

Vyvažování prvního ohybového tvaru rotorů s extrémní rychloběžností.

Vyvažování rychloběžných rotorů ve většině případů probíhá na vyvažovacích strojích (např. Schenck), kde je rotor uložen na rolnách, v prismatických nebo v kluzných ložiskách. Výchylky v místech ložisek jsou sledovány citlivými snímači rychlosti, zároveň je opticky snímána otáčková značka, ke které je vztahována fáze nevyvážku. Nevyvážky jsou kompenzovány ve dvou rovinách buď odebráním materiálu, nebo naopak přidáním známé hmotnosti. U pružných rotorů, které přejíždějí ohybové kritické otáčky, se provádí tzv. modální vyvažování, kdy se koriguje příslušný ohybový tvar kmitání.

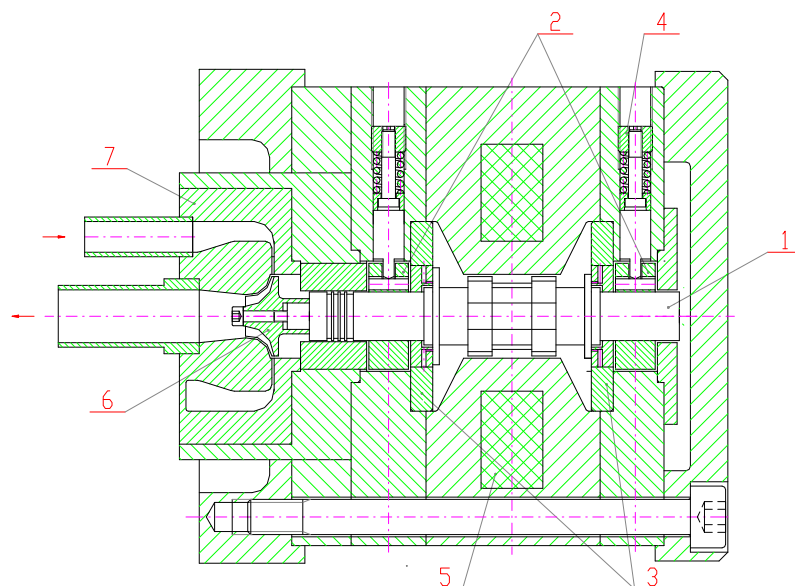
V některých případech je nutné provádět korekci ohybového tvaru u již zkompletovaného stroje, při podstatně vyšších otáčkách, než při nichž probíhá vyvažování na vyvažovacím stroji. Může se jednat např. o dva dále uvedené případy:

- 1) V provozních otáčkách se již začíná objevovat značný nárůst amplitudy kmitání, způsobený přibližujícími se 1. ohybovými kritickými otáčkami ($1.o.k.o. \sim n_{kr}$). U rotorů v aerodynamických ložiskách dochází k pozvolnému nárůstu amplitudy kmitání již od cca 60% hodnoty n_{kr} . Pokud jsou provozní otáčky nižší než $0,6 \cdot n_{kr}$, není obvykle dovyvažování rotoru nutné a maximální amplitudy kmitání nepřekračují povolené hodnoty. V opačném případě by stroj neměl být zadán do výroby, pokud neexistuje možnost provozního dovyvážení.
- 2) Při montáži stroje vznikají nepřesnosti, resp. deformace, které zhoršují přesnost vyvážení dosaženou u jednotlivých dílů

Nyní uvedeme příklady konkrétních řešení případů sub 1) a 2).

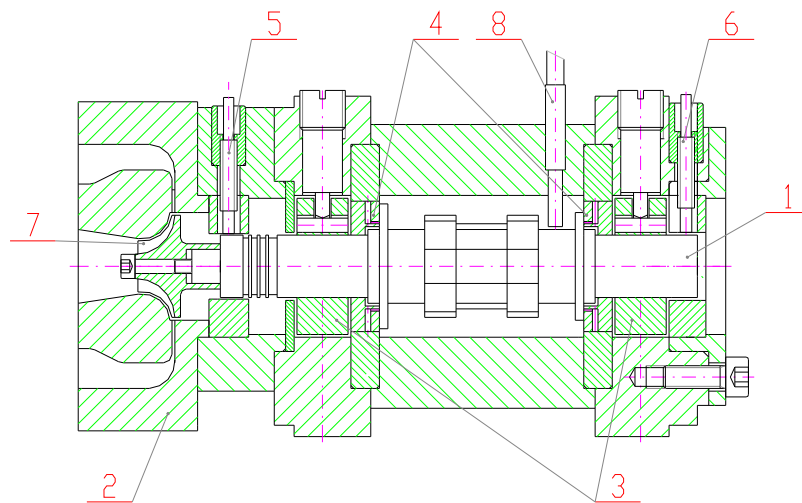
1. Provozní dovyvažování rotorů heliových expanzních turbin

Expanzní turbíny na zkapaňování helia (obr. 1) mají otáčky v rozmezí 220.000 až 350.000 min^{-1} . S ohledem na extrémně vysoké kluzné rychlosti je nutno ukládat rotory do aerodynamických ložisek mazaných procesním médiem. Rotor 1 je uložen ve dvou radiálních aerodynamických ložiskách s naklápěcími segmenty 2, axiální síly jsou zachyceny axiálními aerodynamickými ložisky se spirálními drážkami 3, která jsou pro usnadnění rozběhu opatřena tryskami pro přívod stlačeného vzduchu. Oběžné kolo expanzní turbíny 6 je uloženo na převislém konci rotoru, otáčky jsou regulovány brzdou 5, pracující na principu vířivých proudů.



