



Měření parametrů turbogenerátoru TG4 PVE Čierny Váh

Technická zpráva

17. 6. 2025

TZ 2460/3000



Název: PVE Čierny Váh
Energetické parametry TG4 před rekonstrukcí

Druh dokumentu: Technická zpráva

Datum vydání: 17. 6. 2025

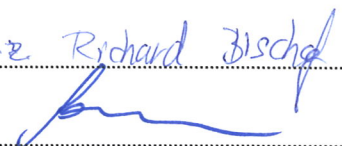
Číslo zakázky: 33 852 000

Objednatel: Slovenské elektrárne, a.s.
Pribinova 40
811 09 Bratislava

Autor zprávy: Ing. Lukáš Rinka
Spolupracovníci: Ing. Petr Ševčík
Ing. Richard Bischof

v.z. 

Vedoucí úkolu: Ing. Lukáš Rinka

v.z. 

Vedoucí divize: Ing. Štěpán Sommer



Evidenční označení: TZ 2460/3000

Počet listů: 44 (zpráva) + 82 (přílohy)
Rozdělovník zprávy: Slovenské elektrárne, a.s. – 4x
OSC, a.s. – 2x

Číslo výtisku:

Anotace

Zpráva obsahuje popis zkoušek, použitého vybavení a vyhodnocení ověřovacího měření účinnosti soustrojí TG4 před rekonstrukcí na přečerpávací vodní elektrárně Čierny Váh, Slovensko. Kromě energetických parametrů nezbytných pro stanovení účinnosti turbíny soustrojí TG4 byly také měřeny a vyhodnoceny tlakové pulzace, kavitace a vibrace. Jako absolutní metoda stanovení průtoku turbínou byla použita Gibsonova metoda (metoda tlak – čas). Všechny zkoušky, kromě měření a vyhodnocení vibrací, byly provedeny společností OSC, a.s. ve dnech 23. a 25. 4. 2025. Měření a vyhodnocení vibrací objednatel zajišťoval vlastní vibrodiagnostickou skupinou.

Obsah

1	Úvod	7
2	Základní informace o elektrárně	7
3	Měřené veličiny	8
3.1	Seznam měřených veličin.....	8
4	Postup měření.....	16
4.1	Přípravná fáze.....	16
4.2	Průběh zkoušek.....	16
4.3	Odchylky proti projektu	17
5	Vyhodnocení zkoušek	17
5.1	Použité konstanty.....	17
5.2	Měření průtoku Gibsonovou metodou	18
5.2.1	Princip metody.....	18
5.2.2	Provoz stroje a měrný úsek.....	19
5.3	Průtok měřený indexovou metodou	21
5.4	Ztráty generátoru.....	21
5.5	Hlavní výpočtová tabulka	24
5.6	Nejistoty měření.....	27
5.6.1	Nejistota průtoku	27
5.6.2	Nejistota spádu	28
5.6.3	Nejistota výkonu	29
5.6.4	Nejistota účinnosti.....	30
6	Prezentace výsledků měření	30
6.1	Grafická prezentace.....	30
6.2	Tlakové pulzace	37
6.3	Vibrace.....	40
6.3.1	Měření OSC na savkách	40
6.3.2	Měření vibrodiagnostické skupiny SE	40

6.4	Kavitace	42
7	Závěr	44

Seznam příloh

P1	Kalibrační listy	53 stran
P2	Vyhodnocení průtoků Gibsonovou metodou	15 stran
P3	Zpráva z měření vibrací	14 stran

Seznam zkratek

č.m. (CM)	číslo měření
Č	čerpadlo
DVLT	dolní vodící ložisko turbíny
G1, G2	horní (G1) / dolní (G2) profil pro měření průtoků Gibsonovou metodou
GUČ	kulový uzávěr čerpadla
GUT	kulový uzávěr turbíny
OK	oběžné kolo
OSC	firma OSC, a.s.
PG	pomocný generátor
PVE	přečerpávací vodní elektrárna
SE	firma Slovenské elektrárne, a.s.
T	turbína
TA	proudový měřicí transformátor
TGx	turbogenerátor (soustrojí) číslo „x“
tp.	třída přesnosti
TV	napětový měřicí transformátor
US	ultrazvukový (ultrasonic)
v.č.	výrobní číslo

Seznam značení

A_1, A_2	m^2	Vstupní / výstupní průřez stroje
a_{DT_T} a_{DT_P}	mm/s	Vibrace na savce turbíny/čerpadla (zrychlení)
$\cos \varphi$	-	Účinník
C_{pst}	m^{-1}	Geometrický faktor potrubí (penstock faktor)
dp_T	Pa	Tlaková diference na spirále turbíny pro indexové měření průtoků
E_{kT}, E_{kP}	V	Kavitační emise na savce turbíny/čerpadla (relativní hodnota)
f	Hz	Frekvence
h_{z2}	m	Úroveň dolní hladiny (relativně k poloze snímače na hrázi)
h_{v1}, h_{v2}	m	Rychlostní výška ve vstupním a výstupním profilu turbíny/čerpadla
H	m	Čistý spád/dopravní výška
$H_{g \max}$	m	Geodetický spád/dopravní výška – maximální
I	A	Proud generátoru



I_b	A	Budicí proud motorgenerátoru
L	m	Délka
n	s^{-1}	Otáčky soustrojí
p_{1G}	Pa	Tlak v průřezu G1 pro Gibsonovu metodu
p_{1P}	Pa	Tlak ve výstupním průřezu čerpadla
p_{1T}	Pa	Tlak ve vstupním průřezu spirály turbíny
p_{2GPa}	Pa	Tlak v průřezu za GUČ pro Gibsonovu metodu
p_{2GPb}	Pa	Tlak v průřezu za GUČ pro Gibsonovu metodu – za zdí
p_{2GT}	Pa	Tlak v průřezu za GUT pro Gibsonovu metodu
P_a	W	Činný výkon/příkon
$P_{a\ sp}$	W	Činný výkon/příkon přepočtený na specifikovaný spád / dopravní výšku
p_{amb}	Pa Abs.	Tlak vzduchu ve strojně
P_{app}	VA	Zdánlivý výkon/příkon
p_{DT_L}	Pa	Tlakové pulzace v savce čerpadla – vlevo
p_{DT_P}	Pa	Tlakové pulzace v savce čerpadla – vpravo
p_{DT_T}	Pa	Tlakové pulzace v savce turbíny
P_h	W	Hydraulický výkon/příkon
P_g	VA	Jalový výkon/příkon
P_T	W	Výkon na hřídeli turbíny / příkon na hřídeli čerpadla
$P_{T\ sp}$	W	Výkon na hřídeli turbíny / příkon na hřídeli čerpadla přepočtený na specifikovaný spád / dopravní výšku
P_w	W	Fluktuace činného výkonu
$p_{x\ p-p}$	Pa	Dvojamplitudy (peak-peak) pulzací tlaku „x“
Q	m^3/s	Průtok
Q_0	m^3/s	Zbytkový průtok přivaděčem po dovření uzavíracích orgánů
Q_i	m^3/s	Průtok stanovený indexovou metodou
$Q_{i\ sp}$	m^3/s	Průtok stanovený indexovou metodou přepočtený na specifikovaný spád / dopravní výšku
Q_{us}	m^3/s	Průtok měřený ultrazvukovým průtokoměrem
t	s	Čas
$tp.$	%	Třída přesnosti
t_w	°C	Teplota vody
U_f	V	Napětí generátoru – fázové
U_b	V	Budicí napětí motorgenerátoru
$y_{GUČo}$ $y_{GUČc}$	-	Indikace otevřené / zavřené polohy kulového uzávěru čerpadla
y_{GUTo} y_{GUTc}	-	Indikace otevřené / zavřené polohy kulového uzávěru turbíny
y_{GV}	%	Otevření rozvaděče
Z_1	m n.m.	Hladina v horní nádrži – provozní měření
Z_2	m n.m.	Hladina v dolní nádrži – měření OSC
Z_{2B}	m n.m.	Hladina v dolní nádrži – provozní měření



z_{P1P}	m n.m.	Poloha membrány tlakového snímače p_{1P} ve výstupním profilu čerpadla
z_{P1T}	m n.m.	Poloha membrány tlakového snímače p_{1T} ve vstupním profilu turbíny
Δp	Pa	Rozdíl tlaku zaznamenaný mezi snímači p_{1G} a p_{2G}
$\eta_{\text{č}}$	%	Účinnost čerpadla
η_T	%	Účinnost turbíny
η_U	%	Účinnost soustrojí
ρ	kg/m ³	Hustota
ξ	Pa	Součet tlakových ztrát mezi odběry a rozdíl rychlostních výšek

1 Úvod

Přečerpávací vodní elektrárna (PVE) Čierny Váh je situována v severní části slovenského pohoří Nízké Tatry. Na soustrojí TG4 se ve dnech 23. a 25. 4. 2025 uskutečnilo měření energetických parametrů, které bude sloužit jako podklad pro plánovanou modernizaci stroje. Cílem měření bylo zejména stanovení účinnosti, vibrací, kavitací a tlakových pulzací, a to jak pro turbínový, tak i čerpadlový provoz stroje. Měření bylo vykonáno pro dva spády (dopravní výšky) danými aktuálními hydrologickými podmínkami v době zkoušek.

Měření a zpracování výsledků bylo provedeno společností OSC, a.s. ve spolupráci s vlastní vibrodiagnostickou skupinou objednatele. Pro stanovení absolutních hodnot průtoků byla zvolena Gibsonova metoda (metoda tlak – čas), která byla v turbínovém režimu doplněna relativní metodou měření průtoku (Winter-Kennedy). Měření na TG4 bylo vykonáno v souladu s normou [1] aplikovanou při reálných provozních podmínkách díla a taktéž v souladu s odsouhlaseným projektem měření [5].

2 Základní informace o elektrárně

PVE Čierny Váh, uvedená do provozu roku 1984, je špičková přečerpávací elektrárna vybavena šesti identickými vertikálními soustrojími v třístrojovém uspořádání (Francisova turbína + dvoustupňové čerpadlo) a jedním soustrojím s Kaplanovou turbínou. Každá dvojice soustrojí s Francisovými turbínami má společný přivaděč. Základní parametry nádrží i vlastního soustrojí TG4 jsou následující:

Turbína	
Typ	F10
Průměr OK	2600 mm
Počet lopatek OK / RK	17 / 20
Spád maximální / střední / minimální netto	428.00 m / 413.00 m / 391.05 m
Návrhový průtok (hltnost)	30 m ³ s ⁻¹
Regulační rozsah před / po modernizaci	70 ÷ 114.3 MW / 50 ÷ 122.4 MW
Zvýšený výkon při Q = 35 m ³ s ⁻¹	122.4 MW
Jmenovité / maximální průběžné otáčky	500 ot.min ⁻¹ / 867 ot.min ⁻¹
Skutečná sací výška	24.66 - 17.21 m
Generátor	
Generátorový chod	
Zdánlivý / činný výkon	124 000 kVA / 122 400 kW
cos φ	0.9
Jmenovité napětí / jmenovitý proud	15 750 ±5% V / 4 545 A
Frekvence	50 Hz
Jmenovité / průběžné otáčky	500 / 885 ot.min ⁻¹
Zapojení vinutí statoru	YY
Motorický chod	
Zdánlivý / činný výkon	118 000 kVA / 110 700 kW
cos φ	0.96
Jmenovité napětí / jmenovitý proud	15 750 ±5% V / 4 545 A

Tab. 1: Základní parametry TG4 na PVE Čierny Váh

3 Měřené veličiny

3.1 Seznam měřených veličin

Měřené veličiny použité pro vyhodnocení GM jsou uvedeny v následující Tab. 2.

Veličina	Přístrojové vybavení	tp.	Poznámka
y _{GV}	Otevření rozvaděče	-	Připojení ve skříni: DS8, svorkovnice: X1, převodník GOZZ1, svorka: C
y _{GUTo} y _{GUTc}	Indikace otevřené / zavřené polohy kulového uzávěru turbíny	-	Připojení ve skříni: DS4.4, GUTo: svork.: 3X38SQ, sv: 6(+), GUTc: svork.: 3X38SQ, sv: 5(+), GUTo+GUTc: svork: X1, sv: 50(-)
y _{GUČo} y _{GUČc}	Indikace otevřené / zavřené polohy kulového uzávěru čerpadla	-	Připojení ve skříni: DS4.5, GUČo: svork.: 3X51SQ, sv: 5(+), GUČc: svork.: 3X51SQ, sv: 6(+), GUČo+GUČc: svork: 3X51SQ, sv: 2(-)
Z ₁	Hladina v horní nádrži	-	Odečet z obrazovky regulátoru
Z _{2B}	Hladina v dolní nádrži	-	Odečet z obrazovky regulátoru
p _{1G}	Tlak v průřezu G1 pro Gibsonovu metodu	0.2	Instalace paralelně k provoznímu snímači na odběru na začátku přívaděče (profil G1) ve tokovém objektu – viz Obr. 1 a Obr. 15
p _{2GT}	Tlak v průřezu před GUT pro Gibsonovu metodu	0.2	Instalace na hadici ze 2 tlakových odběrů – viz Obr. 1 a Obr. 3
p _{2GPa}	Tlak v průřezu za GUČ pro Gibsonovu metodu	0.25	Instalace na sběrač tlaků ze 4 odběrů – viz Obr. 1 a Obr. 6
p _{2GPb}	Tlak v průřezu za GUČ pro Gibsonovu metodu – za zdí elny	0.25	Instalace na odběru tlaku na propojovací potrubí ze 4 tlakových odběrů – viz Obr. 1 a Obr. 6
p _{1T}	Tlak ve vstupním průřezu spirály turbíny	0.2	Instalace sběrač tlaků ze 4 odběrů z hrdla spirály turbíny – viz Obr. 1 a Obr. 4
p _{1Č}	Tlak ve výstupním průřezu čerpadla	0.25	Instalace na hadici ze 2 tlakových odběrů – viz Obr. 1 a Obr. 7
h _{z2}	Úroveň dolní hladiny (relativně k poloze snímače na hrázi)	0.15	Snímač umístěn na hrázi dolní nádrže nad výtakovým průřezem savek – viz Obr. 1 a Obr. 13
dp _T	Tlaková diference na spirále turbíny pro indexové měření průtoku	0.075	Instalace na tlakové odběry na spirále – viz Obr. 1 a Obr. 12

