

# PATENTOVÝ SPIS

(11) Číslo dokumentu:

## 307 571

(13) Druh dokumentu: **B6**

(51) Int. Cl.:

**G01M 13/00** (2006.01)  
**G01M 1/00** (2006.01)  
**G01B 21/16** (2006.01)  
**G01P 3/64** (2006.01)  
**F01D 5/00** (2006.01)

(19)  
ČESKÁ  
REPUBLIKA



ÚŘAD  
PRŮMYSLOVÉHO  
VLASTNICTVÍ

(21) Číslo přihlášky: **2017-378**  
(22) Přihlášeno: **27.06.2017**  
(40) Zveřejněno: **12.12.2018**  
**(Věstník č. 50/2018)**  
(47) Uděleno: **01.11.2018**  
(24) Oznámení o udělení ve věstníku: **12.12.2018**  
**(Věstník č. 50/2018)**

(56) Relevantní dokumenty:

(Measuring Blade Condition in a Gas Turbine Engine Using Eddy-Currents; Greg W. Terpay, George G. Zipfel Jr.; příspěvek z konference "Ninth International Conference on Adaptive Structures and Technologies" 14. až 16.10.1998, Boston, USA; edit. Nesbitt W. Hagood IV, Mauro J. Atalia; ISBN: 1-56676-755-5) 1999; (Využití optických snímačů v úloze bezkontaktního monitorování lopatek; Jaroslav Hajdúk; diplomová práce; <https://otik.uk.zcu.cz/handle/11025/7425>) 2013; (Long distance laser ultrasonic propagation imaging system for damage visualization; Lee Jung-Ryul, Shin He-Jin, Chia Chen Ciang, Dhital Dipesh, Yoon Dong-Jin; Optics and Lasers in Engineering Vol. 49, No. 12, pp. 1361-1371, ISSN: 0143-8166) 12.09.2011.  
GB 847901 A; CZ 305615 B6; CZ 25935 U1; CN 102928472 A; JP S59150901 A; US 2060904 A.

(73) Majitel patentu:  
Ústav Termomechaniky AV ČR, v.v.i., Praha 8,  
Libeň, CZ

(72) Původce:  
Ing. Pavel Procházka, CSc., Praha 8, Kobylisy, CZ

(74) Zástupce:  
Ing. Jaroslav Novotný, Římská 2135/45, 120 00  
Praha 2, Vinohrady

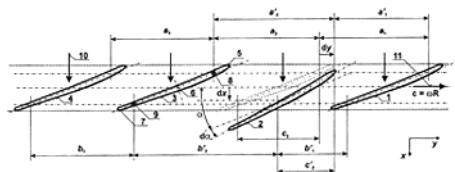
daný typ lopatky se provede porovnání změřených hodnot vzdáleností s výpočtovými modely. Na základě tohoto porovnání jsou pak identifikovány poškozené lopatky lopatkového stroje a zároveň je proveden i odhad stupně jejich poškození.

(54) Název vynálezu:

### Způsob identifikace poškozené lopatky lopatkového stroje za provozu

(57) Anotace:

Na stator lopatkového stroje se umístí v oblasti mezi středem (6) lopatky a náběžnou hranou (5) lopatky jeden nebo více senzorů (8) náběžné části lopatky a současně se na stator lopatkového stroje umístí v oblasti mezi středem (6) a odtokovou hranou (7) lopatky jeden nebo více senzorů (9) odtokové části lopatky. Známými metodami pro měření času jsou těmito senzory současně měřeny a dále zaznamenávány časy průchodů všech lopatek lopatkového stroje s celkovým počtem (n) lopatek lopatkového kola. Z těchto časových hodnot jsou vypočteny původní mezilopatkové vzdálenosti a změněné mezilopatkové vzdálenosti, měřené senzorem (8) náběžné části lopatky, původní mezilopatkové vzdálenosti a změněné mezilopatkové vzdálenosti, měřené senzorem (9) odtokové části lopatky, původní lopatkové vzdálenosti a změněné lopatkové vzdálenosti, měřené současně senzorem (8) náběžné části lopatky a senzorem (9) odtokové části lopatky. Při zjištění rozdílu mezi původní a změněnou hodnotou mezilopatkové vzdálenosti alespoň jedné lopatky lopatkového stroje většího než předem stanovená mez pro daný typ lopatky a současně při zjištění rozdílu mezi původní a změněnou hodnotou lopatkové vzdálenosti alespoň jedné lopatky lopatkového stroje většího než předem stanovená mez pro



