

## DYNAMICKÉ NAMÁHANIE ROTORA ŠPIRÁLOVÉHO ČERPADLA

### DYNAMIC STRESS OF CENTRIFUGAL SPIRAL PUMP

Michal VARCHOLA<sup>1</sup>, Peter TÓTH<sup>2</sup>, Branislav KNÍŽAT<sup>1</sup>

#### *Abstrakt*

Príspevok sa zaoberá analýzou silového namáhania rotora radiálneho hydrodynamického čerpadla od radiálnej sily generovanej nerovnomerným rozložením tlaku a hybnosti po obvode difúzora- špirály. Na základe teoretickej analýzy a experimentálneho merania dynamického účinku od tlaku, hybnosti a nevyvažkov je stanovený priebeh časovej závislosti radiálnej sily od režimu prevádzky.

**Kľúčové slová:** radiálne zaťaženie, hydrodynamické čerpadlo.

#### *Abstract*

Information about the radial thrust on the impeller of the hydrodynamic pump are necessary for bearings design, estimating the gaps in sealing rings and for cyclic strain of the shaft. The paper deals with an experimental investigation of the radial thrust by the original method and shows on the influence of some construction factors, which affect both direction and size of the radial thrust. In the paper is carried out the FFT analyse in order to estimate the significance and influence of some factors on dynamic thrust from radial power.

**Keywords:** radial thrust, hydrodynamic pump.

### ÚVOD

Pre zvyšovanie parametrov čerpadiel a súčasne pre znižovanie ich hmotnosti je charakteristické zvyšovanie obvodových rýchlostí obežného kola u jednostupňových čerpadiel alebo zvyšovanie otáčok pri súčasnom zachovaní alebo zmenšení priemeru obežného kola. Tento spôsob súčasne znižuje hmotnosť čerpadla resp. zvyšuje prenášaný príkon na jednotku hmotnosti. Na strane druhej pri vysokých otáčkach sa zvyšuje nebezpečenstvo vzniku resp. zvýšenia kmitania rotora s nedovolenými amplitúdami. Vo vysokotlakých čerpadlách súčasne narastá celková napätosť základných detailov rotora a statora. Pri týchto podmienkach znalosť kmitania rotora resp. jeho cyklické namáhanie nadobúda veľký význam. Životnosť stroja a jeho spoľahlivosť je daná, okrem správnej pevnostnej dimenzie jednotlivých častí, predovšetkým jeho prevádzkovými parametrami najmä z hľadiska celkového namáhania. Sily spôsobujúce priehyb hriadeľa - radiálne sily sú z tohto pohľadu najdôležitejšie. Tento príspevok je zameraný na experimentálnu analýzu radiálnej sily špirálového čerpadla z pohľadu režimu práce aj z pohľadu možných nevyvažkov. Súčasne analyzuje dôsledky týchto časovo premenlivých síl na celkové podmienky práce čerpadla nielen z ustálených hodnôt, ale aj z ich časovej závislosti.

<sup>1</sup> prof. Ing. Michal VARCHOLA, CSc., doc. Ing. Branislav KNÍŽAT, CSc., KHS, Sjf STU v Bratislave, [michal.varchola@stuba.sk](mailto:michal.varchola@stuba.sk), [knizat@dec50.vm.stuba.sk](mailto:knizat@dec50.vm.stuba.sk)

<sup>2</sup> Ing. Peter TÓTH, Slovenský plynárenský priemysel a.s. Nitra, [peter.toth2@spp.sk](mailto:peter.toth2@spp.sk)  
Lektoroval: prof. Ing. Mária ČARNOGURSKÁ, CSc., KET, Sjf TU v Košiciach, [maria.carnogurska@tuke.sk](mailto:maria.carnogurska@tuke.sk)

Spôľahlivosť a životnosť stroja vo všeobecnosti je ovplyvňovaná predovšetkým jeho predpokladmi na poruchovosť. Tá je determinovaná spoľahlivosťou súčiastok ale aj prevádzkovými pomermi v ktorých daný stroj pracuje.

Práve prevádzkové pomery môžu v rozhodujúcej miere ovplyvniť životnosť jednotlivých dielov. Radiálna sila, ale najmä jej cyklický priebeh môže byť jedným zo zdrojov takýchto porúch. Predmetom tohto príspevku je poukázať nato, že pri prevádzkovaní čerpadla s nevývažkami pri neoptimálnych prietokoch sú splnené podmienky na zníženie spoľahlivosti aj životnosť čerpadla. Okrem toho v príspevku je prevedená FFT analýza, ktorá poukazuje na možné dôsledky dynamického namáhania z radiálnej sily čerpadla.

