

# FREKVENČNA ODVISNOST REZIDUALNEGA TRENJA VISKOZNOSTNEGA VAKUUMSKEGA MERILNIKA Z LEBDEČO KROGLICO

## FREQUENCY DEPENDENCE OF SPINNING ROTOR GAUGE RESIDUAL DRAG

Janez Šetina

Inštitut za kovinske materiale in tehnologije, Lepi pot 11, 1000 Ljubljana, Slovenija  
janez.setina@imt.si

Prejem rokopisa – received: 2007-04-18; sprejem za objavo – accepted for publication: 2007-05-07

Viskoznostni merilnik tlaka z lebdečo kroglico (SRG – Spinning Rotor Gauge) se je uveljavil v meroslovju nizkih tlakov kot precizen in stabilen referenčni etalon za območje med  $10^{-4}$  Pa in 1 Pa. Ob ustrezni kalibraciji s primarnimi vakuumskimi standardi je v tem območju tlakov dosegljiva merilna negotovost pri komercialnih merilnikih  $\pm 0,5\%$ . Med vplivnimi veličinami pri merjenjih z SRG-merilnikom je najpomembnejše rezidualno trenje rotorja, ki se pojavi zaradi vrtničnih električnih izgub pri magnetnem lebdenju in vrtenju kroglice. Rezidualno trenje lahko izmerimo pri zelo nizkem tlaku kot ničelni signal in ga nato upoštevamo pri meritvi tlaka kot popravek. Časovna stabilnost rezidualnega trenja določa spodnjo merilno mejo SRG-merilnika. Izkaže se, da je rezidualno trenje odvisno od frekvenca vrtenja rotorja. Frekvenčno odvisnost lahko določimo z linearno regresijo merjenih vrednosti rezidualnega trenja v odvisnosti od frekvenca. Podrobneje smo raziskali stabilnost in frekvenčno odvisnost rezidualnega trenja pri različnih namestitvah dveh kroglic. Rezultati so pokazali, da je frekvenčna odvisnost slabo korelirana z absolutno vrednostjo rezidualnega trenja. V večini primerov je frekvenčna odvisnost tako velika, da jo moramo upoštevati pri izračunu popravka rezidualnega trenja pri meritvah tlakov plina pod  $1 \cdot 10^{-3}$  Pa.

Ključne besede: viskoznostni vakuumski merilnik, rezidualno trenje, meritev vakuum

Spinning rotor gauge (SRG) is well recognized in the field of low pressure metrology as precise and stable reference standard in the range from  $10^{-4}$  Pa to 1 Pa. The achievable measurement uncertainty of commercial SRG is  $\pm 0,5\%$ , assuring a suitable calibration with a higher level primary standard. Important correction of SRG is the pressure independent contribution to the measured signal known as residual drag. It is caused by eddy current losses in magnetic levitation system and metallic parts in the close vicinity of the spinning rotor, and can be determined at very low gas pressure as a zero signal of the gauge. The residual drag usually depends on the rotational frequency of the rotor. It can be approximated with a linear function which can be determined by linear regression of measured values as a function of rotational frequency. We have investigated stability and frequency dependence of residual drag for several different suspensions of two SRG rotors. Results showed that there is no correlation between frequency dependence and magnitude of residual drag. The frequency dependence is in most cases large enough to have significant influence on the measurements and has to be taken into account for precise pressure measurements below  $1 \cdot 10^{-3}$  Pa.