Obr. 1 Heliová expanzní turbína

První ohybové kritické otáčky těchto rotorů leží v oblasti 400.000 až 480.000 min^{-1} , tj. poměrně vysoko nad provozními otáčkami. Rotory jsou velmi přesně dynamicky vyváženy při otáčkách cca 10.000 min^{-1} na vyvažovacím stroji Schenck. Přesto se u většiny testovaných rotorů začínají zvětšovat relativní výchylky rotoru již od otáček převyšujících cca 60% maximálních provozních otáček. Při provozních otáčkách dosahují amplitudy relativních kmitů rotorů s nepříznivým rozložením nevyváženosti až hodnot přesahujících 50% ložiskové vůle, což je pro dlouhodobý provoz nepřijatelné. Proto byla vyvinuta metoda, která umožňuje korigovat 1. ohybový tvar rotoru [1]. Pro uskutečnění tohoto záměru je nutno rotor roztočit alespoň na 75% provozních otáček a změřit jeho výchylky nejméně ve dvou rovinách po jeho délce. K tomuto účelu byl zkonstruován speciální přípravek zachycený na obr. 2. Přípravek umožňuje roztáčení rotoru stlačeným vzduchem na potřebné otáčky a měření relativních výchylek ve dvou rovinách současně s fázovou značkou.



Obr. 2 Přípravek pro provozní dovyvažování rotorů expanzních turbin

Rotor 1 je uložen ve dvou radiálních aerodynamických ložiskách s naklápěcími segmenty 3, která jsou prakticky shodná s ložisky expanzní turbíny (viz obr. 1). Axiální poloha rotoru je zajištěna dvěma aerodynamickými ložisky 4, která jsou rovněž stejná jako u expanzní turbíny. Výchylky rotoru jsou sledovány miniaturními relativními snímači 5, 6 umístěnými co nejbližší koncům rotoru. Fáze nevyvážky je určována z posunutí vektoru výchylky vzhledem k fázové značce, které snímána optickým senzorem 8.

Relativní snímače Micro-epsilon U05 pracují na principu vířivých proudů a při průměru činné plochy 2 mm mají měřicí rozsah 0,5 mm. Citlivost snímačů se pohybuje kolem 20 mV/ μm , takže jejich rozlišovací schopnost je lepší než 0,1 μm . Fázová značka, vytvořená zmatováním jedné poloviny lesklého obvodu rotoru, je snímána optickým čidlem o průměru 2,5mm. Přenos infračerveného signálu z fotodiody i jeho odraz na fototranzistor optického snímače TECHLAB se uskutečňuje pomocí optických vláken. Signály ze snímačů vibrací a fáze jsou přivedeny na vstup vyvažovací aparatury TECHLAB, která pomocí metody ortogonální filtrace vytvoří vektor výchylky s frekvencí otáček a určí jeho složky vzhledem k fázové značce. Vyvažovací aparatura je jednokanálová, takže je nutno vyhodnotit nevyvážky v obou rovinách postupně.

S ohledem na tzv. „run-out“ se nejprve vyhodnotí výchylky při „nízkých“ referenčních otáčkách – cca 60.000 min^{-1} . Vyhodnocení složek vektoru nevyváženosti proběhne při nejvyšších dosažitelných otáčkách – obvykle 280.000 až 350.000 min^{-1} . Ukazuje se totiž, že čím jsou otáčky vyšší, tím více se projevuje deformace rotoru podle 1. ohybového tvaru, takže výchylky rotoru mají nejen velkou amplitudu, ale na obou koncích rotoru jsou prakticky ve fázi. Při vyhodnocování výchylek je nutno vzít v úvahu ohybovou tuhost rotoru, protože dovyvážením se koriguje průhyb rotoru. Příslušná nevyváženost se stanoví na základě

