Experimentální Analýza Napětí
2004

STRENGTH AND MODAL FEATURES OF THE VE20 WIND-TURBINE COMPOSITE ROTOR BLADE – PART 2: EXPERIMENTAL VERIFICATION

PEVNOST A MODÁLNÍ VLASTNOSTI KOMPOZITNÍHO LISTU ROTORU VĚTRNÉ ELEKTRÁRNY VE20 – ČÁST 2: EXPERIMENTÁLNÍ OVĚŘENÍ

Jiří Krejča[1], Jindřich Rosa[2]

A new wind-turbine composite rotor blade was developed and tested by the Aircraft Propellers Division of Aeronautical Research and Test Institute in Prague. This contribution describes experiments, which were performed to support and verify design process. Modal analysis of common propeller blades is used in its simplest form and mainly natural frequencies are obtained. In the case of a large wind-turbine rotor blade (length of 5,75 m) a verification of shape of natural modes was also necessary. Improoved software equipment and laser vibrometer were used to scan large part of blade. Comparation with results obtained from PRODERA system proves that this simple, but flexibile system is useful for intended applications. Strains were measured during steady-state loading of rotor blade to obtain relationship"bending moment – strain" for following evaluation of service loading. Some problems of strain gage measurement on composite materials are discussed.

Keywords : *propeller, wind-turbine, composite materials, modal analysis, strain gauges.*

Úvod

Projekt „Pokročilá rotorová jednotka pro větrné elektrárny" zahrnoval kromě návrhu a výroby prototypového kusu i několik experimentů, které jsou stále neoddělitelnou součástí vývoje, zvláště při použití kompozitních materiálů. Zkoušky měly za cíl ověřit skutečné vlastnosti výsledné konstrukce, a tím verifikovat, případně korigovat použité výpočtové postupy a zejména jejich vstupní parametry.

Modální analýza a zkoušky

V první části příspěvku byl zdůrazněn význam modálních zkoušek při vývoji lopatkových rotorů. Kontrola frekvenčního naladění je u takových strojů jednou ze stěžejních fází návrhu a zvláště u leteckých vrtulí vystupuje hned v úvodních návrhových cyklech. Dynamické vlastnosti výrazně ovlivňují únavovou životnost a u těchto primárních dílů letecké konstrukce je spolehlivost a bezpečnost vždy na prvním místě.

Experimentální identifikace dynamických vlastností proto vždy stála v popředí zájmu příslušného vrtulářského oddělení, a byla obvykle prováděna vlastními silami, aby byl proces vývoje co nejefektivnější. Například při zavádění technologie výroby kompozitových

[1] Ing. Jiří Krejča: VZLÚ, a.s.; Beranových 130, 199 05 Praha 9, tel.: +420225115451, e-mail: krejca@vzlu.cz

[2] Ing. Jindřich Rosa: VZLÚ,a.s; Beranových 130, 199 05 Praha 9, tel.: +420225115226, e-mail: rosa@vzlu.cz

vrtulových listů byl takto kontrolován každý vyrobený kus a tato experimentální technika se tak stává součástí výrobního procesu coby nedestruktivní výstupní kontrola.

Nicméně stávající podoba modální analýzy používané v oddělení Letecké vrtule VZLÚ (dále „metodika LV“) uplatňuje podstatně zjednodušující prvky oproti komplexnímu postupu vyhodnocování pomocí odměřovaných frekvenčních přenosů. Požadavky vývojového oddělení ostatně směřují zejména na zjištění, resp. ověření hodnot vlastních frekvencí pro kontrolu možných rezonančních stavů. Vzhledem k typickým rozměrům a konstrukci vrtulového listu postačuje znát prvních pět módů kmitání (– ostatní jsou již značně vysoké a nevyvolávají nebezpečí rezonance od běžných budících vlivů), přičemž pořadí jednotlivých tvarů zůstává obvykle stejné. Podstatná je zejména identifikace prvního torzního tvaru kmitání, což je důležitý parametr pro kontrolu možnosti vzniku odtrhového flutteru.