## RADIÁLNA SILA ČERPADLA

Vo vysokotlakých a vysokootáčkových čerpadlách so špirálovým difúzorom hydrodynamická radiálna sila, účinkujúca na rotor resp. obežné koleso môže nadobúdať značných hodnôt. Znalosť radiálnych síl je nevyhnutná podmienka pre optimálne dimenzovanie mechanickej časti čerpadla a vynikajúcim podkladom pre posúdenie vlastností čerpadla z hľadiska jeho spoľahlivosti a životnosti.

Na rotor hydrodynamického čerpadla pôsobia tieto principiálne rozdielne radiálne sily.

- Hydrodynamická sila od nerovnomernosti parametrov tlaku a rýchlosti na obvode obežného kolesa [2], [3]. Táto hydrodynamická sila je spôsobená štruktúrou prúdenia ako v obežnom kolese tak aj v difúzore. Zjednodušene povedané, hydrodynamická sila je dôsledkom osovej asymetrie tlaku a vektora rýchlosti na výstupe z obežného kolesa. Ako vieme špirála môže zabezpečiť osovú symetriu iba pri jednom spravidla optimálnom režime čerpadla. Pri prietokoch menších ako optimálny sa špirála chová ako difúzor s narastaním tlaku po obvode a pri prietokoch väčších ako optimálny sa chová ako konfúzor s poklesom tlaku po obvode od nosa špirály.
- Vztlaková sila v tesniacich kruhoch resp. úzkych medzerách analogická sile v klzných ložiskách. Máme na mysli javy, vznikajúce v klinovej medzere dôsledkom ktorých je radiálna únosnosť klzného ložiska. V tesniacom kruhu obežného kolesa vzniká efekt opačný. V dôsledku excentricity vznikajúca radiálna únosnosť zaťažuje ložiská čerpadla. Táto dopĺňajúca sila vzniká teda v dôsledku montážnej excentricity, alebo ako dôsledok priehybu hriadeľa od hydrodynamickej radiálnej sily.
- Silový účinok vznikajúci z mechanických nevývažkov, ktoré spôsobujú z titulu osovej asymetrie hmotnosti rotora radiálne zaťaženie mechanickej časti. Aj napriek dokonalému dynamickému vyváženiu rotora po určitej prevádzkovej dobe, najmä ak sa čerpadlo používa na nečisté kvapaliny, dochádza k nerovnomernému opotrebeniu a vzniku nevývažkov.

V reálnom čerpadle pôsobia všetky efekty súčasne. Ich exaktné, teoretické zvládnutie vo všetkých detailoch je problematické.