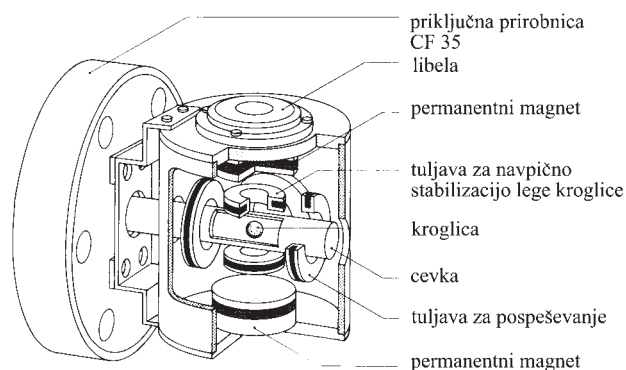
Key words: spinning rotor gauge, residual drag, vacuum measurement

## 1 UVOD

Vsakršno gibanje predmetov v plinu je ovirano zaradi trkov z molekulami plina. Parameter, ki pove, kako močno je gibanje v nekem plinu ovirano, je viskoznost. Pojav molekularnega trenja je povezan s prenosom gibalne količine med molekulami plina in gibajočim predmetom. Enako kot toplotna prevodnost je tudi viskoznost plinov pri nizkem tlaku plina (v molekularnem področju) sorazmerna s tlakom, kar lahko izkoristimo za posredno merjenje vakuum.

Shematski prerez viskoznostnega vakuumskega merilnika z lebdečo kroglico (angleško: SRG – Spinning Rotor Gauge) je prikazan na **sliki 1**. Merilni element je jeklena kroglica s premerom 4,5 mm, ki prosto lebdi v magnetnem ležaju<sup>1</sup>. Kroglica se nahaja v nekaj centimetrom dolgi cevki z notranjim premerom 8 mm. Cevka je z ene strani zaprta, z druge strani pa je privarjena v prirobnico, ki je povezana s posodo, v kateri merimo tlak plina. Merilna glava, ki zagotavlja magnetno lebdenje, pospeševanje in induktivno merjenje frekvenca kroglice,

se nahaja zunaj vakuum. Kroglico pospešimo (z vrtečim se magnetnim poljem, podobno kot pri asinhronskem elektromotorju) do frekvenca 400 Hz in nato pustimo, da se prosto vrti v razredčenem plinu. Trenje z molekulami plina kroglico zavira. Merjena veličina je časovna odvisnost kotne hitrosti kroglice  $\omega$ . Z  $\dot{\omega}$  označimo časovni



**Slika 1:** Prerez merilne glave SRG-merilnika  
**Figure 1:** Cross section of a suspension head of SRG

odvod kotne hitrosti. Definirajmo relativni pojemek kotne hitrosti ( $-\dot{\omega}/\omega$ ), ki ga bomo zaradi lažjega pisanja v nadaljevanju označevali z  $DCR$  (okrajšava iz angleških besed *Deceleration Rate*):

$$DCR = -\frac{\dot{\omega}}{\omega}$$

$DCR$  je v molekularnem področju sorazmeren s tlakom plina <sup>1</sup>:

$$p = K_p \cdot DCR \quad (1)$$

Sorazmernostni faktor  $K_p$  v **enačbi (1)** je konstanta občutljivosti SRG-merilnika:

$$K_p = \frac{a\rho}{10\sigma} \sqrt{\frac{8\pi RT}{M}} \quad (2)$$

$K_p$  vsebuje gostoto  $\rho$  in premer kroglice  $a$ , molekularsko maso  $M$  in temperaturo plina  $T$ , koeficient prenosa gibalne količine  $\sigma$  ter plinsko konstanto  $R$ . Edini parameter v **enačbi (2)**, ki ga ne moremo zanesljivo izmeriti ali napovedati je  $\sigma$ , zato ga moramo za izbrano kroglico in vrsto plina določiti s kalibracijo. V praksi se je izkazalo <sup>2</sup>, da je za plin dušik na površini gladkih jeklenih kroglic  $\sigma$  med 0,94 in 1,06. Razlike med različnimi plini so v mejah  $\pm 2\%$  <sup>3,4</sup>.