Veličina		Přístrojové vybavení	tp.	Poznámka
p_{DT_T}	Tlakové pulzace v savce turbíny	Snímač BD Sensors DMP 331, rozs.: $4 \div 20 \text{ mA} \approx 0 \div 1 \text{ MPa}$, v.č.: 1472480	0.2	Snímač umístěn na odběru v přední části kužele savky turbíny – viz Obr. 1 a Obr. 5
p_{DT_P}	Tlakové pulzace v savce čerpadla – vpravo	Snímač BD Sensors DMP 331, rozs.: $4 \div 20 \text{ mA} \approx 0 \div 1 \text{ MPa}$, v.č.: 1472481	0.2	Snímač umístěn na odběru na pravé straně kužele savky čerpadla – viz Obr. 1 a Obr. 9
p_{DT_L}	Tlakové pulzace v savce čerpadla – vlevo	Snímač BD Sensors DMP 331, rozs.: $4 \div 20 \text{ mA} \approx 0 \div 1 \text{ MPa}$, v.č.: 17073333	0.2	Snímač umístěn na odběru na levé straně kužele savky čerpadla – viz Obr. 1 a Obr. 8
U_f	Napětí gener. - fázové	digitální analyzátor sítě YOKOGAWA WT230, v.č.: 91GB52366	0.2 + tp. $T_A = 0.5$ + tp. $T_V = 0.5$	Připojení na výstupy proudových a napěťových měničů na svorkách generátoru ve skříni č.3 (zezadu) – třísystémové zapojení (Yokogawa), resp. Aronovo zapojení (Rawet ACM-2P) – viz Obr. 14 TA: 6 000 A / 5 A, 60/120 VA svorkovnice: X20 sv.: L1-2,3, L2-12,13, L3-22,23 TV: 15.75 kV / 0.1 kV, 50/50 VA svorkovnice: XM sv.: L1-3, L2-8, L3-12, N-17
I	Proud generátoru			
$\cos \varphi$	Účinník			
f	Frekvence			
P_a	Činný výkon/příkon			
P_g	Jalový výkon/příkon			
P_{app}	Zdánlivý výkon/příkon			
P_w	Fluktuace činného výkonu	Rychlý převodník výkonu RAWET ACM-2P, rozsah: $4 \div 20 \text{ mA} \sim \pm 0 \div 163.68 \text{ MW}$, v.č.: 3501012	0.2	
I_b	Budicí proud motorgenerátoru	Odečet z panelu regulátoru	-	Pro stanovení ztrát v rotoru motorgenerátoru
U_b	Budicí napětí motorgenerátoru	Odečet z panelu regulátoru	-	Pro stanovení ztrát v rotoru motorgenerátoru
Q_{us}	Průtok v turbínovém režimu US průtokoměrem	US průtokoměr Panametrics TransPort PT878787 s příloženými sondami 1 MHz, v.č.: PT7 - 7009 E	~ 2	Průtokoměr instalován na rovný úsek společného přivaděče TG3 a TG4 v místě geologické poruchy - viz kapitola 4.3
t_w	Teplota vody	Kapalinový teploměr	0.5°C	
p_{amb}	Tlak vzduchu ve strojovně	Snímač abs. tlaku BD Sensors DMP 331, rozsah: $4 \div 20 \text{ mA} \approx 0 \div 250 \text{ kPa}$, v.č.: 1101000	0.2	Snímač umístěn na pracovišti měřicí skupiny OSC na strojovně
n	Otáčky soustrojí	Provozní snímač + galvanický oddělovač RAWET GXN 230, rozsah: $0 \div 20 \text{ mA} \sim 0 \div 166.7 \%$	-	Připojení ve skříni: DS8, svorkovnice: X1, převodník Rawet GY200/1, svorka: C (4A)
E_{kT} E_{kP}	Kavitační emise na savce turb./čerpadla (relativní měření)	Analýzátor kavitační emise D400 + příložený piezokeramický mikrofón	-	Analýzátor přemístován na savku T nebo Č podle druhu provozu – umístění viz Obr. 5 a Obr. 10

Veličina		Přístrojové vybavení	tp.	Poznámka
a _{DT_T} a _{DT_P}	Vibrace na savce turbíny/čerpadla (zrychlení)	Analyzátor ADASH A3716 + akcelerometry Vibrasens. citlivost 101 mV/g a 100 mV/g	-	Doplňkové měření ke sledování kavitací – umístění snímačů na savce T a Č viz Obr. 5 a Obr. 11
vibr.	absolutní a relativní (hřídelové) vibrace	provozní nebo dočasné snímače SE	-	Měří a vyhodnocuje vibrodiagnostická skupina SE – viz kapitola 6.3

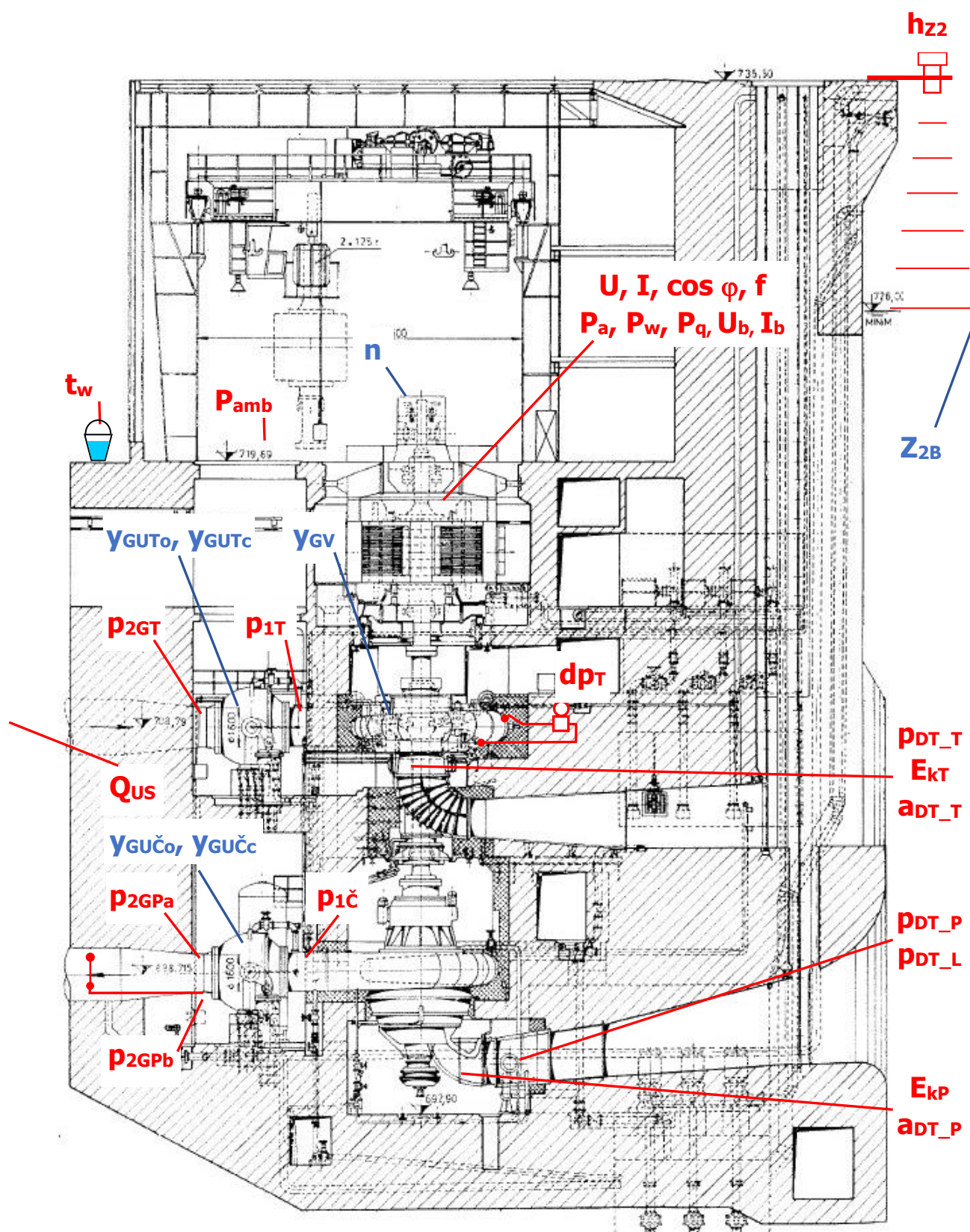
Tab. 2: Přehled měřených veličin

Schematické znázornění lokace hlavních měřených parametrů je uvedeno na Obr. 1.

Pro elektronické zaznamenávání naměřených údajů byly použity následující přístroje:

1. **Jednotka pro sběr dat BMC AD16f**, rozlišení 16 bit, 16 kanálů, třída přesnosti 0.02, k měření neelektrických veličin. Napěťový nebo proudový vstup - 200 Ω pro proudové smyčky. Vzorkovací frekvence byla během měření nastavena na 2000 Hz s následným ředěním dat 1:4 pro dynamické signály (tlaky p_{DT_T}, p_{DT_P} a p_{DT_L}) a 1:16 pro ostatní signály. Ostatní měřené signály byly průměrovány v poměru 1:10. Pro hodnocení a grafické znázornění hodnot byly použity programy Next View 4.6 a MS Excel.
2. **Digitální analyzátor elektrických veličin Yokogawa WT230**, třída přesnosti 0.2 k měření elektrických veličin (proud, napětí, činný výkon, jalový výkon, cos φ , frekvence). Analyzátor umožňuje ukládání dat se vzorkovací frekvence 1 Hz a zobrazení všech měřených veličin na displeji počítače.
3. **Kavitoměr Diagnost D400**, snímač kavitace vyhodnocuje ultrazvukové emise způsobené proudící vodou a modulované podle imploze kavitačních mikrobublin.
4. **Analyzátor vibrací** vibrodiagnostické skupiny SE.

Všechny hlavní použité snímače mají platné kalibrační certifikáty – viz příloha P1.



Obr. 1: Rozmístění měřicích míst na soustrojí



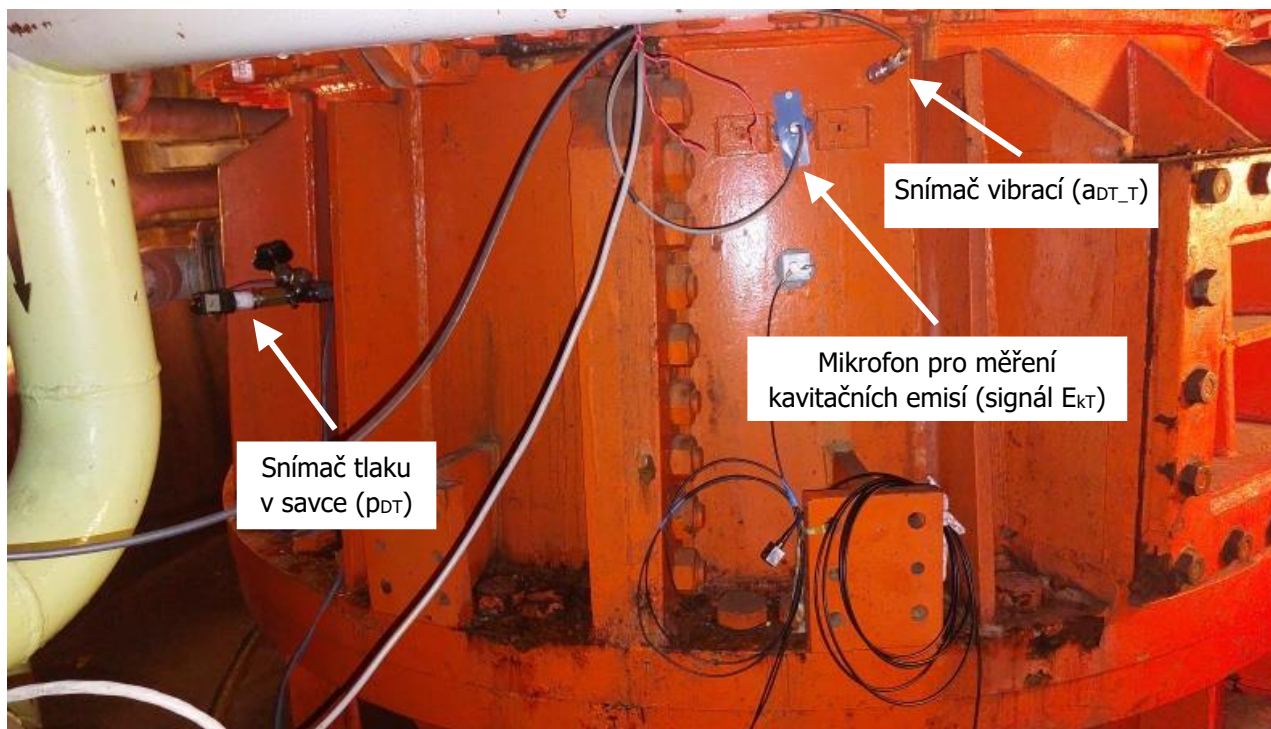
Obr. 2: Měření tlaku v profilu G1 přivaděče (p_{1G})



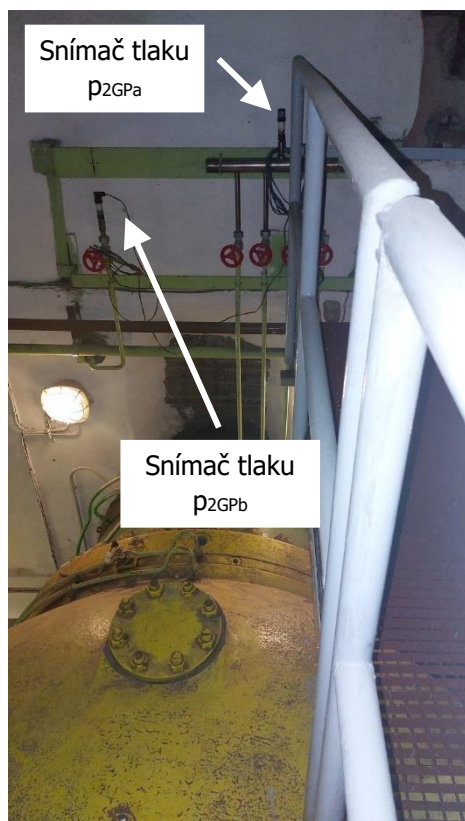
Obr. 3: Tlakové odběry a měření tlaku před GUT (p_{2GT})



Obr. 4: Měření tlaku na hrdle spirály turbíny (p_{1T})



Obr. 5: Měření kavitační emise (E_{KT}), tlaku (p_{DT}) a absolutních vibrací (a_{DT-T}) na savce turbíny



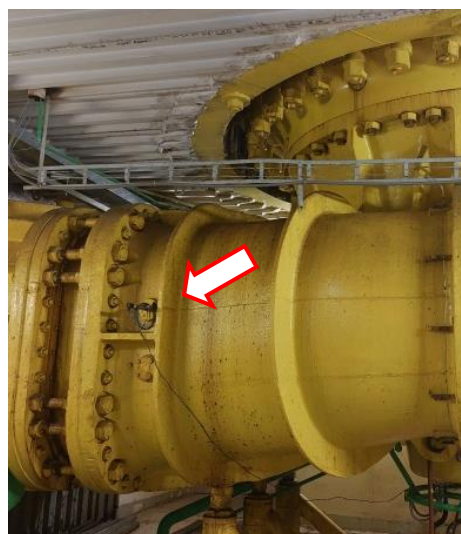
Obr. 6: Měření tlaku na výtlaku čerpadla za GUČ (p_{2GPa} , p_{2GPb})