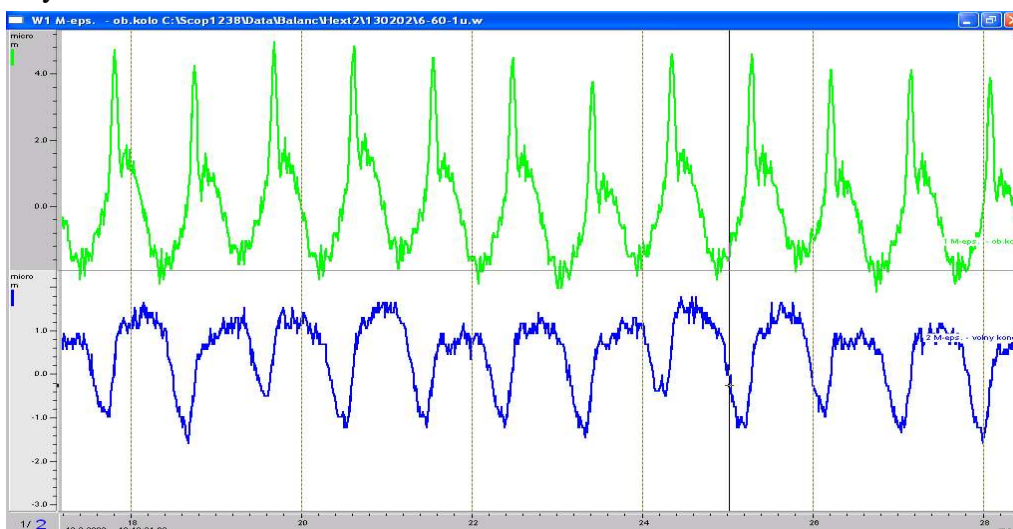
výpočtu vynucených kmitů rotoru s jednotkovou nevyvážeností v místě odběru materiálu. Tuhost rotoru je značná, takže odebrané množství materiálu je poměrně velké. Aby bylo možno odběr kvantifikovat, je materiál odvrtáván. Odvrtává se ve třech rovinách – na koncích ve fázi, ve střední rovině v protifázi, čímž lze teoreticky docílit zachování dynamického vyvážení tuhého rotoru (ve dvou rovinách). Praktické zkušenosti ukazují, že odběr materiálu vrtáním není dostatečně přesný, takže je nutno ještě provést jemné dovyvážení rotoru jako tuhého tělesa na stroji Schenck.

Stanovení fáze a množství odebraného materiálu ve třech vyvažovacích rovinách je poměrně složité. Proto byl vypracován výpočetní program, který provede následující operace:

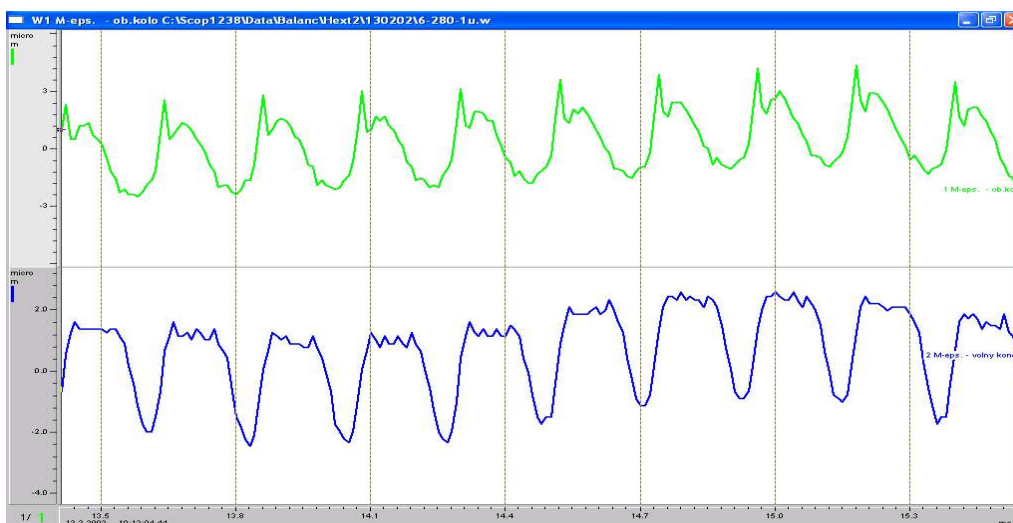
- vyhodnotí velikost relativních výchylek v obou měřených rovinách,
- určí, zda je velikost výchylek přípustná nebo zda je nutné dovyvážení,
- určí fázi nevyvážku, průměr a hloubku vrtaných otvorů ve třech rovinách,
- vytvoří soubor s vyvažovacím protokolem.

Vstupními hodnotami programu jsou složky vektoru výchylek ve dvou měřených rovinách při referenčních a maximálních otáčkách, které poskytuje vyvažovací aparatura.

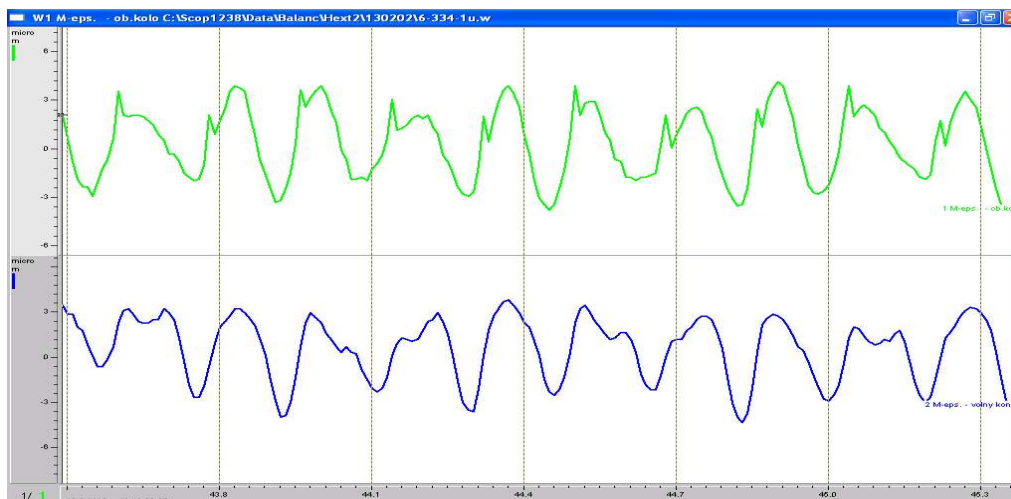
Na obr. 3 až 5 jsou uvedeny ukázky vibračních signálů rotoru expanzní turbíny, jednak při referenčních otáčkách 60.000 min^{-1} , jednak při otáčkách 280.000 min^{-1} a maximálních dosažitelných otáčkách 335.000 min^{-1} .



