

Ing. Pavel B a c h , CSc. - ČVUT Praha

Doc. ing. Jan B e č k a , CSc. - ČVUT Praha

Doc. ing. Zdeněk V o r l í č e k , CSc. - ČVUT Praha

Systém diagnostiky velkých PS zdvihu a výsuvu velkostroje

KU 800

Bez širokého využití poznatků spolehlivosti a technické diagnostiky lze jen obtížně udržet složitá výrobní zařízení v provozuschopném stavu s minimem prostojů v důsledku poruch. Přitom delší výpadky činnosti výrobních strojů na klíčových místech provozního systému mohou značně nepříznivě ovlivnit ekonomické výsledky a je třeba jim zabránit spolehlivostí chodu zařízení. Požadavek nízkého podílu prostojů v důsledku poruch a oprav nelze řešit výhradně absolutním zvyšováním spolehlivosti. Takto pojatá snaha o dokonalost je totiž provázena prudce rostoucími výrobními náklady a cenou stroje. Zvyšování úrovně spolehlivosti lze ekonomičtěji dosáhnout využitím poznatků technické diagnostiky. To u komplexních ukazatelů spolehlivosti, např. součinitele pohotovosti

$$K_p = \frac{\sum t_{pi}}{\sum t_{pi} + \sum t_{oi}} ,$$

kde $\sum t_{pi}$ je součet dob bezporuchového provozu, $\sum t_{oi}$ součet dob oprav stroje, nebo u součinitele technického využití zařízení

$$K_{tv} = \frac{\sum t_{pi}}{\sum t_{pi} + \sum t_{oi} + \sum t_{ui}} ,$$

kde $\sum t_{ui}$ je součet dob provozní údržby, vede ke zvyšování velikosti těchto součinitelů snižováním hodnot součtu dob oprav

$\sum t_{oi}$ ve jmenovateli uvedených výrazů.

Přínosem technické diagnostiky není jen rychlé nalezení a odstranění poruch, ale i možnost předvídání (predikce) de-
gradačních typů poruch, a tím snížení procenta jejich výsky-
tu. Oproti systému preventivních oprav a výměn uzlů v pevných
lhůtách přináší technická diagnostika nemalé ekonomické výho-
dy tím, že umožňuje provádět preventivní výměnu uzlů až po vy-
čerpání jejich individuální životnosti. Krátce shrnuto - vyu-
žívání technické diagnostiky znamená dosažení přínosu především
v oblasti:

- bezpečnosti (prevence havarií),
- spolehlivosti (snížení počtu poruch a prostojů),
- údržby (nahrazení intuitivních údržbářských postupů postupy
racionálnějšími),
- ekonomiky (zvýšením produktivity, snížením objemu údržbářských
prací a spotřeby náhradních dílů).

Je samozřejmé, že nejlepší výsledky můžeme očekávat především
tam, kde požadavky technické diagnostiky byly respektovány a
uplatněny už při projekci a konstrukci daného zařízení.

Charakteristika velkých PS zdvihu a výsuvu velkostroje KU 800

Převodová skříň zdvihu a výsuvu KU 800 je svařovaná pře-
vodovka se 4 soukolími čelních kol. Od vstupu 2: soukolí má
přímé zuby, ostatní soukolí mají dvojnásobně šikmé zuby. Tak
jsou vyrovnány axiální síly na všech hřídelích. Pastorky prv-
ních 3 stupňů jsou vyrobeny z jednoho kusu s hřídelem, pastor-
ky 4. stupně jsou za tepla nataženy na hřídel, nalisovány.
Výstupní hřídel převodovky je dutý se 2 drážkami pro pero a
tvoří vlastně náboj velkého kola 4. stupně. Převodovka je do
velkostroje montována tak, že dutý náboj kola 4. stupně je na-
sazen na plném hřídeli se 2 pery otočenými o 180° , jímž se pře-

naší výstupní krouticí moment převodovky a také tíha převodovky a motorů. Kromě toho je zachycena reakce převodovky dalším závěsným okem na svařeném spodku skříně přes čep na ocelovou konstrukci velkostroje. Elektromotory jsou upevněny na převodovce. Převodovka má jednu dělicí rovinu, v níž leží osy všech 5 hřídelí. Spodek a víko skříně tvoří svařence z plechu tloušťky 20 mm s vevařenými náboji, přírubami, výztuhami a žebry. Ozubení pastorků je cementováno, kaleno a broušeno. Kola 1. a 2. stupně jsou výkovky, kola 3. a 4. stupně jsou bandážována. Všechna kola jsou zušlechťována. Náboj kola 3. stupně je odlit ze slitinové oceli, náboj kola 4. stupně je svařen. Bandáž kola 3. stupně je k náboji připevněna lícovanými šrouby, bandáž kola 4. stupně je k disku náboje připevněna střídavě kuželovými kolíky a závrtnými šrouby.

