

**G01M 13/00** (2019.01)  
**G01M 1/00** (2006.01)  
**G01B 21/16** (2006.01)  
**G01P 3/64** (2006.01)  
**F01D 5/00** (2006.01)

(19)  
 ČESKÁ  
 REPUBLIKA

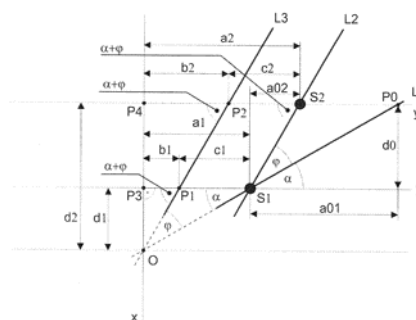


ÚŘAD  
 PRŮMYSLOVÉHO  
 VLASTNICTVÍ

(21) Číslo přihlášky: **2019-481**  
 (22) Přihlášeno: **22.07.2019**  
 (40) Zveřejněno: **03.02.2021**  
**(Věstník č. 5/2021)**  
 (47) Uděleno: **23.12.2020**  
 (24) Oznámení o udělení ve věstníku: **03.02.2021**  
**(Věstník č. 5/2021)**

(56) Relevantní dokumenty:  
 (Blade Tip-timing Technology with Multiple Reference Phases for Online monitoring of High-speed Blades under Variable-speed Operation; Zhang Ji-Wang, Zhang Lai-bin, Ding Ke-Qin, Duan Li-xiang; Measurement Science Review, No. 6, ISSN 1335-8871; <http://www.measurement.sk/2018/msr-2018-0033.pdf>) 2018; (Non-contact measurement of stationary characteristics of shrouded steam turbine blades under rotation; Pavel Procházka, František Vaněk; 2015 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC) Proceedings; E-ISSN 978-1-4799-6114-6; <https://www.semanticscholar.org/paper/Non-contact-measurement-of-stationary-of-shrouded-Prochazka-Vanek/85d61a3cd209c154ee20d2647ec1c4271a071314>) 2015.  
 WO 2019091513 A1; CZ 32016 U1; CN 106813833 A; EP 2808497 A1; EP 2369314 A1; SE 518925 C2; GB 847901 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:  
 NEOLEGAL - advokátní a patentová kancelář, Ing.  
 Jaroslav Novotný, Římská 2135/45, 120 00 Praha 2,  
 Vinohrady



(54) Název vynálezu:  
**Způsob stanovení natočení břítu lopatky lopatkového stroje za rotace se zvýšenou přesností**

(57) Anotace:  
 Způsob stanovení natočení břítu lopatky lopatkového stroje za rotace spočívá v tom, že na stator lopatkového stroje se v rovině kolmé na osu rotace lopatkového stroje, která je zároveň různá od rovnoběžné roviny, v níž leží střed (O) natáčení břítu lopatky, umístí první senzor (S1) průchodu břítu lopatky a v rovině kolmé na osu rotace lopatkového stroje, která je zároveň různá od roviny prvního senzoru (S1) a zároveň je různá od rovnoběžné roviny, v níž leží střed (O) natáčení břítu lopatky, se umístí druhý senzor (S2) průchodu břítu lopatky, přičemž se stanoví časové difference průchodu břítu lopatek v různých otáčkách pod senzorem (S1) průchodu břítu lopatky a pod senzorem (S2) průchodu břítu lopatky, ze kterých se následně vypočte hodnota úhlového natočení ( $\varphi$ ) lopatky jako aritmetický průměr jednotlivých měření nebo vážený aritmetický průměr jednotlivých měření.

## Způsob stanovení natočení břítu lopatky lopatkového stroje za rotace se zvýšenou přesností

### Oblast techniky

5

Vynález se týká způsobu stanovení natočení břítu lopatky lopatkového stroje za rotace, který je založen na měření času průchodu sledované lopatky okolo dvou bezkontaktních senzorů umístěných na statoru stroje, přičemž jeden nebo oba senzory mohou být samostatně využity k získání informace o natočení břítu lopatky. Výsledný údaj o natočení břítu lopatky za rotace je získán výpočtem ze dvou nebo tří současně stanovených údajů, což umožňuje dosažení zvýšené přesnosti výsledného údaje.