CZ 307571 B6

## Způsob identifikace poškozené lopatky lopatkového stroje za provozu

### Oblast techniky

5

Vynález se týká způsobu identifikace poškozené lopatky lopatkového stroje za provozu, který je založen na současném měření mezilopatkových vzdáleností a úhlu natočení lopatek za provozu, vyhodnocení trendů těchto veličin a komparaci měření stanovených hodnot s výpočtovými modely lopatek s různým stupněm poškození.

10

### Dosavadní stav techniky

Rotující lopatky velkých lopatkových strojů, např. plynových a parních turbín, kompresorů a ventilátorů jsou extrémně namáhány velkými odstředivými silami, dosahujícími někdy ekvivalentních hodnot zátěže až stovek tun. Při najíždění a odstavování stroje jsou mimo to tyto lopatky namáhány nízkocyklovými únavovými cykly, které mohou způsobit trvalé poškození materiálu lopatek. V běžném provozu se pak k odstředivým silám superponují vibrace lopatek, které mají sice zpravidla malé amplitudy, nicméně toto vysokocyklové únavové namáhání lopatek prohlubuje stávající poruchy v materiálu lopatek, což po proběhnutí velkého počtu cyklů vede k únavovému lomu, trvalému poškození a následně až odlomení lopatek. Ekonomické ztráty v důsledku takové události jsou pak nedozírné.

Snahou všech provozovatelů velkých lopatkových strojů je tedy získat informace o dynamickém namáhání lopatek stroje za provozu, resp. monitorovat charakteristiky nejvíce namáhaných dlouhých lopatek, tak aby se dalo případně havárii stroje předejít. Ze známých hodnot dynamického namáhání a při znalosti únavové křivky materiálu lopatek, lze výpočtem provést odhad zbytkové životnosti dané lopatky. Takový odhad však bývá zpravidla velice nepřesný a rozhodnutí o dalším provozování stroje na jeho základě nelze spolehlivě učinit. Výsledkem měření vibrací lopatek za provozu je hodnota frekvence a amplitudy vibrací, případně tvar vibrací, počet uzlových průměrů a jejich rozložení po obvodě lopatkového kola. Porušená lopatka s trhlinou má nižší tuhost a v důsledku toho i nižší hodnotu rezonanční frekvence. Detekovat porušenou lopatku na základě změny rezonanční frekvence avšak není zpravidla možné. Změna frekvence je při malé trhlíně tak malá, že leží pod rozlišovací schopností měřicího systému. Vývoj větší trhliny, kdy by již změna frekvence byla měřitelná, zase probíhá velice rychle a k odlomení porušené lopatky dochází během několika sekund. Nelze tedy na základě predikce včas zastavit provoz stroje. Na poškození dané lopatky v budoucnu lze tedy stávajícími způsoby usuzovat při zjištění zvýšených amplitud vibrací, resp. namáhání lopatek. Tento způsob je ovšem opět vázán na problematický výpočet zbytkové životnosti, který může mít chybu stovky procent.