Obr. 7: Tlakové odběry a měření tlaku na hrdle spirály čerpadla (p_{1P})



Obr. 8: Měření tlaku na levé straně savky čerpadla (p_{DT_L})



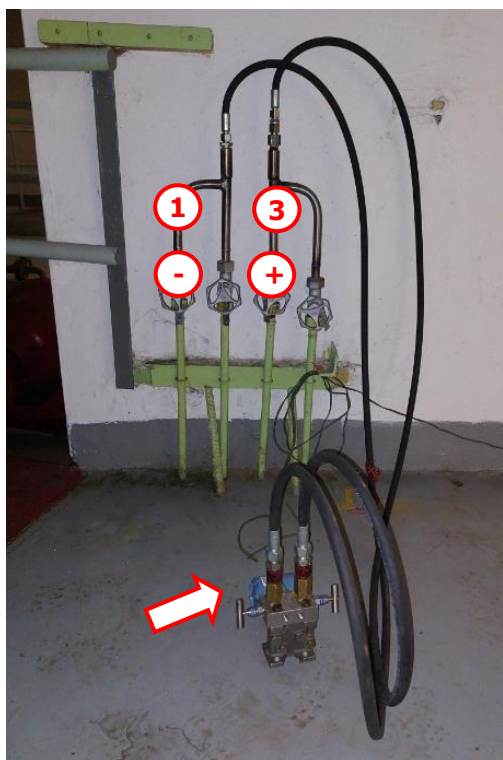
Obr. 9: Měření tlaku na pravé straně savky čerpadla (p_{DT_P})



Obr. 10: Měření kavitace emise (E_{kP}) na savce čerpadla



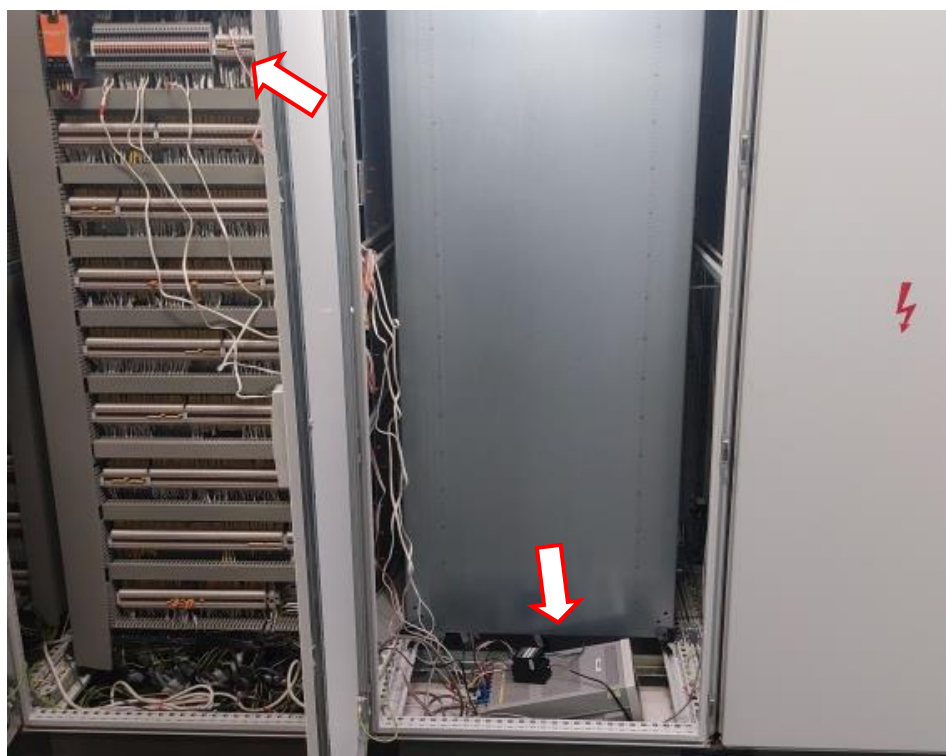
Obr. 11: Měření absolutních vibrací (a_{DT_P}) na savce turbíny



Obr. 12: Měření tlakové difference na spirále turbíny (dp_T)



Obr. 13: Měření dolní hladiny US snímačem OSC (h_{zz})



Obr. 14: Měření elektrických veličin přístrojem Yokogawa WT230 a Rawet ACM-2P včetně připojovacích míst

4 Postup měření

4.1 Přípravná fáze

Přípravné práce na měření probíhaly v rámci výjezdů na PVE Čierny Váh i na začátku vlastního měření. Jednalo se zejména o následující činnosti:

- Prohlídka TG4 v letech 2022 a 2025 pro získání podkladů pro zpracování projektu měření [5]. Šlo zejména o zjištění existence potřebných tlakových odběrů, umístění snímačů, vedení kabelových tras, získání potřebné výkresové dokumentace pro určení přivaděče v úseku mezi profily G1 a G2 atp.
- Kontrola průchodnosti tlakových odběrů využitých při měření.
- Instalace měřicí aparatury v elektrárně, nivelace poloh membrán snímačů tlaku na hrdle spirály turbíny i čerpadla (p_{1T} a p_{1P}) a US snímače dolní hladiny elektrárny (h_{2B}) pomocí nivelačního přístroje a talíře s pásmem za klidu stroje. Výchozím bodem nivelace pro snímače P_{1T} a p_{1P} byl nivelační bod S10 (719.67 m n.m.) situovaný na podlaze strojovny u skříní regulátorů TG4. Pro zaměření dolní hladiny to pak byla nivelační značka v šachtě provozního měření dolní hladiny Z_{2B} (735.023 m n.m.).
- Kalibrace signálu krajních poloh RK v měřicí ústředně OSC.
- Ověření funkčnosti čidel včetně kontrol jejich „nul“, správnosti měřicích řetězců a výpočtových vzorců.

4.2 Průběh zkoušek

Vlastní měření se uskutečnilo při dvou spádech:

- 23. 4. 2025 – měření vyšších spádů/dopravních výšek $H = \text{cca } 430 \text{ m}$.
- 25. 4. 2025 – měření nižších spádů/dopravních výšek $H = \text{cca } 405 \text{ m}$.

V rámci měření se uskutečňovaly následující činnosti:

- Stanovení teploty vody na začátku každého spádu (odečet z provozního měření).
- Kontrola „nuly“ snímačů tlaku na hrdle spirály čerpadla i turbíny i tlakové difference na spirále turbíny (p_{1T} , p_{1P} a p_{dT}). Zaznamenané odchylky odpovídají třídě přesnosti snímačů. Tyto snímače byly i vždy po najetí stroje odvzdušňovány.
- Průběžná kontrola hodnoty provozní dolní hladiny TG2 (Z_{2B}) pomocí pásma a talíře. Zjištěné odchylky byly cca $\pm 3 \text{ cm}$, což je vzhledem k měřenému spádu zanedbatelná hodnota.
- V rámci zkoušek bylo proměřeno:
 - Při vyšším spádu - 18 bodů v turbínovém režimu (z toho v 5 bodech s měřením průtoku Gibsonovou metodou a 2x změřen čerpadlový režim (vždy s aplikací Gibsonovy metody).
 - Při nižším spádu - 15 bodů v turbínovém režimu (z toho se v 6 bodech s měřením průtoku Gibsonovou metodou a 1x změřen čerpadlový režim (s aplikací Gibsonovy metody).
- Při měření byl u vybraných bodů zkoušen provoz bez i se zavzdušňováním savky turbíny – viz kapitoly 5.5 a 6.1.
- Při měření průtoku Gibsonovou metodou byl stroj vždy odstavován provozně s dobou zavírání první směrnice $T_f = 13 \text{ s}$; tato rychlost zavírání pro potřeby metody vyhovuje.
- Během měření byl stroj TG4 vždy provozován za následujících podmínek:
 - Stroj pracoval s pomocným generátorem.
 - Stroj TG3 má s TG4 společný přivaděč, proto byl po celou dobu zkoušek odstaven.
 - Ostatní stroje PVE byly provozovány podle potřeb dispečinku.
 - Jalový výkon byl po dobu zkoušek minimální, tzn. $\cos \varphi \approx 1$ pro turbínu, resp. ≈ -1 pro čerpadlo.

4.3 Odchyly proti projektu

Oproti projektu [5] byly při měření na díle aplikovány následující změny:

- Po dohodě se zástupci objednatele bylo upuštěno od měření tlakové difference na výstupním kuželi za čerpadlem pro indexové měření průtoku (dp_P) jako od nepotřebné veličiny. Průtok vody čerpadlem byl totiž vždy měřen Gibsonovou metodou.
- Se zástupci objednatele dohodnuto, že při nižším spádu bude postačovat pouze jedno měření čerpadlového provozu stroje.
- Na obou spádech v turbínovém režimu docházelo při měření dvou nejvyšších výkonů ($P_a = \text{cca } 114 \text{ MW}$ a 122 MW , č.m. 16, 22, 34 a 35) k dosažení, resp. překročení horní hranice rozsahu snímače tlakové difference. Naměřené hodnoty difference a z nich vypočtené průtoky nebyly věrohodné, proto byly v těchto bodech použity přímo výsledky měření průtoku Gibsonovou metodou (pokud byly k dispozici).
- Při zkouškách byl zvolen stejný měřicí úsek pro Gibsonovu metodu pro turbínový i čerpadlových režim, a to mezi lomovým kolenem a středem kulové odbočnice – viz kapitola 5.2.
- Nepodařilo se nainstalovat US průtokoměr na společnou část přivaděče TG3 a TG4 v místě geologické poruchy, přičemž se zkoušely US průtokoměry OSC i SE včetně různých sond (vždy se jednalo o měření s odrazem). Pravděpodobnou příčinou je kombinace velkých rozměrů přivaděče (obtížné ustavení sond do přesně požadovaných míst) a stavu povrchu přivaděče.

5 Vyhodnocení zkoušek

5.1 Použité konstanty

Název konstanty	Označení	Jednotka	Hodnota	Poznámka
Tíhové zrychlení	g	m/s ²	9.80771	Dle přílohy E I normy [1] z GPS souřadnic PVE Čierny Váh.
Teplota vody	t_w	°C	10	
Hustota vody	ρ	kg/m ³	1000.6	Dle přílohy E II normy [1] a dle měřené teploty a tlaku vody.
Poloha membrány tlakového snímače p_{1T} ve vstupním profilu turbíny	Z_{P1T}	m n.m.	711.14	Vztaženo k nivelačnímu bodu S10 – viz kapitola 4.1.
Poloha membrány tlakového snímače p_{1P} ve výstupním profilu čerpadla	Z_{P1P}	m n.m.	697.43	
Poloha čela US snímače h_{z2}	z_2	m n.m.	735.303	Vztaženo k nivelační značce u provozního měření dolní hladiny – viz kapitola 4.1.
Vstupní průřez turbíny	A_1	m ²	2.01	Dle rozměrů potrubí a poskytnutých informací od provozovatele
Výstupní průřez čerpadla			2.01	
Výstupní průřez turbíny	A_2	m ²	7.47	
Vstupní průřez čerpadla			48.14	
Geometrický součinitel potrubí	C_{pst}	m ⁻¹	115.2977	Viz kapitola 5.2
Konstanty pro metodu Winter-Kennedy	k	m ³ s ⁻¹ /kPa ^{0.5}	3.8028	Konstanty byly získány kalibrací Gibsonovou metodou – viz kap. 5.3.
	e	-	0.5031	

Tab. 3: Konstanty použité při měření TG4 na PVE Čierny Váh

5.2 Měření průtoku Gibsonovou metodou

5.2.1 Princip metody

Gibsonova metoda měření průtoku je fyzikální metoda vycházející z Newtonových pohybových zákonů. Pokud se brzdí vodní sloupec s hustotou ρ v úseku potrubí definované délky L a průřezu A , vzniká na tomto úseku tlakový rozdíl daný vzorcem:

$$\Delta p \cdot A = -L \cdot \rho \cdot \frac{dQ}{dt} \quad (1)$$

Pokud na sebe navazuje „n“ úseků potrubí s různými průřezy, potom je celkový tlakový rozdíl na potrubí dán součtem tlakových rozdílů na jednotlivých úsecích s délkami L_i a průřezy A_i .

$$\Delta p = \sum_{i=1}^n \Delta p_i = -\rho \cdot \sum_{i=1}^n \frac{L_i}{A_i} \cdot \frac{dQ}{dt} \quad (2)$$

Níže uvedený výraz zahrnující geometrické rozměry měrného úseku potrubí se nazývá součinitel potrubí (penstock factor – viz [1]).

$$c_{pst} = \int_{l=0}^L \frac{l}{A(l)} dl \quad \text{nebo} \quad c_{pst} = \sum_{i=1}^n \frac{L_i}{A_i} \quad (3)$$

Detailní popis měrného úseku včetně soupisu jednotlivých částí, příslušných geometrických rozměrů a výsledného součinitele potrubí je uveden v následující podkapitole (kap. 5.2.2).

Průtok je pak vypočítán numericky z následujícího vzorce vyplývajícího z výše popsanych principů.

$$Q_G = \frac{1}{\rho \cdot c_{pst}} \cdot \int (\Delta p + \xi) \cdot dt + Q_0 \quad (4)$$

kde:

- ρ hustota vody
- c_{pst} geometrický součinitel potrubí
- Δp rozdíl tlaků mezi měřicími úseky při odstavení
 - $\Delta p = p_{2G} - p_{1G} - p_{offset}$ pro turbínový směr
 - $\Delta p = p_{1G} - p_{2G} - p_{offset}$ pro čerpadlový směr
- p_{offset} je rozdíl statických tlaků mezi úseky 1G a 2G
- ξ součet tlakové ztráty třením a rozdílu rychlostních výšek mezi oběma úseky 1G a 2G;
 - $\xi(t) = k_G \cdot Q(t)^2$
- Q_0 zbytkový průtok po uzavření rozvaděče, předpokládá se těsný kulový uzávěr, tzn. $Q_0 = 0 \text{ m}^3/\text{s}$

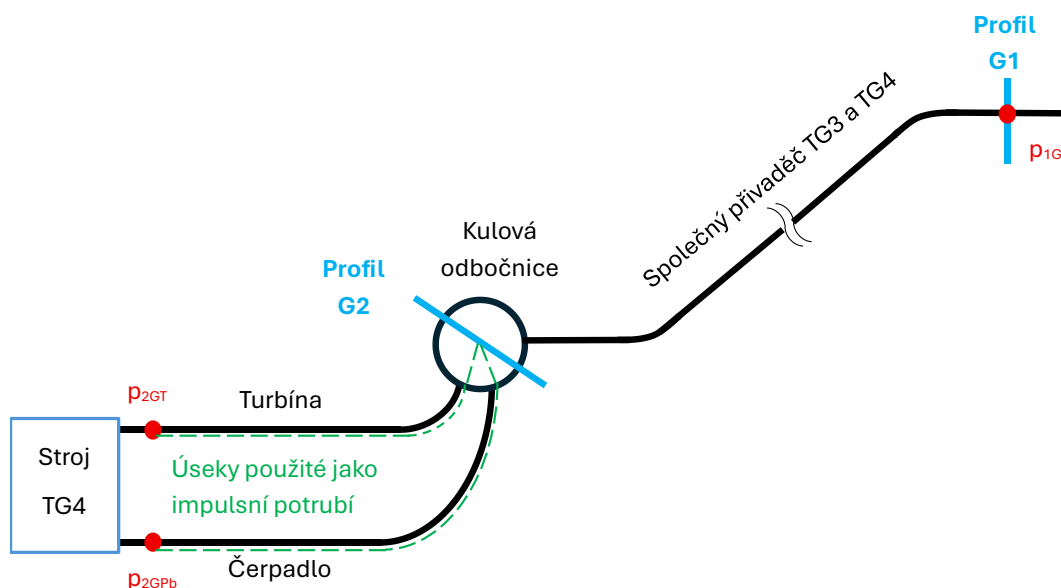
Výpočet probíhá iterační metodou v několika krocích, kdy předchozí průběh průtoku je použit pro výpočet ztrát třením v následujícím kroku.