Hodnoty vlastních frekvencí se stanovují na základě rozkladu odezvy po rázovém vybuzení pomocí algoritmu rychlé Fourrierovy transformace vlastním softwarovým vybavením navrženým a vytvořeným v programovém prostředí LabVIEW a to pro případ v kořeni vetknutého listu. Zkoušený vrtulový list je přitom pevně upnut na roštu zkušebny a odezva je snímaná jen v jednom bodě, případně jak na náběžné, tak odtokové hraně listu. Další modální parametry (např. útlum) určovány nejsou, a proto obvykle nejsou měřeny ani parametry rázu. Identifikace samotných tvarů kmitů příslušejících výše uvedeným frekvencím posléze probíhá při vynuceném kmitání na speciálním stendu - k vyhledání jednotlivých rezonančních zesílení dochází při postupné změně frekvence buzení. Současně se ruční sondou s dalším akcelerometrickým snímačem vysledují a označí uzlové čáry příslušného tvaru kmitání. Je zřejmé, že při umístění listu na vibrační stend se sice mírně pozmění hodnoty frekvencí, ovšem tvary vlastních kmitů a polohy uzlových čar prakticky nikoli – toto zjednodušující řešení právě umožňuje výhodný štíhlý nosníkový tvar listu v porovnání s hmotnou konstrukcí vibračního stendu. Je tedy zřejmé, že popsané měření není nikterak náročné z hlediska kalibrace a technických nároků na přístroje použité při experimentu.

V případě rotorového listu VE20 se však Zkušebně leteckých vrtulí dostal do rukou díl o délce přes 5.75 m a hmotnosti kolem 130 kg, jehož modální vlastnosti se mohly výrazně lišit od dosavadních zkušeností. Do popředí se tak dostala jak otázka hranice použitelnosti stávajícího měření pomocí jediného akcelerometru, tak také rychlé identifikace jednotlivých tvarů při nemožnosti buzení konstantním sinusovým signálem na vibračním stendu. Ukázalo se, že toto ověření bylo nezbytné, neboť oproti předběžnému výpočtu MKP došlo k značným frekvenčním posunům zejména u tvarů s výraznou smykovou složkou a to do takové míry, že u vyšších tvarů se dokonce zaměnilo pořadí jednotlivých módů vlastního kmitání (Tab. 1).

Modifikovanou metodikou LV tak byla prověřována možnost rychlé identifikace tvarů, kterou by bylo možno uskutečnit i v „polních“ podmínkách (např. u výrobce těchto rozměrných dílů) s minimálními nároky na pracnost a časovou náročnost. Vybuzení probíhalo poklepem za pomoci gumového kladívka. V první fázi byla hledána poloha umístění akcelerometru tak, aby jednotlivé vlastní frekvence byly na spektrálním diagramu co nejvýraznější (Obr. 4). Tato poloha pak byla považována za referenční pro identifikaci jednotlivých tvarů kmitů. Do měřící ústředny byl zaveden další signál z laserového vibrometru (Ometron VH 300+), což umožňovalo rychlou změnu měřeného bodu na rotorovém listu pouhým přestavením vysokozdvižné plošiny, na které byl vibrometr umístěn (Obr. 1 a 2). Volba zaměřovaných bodů probíhala na základě teoretického výpočtu vlastních tvarů kmitů v podobě grafického výstupu z MKP, přičemž k vyhodnocení postačovalo zjistit vzájemné fáze amplitud obou vyhodnocených signálů, případně velikosti výchylky v kategorii „hodně – málo“.

