

## **EXPERIMENTAL ANALYSIS OF DYNAMIC BEHAVIOUR OF TESTING PUMP**

**E. Malenovský\*, F. Pochylý\***

**Summary:** *The testing pump with one water-pump impeller is described in this contribution. During rotation it is possible to analyze the forces and moments which impact the runner. Radial forces are measured in four radial places and axial force is measured in one place. Main analysis is provided in time and frequency domain. Only for the possibility to do the detail analysis are measured accelerations in two radial and one axial directions. Results of analysis are statistical values, such as medium values and root of deviation mean square of forces and moments and complex Fourier spectra.*

### **1. Úvod**

Rotorová soustava se skládá z čerpadlové a pohonné jednotky. Vlastní čerpadlo je tvořeno jedním stupněm a je přes pružnou spojku spojeno s pohonovou jednotkou dynamometru. Hřídel čerpadla, kde na převislém konci je oběžné kolo, je přes valivá ložiska a poddajnou část připojen k tuhému rámu čerpadla. Na poddajné části jsou instalovány odporové tenzometrické snímače pro měření sil přenášených do základu. Tyto snímací elementy jsou doplněny snímačem axiální síly. Celkový pohled na zkušební stand je na obr. 1 a schéma čerpadlové části je na obr. 2. Radiální síly jsou měřeny v ložisku A a B čtyřmi siloměry (celkem 8). Axiální síla jedním siloměrem v ložisku B. Osy siloměrů svírají 45 stupňů od vodorovných os a v každém směru vždy dva siloměry. V ložisku A jsou umístěny siloměry s rozsahem do 9806 N, v ložisku B v radiálním směru s rozsahem do 4903 N a v axiálním s rozsahem do 4903 N.

V článku jsou uvedeny výsledky analýzy za rotace s tekutinou. První část experimentální analýzy byla zaměřena na stanovení frekvenčně modální vlastnosti za klidu i

---

\* doc. Ing. Eduard Malenovský, DrSc., Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Technická 2, 616 69 Brno, Česká Republika, tel. +420541142855, fax +420541142876, e-mail: [malenovsky@umt.fme.vutbr.cz](mailto:malenovsky@umt.fme.vutbr.cz), prof. Ing. František Pochylý, CSc., Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Technická 2, 616 69 Brno, Česká Republika, tel: +420541142335, fax.: +420541142329 e-mail: [pochyly@khzs.fme.vutbr.cz](mailto:pochyly@khzs.fme.vutbr.cz)

za rotace a posouzení funkce siloměrů opět za klidu a za rotace. Výsledky frekvenčně modálních vlastností lze shrnout v závěru, že vlastní frekvence podélného kmitání je 19.8 Hz, vlastní frekvence torzního kmitání 24.8 Hz a první frekvence ohybového kmitání 68.5 Hz. Ověřená metodika výpočtu silových účinků působících na kole byla využita pro analýzu za čerpadla rotace s tekutinou.

Při analýze za rotace s tekutinou bylo čerpadlo provozováno při konstantních otáčkách 600 1/min (10 Hz) a postupně byl zvyšován průtok z nulové hodnoty až na hodnotu 15 l/s s krokem 1.5 l/s. Při každém průtoku byl zaznamenán signál ze siloměru s vzorkovací frekvencí 2400 Hz v čase 16s. Měření bylo doplněno záznamem 3 akcelerometrů. Dva byly umístěny pro analýzu zrychlení v radiálním směru a jeden v axiálním. Akcelerometry byly na siloměrech.

## 2. Metodika měření

Na čerpadle jsou v ložisku B nainstalovány 4 siloměry typu U2A/4093 pro měření radiálních sil a jeden siloměr stejného typu pro měření axiálních sil. Dále jsou na čerpadle v ložisku A instalovány 4 siloměry typu U2A/4093. Všechny snímače jsou fy. Hottinger. K vyhodnocení sil je použit software Spider 8, fy. Hottinger.

Cílem analýzy za rotace je stanovení sil a momentů působících na oběžném kole. Na oběžné kolo působí odstředivé účinky od nevyvahy (síla a moment) a silové účinky od tekutiny (síla i moment). Na základě změřených sil v ložiskových stojanech byla stanovena síla ve vodorovném, svislém a axiálním směru a momenty k vodorovné a svislé ose.

Všechny veličiny se skládají ze stacionární a nestacionární složky. Stacionárním složkám odpovídají střední hodnoty. Tyto byly vyhodnoceny v závislosti na průtoku. Základem pro vyhodnocení dynamických účinků byla analýza ve frekvenční oblasti, zejména stanovení Fourierových spekter.

K vyhodnocení byl použit programový systém Matlab. Pro stanovení středních hodnot funkce „mean“, a pro analýzu ve frekvenční oblasti zejména funkce „fft“. Rovněž celý software pro zpracování měřená byl zpracován v programovém prostředí Matlab, včetně grafického zpracování.

Pro záznam signálů zrychlení z akcelerometrů byl použit měřicí systém Pulse. V tomto systému bylo provedeno i částečné zpracování naměřených dat, které spočívalo zejména v konverzi do formátu, který lze zpracovat v programovém systému Matlab.