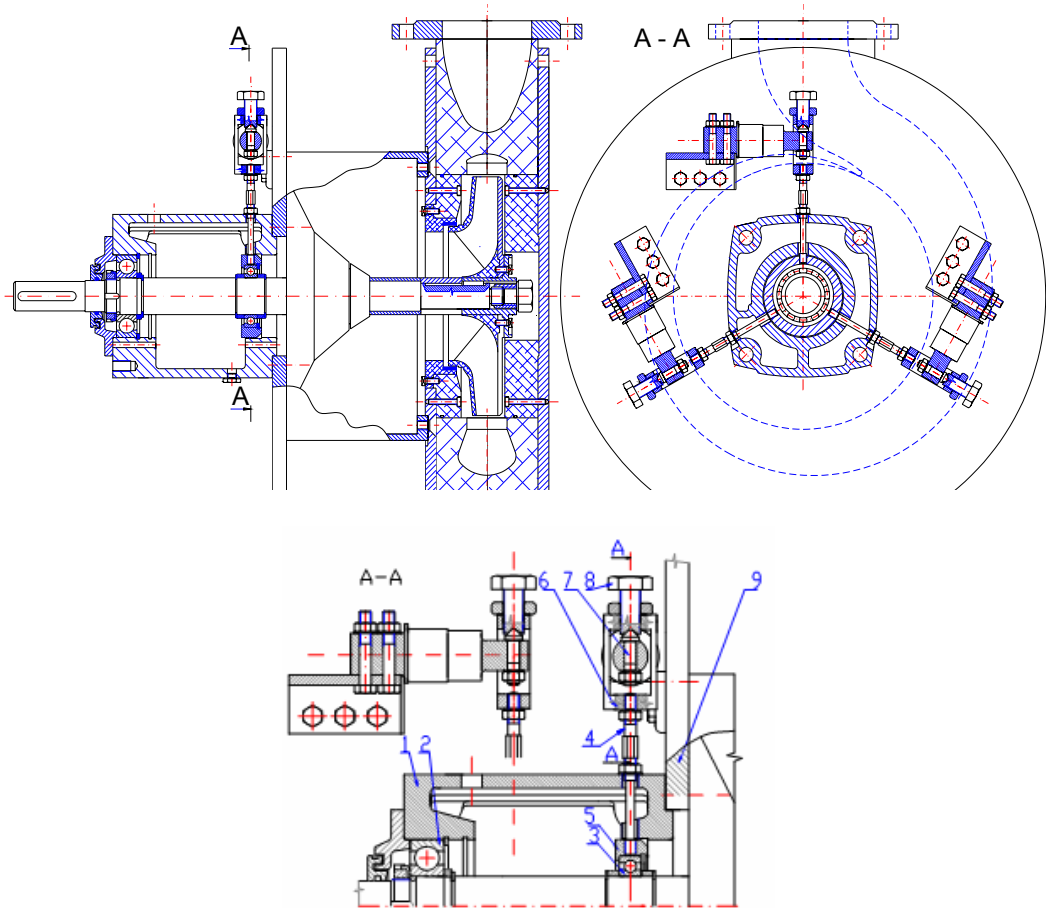
Pôvodom radiálnych hydrodynamických síl je, ako bolo uvedené, asymetria hybnosti a tlaku po povrchu rotora čerpadla t.j. obežného kolesa. Pre zložky radiálnej sily možno odvodiť vzťahy [1], [9]

$$\begin{aligned}
 F_{r,x} &= -b_2 \cdot R_2 \cdot \left[ \int_0^{2\pi} p_2 \cdot \cos(\varphi) \cdot d\varphi + \rho \cdot \left( \int_0^{2\pi} c_{2r}^2 \cdot \cos(\varphi) \cdot d\varphi - \int_0^{2\pi} c_{2r} \cdot c_{2u} \cdot \sin(\varphi) \cdot d\varphi \right) \right], \\
 F_{r,y} &= -b_2 \cdot R_2 \cdot \left[ \int_0^{2\pi} p_2 \cdot \sin(\varphi) \cdot d\varphi + \rho \cdot \left( \int_0^{2\pi} c_{2r}^2 \cdot \sin(\varphi) \cdot d\varphi + \int_0^{2\pi} c_{2r} \cdot c_{2u} \cdot \cos(\varphi) \cdot d\varphi \right) \right].
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

Z uvedeného rozboru je zrejmé, že vektor radiálnej sily t.j. jej veľkosť a smer bude závisieť od asymetrie hydrodynamických veličín na rozhraní obežné koleso-difúzor.

Ako vidíme exaktné stanovenie radiálnej sily vyžaduje znalosť rozloženia rýchlostí a tlakov po obvode obežného kolesa. Tieto údaje sú pri návrhu čerpadla v širokom rozsahu práce čerpadla neznáme.

## EXPERIMENTÁLNE ZARIADENIE NA MERANIE RADIÁLNEJ SILY



Obr.1 Experimentálne zariadenie na meranie radiálnej sily

Na realizáciu experimentálneho zisťovania radiálnej sily bolo použité modelové špirálové čerpadlo ktorého rez je na obr.1. Rotor čerpadla je uložený v mechanickej časti čerpadla ktorá je z čerpadla META (SIGMA). Modelové čerpadlo je konštruované tak, aby mechanická časť umožňovala aplikáciu širokého rozsahu obežných kolies a špirál v dostatočnom rozsahu rýchlobežnosti. Teleso čerpadla slúži na uchytenie zariadenia pre snímanie radiálnej sily zo strany mechanickej časti a na umiestnenie hydraulickej časti čerpadla zo strany druhej.