SRG-merilnik je pomemben predvsem, ker v stabilnosti prekaša vse druge merilnike v visokovakuusnem področju. V različnih raziskavah so ugotovili, da se pri pazljivem ravnanju konstanta občutljivosti SRG-merilnika v daljšem časovnem obdobju (več let) običajno spremeni za manj kot 1%. Merilnik se je v vakuumskem meroslovju uveljavil kot prenosni etalonski merilnik oziroma sekundarni referenčni merilnik <sup>5</sup>. V Laboratoriju za metrologijo tlaka na IMT je SRG-merilnik slovenski nacionalni etalon v območju med  $10^{-5}$  Pa in 0,1 Pa <sup>6</sup>. Zaradi majhnega delovnega volumna in inertnosti je SRG merilnik še posebej primeren za meritve tlaka in netesnosti v majhnih hermetičnih sistemih <sup>7,8,9</sup>.

## 2 REZIDUALNO TRENJE ROTORJA

Poleg molekularnega trenja pri SRG-merilniku opazimo tudi majhno, od tlaka in vrste plina povsem neodvisno zaviranje kroglice. To je tako imenovano rezidualno trenje, ki je navadno tako veliko, kot bi bilo trenje v plinu (dušiku) pri tlaku med  $10^{-4}$  Pa in  $10^{-2}$  Pa. Na prvi pogled se zdi, da zaradi rezidualnega trenja sploh ne moremo natančno meriti tlakov pod  $10^{-2}$  Pa. Vendar lahko rezidualno trenje predhodno izmerimo tako, da sistem izčrpamo do tlaka pod  $1 \cdot 10^{-6}$  Pa, ko postane molekularno trenje zanemarljivo v primeri z rezidualnim. Tedaj merilnik pokaže "ekvivalent tlaka", ki ustreza rezidualnemu trenju kroglice in ga navadno imenujemo "offset" ( $OFS$ ) oziroma ničelni premik:

$$OFS = K_p \cdot DCR_{p=0} \quad (3)$$

Pri meritvi tlaka dobimo pravi tlak plina  $p$ , ki je posledica molekularnega trenja tako, da v **enačbi 1** od

merjenega relativnega kotnega pospeška  $DCR$  odštejemo od tlaka neodvisni prispevek  $DCR_{p=0}$ :

$$p = K_p \cdot (DCR - DCR_{p=0}) = \Psi - OFS \quad (4)$$

Tu je  $\Psi$  prikazana vrednost tlaka brez popravka rezidualnega trenja (osnovni signal). Če popravek rezidualnega trenja izražamo v enotah tlaka ( $OFS$ ), moramo pri tem navesti, za katero vrsto plina velja, saj je sorazmernostni faktor  $K_p$  odvisen od molekularne mase plina. V nadaljevanju bomo vse vrednosti  $\Psi$  in  $OFS$  izražali v ekvivalentu tlaka dušika.

Rezidualno trenje izmerimo tako, da izčrpamo sistem s SRG-merilnikom do tlaka  $p$ , ki je nižji od negotovosti, ki jo želimo doseči, in lahko naredimo približek  $OFS = \Psi$ . Tako je za meritve v območju  $10^{-1}$  Pa navadno dovolj, da izmerimo ničelni premik pri tlaku pod  $10^{-4}$  Pa, kar je manj kot 0,1% merjenega tlaka. Za precizijske meritve nizkih tlakov pod  $10^{-3}$  Pa moramo ničelni premik izmeriti pri tlakih pod  $10^{-6}$  Pa.

Običajen postopek za popravek rezidualnega trenja, ki ga priporoča proizvajalec <sup>10</sup> v svojih navodilih, je naslednji:

1. Izčrpati sistem pod mejo ločljivosti ( $<10^{-6}$  Pa);
2. v kontrolni enoti nastaviti (resetirati) parameter  $OFS$  na vrednost 0;
3. aktivirati nov merilni cikel in izmeriti ničelni premik (prikazana vrednost pri tlaku plina  $p \approx 0$ ), na primer  $2,5678 \cdot 10^{-4}$  Pa;
4. izmerjeno vrednost vnesti v kontrolno enoto kot novo vrednost parametra  $OFS = 2,5678 \cdot 10^{-4}$  Pa

Pri vseh nadaljnjih meritvah elektronska kontrolna enota avtomatično odšteva  $OFS$  od osnovne merjene vrednosti in tako prikaže tlak s popravkom rezidualnega trenja (**enačba 4**).