## 3. Výsledky experimentální analýzy

Jak již bylo uvedeno, měřeny byly síly na 5 siloměrech a zrychlení na 3 akcelerometrech. Dále budou uvedeny výsledky analýzy siloměrů a akcelerometrů.

### 3.1 Analýza sil

Během měření byly zaznamenány celkové hodnoty sil, které se skládají ze střední (statické) složky a časově proměnné dynamické. Tomuto odpovídalo i zpracování příslušných veličin. Pouze pro představu charakteru analyzovaných dějů jsou uvedeny výsledky analýzy v časové

oblasti při průtoku 15 l/s. Pro informaci je na obr. 3 je uveden časový záznam síly na kole ve vodorovném směru. Jak již bylo uvedeno, analýza v časové oblasti se skládala ze stanovení středních hodnot a dynamické složky. V dalším bude nyní pozornost zaměřena na analýzu středních hodnot sil a momentů působících na kole. Na obr. 4 je nakresleno zobrazení vektoru radiální síly v rovině kolmé na osu rotace. Čísla 1 – 11 představují jednotlivé průtoky 0 – 15 l/s s krokem 1.5 l/s. Orientace vektorů je taková, že šipky u vektorů jsou u čísel. Na obr. 5 je nakresleno zobrazení vektoru momentu v rovině kolmé na osu rotace. Čísla 1 – 11 představují jednotlivé průtoky 0 – 15 l/s s krokem 1.5 l/s. Orientace vektorů je taková, že šipky u vektorů jsou u čísel a celkový pohled je ze strany čerpadla.

Z této analýzy lze vyvodit závěr, že radiální síla s narůstajícím průtokem do hodnoty cca 11 l/s klesá a pak narůstá. Orientace vektoru síly je do dolní poloviny čerpadla, přičemž při průtoku cca 11 l/s, tedy při nejmenší radiální síle směřuje na opačnou stranu než je výtlak čerpadla. Moment do průtoku cca 5 l/s klesá a pak s narůstajícím průtokem začne narůstat. Vektor momentu je orientován do levé části čerpadla.

Podstatně širší pohled na analýzu působících sil představuje analýza. K tomu byla použita funkce Matlabu „fft“. V tomto případě nelze provádět analýzu radiální síly, ale je podstatně vhodnější analýza ve vodorovném a svislém směru odděleně. Na obr. 6 je nakreslen kaskádový diagram síly ve vodorovném směru. Obdobně byl analyzován i svislý a axiální směr. Z kaskádových diagramů je zřejmé, že v radiálním směru je dominantní amplituda na otáčkové frekvenci. Dále je zřejmé ze všech siloměrů, že při nulovém průtoku (zavřeném čerpadle) jsou buzeny složky u vyšších frekvencí. S přibývajícím průtokem podíl těchto složek pro vodorovnou i svislou sílu klesá a narůstá amplituda sil na otáčkové frekvenci. Z kaskádového diagramu axiální síly je zřejmé vybudění i na relativně vyšších frekvencí cca 175 Hz. S ohledem na vybudění nižších frekvenčních složek je na obr. 7 nakreslen detail Fourierova spektra pro nulový průtok, avšak pouze do frekvence cca 100 Hz. Z kaskádových diagramů i detailů Fourierových spekter je zřejmý výrazný podíl amplitud na násobcích otáčkové frekvence. Z analýzy kmitání čerpadla bez tekutiny a za klidu byla stanovena první vlastní frekvence při kmitání v radiálním směru (ohybové kmitání) 68 Hz. Vzhledem k tomu, že za rotace nebyla zaznamenána na této frekvenci zvýšená amplituda, ale pouze na siloměrech v radiálním směru, lze tuto frekvenci považovat za vlastní frekvenci kmitání v radiálním směru.

Znalost frekvenčních závislostí sil a momentů ve dvou na sobě kolmých směrech umožňuje provést sestavení tzv. komplexního Fourierova spektra. Toto spektrum zahrnuje analýzu podílu jednotlivých frekvenčních složek pro souběžnou a protiběžnou precesi. Analýza zátěžných účinků, tedy sil a momentů v tomto zobrazení pak představuje podíl na buzení souběžné a protiběžné precese. Na obr. 8 je nakresleno komplexní spektrum pro síly. Oblast se zápornou frekvencí představuje buzení protiběžné precese a oblast s kladnou buzení souběžné. Diagram je zkonstruován v závislosti na průtoku, přičemž amplitudy představují síly. Z těchto obrázků je zřejmé, že síly budí v převážné míře protiběžnou precesi a momenty budí téměř stejnými amplitudami obě precese.

### 3.2 Analýza akcelerometrů

Během měření byly zaznamenány signály ze tří akcelerometrů. Dva byly instalovány na siloměrech v radiálních na sobě kolmých směrech a jeden na siloměru v axiálním směru.