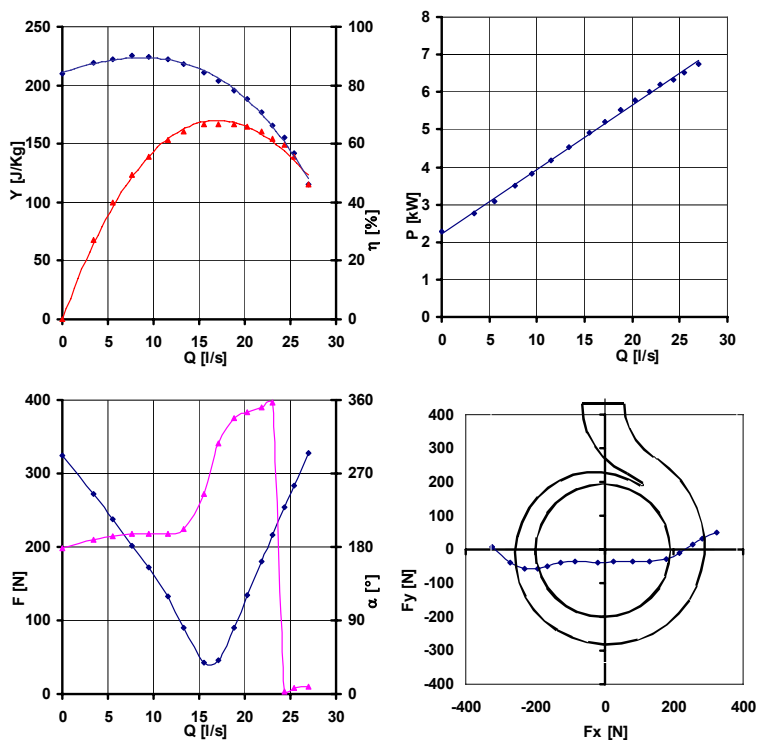
Princíp meracieho zariadenia (obr.1) spočíva v prenose sily v prednom ložisku (3) ako reakcie na zaťaženie hriadeľa radiálnou silou, mimo ložiskový priestor čerpadla na tri snímače (7). Ložisko (3) je uložené v objímke (5), ktorá je uvoľnená z kozlíka (1) s dostatočnou radiálnou

vôľou. V objímke (5) sú upevnené tri ťahadlá (4) pod vzájomným uhlom  $120^\circ$ , ktoré sa pomocou polohovacích zariadení (6) bodovo dotýkajú s kužeľovým hrotom tenzometrických snímačov (7). Prenos radiálnej sily na tenzometrické snímače je realizovaný iba ťahom prepätých ťahadiel (4). Detailný popis konštrukcie meracieho zariadenia, metódy merania a vyhodnotenia radiálnej sily hydrodynamického čerpadla je popísaný v [1].

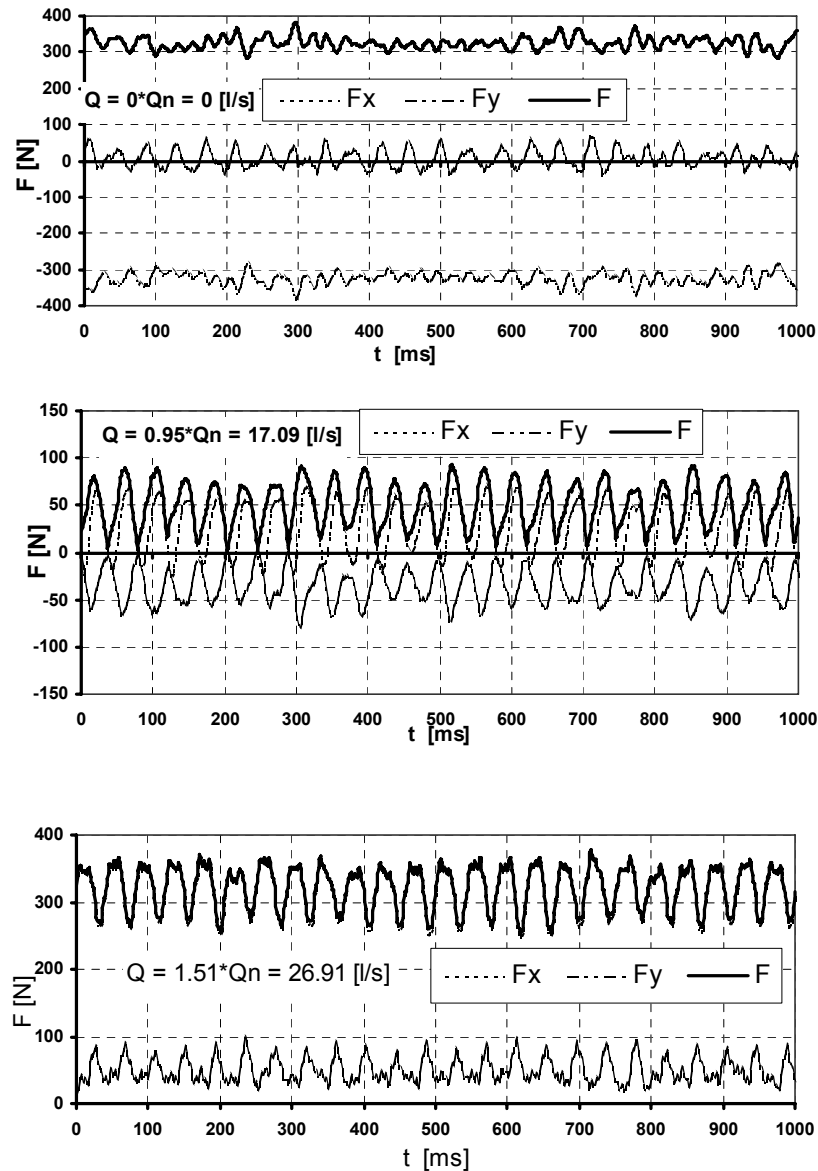
## RADIÁLNA SILA PRI RÔZNYCH REŽIMOCH PRÁCE ČERPADLA