Je užíván program Gibmak.xls (makro ve Visual Basicu for Applications), který stanoví průtok na počátku před zavíráním stroje. Program navíc poskytuje časový průběh průtoku během zavírání stroje. Vlastní program je užíván dodavatelem měření již více než 30 let, prochází postupným vylepšováním uživatelského rozhraní a byl ověřen při řadě měření na díle. Navíc byl porovnáván na souborech dat s dalšími evropskými pracovišti, kde se této metodě věnují.

5.2.2 Provoz stroje a měrný úsek

V turbínovém i čerpadlovém režimu bylo při aplikaci Gibsonovy metody použito provozní odstavení stroje s dobou zavírání první směrnice $T_f = 13$ s, které vyvolává v potrubí dostatečný vodní ráz. Chladicí voda pro TG4 je odebírána z propoje savek turbín TG3 a TG4 a vracena do propoje savek čerpadel TG3 a TG4, takže neovlivňuje výsledky Gibsonova metody.

Umístění měrných průřezů/profilů G1 a G2 pro Gibsonovu metodu je znázorněno na Obr. 1 a Obr. 15.



Obr. 15: Schéma zvolených měřicích úseků pro Gibsonovou metodu měření průtoků

Profil G1 – snímač byl připojen paralelně k provoznímu snímači na tlakový odběr u zlomového kolena v horní části přiváděče ve vtokovém objektu – viz Obr. 2. Tento snímač byl použit pro turbínový i čerpadlový režim.

Profil G2 – z důvodů sjednocení Gibsonovy metody pro turbínový i čerpadlový režim byl profil G2 zvolen do středu kulové odbočnice, přičemž:

■ Turbínový režim

Pro měření byl použit tlak z válcové části přiváděče mezi GUČ a kulovou odbočnicí měřený snímačem p_{2GPb} , přičemž potrubí mezi kulovou odbočnicí a tímto snímačem bylo použito jako impulsní potrubí. Snímač p_{2GPb} byl připojen na 4 odběry spojené do jednoho potrubí vedeného do strojovny – viz Obr. 6.

■ Čerpadlový režim

Proto měření byl použit tlak p_{2GT} v profilu před GUT, přičemž potrubí mezi kulovou odbočnicí a tímto snímačem bylo použito jako impulsní potrubí. Snímač p_{2GT} byl připojen na dva tlakové odběry, které byly spojeny pevnou hydraulickou hadicí – viz Obr. 3.

Pozn.: Při použití původně vybraného profilu G2 na kuželi za GUČ se 4 tlakovými odběry zavedenými do sběrače osazeného snímačem p_{2Ga} , popř. na válcové části přivodního potrubí mezi GUČ a kulovou odbočnicí se snímačem p_{2GPb} vycházely v čerpadlovém režimu nevěrohodné průběhy vypočítávaných průtoků. Možnou příčinou je víření vody v profilech blízkých GUČ při jeho zavírání během odstavování stroje.

Znalost přesných rozměrů přivaděče (délka a vnitřní průměr, resp. průřez) mezi profily G1 a G2 měrných úseků má zásadní vliv na správnost stanovení průtoku. Potřebné rozměry byly odečteny z poskytnuté dokumentace a jsou uvedeny v Tab. 4.

Výsledná hodnota součinitele potrubí (penstock factor) pro výpočty průtoků turbínového i čerpadlového režimu na TG4 je:

$$C_{pst} = 115.2977 \text{ m}^{-1}$$

Protokoly s vyhodnocením jednotlivých průtoků Gibsonovou metodou jsou uvedeny v příloze P2.

Úsek	D ₁ [m]	D ₂ [m]	L [m]	A [m ²]	L/A [m ⁻¹]
Přechodový kus	3.8 x 3.8	3.80	3.16		0.257534
Vodorovná část za přechodovým kusem	3.80		2.17	11.341	0.190986
Šikmá horní část po lomové koleno	3.80		129.73	11.341	11.43843
1. segment horního lom. kolena	3.80		13.13	11.341	1.157731
2. segment horního lom. kolena	3.80		13.13	11.341	1.157731
Šikmá část	3.80		507.46	11.341	44.74467
1. segment dolního lom. kolena 1. kus	3.80		4.10	11.341	0.36178
1. segment dolního lom. kolena 2. kus	3.80		4.40	11.341	0.387968
1. segment dolního lom. kolena 3. kus	3.80		4.10	11.341	0.36178
2. segment dolního lom. kolena 1. kus	3.80		4.10	11.341	0.36178
2. segment dolního lom. kolena 2. kus	3.80		4.40	11.341	0.387968
2. segment dolního lom. kolena 3. kus	3.80		4.10	11.341	0.36178
Dolní vodorovný úsek					
Navazující kus na koleno 24-25	3.80		6.25	11.341	0.551355
Sekce 25	3.80		92.40	11.341	8.147322
Sekce 26-29	3.80		39.60	11.341	3.49171
Sekce 29-30	3.80		92.40	11.341	8.147322
Sekce 30-32	3.80		26.40	11.341	2.327806
Sekce 32-33	3.80		85.80	11.341	7.565371
Sekce 33-34	3.80		6.60	11.341	0.581952
Sekce 34-35	3.80		3.14	11.341	0.27678
Sekce 35-39	3.80		75.33	11.341	6.642184
Redukce průměru 39-40 -válnová část	3.80		2.99	11.341	0.263554
Redukce průměru 40-41 -válnová část	3.80	3.60	0.15		0.013961
Sekce 41-42	3.60		32.99	10.179	3.240768
Dolní shybka – vodorovný kus 42-43	3.60		2.78	10.179	0.272921
Dolní shybka – segment 43-44	3.60		6.53	10.179	0.641925
Dolní shybka – segment 44-45	3.60		8.24	10.179	0.809725
Dolní shybka – segment 45-46	3.60		6.53	10.179	0.641925
Vodorovný úsek před kulovou odbočnicí 46-48	3.60		98.81	10.179	9.707567
Začátek sešupu ke kulové odbočnici 48-49	3.60		2.11	10.179	0.207393
Sekce 49 - kraj kulové odbočnice	3.60		4.27	10.179	0.419206
Kulová odbočnice po střed	3.60	5.60	2.80		0.176839
Celkem			1346.91		115.2977

Tab. 4: Určení geometrického faktoru potrubí na TG4

5.3 Průtok měřený indexovou metodou

Měření průtoku Gibsonovou metodou (viz kapitola 5.2) sloužilo při turbínovém režimu stroje i ke kalibraci indexové metody měření průtoku (měření tlakové difference na spirále turbíny, metoda Winter-Kennedy). Snímač tlakové difference d_{PT} byl připojen hydraulickými hadicemi na tlakové odběry ze spirály turbíny. Z hlediska měření byly jako nejvhodnější vybrány, při pohledu zleva, odběry 3 (+) a 1 (-) – viz Obr. 12

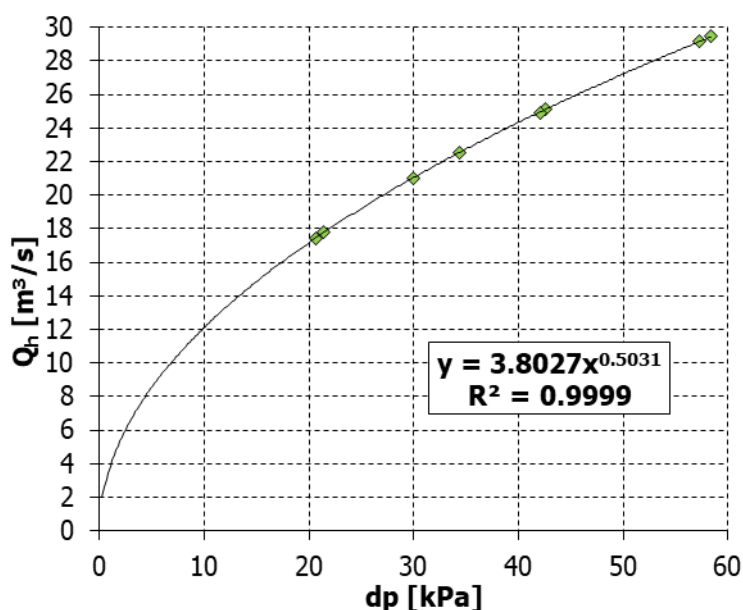
Zaznamenaná difference pak byla využita pro stanovení průtoku a vyhodnocování účinnosti turbíny ve všech nastavovaných bodech stroje, mimo body při provozu na nejvyšší výkony, kdy došlo k překročení rozsahu snímače – viz kapitola 4.3 (v Tab. 5 a Tab. 8 jsou tyto body vyznačeny červeně). Vzájemná závislost mezi měřeným průtokem a tlakovou diferencí je dána následující rovnicí:

$$Q_i = k \cdot dp^e \quad (5)$$

Konstanty **k** a **e** byly stanoveny na základě proložení křivky hodnotami průtoků vypočtených Gibsonovou metodou a odpovídajících hodnot tlakové difference metodou nejmenších čtverců. Vyčíslení konstant je uvedeno v Tab. 5. Tabulka rovněž obsahuje relativní nejistotu proložení aproximační křivkou naměřenými body v souladu s metodikou uvedenou v příloze normy [1].

č.m.	dp	Q _G	Q _i	ΔQ _i
-	kPa	m ³ /s	m ³ /s	%
8	34.32	22.51	22.52	-0.04
14	57.31	29.19	29.15	0.14
18	21.38	17.81	17.75	0.34
21	42.54	25.14	25.09	0.19
22	-	33.00	-	-
25	30.01	21.02	21.05	-0.16
28	42.11	24.87	24.97	-0.40
31	58.37	29.45	29.42	0.10
34	-	32.83	-	-
35	-	35.51	-	-
37	20.70	17.44	17.46	-0.12
Winter-Kennedy konstanty		Nejistota apr.		
k	3.8027	t_{n-m}	2.447	
e	0.5031	f_{Q_iAP}	0.24%	
		N	8	

Tab. 5: Průtoky stanovené Gibsonovou metodou a jim odpovídající tlakové difference



Obr. 16: Kalibrační závislost indexového měření průtoku

5.4 Ztráty generátoru

Celkový ztrátový výkon v generátoru byl vypočten částečně z dat z garančního měření v roce 1982 (viz [4]) a částečně z měřeného budícího proudu a napětí budící soupravy včetně pomocného generátoru. Data pro dílčí ztráty v mědi statoru v závislosti na statorovém proudu byla aproximována polynomem 2. stupně – viz Obr. 17 a následující rovnice:

$$\Delta P_{Cu1} = a_2 \cdot I_G^2 + a_1 \cdot I_G + a_0 \quad (6)$$

Data pro dílčí ztráty v železe společně s mechanickými ztrátami v závislosti na statorovém napětí byla zjednodušeně aproximována lineárně – viz Obr. 18 a následující rovnice:

$$\Delta P_{Fe+Lm} = a_1 \cdot U_s + a_0 \quad (7)$$

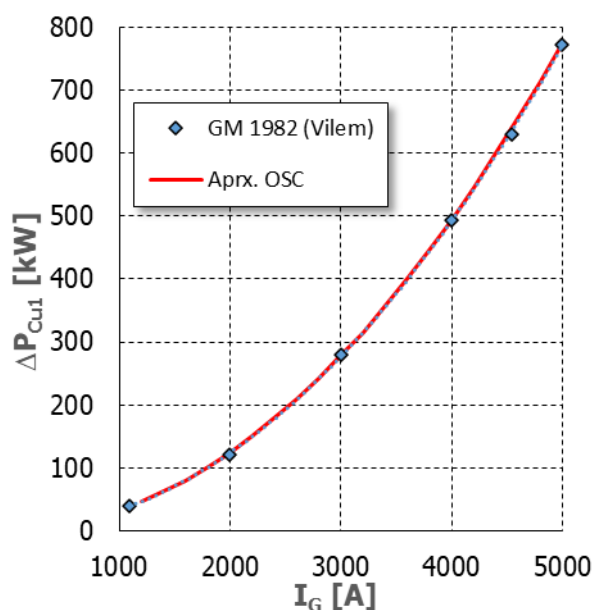
Poznámka: Napětí U_s v rovnici (7) značí sdružené napětí. Měřeno bylo fázové napětí U_f , proto se ve výpočtech musí přepočítat dle vztahu:

$$U_s = \sqrt{3} \cdot U_f \quad (8)$$

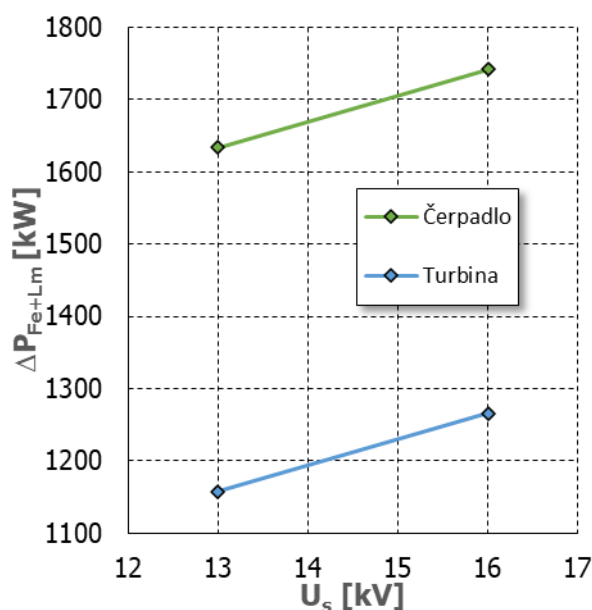
Hodnoty konstant aproximačních polynomů jsou uvedeny v následující tabulce (Tab. 6).