Vyhodnocení zrychlení je obdobné vyhodnocení dynamické složky sil. V tomto případě jsou zpracovávána zrychlení ve vodorovném a svislém směru. Na obr. 9 je nakreslen

kaskádový diagram zrychlení v radiálním směru. Z kaskádových diagramů bylo zřejmé, že výrazné odezvy jsou zejména v oblasti cca 175 Hz. Výraznější jsou rovněž amplitudy na otáčkové frekvenci. Z těchto diagramů je zřejmé, že ve velikostech zrychlení pro jednotlivé průtoky není výrazný rozdíl. Aby bylo možno porovnat Fourierova spektra sil a zrychlení, je na obr. 10 nakreslen detaily spekter pouze pro nulový průtok, tedy stejně jako při analýze sil.

Z porovnání detailů Fourierových spekter pro síly a zrychlení je zřejmé, že ve spektrech pro zrychlení nejsou pouze výrazné složky otáčkové frekvence. Ve spektru zrychlení v axiálním směru je výrazná složka na frekvenci cca 21 Hz. Tato složka není výrazná ve spektrech ve vodorovném a axiálním směru. S největší pravděpodobností se jedná o vlastní frekvenci kmitání v axiálním směru. Ve všech spektrech je výrazněji zastoupena rovněž složka na frekvenci cca 25 Hz. V tomto případě by se mohlo jednat o vlastní frekvenci torzního kmitání. Podíl tohoto tvaru kmitu v příčných i podélném směru by naznačoval vazbu mezi torzním, příčným a podélným kmitáním. Nevyjasněnou zůstává složka kmitání ve vodorovném směru na frekvenci cca 16.5 Hz a rovněž složky na vyšších frekvencích cca 175 Hz.

#### 4. Závěr

V článku je popsán zkušební stend pro analýzu silového zatížení oběžného kola jednostupňového čerpadla za rotace s vodou. Čerpadlo bylo provozováno při konstantních otáčkách 600 1/min a s proměnným průtokem 0 – 15 l/s s krokem 1.5 l/s. Analýza byla zaměřena zejména na stanovení závislosti sil působících na oběžné kolo v závislosti na průtoku. Výsledky jsou doplněny měřeními zrychlení na siloměrech.

- Z analýzy středních hodnot sil a momentů lze vyvodit závěr, že radiální síla s narůstajícím průtokem do hodnoty cca 11 l/s klesá a pak narůstá. Orientace vektoru síly je do dolní poloviny čerpadla, přičemž při průtoku cca 11 l/s, tedy při nejmenší radiální síle směřuje na opačnou stranu než je výtlač čerpadla. Moment do průtoku cca 5 l/s klesá a pak s narůstajícím průtokem začne narůstat. Vektor momentu je orientován do levé části čerpadla.
- Z frekvenční analýzy nestacionárních sil je zřejmé, že v radiálním směru je dominantní amplituda na otáčkové frekvenci. Dále je zřejmé ze všech siloměrů, že při nulovém průtoku (zavřeném čerpadle) jsou buzeny složky u vyšších frekvencí. S přibývajícím průtokem podíl těchto složek pro vodorovnou i svislou sílu klesá a narůstá amplituda sil na otáčkové frekvenci. Z frekvenční analýzy axiální síly je zřejmé vybudění i na relativně vyšší frekvenci cca 175 Hz. Z kaskádových diagramů i detailů Fourierových spekter je zřejmý výrazný podíl amplitud na násobcích otáčkové frekvence. Vlastní frekvence kmitání v radiálním směru je cca 62.5 Hz. Ze závislosti radiální síly je celkově zřejmý její nárůst s narůstajícím průtokem a pro axiální sílu její pokles.
- Z analýzy zrychlení je zřejmé, že výrazné odezvy jsou zejména v oblasti cca 175 Hz. Výraznější jsou rovněž amplitudy na otáčkové frekvenci, a dále je zřejmé, že ve velikostech zrychlení pro jednotlivé průtoky není výrazný rozdíl. Z porovnání detailů Fourierových spekter pro síly a zrychlení vyplývá, že ve spektrech pro zrychlení nejsou pouze výrazné složky otáčkové frekvence. Ve spektru zrychlení v axiálním směru je výrazná složka na frekvenci cca 21 Hz. Tato složka není výrazná ve spektrech ve vodorovném a axiálním směru. S největší pravděpodobností se jedná o vlastní frekvenci

kmitání v axiálním směru. Ve všech spektrech je výrazněji zastoupena rovněž složka na frekvenci cca 25 Hz. V tomto případě by se mohlo jednat o vlastní frekvenci torzního kmitání. Podíl tohoto tvaru kmitu v příčných i podélném směry by naznačoval vazbu mezi torzním, příčným a podélným kmitáním. Nevyjasněnou zůstává složka kmitání ve vodorovném směru na frekvenci cca 16.5 Hz a rovněž složky na vyšších frekvencích cca 175 Hz.

