

Diagnostika rotorů s kluznými ložisky

S rostoucí rychloběžností strojů se zvyšují nároky na provozní monitorování jejich stavu. Pro vibrodiagnostiku rotorů s kluznými ložisky jsou ve velké většině případů nutné tzv. relativní snímače, tj. snímače které měří pohyby rotoru vzhledem k ložiskům. Na rozdíl od valivých ložisek, která nemají prakticky žádný útlum, olejový film kluzných ložisek vibrace rotoru výrazně tlumí. Přenos vibrací na ložiskové štíty nebo skříň stroje je tak velmi omezen a měřením vibrací absolutními snímači na skříni nelze často nic důležitého zjistit. Jsou známy případy, kdy v důsledku nepřijatelných výchylek čepu v ložisku docházelo k únavovému poškození a postupnému vypadávání kompozice z ložisek, aniž by absolutní snímače vibrací zaznamenaly výrazně zvýšenou hladinu vibrací. Proto je optimální sledovat výchylky rotoru pomocí relativních snímačů v blízkosti obou ložisek. Velké rotační stroje a soustrojí (parní, spalovací a vodní turbíny s generátorem, kompresory s motorem a převodovkou) již prakticky nejsou provozovány bez trvalého monitoringu relativních výchylek rotoru. U menších strojů (plnicí turbodmychadla, ventilátory, rychloběžná dmychadla) by měly být relativní výchylky rotoru sledovány alespoň při zkušebním provozu. U turbodmychadel, která ve většině případů používají rotující plovoucí pouzdra, se může vyskytnout nestabilita vnějšího olejového filmu. Přestože amplitudy kmitání rotoru dosahují prakticky celé ložiskové vůle, měření absolutním snímačem na skříni velké amplitudy kmitání neindikuje. V důsledku opotřebení pouzder může za provozu dojít k takovým změnám vůle, které nestabilitu vyvolají, i když zařízení s novými ložisky pracovalo ve stabilní oblasti. Vzhledem k tomu, že nestabilita je vždy indikována výraznou nesynchronní složkou, bylo by účelné sledovat relativní výchylky rotoru s rotujícími pouzdry alespoň jedním snímačem.

U rychloběžných rotorů s valivým uložením se s ohledem za účelem hladkého přejíždění ohybových kritických otáček často používá uložení vnějších kroužků do poddajných elementů, které se vyznačují určitým materiálovým tlumením. Pak je situace obdobná jako u kluzných ložisek a pro monitorování vibrací rotoru je třeba použít rovněž relativní snímače chvění.

Druhy relativních snímačů

Z hlediska principu lze relativní snímače rozdělit do těchto skupin:

- 1) induktivní
- 2) kapacitní
- 3) optické (laserové)
- 4) na principu vířivých proudů

Induktivní snímače:

Induktivní snímače, které byly dodávány hlavně firmou Hottinger, se pro měření relativních výchylek již prakticky nepoužívají, neboť jsou velmi citlivé na změny teploty a nehomogenity měřeného objektu. Hodí se však velmi dobře např. pro měření otáček nebo fáze, např. při vyvažování. Induktivní snímače Hottinger v diferenciálním zapojení byly používány pro měření relativních výchylek zkušebního ložiska vzhledem k hřídeli a výchylek zkušebního ložiska vzhledem k rámu zařízení na zkušebním standu pro identifikaci dynamických vlastností kluzných ložisek v SVÚSS Běchovice [1]. Protože aparatura Hottinger byla používána rovněž k měření harmonické budicí síly, mělo využití stejné aparatury pro měření budicí síly i odezvy výhodu v eliminaci fázových posuvů, které by s velkou pravděpodobností existovaly mezi měřicími kanály různého provedení. Použití snímačů Hottinger pro měření dynamických jevů bylo vcelku úspěšné a umožnilo ověřit přesnost výpočtu tuhostí a útlumů radiálních ložisek. Měření statických posuvů, které mělo určit polohu čepu v ložisku v závislosti na zatížení, však bylo s ohledem na teplotní drift naprosto neúspěšné.

Kapacitní snímače:

Hlavní výhodou kapacitních snímačů je možnost jejich použití ve velmi náročných podmínkách (vysoké teploty a tlaky) a jejich necitlivost na materiálové vlastnosti měřeného objektu, což je důležité zejména u rotorů. V současné době nejsou snímače příliš používány pro běžná měření, neboť u jednoduchých snímačů tvořených elektrodou odisolovanou od kostry stroje dochází při změnách teploty v okolí snímače ke značným driftům (posuvům nuly). Pro měření dynamických jevů s menšími nároky na přesnost jsou však tyto kapacitní snímače vhodné.