Konst.	ΔP_{Cu1}	ΔP_{Fe+Lm}	
	T + Č	T	Č
a_2	0.0000315505	-	-
a_1	-0.0039636400	36	36
a_0	6.0376600000	690	1166

Tab. 6: Konstanty aproximačních polynomů dílčích ztrátových výkonů generátoru



Obr. 17: Graf závislosti ztrát v mědi v závislosti na satorovém proudu



Obr. 18: Graf závislosti ztrát v železe a mechanických ztrát na satorovém sdruženém napětí

Protože buzení je realizováno z pomocného generátoru (PG), je lepší počítaný výkon budící soupravy včetně PG z budícího napětí a proudu. Pomocný generátor i celá budící souprava má jistou malou ztrátu, která není přesně známá. Kvalifikovaným odhadem je tato ztráta stanovena na cca 6% z budícího výkonu. Ztrátový výkon v mědi rotoru je pak vypočten ze vztahu:

$$\Delta P_{Cu2} = 1.06 \cdot U_B \cdot I_B \quad (9)$$

Celkový ztrátový výkon je pak určen součtem dílčích ztrát:

$$\Delta P_{celk} = \Delta P_{Cu1} + \Delta P_{Fe+Lm} + \Delta P_{Cu2} \quad (10)$$

č.m.	U _f	I	cosφ	f	P _a	P _q	P _{app}	U _B	I _B	ΔP _{Cu1}	ΔP _{Fe+Lm}	ΔP _{Cu2}	ΔP _{celk}
[-]	kV	A	-	Hz	MW	MVar	MVA	V	A	kW	kW	kW	kW
Turbína H = 430 m													
5	9.18	2539.1	1.00	50.00	69.87	-2.03	69.92	79.3	537.3	199	1262	45	1507
6	9.17	2721.2	1.00	50.00	74.85	-2.49	74.90	79.3	537.3	229	1262	45	1536
7	9.16	2905.2	1.00	49.98	79.79	-2.76	79.84	79.3	537.3	261	1261	45	1567
8	9.11	3111.5	1.00	50.02	85.02	-2.99	85.08	79.3	578.5	299	1258	49	1606
9	9.15	3272.9	1.00	49.97	89.76	-3.16	89.82	89.6	540.5	331	1260	51	1643
10	9.13	3468.2	1.00	49.97	94.95	-3.40	95.01	89.6	592.3	372	1259	56	1687
11	9.10	3660.4	1.00	49.96	99.83	-3.66	99.89	89.6	592.3	414	1257	56	1728
12	9.10	3840.8	1.00	50.01	104.75	-3.93	104.83	89.6	622.2	456	1257	59	1773
13	9.11	4022.7	1.00	50.03	109.80	-4.21	109.88	103.3	658.9	501	1258	72	1831
14	9.09	4027.6	1.00	49.99	109.74	-4.23	109.83	103.3	658.9	502	1257	72	1831
15	9.11	4208.7	1.00	50.02	114.88	-4.41	114.97	105.5	660.2	548	1258	74	1880
16	9.09	4396.1	1.00	49.98	119.83	-4.66	119.93	105.5	699.5	598	1257	78	1934
17	9.10	2559.1	1.00	50.00	69.85	-2.46	69.90	105.5	569.1	203	1258	64	1524
18	9.03	2394.3	1.00	50.02	64.83	-1.97	64.87	71.5	519.9	177	1253	39	1470
19	9.09	2194.7	1.00	49.99	59.81	-0.58	59.85	74.3	503.7	149	1257	40	1446
20	9.08	2015.6	1.00	49.98	54.86	-0.23	54.90	74.3	503.7	126	1256	40	1422
21	9.02	3514.9	1.00	49.96	95.00	-3.58	95.07	74.3	503.7	382	1252	40	1674
22	8.95	4542.9	1.00	50.01	121.82	-4.98	121.92	113.0	707.0	639	1248	85	1972
Turbína H = 405 m													
23	9.11	2554.3	1.00	49.98	69.78	-1.10	69.83	77.5	500.5	202	1258	41	1501
24	9.10	2563.6	1.00	49.96	69.93	-1.18	69.98	77.5	500.5	203	1257	41	1502
25	9.08	2750.0	1.00	49.97	74.90	-2.74	74.95	77.5	532.9	234	1256	44	1534
26	9.06	2946.8	1.00	49.96	80.04	-2.98	80.09	70.6	514.1	268	1255	38	1562
27	9.07	3120.4	1.00	49.98	84.81	-3.21	84.87	70.6	580.3	301	1255	43	1600
28	9.07	3304.6	1.00	50.02	89.83	-3.45	89.90	85.3	580.3	337	1255	52	1645
29	9.02	3512.7	1.00	50.00	94.94	-3.76	95.02	89.1	522.3	381	1252	49	1683
30	9.00	3703.9	1.00	50.01	99.89	-4.02	99.98	89.1	605.2	424	1251	57	1732
31	8.98	3901.0	1.00	49.94	105.05	-4.31	105.14	89.1	605.2	471	1250	57	1778
32	9.01	4071.9	1.00	50.03	109.94	-4.54	110.03	79.4	635.2	513	1252	53	1818
33	8.99	4078.4	1.00	50.00	109.89	-4.58	109.99	99.4	635.2	515	1251	67	1832
34	9.05	4238.2	1.00	49.99	114.93	-4.65	115.03	99.4	680.7	556	1254	72	1882
35	9.01	4514.4	1.00	49.96	121.96	-5.07	122.07	110.0	708.2	631	1252	83	1966
36	9.09	2392.8	1.00	50.01	65.19	-0.94	65.24	72.5	528.5	177	1257	41	1475
37	9.09	2199.7	1.00	50.03	59.93	-0.62	59.97	72.5	528.5	150	1257	41	1447
Čerpadlo H = 434 m													
3	8.71	4094.0	-0.96	49.98	-103.22	-28.11	106.98	84.0	533.0	519	1709	47	2275
4	9.07	3787.3	-1.00	49.98	-103.02	4.00	103.10	84.0	533.0	444	1732	47	2223
Čerpadlo H = 410 m													
38	8.93	3917.1	-1.00	49.97	-104.79	4.24	104.88	106.9	637.0	475	1723	72	2269

Tab. 7: Tabulka naměřených elektrických veličin s vypočtenými ztrátovými výkony

5.5 Hlavní výpočtová tabulka

Střední hodnoty měřených veličin a hodnoty veličin následně z nich vypočtených jsou uvedeny v Tab. 8, kde význam jednotlivých sloupců tabulky je následující:

CM	-	číslo měření – u oranžově označených bodů byl průtok stanovován Gibsonovou metodou
y _{GV}	%	otevření rozváděcího kola
p _{1T(Č)}	Pa	tlak ve vstupním průřezu spirály turbíny (výstupním průřezu čerpadla)
dp _T	Pa	tlaková diference ve spirále
h _{Z2}	m	údaj US sondy nad vývarem
U _f	V	svorkové napětí generátoru (fázové)
I	A	proud generátoru
cos φ	-	účinník
f	Hz	frekvence
P _a	W	činný výkon generátoru
P _q	VA	jalový výkon generátoru
P _{app}	VA	zdánlivý výkon generátoru
E _k	V	kavitační emise na savce turbíny (E _{KT}) / čerpadla (E _{KP})
Z ₂	m n.m.	dolní hladina ve vývaru TG4

$$Z_2 = z_2 + h_{Z2} \quad (11)$$

z₂ – elevace US sondy – viz Tab. 3

Q _{i(G)}	m ³ /s	průtok stanoven indexovou metodou; viz kap.5.3, rovnice (5); (v některých případech je z důvodu překročení rozsahu snímače tlakové diference dosazen průtok vypočtený Gibsonovou metodou, ve výpočetní tabulce označený červeně)
-------------------	-------------------	---

h _{v1}	m	rychlostní výška ve vstupním profilu turbíny / výstupním profilu čerpadla
-----------------	---	---

$$h_{v1} = \frac{\left(\frac{Q_{i(G)}}{A_1}\right)^2}{2 \cdot g} \quad (12)$$

konstanty A₁ a g – viz Tab. 3

h _{v2}	m	rychlostní výška ve výstupním profilu turbíny / vstupním profilu čerpadla
-----------------	---	---

$$h_{v2} = \frac{\left(\frac{Q_{i(G)}}{A_2}\right)^2}{2 \cdot g} \quad (13)$$

konstanty A₂ a g – viz Tab. 3

H	m	čistý spád na turbínu / čistá dopravní výška čerpadla
---	---	---

$$H = \frac{p_{1T(Č)}}{\rho \cdot g} + z_{p1T(Č)} + h_{v1} - (Z_2 + h_{v2}) \quad (14)$$

Konstanty ρ, g, z_{p1T} a z_{p1P} viz Tab. 3

P _h	W	hydraulický výkon
----------------	---	-------------------

$$P_h = H \cdot g \cdot \rho \cdot Q_{i(G)} \quad (15)$$

konstanty ρ a g – viz Tab. 3

η _s	%	účinnost soustrojí
----------------	---	--------------------

turbína:

$$\eta_s = \frac{P_a}{P_h} \quad (16)$$

čerpadlo:

$$\eta_s = \frac{P_h}{P_a} \quad (17)$$

ΔP_{celk} W ztrátový výkon generátoru – viz ksp.5.4

$P_{T(Č)}$ W výkon na turbíně / příkon na čerpadle

$$P_T = P_a \pm \Delta P_{celk} \quad (18)$$

turbína +, čerpadlo -

$\eta_{T(Č)}$ % účinnost turbíny / čerpadla

$$\eta_T = \frac{P_T}{P_h} \quad (19)$$

$$\eta_Č = \frac{P_h}{P_Č} \quad (20)$$

Z rozložení spádu v průběhu měření (viz Obr. 19 a Obr. 20) vyplývá, že rozptyl spádu nepřesáhl normou [1] stanovené meze $\pm 2\%$ H_{sp} . Proto je možný přepočet následujících veličin pomocí vzorců na specifický spád.

Q_{isp} m³/s průtok přepočtený na specifický spád

$$Q_{isp} = Q_i \cdot \left(\frac{H_{sp}}{H} \right)^{0.5} \quad (21)$$

$H_{sp} = 430$ m; $H_{sp} = 405$ m

P_{Tsp} W výkon na turbíně přepočtený na specifický spád

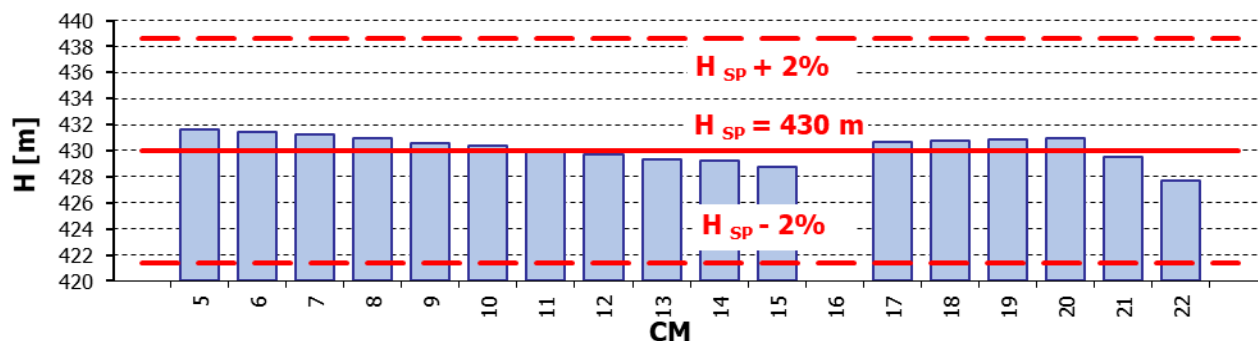
$$P_{Tsp} = P_T \cdot \left(\frac{H_{sp}}{H} \right)^{1.5} \quad (22)$$

$H_{sp} = 430$ m; $H_{sp} = 405$ m

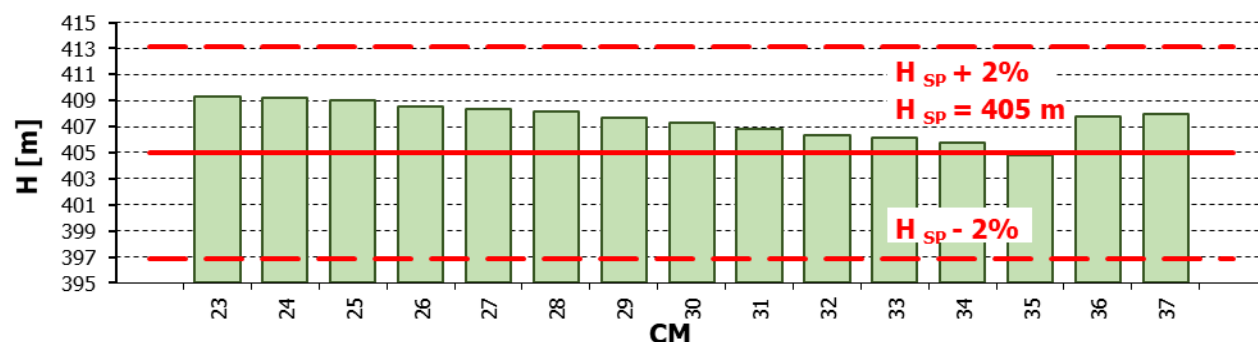
P_{asp} W činný výkon přepočtený na specifický spád