- Další analýzu je nutno zaměřit na identifikaci vlastních kmitání ve všech směrech, tedy v příčném, podélném a torzním. Za tím účelem je nutno provádět analýzu při různých otáčkových stavech. Buď při průběžné změně a provádět souběhovou filtraci, nebo jako kvazistacionárních stavech při určitých otáčkách. Dále je nutné zaměřit se na identifikaci buzení na frekvenci cca 175 Hz.
- Současné měření prokázalo možnost identifikace stacionárních i nestacionárních sil a momentů působících na kole. Je nutno podotknout na vhodnost měření sil i zrychlení současně. Pro komplexní analýzu a identifikaci podílu souběžné a protiběžné precese by bylo vhodné měřit současně i polohu středu hřídele.
- Z analýzy komplexního Fourierova spektra je zřejmé, že síly budí v převážné míře protiběžnou precesi a momenty budí téměř stejnými amplitudami obě precese.

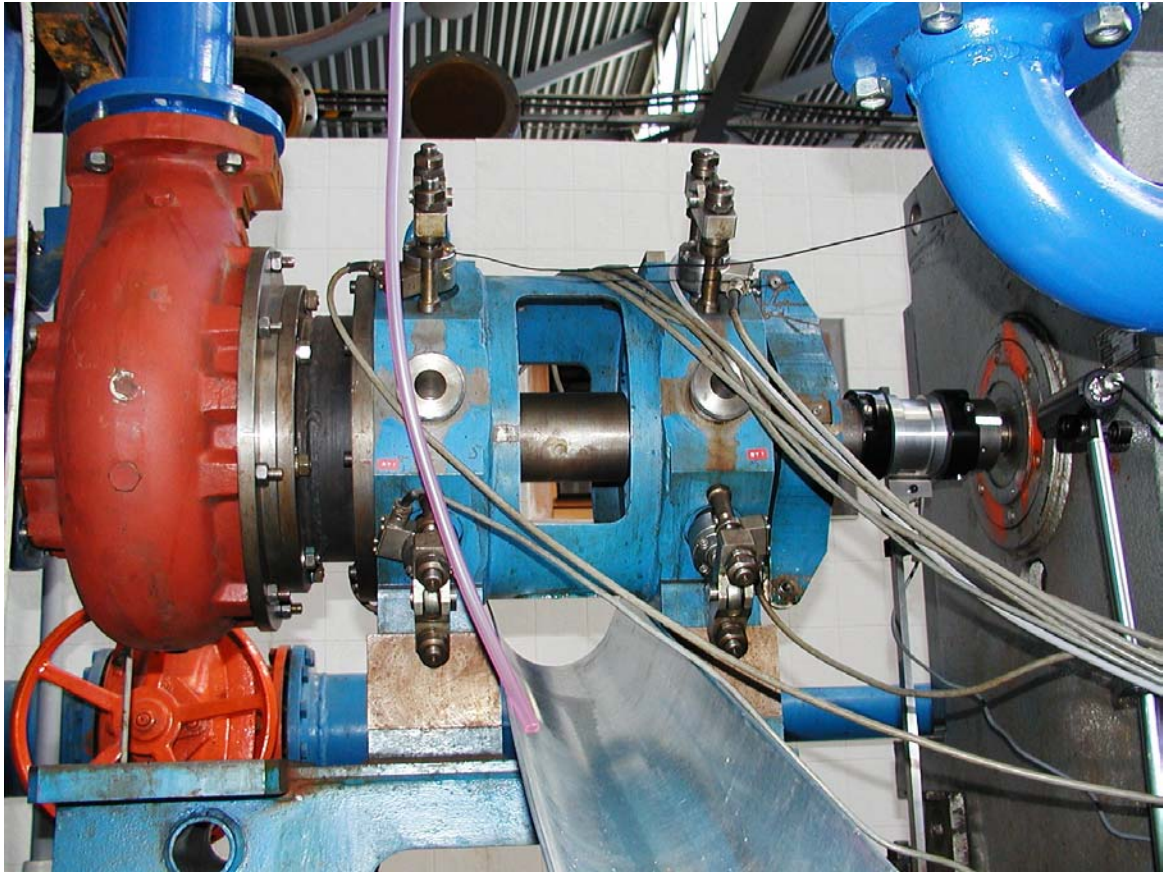
## 5. Poděkování

Práce prezentované v tomto příspěvku byly vytvořeny s podporou výzkumného záměru CEZ MSM 2600001

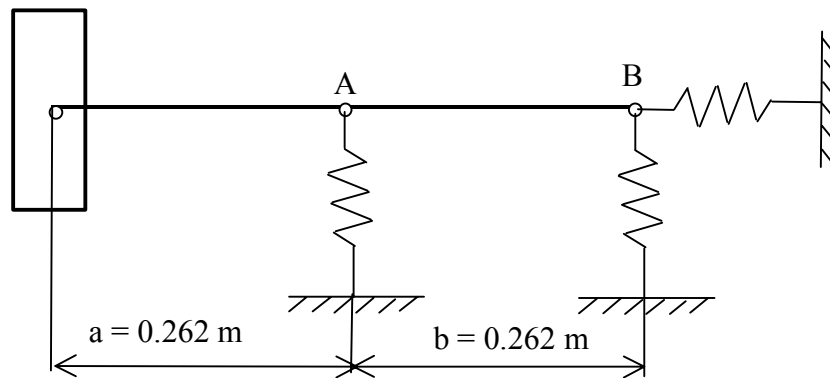
## 6. Literatura

Malenovský, E. a kol. (2002) *Experimentální analýza dynamických vlastností zkušebního čerpadla část I*. Technický protokol 302. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Brno, 18 stran.