Hřídele jsou všechny uloženy ve valivých dvouřadých soudečkových naklápěcích ložiskách. Na obou stranách skříně jsou vnitřní kroužky ložisek nalisovány na hřídeli a osově zajištěny proti posunu hřídelovou maticí nebo přitažením opěrného kroužku šrouby. Vnější kroužky ložisek jsou volně vloženy v otvorech ve skříně a u vstupu a výstupu je vnější kroužek ložiska na jedné straně skříně zajištěn proti posunu sevřením mezi víko a kroužek, které jsou oba přitaženy šrouby k náboji skříně. Ostatní ložiska jsou v nábojích skříně axiálně posuvně uložena, a tím je umožněno vyrovnávání tepelných dilatací a určitých výrobních nepřesností. Je tedy dána axiální poloha vstupního a výstupního hřídele. Vzhledem k použití dvojnásobně šikmého ozubení čelních kol u 1., 3. a 4. soukolí je tak dána i osová poloha ostatních hřídelů, u nichž pak musí být umožněn osový pohyb volně posuvnými vnějšími ložiskovými kroužky na obou stranách skříně. Protože 2. soukolí má přímé zuby, určuje vstupní hřídel i polohu 2. hřídele a výstupní hřídel dává zase osovou polohu 3. a 4. hřídele. Ve 2. soukolí s přímými

zuby pak dojde k vyrovnání nepřesností ve vzájemné osové poloze kol.

U ozubení je předepsáno docílení dotyku zubů v pásmu minimálně 60 % výšky zubů a minimálně 80 % délky zubů (po šířce kol). Doléhání boků zubů se kontroluje pomocí kontrolního laku. Použití šikmého ozubení vede ke zvýšení únosnosti ozubení v důsledku zvětšení šířky a součinitele trvání záběru. Pro vyrovnání osových sil je však třeba použít dvojnásobně šikmé zuby, kde je vhodné z výrobních důvodů kola rozdělit na 2 části s poloviční šířkou a opačným sklonem zubů. Tím vzniká požadavek na přesnost výroby a montáže, aby skutečně došlo k větvení toku výkonu na poloviny. Jak už bylo výše popsáno, je zapotřebí umožnit osový posuv hřídelů 2, 3 a 4, aby se vyrovnaly osové síly a výkon se rovnoměrně rozdělil. Osový posuv hřídelů by měl vyrovnat nepřesnost v poloze roviny souměrnosti dvojnásobně šikmého ozubení při vzájemně pootočených zubech levé a pravé strany. Nedokonalé dosednutí zubů po délce stejně jako nerovnoměrné rozložení přenášené síly a výkonu na levou a pravou stranu vede k přetížení některé části zubů. Nerovnoměrnost zatížení, vzniklá nepřesnostmi, se však zmenšuje v důsledku poddajnosti systému. Projeví se především poddajnost disků kol, hřídelů, ložisek a svařené skříně. Některé nepřesnosti, jako třeba čelní házení kol, různoběžnost osy hřídele a ozubení, vedou k periodické změně v rozložení přenášené síly v průběhu 1 otáčky. Tím může dojít k přetížení určité části zubu proměnným zatížením. Toto časově proměnné zatížení může být spojeno ještě s rázy při vstupu nových zubů do záběru a výstupu zubů ze záběru.