40

Měření namáhání lopatek a charakteristických hodnot jejich vibrací bylo v dřívějších dobách prováděno foliovými a polovodičovými tenzometry. Jejich výstupní signál musel být zesílen ještě na rotoru, a pak byl vyveden přes sběrací kroužky nebo bezdrátově přes telemetrický systém. Nevýhodou byla velice omezená životnost při poměrně vysokých nákladech. I když byly tenzometry a jejich výstupní vodiče chráněny přibodovanými ocelovými plíšky, v prostředí horké páry měly životnost několik minut, maximálně hodin. Proto se začaly používat bezkontaktní měřicí systémy založené na přesném měření časů průchodů lopatek kolem statorových senzorů, pracujících na kapacitním, optickém, elektromagnetickém nebo mikrovláknovém principu. Jedná se o tzv. metodu Blade Tip-Timing (BTT), kdy z časových diferencí průchodů lopatek v jednotlivých otáčkách může být vypočtena frekvence, amplituda nebo tvar vibrací lopatek. Nicméně nedostatkem tohoto způsobu je opět, již zmíněná nemožnost zjistit a predikovat poškození lopatky s dostatečným časovým předstihem, umožňujícím včasné zastavení stroje. Určitá analogie navrženého řešení je známa z příspěvku z konference "Ninth International Conference on Adaptive Structures and Technologies" 14. až 16. 10. 1998, Boston, USA; edit. Nesbitt W. Hagood IV, Mauro J. Atalia; ISBN: 1-56676-755-5, 1999, str. 71 až 80, kde se ve

55

výsledku průzkumu se uvádí "Identifikace poškozené lopatky na základě měření času jejího průchodu, kde se popisuje návrh nového senzoru pro měření časů průchodu lopatek plynové turbíny. Je v něm zmíněna možnost použití senzoru pro identifikaci poškozené lopatky, ale nikoli na principu měření času, který je uveden v přihlášce vynálezu, ale na principu měření tip clearance (lze přeložit jako světlost špiček, ale obvykle se používá termín clearance i v češtině). Na str. 71 (Introduction) se píše: "Za chodu stroje je také důležité mít informaci o clearance špičky lopatky a možném poškození lopatky". (" It is also important to have, while the engine is running, information about tip clearance and possible blade damage".) Dále na str. 77 autoři uvádějí: "Je-li senzor umístěn u náběžné nebo odtokové hrany, snímač shromažďuje stejnou informaci, přičemž také detekuje ulomené nebo chybějící špičky a axiální polohu lopatek". ("If located at the leading or trailing edges the sensor gathers the same information while also detecting broken or missing tips and axial location of the blades".) Použitý přístup je upřesněn v závěru práce (str. 80) : Schopnost měřit clearance špičky (lopatky) může být použita pro měření účinnosti stroje, poklesu vzlaku, poškození špičky lopatky a rotace rotoru při nevyváženosti nebo poškození ložisek. ("The ability to sense tip clearance can be used to measure engine efficiency, stall on-set, blade tip damage, and rotor whirl due to imbalance or bearing distress.") Jedná se tedy o pouhé zmínění možnosti identifikace poškozené lopatky bez dalšího popisu funkce. Co je však zásadní a podstatné, je to, že autoři k identifikaci poškozené lopatky používají měření světlosti špičky (tip clearance), tedy odlišný princip, než který je uveden v následujícím textu přihlášky vynálezu. Tuto veličinu nelze totiž stanovit z časů průchodů a potažmo vzdáleností lopatek, ale z amplitudy signálu senzoru průchodu lopatek. To je také popsáno na str. 74 "Tak senzor současně poskytuje měření clearance špičky lopatky. Jak bude ukázáno, inteligentní umístění senzoru a jeho použití jako snímače světlosti dovoluje detekovat poškozené špičky lopatek". ("Thus the sensor simultaneously provides blade tip clearance measurements. As will be shown, intelligent positioning of the sensor and its use as a clearance sensor allows one to detect damaged blade tips.). Měření clearance je pak popsáno v kapitole "Laboratory measurements" jako měření napěťových amplitud impulsů a nikoli jejich časových diferencí. To je dokumentováno i na obr. 5 a 6. Ke změně amplitudy dojde, bude-li odlomena část špičky lopatky nebo tato špička bude zcela chybět. Vyhodnocení je pak analogové, a tedy až o několik řádů méně přesné než při měření vzdáleností na základě časových diferencí, jak je navrženo v přihlášce vynálezu. Další nevýhoda identifikace založené na clearance spočívá v tom, že tato metoda nemůže odhalit trhlinu v patě lopatky, kde je největší namáhání a kde také trhliny vznikají.