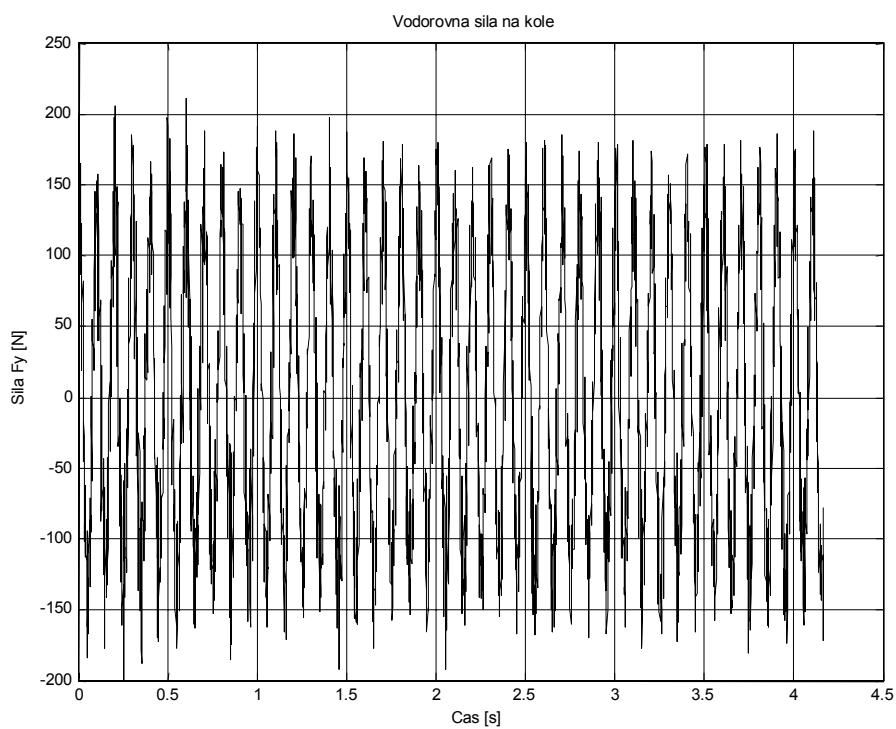
Malenovský, E. a kol. (2002) *Experimentální analýza dynamických vlastností zkušebního čerpadla část II*. Technický protokol 402. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Brno, 26 stran.