10

### Dosavadní stav techniky

15

Na rotující lopatky velkých lopatkových strojů, např. plynových a parních turbín, kompresorů a ventilátorů, působí síly, které jsou výslednicí odstředivých sil a aerodynamických sil, jimiž proudící médium, např. vodní pára, působí na lopatky lopatkového stroje. V důsledku působení těchto sil dochází i ke změně tvaru lopatek, zejména k jejich prodloužení a natočení, resp. rozkroucení. Tyto charakteristiky mají jednak vliv na účinnost stroje a jednak mohou být i projevem poškození příslušné lopatky lopatkového stroje. 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 současně dojde i ke změně úhlu sklonu břítu lopatky vzhledem k rovině rotace. Postupující poškození lopatky trhlinou je charakterizováno trendem změny mezilopatkových vzdáleností a současně trendem natáčení břítu lopatky.

20

25

Z těchto skutečností je zřejmé, že je důležité získat informace o skutečném úhlovém natočení břítu lopatky za provozu. Střídavá složka této charakteristiky poskytuje informaci o torzních kmitech lopatky, které mohou mít vliv na její životnost. V patentovém dokumentu CZ 307571 B6 "Způsob identifikace poškozené lopatky lopatkového stroje za provozu" je popsán způsob stanovení úhlu sklonu břítu lopatky vzhledem k rovině rotace pomocí dvou statorových senzorů, přičemž jeden senzor je umístěn u náběžné hrany lopatek a druhý u odtokové hrany. Pomocí časoměrných zařízení jsou měřeny a ukládány časy průchodů všech lopatek lopatkového stroje. Z časových údajů se následně vyhodnotí časové diference časů průchodu lopatek a z nich se vypočtou mezilopatkové vzdálenosti a současně lopatkové vzdálenosti, které charakterizují natočení lopatky. Pro stanovení časů průchodu lopatek je zapotřebí třetí, referenční snímač, který slouží k identifikaci jednotlivých lopatek a odečtu nulového časového údaje v každé otáčce. Vzhledem k tomuto času jsou pak vyhodnoceny časy průchodu lopatky pod náběžným a odtokovým senzorem a z nich stanovena časová diference a příslušné mezilopatkové vzdálenosti, které nepřímo vypovídají o úhlu natočení břítu lopatky. Nevýhodou je, že časové diference jsou stanoveny jako rozdíl dvou rozdílů časových hodnot a to: 1. času průchodu lopatky pod senzorem náběžné hrany a nulového času referenční značky a 2. času průchodu lopatky pod senzorem odtokové hrany a nulového času referenční značky. Tento složitější postup výpočtu může vést ke zvýšené chybě měření.

35

40

45

### Podstata vynálezu

Uvedené nedostatky odstraňuje způsob stanovení natočení břítu lopatky lopatkového stroje za rotace podle tohoto vynálezu, jehož podstata spočívá v tom, že se na stator lopatkového stroje umístí dva bezkontaktní senzory průchodu břítu lopatky, které leží v rovinách kolmých na osu rotace lopatkového stroje a zároveň rovnoběžných s rovinou, rovněž kolmou na osu rotace lopatkového stroje, v níž leží střed natáčení břítu lopatky, kolem něž se otáčí břit lopatky při úhlovém natočení. Důležitou podmínkou je, že rovina, jíž prochází střed natáčení břítu lopatky, není totožná s rovinou, v níž leží senzory průchodu břítu lopatky. V takovém případě při úhlovém

50

55

natočení břitu lopatky dojde k časovému posunu okamžiku průchodu břitu lopatky pod bezkontaktními senzory. Tento časový posun se pro každý sledovaný režim provozu kola, např. otáčky, a každý senzor stanoví zařízením pro měření času. Z rozdílu časů průchodu lopatky je pak ve vyhodnocovací zařízení vyhodnocena hodnota úhlového natočení břitu lopatky zvlášť pro každý senzor.

### Objasnění výkresů

Vynález je dále blíže objasněn pomocí výkresu, kde na obr. 1 je schematicky zobrazen v půdorysu pohled na koncový profil, tedy břit lopatky v různých polohách, a to při průchodu natočeného i nenatočeného břitu lopatky pod senzory průchodu lopatky a při průchodu natočeného i nenatočeného břitu lopatky středem natáčení břitu lopatky.

### Příklady uskutečnění vynálezu

Způsob stanovení natočení břitu lopatky lopatkového stroje za rotace je demonstrován na příkladu podle obr. 1, kde jsou znázorněny dva senzory S1 a S2 průchodu břitu lopatky, pod nimiž právě prochází břit L1 lopatky ve výchozí úhlové poloze.