$$P_{asp} = P_a \cdot \left(\frac{H_{sp}}{H} \right)^{1.5} \quad (23)$$

$H_{sp} = 430$ m; $H_{sp} = 405$ m



Obr. 19: Rozložení spádu během měření pro $H_{sp} = 430$ m



Obr. 20: Rozložení spádu během měření pro $H_{sp} = 405$ m



Měření parametrů turbogenerátoru TG4 PVE Čierny Váh

| TZ 2460/3000

3000 – Divize řídicích systémů

CM	Y _{GV}	p _{1T(Č)}	dP _T	h _{z2}	U _f	I	cosφ	f	P _a	P _q	P _{app}	E _k	Z ₂	Q _{1(G)}	h _{v1}	h _{v2}	H	P _h	η _s	ΔP _{celk}	P _{T(Č)}	η _{T(Č)}	Q _{i,sp}	P _{a,sp}	P _{T,sp}	
-	%	Mpa	kPa	m	kV	A	-	Hz	MW	MVAR	MVA	V	m n.m.	m ³ /s	m	m	m	MW	%	kW	MW	%	m ³ /s	MW	MW	
Turbína H = 430 m																										
5	48.8	4.348	24.24	-8.60	9.18	2539	1.00	50.0	69.9	-2.03	69.92	8.20	726.70	18.91	4.51	0.33	431.64	80.1	87.24	1507	71.4	89.12	18.87	69.5	71.0	
6	51.9	4.340	27.41	-8.61	9.17	2721	1.00	50.0	74.9	-2.49	74.90	11.44	726.69	20.12	5.10	0.37	431.46	85.2	87.89	1536	76.4	89.69	20.08	74.5	76.0	
7	54.6	4.333	30.68	-8.58	9.16	2905	1.00	50.0	79.8	-2.76	79.84	13.83	726.72	21.29	5.71	0.41	431.27	90.1	88.57	1567	81.4	90.31	21.26	79.4	81.0	
8	57.5	4.324	34.32	-8.54	9.11	3111	1.00	50.0	85.0	-2.99	85.08	10.90	726.76	22.52	6.40	0.46	430.95	95.3	89.26	1606	86.6	90.95	22.50	84.7	86.3	
9	60.2	4.315	37.92	-8.50	9.15	3273	1.00	50.0	89.8	-3.16	89.82	8.65	726.80	23.68	7.07	0.51	430.61	100.1	89.69	1643	91.4	91.33	23.67	89.6	91.2	
10	63.3	4.305	42.27	-8.48	9.13	3468	1.00	50.0	94.9	-3.40	95.01	6.36	726.82	25.01	7.89	0.57	430.34	105.6	89.89	1687	96.6	91.49	25.00	94.8	96.5	
11	66.5	4.294	46.80	-8.48	9.10	3660	1.00	50.0	99.8	-3.66	99.89	5.20	726.82	26.33	8.74	0.63	430.02	111.1	89.85	1728	101.6	91.41	26.33	99.8	101.5	
12	70.1	4.283	51.84	-8.43	9.10	3841	1.00	50.0	104.8	-3.93	104.83	4.44	726.87	27.72	9.68	0.70	429.70	116.9	89.63	1773	106.5	91.15	27.73	104.9	106.6	
13	73.9	4.270	57.50	-8.41	9.11	4023	1.00	50.0	109.8	-4.21	109.88	3.73	726.89	29.20	10.75	0.78	429.37	123.0	89.24	1831	111.6	90.73	29.22	110.0	111.9	
14	73.9	4.270	57.31	-8.41	9.09	4028	1.00	50.0	109.7	-4.23	109.83	2.64	726.89	29.15	10.71	0.78	429.27	122.8	89.37	1831	111.6	90.86	29.18	110.0	111.9	
15	78.1	4.255	63.48	-8.36	9.11	4209	1.00	50.0	114.9	-4.41	114.97	2.50	726.94	30.69	11.87	0.86	428.75	129.1	88.97	1880	116.8	90.42	30.73	115.4	117.3	
16	82.4	4.240	67.79	-8.36	9.09	4396	1.00	50.0	119.8	-4.66	119.93	2.65	726.95	-	-	-	-	-	-	1934	121.8	-	-	-	-	
17	48.9	4.341	24.09	-8.32	9.10	2559	1.00	50.0	69.9	-2.46	69.90	3.60	726.98	18.85	4.48	0.32	430.67	79.7	87.68	1524	71.4	89.60	18.83	69.7	71.2	
18	46.2	4.347	21.38	-8.30	9.03	2394	1.00	50.0	64.8	-1.97	64.87	2.94	727.00	17.75	3.97	0.29	430.79	75.0	86.39	1470	66.3	88.35	17.73	64.7	66.1	
19	44.0	4.353	18.86	-8.28	9.09	2195	1.00	50.0	59.8	-0.58	59.85	2.75	727.02	16.66	3.50	0.25	430.88	70.5	84.88	1446	61.3	86.93	16.65	59.6	61.1	
20	40.9	4.358	16.30	-8.25	9.08	2016	1.00	50.0	54.9	-0.23	54.90	2.89	727.05	15.48	3.02	0.22	430.95	65.5	83.77	1422	56.3	85.94	15.47	54.7	56.1	
21	63.5	4.299	42.54	-8.24	9.02	3515	1.00	50.0	95.0	-3.58	95.07	6.58	727.07	25.09	7.94	0.58	429.53	105.8	89.82	1674	96.7	91.41	25.10	95.2	96.8	
22	84.3	4.229	68.11	-8.19	8.95	4543	1.00	50.0	121.8	-4.98	121.92	2.93	727.12	33.00	13.73	1.00	427.70	138.5	87.94	1972	123.8	89.37	33.09	122.8	124.8	
Turbína H = 405 m																										
23	52.6	4.178	26.48	-3.23	9.11	2554	1.00	50.0	69.8	-1.10	69.83	14.67	732.07	19.77	4.93	0.36	409.34	79.4	87.87	1501	71.3	89.76	19.66	68.7	70.1	
24	52.7	4.177	26.50	-3.21	9.10	2564	1.00	50.0	69.9	-1.18	69.98	4.23	732.09	19.77	4.93	0.36	409.24	79.4	88.06	1502	71.4	89.95	19.67	68.8	70.3	
25	55.9	4.169	30.01	-3.21	9.08	2750	1.00	50.0	74.9	-2.74	74.95	14.92	732.09	21.05	5.59	0.40	409.06	84.5	88.62	1534	76.4	90.43	20.95	73.8	75.3	
26	59.1	4.158	33.69	-3.18	9.06	2947	1.00	50.0	80.0	-2.98	80.09	14.94	732.13	22.31	6.28	0.45	408.58	89.5	89.45	1562	81.6	91.20	22.22	79.0	80.5	
27	62.2	4.150	37.61	-3.17	9.07	3120	1.00	50.0	84.8	-3.21	84.87	15.09	732.13	23.58	7.01	0.51	408.38	94.5	89.72	1600	86.4	91.42	23.49	83.8	85.3	
28	65.6	4.140	42.11	-3.14	9.07	3305	1.00	50.0	89.8	-3.45	89.90	15.39	732.16	24.97	7.86	0.57	408.11	100.0	89.84	1645	91.5	91.49	24.87	88.8	90.4	
29	69.4	4.127	47.32	-3.11	9.02	3513	1.00	50.0	94.9	-3.76	95.02	15.48	732.20	26.47	8.83	0.64	407.71	105.9	89.63	1683	96.6	91.22	26.39	94.0	95.7	
30	73.2	4.115	52.37	-3.08	9.00	3704	1.00	50.0	99.9	-4.02	99.98	15.11	732.22	27.86	9.78	0.71	407.27	111.3	89.71	1732	101.6	91.27	27.78	99.1	100.8	
31	77.5	4.100	58.37	-3.08	8.98	3901	1.00	49.9	105.1	-4.31	105.14	15.47	732.22	29.42	10.91	0.79	406.80	117.5	89.44	1778	106.8	90.95	29.36	104.4	106.1	
32	82.1	4.084	65.11	-3.04	9.01	4072	1.00	50.0	109.9	-4.54	110.03	15.02	732.26	31.08	12.18	0.88	406.37	124.0	88.69	1818	111.8	90.15	31.03	109.4	111.2	
33	82.1	4.083	64.71	-3.02	8.99	4078	1.00	50.0	109.9	-4.58	109.99	5.57	732.29	30.99	12.10	0.88	406.17	123.5	88.97	1832	111.7	90.46	30.94	109.4	111.2	
34	87.2	4.066	68.17	-3.01	9.05	4238	1.00	50.0	114.9	-4.65	115.03	4.81	732.29	32.83	13.59	0.98	405.79	130.7	87.91	1882	116.8	89.35	32.80	114.6	116.5	
35	95.7	4.036	68.23	-2.96	9.01	4514	1.00	50.0	122.0	-5.07	122.07	4.54	732.34	35.51	15.90	1.15	404.78	141.1	86.46	1966	123.9	87.85	35.52	122.1	124.0	
36	50.8	4.170	23.96	-2.92	9.09	2393	1.00	50.0	65.2	-0.94	65.24	3.38	732.38	18.80	4.45	0.32	407.82	75.2	86.66	1475	66.7	88.62	18.73	64.5	66.0	
37	47.3	4.177	20.70	-2.91	9.09	2200	1.00	50.0	59.9	-0.62	59.97	3.44	732.40	17.46	3.84	0.28	407.93	69.9	85.73	1447	61.4	87.80	17.40	59.3	60.7	
Čerpadlo H = 434 m																										
3	-	4.492	-	-8.48	8.71	4094	-0.96	50.0	-103.2	-28.11	106.98	28.59	726.82	21.17	5.65	0.01	433.99	90.1	87.33	2275	100.9	89.30	-	-	-	
4	-	4.494	-	-8.59	9.07	3787	-1.00	50.0	-103.0	4.00	103.10	20.56	726.72	20.77	5.44	0.01	434.06	88.5	85.87	2223	100.8	87.76	-	-	-	
Čerpadlo H = 410 m																										
38	-	4.304	-	-2.72	8.93	3917	-1.00	50.0	-104.8	4.24	104.88	-8.46	732.59	22.43	6.34	0.01	409.78	90.2	86.07	2269	102.5	87.97	-	-	-	
Legenda:																										
						Měření průtoku Gibsonovou metodou;				zavzdušnění				XXX				dp- přes rozsah, průtok použit přímo z Gibsonovy metody;				dp- přes rozsah, průtok není k dispozici				

Tab. 8: Hlavní výpočetní tabulka

5.6 Nejistoty měření

Nejistoty měření jsou vyčíslovány pro interval spolehlivosti 95%. Vyhodnocení nejistot jednotlivých veličin vychází z následujících obecných vztahů:

$$f_x = \frac{e_x}{X} \quad (24)$$

Kde:

f_x [%] – relativní nejistota veličiny X
 e_x [fyz. rozměr veličiny X] – absolutní nejistota veličiny X

Celková relativní nejistota veličiny X, která je součinem či podílem dílčích veličin, vyhodnocená podle Přílohy C a D normy [1] se na základě n dílčích nejistot f_{xi} vyčíslí podle vztahu:

$$f_x = \sqrt{\sum_{i=1}^n f_{xi}^2} \quad (25)$$

Obdobně celková absolutní nejistota veličiny X, která je součtem či rozdílem dílčích veličin, se na základě n dílčích nejistot e_{xi} vyčíslí podle vztahu:

$$e_x = \sqrt{\sum_{i=1}^n e_{xi}^2} \quad (26)$$

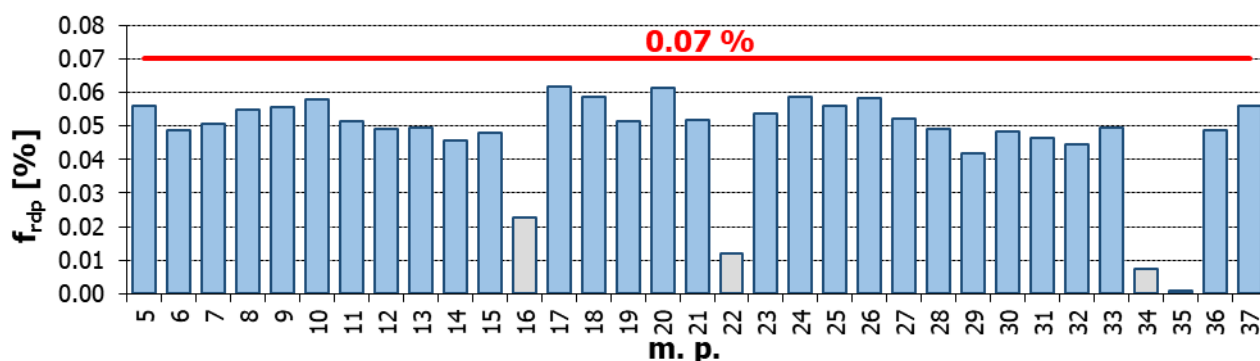
Náhodné absolutní nejistoty všech měřených veličin jsou automaticky vyhodnocované po ukončení měření každého bodu. Významné nejistoty měření jsou popsány v následujících podkapitolách.

Vzhledem k třístrojovému uspořádání PVE Čierny Váh se některé použité přístrojové vybavení lišilo při měření turbínového nebo čerpadlového chodu. Tato skutečnost má vliv i na vyhodnocení nejistot, nicméně tento vliv není zásadní a pro zachování větší přehlednosti jsou následující dílčí nejistoty a z nich plynoucí celková nejistota provedeny pouze pro turbínový chod a výsledná hodnota je použita i pro chod čerpadlový.

5.6.1 Nejistota průtoku

Dílčí veličina	f_x
Měření tlaku pG1	0.20%
Měření tlaku pG2	1.25%
Rovnoměrnosti rozložení rychlostí v profilu G1 (odhad)	0.10%
Rovnoměrnosti rozložení rychlostí v profilu G2 (odhad)	0.50%
Stanovení nejistoty geometrického součinitele potrubí C_{pst}	0.50%
Kvantováním měřicí ústředny (rozlišení 16 bit) - pro rozsah $dp_G = 400$ kPa	0.12%
Určení nuly tlakové difference	0.20%
Nejistota rozlišení dp (malá změna dp)	0.20%
Integrace – vodní ráz	0.50%
Integrace – ztráty třením v potrubí	0.20%
Integrace – ukončení intervalu integrace	0.20%
Stanovení zbytkového průtoku – průsak přes KU (nulový průsak – těsný KU)	0.00%
Celková nejistota měření průtoku Gibsonovou metodou	1.59%
Systematická nejistota snímače dp	0.08%
Náhodná nejistota dp	0.07%
Nejistota aproximace	0.24%
Nejistota indexového průtoku	1.61%

Tab. 9: dílčí nejistoty a celková nejistota průtoku



Obr. 21: Náhodná nejistota měření tlakové difference

V grafu na Obr. 21 jsou šedou barvou vyznačeny body, ve kterých měřená difference překročila rozsah použitého snímače. Stejně tak jako samotné naměřené hodnoty nejsou správné, i vyhodnocená náhodná nejistota v těchto bodech neodpovídá skutečnosti.