Podobně patent GB 847901 A (CHICAGO AERIAL IND INC), ("Improvements in or relating to apparatus for determining information about a moving body") popisuje optické snímání průchodu neprůhledných těles, které je dokumentováno na příkladu lopatek vrtulníku. Impulsní signály jsou zpracovány analogově-číslicovou metodou, kde délka intervalu je převedena na analogový signál, jehož amplituda se měří. To opět snižuje přesnost i citlivost, která by nebyla pro identifikaci porušené lopatky dostatečná. Je zde také uvedeno, že dva měřicí obvody mohou být použity pro získání diferencí mezi lopatkami a interval mezi náběžnou a odtokovou hranou lze využít pro získání informace o sklonu lopatek. Na žádném místě tohoto dokumentu však není zmínka o identifikaci poškozené lopatky nebo stanovení stupně jejího poškození.

#### 45 Podstata vynálezu

Uvedené nedostatky odstraňuje způsob identifikace poškozené lopatky lopatkového stroje za provozu podle tohoto vynálezu, jehož podstata spočívá v tom, že se na stator lopatkového stroje umístí v oblasti mezi středem lopatky a náběžnou hranou lopatky jeden nebo více senzorů náběžné části lopatky a současně se na stator lopatkového stroje umístí v oblasti mezi středem lopatky a odtokovou hranou lopatky jeden nebo více senzorů odtokové části lopatky. Je-li některá z lopatek poškozena trhlinou, sníží se hodnota její tuhosti v ohybu a rovněž torzní tuhosti. V důsledku působení tlaku páry, odstředivých a setrvačných sil při rotaci, dojde ke zvýšenému ohybu poškozené lopatky a daná lopatka se přiblíží k předchozí lopatce a vzdálí se od lopatky

následující. Poškození lopatky se tedy projeví změnou mezilopatkových vzdáleností. Současně dojde i ke změně úhlu sklonu lopatky vzhledem k rovině rotace. Postupující poškození lopatky trhlinou je charakterizováno trendem změny mezilopatkových vzdáleností a současně trendem natáčení lopatky. Pomocí časoměrných zařízení jsou měřeny a ukládány časy průchodů všech  $n$  lopatek lopatkového stroje. Z časových údajů se následně vyhodnotí časové diference času průchodu lopatek a z nich se vypočtou mezilopatkové vzdálenosti a současně lopatkové vzdálenosti, které charakterizují natočení lopatky. Při zjištění rozdílu mezi původními a změněnými hodnotami vzdáleností lopatek lopatkového stroje většího než předem stanovená mez pro daný typ lopatky se provede porovnání změněných hodnot vzdáleností s výpočtovými modely, z nichž jsou pak identifikovány poškozené lopatky lopatkového stroje a zároveň i stupeň jejich poškození.

### Objasnění výkresů

Vynález je dále blíže objasněn pomocí výkresu, kde na obr. 1 je v půdorysu zobrazen pohled na skupinu koncových profilů čtyř lopatek a dvou bezkontaktních statorových senzorů snímajících postupně průchod všech lopatek lopatkového kola.