Při měření malých výchylek mohou mít kapacitní snímače velmi malé rozměry, proto jsou využívány zejména u malých strojů. V 70. a 80. letech byly kapacitní snímače úspěšně použity pro měření relativních výchylek rotorů heliových expanzních turbin při otáčkách až 370.000 min^{-1} [2]. Snímače tvořené elektrodou průměru 2 mm byly umístěny na obou koncích rotoru v blízkosti aerodynamických radiálních ložisek. Snímače byly připojeny na aparaturu DISA 51E05, která zajišťovala linearizaci a zesílení signálu. Výstup z aparatury DISA byl přiveden na dvoukanálový osciloskop, umožňující zobrazení časového průběhu signálu a přibližné odečtení amplitudy vibrací. Citlivost snímačů byla zjištěna ve stavu bez rotace kalibrací s pomocí tisícínového indikátoru. Využití kapacitních snímačů umožnilo provozovat expanzní turbíny při daleko vyšších otáčkách než v minulosti bez nebezpečí poškození ložisek v důsledku nadměrných vibrací. Naměřené výsledky byly také východiskem pro vypracování metodiky korekce 1. ohybového tvaru rotoru [2], při níž se rovněž využívá měření relativních výchylek rotoru na jeho koncích. Kapacitní snímač byl použit rovněž pro měření otáček zubní vrtačky s otáčkami v rozmezí 200.000 až 750.000 min^{-1} . Snímač o průměru cca 1 mm byl umístěn proti dřívku vrtáčku o průměru 2,5 mm a výsledný vibrační signál byl přiveden na osciloskop a čítač impulzů.

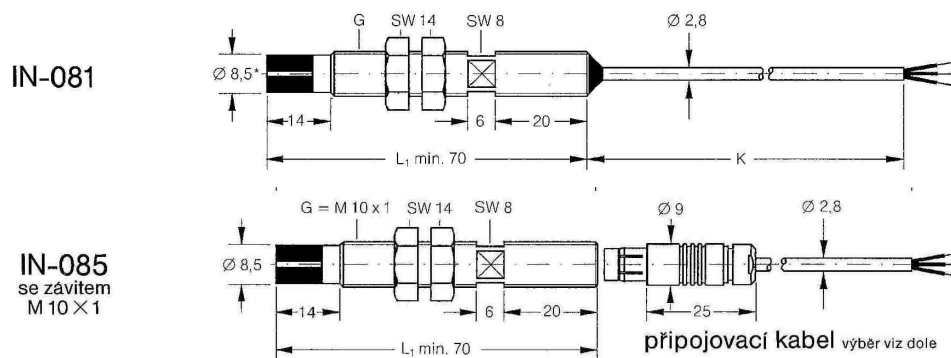
V současné době dodává snímače pracující na kapacitním principu firma Micro-epsilon. Autor nemá s těmito snímači osobní zkušenost, ale lze předpokládat, že informace o teplotním driftu pro tuto generaci snímačů již neplatí. Mnohem lepší vlastnosti snímačů jsou však vykoupeny poněkud většími rozměry (nejmenší snímač má průměr 6 mm) a také vyšší cenou.

Optické snímače:

U optických snímačů je většinou používán princip laseru s odrazem paprsku od měřeného objektu. Výhodou těchto snímačů je vysoká rozlišovací schopnost při poměrně značném měřicím rozsahu. Nevýhodou jsou relativně velké rozměry, závislost na kvalitě povrchu měřeného objektu a relativně vysoká cena. Snímače nelze použít tam, kde měřený objekt není viditelný nebo tam, kde hrozí nebezpečí znečištění optočlenu. V blízkosti hydrodynamických ložisek, kde se vyskytuje olejová mlha, nelze znečištění snímače vyloučit. Vhodným objektem pro využití optických snímačů jsou proto rotory uložené v aerodynamických ložiskách, kde nebezpečí znečištění nehrozí, pokud je alespoň část rotoru potřebná pro měření přístupná. U malých strojů může být problém relativně velký snímač uchytit.