Rezidualno trenje nastopi zaradi več pojavov. Poglavitni vzrok rezidualnega trenja pri komercialnih SRG-merilnikih so inducirani vrtnični tokovi <sup>11</sup>. Pri tem razlikujemo:

- vrtnične tokove, ki se inducirajo v sami kroglici, če magnetno polje, v katerem lebdi kroglica, ni simetrično okrog osi vrtenja kroglice;
- vrtnične tokove, ki se inducirajo v kovinskih delih v neposredni bližini kroglice zaradi vrteče se komponente magnetnega momenta kroglice (ta nam v detekcijskih tuljavah tudi inducira sinusni signal za merjenje kotne hitrosti).

Zaradi induciranih vrtničnih tokov se kroglici zmanjšuje njena rotacijska energija, ki se pretvarja v električno delo oziroma toplotne izgube. Čeprav so te izgube znatne v primeri z molekularnim trenjem pri nizkih tlakih, je segrevanje kroglice in njene okolice zaradi njih prav neznatno. Moč, ki ustreza rezidualnemu ali molekularnemu trenju pri  $10^{-3}$  Pa je namreč le  $10^{-10}$  W.

V praksi se je izkazalo, da velikosti rezidualnega trenja za neko kroglico ne moremo vnaprej napovedati ali izračunati, saj je odvisna tako od asimetrije magnetnega polja, v katerem lebdi kroglica, kot tudi od velikosti

in smeri vrteče se komponente magnetnega momenta kroglice. Zato je rezidualno trenje za različne kroglice različno. Prav tako dobimo pri neki kroglici vsakič drugačno vrednost rezidualnega trenja, če kroglico vzamemo iz merilne glave in jo nato ponovno namestimo vanjo. Pri vsakem lebdenju se namreč kroglica drugače orientira v magnetnem polju. Poskusi, da bi stabilizirali orientacijo kroglice v magnetnem polju in s tem tudi rezidualno trenje, se niso obnesli<sup>12</sup>. Čeprav se rezidualno trenje ne vede ponovljivo, pa je na srečo pri večini kroglic stabilno, če merilnika ne izklopimo in s tem ne prekinemo lebdenja kroglice.

### 3 EKSPERIMENTALNO DELO

Pri meritvi z SRG-merilnikom je osnovni signal vedno vsota rezidualnega in molekularnega trenja. Po naših izkušnjah lahko zavzame rezidualno trenje širok obseg vrednosti od  $5 \cdot 10^{-5}$  Pa do  $10^{-2}$  Pa, a je najpogosteje v območju med  $2 \cdot 10^{-4}$  Pa in  $8 \cdot 10^{-4}$  Pa. Rezidualno trenje je najpomembnejši popravek pri SRG-merilniku v območju zelo nizkih tlakov. Negotovost popravka je odvisna od negotovosti, ki jo dosežemo pri merjenju rezidualnega trenja, in od kratkoročne oziroma dolgoročne stabilnosti. Ker ne moremo meriti hkrati tlaka plina in rezidualnega trenja, lahko negotovost ničelnega popravka v času meritve tlaka pravilno ocenimo le, če imamo dovolj podatkov o njegovi stabilnosti.