### Příklad uskutečnění vynálezu

Způsob identifikace poškozené lopatky lopatkového stroje za provozu je demonstrován na příkladu podle obr. 1, kde je použit jeden senzor  $g$  náběžné části lopatky umístěný na statoru stroje nad lopatkami v oblasti mezi středem  $6$  lopatky a náběžnou hranou  $5$  lopatky a současně je na stator lopatkového stroje umístěn nad lopatkami v oblasti mezi středem  $6$  lopatky a odtokovou hranou  $7$  lopatky jeden senzor  $z$  odtokové části lopatky. Známými metodami pro měření času jsou těmito senzory současně měřeny a zaznamenávány časy průchodů všech lopatek lopatkového stroje s celkovým počtem lopatek lopatkového kola  $n$ . Při prvním najetí stroje na provozní otáčky jsou z časových diferencí průchodu lopatek stanoveny původní mezilopatkové vzdálenosti  $(a_1, a_2, \dots, a_n)$ , měřené senzorem  $g$  náběžné části lopatky, původní mezilopatkové vzdálenosti  $(b_1, b_2, \dots, b_n)$ , měřené senzorem  $z$  odtokové části lopatky, a původní lopatkové vzdálenosti  $(c_1, c_2, \dots, c_n)$ , měřené senzorem  $g$  náběžné části lopatky a současně senzorem  $z$  odtokové části lopatky. V průběhu provozu stroje jsou časy průchodu jednotlivých rotujících lopatek opakovaně měřeny a jsou z nich průběžně vyhodnocovány příslušné časové diference a odpovídající mezilopatkové a lopatkové vzdálenosti, přičemž je sledován trend těchto hodnot, tedy jejich vývoj vzhledem k původním hodnotám zjištěným při prvním najetí stroje na provozní otáčky. Při zjištění rozdílu mezi naměřenými a původními hodnotami vzdáleností lopatek lopatkového stroje většího, než předem stanovená mez pro daný typ lopatky se provede porovnání změněné mezilopatkové vzdálenosti  $(a'_1, a'_2, \dots, a'_n)$ , měřené senzorem  $g$  náběžné části lopatky, změněné mezilopatkové vzdálenosti  $(b'_1, b'_2, \dots, b'_n)$ , měřené senzorem  $z$  odtokové části lopatky, a změněné lopatkové vzdálenosti  $(c'_1, c'_2, \dots, c'_n)$ , měřené současně senzorem  $g$  náběžné části lopatky a senzorem  $z$  odtokové části lopatky, tedy měřením a výpočtem zjištěných změněných hodnot vzdáleností s předem stanovenými výpočtovými modely lopatky s různou velikostí trhliny vypočtenými metodou konečných prvků (FEM), z nichž je pak na základě porovnání hodnot vypočtených a změřených vzdáleností lopatek, které byly identifikovány jako poškozené, stanoven i nejpravděpodobnější stupeň jejich poškození.

Popsaný způsob identifikace poškozené lopatky lopatkového stroje za provozu byl úspěšně ověřen při vyhodnocení provozních dat zaznamenaných na nízkotlakém stupni turbíny 1000 MW. U lopatek, které byly popsáným způsobem za provozu identifikovány jako poškozené, byly po odstavení nedestruktivní magnetoskopickou metodou nalezeny mikrotrhliny v patě lopatek, kde jsou lopatky nejvíce namáhány.

Metoda je oproti dříve užívaným metodám velice citlivá a umožňuje identifikovat i značně malé

změny ve vzájemné poloze lopatek i změny úhlu natočení lopatek vůči rovině rotace. Citlivost metody se zvyšuje při malém úhlu sklonu koncového profilu lopatek vůči rovině rotace. To je dáno tím, že ohyb lopatky v axiálním směru  $\underline{x}$  je transformován do obvodového směru  $\underline{y}$ , v němž je průchod lopatek snímán podle vztahu  $\underline{y} = \underline{x} / \operatorname{tg} \alpha$ . Uvažujeme-li typický úhel břitu koncového profilu dlouhých turbínových lopatek  $\alpha = 15^\circ$ , dostáváme poměr mezi obvodovou a axiální výchylnou lopatky  $\underline{y} = 3,73 \underline{x}$ . Předpokládejme jako příklad obvodovou rychlost lopatky  $\underline{c} = 500 \text{ m/s}$  a zařízení pro měření času s rozlišením 10 ns. Potom rozlišení výchylny lopatky v axiálním směru  $\underline{x}$  je 1,34  $\mu\text{m}$ . Při statistickém zpracování dat z opakovaných měření může být tato hodnota až 3x nižší, čemuž odpovídá rozlišení ohybu lopatky až 0,5  $\mu\text{m}$ . Citlivost na změnu úhlu můžeme zjistit obdobným způsobem. Pro vzdálenost mezi senzorem 8 náběžné části lopatky a senzorem 9 odtokové části lopatky 200 mm a uvažované rozlišení měření vzdálenosti v obvodovém směru 5  $\mu\text{m}$  je rozlišení změny úhlu lopatky  $\underline{\alpha} = 0,36^\circ$ .