Z bohatých experimentálnych výsledkov realizovaných s tromi obežnými kolesami v kombinácii s tromi špirálami, tento príspevok dokumentuje priebeh radiálnej sily a smeru jej pôsobenia pri celom rozsahu možných prevádzkových režimov práce na jednej alternatíve. Dôležitým experimentálnym poznatkom sú časové priebehy sily a frekvenčná analýza dynamicky sa meniacich parametrov.

Radiálna sila  $F_r$  a jej smer  $\alpha$  (meraný od osi x obr.2) boli vyhodnocované spolu s výkonovými parametrami ako funkcie prietoku čerpadla.

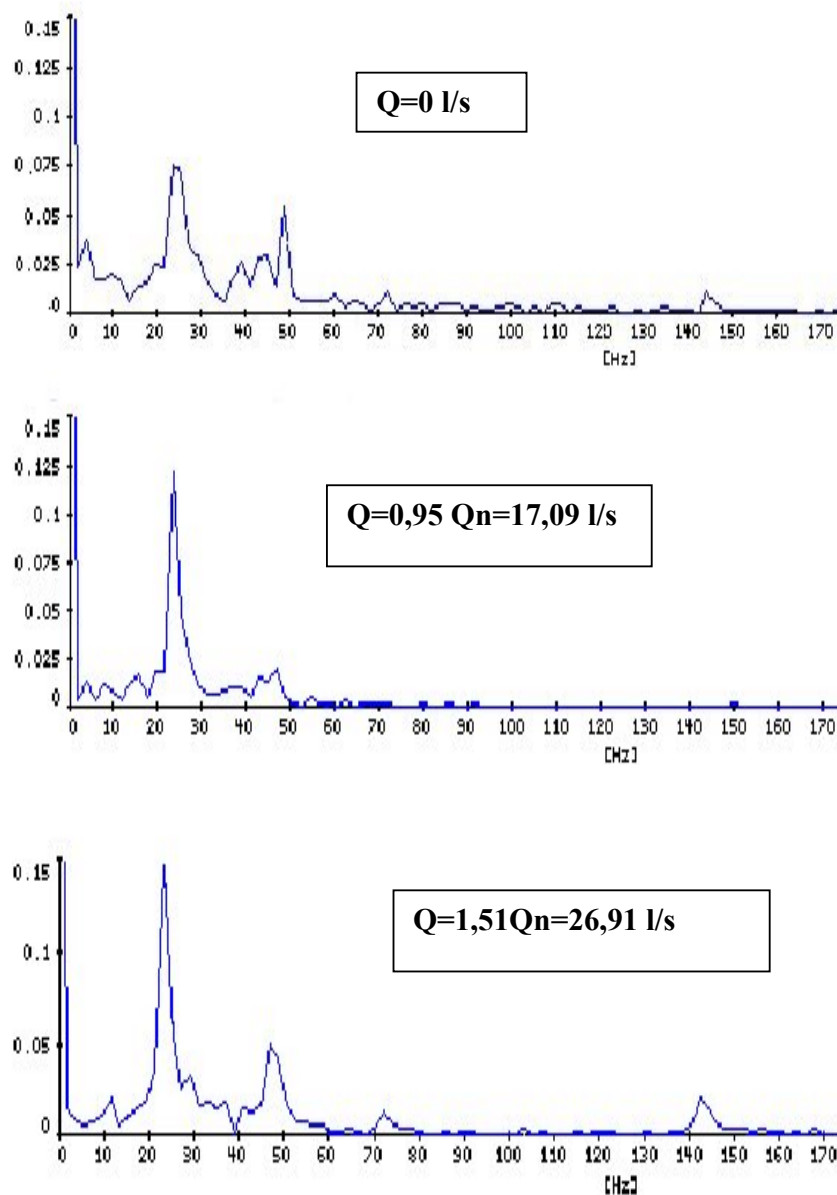


Obr.2 Charakteristika čerpadla, veľkosť a smer radiálnej sily čerpadla



Obr.3 Časový priebeh radiálnej sily

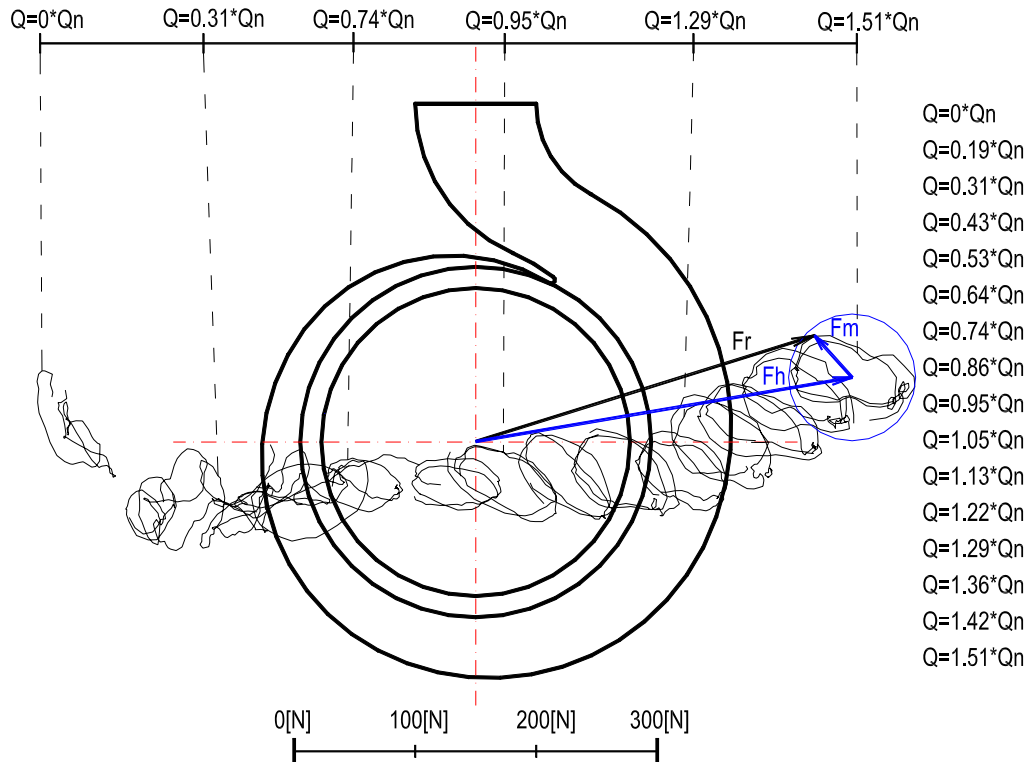
Pre lepšie zobrazenie charakteru pôsobenia radiálnej sily  $F_r$  je zostrojený graf vektora radiálnej sily, kde spojením počiatku súradného systému s bodom na príslušnej krivke dostaneme veľkosť a orientáciu radiálnej sily pôsobiacej na hriadeľ čerpadla vzhľadom na špirálu (obr.2).