Jak je zřejmé z tabulky dílčích nejistot Tab. 9, jako hlavní zdroje nejistot stanovení průtoku lze označit následující skutečnosti:

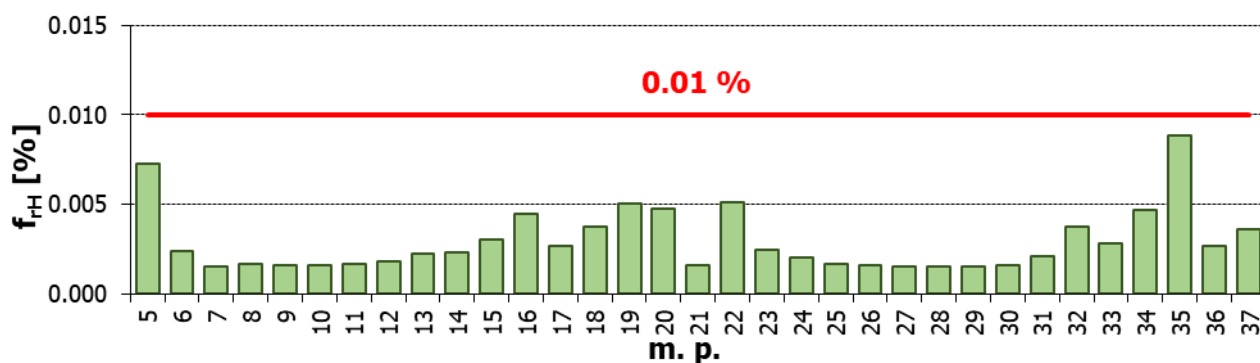
- Malá hodnota tlakové změny p_{2G} (≈ 0.45 MPa) vůči rozsahu snímače (10 MPa). Přestože offset snímače je vykompenzován v rámci výpočtového algoritmu, zůstává zde nejistota měřené hodnoty vztažená na velikost tlakové změny při rychlém zavření turbíny (1.25%).
- Bylo zjištěno, podobně jako měřicí skupina Litostroje u TG5, že nejvěrohodnější výsledky dává měření mezi vtokem a kulovou odbočnicí, přičemž odbočka k čerpadlu v turbínovém režimu a odbočka k turbíně v čerpadlovém režimu sloužily jako impulsní potrubí nestandardního průměru a délky. Zde se uplatní zejména:
 - Nedefinovatelné rozložení rychlostí v kulové odbočnici.
 - Obtížně stanovitelný geometrický faktor potrubí pro tento kus přivaděče.
- Z důvodu malé změny tlaku vůči rozsahu snímače je rovněž kvantování měřicí ústředny využito pouze ze 4% rozsahu (± 32768 úrovní). Nicméně tato zvýšená nejistota rozlišení nemá zásadní vliv na celkovou nejistotu průtoku.

5.6.2 Nejistota spádu

Dílčí veličina	e_x	f_x
tp. tlakového snímače p_1 0.2% z rozsahu 6 MPa	1.223 m	
tp. ultrazvukové sondy 0.15% z rozsahu 12 m	0.018 m	
Nejistota ustavení tlakového snímače – odhad	0.100 m	
Nejistota ustavení ultrazvukové sondy - odhad	0.050 m	
Relativní systematická nejistota spádu pro $H = 405$ m *	1.23 m	0.30%
Náhodná nejistota měření spádu		0.01%
Celková nejistota spádu		0.30%

Tab. 10: Dílčí nejistoty a celková nejistota spádu

* Pozn.: Pro větší přehlednost je relativní nejistota vztažena pouze k jednomu spádu. Zvolen byl menší z měřených spádů, protože relativní nejistota je nepatrně větší (o 0.01%), tedy na bezpečnější stranu. Tento malý rozdíl nemá zásadní vliv na celkovou nejistotu.

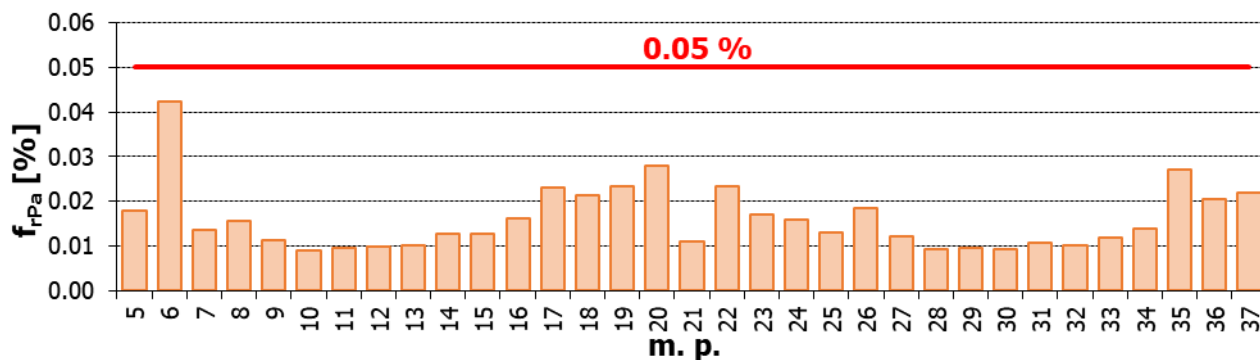


Obr. 22: Náhodná nejistota měření spádu

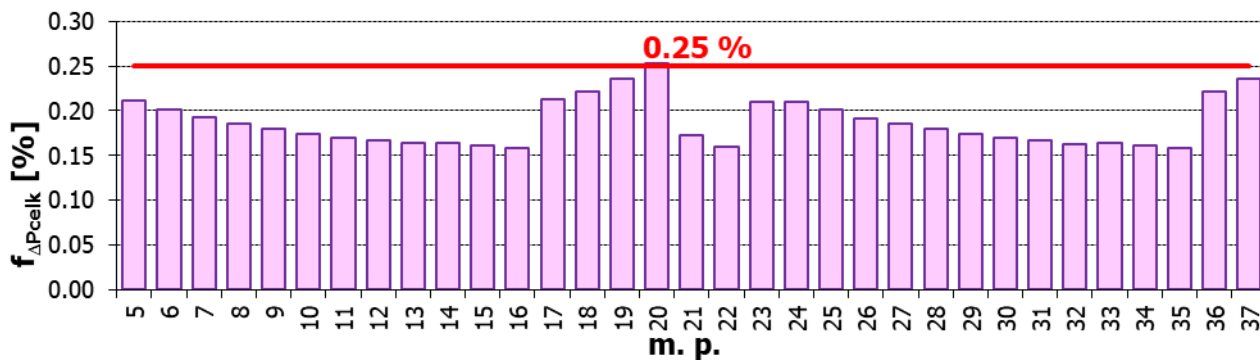
5.6.3 Nejistota výkonu

Dílčí veličina	f_x
Tp. proudových měřicích transformátorů	0.50%
Tp. napěťových měřicích transformátorů	0.50%
Tp. analyzátoru sítě Yokogawa	0.20%
Relativní náhodná nejistota svorkového výkonu	0.05%
Nejistota ztrát generátoru (odhad nejistoty stanovení ztrátového výkonu 10%)	0.25%
Celková nejistota svorkového výkonu	0.78%

Tab. 11: Dílčí nejistoty a celková nejistota výkonu



Obr. 23: Náhodná nejistota měření výkonu



Obr. 24: Nejistota ztrátového výkonu

5.6.4 Nejistota účinnosti

Dílní veličina	f_x
Průtok	1.61%
Spád	0.30%
Výkon turbíny / příkon čerpadla	0.78%
Celková nejistota účinnosti	1.8%

Tab. 12: Shrnutí všech nejistot a celková nejistota účinnosti

6 Presentace výsledků měření

6.1 Grafická prezentace

Přehledné grafické znázornění výsledků měření účinnosti je k dispozici na následujících obrázcích. V grafech účinnosti turbíny jsou naměřené body aproximovány polynomem a tomuto polynomu je přiřazeno stanovené pásmo nejistoty $\pm 1.8\%$ (viz kap.5.6). Polynomy jsou aproximovány i další závislosti. Rovnice těchto polynomů jsou uvedeny přímo v grafech.

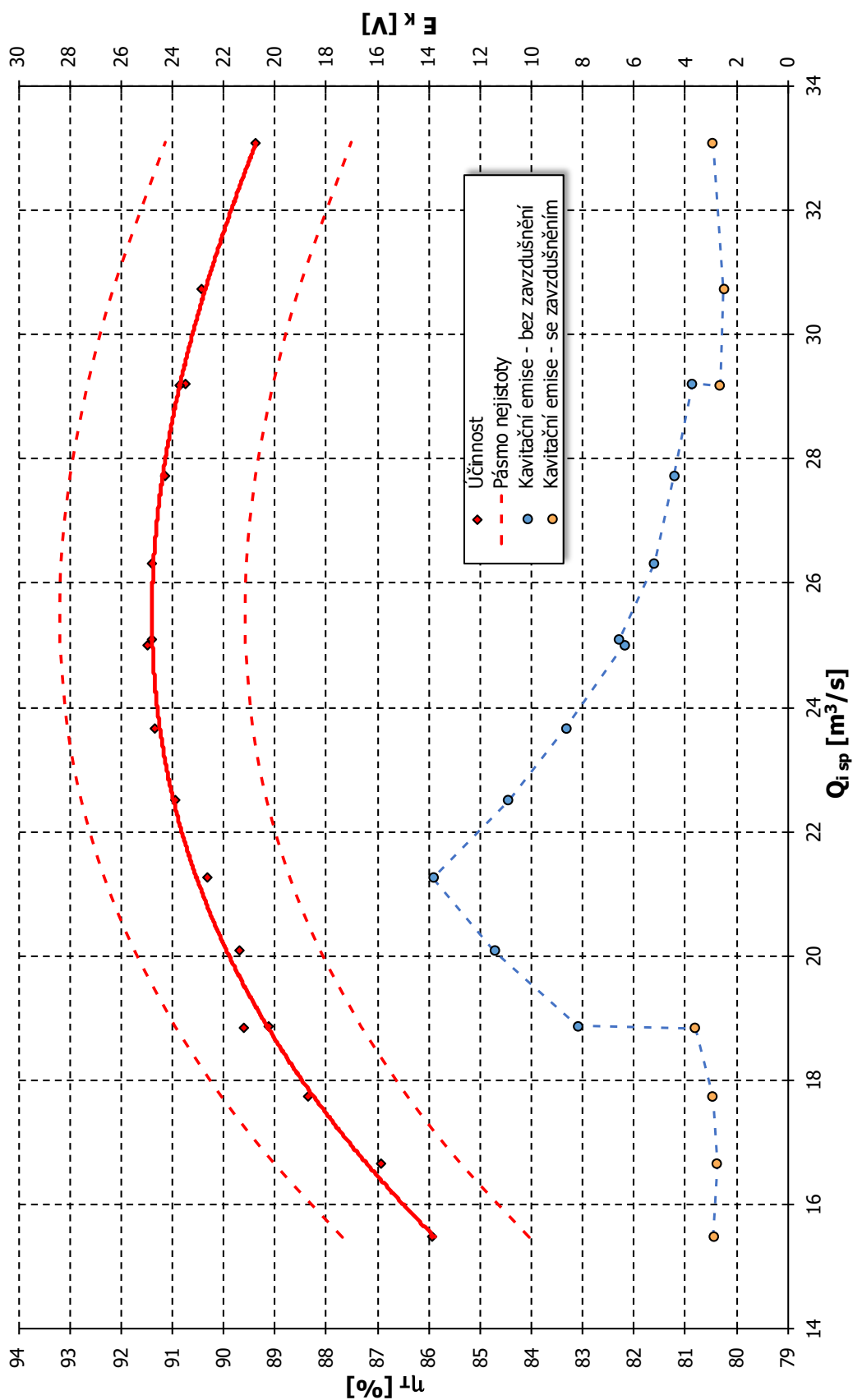
Vzhledem k malému počtu měřených bodů v čerpadlovém chodu nejsou výsledky měření zobrazeny v grafech, ale jsou uvedeny pouze v Tab. 8 v kap.5.5.

$H_{sp} = 430\text{ m}$

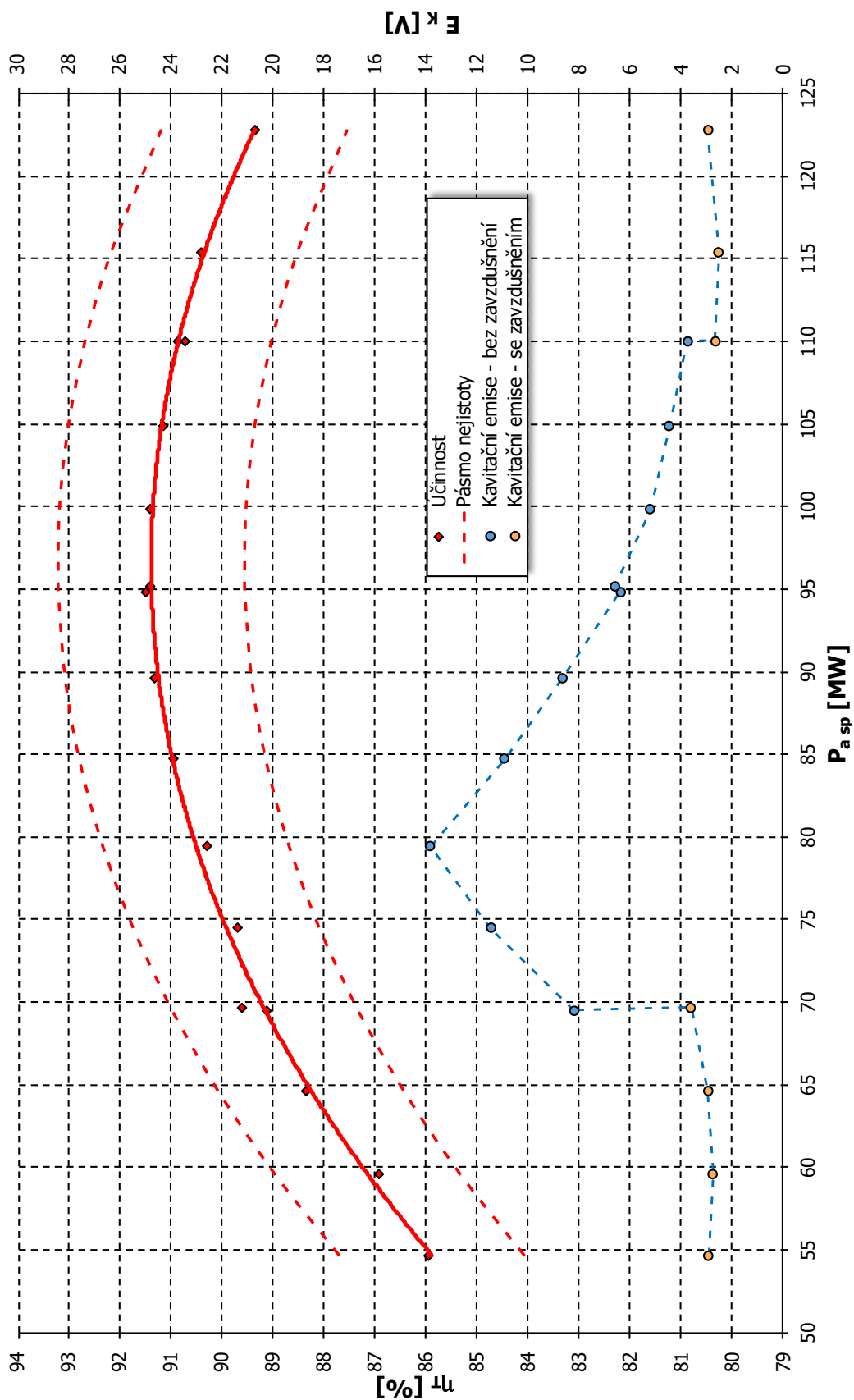
- Obr. 25: Účinnost turbíny a kavitace v závislosti na průtoku pro $H_{sp} = 430\text{ m}$
- Obr. 26: Účinnost turbíny a kavitace v závislosti na výkonu pro $H_{sp} = 430\text{ m}$
- Obr. 27: Průtok turbínou v závislosti na otevření rozvaděče pro $H_{sp} = 430\text{ m}$
- Obr. 28: Činný výkon turbíny v závislosti na průtoku pro $H_{sp} = 430\text{ m}$

