



*Simulační systémy  
Řídicí systémy  
Zpracování a přenos dat*

---

## ***PVE Čierny Váh***

### ***Rozšíření regulačního rozsahu turbín***

*Technická zpráva*

*TZ 1854/3000*

*srpen 2009*

OSC, a.s.  
Staňkova 18a  
612 00 Brno

tel: +420 541 643 111  
fax: +420 541 643 109  
email: [osc@osc.cz](mailto:osc@osc.cz)



---

|                     |   |                                                       |       |
|---------------------|---|-------------------------------------------------------|-------|
| Název               | : | PVE Čierny Váh - Rozšíření regulačního rozsahu turbín |       |
| Druh dokumentu      | : | Technická zpráva                                      |       |
| Datum vydání        | : | 17. 8. 2009                                           |       |
| Číslo zakázky       | : | 33 198 000                                            |       |
| Objednatel          | : | Slovenské elektrárne, a.s.                            |       |
|                     |   |                                                       |       |
| Autor zprávy        | : | Ing. Richard Bischof                                  | ..... |
| Spolupracovníci     | : | Ing. Pavel Polák                                      |       |
|                     |   | Ing. Vojtěch Němec                                    |       |
|                     |   | Ing. Petr Ševčík                                      |       |
|                     |   |                                                       |       |
| Vedoucí úkolu       | : | Ing. Petr Ševčík                                      | ..... |
| Vedoucí útvaru      | : | Ing. Miroslav Konečný                                 | ..... |
|                     |   |                                                       |       |
| Ředitel společnosti | : | Ing. Vlastimír Krček                                  | ..... |
|                     |   |                                                       |       |
| Evidenční označení  | : | TZ 1854/3000                                          |       |
| Počet listů         | : | 34 (zpráva) + 35 (přílohy)                            |       |
| Rozdělovník zprávy  | : | Slovenské elektrárne, a.s.                            | 3x    |
|                     |   | OSC, a.s.                                             | 3x    |
| Číslo výtisku       | : |                                                       |       |

## ANOTACE:

Zpráva obsahuje výsledky měření vibrací, pulsací a hluku na soustrojí TG3 přečerpávací vodní elektrárny PVE Čierny Váh při různých výkonových hladinách a spádech, s cílem poskytnout výrobci instalovaných turbín (ČKD Blansko Holding, a.s.) podklad pro posouzení možnosti provozovat stroje PVE Čierny Váh při výkonech nižších, než je stávající provozní minimum.

Měření provedla společnost OSC, a.s. ve spolupráci s pracovníky diagnostické skupiny provozovatele elektrárny ve dnech 22. 6. ÷ 24. 6. 2009.

## OBSAH:

|                                                            |    |
|------------------------------------------------------------|----|
| 1. Úvod.....                                               | 6  |
| 2. Parametry soustrojí TG3.....                            | 7  |
| 3. Personální zabezpečení zkoušek.....                     | 8  |
| 4. Postup měření .....                                     | 8  |
| 5. Měřicí zařízení a měřené veličiny.....                  | 9  |
| 5.1 Zaznamenávané veličiny a použité měřicí přístroje..... | 9  |
| 5.2 Popis měření tlaků, výkonu, kavitací a hluku .....     | 11 |
| 6. Výsledky zkoušek.....                                   | 17 |
| 6.1 Hlavní tabulka naměřených dat .....                    | 17 |
| 6.2 Pulsace výkonů a tlaků .....                           | 20 |
| 6.3 Měření kavitačních emisí.....                          | 25 |
| 6.4 Měření hluku.....                                      | 26 |
| 6.5 Měření vibrací.....                                    | 28 |
| 6.6 Test najetí stroje na nízký výkon .....                | 29 |
| 7. Závěr.....                                              | 32 |

## SEZNAM PŘÍLOH:

Příloha 1: Záznamy vybraných signálů v ustálených provozních stavech TG3 (13 listů)

Příloha 2: Záznamy signálů snímačů vibrací během zkoušek na TG3 (19 listů)

Příloha 3: Záznamy vybraných signálů při najíždění TG3 na nízké výkony (3 listy)

## SYSTÉM ZNAČENÍ:

|                    |          |                                                                                       |
|--------------------|----------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| $E_k$              |          | kavitační emise na víku turbíny                                                       |
| $E_{kav}$          |          | výsledné kavitační emise na víku turbíny                                              |
| $E_{AK V}$         | dB       | akustické emise v prostoru víka turbíny – hodnota na dané frekvenční hladině          |
| $E_{AK V EQ}$      | dB       | akustické emise v prostoru víka turbíny – ekvivalentní hodnota                        |
| $E_{AK S}$         | dB       | akustické emise v prostoru savky turbíny – hodnota na dané frekv. hladině             |
| $E_{AK S EQ}$      | dB       | akustické emise v prostoru savky turbíny – ekvivalentní hodnota                       |
| $E_{AK V MAX}$     | dB       | akustické emise v prostoru víku turbíny – maximální hodnota                           |
| $E_{AK S MAX}$     | dB       | akustické emise v prostoru savky turbíny – maximální hodnota                          |
| $g$                | $m/s^2$  | tíhové zrychlení                                                                      |
| $GAXD$             | mm       | relativní axiální vibrace hřídele v běhounu závěsného ložiska generátoru ve směru „x“ |
| $GAYD$             | mm       | relativní axiální vibrace hřídele v běhounu závěsného ložiska generátoru ve směru „y“ |
| $GAXV$             | $m/s^2$  | absolutní axiální vibrace závěsného ložiska generátoru – první snímač                 |
| $GAYV$             | $m/s^2$  | absolutní axiální vibrace závěsného ložiska generátoru – druhý snímač                 |
| $GVXD$             | mm       | relativní hřídelové vibrace v dolním vodícím ložisku generátoru ve směru „x“          |
| $GVYD$             | mm       | relativní hřídelové vibrace v dolním vodícím ložisku generátoru ve směru „y“          |
| $GVXV$             | $m/s^2$  | absolutní vibrace dolního vodícího ložiska generátoru ve směru „x“                    |
| $GVYV$             | $m/s^2$  | absolutní vibrace dolního vodícího ložiska generátoru ve směru „y“                    |
| $GXD$              | mm       | relativní hřídelové vibrace v závěsném ložisku generátoru ve směru „x“                |
| $GYD$              | mm       | relativní hřídelové vibrace v závěsném ložisku generátoru ve směru „y“                |
| $GXV$              | $m/s^2$  | absolutní vibrace závěsného ložiska generátoru ve směru „x“                           |
| $GYV$              | $m/s^2$  | absolutní vibrace závěsného ložiska generátoru ve směru „y“                           |
| $H_B$              | m        | hrubý spád na TG3                                                                     |
| $H_{B prům}$       | m        | průměrný hrubý spád na TG3                                                            |
| $H_n$              | m        | návrhový spád na turbíny                                                              |
| $k_{ek1}, k_{ek2}$ | -        | koefficienty zesílení signálu kavitačních emisí                                       |
| $KXV$              | $m/s^2$  | absolutní vibrace kužele savky                                                        |
| $n$                | %        | otáčky soustrojí TG3                                                                  |
| $p-p$              |          | dvojamplituda - „peak-peak“                                                           |
| $p_g$              | MPa      | vztažný geodetický tlak ( $p_g = H_B \cdot \rho \cdot G$ )                            |
| $p_s$              | MPa      | tlak na hrdle spirály turbíny                                                         |
| $p_{r1}$           | MPa      | tlak v mezilopatkovém prostoru pod víkem turbíny                                      |
| $p_{r2}$           | MPa      | tlak v mezilopatkovém prostoru před dolním labyrintem OK                              |
| $p_{r3}$           | MPa      | tlak v mezilopatkovém prostoru pod věncem OK                                          |
| $p_{K1}$           | MPa      | tlak na kuželi savky – odběr č. 1 (proti STV)                                         |
| $p_{K2}$           | MPa      | tlak na kuželi savky – odběr č. 2 (po STV)                                            |
| $P_a$              | MW       | činný výkon generátoru TG3                                                            |
| $P_{a n}$          | MW       | činný výkon generátoru TG3 - nominální                                                |
| $P_{a min}$        | MW       | činný výkon generátoru TG3 – předběžně určené minimum pro měřený spád                 |
| $THXD$             | mm       | relativní hřídelové vibrace v horním vodícím ložisku turbíny ve směru „x“             |
| $THYD$             | mm       | relativní hřídelové vibrace v horním vodícím ložisku turbíny ve směru „y“             |
| $THXV$             | $m/s^2$  | absolutní vibrace horního vodícího ložiska turbíny ve směru „x“                       |
| $THYV$             | $m/s^2$  | absolutní vibrace horního vodícího ložiska turbíny ve směru „y“                       |
| $TDXD$             | mm       | relativní hřídelové vibrace v dolním vodícím ložisku turbíny ve směru „x“             |
| $TDYD$             | mm       | relativní hřídelové vibrace v dolním vodícím ložisku turbíny ve směru „y“             |
| $TDXV$             | $m/s^2$  | absolutní vibrace dolního vodícího ložiska turbíny ve směru „x“                       |
| $TDYV$             | $m/s^2$  | absolutní vibrace dolního vodícího ložiska turbíny ve směru „y“                       |
| $y_{RK}$           | %        | otevření rozvaděče (RK)                                                               |
| $Z_1$              | m n.m.   | hladina v horní nádrži (provozní měření)                                              |
| $Z_2$              | m n.m.   | hladina v dolní nádrži (provozní měření)                                              |
| $\rho$             | $kg/m^3$ | hustota vody                                                                          |

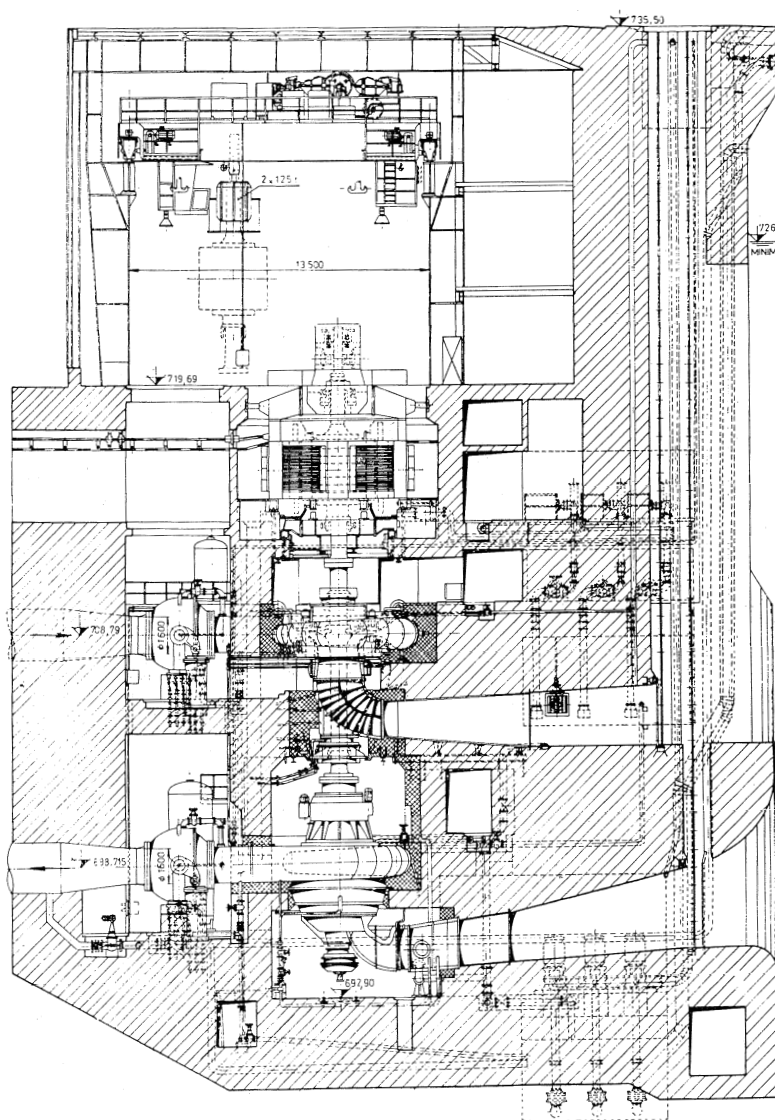
## **ZKRATKY POUŽITÉ V TEXTU:**

|      |                                                                        |
|------|------------------------------------------------------------------------|
| 2A   | dvojamplituda                                                          |
| ČKD  | společnost ČKD Blansko Holding, a.s.                                   |
| DVLG | dolní vodící ložisko generátoru                                        |
| DVLT | dolní vodící ložisko turbíny                                           |
| HVLG | horní vodící ložisko generátoru                                        |
| HVLT | horní vodící ložisko turbíny                                           |
| MaR  | měření a regulace                                                      |
| MLP  | mezilopatkový prostor                                                  |
| OK   | oběžné kolo                                                            |
| OSC  | společnost OSC, a.s.                                                   |
| PC   | osobní počítač                                                         |
| PVE  | přečerpávací vodní elektrárna                                          |
| RK   | rozvaděč (rozdávčí kolo)                                               |
| ŘS   | řídící systém                                                          |
| SE   | společnost Slovenské elektrárne, a.s.                                  |
| STV  | směr toku vody                                                         |
| TG   | turbogenerátor                                                         |
| VET  | společnost Slovenské elektrárne, a.s. – závod Vodné elektrárne Trenčín |
| ZLG  | závěsné ložisko generátoru                                             |

# 1. Úvod

Provozovatel PVE Čierny Váh (Slovenské elektrarne, a.s.) plánuje rozšíření poskytovaných podpůrných energetických služeb tímto vodním dílem. Z tohoto důvodu je pro maximální využití instalovaných strojů třeba znát jejich potenciální provozní rozsah ve směru možného reálného snížení stávajícího minimálního výkonu. Všechny stroje na PVE Čierny Váh spolehlivě pracují od 1984 pouze s jednou uskutečněnou generální opravou.

Konečné posouzení bude vypracováno výrobcem instalovaných turbín (ČKD Blansko Holding, a.s.) na základě výsledků ověřovacího měření uskutečněného společností OSC, a.s. ve spolupráci s pracovníky diagnostické skupiny provozovatele (SE, a.s., VET). Ověřovací měření se uskutečnilo na soustrojí TG3 ve dnech 22. 6. ÷ 24. 6. 2009 v souladu s platnými normami vztahujícími se na zkoušky vodních turbín na díle a s odsouhlaseným projektem měření – viz [1] ÷ [6] a [11].



Obr. 1 – Řez soustrojím PVE Čierny Váh.

## 2. Parametry soustrojí TG3

Vzhledem k tomu, že tento dokument se věnuje pouze možnostem rozšíření provozního rozsahu stroje v turbínovém režimu, jsou v následující tabulce uváděny pouze základní parametry turbíny (tzn. bez akumulčního čerpadla).