Obr. 1 a 2 List VE20 č. X2 na pevnostní zkušebně VZLÚ během modálních zkoušek

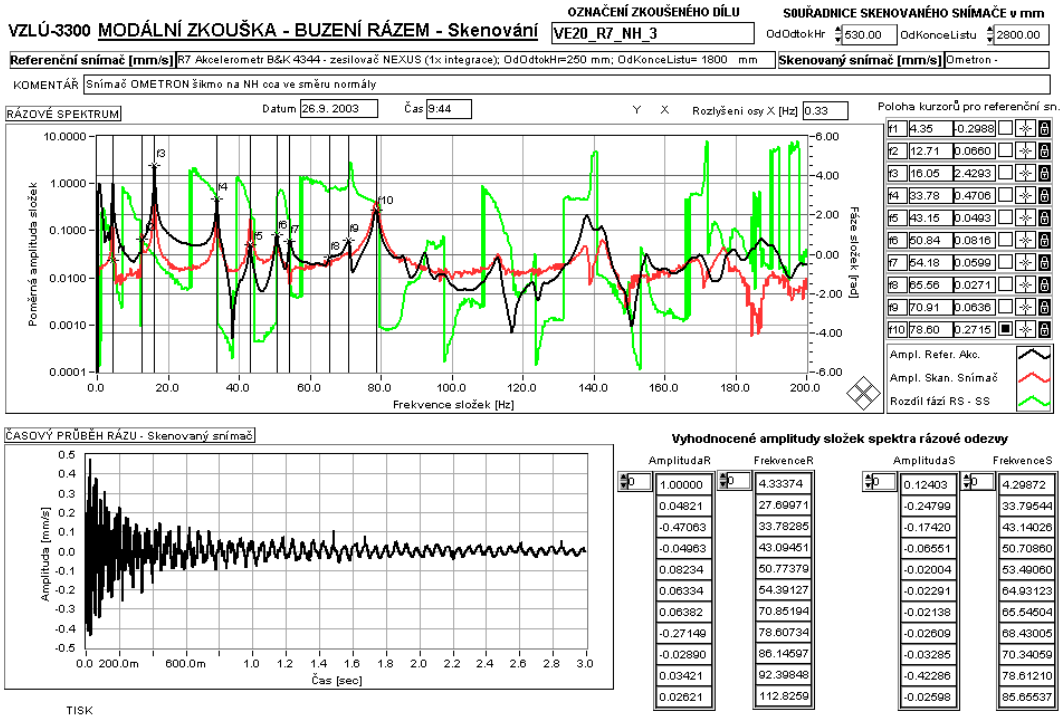
Obr. 3 Laserový vibrometr Ometron VH 300+ na vysokozdvižné plošině

Později byly prototypové listy určené pro montáž do větrné elektrárny (X3 až X5) ve spolupráci s divizí Pevnost letadel proměřeny známým systémem PRODERA. Na zvolenou síť měřených bodů bylo instalováno 36 akcelerometrů, vybuzování probíhalo minivibrátorem ve vhodném bodě pro daný mód kmitání. Výsledky byly z oddělení Pevnost letadel dodány ve standardní podobě [1]. Tytéž listy byly pak pro další ověření použitelnosti metodiky LV a pro porovnání s úplnými výsledky modální analýzy systémem PRODERA znovu proměřeny, tentokrát již jen pomocí dvou akcelerometrů v předem vybraných bodech.