Obr. 3 Relativní výchylky rotoru při referenčních otáčkách 60.000 min^{-1}



Obr. 4 Relativní výchylky rotoru při otáčkách 280.000 min^{-1}

Obr. 5 Relativní výchylky rotoru při otáčkách 335.000 min^{-1}

Již z časových průběhů signálů je zřejmé, že zatímco při referenčních otáčkách jsou oba konce hřídele téměř v protifázi (obr. 3), při otáčkách 280.000 (obr. 4) a 335.000 min^{-1} (obr. 5) jsou již prakticky ve fázi. To spolu s rostoucí amplitudou (viz Tab. 1) indikuje klasickou deformaci rotoru do 1. ohybového tvaru, kdy převislé konce rotoru kmitají ve fázi a jeho střední část v protifázi. Špičky na signálu v rovině u oběžného kola (horní křivka), které jsou způsobeny odbroušením materiálu v blízkosti snímače při vyvažování rotoru jako tuhého tělesa, nemají na dovyvážení podstatný vliv.

Tab. 1 Amplitudy kmitání rotoru heliové expanzní turbíny

otáčky (min^{-1})	rovinu 1 (u oběžného kola)			rovinu 2 (volný konec rotoru)		
	$2A_{max}$ (μm)	A_{ef} (μm)	A_{ot} (μm)	$2A_{max}$ (μm)	A_{ef} (μm)	A_{ot} (μm)
60.000	8,7	1,55	-	5,0	0,87	-
280.000	11,2	1,78		7,1	1,41	
335.000	12,8	2,38	7,0	13,8	2,36	8,1

$2A_{max}$ - dvojamplituda kmitání, A_{ef} - efektivní hodnota amplitudy,
 A_{ot} - amplituda kmitání s frekvencí otáčení.

Efektivní hodnota amplitudy je statistická hodnota stanovená z relativně dlouhého záznamu a má proto největší vypovídací hodnotu. V daném případě indikuje progresivní nárůst amplitudy při otáčkách nad 280.000 min^{-1} .

Efekt dovyvažování je zřejmý z tabulky 2, kde jsou uvedeny amplitudy vibrací souboru 6ti rotorů před a po vyvažování. Tabulka uvádí amplitudy kmitání s otáčkovou frekvencí vyhodnocené programem.

Tab. 2 Amplitudy kmitání rotoru heliové expanzní turbíny před vyvážením a po vyvážení