***Poznámka:** V turbínovém režimu je rozpojena zubová spojka mezi turbinou a akumulčním čerpadlem - čerpadlo je v klidu.*

| Parametr                                                                                               | Hodnota     | Jednotka          |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|-------------------|
| Maximální hladina v horní nádrži                                                                       | 1160,00     | m n.m.            |
| Minimální hladina v horní nádrži                                                                       | 1135,00     | m n.m.            |
| Pracovní rozsah hladin (horní)                                                                         | 25,00       | m                 |
| Maximální hladina v dolní nádrži                                                                       | 733,45      | m n.m.            |
| Minimální hladina v dolní nádrži                                                                       | 726,00      | m n.m.            |
| Kóta oběžného kola                                                                                     | 708,79      | m n.m.            |
| Maximální sací výška                                                                                   | - 24,66     | m                 |
| Minimální sací výška                                                                                   | - 17,21     | m                 |
| Maximální hrubý spád                                                                                   | 434,00      | m                 |
| Minimální hrubý spád                                                                                   | 401,55      | m                 |
| Maximální čistý spád (provoz 1 stroje)                                                                 | 428,00      | m                 |
| Maximální čistý spád (provoz 2 strojů)                                                                 | 423,50      | m                 |
| Návrhový čistý spád                                                                                    | 413,00      | m                 |
| Minimální čistý spád                                                                                   | 391,05      | m                 |
| Průtok maximální (návrhový)                                                                            | 30          | m <sup>3</sup> /s |
| Průtok při H <sub>max</sub>                                                                            | 18 ÷ 30     | m <sup>3</sup> /s |
| Průtok při H <sub>min</sub>                                                                            | 18 ÷ 30     | m <sup>3</sup> /s |
| Výkon maximální – přetížení<br>(stanoveno při uvádění do provozu za podmínky přívodu vzduchu do savky) | 122,4       | MW                |
| Výkon návrhový (původně maximální)                                                                     | 114,3       | MW                |
| Výkon minimální – stávající<br>(stanoveno při uvádění do provozu)                                      | 78          | MW                |
| Výkon minimální – původní<br>(před uváděním do provozu)                                                | 65          | MW                |
| Typ turbíny                                                                                            | F10         |                   |
| Výrobce turbíny                                                                                        | ČKD Blansko |                   |
| Průměr oběžného kola                                                                                   | 2600        | mm                |
| Otáčky                                                                                                 | 500         | min <sup>-1</sup> |
| Průběžné otáčky                                                                                        | 867         | min <sup>-1</sup> |
| Čas otevření / zavření rozvaděče                                                                       | 15 / 10     | s                 |

**Tab. 1** – Základní parametry turbín PVE Čierny Váh (údaje výrobce turbíny).

### 3. Personální zabezpečení zkoušek

Měření na PVE se uskutečnilo za následujícího personálního obsazení:

- Zástupci provozovatele (Slovenské elektrárne, a.s.) – Ing. Pavol Mojžíš, Ing. Ján Lacko
- Zástupci výrobce turbíny (ČKD Blansko Holding, a.s.) – Ing. Aleš Petříček, Ing. Jan Trtík
- Měřicí tým:
  - měření tlaků, výkonů a hluku (OSC, a.s.): Ing. Richard Bischof, Ing. Pavel Polák, Ing. Vojtěch Němec
  - měření relativních a absolutních vibrací soustrojí (Diagnostická skupina VET): Ing. Ivan Berec, Ing. Roman Jung
- Provozní personál PVE Čierny Váh pro manipulaci se strojem a komunikaci s dispečinkem vodních elektráren a pro poskytnutí potřebných podkladů a informací.

### 4. Postup měření

Postup měření je detailněji popsán v následujících bodech.

- Měření se uskutečnilo na soustrojí TG3, a to pouze v turbínovém režimu. Čerpadlo bylo od soustrojí v době měření odpojeno (pomocí zubové spojky).
- Měření uskutečnily dvě nezávislé měřicí skupiny – OSC a VET. Skupina OSC měřila a vyhodnocovala velikost výkonových a tlakových pulsací, dále úroveň kavitačních emisí a hluku v prostoru víka turbíny a savky. Měřicí skupina VET zaznamenávala a sledovala relativní a absolutní vibrace různých částí stroje. Pro vzájemné porovnání dat byly měřicí ústředny obou skupin synchronizovány otáčkovou značkou, snímanou skupinou VET a zasílanou i na měřicí ústřednu OSC.
- Dle návrhu ČKD (viz [10]) se měření uskutečnilo při dvou spádech - maximálním spádu (cca 432 m) a spádu blízkém minimálnímu (cca 402 m). První den zkoušek (23. 6.) byly při maximálním spádu změřeny 4 nastavení turbíny, následující den při nízkém spádu bylo proměřeno 7 nastavení TG3.
- Při obou měřených spádech byly jednotlivé měřené body postupně nastavovány od vysokých výkonů směrem k výkonům nižším, dokud nebylo dosaženo provozního stavu indikujícího zhoršení provozních parametrů stroje. Tento stav byl stanoven na základě měřených a on-line zobrazovaných veličin obou měřicích skupin, zejména vibrací a hluku.
- Po nastavení každého měřeného bodu se následně ponechal čas nezbytný k ustálení provozních parametrů stroje. Následně byl spuštěn záznam všech měřených veličin. Délka záznamů ustálených stavů byla kvůli dynamickým projevům stroje nastavena na 5 minut.
- Při měření na vysokém spádu bylo měření na vybraných výkonových hladinách kvůli nevhodným hodnotám kavitačních emisí opakováno – více viz kapitoly 6.1 a 6.2.
- Po předchozím vyhodnocení záznamů byl pro daný spád předběžně stanoven bezpečný minimální výkon stroje. Jako poslední zkouška se uskutečnilo najetí TG3 na tento výkon, následně krátký provoz s konstantním výkonem a poté provozní odstavení.

## 5. Měřicí zařízení a měřené veličiny

### 5.1 Zaznamenávané veličiny a použité měřicí přístroje

V následujících tabulkách jsou uvedeny veličiny zaznamenávané měřicí skupinou OSC (Tab. 2) a měřicí skupinou VET (Tab. 3).

| Veličina         |                                                                                       | Přístroj                                           | tp.                             | Poznámka                                                                                                                                                                                                                                                 |
|------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|---------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| y <sub>RK</sub>  | otevření rozváděcího kola                                                             | provozní snímač<br>otevření + galvanický oddělovač | 0,1                             | připojení ve skříni MSRT 04 svorkovnice: X1, sv.: 40 (+), 41 (-), výstup:0 ÷ 20 mA ~ 0 ÷ 100 %                                                                                                                                                           |
| Z <sub>1</sub>   | hladina v horní nádrži                                                                | provozní snímač                                    | -                               | údaj opisovaný z display na velíně                                                                                                                                                                                                                       |
| Z <sub>2</sub>   | hladina v dolní nádrži                                                                | provozní snímač                                    | -                               | údaj opisovaný z display na velíně                                                                                                                                                                                                                       |
| n                | otáčky stroje                                                                         | provozní snímač+ galvanický oddělovač              | -                               | připojení ve skříni MSRT 04 svorkovnice: X1, sv.: 42 (+), 43 (-), výstup: 0 ÷ 20 mA ~ 0 ÷ 200 %                                                                                                                                                          |
| p <sub>s</sub>   | tlak na hrdle spirály turbíny (vč. vyhodnocení pulsací)                               | snímač BD Sensors DMP 333                          | 0,2                             | snímač připojen na tlakové odběry na hrdle spirály, rozsah: 4 ÷ 20 mA ~ 0 ÷ 6 MPa                                                                                                                                                                        |
| p <sub>r1</sub>  | tlak v mezilopatkovém prostoru pod víkem turbíny (vč. vyhodnocení pulsací)            | snímač BD Sensors DMP 331                          | 0,2                             | snímač připojen na tlakový odběr místo provozního manometru, výstup: 4 ÷ 20 mA ~ 0 ÷ 1 MPa                                                                                                                                                               |
| p <sub>r2</sub>  | tlak v mezilopatkovém prostoru před dolním labyrintem OK (včetně vyhodnocení pulsací) | snímač BD Sensors DMP 331                          | 0,2                             | snímač připojen na tlakový odběr místo provozního manometru, výstup: 4 ÷ 20 mA ~ 0 ÷ 2,5 MPa                                                                                                                                                             |
| p <sub>r3</sub>  | tlak v mezilopatkovém prostoru pod věncem OK (vč. vyhodnocení pulsací)                | snímač BD Sensors DMP 331                          | 0,2                             | snímač připojen na tlakový odběr místo provozního manometru, výstup: 4 ÷ 20 mA ~ 0 ÷ 2,5 MPa                                                                                                                                                             |
| p <sub>K1</sub>  | tlak v kuželi savky – odběr č. 1 (vč. vyhodnocení pulsací)                            | snímač BD Sensors DMP 331                          | 0,2                             | snímač připojen na tlakový odběr savky, výstup: 4 ÷ 20 mA ~ 0 ÷ 1,6 MPa                                                                                                                                                                                  |
| p <sub>K2</sub>  | tlak v kuželi savky – odběr č. 2 (vč. vyhodnocení pulsací)                            | snímač BD Sensors DMP 331                          | 0,2                             | snímač připojen na druhý tlakový odběr savky pootočený vůči odběru snímače p <sub>K1</sub> o cca 170 °, výstup: 4 ÷ 20 mA ~ 0 ÷ 1,6 MPa                                                                                                                  |
| P <sub>a</sub>   | činný výkon generátoru (vč. vyhodnocení pulsací)                                      | převodník výkonu Metra NC 290                      | 0,5<br>tp.TV= 0.5<br>tp.TA= 0.5 | Připojení na výstupy proudových a napěťových měničů na svorkách generátoru - Aronovo zapojení, skříň DT3/1B<br>TV – měnič TE3A<br>6 kV / 100 V<br>L1–sv. 24, L2–sv. 28, L3–sv. 33<br>TA - měnič TJ7A<br>40 A / 5 A, 10 VA<br>L1 – sv. 20-21,L2 – sv. 6-7 |
| E <sub>kav</sub> | kavitační emise v kuželi savky                                                        | kavitoměr D400                                     | -                               | umístění čidla na kuželi savky co nejblíže k OK                                                                                                                                                                                                          |
| E <sub>AK</sub>  | akustické emise v prostoru víka turbíny a savky                                       | snímač hluku NTI AL1                               | 2                               | prostor víka turbíny a kužele savky                                                                                                                                                                                                                      |

Tab. 2 - Přehled veličin zaznamenávaných měřicí skupinou OSC.

| Veličina             |                                          |                                                        | Přístroj                                             | tp. | Poznámka                                                                                                                    |
|----------------------|------------------------------------------|--------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|-----|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Značení dle projektu | Značení dle VET                          | Popis                                                  |                                                      |     |                                                                                                                             |
| KXV                  | K-OK                                     | absolutní vibrace kužele savky                         | akcelerometr B&K 4395                                | -   | Citlivost 1 mV/ms <sup>-2</sup> , 16-kanálový magnetofon - kanál 12                                                         |
| GXD<br>GYD           | HVLGx<br>HVLGy                           | relativní hřídelové vibrace v HVLG/ZLG – osa „x“ a „y“ | provozní snímač vibrací Bently instalovaný v ložisku | -   | HVLG (v 8-kanálových záznamech), 8-kanálový magnetofon - kanály 2, 3                                                        |
| GXV<br>GYV           | HVLG<br>HVLG<br>HVLG <sub>ab</sub>       | absolutní vibrace HVLG/ZLG – osa „x“ a „y“             | akcelerometr Endevco a B&K 4395 i zainstal. BN       | -   | Citlivost 10 mV/ms <sup>-2</sup> , a 1 mV/ms <sup>-2</sup> , 16-kanálový magnetofon - kanály 2, 3 i zainstal. BN 8- kanál 7 |
| GAXD<br>GAYD         | ZLG <sub>ax</sub>                        | relativní axiální vibrace hřídele – běhoun ZLG         | provozní snímač vibrací Bently instalovaný v ložisku | -   | Je instalován jen 1 snímač 8-kanálový magnetofon, kanál - 6                                                                 |
| GAXV<br>GAYV         | ZLG<br>ZLG                               | absolutní axiální vibrace ZLG – osa „x“ a „y“          | akcelerometr Endevco a B&K 4395                      | -   | Citlivost 10 mV/ms <sup>-2</sup> , a 1 mV/ms <sup>-2</sup> , 16-kanálový magnetofon - kanály 4, 5                           |
| GVXD<br>GVYD         | DVLG X<br>DVLG Y                         | relativní hřídelové vibrace v DVLG – osa „x“ a „y“     | vlastní snímač                                       | -   | DVLG, 16-kanálový snímač - kanály 13, 14                                                                                    |
| GVXV<br>GVYV         | DVLG <sub>ab</sub><br>DVLG <sub>ab</sub> | absolutní vibrace DVLG – osa „x“ a „y“                 | akcelerometr Endevco a B&K 4395                      | -   | Citlivost 10 mV/ms <sup>-2</sup> , a 1 mV/ms <sup>-2</sup> , 16-kanálový snímač - kanály 6, 7                               |
| THXD<br>THYD         | HVLTx<br>HVLTy                           | relativní hřídelové vibrace v HVLt – osa „x“ a „y“     | provozní snímač vibrací Bently instalovaný v ložisku | -   | 8-kanálový magnetofon, kanály 4, 5                                                                                          |
| THXV<br>THYV         | HVLt<br>HVLt<br>HVLt <sub>ab</sub>       | absolutní vibrace HVLt – osa „x“ a „y“                 | 2 x akcelerometr B&K 4370 i zainstal. BN             | -   | Citlivost 10 mV/ms <sup>-2</sup> , 16-kanálový magnetofon - kanály 8, 9; zainstal. BN-8kanál 8                              |
| TDXD<br>TDYD         | DVLt X<br>DVLt Y                         | relativní hřídelové vibrace v DVLt – osa „x“ a „y“     | vlastní snímač                                       | -   | DVLt, 16-kanálový magnetofon - kanály 15, 16                                                                                |
| TDXV<br>TDYV         | DVLt<br>DVLt                             | absolutní vibrace DVLt – osa „x“ a „y“                 | 2 x akcelerometr B&K 4370                            | -   | Citlivost 10 mV/ms <sup>-2</sup> , 16-kanálový magnetofon - kanály 10, 11                                                   |

**Tab. 3** - Přehled veličin zaznamenávaných měřicí skupinou VET.

Pro elektronický záznam dat měřených skupinou OSC byly použity tyto přístroje:

1. **Měřicí ústředna BMC iM-AD25**, rozlišení 16 bit, 16 kanálů, tp. 0,05 pro měření neelektrických veličin. Vstup napěťový, nebo proudový – bočníky 200 Ω pro proudové smyčky. Vzorkovací frekvence byla během zkoušek nastavena na 1010 Hz (signály otevíření rozvaděče **y<sub>RK</sub>** a otáček **n** byly ředěny v poměru 1:10). Pro vyhodnocení a grafické zobrazení hodnot se použily programy NextView NT, NV script a MS Excel.
2. **Převodník činného výkonu METRA NC 290**, tp. 0,5, výr. č.: 5091647, slouží k měření činného výkonu. Signál výkonu byl přenášen analogovým signálem (proudová smyčka -5 ÷ 5 mA) do měřicí ústředny.

3. **Analyzátor hluku NTI ALI**, tp. 2 pro měření akustických emisí. Analyzátor umožňuje ukládat a zobrazovat potřebné měřené údaje na vlastním display i na obrazovce počítače připojeného přes sběrnici USB.