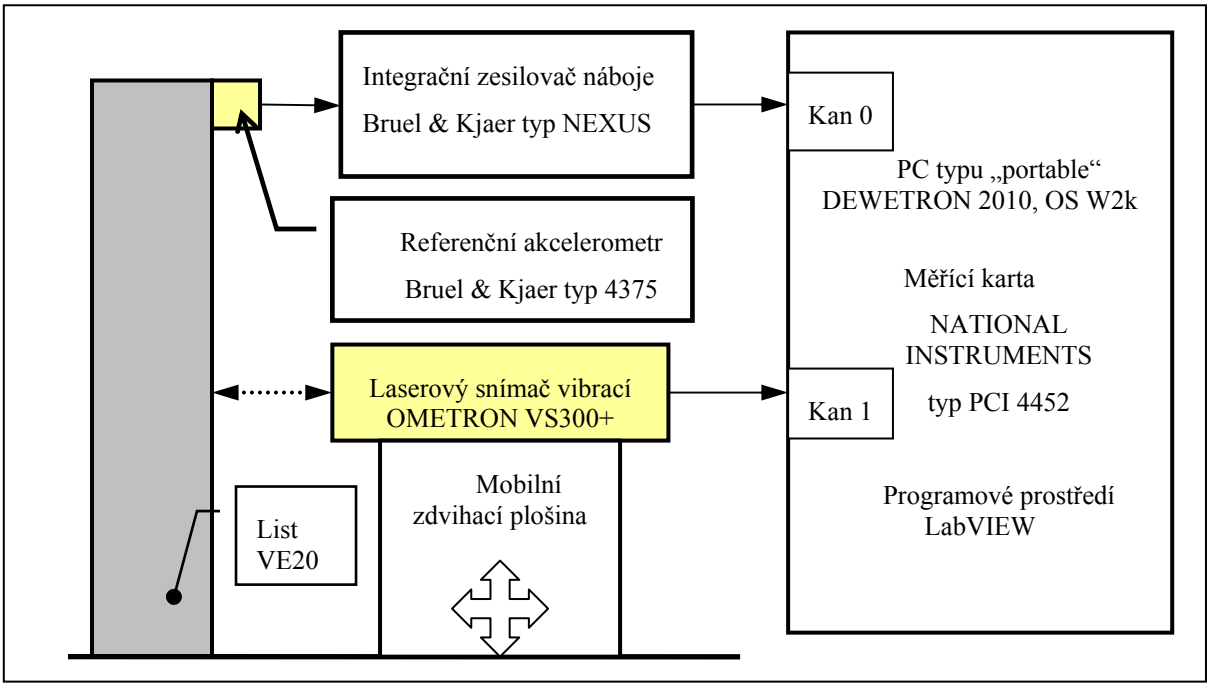
Z Tab. 1 je zřejmé, že ruční výroba kontaktní laminací u tak velkého dílu dává již poměrně značný rozptyl hodnot vlastních frekvencí. List X2 určený pro statickou zkoušku nebyl opatřen povrchovou vrstvou gelcoatu. Tomuto rozdílu v hmotnosti cca 4 kg odpovídají vyšší vlastní frekvence.

	experiment	**X2**	**X3**	**X4**	**X5**		**MKP**	
mód	popis	f [Hz]	f [Hz]	f [Hz]	f [Hz]	mód	f [Hz]	popis
1	1. ohyb Imin	4.35	4.10	4.00	4.00	1	3.81	1. ohyb Imin
2	**1. ohyb Imax**	12.71	13.50	12.25	11.75	2	13.31	**1. ohyb Imax**
3	2. ohyb Imin	16.05	15.60	15.40	15.20	3	15.62	2. ohyb Imin
4	3. ohyb Imin	33.78	32.73	32.18	32.19	4	32.18	3. ohyb Imin
						5	34.80	**1. torze**
5	**1. torze**	43.15	41.96	41.50	41.60			
6	**2. ohyb Imax**	50.51	48.24	46.88	47.64			
7	4. ohyb Imin	53.85	51.39	53.20	51.21	6	51.53	4. ohyb Imin
						7	59.19	**2. ohyb Imax**
						8	66.35	**2. torze**
8	5. ohyb Imin	70.57	68.53	67.30	68.84	9	70.84	5. ohyb Imin
9	**2. torze**	78.60	74.80	76.72	76.48			
10	6. ohyb Imin		82.68	83.48	85.52	10	82.90	6. ohyb Imin

Tab. 1 Naměřené vlastní frekvence prototypové série rotor. listů VE20 v porovnání s výpočtem MKP