### 15 Průmyslová využitelnost

Způsob identifikace poškozené lopatky lopatkového stroje za provozu podle tohoto vynálezu lze využít pro monitorování stavu lopatek velkých lopatkových strojů za provozu a jejich ochranu před devastujícími haváriemi. Vynález lze využít zejména při zajištění bezpečného provozu parních a plynových turbín, velkých ventilátorů a kompresorů, kde dochází v důsledku odstředivých sil a superpozici vibrací k nadměrnému namáhání dlouhých rotujících lopatek, které může vést při jejich odlomení k havárii stroje s velkými ekonomickými ztrátami a v případě elektrárenských turbosoustrojí i celospolečenskými škodami.

25

## PATENTOVÉ NÁROKY

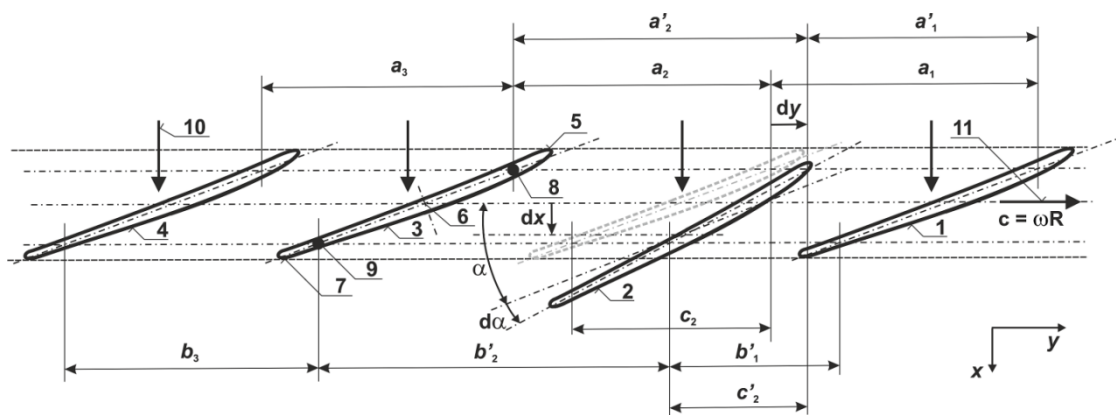
1. Způsob identifikace poškozené lopatky lopatkového stroje za provozu, **vyznačující se tím**, že se na stator lopatkového stroje v oblasti mezi středem (6) lopatky a náběžnou hranou (5) lopatky umístí nejméně jeden senzor (8) náběžné části lopatky a současně se na stator lopatkového stroje v oblasti mezi středem (6) lopatky a odtokovou hranou (7) lopatky umístí nejméně jeden senzor (9) odtokové části lopatky, přičemž jsou těmito senzory současně měřeny a zaznamenávány časy průchodů všech lopatek lopatkového stroje s celkovým počtem (n) lopatek lopatkového kola, ze kterých jsou následně stanoveny původní mezilopátkové vzdálenosti ( $a_1, a_2, \dots a_n$ ) měřené senzorem (8) náběžné části lopatky, změněné mezilopátkové vzdálenosti ( $a'_1, a'_2, \dots a'_n$ ) měřené senzorem (8) náběžné části lopatky, původní mezilopátkové vzdálenosti ( $b_1, b_2, \dots b_n$ ) měřené senzorem (9) odtokové části lopatky, změněné mezilopátkové vzdálenosti ( $b'_1, b'_2, \dots b'_n$ ) měřené senzorem (9) odtokové části lopatky, původní lopátkové vzdálenosti ( $c_1, c_2, \dots c_n$ ) měřené současně senzorem (8) náběžné části lopatky a senzorem (9) odtokové části lopatky a změněné lopátkové vzdálenosti ( $c'_1, c'_2, \dots c'_n$ ) měřené současně senzorem (8) náběžné části lopatky a senzorem (9) odtokové části lopatky, přičemž při zjištění rozdílu mezi původní a změněnou hodnotou mezilopátkové vzdálenosti alespoň jedné lopatky lopatkového stroje většího než předem stanovená mez pro daný typ lopatky a současně při zjištění rozdílu mezi původní a změněnou hodnotou lopátkové vzdálenosti alespoň jedné lopatky lopatkového stroje většího než předem stanovená mez pro daný typ lopatky, se provede porovnání změněných hodnot vzdáleností s výpočtovými modely, z nichž jsou pak identifikovány poškozené lopatky lopatkového stroje a zároveň i stupeň jejich poškození.