Záznam veličin snímaných měřicí skupinou VET se uskutečnil pomocí akcelerometrů Brüel&Kjaer, Endevco a dalších vlastních snímačů pro změření relativních hřídelových pohybů:

1. **Digitální magnetofony SONY PC 208 (osmikanálový) a PC 216 (šestnáctikanálový)** pro záznam dat.
2. **Zesilovače:**
  - B&K 8 kanál DELTA - TRON 5963
  - B&K 2 kanál – nábojový - NEXUS 2692
3. **Akcelerometry DELTA SHEAR: Bruel&Kjaer 4370, DELTA TRON 4395 a Endevco 4392.**
4. **Analyzátor (8-kanálový) Bruel&Kjaer 3557**, frekvenční rozsah  $0 \div 25,4$  kHz.

## 5.2 Popis měření tlaků, výkonu, kavitací a hluku

### 1. Otevření rozvaděče ( $y_{RK}$ )

Použit byl proudový signál z provozního snímače. Signál byl ve skříně MSRT 04 galvanicky oddělen převodníkem RAWET GXN 230 a byl přiveden na měřicí ústřednu. Kalibrace obou krajních poloh proběhla na stojícím stroji podle údajů digitálního ukazatele na skříně regulátoru.

### 2. Hladiny v horní a dolní nádrži ( $Z_1, Z_2$ )

Vzhledem k objemu obou nádrží, velikosti spádu a k délce záznamů jednotlivých měřených bodů (cca 5 minut) byla změna horní i dolní hladiny v průběhu jednotlivých měření zanedbatelná. Proto byly údaje o obou hladinách vždy na začátku spuštění záznamu pouze opisovány z obrazovek na velíně.

### 3. Otáčky stroje ( $n$ )

Pro měření otáček byl využit provozní snímač, jehož signál byl ve skříně MSRT 04 galvanicky oddělen převodníkem RAWET GXN 230 a následně přiveden na měřicí ústřednu.

### 4. Tlak na hrdle spirály turbíny TG3 ( $p_s$ )

Tlak byl měřen vlastním snímačem BD Sensors DMP 333 (rozsah  $0 \div 6$  MPa). Snímač byl připojen na sběrnou nádobku (viz Obr. 2), do které jsou zaústěny čtyři tlakové odběry z potrubí mezi kulovým uzávěrem a hrdlem spirály.

### 5. Tlak v mezilopatkovém prostoru pod víkem turbíny ( $p_{r1}$ )

Tlak byl měřen vlastním snímačem BD Sensors DMP 331 (rozsah  $0 \div 1$  MPa). Snímač byl připojen na tlakový odběr vyvedený na podlaží turbíny (viz Obr. 3).

Při najetí stroje bylo zjištěno, že udávaná hodnota tlaku je neočekávaně malá (cca o řád nižší). Chyba na straně měřicí techniky OSC byla vyloučena výměnou snímače za jiný, rovněž připojovací místo bylo podle dokumentace správné. Možným zdůvodněním je skutečnost, že tlakový odběr je ve víku turbíny zaústěn v blízkosti potrubí převádějícího vodu z prostoru nad OK do prostoru pod OK kvůli snížení axiálního tahu turbíny. Lze tedy očekávat, že kolem uvedeného potrubí bude vznikat úplav, který způsobuje snížení tlaku v jeho bezprostředním okolí. Zmíněné potrubí nelze z provozních důvodů zavřít.

### 6. Tlak v mezilopatkovém prostoru před dolním labyrintem OK ( $p_{r2}$ )

Tlak byl měřen vlastním snímačem BD Sensors DMP 331 (rozsah  $0 \div 2,5$  MPa). Snímač byl připojen na tlakový odběr vyvedený do prostoru savky - do kostelíčku (viz Obr. 4 a Obr. 5).

#### 7. Tlak v mezilopatkovém prostoru pod věncem OK ( $p_{r3}$ )

Tlak byl měřen vlastním snímačem BD Sensors DMP 331 (rozsah  $0 \div 2,5$  MPa). Snímač byl připojen na tlakový odběr vyvedený rovněž do prostoru savky - do kostelíčku (viz Obr. 4 a Obr. 6).

#### 8. Tlaky v kuželi savky ( $p_{K1}, p_{K2}$ )

Oba tlaky byly měřeny vlastními snímači BD Sensors DMP 331 (rozsah  $0 \div 1,6$  MPa). Snímače byly připojeny na tlakové odběry ze savky, v prostoru kostelíčku, přičemž oba tlakové odběry byly vůči sobě pootočené o cca  $170^\circ$ . Snímač  $p_{K1}$  byl umístěn na odběr proti STV, snímač  $p_{K2}$  pak na odběr po STV (viz Obr. 4 a Obr. 7).

#### 9. Činný výkon generátoru TG3

Elektrický výkon generátoru byl měřen převodníkem METRA NC 290, jehož dynamické parametry umožňují zaznamenávat i rychlé změny výkonu (vnitřní vzorkovací frekvence přístroje = 18 kHz, časová konstanta tlumení  $\tau = 0,1$  s).

Připojení přístroje na původně plánované svorky ve MSRT 04 (svorkovnice X2) nebylo možné, neboť po připojení přístroje a startu TG3 docházelo k výpadku soustrojí na nesymetrii zatížení fází. Jako náhradní řešení bylo zvoleno připojení na příslušné svorky ve skříni DT3/1B (viz Obr. 8).

#### 10. Kavitační emise na kuželi savky ( $E_{kav}$ )

Kavitační emise byly snímány relativně pomocí analyzátoru D400, zesilovače a piezoelektrického mikrofónu. Přístroj zaznamenává vysokofrekvenční šum emitovaný proudící kapalinou, resp. modulaci tohoto šumu způsobenou zanikajícími bublinkami nasycených vodních par vzniklých při kavitaci. Snímač byl přichycen magnetickým držákem na savku TG3 v prostoru kostelíčku, ve STV (viz Obr. 4 a Obr. 9).

#### 11. Akustické emise v prostoru víka turbíny a kužele savky ( $E_{AK}$ )

Akustické emise byly měřeny přístrojem NTI AL1, a to převážně v prostoru víka turbíny (viz Obr. 10) a ve vybraných měřeních také u přístupové chodbičky k savce (ke kostelíčku).

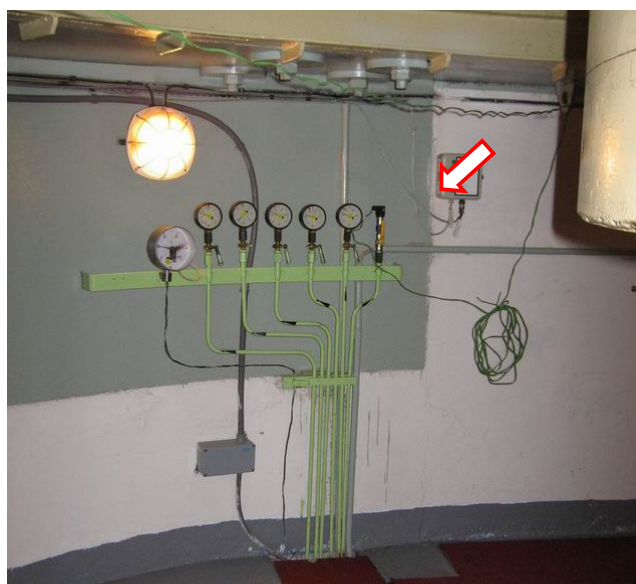
#### 12. Měření vibrací

Všechny signály z vibračních snímačů byly při obou měřených spádech zaznamenány kontinuálně na obě výše zmíněná záznamová zařízení.

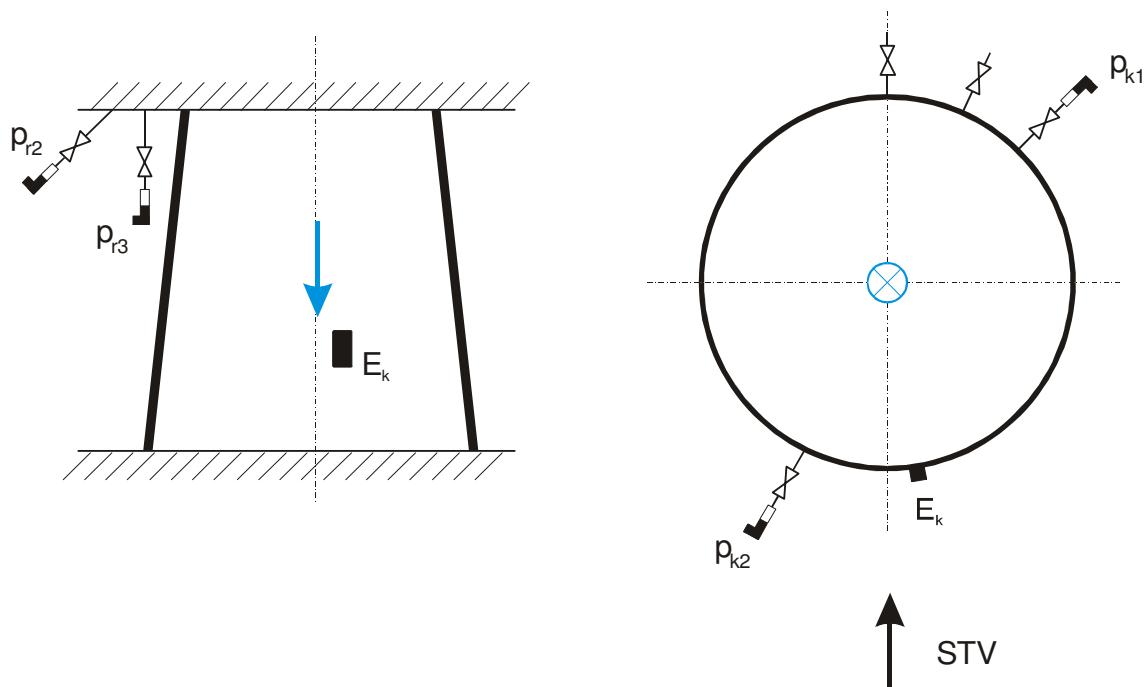
Přesné zapojení jednotlivých záznamových zařízení a umístění vibračních senzorů v rámci měřeného stroje TG3 je na vyžádání k dispozici v archivu měřicí skupiny VET.



**Obr. 2** – Měření tlaku na hrdle spirály -  $p_s$  (snímač je označen šipkou).



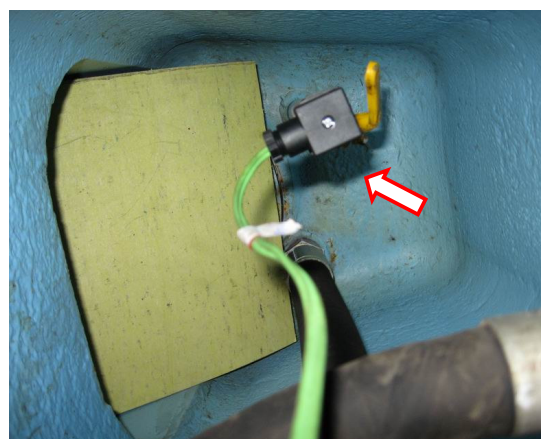
**Obr. 3** – Měření tlaku v MLP pod víkem turbíny -  $p_{r1}$  (snímač je označen šipkou).



**Obr. 4** – Schéma (nárys a půdorys) připojení snímačů v prostoru savky turbíny - v kostelíčku.



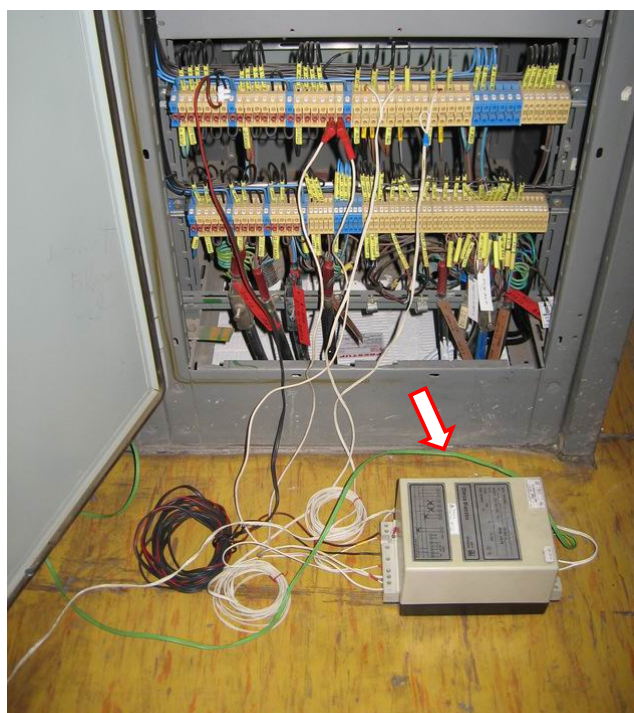
**Obr. 5** - Měření tlaku v MLP pod dolním labyrintem –  $p_{r2}$  (snímač je označen šipkou).



**Obr. 6** - Měření tlaku v MLP pod věncem OK –  $p_3$  (snímač je označen šipkou).



**Obr. 7** – Měření tlaku v kuželi savky –  $p_{K1}$  (snímač je označen šipkou).



**Obr. 8** – Převodník výkonu METRA NC 290 (označen šipkou) pro měření činného výkonu.



**Obr. 9** – Měření kavitačních emisí na kuželi savky –  $E_k$  (mikrofon kavitoměru je označen šipkou).



**Obr. 10** – Měření akustických emisí v prostoru víka turbíny –  $E_{AK}$  (přístroj je označen šipkou).

## 6. Výsledky zkoušek

Vyhodnocení zkoušek bylo provedeno podle platných norem (viz [1] ÷ [6]) a schváleného projektu měření (viz [11]).

Měření se uskutečnilo na stroji TG3 v turbínovém režimu (čerpadlo odpojeno zubovou spojkou) při dvou průměrných spádech:

- $H_{B \text{ prům}} = 432,14 \text{ m}$  ..... proměřený rozsah výkonů: cca  $111 \div 56 \text{ MW}$
- $H_{B \text{ prům}} = 402,06 \text{ m}$  ..... proměřený rozsah výkonů: cca  $104 \div 47 \text{ MW}$

Během měření byly sledovány hodnoty tlaků a činného výkonu (obojí včetně pulsací), vibrací (absolutní i relativní), kavitací a hluku na jednotlivých výkonových hladinách, s cílem poskytnout zhotoviteli turbíny údaje ke stanovení nejnižšího výkonu, při němž je stroj v turbínovém režimu schopen dlouhodobého provozu bez jakýchkoliv omezení a negativních vlivů na životnost stroje a jeho příslušenství.