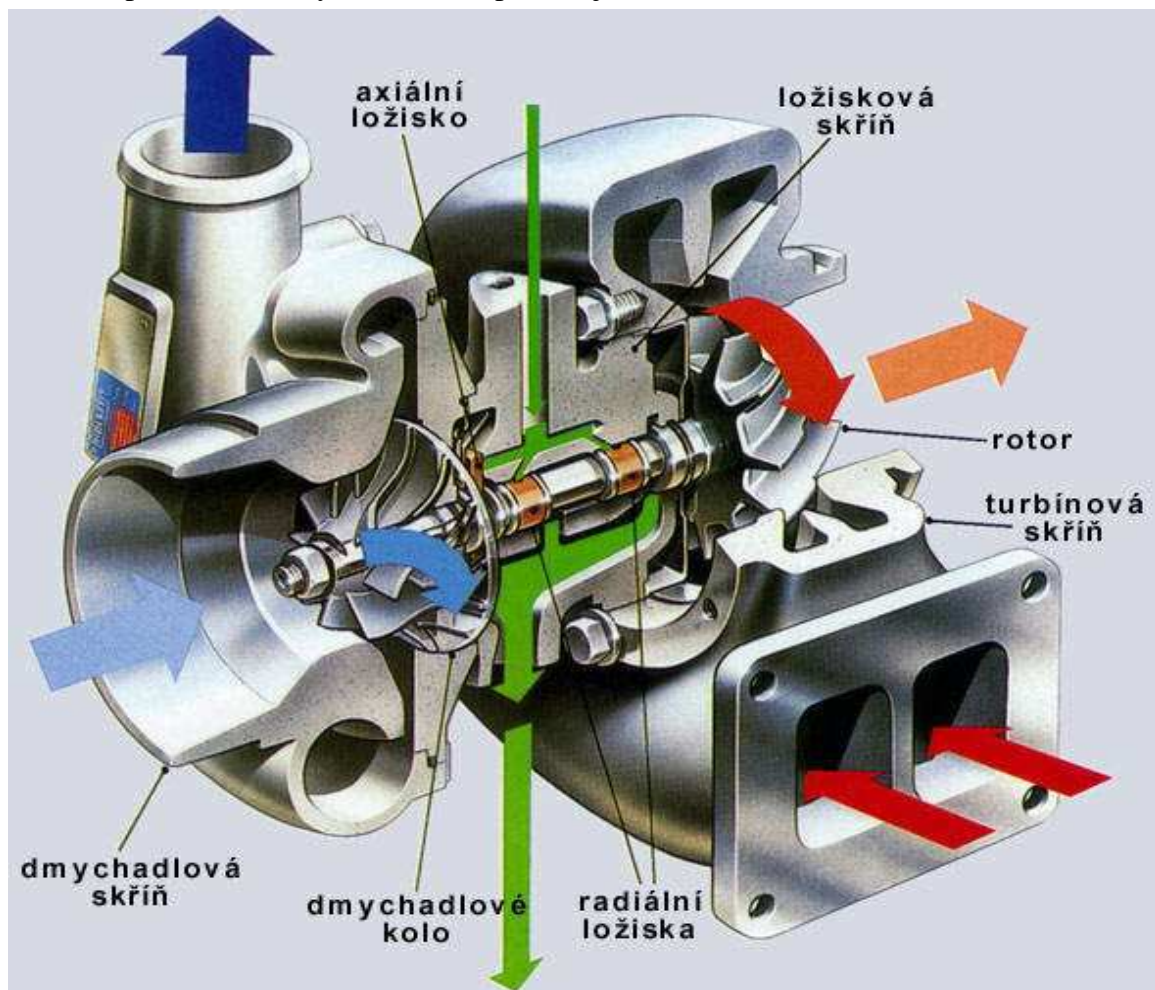
otáčky rotoru (min^{-1})	amplituda v rovině 1 (μm)		amplituda v rovině 2 (μm)	
	počáteční	po vyvážení	počáteční	po vyvážení
330.000	4,5	2,1	4,1	1,1
330.000	4,2	2,4	5,9	2,6
331.000	3,8	1,7	5,7	3,2
330.000	5,0	3,4	3,6	1,4
329.000	6,5	2,6	7,7	1,7
335.000	5,8	2,5	7,8	3,0

Z tabulky je zřejmé, že ve většině případů se výchylka zmenší na zhruba polovinu původní hodnoty, v některých případech je redukce ještě výraznější. V případě potřeby je možno vyvážení ještě zlepšit v dalším kroku.

Výše popsaná technologie provozního dovyvažování byla vypracována v r. 1997 pro rotory s provozními otáčkami do 270.000 min^{-1} a postupně byla rozšiřována na další typy rotorů s otáčkami až 350.000 min^{-1} . Současné možnosti měřicí a výpočetní techniky by umožnily sofistikovanější přístup s přímým propojením vyvažovací aparatury a počítače, podobně jako v druhém uvedeném příkladu.

2. Provozní dovyvažování malých přeplňovacích turbodmychadel ČZ Strakonice

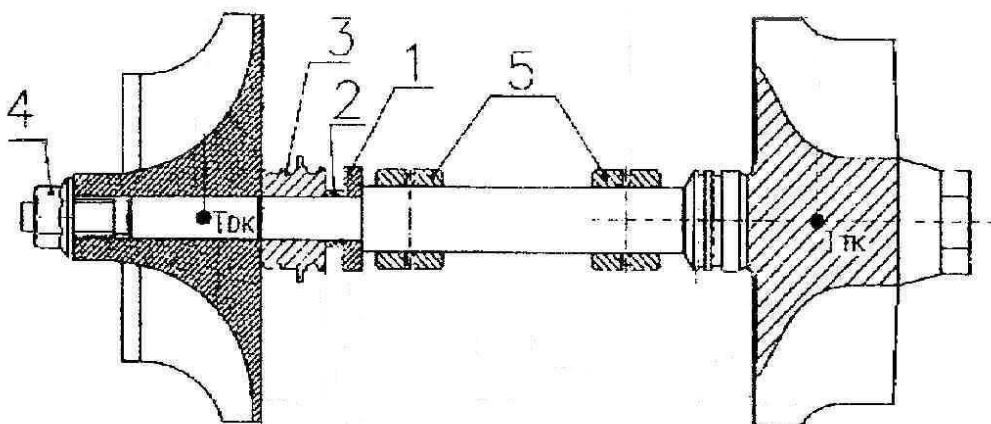
Přeplňovací turbodmychadla (dále jen TD) pro motory osobních automobilů mají maximální provozní otáčky, které často přesahují i 200.000 min^{-1} (obr. 6)



Obr. 6 Řez turbodmychadlem

Jednotlivé části rotoru (obr. 7), tj. oběžné kolo turbíny s hřídelem, běhoun axiálního ložiska 1, distanční kroužek 2, odstřikovací kroužek 3, oběžné kolo kompresoru a v některých případech i matice oběžného kola 4, jsou před montáží velmi přesně dynamicky vyváženy. Při montáži však dochází vlivem výrobních nepřesností a jejich sečítáním k určitému prohnutí konce rotoru s oběžným kolem kompresoru. Vychýlení těžiště kola již v řádu několika μm vyvolává značnou nevyváženost, která budí 1. ohybový tvar kmitání rotoru nacházející se v provozní oblasti. Při přejíždění těchto kritických otáček má tato nevyváženost za následek

výrazné zvýšení úrovně vibrací, které zvyšuje hladinu hluku a nepříznivě ovlivňuje jízdní komfort.