Snímače pracující na principu vířivých proudů:

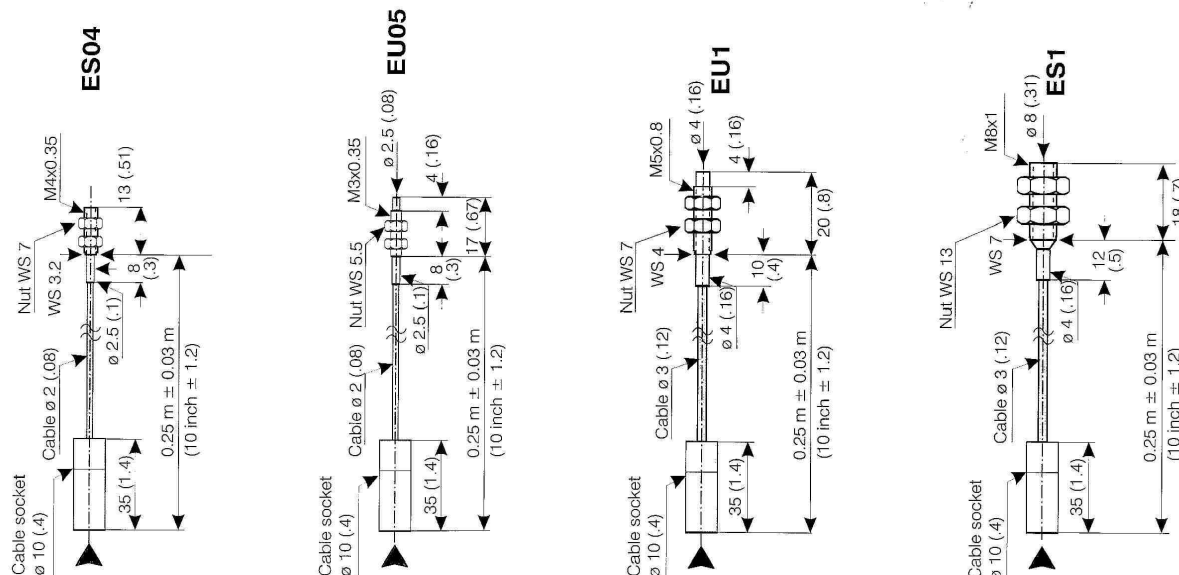
Tento typ relativních snímačů je s ohledem na své vesměs příznivé vlastnosti nerozšířenější. Výhodou je přijatelná cena, dostatečný měřicí rozsah a odolnost proti rušení. Vynikající odolnost proti elektrickému rušení mají zejména snímače s oscilátorem integrovaným do snímače, např. typy IN-081 a IN-085 (obr. 1) firmy Brüel Kjaer Vibro. Tyto snímače mají při průměru aktivní části 8,5 mm měřicí rozsah 1,5 mm. Pro jejich použití stačí zdroj napájení stejnosměrným proudem 18 až 30 V, protože při standardní citlivosti $8 \text{ mV}/\mu\text{m}$ je lze připojit přímo na vstup měřicí karty. Snímače mají závit M10x1, délka snímače a připojovacího kabelu je volitelná.



Obr. 1 Snímáče IN-081 a IN-085 Brüel Kjør Vibro

Při měření vibrací rotoru vysokofrekvenčního elektromotoru [4], kdy byly snímáče IN-081 umístěny v těsné blízkosti vinutí, byly signály ze snímáčů prakticky nerušené. Tato vlastnost vynikla zejména při srovnání se snímáči, které měly standardní oscilátory umístěné vně snímáče.

Pro menší rotační stroje jsou vhodné snímáče firmy Micro-epsilon, jejichž rozměry (obr. 2) umožňují instalaci i do velmi malých prostorů (obr. 3).