### 6.1 Hlavní tabulka naměřených dat

V tabulce Tab. 4 jsou uvedeny střední, popř. maximální hodnoty měřených veličin. Další naměřené výsledky jsou uvedeny v podkapitolách u jednotlivých vyhodnocovaných veličin:

Význam jednotlivých sloupců Tab. 4 je následující:

|                       |          |                                                                     |
|-----------------------|----------|---------------------------------------------------------------------|
| č.m.                  | [-]      | číslo měřicího bodu                                                 |
| čas OSC               | [hh:mm]  | čas začátku záznamu měřicí ústředny OSC                             |
| čas VET - 8           | [min]    | čas změny výkonu v záznamovém zařízení VET; 8-kanálový magnetofon   |
| čas VET - 16          | [min]    | čas změny výkonu v záznamovém zařízení VET; 16-kanálový magnetofon  |
| $y_{RK}$              | [%]      | otevření rozváděcího kola                                           |
| $Z_1$                 | [m n.m.] | hladina v horní nádrži (odečet z provozního měření)                 |
| $Z_2$                 | [m n.m.] | hladina v dolní nádrži (odečet z provozního měření)                 |
| $H_B$                 | [m]      | hrubý spád na TG3:                                                  |
| $H_B = Z_1 - Z_2$ (1) |          |                                                                     |
| $P_a$                 | [MW]     | činný výkon generátoru TG3 (odečet z provozního měření)             |
| $P_Q$                 | [MVA]    | jalový výkon generátoru TG3 (odečet z provozního měření)            |
| $\cos \varphi$        | [-]      | účinník                                                             |
| $p_s$                 | [MPa]    | tlak na hrdle spirály turbíny                                       |
| $p_{r1}$              | [MPa]    | tlak v mezilopatkovém prostoru pod víkem turbíny                    |
| $p_{r2}$              | [MPa]    | tlak v mezilopatkovém prostoru před dolním labyrintem oběžného kola |
| $p_{r3}$              | [MPa]    | tlak v mezilopatkovém prostoru pod věncem oběžného kola             |
| $p_{K1}$              | [MPa]    | tlak v kuželi savky – odběr č. 1                                    |
| $p_{K2}$              | [MPa]    | tlak v kuželi savky – odběr č. 2                                    |

|                                                       |      |                                                                 |
|-------------------------------------------------------|------|-----------------------------------------------------------------|
| $E_k$                                                 | [V]  | kavitační emise na víku turbíny                                 |
| $k_{ek1}, k_{ek2}$                                    | [-]  | koeficienty zesílení signálu kavitačních emisí                  |
| $E_{kav}$                                             | [V]  | výsledné kavitační emise na víku turbíny:                       |
| $E_{kav} = k_{ek1} \cdot k_{ek2} \cdot E_k \quad (2)$ |      |                                                                 |
| $E_{AK \text{ V EQ}}$                                 | [dB] | akustické emise v prostoru víka turbíny – ekvivalentní hodnota  |
| $E_{AK \text{ S EQ}}$                                 | [dB] | akustické emise v prostoru savky turbíny – ekvivalentní hodnota |
| $E_{AK \text{ V MAX}}$                                | [dB] | akustické emise v prostoru víka turbíny – maximální hodnota     |
| $E_{AK \text{ S MAX}}$                                | [dB] | akustické emise v prostoru savky turbíny – maximální hodnota    |

*Poznámky k tabulce:*

- V průběhu měření při vysokém spádu se vyskytly pochybnosti o věrohodnosti naměřených hodnot kavitačních emisí (viz hodnoty zaznamenané v Tab. 4 psané červeně). Důvodem bylo nahodilé snížení přitlaku mikrofonu kavitoměru na povrchu kužele savky, neboť vlivem chvění kužele za provozu docházelo k uvolňování přitlačné magnetické upínky. Proto se v rámci č.m. 8 měření na vybraných výkonových hladinách opakovalo.
- Vzhledem k nutnosti rychlého měření nastavených bodů (zejména na nízkém spádu kvůli dodržení minimálních změn spádu, udržení hladin v povolených mezích a dodržení časového harmonogramu zkoušek dohodnutého na dispečinku) se měření akustických emisí zpravidla uskutečňovalo buď na víku turbíny nebo v prostoru u savky. Příslušná políčka pro místa, kde hluk nebyl měřen, jsou pak tedy proškrtnutá.
- Pro případné srovnání dat zaznamenaných v měřicích ústřednách OSC a VET se před zahájením měření uskutečnilo vzájemné seřízení času v těchto ústřednách. Rovněž ústředny zaznamenávaly synchronizační signál - otáčkovou značku, snímanou skupinou VET a kontinuálně zasílanou na vstup měřicí ústředny OSC.

| č.m.                           | čas OSC | čas VET - 8 | čas VET - 16  | y <sub>AK</sub>                                       | Z <sub>1</sub> | Z <sub>2</sub> | H <sub>B</sub> | P <sub>a</sub> | P <sub>o</sub> | cos φ | p <sub>s</sub> | p <sub>r1</sub> | p <sub>r2</sub> | p <sub>r3</sub> | p <sub>k1</sub> | p <sub>k2</sub> | E <sub>k</sub> | k <sub>st</sub> | k <sub>g2</sub> | E <sub>kav</sub> | E <sub>AK V EQ</sub> | E <sub>AK SEQ</sub> | E <sub>AK V MAX</sub> | E <sub>AK S MAX</sub> |
|--------------------------------|---------|-------------|---------------|-------------------------------------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-------|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|----------------|-----------------|-----------------|------------------|----------------------|---------------------|-----------------------|-----------------------|
| -                              | hh:mm   | min         | min           | %                                                     | m n.m.         | m n.m.         | m              | MW             | MVA            | -     | MPa            | MPa             | MPa             | MPa             | MPa             | MPa             | V              | -               | -               | V                | dB                   | dB                  | dB                    | dB                    |
| <b>Vysoký spád</b>             |         |             |               |                                                       |                |                |                |                |                |       |                |                 |                 |                 |                 |                 |                |                 |                 |                  |                      |                     |                       |                       |
| H <sub>B prům</sub> = 432,14 m |         |             |               |                                                       |                |                |                |                |                |       |                |                 |                 |                 |                 |                 |                |                 |                 |                  |                      |                     |                       |                       |
| 1                              | 8:16    | 1           | 1 (záznam A)  | naletí stroje                                         | 79,8           | 1158,95        | 726,47         | 432,48         | 111,4          | -8,9  | 1,00           | 4,26            | 0,241           | 2,05            | 2,40            | 0,17            | 0,14           | 0,95            | 1               | 10               | 9,518                | 101,4               | -                     | -                     |
| 2                              | 8:31    | 16          | -             | -                                                     | 79,8           | 1158,95        | 726,47         | 432,48         | 111,4          | -8,9  | 1,00           | 4,26            | 0,241           | 2,05            | 2,40            | 0,17            | 0,14           | 0,95            | 1               | 10               | 9,518                | 101,4               | -                     | -                     |
| 3                              | 8:43    | 22          | 2 (záznam B)  | -                                                     | 64,9           | 1158,83        | 726,47         | 432,36         | 90,4           | -8,4  | 1,00           | 4,30            | 0,229           | 1,86            | 2,20            | 0,16            | 0,15           | 0,05            | 1               | 30               | 1,445                | 103,9               | -                     | -                     |
| 4                              | 8:54    | 37          | 16 (záznam B) | -                                                     | 64,9           | 1158,77        | 726,57         | 432,20         | 90,3           | -8,8  | 1,00           | 4,30            | 0,229           | 1,86            | 2,20            | 0,16            | 0,15           | 1,14            | 1               | 10               | 11,430               | -                   | -                     | -                     |
| 5                              | 9:07    | 45          | 24 (záznam B) | -                                                     | 50,1           | 1158,68        | 726,62         | 432,06         | 64,7           | -8,7  | 0,99           | 4,34            | 0,261           | 1,71            | 2,06            | 0,19            | 0,19           | 0,61            | 1               | 10               | 6,146                | 98,7                | -                     | -                     |
| 6                              | 9:24    | 61          | 40 (záznam B) | -                                                     | 45,1           | 1158,56        | 726,66         | 431,90         | 55,9           | -8,6  | 0,99           | 4,35            | 0,266           | 1,67            | 2,02            | 0,19            | 0,20           | 0,58            | 1               | 3                | 1,750                | 98,5                | -                     | -                     |
| 7                              | 9:35    | 75          | 54 (záznam B) | -                                                     | 49,4           | 1158,51        | 726,68         | 431,83         | 63,3           | -8,6  | 0,99           | 4,34            | 0,262           | 1,71            | 2,05            | 0,19            | 0,19           | 0,74            | 1               | 3                | 2,209                | 100,1               | -                     | -                     |
| 8                              | 9:49    | 88          | 67 (záznam B) | postupné profeti vykonu                               | -              | -              | -              | 65,8           | -8,6           | 0,99  | 4,33           | 0,26            | 1,71            | 2,06            | 0,19            | 0,42            | 0,42           | 1               | 10              | 4,150            | -                    | -                   | -                     | -                     |
| 8                              | 9:52    | 96          | 76 (záznam B) | -                                                     | -              | -              | -              | 89,8           | -8,7           | 1,00  | 4,30           | 0,23            | 1,86            | 2,20            | 0,16            | 0,15            | 0,61           | 1               | 10              | 6,090            | -                    | -                   | -                     | -                     |
| 8                              | 9:55    | 100         | 80 (záznam B) | -                                                     | -              | -              | -              | 111,2          | -8,7           | 1,00  | 4,25           | 0,24            | 2,06            | 2,40            | 0,17            | 0,15            | 0,26           | 1               | 10              | 2,570            | -                    | -                   | -                     | -                     |
| 9                              | 10:03   | 108         | 88 (záznam B) | naletí TG3 na cca 65 MW a prov.odstavení z cca 105 MW | -              | -              | -              | -              | -              | -     | -              | -               | -               | -               | -               | -               | -              | -               | -               | -                | -                    | -                   | -                     | -                     |
| <b>Nizký spád</b>              |         |             |               |                                                       |                |                |                |                |                |       |                |                 |                 |                 |                 |                 |                |                 |                 |                  |                      |                     |                       |                       |
| H <sub>B prům</sub> = 402,06 m |         |             |               |                                                       |                |                |                |                |                |       |                |                 |                 |                 |                 |                 |                |                 |                 |                  |                      |                     |                       |                       |
| 10                             | 8:13    | 1           | 1             | naletí stroje                                         | 84,6           | 1135,64        | 733,16         | 402,48         | 104,2          | -5,7  | 1,00           | 4,03            | 0,306           | 2,09            | 2,44            | 0,23            | 0,21           | 0,75            | 1               | 10               | 7,457                | 99,5                | 97,2                  | 99,9                  |
| 11                             | 8:17    | 5           | 5             | -                                                     | 84,6           | 1135,64        | 733,16         | 402,48         | 104,2          | -5,7  | 1,00           | 4,03            | 0,306           | 2,09            | 2,44            | 0,23            | 0,21           | 0,75            | 1               | 10               | 7,457                | 99,5                | 97,2                  | 99,9                  |
| 12                             | 8:29    | 14          | 14            | -                                                     | 66,9           | 1135,44        | 733,19         | 402,25         | 82,2           | -5,8  | 1,00           | 4,077           | 0,2959          | 1,89            | 2,2305          | 0,23            | 0,22           | 0,65            | 1               | 10               | 6,462                | 98,9                | -                     | 99,4                  |
| 13                             | 8:37    | 22          | 22            | -                                                     | 55,5           | 1135,34        | 733,21         | 402,13         | 64,8           | -5,7  | 1,00           | 4,104           | 0,3197          | 1,782           | 2,1219          | 0,25            | 0,246          | 0,37            | 1               | 10               | 3,741                | 98,8                | -                     | 99,2                  |
| 14                             | 8:45    | 29          | 29            | -                                                     | 52,7           | 1135,26        | 733,24         | 402,02         | 60,2           | -5,6  | 1,00           | 4,109           | 0,3216          | 1,762           | 2,1022          | 0,25            | 0,248          | 0,27            | 1               | 10               | 2,667                | 98,9                | -                     | 99,2                  |
| 15                             | 8:53    | 38          | 38            | -                                                     | 49,6           | 1135,19        | 733,24         | 401,95         | 55,4           | -5,7  | 1,00           | 4,115           | 0,3246          | 1,74            | 2,0805          | 0,25            | 0,252          | 0,64            | 1               | 3                | 1,923                | 99,0                | -                     | 99,7                  |
| 16                             | 9:02    | 47          | 47            | -                                                     | 47,0           | 1135,10        | 733,26         | 401,84         | 51,4           | -5,6  | 0,99           | 4,119           | 0,3249          | 1,721           | 2,0615          | 0,25            | 0,252          | 0,61            | 1               | 3                | 1,838                | 99,1                | -                     | 99,7                  |
| 17                             | 9:09    | 54          | 54            | -                                                     | 44,1           | 1135,04        | 733,27         | 401,77         | 47,0           | -5,5  | 0,99           | 4,123           | 0,3277          | 1,703           | 2,0435          | 0,25            | 0,257          | 0,59            | 1               | 3                | 1,784                | -                   | -                     | 101,2                 |
| 18                             | 9:13    | 61          | 61            | provozní odstavení stroje z cca 47 MW                 | -              | -              | -              | -              | -              | -     | -              | -               | -               | -               | -               | -               | -              | -               | -               | -                | -                    | -                   | -                     | -                     |
| 19                             | 9:18    | -           | -             | naletí stroje na cca 55 MW a provozní odstavení       | -              | -              | -              | -              | -              | -     | -              | -               | -               | -               | -               | -               | -              | -               | -               | -                | -                    | -                   | -                     | -                     |

Tab. 4 – Tabulka středních hodnot zaznamenaných při měření na TG3 PVE Čierny Váh).

## 6.2 Pulsace výkonů a tlaků

Při obou měřených spádech byly vyhodnoceny pulsace činného výkonu ( $P_a$ ), tlaku v hrdle spirály ( $p_s$ ), tlaků v mezilopatkovém prostoru ( $p_{r1}$ ,  $p_{r2}$  a  $p_{r3}$ ) a tlaků v kuželovém nástavci savky ( $p_{K1}$  a  $p_{K2}$ ).

Hodnoty těchto pulsací (dvojamplitudy –  $2A$ ) byly vyhodnoceny v ustálených provozních stavech TG3 při daných hydrologických podmínkách a byly stanoveny jako hodnoty distribučních funkcí pro úroveň 95 % dat naměřeného souboru.

Hodnoty dvojamplitud ( $2A$ ) všech pulsací jsou uvedeny v Tab. 5. Způsob vyjádření procentuálních hodnot (dvojamplitud) pulsací je následující:

- *Dvojamplituda pulsací činného výkonu na svorkách generátoru* - pulsace výkonu jsou vyjádřeny jako procenta vztahovaná ke jmenovitému výkonu soustrojí ( $P_{an} = 111,6$  MW, dle [8]).
- *Dvojamplituda pulsací tlaků* - pulsace tlaků jsou vyjádřeny jako procenta ze vztažného tlaku ( $p_g$ ) odpovídajícího jmenovitému geodetickému spádu:

$$p_g = H_n \cdot \rho \cdot g \quad (3)$$

kde:

$H_n = 408,5$  m, návrhový spád turbíny – dle [8]

$\rho = 1000$  kg/m<sup>3</sup>, uvažovaná hustota vody

$g = 9,81$  m/s<sup>2</sup>, uvažované tíhové zrychlení

Před vlastním měřením bylo zjištěno, že signál tlaku v mezilopatkovém prostoru pod víkem turbíny ( $p_{r1}$ ) je nečekaně nízký – předpokládané důvody viz kapitola 5.2, odrážka 5. Signál byl přesto zaznamenáván a vyhodnocován, nicméně výsledky tohoto tlaku jsou zavádějící, a proto uváděny pouze pro úplnost.

Grafické vyhodnocení měřených bodů je uvedeno na Obr. 11 ÷ Obr. 15.