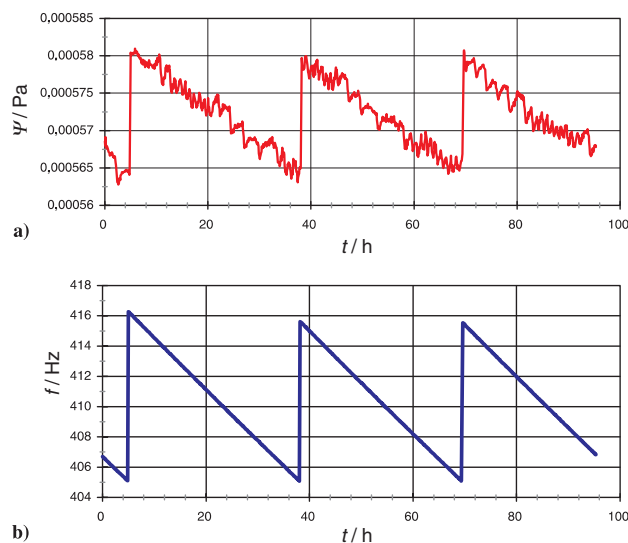
Pri našem eksperimentu smo SRG-merilnik izčrpali na ultravisokovakuumskega sistema do tlaka pod  $2 \cdot 10^{-7}$  Pa in z računalnikom neprekinjeno zapisovali frekvenco rotorja in prikazano vrednost tlaka  $\Psi$  brez popravka rezidualnega trenja. Meritev je trajala 4 dni. Pri integracijskem intervalu 30 s bi v tem času dobili več kot 10 000 prikazanih vrednosti, zato smo v programu za zajem podatkov uvedli povprečenje 10 zaporednih prikazanih vrednosti in v datoteko shranjevali povprečne vrednosti frekvence in tlaka v časovnem intervalu 300 s. S povprečenjem se je tudi zmanjšal statistični šum za faktor  $\sqrt{10}$ . V nadaljevanju eksperimenta smo izmerili frekvenčno odvisnost rezidualnega trenja pri večjem številu različnih namestitvev dveh rotorjev.

V kontrolno enoto SRG-merilnika so bili pri vseh meritvah vneseni parametri za plin dušik pri temperaturi 293 K (enačba 2).

### 4 REZULTATI IN DISKUSIJA

#### A – Frekvenčna odvisnost in časovna stabilnost rezidualnega trenja

Primer neprekinjene meritve osnovnega signala  $\Psi$  pri tlaku pod  $2 \cdot 10^{-7}$  Pa v časovnem obdobju 100 h je prikazan na **sliki 2 a**. Na **sliki 2 b** je prikazana tudi frekvenca rotorja, ki smo jo merili hkrati s  $\Psi$ . Na **sliki 2a** opazimo žagast potek signala, ki je koreliran s frekvenco

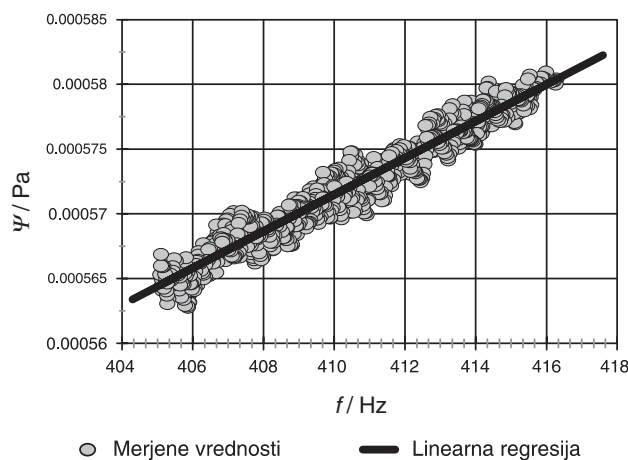


**Slika 2:** Prikazana vrednost SRG-merilnika ( $\Psi$ ) v odvisnosti od časa ( $t$ ) pri tlaku pod  $10^{-6}$  Pa (a) in potek frekvence rotorja ( $f$ ) v daljšem časovnem obdobju (b)