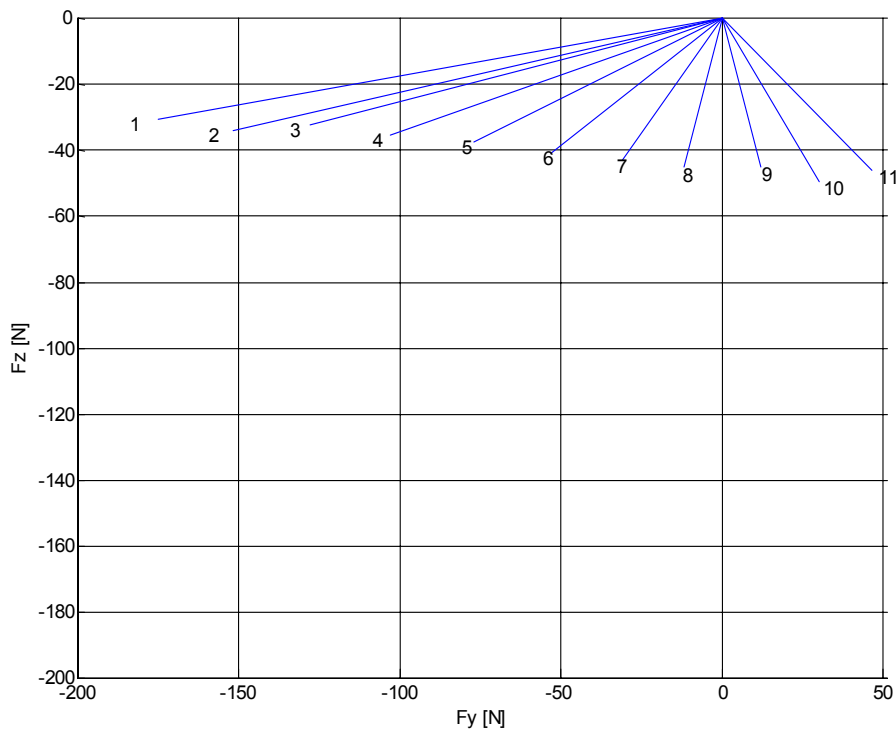
Obr. 1 Celkový pohled na zkušební stand



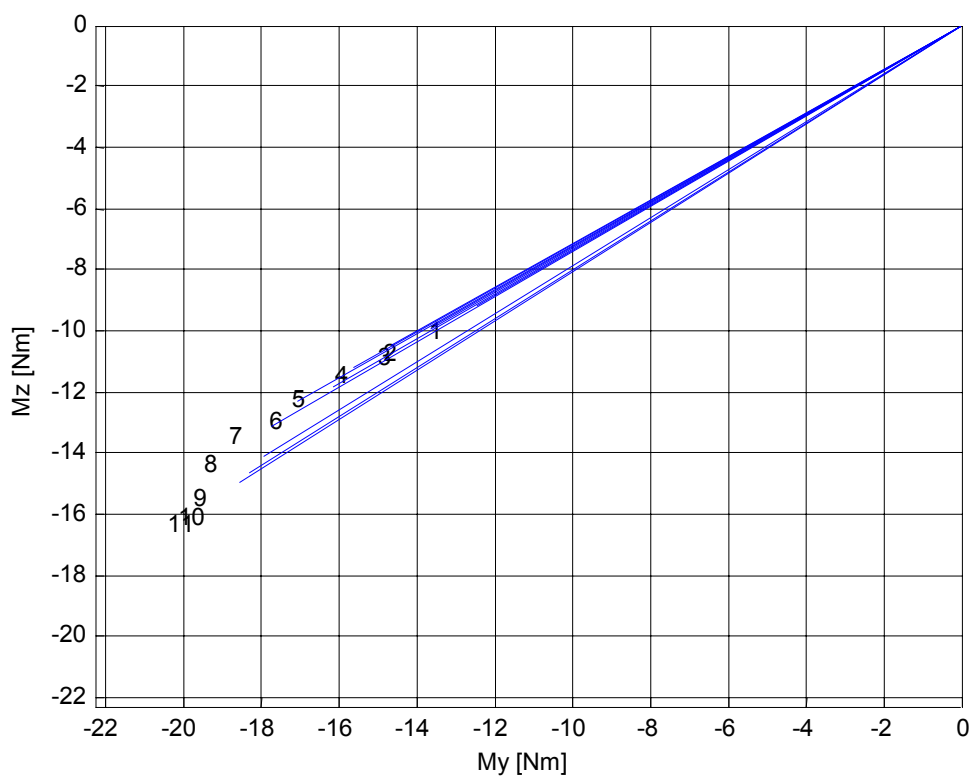
Obr. 2 Schéma čerpadla



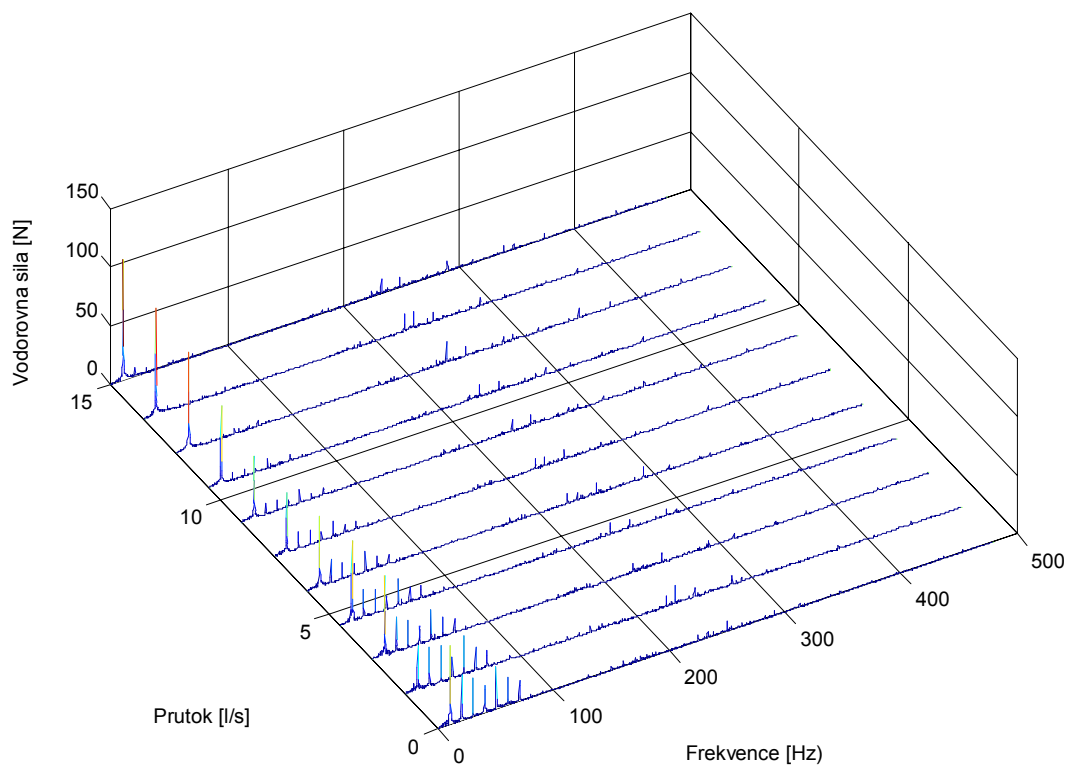
Obr. 3 Časový průběh síly na kole ve vodorovném směru