Obr.4 Frekvenčná analýza radiálnej sily čerpadla

Na obr.3 sú uvedené výsledky časového priebehu silových pomerov pri nulovom prietoku, v okolí optimálneho bodu čerpadla a vpravo od optimálneho bodu čerpadla. Z rozboru uvedeného obrázku možno dedukovať, že najviac nebezpečným aj z hľadiska silového kmitania je režim s nulovým prietokom. Maximálna veľkosť amplitúdy časovo premenlivej zložky sily, je ako vidieť z obrázku, nezávislá od prietoku čerpadla. Na obr.4 je uvedená frekvenčná analýza uvedených meraní, z ktorej vidieť pri všetkých prevádzkových režimoch najvýznačnejšiu

frekvenciu pri 24.16 Hz, čo predstavuje otáčky čerpadla pri experimente. Dynamická sila s touto frekvenciou je indukovaná v dôsledku osovej asymetrie hmotnosti rotora čerpadla.



Obr.5 Priebeh radiálnej sily počas dvoch otáčok čerpadla pri rôznych režimoch práce čerpadla

## ZÁVER

Vyššie významné frekvencie sú ako vidieť celočíselným násobkom frekvencie otáčok hriadeľa. Z vyšších frekvencií vidieť pri 145 Hz vplyv neoptimálneho obtekania reálneho počtu lopatiek (6) obežného kola v mimooptimálnych režimoch. V jeho dôsledku interakcie rotora a statora lopatky indukujú prídavnú cyklickú silu, ktorej amplitúda je však menšia ako amplitúda pri frekvencii 24.16 Hz a zanedbateľne malá pri optimálnom režime čerpadla. Lepší obraz o pôsobení radiálnej sily na hriadeľ čerpadla vidieť z obr.5, kde vidieť jej priebeh počas dvoch otáčok hriadeľa. Z obrázku vidieť, že výsledný vektor radiálnej sily sa skladá z dvoch dynamických cyklicky sa meniacich zložiek a to hydrodynamickej sily  $F_h$  a mechanickej zložky sily  $F_m$  od nevyvažku. Dynamická zložka  $F_h$  vzniká v dôsledku nerovnomerného rozloženia hydraulických parametrov t.j. tlaku a hybnosti kvapaliny na výstupe obežného kola. Dynamická zložka  $F_m$  vzniká v dôsledku rotácie mechanického nevyvažku rotora čerpadla.

V oblasti prietokov menších ako optimálny a hlavne v blízkosti nulového prietoku vidieť značný vplyv nestacionárneho a pulzačného prúdenia na rozhraní obežného kola a špirály. Tento charakter prúdenia ma značný vplyv na zaťaženie hriadeľa. Vektorový priebeh radiálnej sily je v jeho dôsledku v tejto oblasti značne odlišný od iných režimov práce čerpadla. Práve pri režimoch v ktorých je prietok blízky nule má výsledná sila v značnej miere stochastický charakter

## LITERATÚRA

- [1] VARCHOLA, M., TÓTH, P.: *Metóda merania a vyhodnotenia radiálnej sily hydrodynamického čerpadla*, Strojné inžinierstvo '98, Bratislava 1998, s. 441-446
- [2] VARCHOLA, M.: *Prúdové pomery na výstupe z obežného kola špirálového čerpadla pri rôznych režimoch práce*, Zborník vedeckých prác SjF v Bratislave, 21, 1993, s. 173-185
- [3] VARCHOLA, M.: *Radiálna sila hydrodynamického čerpadla so špirálovým difúzorom*, Celoštátny seminár Katedier termomechaniky a mechaniky tekutín, Dom techniky CSVTS Brno 1988, s. 97-102
- [4] STEPANOFF, A.J.: *Radial- und Axialpumpen*, Springer-Verlag 1959
- [5] STEPANOFF, A.J.: *Centrifugal and Axial Flow Pumps*, 2nd edition, John Wiley and Sons, New York 1957
- [6] AGOSTINELLI, A., NOBLES, D., MOCKRIDGE, C.R.: *An Experimental Investigation of Radial Thrust in Centrifugal Pumps*, Transactions of the ASME, Series A, 1960, p. 120-126
- [7] BIHELLER, H.J.: *Radial Force on the Impeller of Centrifugal Pumps with Volute, Semivolute and Fully Concentric Casing*, Transactions of the ASME, Series A 1965, p. 319-323
- [8] LOMAKIN, A.A.: *Centrobežnyje i osevyje nasosy*, Mašinstrojenie, Moskva 1966, s. 217-224
- [9] TÓTH, P.: *Vplyv interakcie rotora a statora na radiálnu silu hydrodynamického čerpadla*, 2001