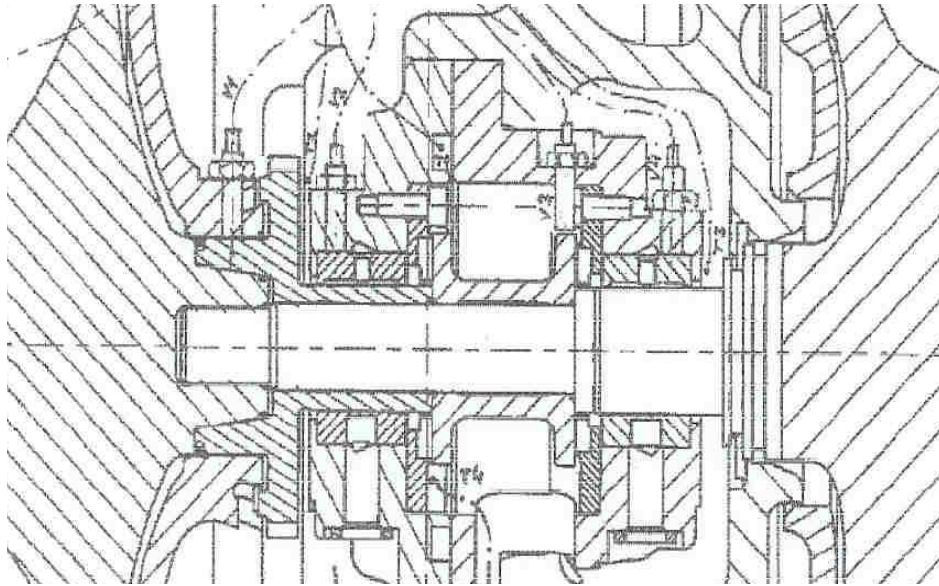
Obr. 2 Rozměry snímáčů Micro-epsilon na principu vířivých proudů

Nejmenší snímáč Micro-epsilon EU05 má aktivní průměr 2,5 mm, závit M3x0,35 a délku 17 mm. Měřicí rozsah snímáče je 0,5 mm a standardní citlivost 20mV/μm.

Příklad instalace 4 snímáčů ES04 pro měření vibrací rotoru a plovoucích pouzder u obou radiálních ložisek turbodmychadla střední velikosti je zachycen v obr. 3 [5]. Přestože snímáče byly umístěny ve velmi stísněném prostoru, kde nebylo možné dodržet všechna doporučení výrobce týkající se volného prostoru kolem snímáče, a byly vystaveny velmi náročným podmínkám (vysoká teplota, přítomnost oleje a olejové mlhy), byly výsledky měření dobře reprodukovatelné a přinesly množství informací o chování rotoru a plovoucích pouzder při otáčkách až 70.000 min⁻¹.

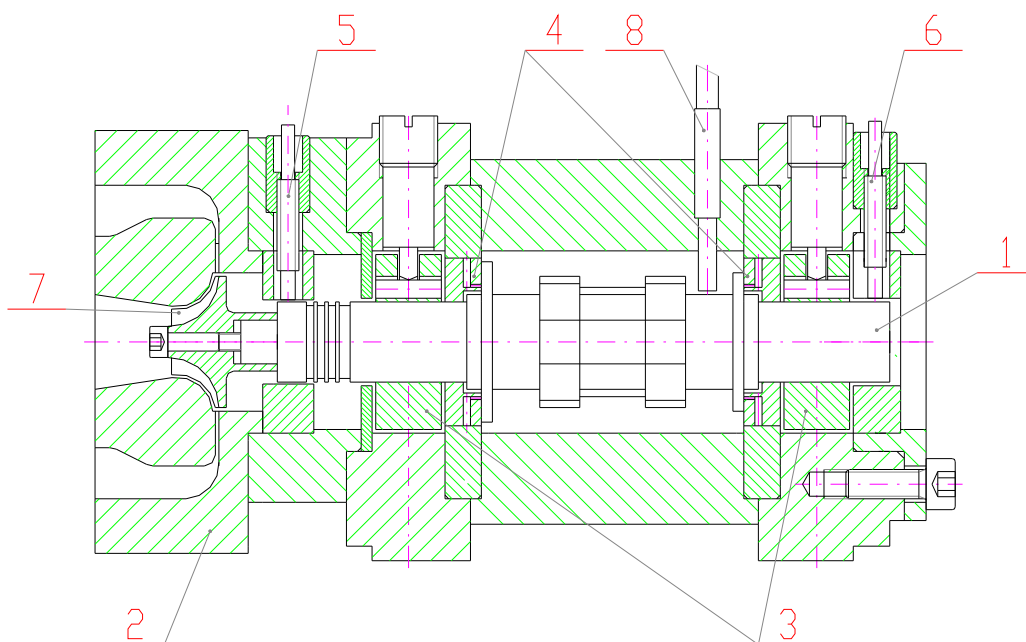
Na turbodmychadlech používaných v motorech osobních automobilů, které mají ještě podstatně menší rozměry (průměr hřídele 6 mm, vzdálenost ložisek 20 mm), se podařilo instalovat dva snímáče ES04 v prostoru mezi ložisky. V případě uložení na rotujících pouzdrech byly snímány vibrace rotoru ve dvou směrech, pokud bylo použito zastavené pouzdro společné pro obě ložiska, byly sledovány výchylky rotoru a pouzdra. S tímto

uspořádáním snímačů bylo možno sledovat relativní výchylky až do otáček přesahujících 220.000 min^{-1} .