Obr. 4 Vektory radiální síly

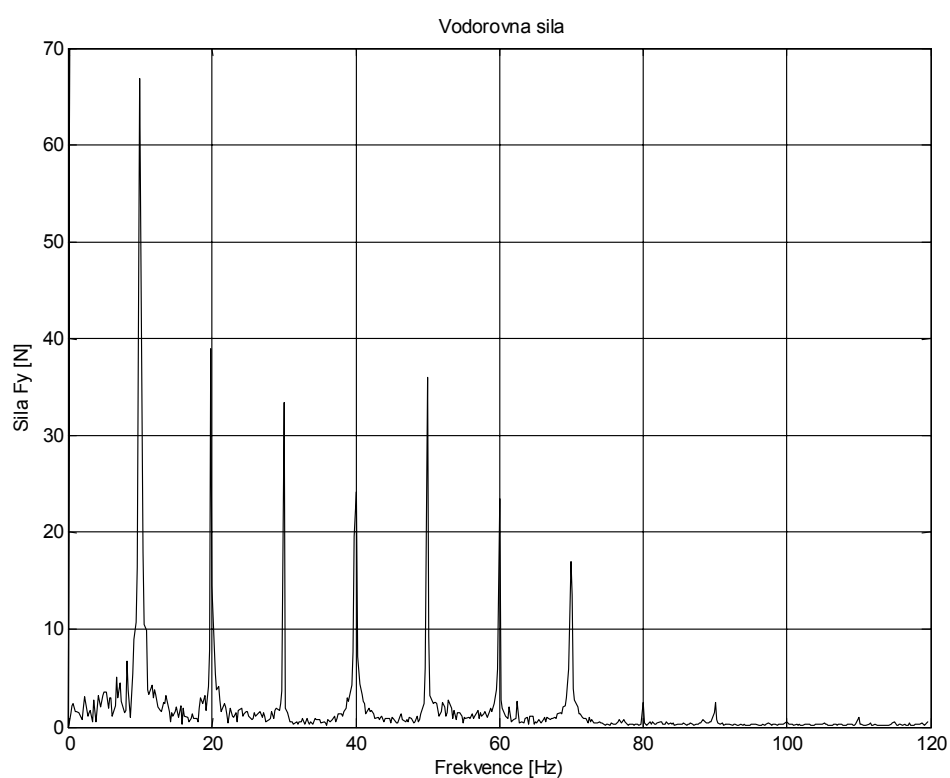


Obr. 5 Vektory momentů

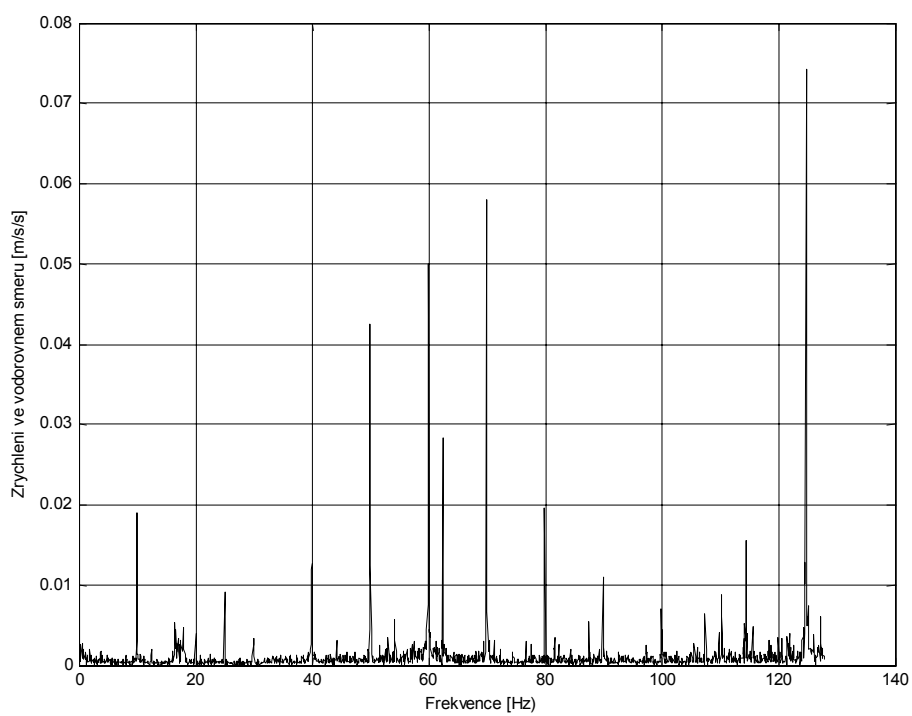


Obr. 6 Kaskádový diagram síly ve vodorovném směru

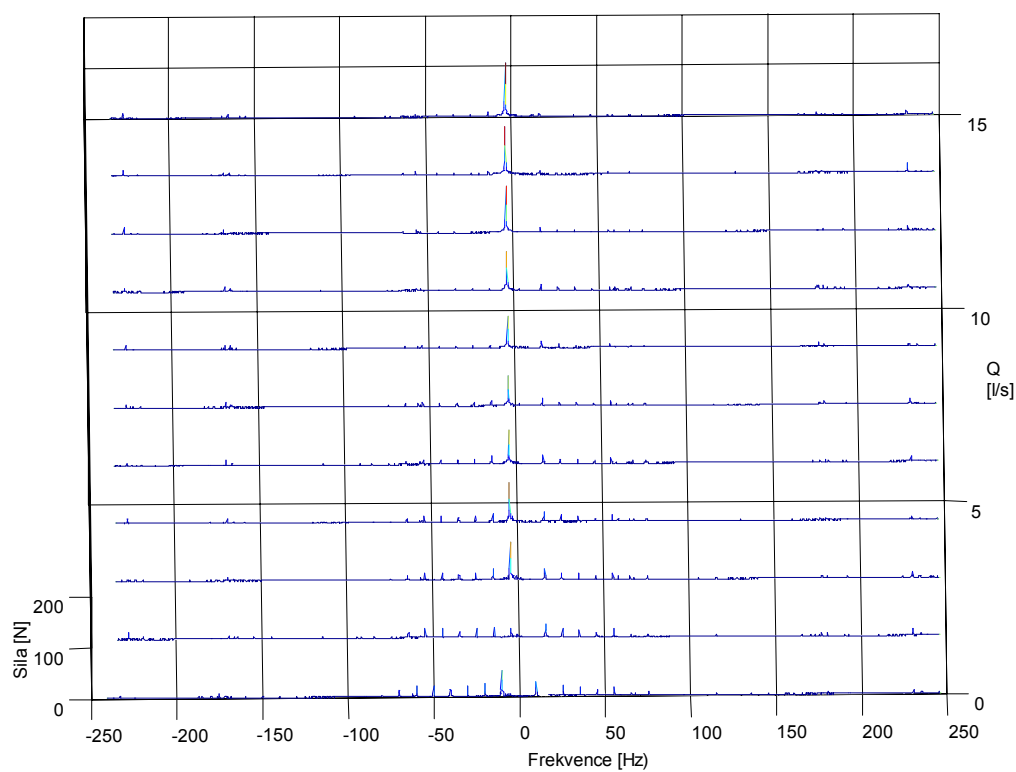