Převodovka zdvihu a výsuvu je prakticky stále pod zatížením vlastními tíhami částí velkostroje. Při práci kola se toto jinak klidné zatížení může působením sil na bříty korečků v širokém rozmezí měnit. Zuby v závěru se nemusí pohybovat, ale

už jenom v důsledku změn zatížení, vibrací a chvění celého stroje jsou dynamicky zatěžovány a mohou se v důsledku malých pohybů i opotřebovávat. Proto je velmi obtížné posuzovat dobu běhu zdvihu a výsuvu z hlediska kumulace zatížení, únavy a opotřebení převodového mechanismu. Určité přiblížení k hodnocení historie zatěžování by mohl dát registrační záznam příkonu elektromotorů pohonu zdvihu a výsuvu.

Následkem provozu dochází k postupnému opotřebení ložisek a ozubených kol. Přitom zvětšování vůlí v ložiskách vede nejprve k zhoršování záběrových poměrů ozubení a lze předpokládat, že až změny v ozubení znamenají velkou degradaci zařízení; poruchy ložisek jsou rovněž snáze diagnostikovatelné vzhledem k možnosti snímání vibrací i zvukových a ultrazvukových emisí. Ozubení při postupném opotřebovávání je podrobováno zvýšeným dynamickým účinkům, jako jsou rázy při vstupu a výstupu zubu do záběru, střídání tužšího záběru více zubů s poddajnějším záběrem méně zubů a rázy z pohybu hřídelů v rozmezí vůle v ložiskách při odlehčení či torzním překmitu. Havárie převodovky hrozí v případě únavového lomu v patě zubu nebo při jiných únavových jevech, jako by např. mohlo být postupné narušování svárů spodku a víka skříně nebo uvolnění některého spoje hřídele a náboje v důsledku vibračního opotřebení s navazujícím únavovým lomem. Podobně by postupně mohlo dojít k uvolnění nalisovaného spoje pastorků 4. soukolí, uvolnění bandážování velkých kol nebo zničení per kol 1., 2. nebo 3. soukolí. Všechny tyto změny jsou spojeny s určitou změnou tuhosti některé části a vznikem pohybů při rázech. Únavový lom zubu v patě má rovněž určitou dobu rozvoje z iniciační trhlinky, po kterou vykazuje změnu v tuhosti kontaktu. Nejvýraznější projevy nerovnoměrného rozložení síly v kontaktu zubů mohou představovat osové posuvy hřídelů a čelní házení věnců velkých ozubených kol. Na změny

zatížení a jeho rozložení reaguje deformacemi rovněž poměrně poddajná svařovaná skříň.

Místa snímání diagnostických signálů, měřené veličiny a měřicí zařízení

Z literatury jsou známy tři systémy diagnostických aparatur využívajících analýzu naměřených vibrací. Je to:

- 1) Periodické snímání vibrací se současnou frekvenční analýzou na místě. Spektra se porovnávají co do amplitud nejvýraznějších složek pouze vizuálně a odhaduje se trend těchto špiček. Užívá se při orientačním měření nepříliš velkého počtu míst. Lze tak s úspěchem rozpoznat nevyvážené rotující části strojů. Obtížněji se identifikují zubové frekvence.
- 2) Periodické snímání úrovně vibrací a nahrávání na vhodný registrační přístroj. Nahrávka se analyzuje v laboratoři pomocí FFT analyzátoru nebo stolního počítače, umožňujícího provádět trendovou, případně i cepstrální analýzu. Výsledky umožňují identifikaci vad ozubených kol a ložisek. Perioda nahrávek se volí v rozmezí 1 až 4 měsíců. Předpokládá se širokopásmová i úzkopásmová analýza.
- 3) Permanentní sledování úrovně vibrací a okamžitá analýza pomocí počítače. Tento systém je zdůvodnitelný pouze u kritických míst technologického komplexu, neboť je velmi nákladný. Často se kombinuje se systémem 2), který pak sleduje méně náročná místa. Permanentní monitoring se užívá tam, kde hrozí náhlá porucha vedoucí k rozsáhlým škodám.

Předpokládáme, že v případě převodovek zdvihu a výsuvu velko- stroje KU 800, s ohledem na možnosti podniku SHD, by byla nejvýhodnější kombinace systémů 1) a 2) s tím, že by se první systém využil v počáteční fázi testování převodovek k získání informací o jejich současném stavu. Perioda měření by byla nejprve 14 dní a později 1 až 2 měsíce.