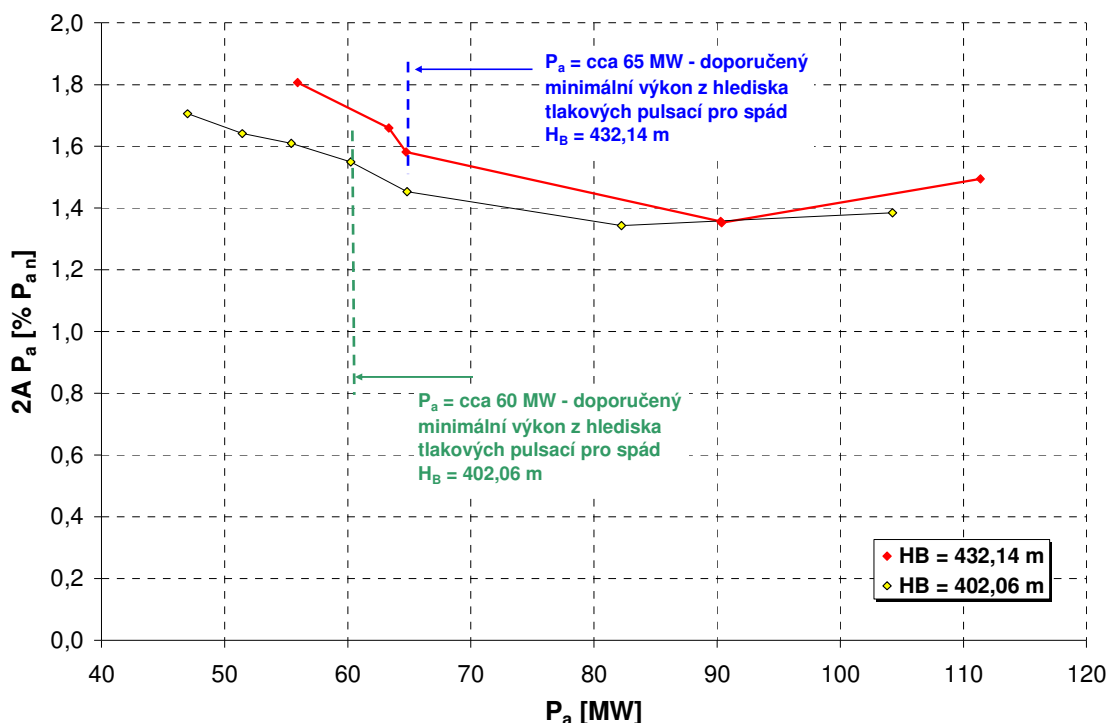
Z tabulky a obrázků vyplývá:

1. Dvojamplitudy pulsací činného výkonu v turbínovém režimu jsou v celém měřeném výkonovém rozsahu při obou spádech hluboko pod hranicí 10 %  $P_{an}$ . Maximální dosažený rozkmit činí 1,8 %  $P_{an}$ . Nepředstavují omezující faktor provozního rozsahu.
2. Dvojamplitudy pulsací tlaku na hrdle spirály ( $p_s$ ) prudce narůstají pro výkony pod 60 MW (minimální spád) a 65 MW (maximální spád) k hranici 7 % jmenovitého geodetického tlaku  $p_g$ . Uvedené výkony lze považovat za dolní meze z hlediska pulsací ve spirále.
3. Dvojamplitudy pulsací tlaků v savce ( $p_{K1}$  a  $p_{K2}$ ) překračují hodnotu 7 % geodetického tlaku  $p_g$  rovněž pro výkony nižší než 60 MW (min. spád), resp. 65 MW (max. spád).
4. Dvojamplitudy pulsace tlaku v mezilopatkovém prostoru pod víkem turbíny ( $p_{r1}$ ) mají značně sníženou vypovídací schopnost, vlivem nevhodného umístění tlakového odběru (viz kapitola 5.2).
5. Tvar závislosti dvojamplitudy pulsací tlaků v MLP ( $p_{r2}$  a  $p_{r3}$ ) na výkonu má charakter vanové křivky. Zejména při vysokém spádu dosahuje maxima při výkonech nad cca 100 MW. Pro výkon pod cca 65 MW opět prudce vzrůstají až nad hranici 10 %  $p_g$ . obdobný průběh je při malém spádu, avšak s nižšími pulsacemi – viz Obr. 13. Je zřejmé, že pulsace v MLP představují limitující faktor. Pro dosažení klidného provozu v nižších výkonových hladinách se nabízí podobné řešení, jaké bylo použito již při uvádění do provozu k rozšíření pásma směrem k maximálnímu výkonu., tzn. zavzdušnění do prostoru OK.

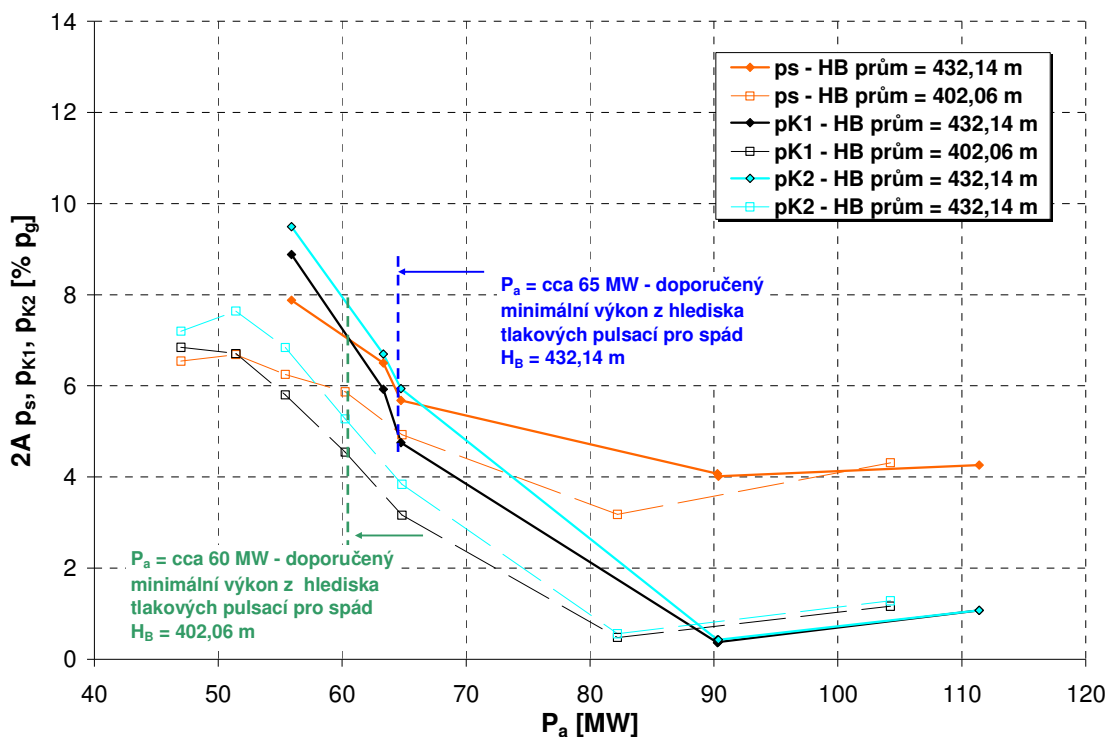
6. Z frekvenční analýzy signálů tlaků (viz Obr. 14 a Obr. 15) při obou spádech je patrné, že se snižujícím se výkonem dochází ve spektru frekvencí k posunu dominantní složky od frekvence 8,3 Hz (otáčková frekvence stroje) k frekvenci kolem 3,2 Hz, což odpovídá frekvenci otáčení vodního víru - „copu“. Zlomový bod - přechod dominantní frekvence mezi oběma uvedenými hodnotami - je mezi výkony cca 90 ÷ 65 MW. Při posunu dominantní frekvence rovněž dochází k výraznému nárůstu mohutnosti této dominantní frekvenční složky, a to zejména u tlaků v mezilopatkovém prostoru  $p_{r2}$  a  $p_{r3}$  a tlaku v sacce  $p_{K2}$ . To odpovídá zvýšenému hluku (bouchání copu) v kuželi savky při malých výkonech. Ve spektrech vibračních signálů se však projevuje frekvence 3,2 Hz bez potlačení otáčkové frekvence 8,3 Hz - viz Příloha 2. Uvedená skutečnost odpovídá typickému chování Francisovy turbíny. Zavedením vzduchu do prostoru OK lze projev copu potlačit, a tím dosáhnout potřebného zklidnění pro tuto provozní oblast.

| č.m.                                                     | Střední hodnoty |         |        |        |       |  | absolutní hodnoty pulsací 2A |       |          |          |          |          |          | relativní hodnoty pulsací 2A |       |          |          |          |          |          |
|----------------------------------------------------------|-----------------|---------|--------|--------|-------|--|------------------------------|-------|----------|----------|----------|----------|----------|------------------------------|-------|----------|----------|----------|----------|----------|
|                                                          | $y_{RK}$        | $Z_1$   | $Z_2$  | $H_B$  | $P_a$ |  | $P_a$                        | $P_s$ | $P_{r1}$ | $P_{r2}$ | $P_{r3}$ | $P_{K1}$ | $P_{K2}$ | $P_a$                        | $P_s$ | $P_{r1}$ | $P_{r2}$ | $P_{r3}$ | $P_{K1}$ | $P_{K2}$ |
| -                                                        | %               | m n.m.  | m n.m. | m      | MW    |  | MW                           | MPa   | MPa      | MPa      | MPa      | MPa      | MPa      | % $P_{an}$                   |       |          |          |          |          |          |
| <b>Vysoký spád</b> $H_B \text{ prům} = 432,14 \text{ m}$ |                 |         |        |        |       |  |                              |       |          |          |          |          |          |                              |       |          |          |          |          |          |
| 2                                                        | 79,8            | 1158,95 | 726,47 | 432,48 | 111,4 |  | 1,7                          | 0,17  | 0,009    | 0,49     | 0,38     | 0,04     | 0,04     | 1,49                         | 4,26  | 0,23     | 12,22    | 9,38     | 1,07     | 1,07     |
| 3                                                        | 64,9            | 1158,83 | 726,47 | 432,36 | 90,4  |  | 1,5                          | 0,16  | 0,004    | 0,36     | 0,34     | 0,02     | 0,02     | 1,35                         | 4,01  | 0,11     | 8,92     | 8,54     | 0,38     | 0,42     |
| 4                                                        | 64,9            | 1158,77 | 726,57 | 432,20 | 90,3  |  | 1,5                          | 0,16  | 0,004    | 0,34     | 0,34     | 0,01     | 0,02     | 1,36                         | 4,07  | 0,11     | 8,56     | 8,44     | 0,37     | 0,43     |
| 5                                                        | 50,1            | 1158,68 | 726,62 | 432,06 | 64,7  |  | 1,8                          | 0,23  | 0,043    | 0,32     | 0,33     | 0,19     | 0,24     | 1,58                         | 5,68  | 1,07     | 8,03     | 8,29     | 4,76     | 5,94     |
| 6                                                        | 45,1            | 1158,56 | 726,66 | 431,90 | 55,9  |  | 2                            | 0,32  | 0,063    | 0,46     | 0,42     | 0,36     | 0,38     | 1,81                         | 7,88  | 1,58     | 11,37    | 10,47    | 8,89     | 9,49     |
| 7                                                        | 49,4            | 1158,51 | 726,68 | 431,83 | 63,3  |  | 1,9                          | 0,26  | 0,050    | 0,33     | 0,33     | 0,24     | 0,27     | 1,66                         | 6,50  | 1,24     | 8,25     | 8,26     | 5,93     | 6,70     |
| <b>Nizký spád</b> $H_B \text{ prům} = 402,06 \text{ m}$  |                 |         |        |        |       |  |                              |       |          |          |          |          |          |                              |       |          |          |          |          |          |
| 11                                                       | 84,6            | 1135,64 | 733,16 | 402,48 | 104,2 |  | 1,5                          | 0,17  | 0,006    | 0,24     | 0,29     | 0,05     | 0,05     | 1,38                         | 4,31  | 0,14     | 5,98     | 7,24     | 1,16     | 1,28     |
| 12                                                       | 66,9            | 1135,44 | 733,19 | 402,25 | 82,2  |  | 1,50                         | 0,13  | 0,00     | 0,18     | 0,25     | 0,02     | 0,02     | 1,34                         | 3,18  | 0,11     | 4,48     | 6,21     | 0,48     | 0,56     |
| 13                                                       | 55,5            | 1135,34 | 733,21 | 402,13 | 64,8  |  | 1,62                         | 0,20  | 0,02     | 0,22     | 0,25     | 0,13     | 0,15     | 1,45                         | 4,93  | 0,38     | 5,55     | 6,21     | 3,16     | 3,84     |
| 14                                                       | 52,7            | 1135,26 | 733,24 | 402,02 | 60,2  |  | 1,73                         | 0,24  | 0,02     | 0,24     | 0,25     | 0,18     | 0,21     | 1,55                         | 5,87  | 0,46     | 6,07     | 6,25     | 4,55     | 5,28     |
| 15                                                       | 49,6            | 1135,19 | 733,24 | 401,95 | 55,4  |  | 1,80                         | 0,25  | 0,03     | 0,29     | 0,29     | 0,23     | 0,27     | 1,61                         | 6,25  | 0,65     | 7,36     | 7,23     | 5,80     | 6,84     |
| 16                                                       | 47,0            | 1135,10 | 733,26 | 401,84 | 51,4  |  | 1,83                         | 0,27  | 0,03     | 0,34     | 0,32     | 0,27     | 0,31     | 1,64                         | 6,69  | 0,81     | 8,47     | 8,09     | 6,71     | 7,64     |
| 17                                                       | 44,1            | 1135,04 | 733,27 | 401,77 | 47,0  |  | 1,90                         | 0,26  | 0,03     | 0,30     | 0,31     | 0,27     | 0,29     | 1,71                         | 6,54  | 0,83     | 7,41     | 7,82     | 6,84     | 7,20     |

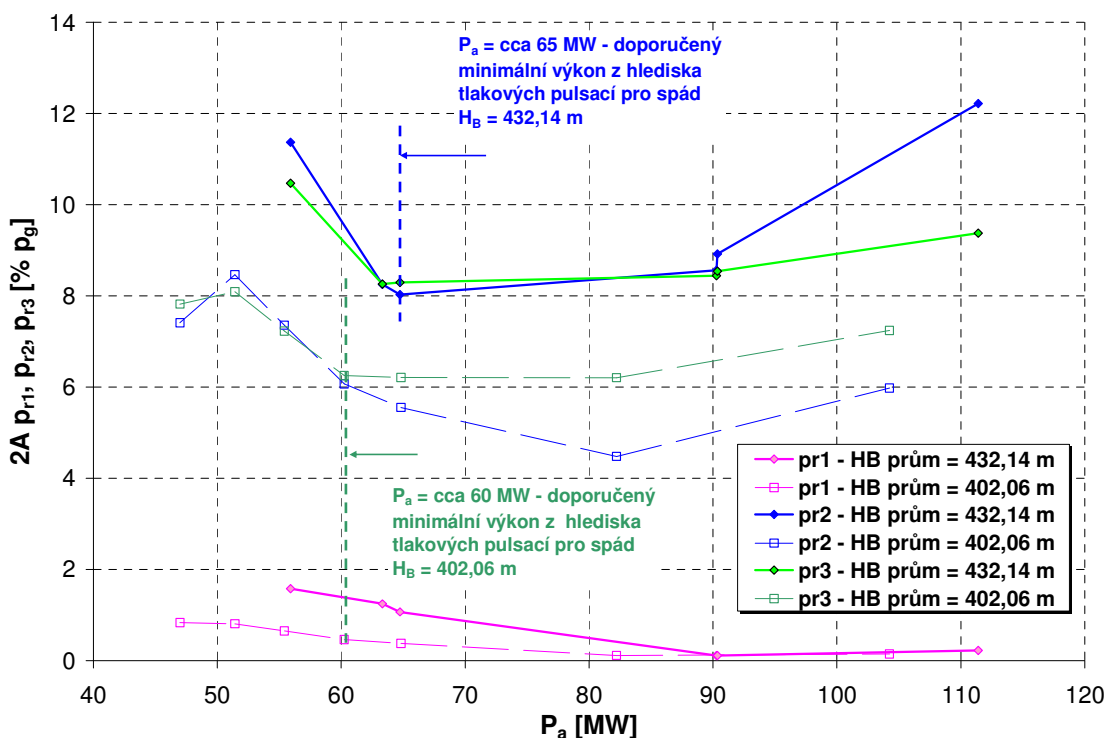
Tab. 5 - Pulsace pro měřené body při ustálených provozních stavech na TG3 v turbínovém režimu.