Obr. 4 Protokolový záznam vyhodnocení jednoho měřeného bodu na listu X2



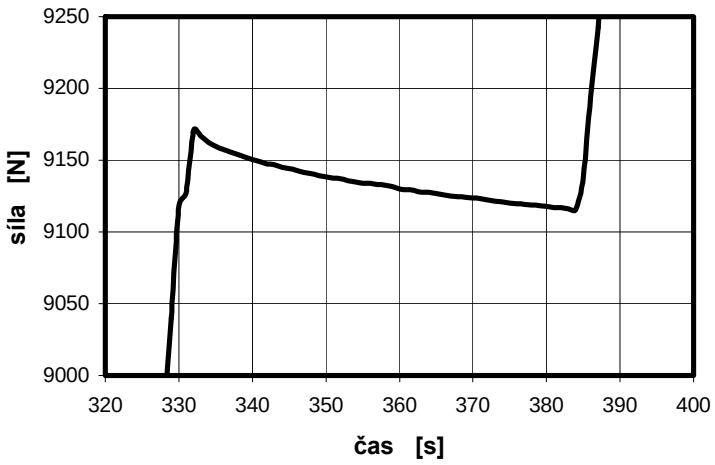
Obr. 5 Měřící řetězec při modálních zkouškách

Obr. 6 Měřící ústředna na platformě zodolněného přenosného PC Dewetron umožňuje měření prakticky kdekoli v terénu

Statická pevnostní zkouška

Zkouška proběhla ve spolupráci s oddělením Experimentální pevnost letadel VZLÚ a.s. Kromě vlastního zatěžovacího přípravku zajistilo toto pracoviště i měření průhybů. Režim zatěžování včetně fotodokumentace je podrobněji popsán v 1. části. Požadavek na deformací řízené zatěžování je poněkud nezvyklý, ale u kompozitů je vynucen výrazným vizkoelastickým chováním zejména při vyšším namáhání, jak je patrné z Obr. 7.

Tento přístup se řešitelskému pracovišti osvědčil již v minulosti, protože zpravidla umožňuje zachytit a zdokumentovat počáteční poškození konstrukce před úplným dolomením. Kompozity se poškozují obvykle křehkým mnohočetným lomem. Při udržování konstantního silového zatížení může snadno dojít k „přeběhnutí“ přes kritický bod s velmi dynamickým průběhem. Zpětné vyhodnocení pak bývá spekulativní povahy.



Obr. 7 Časový průběh zatěžování – prodleva pro odečet měřených hodnot při 45% zatížení. Relaxace síly zatížení při zachování konstantní deformace (průhybu) listu

Prototypový kus X2 určený pro statickou zkoušku až do lomu byl současně vystrojen tenzometrickou instalací. Důvody byly následující:

- Zjištění kalibrační závislosti „měřená deformace – ohybový moment“ pro další zpracování výsledků provozního měření na skutečné prototypové elektrárně. Pro tyto účely bylo provedeno zatěžování v obou směrech základního kmitání - jak v rovině minimální tuhosti (flapwise bending), tak ve směru maximální tuhosti listu (edgewise bending). Zjišťováno bylo hlavně namáhání na kořenové části listu.
- Ověření výstupů teoretického výpočtu MKP, kterým bylo modelováno zkušební zatížení

Tenzometry byly na ploše listu rozmístěny tak, aby umožnily zachycení a porovnání jednotlivých modálních složek kmitů při dynamickém zatěžování rotorového listu za provozu.

Tenzometrování na kompozitních materiálech je často diskutovaným problémem. Zde je nutno upozornit, že velmi záleží na charakteru (skladbě) měřeného kompozitu. Občas zmiňované případy vzniku poměrně velkých chyb [2] se vyskytují spíše při měření zvláštních případů zatížení a to na laminátech tvořených vrstvami s jednosměrovou vláknovou výztuží, takže vliv v tomto případě značně anizotropních vlastností kompozitu velmi výrazně zvyšuje chyby dané nepřesností instalace tenzometrů a jejich technických parametrů. V našem případě - skleněná tkanina typu plátno - jsou materiálové charakteristiky směrově daleko vyváženější. Například chyby vlivem příčné citlivosti jsou prakticky zanedbatelné, neboť použité tenzometry firmy HBM (LY41) o jmenovitém odporu 350 Ω mají koeficient příčné citlivosti pouze q = 0.1%.