Z výše uvedeného rozboru poruch převodovky plynou tato měřicí místa: vnější kroužky valivých ložisek v radiálním a případně axiálním směru, axiální posuvy hřídelů relativně vůči skříni, axiální házení kol, vibrace skříně v přístupných místech. Stav převodovky jako celku indikují především absolutní kmity ložisek, měřené na vnějším kroužku v pásmu cca 10 až 1000 Hz, ve dvou na sebe kolmých směrech radiálně a také axiálně. Registruje se obvykle rychlost kmitání. Podle ISO 2372 by velké stroje měly vykazovat efektivní hodnoty rychlosti v rozmezí 0,28 až 1,8 mm/s, jsou-li v dobrém stavu. Kromě toho je možné měřit i relativní kmity hřídelů převodovky a to zejména u pomaluběžných hřídelí, kde jsou otáčky menší než 60 ot/min.

Rozhodneme-li se pro sledování ložisek jako samostatných důležitých částí stroje, je třeba si uvědomit, že stav ložisek indikují signály o vysokých frekvencích řádu nejméně jednotek kHz. Nelze je tedy měřit podle ISO 2372, ale užívá se zvláštních kritérií. Často se hodnotí množství energie, obsažené v rezonančních kmitech piezoelektrického snímače, buzeného měřeným ložiskem. Jde totiž o vady, které se projeví vlastním kmitáním kroužků valivého ložiska. Vzhledem k vysokým tuhostem valivých tělísek jsou vlastní frekvence řádu desítek kHz a jsou srovnatelné s vlastními frekvencemi snímačů, které toto buzení uvádí do rezonance. Zvýšené citlivosti snímače v rezonanční oblasti se využívá k měření. Taková měření umožňují přístroje řady výrobců, např. firem Brüel & Kjaer nebo Schenck. U převodovky zdvihu a výsuvu KU 800 by v tomto případě mohly činit obtíže její velmi nízké otáčky na výstupu. Proto navrhuje nejprve orientační měření ložisek resp. jejich spekter. Domníváme se, že podle stavu ložisek by bylo možné předpovědět i stav převodovky. Tato předpověď by se zakládala na analýze vysokofrekvenčních signálů. Případné již vzniklé vady se projevují signály nízkofrekvenčními.

Zdrojů kmitání může být v převodovkách několik, např.:

- nevyváženost projevuje se signály o frekvencích $n/60$, kde n jsou otáčky rotoru (kola, hřídele) v 1/min.
- nesouosost generuje signály o frekvencích $n/60$, $2.n/60$, $4.n/60$.
- závady v ozubení ... vyvolávají signály o frekvencích $z.n/60$, případně $z.n/60 \pm n/60$, což jsou tzv. "postranní frekvence".
- závady ložisek ... vyvolají signály o vysokých frekvencích řádu kHz.
- elektrické rušení ... projeví se signály s frekvencemi $n/60$, f a $2.f$, kde f je synchronní frekvence. Tyto jevy nelze odstranit.

Případné poruchy drah ložisek se projeví vzrůstem nízko-frekvenčních složek signálu ($f \leq 1$ kHz), avšak deformace, resp. opotřebení valivých tělísek vyvolá vysokofrekvenční signály. Závadami v ozubení rozumíme nejen porušení zubů, ale i nesouosost, nerovnost roztečí, vady tvaru aj. Někdy se objevují i subharmonické složky signálů ve Fourierově spektru. Bývají způsobeny uvolněnými ložisky ($0,5.n$, $0,3.n$, $1/12.n$). Druhé a třetí harmonické ve spektru indikují opotřebení zubů.

Na tomto místě je třeba upozornit i na to, že spektra převodovek mohou být závislá na jejich zatížení. Proto doporučujeme provádět měření při zatížení pouze tíhou výložníku, bez zatížení od provozu technologického zařízení.

Jako základní přístroj, který je schopen spolehlivě a přitom jednoduše diagnostikovat daný stroj, navrhuje přístroj firmy Schenck Vibroport 30 s příslušenstvím. Umožňuje měření absolutních i relativních kmitů a současně dovoluje provést

frekvenční a Fourierovu analýzu. Pro většinu předpokládaných signálů má dostatečný frekvenční rozsah a citlivost. Dokumentace měření je snadná na vestavěné tiskárně. Přístroj je přenosný, indikační jednotka váží asi 10 kg, příslušenství dalších 8 kg.