Obr. 11 – Pulsace činného výkonu na TG3 v turbínovém režimu.



Obr. 12 - Pulsace tlaků v hrdle spirály a v kuželi savky na TG3 v turbínovém režimu.



Obr. 13 - Pulsace tlaků v mezilopatkovém prostoru turbíny na TG3 v turbínovém režimu.

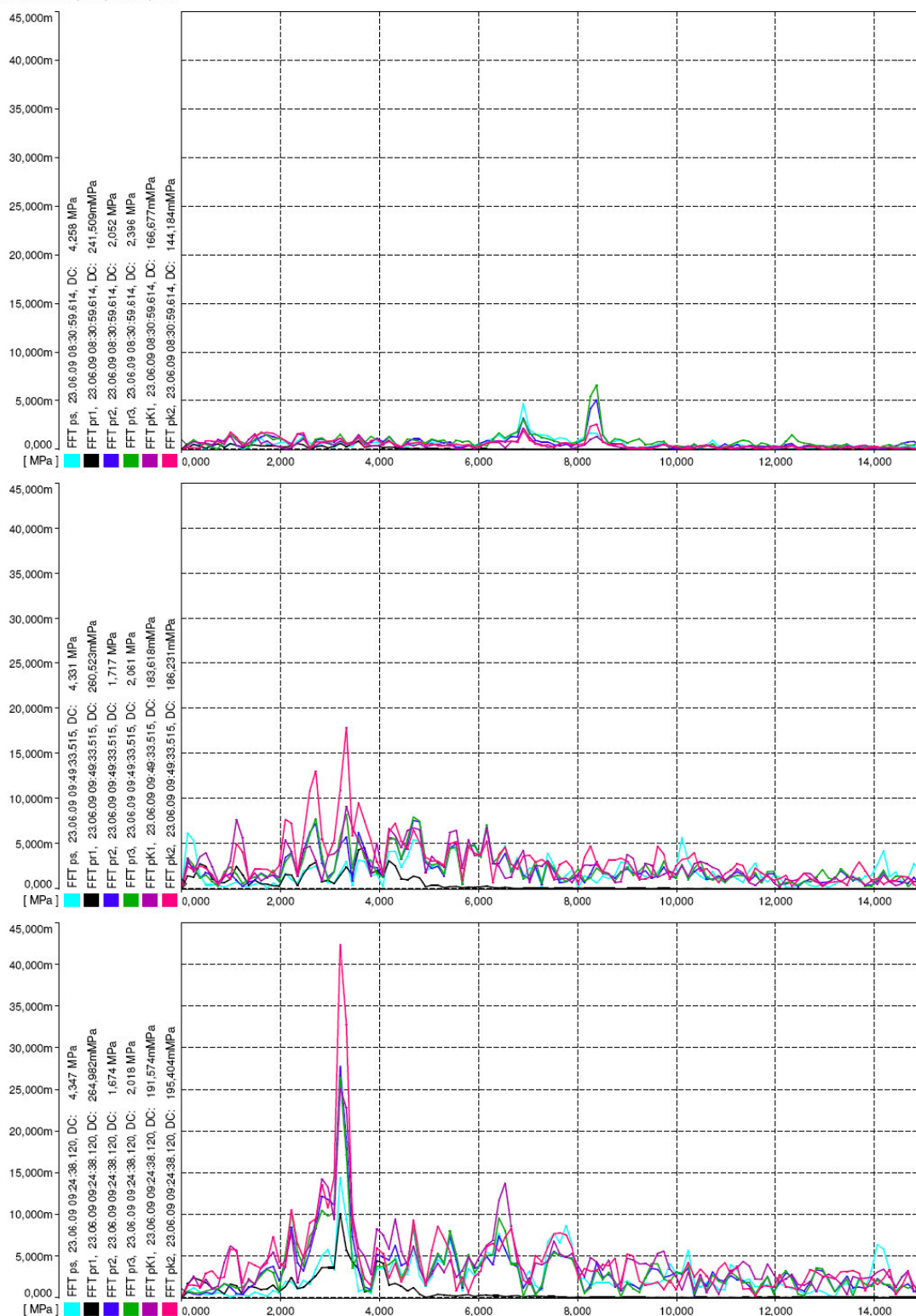
## Elektrárna Čierny Váh - TG3 - vysoký spád

č.m. 2: HB = 432,48 m; Pa = 114,2 MW  
č.m. 8: HB = 431,83 m; Pa = 65,1 MW  
č.m. 6: HB = 431,90 m; Pa = 55,9 MW

Date: 06.08.09 11:16:55

Responsible:

Company: OSC, a.s.

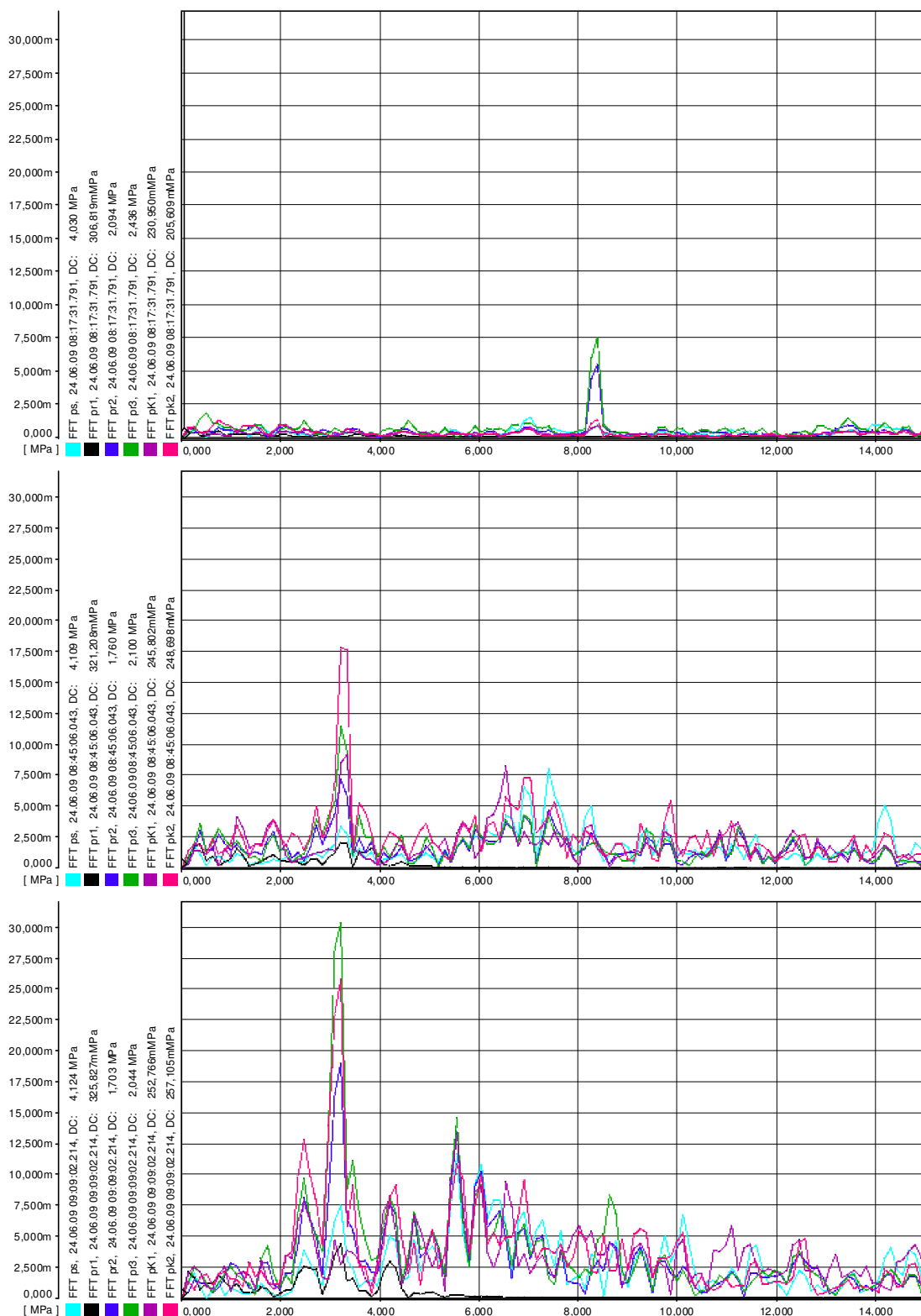


Obr. 14 – Frekvenční analýza signálů významných tlaků při různých výkonech na vysokém spádu.

## Elektrárna Čierny Váh - TG3 - nízký spád

č. m. 11: HB = 402,48 m; Pa = 104,2 MW  
č. m. 14: HB = 402,02 m; Pa = 60,2 MW  
č. m. 17: HB = 401,77 m; Pa = 47,00 MW

Date: 15.08.09 06:33:36  
Responsible:  
Company: OSC, a.s.



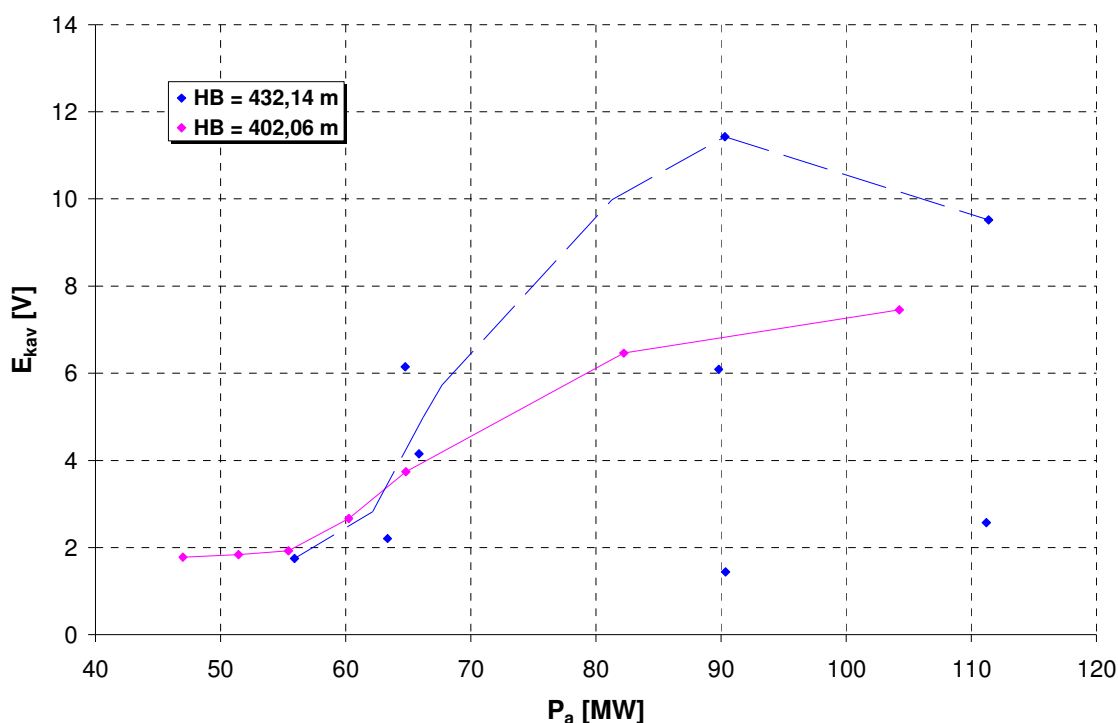
Obr. 15 – Frekvenční analýza signálů významných tlaků při různých výkonech na nízkém spádu.

## 6.3 Měření kavitačních emisí

Výsledky měření kavitačních emisí jsou v číselné podobě uvedeny v Tab. 4, v grafické podobě pak na Obr. 16.

Jak již bylo uvedeno v kapitole 6.1, během měření při vysokém spádu doházelo vlivem chvění kužele savky k uvolňování magnetické upínky přitlačující mikrofon na stěnu kužele, takže průběh naměřených hodnot vykazoval nevěrohodný rozptyl. Proto se na vybraných výkonových hladinách uskutečnilo opakované krátké proměření (č.m. 8). Průběh kavitačních emisí pro vysoký spád je orientační - byl vytvořen se zahrnutím pouze očekávaných (věrohodných) hodnot a podle tvaru průběhu kavitačních emisí naměřených při nízkém spádu.

Z výsledků měření kavitačních emisí vyplývá, že průběhy kavitačních emisí při obou měřených spádech mají se snižujícím se výkonem generátoru výrazný klesající charakter, tzn. pro provoz stroje na nižších výkonech nepředstavují žádné provozní omezení.



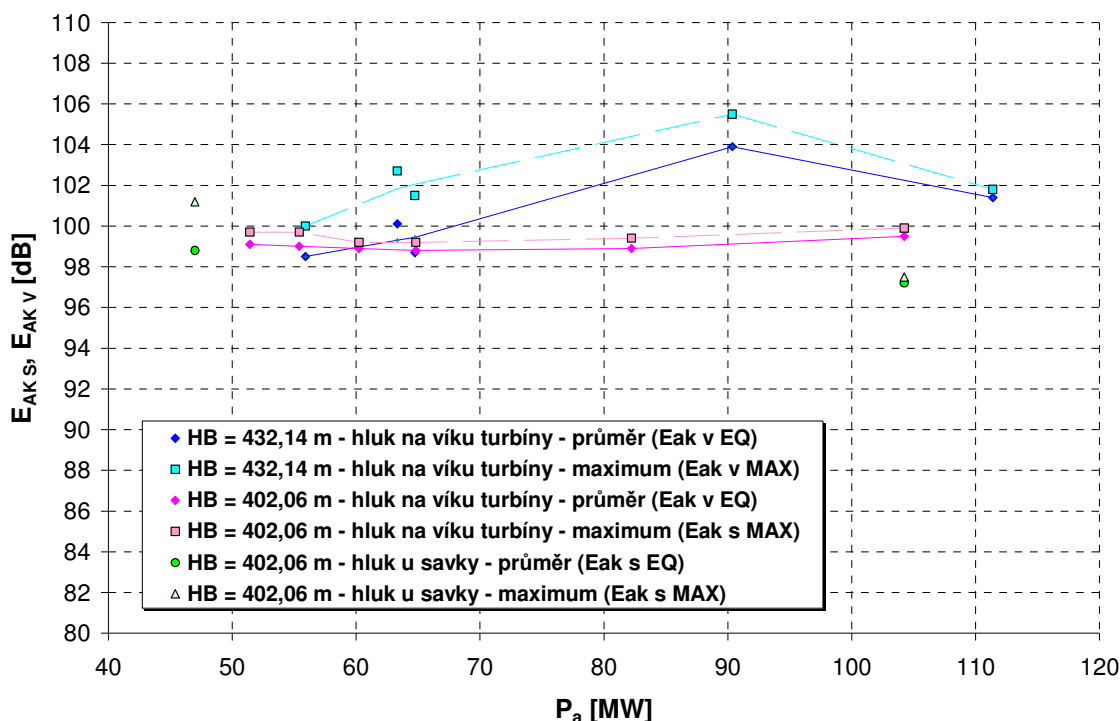
Obr. 16 – Průběh kavitačních emisí naměřených při různých výkonech TG3.