V půdorysu na obr. 1 se břit L1 lopatky při otáčení lopatkového kola pohybuje ve směru tangenciální osy y, tedy v obvodovém směru. Břit L1 lopatky svírá s osou y úhel α. V jiném časovém okamžiku, tedy v jiné otáčce stroje, může dojít k tomu, že se břit L1 lopatky natočí o úhel φ. Taková situace je znázorněna břitem L2 lopatky, který právě prochází pod senzorem S1 průchodu břitu lopatky. V jistém časovém okamžiku prochází břit L2 lopatky středem O natáčení břitu lopatky. Tato situace je zobrazena jako břit L3 lopatky, který je vůči ose y natočen o úhel α+φ. Senzor S1 průchodu břitu lopatky a střed O natáčení břitu lopatky leží ve dvou různých rovinách, kolmých na osu otáčení lopatkového kola, mezi nimiž je nenulová vzdálenost d1. Osa otáčení lopatkového kola je ve znázorněném příkladu rovnoběžná s osou x souřadnicového systému. Rozdílnému času průchodu břitu L3 lopatky středem O natáčení břitu lopatky a průchodu břitu L2 lopatky pod senzorem S1 průchodu břitu lopatky odpovídá na ose y vzdálenost c1, tedy vzdálenost mezi body P1 a S1 na obr. 1.

Způsob I.

Vzdálenost c1 můžeme vyjádřit jako

$$c1 = \Omega R \Delta t1$$

kde  $\Omega$  [rad/s] je úhlová frekvence otáčení lopatkového kola,  $R$  je poloměr lopatkového kola a  $\Delta t1$  je naměřená časová diference průchodu břitu L2 a L3 pod senzorem S1 průchodu břitu lopatky. Pro úhlové veličiny v obr. 1 platí vztahy

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{d1}{a1}$$

$$\operatorname{tg}(\alpha + \varphi) = \frac{d1}{b1}$$

Z obou vztahů můžeme odvodit výsledný vztah pro výpočet úhlového natočení  $\varphi$  břitu lopatky

$$\varphi = \arctg \frac{d1 \operatorname{tg} \alpha}{d1 - \Omega R \Delta t1 \operatorname{tg} \alpha} - \alpha$$

Při měření senzorem S2 svírá břit L1 lopatky s osou y úhel α. V jiném časovém okamžiku, tedy v jiné otáčce stroje, může dojít k tomu, že se břit L1 lopatky natočí o úhel φ. Taková situace je znázorněna břitem L2 lopatky, který právě prochází pod senzorem S2 průchodu břitu lopatky. V jistém časovém okamžiku prochází břit L2 lopatky středem O natáčení břitu lopatky. Tato situace je zobrazena jako břit L3 lopatky, který je vůči ose y natočen o úhel α + φ. Senzor S2 průchodu břitu lopatky a střed O natáčení břitu lopatky leží ve dvou různých rovinách, kolmých na osu otáčení lopatkového kola, mezi nimiž je nenulová vzdálenost d2. Osa otáčení lopatkového kola je ve znázorněném příkladu rovnoběžná s osou x souřadnicového systému. Rozdílnému času průchodu břitu L3 lopatky středem O natáčení břitu lopatky a průchodu břitu L2 lopatky pod senzorem S2 průchodu břitu lopatky odpovídá na ose y vzdálenost c2, tedy vzdálenost mezi body P2 a S2 na obr. 1.

15 Způsob II.

Obdobně jako v předchozím případě můžeme vzdálenost c2 při měření senzorem S2 vyjádřit jako

$$c2 = \Omega R \Delta t2$$

20

kde Ω [rad/s] je úhlová frekvence otáčení lopatkového kola, R je poloměr lopatkového kola a Δt2 je naměřená časová diference průchodu břitu L2 a L3 pod senzorem S2 průchodu břitu lopatky. Pro úhlové veličiny v obr. 1 platí vztahy

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{d2}{a2}$$

25

$$\operatorname{tg}(\alpha + \varphi) = \frac{d2}{b2}$$

30

Z obou vztahů můžeme odvodit výsledný vztah pro výpočet úhlového natočení φ břitu lopatky

$$\varphi = \arctg \frac{d2 \operatorname{tg} \alpha}{d2 - \Omega R \Delta t2 \operatorname{tg} \alpha} - \alpha$$

Způsob III.