Obr. 3 Příklad instalace snímačů Micro-epsilon ES04 v turbodmychadle střední velikosti

Při dosud nejvyšších otáčkách bylo měření relativních výchylek rotoru uskutečněno na heliových expanzních turbinách, s otáčkami přesahujícími 350.000 min^{-1} . Signál ze snímačů 5 a 6, umístěných na koncích rotoru ve vyvažovací přípravku (obr. 4), slouží zároveň jako podklad pro korekci 1. ohybového tvaru rotoru.



Obr. 4 Přípravek na provozní dovyvažování rotorů heliových expanzních turbin

Pozn.:

Při vysokých požadavcích na přesnost měření může být určitým problémem citlivost snímačů na nehomogenity materiálu měřeného objektu. V případě, že výchylky rotujícího objektu jsou velmi malé, mohou být dokonce zcela překryty poruchovým signálem vyvolaným průchodem materiálu s různými elektrickými vlastnostmi po obvodu měřené plochy pod snímačem [6]. Proto je u vibrodiagnostických systémů nutno provádět korekci tzv. run-out, tj. odečíst od vlastního vibračního signálu signál naměřený při pomalém protáčení rotoru.

Závěr

Pro diagnostiku rychloběžných strojů s kluznými ložisky je nutno používat relativní snímače, které sledují výchylky rotoru vzhledem k ložiskům. Totéž platí o rotorech s valivými ložisky, jejichž vnější kroužky jsou uloženy v pružných tlumicích elementech. V obou případech je přenos vibrací na skříň stroje velmi omezený a absolutními snímači uchycenými na skříň nebo ložiskový štít nelze většinou zachytit vznik vibrací nebezpečných pro provoz rotoru. Tím není řečeno, že provoz strojů s kluznými ložisky nelze monitorovat s použitím absolutních akcelerometrických snímačů. Údaje z těchto snímačů však slouží spíše jako doplňková informace, případně pouze jako prostředek pro odstavení stroje při podstatně zvýšené hladině vibrací.

Ideálním řešením pro monitorování vibrací rotoru jsou dva relativní snímače umístěné po 90° u každého ložiska, neboť tak lze zobrazit nejen časový průběh vibrací, ale i trajektorii pohybu rotoru. V nejméně příznivém případě lze kvůli nedostatku prostoru nebo redukci ceny použít pouze jeden relativní snímač na rotoru. Snímač umístěný u jednoho z ložisek by měl zachytit výrazné zvýšení vibrací, i když k němu dochází na opačné straně rotoru.

Nejvhodnějším typem relativního snímače pro vibrodiagnostiku rotorů je zřejmě snímač pracující na principu vířivých proudů, jehož varianta s oscilátorem umístěným uvnitř tělesa snímače se vyznačuje výbornou odolností proti vnějšímu rušení. Pro přesná laboratorní měření je vhodná nová generace kapacitních snímačů, protože jejich funkce není ovlivňována materiálovými vlastnostmi měřeného objektu.

Reference:

- [1] Šimek, J.: Experimentální výzkum radiálních ložisek Ø 90 mm. Ověření metod měření a vyhodnocení
Výzkumná zpráva č. SVÚSS 83-03018
- [2] Šimek, J. - Svoboda, R.: Návrh aerodynamického uložení a dynamická analýza rotoru heliové expanzní turbíny L5
Výzkumná zpráva č. SVÚSS 93-03007
- [3] Šimek, J. - Korec, L.: Vývoj technologie vyvažování rotorů expanzních turbin
Technická zpráva TECHLAB č. 97-2401
- [4] Šimek, J.: Výsledky testů aerodynamického uložení turbodmychadla ATUR
Technická zpráva TECHLAB č. 05-404
- [5] Šimek, J.: Měření relativních vibrací rotoru turbodmychadla PTR155
Technická zpráva TECHLAB č. 03-402
- [6] Šimek, J.-Tůma, J.: Unorthodox behaviour of a rigid rotor supported in sliding bearings.
Colloquium Dynamic of Machines, Praha, 2010.