## 6.4 Měření hluku

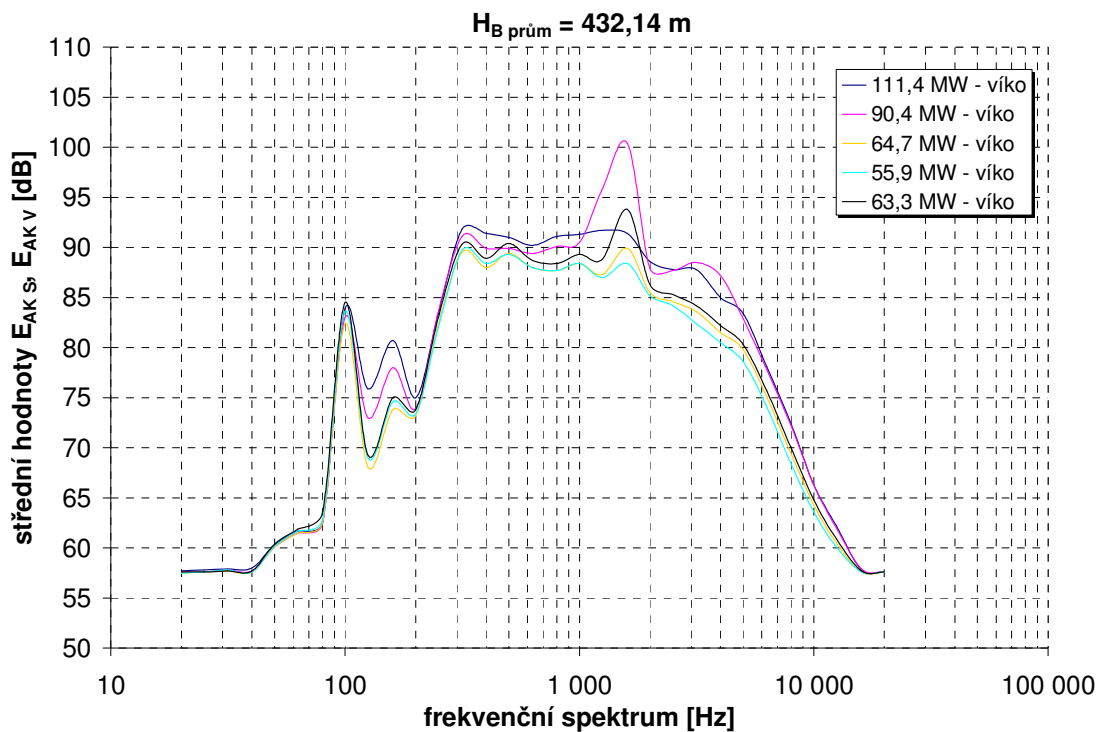
Měření a vyhodnocení hluku (akustické emise) se uskutečnilo v prostoru víka turbíny a savky. podle platných, běžně používaných návodů a norem – viz [4] a [5].

Naměřené hodnoty hluku jsou vyneseny v grafech na Obr. 17 ÷ Obr. 19. z obrázků vyplývá, že:

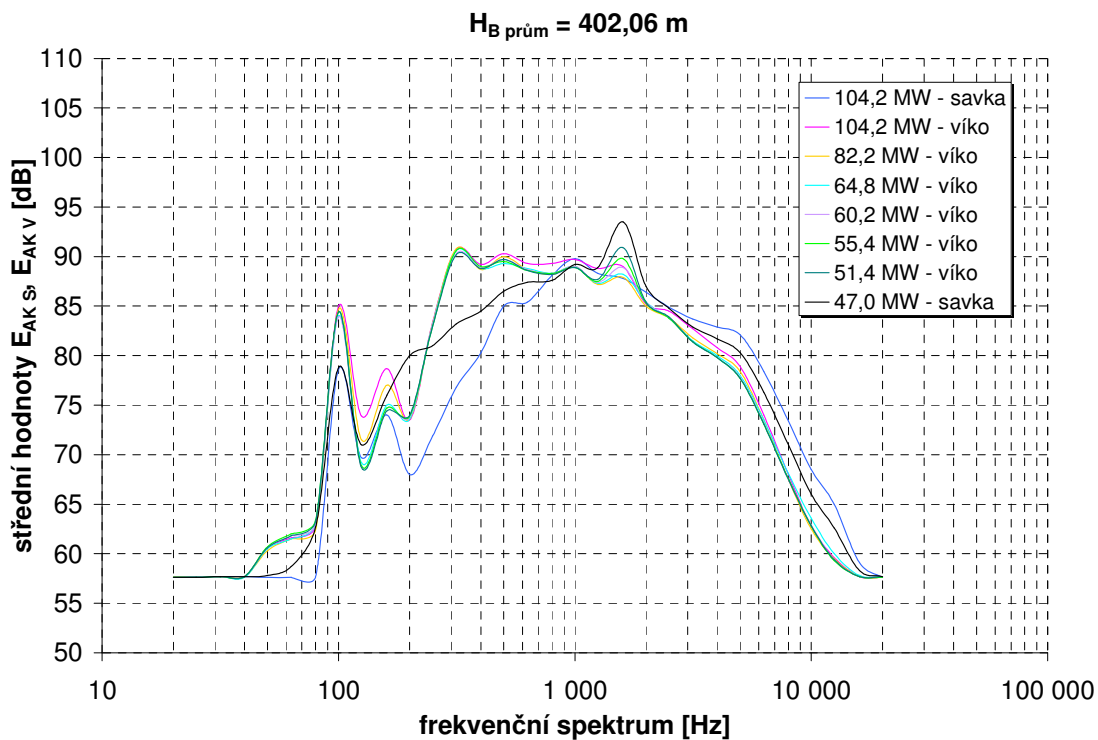
- 1) Průběhy výsledných hodnot emisí hluku (ekvivalentní ani maximální) měřené v prostoru víka turbíny i v prostoru u savky nevykazují se snižujícím se výkonem žádné abnormality – viz Obr. 17.
- 2) Při vysokém spádu bylo dosaženo maximum hluku na víku turbíny v „bezpečném pásmu“ kolem výkonu 90 MW a při dalším snižování výkonu se hluk snižoval. Při nízkém spádu se hodnota hluku na víku turbíny mění jen velmi málo, s téměř stejnou diferencí mezi střední (ekvivalentní - EQ) maximální (maximální - MAX) hodnotou. Hodnoty naměřené v prostoru savky odpovídají zejména u nejnižšího měřeného výkonu (47 MW) na nízkém spádu hodnotám naměřeným na víku turbíny. Rozdíl mezi střední a maximální hodnotou při tomto výkonu činí cca 2,5 dB, což koresponduje s rozdílem hodnot mezi středními a maximálními hodnotami u vysokého spádu.
- 3) Při analýze hodnot hluku na jednotlivých frekvenčních hladinách (z nichž se následně vy počítává výsledná hodnota pro dané frekvenční spektrum). vyplývá, že lokální maxima hluku jsou pro oba spády bez ohledu na výkon dosahována při frekvencích cca 100 ÷ 1600 Hz (viz Obr. 18 a Obr. 19).
- 4) Zvýšená hlučnost registrovaná subjektivně sluchem při nízkých výkonech zejména v prostoru savky (bouchání copu) se ve výsledném spektru hluku změřeného použitým přístrojem nijak jednoznačně neobjevila. Projevy pulsací a rázů jsou totiž v čase náhodné a nepravidelné a ve spektru se projeví jako širokopásmový šum.



Obr. 17 – Průběh výsledných emisí hluku naměřených při různých výkonech na TG3.



Obr. 18 – Emise hluku naměřené na jednotlivých frekvenčních hladinách při vysokém spádu.



Obr. 19 – Emise hluku naměřené na jednotlivých frekvenčních hladinách při nízkém spádu.

## 6.5 Měření vibrací

Měření a vyhodnocení vibrací (relativních i absolutních) pracovníky VET proběhlo v souladu s normami [2] a [3]. Záznamy jednotlivých měřených signálů při zkouškách TG3 jsou uloženy v archivu VET, kde jsou na požádání k dispozici.

Vybrané provozní záznamy vibrací jsou uvedeny v Příloze 2. Záznamy jsou vykresleny s relativním časem a bez uvedení výkonových hladin. Vztah k absolutnímu času, stejně jako určení odpovídající výkonové hladiny je patrný z Tab. 5. Pro grafické vynesení průběhů signálů bylo pracovníky VET použito odlišné značení, než bylo stanoveno v dokumentu [10] i v projektu [11]. Vzájemná souvislost mezi oběma způsoby značení je uvedena v Tab. 4.

Při celkovém vyhodnocení si je třeba uvědomit následující skutečnosti:

- Měření zrychlení na nepohyblivých částech – ložiscích – má mimo diagnostických možností také přímou vazbu na budící síly ( $F=m.a$ ), hlavně v oblasti nižších frekvencí, které vlastně představují pohyb hmot jako celku.
- Projevy pulsací a rázů jsou v čase náhodné, nepravidelné a Fourierova transformace takového signálu je pak zobrazuje jako širokopásmový šum. Energie rázu se tak rozkládá na velké množství frekvencí, což způsobuje nepřesnost při výpočtu jejich energetického obsahu a tendenci podceňovat jejich sumární obsah.
- Jednostranné zaměření se jen na amplitudy relativních hřídelových vibrací v ložiscích by při vyhodnocování měření mohlo vést k mylné domněnce, že měřené provozní režimy (výkony) mají malý vliv na změnu jejich amplitud a tedy i malý vliv na konstrukci stroje, což ale není možné říct při zohlednění jednosměrných posunů hřídele v ložiscích a signálů z akcelerometrů. Proto je účelné vzít na zřetel i frekvence v řádech kHz.

| Pásma vibrací  | Rozkmit (dvojamplituda) vibrací |  |
|----------------|---------------------------------|--|
|                | $2A = S_{(p-p)}$                |  |
|                | [μm]                            |  |
| <b>Pásmo A</b> | 0 ÷ 143                         |  |
| <b>Pásmo B</b> | 143 ÷ 235                       |  |
| <b>Pásmo C</b> | 235 ÷ 471                       |  |

Poznámka: Výše uvedené hodnoty mezí platí pro soustrojí s otáčkami 500 ot/min

**Pásmo A** - oblast pro provoz nově přejímaných strojů

**Pásmo B** - oblast pro provoz strojů po neomezenou dobu

**Pásmo C** - neuspokojivé pro trvalý provoz (provoz jen do doby možnosti opravy)

**Tab. 6** – Tabulka mezních hodnot relativních hřídelových vibrací pro PVE Čierny Váh.

Naměřené výsledky jsou pracovníky VET zhodnoceny následovně:

- 1) S přihlédnutím na oblasti obvykle provozovaných výkonů (cca 78 ÷ 114 MW) vykazují všechny vibrace při provozu stroje mimo tuto oblast velmi intenzivní nárůst amplitudy.
- 2) Všechny měřené hřídelové vibrace se při obou spádech a nízkých výkonech pohybovaly v pásmu A nebo mírně zasahovaly do pásma B (cca 170 μm) – viz Tab. 6 vyplývající z normy [2]. Vliv výkonu generátoru na hodnoty hřídelových vibrací v obou generátorových ložiscích a dolním vodícím ložisku turbíny je minimální. Zato v horním vodícím ložisku turbíny došlo při minimálních měřených výkonech k nárůstu vibrací oproti stavu na běžných výkonech až o cca 200 %.

- 3) Při výkonech pod 60 MW je při obou spádech patrný jednosměrný posun hřídele, který se pak opírá o ložisko turbíny, což se projevilo na příslušných snímačích absolutních vibrací (akcelerometrech).
- 4) Samotné hřídelové vibrace by nárůstem svých hodnot nemusely být při sníženém výkonu provozně nebezpečné, ale jejich kombinace s posuvy hřídele na jednu stranu a jejich interakcí s ložisky může vést k jejich rychlému opotřebení a k závadám souvisejícím s únavou materiálu.
- 5) Při výkonech menších než 70 MW lze z celkových pohybů hřídele (hřídelových vibrací) a současných změn vibrací ložisek vysledovat narůstající silové namáhání ložisek (vlivem jejich kontaktu s hřídelí) v závislosti na dynamických podmínkách. Tento stav se pak velmi výrazně projevuje při výkonech pod cca 60 MW. V některých měřených bodech dosahují špičky amplitud zrychlení ( $p_{\max}$ ,  $p_{\min}$ ) popř. dvojamplitud („p-p“) i více než desetinásobně vyšší hodnoty oproti amplitudám při výkonu 87 MW. Příklad nárůstu absolutních vibrací, resp. měřených zrychlení je uveden v Tab. 7. Přitom dílčí amplitudy na otáčkové frekvenci stroje i v oblasti nižších frekvencí se snižujícím se výkonem takovým tempem nerostou.

| výkon             | čas | amplituda | číslo kanálu na 16-ti kanálové ústředně VET |         |         |         |         |
|-------------------|-----|-----------|---------------------------------------------|---------|---------|---------|---------|
|                   |     |           | 8                                           | 9       | 10      | 11      | 12      |
|                   |     |           | označení signálu                            |         |         |         |         |
| $P_a$             |     |           | HVLT                                        | HVLT    | DVLT    | DVLT    | K-OK    |
| MW                | min |           | $m/s^2$                                     | $m/s^2$ | $m/s^2$ | $m/s^2$ | $m/s^2$ |
| běžný výkon       |     |           |                                             |         |         |         |         |
| 83                | 20  | p max     | 0,05                                        | 0,05    | 0,05    | -0,03   | -0,03   |
|                   |     | p min     | -0,05                                       | -0,05   | -0,05   | -0,05   | -0,055  |
|                   |     | p-p       | 0,1                                         | 0,1     | 0,1     | 0,02    | 0,025   |
| maximální vibrace |     |           |                                             |         |         |         |         |
| 47                | 58  | p max     | 0,15                                        | 0,25    | 1       | 0,6     | 0,45    |
|                   |     | p min     | -0,2                                        | -0,25   | -1      | -0,6    | -0,65   |
|                   |     | p-p       | 0,35                                        | 0,5     | 2       | 1,2     | 1,1     |
| detail vibrací    |     |           |                                             |         |         |         |         |
| 47                | 58  | p max     | 0,07                                        | 0,1     | 0,3     | 0,1     | 0,15    |
|                   |     | p min     | -0,07                                       | -0,1    | -0,5    | -0,15   | -0,12   |
|                   |     | p-p       | 0,14                                        | 0,2     | 0,8     | 0,25    | 0,27    |

Tab. 7 – Příklad nárůstu vibrací na TG3 při malém výkonu na nízkém spádu ve srovnání s běžným výkonem.