35 Uvažujme nyní třetí možnost, kdy břit L1 lopatky leží pod senzorem S1 a zároveň prochází bodem P0, přičemž svírá s osou y úhel α. Na senzorech S1, S2 registrujeme průchody břitu lopatky v časech t3S1 a t3S2, jejichž časová diference těchto údajů je

$$\Delta t3 = t3S1 - t3S2$$

40

Pro úhlové veličiny v obr. 1 platí vztahy

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{d0}{\Omega R \Delta t3} \quad \operatorname{tg}(\alpha + \varphi) = \frac{d0}{\Omega R \Delta t3'}$$

45 kde Δt3' je časová diference časů průchodů břitu lopatky v jiné otáčce po natočení břitu L1 lopatky

do polohy  $L_2$  o úhel  $\varphi$

$$\varphi = \operatorname{arctg} \frac{d_0}{\Omega R \Delta t_3'} - \operatorname{arctg} \frac{d_0}{\Omega R \Delta t_3}$$

5 Pro stanovení výsledného úhlu natočení lopatky jsou k dispozici následující způsoby výpočtu:

1. Aritmetický průměr hodnot  $\varphi$  stanovených způsobem I a II.
2. Aritmetický průměr hodnot  $\varphi$  stanovených způsobem I a III.
- 10 3. Aritmetický průměr hodnot  $\varphi$  stanovených způsobem II a III.
4. Aritmetický průměr  $\varphi$  stanovených způsobem I, II a III.
- 15 5. Vážený aritmetický průměr hodnot  $\varphi$  stanovených způsobem I a II.
6. Vážený aritmetický průměr hodnot  $\varphi$  stanovených způsobem I a III.
7. Vážený aritmetický průměr hodnot  $\varphi$  stanovených způsobem II a III.
- 20 8. Vážený aritmetický průměr  $\varphi$  stanovených způsobem I, II a III.

Tímto způsobem je dosaženo potlačení soustavných chyb a zvýšení přesnosti měření úhlu natočení  
břitu lopatky.

25

#### Průmyslová využitelnost

Způsob stanovení natočení břitu lopatky lopatkového stroje za rotace lze využít pro monitorování  
30 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  
35 celospolečenskými škodami. Znalost skutečné hodnoty natočení břitů lopatek je také důležitá pro  
optimalizaci účinnosti lopatkového stroje.

## PATENTOVÉ NÁROKY

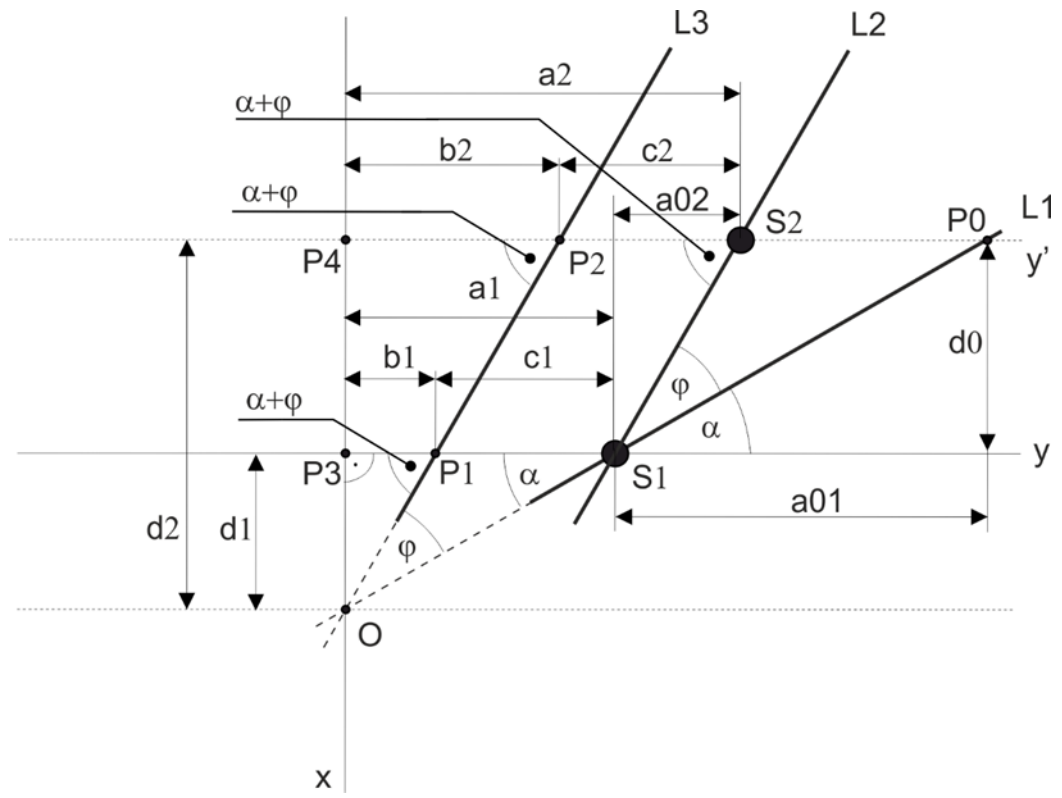
1. Způsob stanovení natočení břitů lopatky lopatkového stroje za rotace, **vyznačující se tím**, že  
 5 na stator lopatkového stroje se v rovině kolmé na osu rotace lopatkového stroje, která je zároveň  
 různá od rovnoběžné roviny, v níž leží střed (O) natáčení břitů lopatky, umístí první senzor (S1)  
 průchodu břitů lopatky a v rovině kolmé na osu rotace lopatkového stroje, která je zároveň různá  
 od roviny prvního senzoru (S1) průchodu břitů lopatky a zároveň je různá od rovnoběžné roviny,  
 v níž leží střed (O) natáčení břitů lopatky, se umístí druhý senzor (S2) průchodu břitů lopatky,  
 10 přičemž se známými metodami pro měření času stanoví časové diference průchodu břitů lopatek  
 v různých otáčkách pod prvním senzorem (S1) průchodu břitů lopatky a pod druhým  
 senzorem (S2) průchodu břitů lopatky, ze kterých se následně vypočte hodnota úhlového natočení  
 ( $\varphi$ ) lopatky jako aritmetický průměr nebo vážený aritmetický průměr z jednotlivých měření prvním  
 senzorem (S1) průchodu břitů lopatky a druhým senzorem (S2) průchodu břitů lopatky, nebo  
 15 prvním senzorem (S1) průchodu břitů lopatky a současně prvním senzorem (S1) průchodu břitů  
 lopatky a druhým senzorem (S2) průchodu břitů lopatky, nebo druhým senzorem (S2) průchodu  
 břitů lopatky a současně prvním senzorem (S1) průchodu břitů lopatky a druhým senzorem (S2)  
 průchodu břitů lopatky nebo prvním senzorem (S1) průchodu břitů lopatky a druhým  
 senzorem (S2) průchodu břitů lopatky a současně prvním senzorem (S1) průchodu břitů lopatky  
 20 a druhým senzorem (S2) průchodu břitů lopatky.