**Figure 2:** Displayed value of SRG ( $\Psi$ ) versus time ( $t$ ) at gas pressure below  $10^{-6}$  Pa (a), and rotor frequency ( $f$ ) (b)

rotorja. Žagast potek frekvence je povezan s samodejnim pospeševanjem rotorja. Ko pade frekvenca rotorja pod spodnjo mejo 405 Hz, elektronska kontrolna enota rotor ponovno pospeši do zgornje frekvenčne meje 415 Hz. To frekvenčno okno je pri našem tipu SRG-merilnika fiksno in ga ne moremo spreminjati. Pri vsaki pospešitvi rotorja je ničelni premik skokovito narasel in je nato enakomerno padal, ko se je frekvenca počasi s časom zmanjševala (posledica izgub energije zaradi rezidualnega trenja).

Merjene vrednosti  $\Psi$  s **sliki 2 a** lahko prikažemo na diagramu odvisnosti od frekvence (**slika 3**). V majhnem območju frekvenc med 405 Hz in 415 Hz lahko frekvenčno odvisnost aproksimiramo z linearno funkcijo.

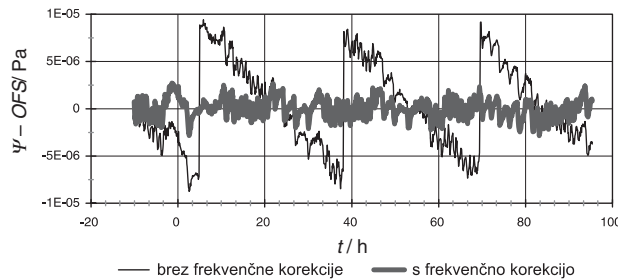


**Slika 3:** Prikazana vrednost SRG-merilnika ( $\Psi$ ) s **sliki 2 v** odvisnosti od frekvence rotorja ( $f$ )

**Figure 3:** Displayed value of SRG ( $\Psi$ ) from **Figure 2** versus rotor frequency ( $f$ )

**Tabela 1:** Rezultati linearne regresije merjenih vrednosti  $\Psi$  s slike 2  
**Table 1:** Results of linear regression of measured values of  $\Psi$  from figure 2

Rezultati linearne regresije:	
<b>Konstanta</b>	$C = -9,8878 \cdot 10^{-6}$ Pa
Standardni odmik konstante	$1,0279 \cdot 10^{-6}$ Pa
$R^2$	0,94520
Število prostostnih stopenj	1169
<b>Naklon premice</b>	$k_f = 1,418 \cdot 10^{-6}$ Pa/Hz
Standardni odmik naklona	$9,9 \cdot 10^{-9}$ Pa/Hz



**Slika 4:** Merjeni signal s popravkom rezidualnega trenja ( $\Psi - OFS$ )  
**Figure 4:** Measured signal with residual drag correction ( $\Psi - OFS$ ) (without and with a frequency dependence)

Rezultati linearne regresije merjenih točk z metodo najmanjših kvadratov so podani v tabeli 1.

Popravek rezidualnega trenja v odvisnosti od frekvence lahko izračunamo iz konstante  $C$  in naklona premice  $k_f$  iz **tabele 1**:

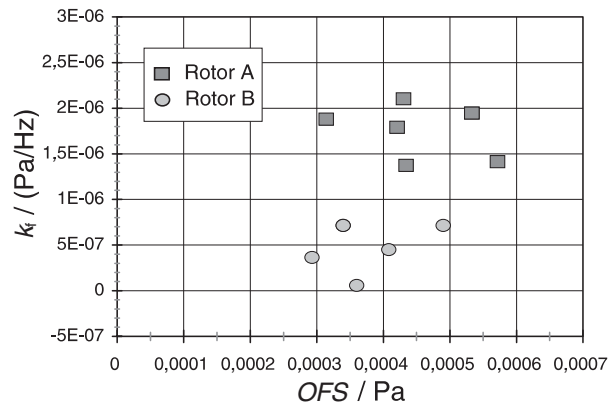
$$OFS(f) = k_f \cdot f + C \quad (5)$$

Razlika merjenih vrednosti  $\Psi$  in linearne aproksimacije popravka  $OFS(f)$  je prikazana na **sliki 4**. Preostale variacije merjenega signala z upoštevanim popravkom rezidualnega trenja so posledica nihanj temperature ter vibracij in drugih vplivov<sup>13</sup>. Ker je bil tlak v sistemu manjši od  $2 \cdot 10^{-7}$  Pa nam **slika 4** prikazuje dolgoročno stabilnost popravka rezidualnega trenja. Že na prvi