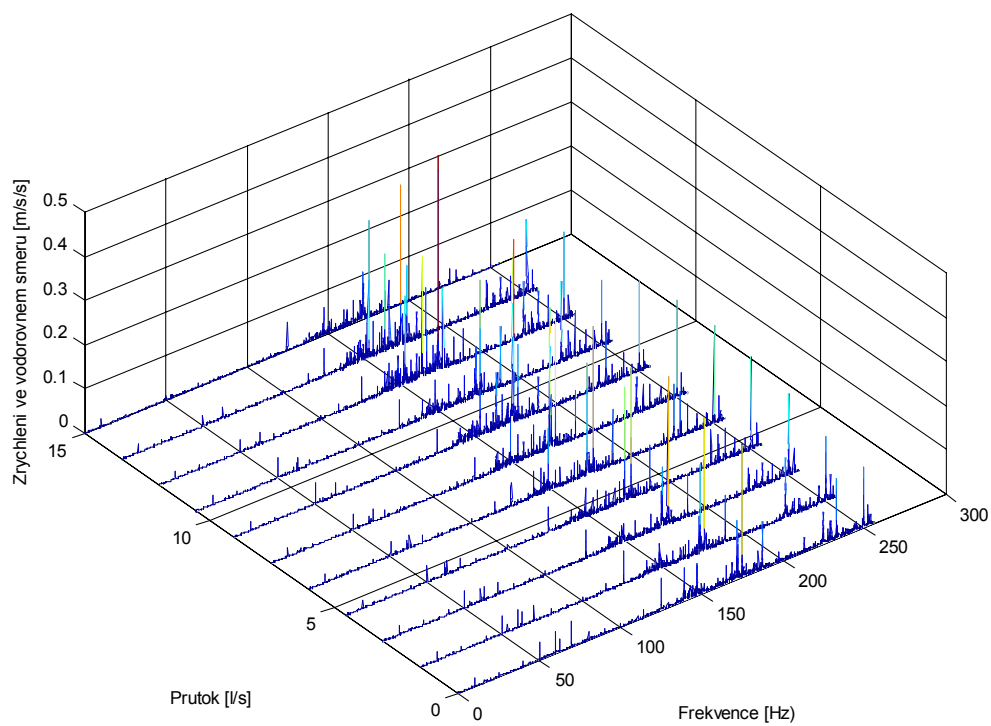
Obr. 7 Fourierovo spektrum síly



Obr. 10 Fourierovo spektrum zrychlení



Obr. 8 Komplexní Fourierovo spektrum pro síly



Obr. 9 Kaskádový diagram zrychlení ve vodorovném směru