1 výkres

## Seznam vztahových značek

- $x$  osa  $x$  souřadnicového systému (axiální směr)
- $y$  osa  $y$  souřadnicového systému (obvodový směr otáčení)
- $y'$  posunutá osa souřadnicového systému
- O střed natáčení břitů lopatky
- L1 břit lopatky – výchozí poloha
- L2 břit lopatky – poloha po natočení
- L3 břit lopatky – posunutá poloha po natočení
- S1 první senzor průchodu břitů lopatky
- S2 druhý senzor průchodu břitů lopatky
- P0 průsečík břitů L1 lopatky a osy  $y'$
- P1 průsečík břitů L3 a osy  $y$
- P2 průsečík břitů L3 a osy  $y'$
- P3 průsečík kolmice na osu  $y$  procházející středem O natáčení břitů lopatky a osy  $y$
- P4 průsečík kolmice na osu  $y$  procházející středem O natáčení břitů lopatky a osy  $y'$
- $\alpha$  výchozí úhel břitů lopatky vůči ose  $y$
- $\varphi$  hodnota úhlového natočení břitů lopatky
- a1 vzdálenost mezi průmětem senzoru S1 do osy  $y$  a průsečíkem P3 kolmice procházející středem O natáčení břitů lopatky a osy  $y$
- a2 vzdálenost mezi průmětem senzoru S2 do osy  $y$  a průsečíkem P4 kolmice procházející středem O natáčení břitů lopatky a posunuté osy  $y'$
- a01 vzdálenost průsečíku P0 a průsečíku osy  $y'$  a kolmice vedené senzorem S1 na osu  $y'$
- a02 rozdíl vzdáleností a1 a a2
- b1 vzdálenost mezi průsečíkem P1 a průsečíkem P3 kolmice procházející středem O natáčení břitů lopatky a osy  $y$
- b2 vzdálenost mezi průsečíkem P2 a průsečíkem P4 kolmice procházející středem O natáčení břitů lopatky a posunuté osy  $y'$
- c1 rozdíl vzdáleností a1 a b1
- c2 rozdíl vzdáleností a2 a b2
- d0 vzdálenost osy  $y$  a posunuté osy  $y'$

- d1 vzdálenost roviny kolmé na osu otáčení lopatkového stroje, v níž leží senzor S1 průchodu břítu lopatky a roviny kolmé na osu otáčení lopatkového stroje, v níž leží střed O natáčení břítu lopatky
- d2 vzdálenost roviny kolmé na osu otáčení lopatkového stroje, v níž leží senzor S2 průchodu břítu lopatky a roviny kolmé na osu otáčení lopatkového stroje, v níž leží střed O natáčení břítu lopatky



Obr. 1