**Tabela 2:** Rezidualno trenje ( $OFS$ ) pri 410 Hz in frekvenčna odvisnost ( $k_f$ ) za dva SRG-rotorja pri različnih namestitvah v magnetnem ležaju. Pri obeh rotorjih sta bili uporabljeni ista kontrolna enota in merilna glava.

**Table 2:** Residual drag ( $OFS$ ) at 410 Hz and frequency dependence ( $k_f$ ) for different suspensions of two SRG rotors. (The same suspension head and SRG controller has been used for both rotors).

	$OFS$ (410 Hz)	$k_f$
Rotor A	$5.715 \cdot 10^{-4}$	$1.42 \cdot 10^{-6}$
	$4.339 \cdot 10^{-4}$	$1.38 \cdot 10^{-6}$
	$3.141 \cdot 10^{-4}$	$1.88 \cdot 10^{-6}$
	$4.207 \cdot 10^{-4}$	$1.80 \cdot 10^{-6}$
	$4.302 \cdot 10^{-4}$	$2.11 \cdot 10^{-6}$
Rotor B	$5.327 \cdot 10^{-4}$	$1.95 \cdot 10^{-6}$
	$3.597 \cdot 10^{-4}$	$5.95 \cdot 10^{-8}$
	$2.930 \cdot 10^{-4}$	$3.67 \cdot 10^{-7}$
	$4.901 \cdot 10^{-4}$	$7.17 \cdot 10^{-7}$
	$4.081 \cdot 10^{-4}$	$4.52 \cdot 10^{-7}$
	$3.398 \cdot 10^{-4}$	$7.16 \cdot 10^{-7}$



**Slika 5:** Ponovljivost rezidualnega trenja ( $OFS$ ) in njegove frekvenčne odvisnosti ( $k_f$ ) pri različnih namestitvah rotorja  
**Figure 5:** Repeatability of residual drag ( $OFS$ ) and frequency dependence ( $k_f$ ) for different suspensions of the rotor

pogled se zdi, da se povprečna vrednost razlike  $\Psi - OFS(f)$  v času meritve ni bistveno spremenila, vendar pa je kvantitativna ocena "na pogled" zaradi znatnega raztrosa praktično nemogoča. Ker imamo na razpolago veliko število merjenih točk, si lahko pomagamo s statističnimi metodami in tudi v tem primeru kot merilo za dolgoročno stabilnost rezidualnega trenja vzamemo naklon premice, ki jo določimo z metodo najmanjših kvadratov. Naklon premice na **sliki 4** je  $-3 \cdot 10^{-8}$  Pa/d s standardno negotovostjo  $7 \cdot 10^{-8}$  Pa/d. To pomeni, da je izračunani naklon bistveno manjši od standardne negotovosti in lahko rečemo, da je bila vrednost rezidualnega trenja z upoštevanim frekvenčnim popravkom časovno neodvisna.

**B – Ponovljivosti rezidualnega trenja za različne namestitve rotorja**

Eksperiment smo nadaljevali tako, da smo rotor zaustavili, odstranili merilno glavo in jo ponovno namestili na merilno cevko. Pri tem smo dobili novo orientacijo rotorja v magnetnem ležaju glede na os vrtenja. Postopek smo večkrat ponovili in za vsako novo namestitev določili frekvenčno odvisnost rezidualnega trenja.