V počáteční fázi měření doporučujeme doplnit vibrační testy o sledování příkonu elektromotorů registračním wattmetrem, sledování vibrací skříně a motorů ve vybraných (přístupných) místech, sledování teploty elektromotorů. Později bude pravděpodobně možné na základě zkušeností redukovat počet míst měření a také počet sledovaných veličin. Ideální by bylo sledovat pouze stav ložisek v pásmu 0,01 kHz až 10 kHz, sledovat relativní kmity hřídelů a doplnit tyto testy tribotechnickým vyšetřením.

Metodika provádění diagnostických testů a jejich vyhodnocování

Stanovení technického stavu převodovky zdvihu a výsuvu KU 800 je uskutečnitelné zejména kombinovaným využitím několika nezávislých diagnostických testů (měření). Jako možné se jeví sledování:

- emise vibrací valivých ložisek,
- emise vibrací související s činností ozubeného převodu; místa měření na skříní budou stanovena experimentálně,
- axiálních posuvů hřídelí převodovky, axiálního "házení" věnců velkých ozubených kol na výstupu převodovky,
- doby činnosti a zatížení převodovky (elektromotorů),
- tribotechnických veličin, souvisejících jednak se sledováním stavu olejové náplně, jednak se sledováním množství kovového otěru a jeho trendu.

Pro získávání porovnatelných výsledků je třeba dodržovat předem stanovené podmínky měření. Ty lze krátce shrnout takto: stroj při diagnostickém testu běží naprázdno, nepracuje. Převodovka je zatížena jen hmotnostmi, případně odpovídajícími setrvačnými silami. Měří se chod vpřed i vzad ve stanoveném rozmezí od stanoveného bodu (např. 3/4 vysunutí výložníku). Diagnostické měření se provádí pravidelně jako součást plánované údržby v pevně stanovených intervalech (po 1 až 2 měsících, po 300 hod. provozu).

K náplni diagnostických testů (měření) náleží sledování technického stavu valivých ložisek, ozubených převodů, spojů a skříně. Sledování valivých ložisek se provádí pomocí snímačů umísťovaných při testech na šroubech, upevněných v nábojích ložisek hřídelí. Použitelné jsou přístroje Vibroport, TMED, IRC. Způsob vyhodnocení předepisuje výrobce přístroje. Pro sledování stavu ozubených převodů jsou snímače upevňovány na závrtné šrouby v místech převodovky, která budou stanovena experimentálně na základě měření tvaru kmitání skříně. Vhodné jsou přístroje Schenck či Brüel & Kjaer, viz předchozí kapitola.

Vlastní diagnostiku lze provádět na základě použití některé z následujících metod:

- a) Sledováním komplexní amplitudy rychlosti kmitání a porovnáním naměřené hodnoty s výchozím bezvadným stavem. Na základě řady naměřených hodnot lze predikovat, kdy dojde k dosažení mezní hodnoty (např. dvojnásobku výchozího stavu), a tím ke ztrátě provozuschopnosti.
- b) Sledováním spekter (zrychlení rychlosti) vibrací, jejich porovnáváním s výchozím stavem a sledováním změn amplitud na jednotlivých výrazných vlastních frekvencích. Případně je možné vycházet i ze změn samotných vlastních frekvencí. Sleduje se opět trend např. růstu amplitud k mezní hodnotě.

Odpovídající vlastní frekvence lokalizuje degradační poruchu.

- c) Snímáním vibrací a stanovením tzv. cepstrální charakteristiky z naměřených spekter vibrací dvojnásobnou Fourierovou transformací (FFT) pomocí mikropočítače nebo přímo použitím vhodného typu analyzátoru. Tato metoda je sice aparaturně složitější a finančně náročnější, avšak u složitějších soustav s komplikovanými průběhy spekter bývá často poslední reálnou možností vibrační diagnostiky.