Tato předběžná teoretická analýzy byla potvrzena během měření. Pro přesné vyloučení chyb vzniklých vlivem příčné citlivosti tenzometrů, zvláště pokud charakteristiku deformačního pole neznáme, je nutné provést v daném místě alespoň dvě vůči sobě ortogonální tenzometrická měření. Korekce na vyloučení vlivu příčné deformace se pak provádí podle standardních vztahů pro dvoumřížkovou pravoúhlou růžici:

$$\varepsilon_x = \frac{(1 - \nu_{12} q)(\varepsilon_{mx} - q\varepsilon_{my})}{1 - q^2} \qquad \varepsilon_y = \frac{(1 - \nu_{12} q)(\varepsilon_{my} - q\varepsilon_{mx})}{1 - q^2}$$

Naměřené a posléze přepočítané hodnoty poměrné deformace při „zatížení 30%“ během Zk3 (třetí předzatěžování –hystereze tenzometrů už potlačena) jsou v následující Tab. 2:

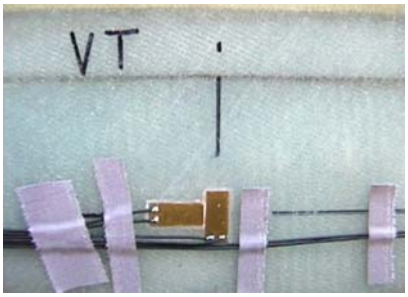
Tenzometr typ LY41 (HBM)		Poměrná deformace [$\mu m.m^{-1}$]				Chyba
umístění	označení	naměřeno		korigováno		[%]
Tlaková strana listu	VT2	ε_{mx}	2199	ε_x	2199.296	-0.013
(při zkoušce tažená)	VT1	ε_{my}	-921	ε_y	-922.937	-0.210
Sací strana listu	VS2	ε_{mx}	-2204	ε_x	-2204.188	-0.008
(při zkoušce tlačená)	VS1	ε_{my}	814	ε_y	815.972	-0.242

Tab. 2

Také z výpočtové analýzy MKP vyplývalo, že součinitel biaxiality zatížení při statické zkoušce (ohybové namáhání) se pohybuje kolem 0.3 – blízko hodnoty, při které jsou tenzometry standardně cejchovány.

Chyby způsobené odchylkou orientace tenzometru oproti hlavním směrům materiálu jsou dány lidským faktorem (dodržení směru orientace malého snímače do 2º na často nezřetelné struktuře) a jejich zamezení není tudíž snadnou záležitostí. V našem případě nebyla aplikována ochranná povrchová pryskyřice (tzv. gelcoat) a struktura výztuže (orientace plátnové tkaniny 0/90) byla tedy patrná.

Napájení tenzometrů ve čtvrtmůstkovém zapojení bylo zvoleno pouze 1V (s ohledem na značné deformace během zkoušky není nutna velká citlivost). Teplotní ovlivnění kompozitního materiálu ohřevem a zpětně zvýšením odporu tenzometru je v takovém případě naprosto zanedbatelné, jak bylo prokázano již dříve za pomoci termovize [3].



Obr. 8 Instalace tenzometrů HBM LY41 na kompozitovém listu

Závěr

Pracoviště Letecké vrtule VZLÚ, a.s. získalo cenné zkušenosti s částečnou identifikací dynamických vlastností rozměrných dílů. Při vědomí podstatného zjednodušení postupů modální analýzy se ukázalo, že jednoduchá metoda identifikace jednotlivých tvarů kmitů předběžně určených pomocí MKP ve zvolených bodech pomocí porovnání fáze kmitů vůči referenčnímu bodu dává v případě nutnosti (operativní měření ve výrobních podmínkách apod.) použitelné výsledky.

Literatura

[1] ČERNÝ, O. a HLAVATÝ, V.: *Modální zkouška listů větrné elektrárny VE20* – Zpráva VZLÚ Z-3801/04, Praha 2004

[2] TUTTLE, M.E. a BRINSON, H.F.: *Resistance-foil Strain-gage Technology as Applied to Composite Materials* – Experimental Mechanics 24, 54 – 65, 1984; - errata corrigendum: Experimental Mechanics 26, 153 – 154, 1986

[3] ROSA, J.: Úvodní únavová zkouška kořenové části celokompozitního vrtulového listu V36o – Zpráva VZLÚ Z-3796/03, Praha 2003