50

1 výkres

Seznam vztahových značek:

- 1 Lopatka č. 1
- 2 Lopatka č. 2
- 3 Lopatka č. 3
- 4 Lopatka č. 4
- 5 Náběžná hrana lopatky
- 6 Střed lopatky
- 7 Odtoková hrana lopatky
- 8 Senzor náběžné části lopatky
- 9 Senzor odtokové části lopatky
- 10 Směr hnacího media lopatkového stroje
- 11 Směr otáčení lopatkového stroje
- $x$  Axiální směr
- $y$  Obvodový směr
- $dx$  Axiální změna polohy lopatky
- $dy$  Obvodová změna polohy lopatky
- $\alpha$  Úhel lopatky vůči rovině rotace
  
- $c$  Obvodová rychlost lopatky
- $\omega$  Úhlová rychlost lopatky
- $R$  Obvodový poloměr lopatkového kola
- $a_1$  Původní mezilopatková vzdálenost mezi lopatkou č. 1 a lopatkou č. 2 měřená senzorem náběžné části lopatky
- $a_2$  Původní mezilopatková vzdálenost mezi lopatkou č. 2 a lopatkou č. 3 měřená senzorem náběžné části lopatky
  
- $a_3$  Původní mezilopatková vzdálenost mezi lopatkou č. 3 a lopatkou č. 4 měřená senzorem náběžné části lopatky
- $a'_1$  Změněná mezilopatková vzdálenost mezi lopatkou č. 1 a lopatkou č. 2 měřená senzorem náběžné části lopatky
- $a'_2$  Změněná mezilopatková vzdálenost mezi lopatkou č. 2 a lopatkou č. 3 měřená senzorem náběžné části lopatky
- $b'_1$  Změněná mezilopatková vzdálenost mezi lopatkou č. 1 a lopatkou č. 2 měřená senzorem odtokové části lopatky
- $b'_2$  Změněná mezilopatková vzdálenost mezi lopatkou č. 2 a lopatkou č. 3 měřená senzorem odtokové části lopatky
- $b_3$  Původní mezilopatková vzdálenost mezi lopatkou č. 3 a lopatkou č. 4 měřená senzorem odtokové části lopatky
- $c_2$  Původní lopatková vzdálenost lopatky č. 2 měřená senzorem náběžné části lopatky a senzorem odtokové části lopatky
- $c'_2$  Změněná lopatková vzdálenost lopatky č. 2 měřená senzorem náběžné části lopatky a senzorem odtokové části lopatky
- $n$  Celkový počet lopatek lopatkového kola



Obr. 1.