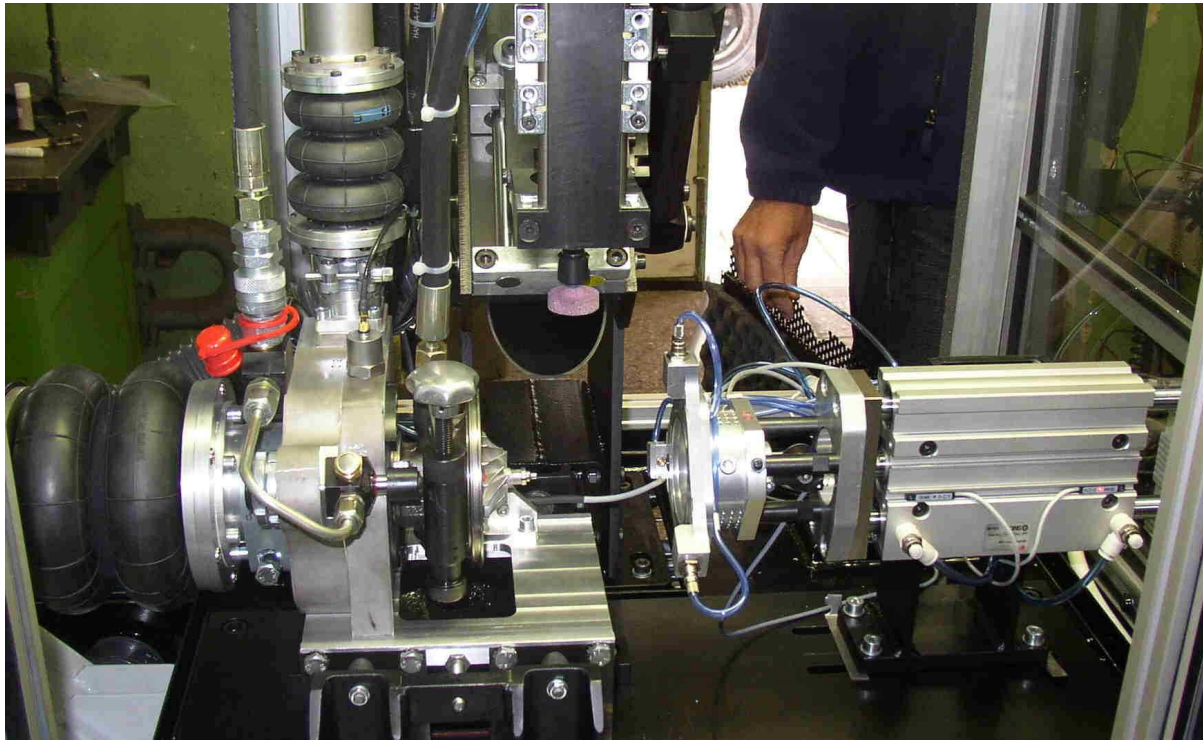
Obr. 7 Rotor malého turbodmychadla

Proto bylo nutno řešit provozní dovyvažování zkompletovaného TD. Jediné místo, které zůstane po montáži přístupné pro vyvažování, je oběžné kolo kompresoru [2]. Protože nevyváženost vzniká v podstatě vychýlením těžiště oběžného kola z rotační osy, je postačující dovyvážení v jedné rovině. Nejúčinnější by samozřejmě bylo odebírání materiálu z meridiánu oběžného kola, protože korekční hmota je na velkém poloměru a blízko těžiště kola. Při pokusném vyvažování také zásah v této lokalitě vedl vždy k výraznému snížení úrovně vibrací. Odebírání materiálu z oběžného kola je však problematické, zejména z pohledu správného nastavení místa odběru, protože v místě lopatky není odběr možný a hrozí také nebezpečí poškození lopatek. Proto bylo zvoleno místo odběru na matici oběžného kola, která má sice mnohem menší poloměr, ale je na rozdíl od kola je ocelová. Stejný odebraný objem materiálu má proto v důsledku vyšší hustoty stejnou hmotnost jako trojnásobný objem hliníkové slitiny odebraný z oběžného kola. Rovněž manipulace s ocelovými třískami je jednodušší než s hliníkem. Tyto pozitivní aspekty jsou bohužel poněkud znehodnoceny parazitními momenty, které vznikají v důsledku velké vzdálenosti vyvažovací roviny od těžiště kola, tedy od místa kde nevyváženost vzniká. Od určité velikosti nevyváženost proto není možné odběrem materiálu z matice nevyváženost korigovat na potřebnou úroveň.