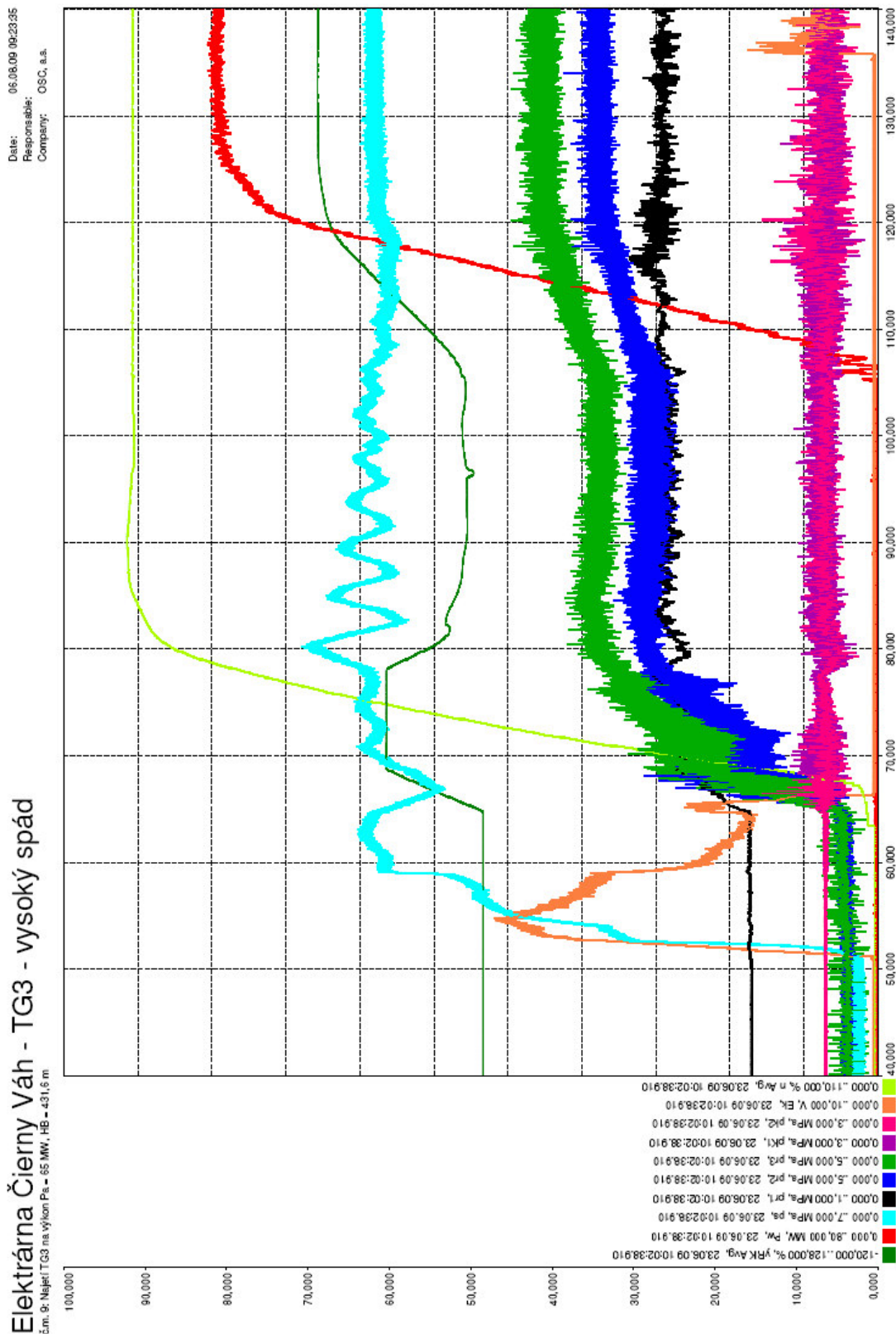
## 6.6 Test najetí stroje na nízký výkon

Na základě okamžitých výsledků měření byly ihned po ukončení zkoušek na obou spádech **předběžně** určeny (bez vyhodnocení vibračního chování stroje) minimální výkonové hladiny, při kterých by mohlo být soustrojí TG3 v turbínovém režimu schopné běžného provozu. Jedná se o tyto výkonové hladiny:

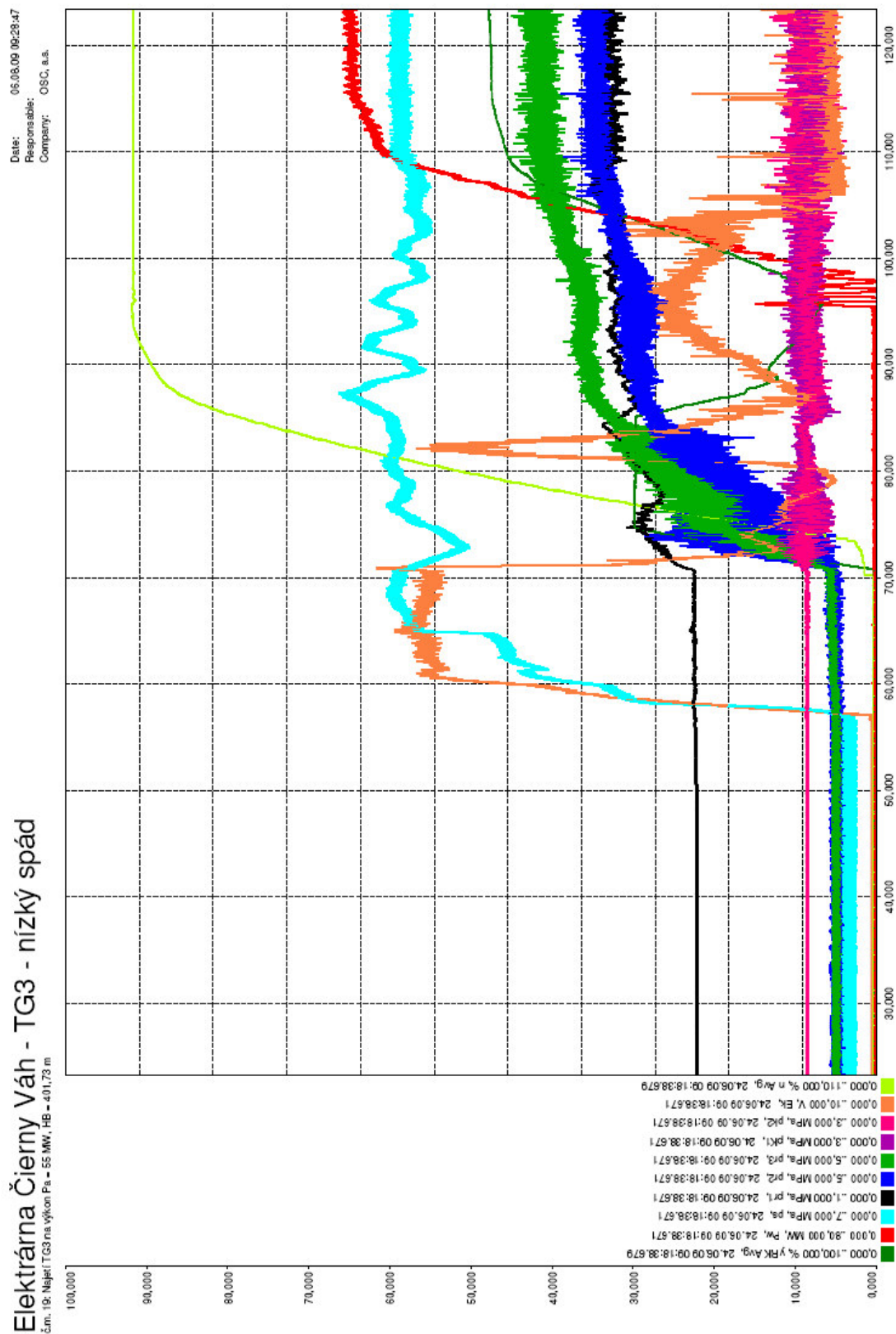
- spád  $H_B = 431,60$  m .....  $P_{a \min} =$  cca 65 MW
- spád  $H_B = 401,73$  m .....  $P_{a \min} =$  cca 52 MW (dle bouchání copu)  
resp. 60 MW (dle pulsací tlaku)

Protože s nově stanoveným minimálním výkonem musí být stroj schopný bez problémů fungovat při všech provozních stavech, byl v rámci zkoušek při každém z obou spádů uskutečněn i test najetí stroje. Zvolené výkony pro jednotlivé spády byly 65 MW pro vysoký spád a 52 MW pro nízký spád.

Najetí na oba výkony proběhlo bez komplikací – viz záznamy najetí na Obr. 20 a Obr. 21.



Obr. 20 – Najetí soustrojí TG3 na výkon  $P_a = 65$  MW při spádu  $H_B = 431,6$  m.



Obr. 21 – Najetý soustrojí TG3 na výkon  $P_a = 52$  MW při spádu  $H_B = 401,73$  m.

## 7. Závěr

Provedené měření pro posouzení možnosti provozovat instalované stroje v turbínovém režimu na nižším výkonu, než je stávající minimum, a jeho výsledky lze zhodnotit následovně:

1. Měření se uskutečnilo na soustrojí TG3 v turbínovém režimu při dvou spádech blížících se maximálnímu a minimálnímu provoznímu spádu elektrárny ( $H_{B\text{ prům}} = 432,14 \text{ m}$  a  $402,06 \text{ m}$ ).
2. Dvojamplitudy pulsací činného výkonu v celém zkoušeném rozsahu dosahují maximálně hodnoty  $1,8 \% P_{an}$  a nepředstavují omezující faktor.
3. Pulsace tlaků v hrdle spirály, mezilopatkovém prostoru a savce nabývají významných hodnot pro výkony pod 60 MW (min. spád), resp. 65 MW (max. spád). Tyto výkony by měly být z hlediska pulsací považovány za dolní mez provozní oblasti.
4. Průběhy pulsací tlaků v mezilopatkovém prostoru před dolním labyrintem OK ( $p_{r2}$ ) a pod věncem OK ( $p_{r3}$ ) mají „vanový“ charakter, kdy maxim dosahují jak pro minimální, tak pro maximální výkon. Nežádoucí dynamické projevy stroje pro maximální výkon byly již dříve potlačeny vhněním vzduchu do prostoru oběžného kola. Obdobné řešení se nabízí i pro oblast malých výkonů.
5. Se snižujícím se výkonem dochází ve frekvenčním spektru signálů tlaků k posunu dominantní složky od frekvence 8,3 Hz (otáčková frekvence stroje) k frekvenci kolem 3,2 Hz, což odpovídá frekvenci otáčení vodního víru - „copu“, při současném výrazném nárůstu mohutnosti této dominantní frekvenční složky. K posunu dominantní frekvence dochází zejména u tlaků v mezilopatkovém prostoru  $p_{r2}$  a  $p_{r3}$  a tlaku v savce  $p_{K2}$ .
6. Hodnoty kavitacních emisí při obou měřených spádech vykazují se snižujícím se výkonem generátoru klesající charakter. Kavitace nepředstavují limitující faktor.
7. Průběhy výsledných hodnot emisí hluku (ekvivalentní ani maximální) měřené v prostoru víka turbíny i v prostoru u savky nevykazují se snižujícím se výkonem žádné abnormality. Zvýšená hlučnost registrovaná sluchem při nízkých výkonech zejména v prostoru savky (bouchání vodního víru - „copu“) se ve výsledcích ani v detailním rozboru naměřeného spektra hluku nijak jednoznačně neobjevila.
8. Relativní hřídelové vibrace se v celém proměřeném rozsahu výkonů pohybovaly v pásmu A, popř. mírně zasahovaly do pásma B. Nárůst absolutních vibrací při snižování výkonu byl evidován zejména u horního vodícího ložiska turbíny, kdy byl při minimálních měřených výkonech nárůst vibrací oproti stavu na běžných výkonech až o cca 200 %. Samotné hřídelové vibrace by přitom nemusely být při sníženém výkonu provozně nebezpečné, ale jejich kombinace s jednostrannými posuvy hřídele a jejich interakcí s ložisky může vést k jejich rychlému opotřebení a k závadám souvisejícím s únavou materiálu.
9. Soustrojí TG3 prokázalo schopnost bezproblémově najet a udržet výkony nižší, než je jeho stávající výkonové minimum. Najetí se uskutečnilo na výkon cca 65 MW při spádu  $H_B = 431,6 \text{ m}$ , resp. cca 52 MW při spádu  $H_B = 401,73 \text{ m}$ .

Na základě výsledků měření skupiny OSC se ukazuje, že z hlediska tlakových pulsací by mělo být soustrojí TG3 (resp. všechny stroje na PVE Čierny Váh) možné bezpečně provozovat v turbínovém režimu i při výkonech nižších, než je stávající provozní minimum (78 MW), konkrétně při výkonech:

- $H_B = \text{cca } 432 \text{ m} \dots\dots P_{a \text{ min}} = \text{cca } 65 \text{ MW}$
- $H_B = \text{cca } 402 \text{ m} \dots\dots P_{a \text{ min}} = \text{cca } 60 \text{ MW}$

Z výsledků vibračního chování stroje (měření provedené skupinou VET) však vyplývá, že při provozu TG3 na výkonech pod cca 70 MW dochází k velkému nárůstu hodnot absolutních vibrací (zejména pod výkonem 60 MW), což může mít vliv na nárůst poruchovosti stroje. Proto provoz na takových výkonech není možno za stávajících podmínek bez dalších opatření doporučit.

Výsledky uvedené ve zprávě jsou určeny jako podklad pro odborné posouzení stavu instalovaných turbín výrobcem ČKD Blansko Holding, a.s. a pro konečné rozhodnutí o případném rozšíření bezpečného provozního pásma turbínového režimu soustrojí PVE Čierny Váh směrem k nižším výkonům.

## LITERATURA:

- [1] ČSN EN 60041: „Přejímací zkoušky na díle pro určení hydraulických charakteristik vodních turbín, akumulčních čerpadel a čerpadlových turbín“, ČSNI Praha, 1995.
- [2] ČSN ISO 7919-5: „Vibrace strojů s nevratným pohybem - Měření na rotujících hřídelích a kritéria hodnocení – Část 5: Soustrojí ve vodních elektrárnách a čerpacích stanicích“, ČSNI Praha, 1999.
- [3] ČSN ISO 10816-5: „Hodnocení vibrací strojů na základě měření na nerotujících částech – Část 5: Soustrojí ve vodních elektrárnách a čerpacích stanicích“, ČSNI Praha, 1999.
- [4] Metodický návod pro měření a hodnocení hluku a vibrací v pracovním prostředí č.j. HEM-300-26.4.01-16344 ze dne 26.4. 2001.
- [5] ČSN IEC 61672-1: „Elektroakustika - Zvukoměry - Část 1: Technické požadavky“ ČSNI Praha, 2003.
- [6] ČSN EN 60994: „Pokyny pro měření vibrací a pulsací v hydraulických strojích (turbínách, akumulčních čerpadlech a čerpadlových turbínách) na díle“, ČNI, 1997.
- [7] Černoch S.: „Strojně technická příručka“, SNTL Praha, 1968.
- [8] Pasporty vodních elektráren, ORGREZ Brno, n.p., 1976.
- [9] „Zápis z rokovania o zvýšení regulačního rozsahu výkonu turbín TG 1-6 na PVE Čierny Váh“, 04/2009.
- [10] Petříček A. Trtík J.: „PVE Čierny Váh, technické posouzení rozšíření regulačního výkonu turbín TG1 ÷ 6 Čierny Váh“; dokument ČKD Blansko Holding, a.s., 02/2009.
- [11] Ševčík P., Bischof R.: „PVE Čierny Váh - projekt měření pro rozšíření regulačního výkonu turbín“, OSC, a.s., 05/2009.