Metodika diagnostikování stavu ozubených převodů bude upřesňována tak, aby byla stanovena:

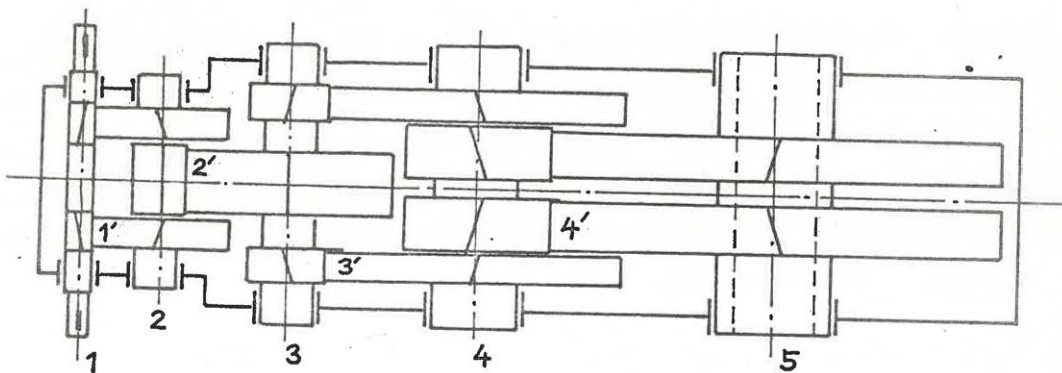
- 1) provozní orientační metoda, viz a) resp. b),
- 2) jemnější metoda k upřesnění technického stavu, viz b) nebo c), používaná jen v případech, kdy provozní metoda avizuje zhoršení technického stavu ozubených převodů.

Sledování kombinace doby činnosti a velikosti zatížení převodovky pomocí měření registračním wattmetrem bude dávat podklad pro odhad míry vyčerpání výpočtové životnosti převodovky. Sledování axiálních posuvů hřídelů ve skříni a podobně i axiální házení věnců ozubených kol (zvláště velikých u 3. a 4. soukolí) může dávat signál pro diagnostiku ozubení a spojů. Měření lze uskutečnit pomocí induktivních snímačů polohy (RFT, Philips). Změna axiální polohy hřídele představuje příznak poruchy ozubení v jedné z větví větvení toku výkonu.

K sledování stavu olejové náplně převodovky slouží tribotechnické metody. Smyslem nasazení těchto metod je jednak využít zcela životnosti olejové náplně na základě zkoušek viskozity, čísla kyselosti oleje, obsahu vody resp. celkového obsahu nečistot atd. Měření je třeba provádět v pravidelných intervalech, např. po 300 hod. provozu. Na základě naměřených hodnot lze sledovat trend stárnutí a prognózovat nutný okamžik vý-

měny olejové náplně. Vibrační diagnostiku doplňují poznatky ze sledování kovového otěru v oleji ferrografií. Na základě využití ferrogramu můžeme provádět jednak morfologickou analýzu otěrových částic, jednak stanovovat index intenzity opotřebení jako míru změny technického stavu ozubených převodů.

Stanovení mezních hodnot diagnostických veličin převodovky zdvihu a výsuvu velkostroje KU 800 musí být nutně procesem, kombinujícím využití teoretických poznatků, výsledků plánovaných měření a dosavadních praktických provozních zkušeností. Dobrou výchozí základnu by poskytlo podrobné proměření zmíněných diagnostických veličin na převodovce nové, prokazatelně bezvadné, a na převodovkách vyřazovaných z provozu.



Obr. 1: Schéma převodovky zdvihu a výsuvu KU 800

Tab. 1: Budící frekvence v převodovce zdvihu a výsuvu KU 800

Hřídel	otáčky n [1/min]	frekvence $f = \frac{n}{60}$ [Hz]	ložiska $f_l = f \cdot z$ [Hz]	soukolí	frekvence $f_z = f \cdot z'$ [Hz]	frekvence $f'_z = 2 \cdot f_z$ [Hz]
1	1 400	23,3	886,5	1' 2' 3' 4'	420	840
2	252	4,2	126,0		92,4	184,8
3	49,5	0,8	29,7		23,1	46,2
4	12,4	0,2	9,1		8,25	16,5
5	3,5	0,06	5,0			

S h r n u t í

Článek "Systém diagnostiky velkých PS zdvihu a výsuvu velkостroje KU 800" v úvodní části charakterizuje diagnostikované převodové skříně. Zabývá se místy pro snímání diagnostických signálů, měřenými veličinami včetně měřících zařízení. V závěru článku je uvedena metodika provádění diagnostických testů a jejich vyhodnocování.