Pro ověření správnosti metodiky bylo uskutečněn pokus o dovyvážení několika TD na provizorním zkušebním zařízení, kde bylo TD upnuto na pružně uchyceném stolku. Při zkoušce byly měřeny absolutní vibrace stolku v „měkkém“ směru současně s fázovou značkou snímanou optickým snímačem. Fáze nevyvážky byla vyhodnocována vyvažovací aparaturou, vyvinutou pro vyvažování heliových expanzních turbin. Pomocí této metody byly nalezeny optimální vyvažovací otáčky a úspěšně vyváženo několik rotorů. Proto byl zadán vývoj stolice pro provozní dovyvažování TD a kontrolu vibrací v celém rozmezí provozních otáček.

Konstrukce hlavních částí stolice je zřejmá z fotografie na obr. 8. Na pevný rám je pomocí planžet uchycen zkušební stůl, na kterém je upevněna odlehčená skříň turbíny. Ke skříni se pomocí excentrů nebo hydraulických válců uchyty vyvažované TD. Po spuštění cyklu je pneumatickým válcem na skříni TD nasunut kryt oběžného kola kompresoru, který se rovněž pneumaticky na skříni uchyty. Pružně uchycený stůl s TD je opatřen akcelerometrickým snímačem vibrací TECHLAB, v krytu oběžného kola je umístěn indukční snímač otáček, který slouží zároveň pro určení fáze nevyvážky. Signály ze snímačů vibrací a fázové značky jsou zpracovány speciálně vyvinutou vyvažovací aparaturou TECHLAB, která vyhodnotí složky vibračního signálu s frekvencí otáčení vzhledem k referenční značce na oběžném kole.

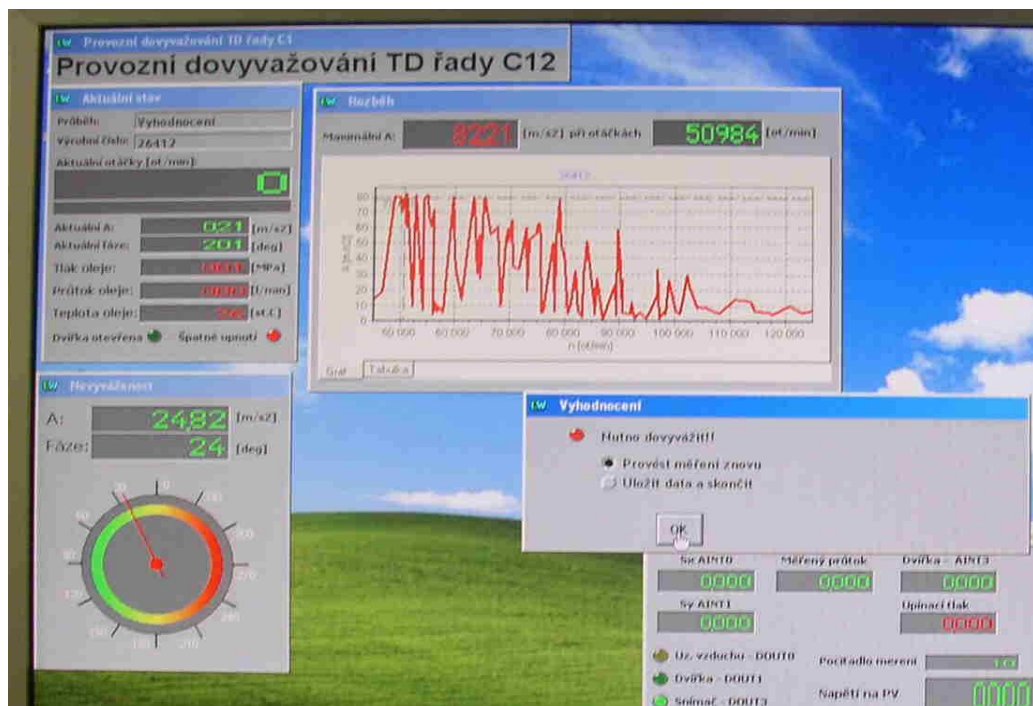
Na skříni turbíny je umístěn další akcelerometrický snímač B&K, který vyhodnocuje úroveň vibrací od vyvažovacích až po maximální otáčky. Snímač B&K je orientován vertikálně a je použit proto, že tento snímač je v ČZ používán standardně pro hodnocení vibrací TD.