Neodvisno od opisanega eksperimenta smo pridobili podatke o frekvenčni odvisnosti rezidualnega trenja še za drug SRG-rotor v drugi merilni cevki, a z isto merilno glavo in kontrolno enoto. Rezultati za oba rotorja so podani v **tabeli 2** in na **sliki 5**.

Glede na razmeroma majhno število ponovitev meritve lahko rečemo, da se vrednost ofseta pri 410 Hz bistveno ne razlikuje za rotorja A in B. Pri obeh rotorjih je bila vrednost rezidualnega trenja med  $3 \cdot 10^{-4}$  Pa in  $6 \cdot 10^{-4}$  Pa. Opazna pa je razlika v koeficientu frekvenčne odvisnosti  $k_f$ , ki je pri rotorju A bistveno večja. Pri rotorju B smo pri eni namestitvi izmerili rezidualno trenje, ki je bilo praktično brez frekvenčne odvisnosti. V vseh drugih primerih pa je bila frekvenčna odvisnost znatna, tako da je bila pri pospešitvi rotorja od 405 Hz

do 415 Hz sprememba rezidualnega trenja med  $3,7 \cdot 10^{-6}$  Pa in  $2,1 \cdot 10^{-5}$  Pa, kar ima znaten vpliv pri meritvah tlaka v področju pod  $1 \cdot 10^{-3}$  Pa.

## 5 SKLEPI

Rezidualno trenje SRG-rotorja je odvisno od frekvence vrtenja. Le včasih je frekvenčna odvisnost tako majhna, da jo lahko zanemarimo. Podobno kot velikosti rezidualnega trenja tudi frekvenčne odvisnosti ne moremo napovedati. Pri vsaki prekinitvi magnetnega lebdenja in ponovni namestitvi rotorja se naključno spremenita tako velikost rezidualnega trenja kot tudi frekvenčna odvisnost. Med njima ni zadostne korelacije, da bi lahko že iz velikosti rezidualnega trenja napovedali frekvenčno odvisnost. Poudariti pa velja, da navadno obe vrednosti ostaneta konstantni med neprekinjenim lebdenjem, tudi po večkratni pospešitvi rotorja, tako da lahko zanesljivo izračunamo popravke rezidualnega trenja pri meritvah tlaka.

## 6 REFERENCES

- <sup>1</sup> J. K. Fremerey, J. Vac. Sci. Technol. A3, (1985), 1715
- <sup>2</sup> S. Dittmann, B. E. Lindenau, C. R. Tilford, J. Vac. Sci. Technol. A7, (1989), 3356
- <sup>3</sup> J. K. Fremerey, Vacuum, 32, (1982), 685
- <sup>4</sup> G. Comsa, J. K. Fremerey, B. Lindenau, G. Messer, P. Röhl, J. Vac. Sci. Technol. 17, (1980), 642
- <sup>5</sup> B. Erjavec, J. Šetina, L. Irmančnik-Belič, Mater. tehnol., 35, (2001), 143
- <sup>6</sup> J. Šetina, B. Erjavec, L. Irmančnik-Belič, Mater. tehnol., 35, (2001), 321
- <sup>7</sup> J. Šetina, R. Zavašnik, V. Nemanič, J. Vac. Sci. Technol. A5, (1987), 2650
- <sup>8</sup> V. Nemanič, J. Šetina, J. Vac. Sci. Technol. A17, (1999), 1040
- <sup>9</sup> B. Erjavec, Vacuum, 64, (2001), 15
- <sup>10</sup> SRG 2CE, Instruction Manual, MKS Instruments, ZDA
- <sup>11</sup> J. K. Fremerey, Rev.Sci.Instrum. 43, (1972), 1413
- <sup>12</sup> C. Suk-Ho, S. Dittmann, C. R. Tilford, J. Vac. Sci. Technol. A8, (1990), 4079
- <sup>13</sup> T. Bock, K. Jousten, Vacuum, 81, (2006), 234