Obr. 8 Stolice pro provozní dovyvažování TD – pohled na vyvažovací stolek

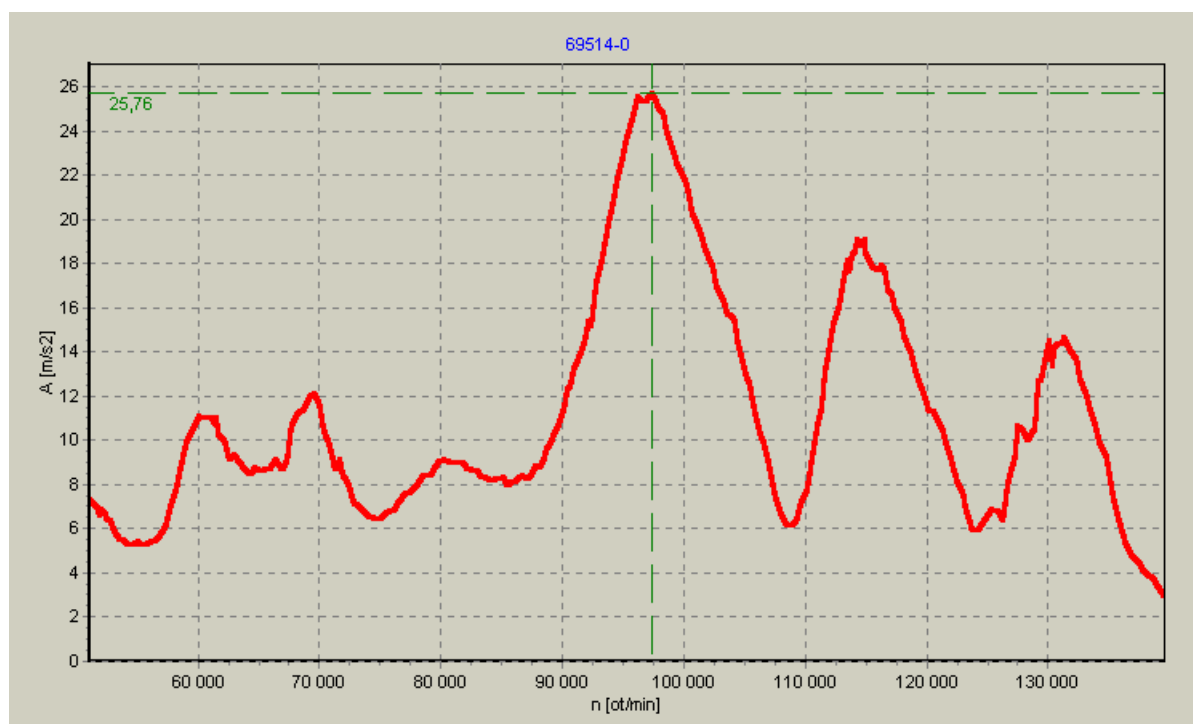
Cyklus vyvažovací stolice je řízen programem, vytvořeným v prostředí Control Web 2000. Cyklus je zahájen načtením čárového kódu, který jednoznačně identifikuje příslušné TD. Zavřením dvířek je spuštěn vlastní vyvažovací cyklus, při němž se rotor roztáčí stlačeným vzduchem. Nejprve se odečte poloha nevyváženosti při daných otáčkách (optimalizovaných pro určitý typ TD), poté následuje řízený rozběh rotoru na maximální otáčky. Otevírání ventilu, který přivádí vzduch do turbíny, je programem řízeno tak, aby byl rozběh zhruba rovnoměrný. Během rozběhu je zaznamenávána úroveň vibrací v závislosti na otáčkách. Po dosažení maximálních otáček je přívod vzduchu uzavřen, rotor dobíhá a na obrazovce počítače lze odečíst velikost a fázi nevyvážku (číselně i v polárním grafu) a je zde zobrazen průběh zrychlení v závislosti na otáčkách s vyznačením maximální hodnoty (obr. 9). V případě, že maximální úroveň vibrací převyšuje danou mez, je pomocí rychloběžné brusky s odsáváním odebrán materiál z matice oběžného kola a poté se provede další vyvažovací běh.

Na obr. 9 je ukázka obrazovky počítače po ukončení vyvažovacího běhu. V levém dolním rohu obrazovky je panel s polárním grafem, který ukazuje fázi nevyvážku, nad ním je panel s číselnými údaji o fázi a velikosti nevyvážku (zrychlení). Vpravo nahoře je graf závislosti zrychlení na otáčkách s číselnými hodnotami maximálního zrychlení a příslušných otáček. Pod grafem je rozhodovací panel, který určuje, zda se provede dovyvážení odbroušením na matici oběžného kola nebo zda se proces dovyvažování ukončí a výsledky se uloží. Pod rozhodovacím panelem je pomocný panel s údaji o složkách vektoru nevyváženosti a svítícími diodami indikujícími stav některých skupin, např. uzavíracích dvířek nebo ventilu ovládajícího pohon TD.



Obr. 9 Ukázka obrazovky po ukončení vyvažovacího cyklu

Po skončeném vyvažování jsou data závislosti vibrací na otáčkách archivována a lze je kdykoli opět zobrazit. Na obr. 10 je ukázka skutečného záznamu vibrací TD řady C-1.



Obr. 10 Ukázka záznamu rozběhu TD

V ČZ Strakonice jsou v provozu dvě kontrolní a vyvažovací stolice TD, z nichž první je v provozu od r. 2004, druhá od r. 2006. Mechanická část zkušební stolice byla zkonstruována a vyrobena v DIOSS Nýřany, naše firma dodala vyvažovací aparaturu a PC s příslušným softwarem. Zkušenosti z provozu jsou vesměs pozitivní, po odladění programu a nastavení vstupních parametrů nebylo nutno dělat žádné větší úpravy.

Literatura:

- [1] Šimek, J. - Korec, L.: Vývoj technologie vyvažování rotorů expanzních turbin
Technická zpráva TECHLAB č. 97-2401
- [2] Šimek, J. - Korec, L.: Zařízení pro kontrolu vibrací a provozní dovyvažování
turbodmychadel řady C1 ČZ Strakonice
Technické zprávy TECHLAB č. 04-402, 06-408