$H_{sp} = 405\text{ m}$

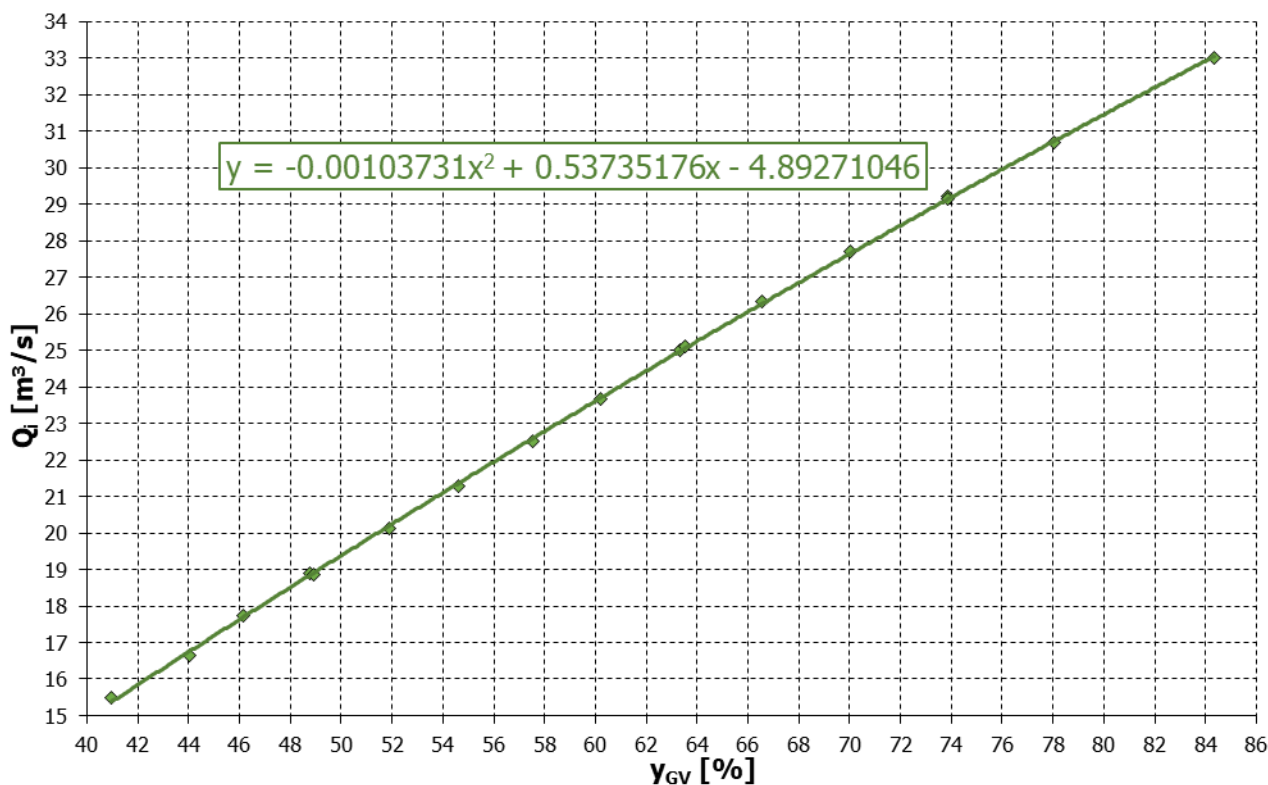
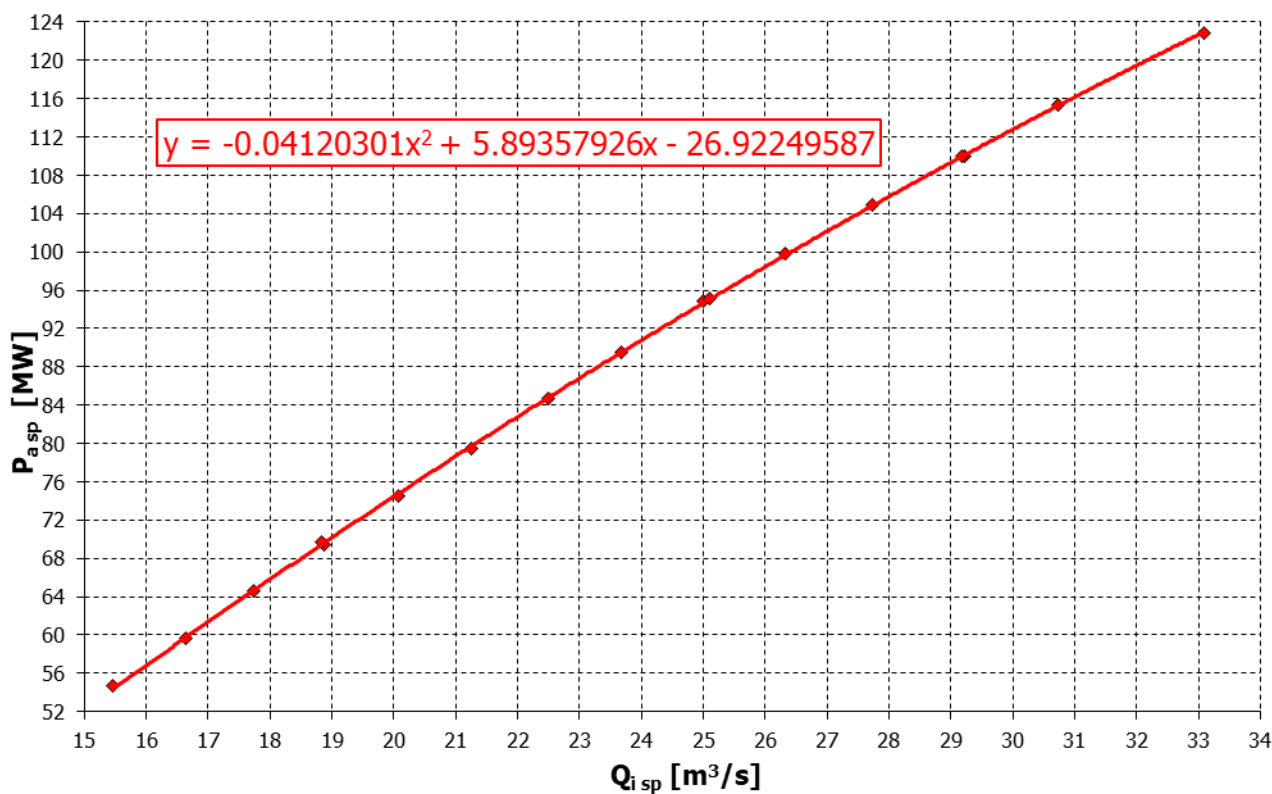
- Obr. 29: Účinnost turbíny a kavitace v závislosti na průtoku pro $H_{sp} = 405\text{ m}$
- Obr. 30: Účinnost turbíny a kavitace v závislosti na výkonu pro $H_{sp} = 405\text{ m}$
- Obr. 31: Průtok turbínou v závislosti na otevření rozvaděče pro $H_{sp} = 405\text{ m}$
- Obr. 32: Činný výkon turbíny v závislosti na průtoku pro $H_{sp} = 405\text{ m}$

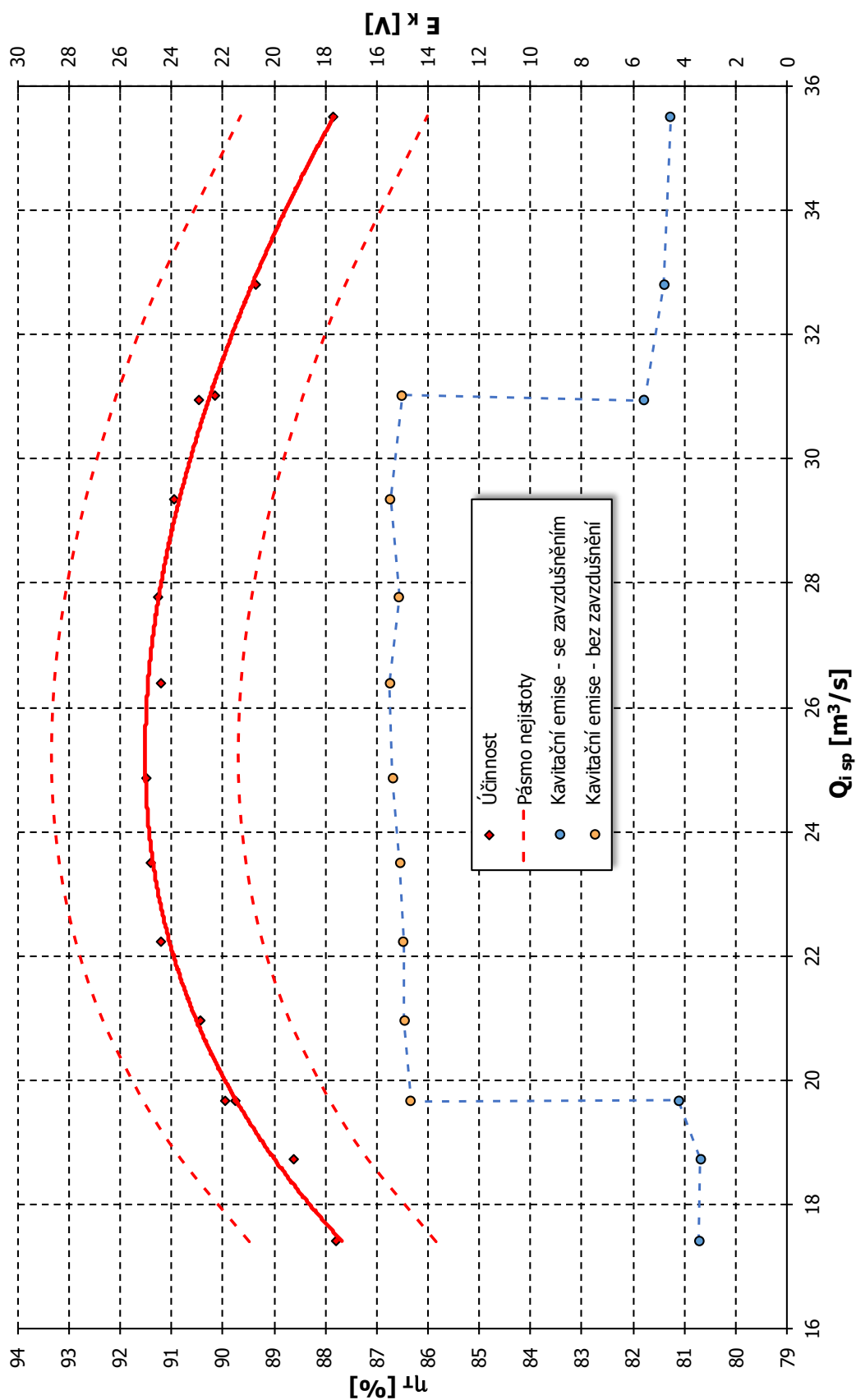


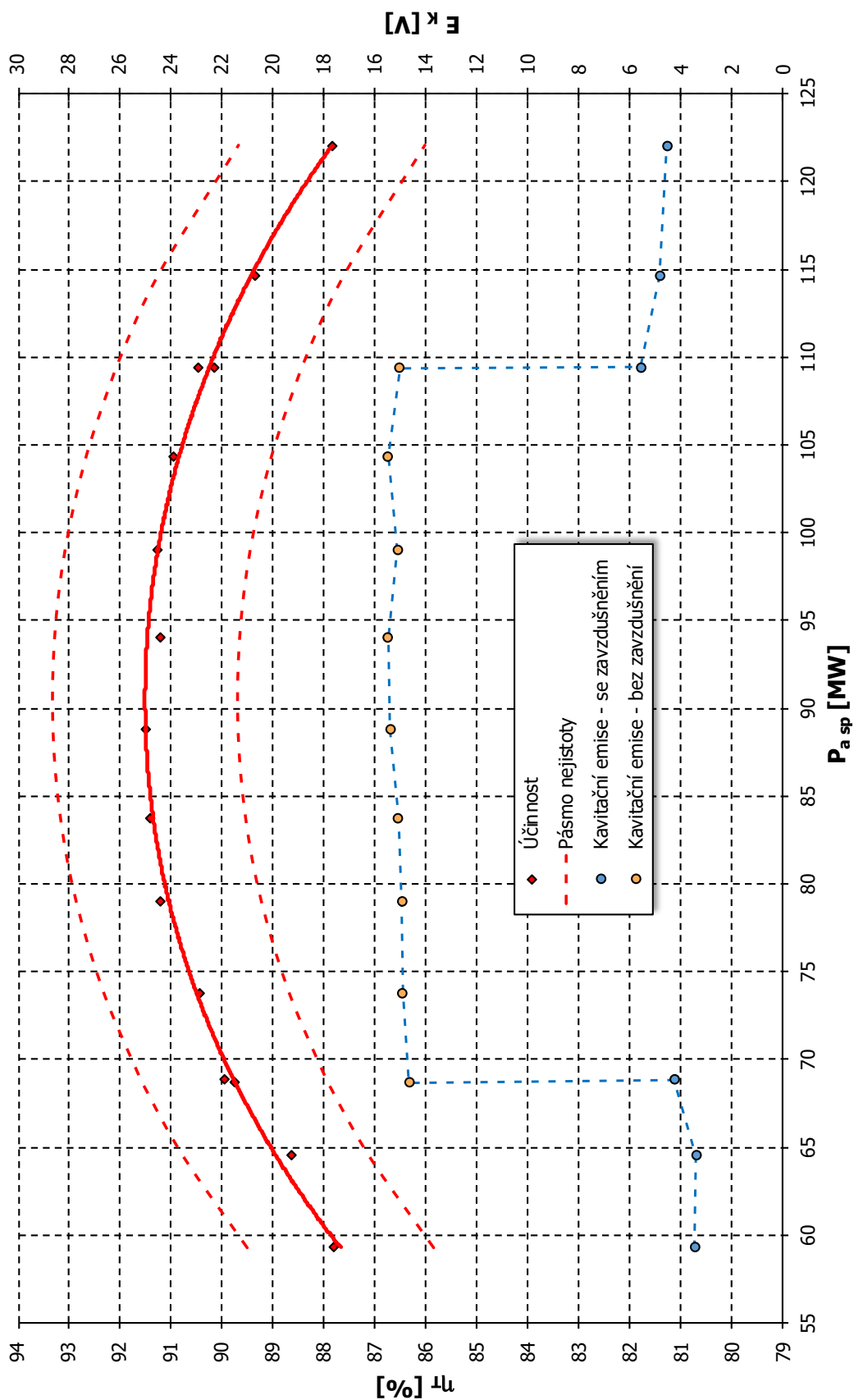
Obr. 25: Účinnost turbíny a kavitace v závislosti na průtoku pro $H_{sp} = 430\ m$



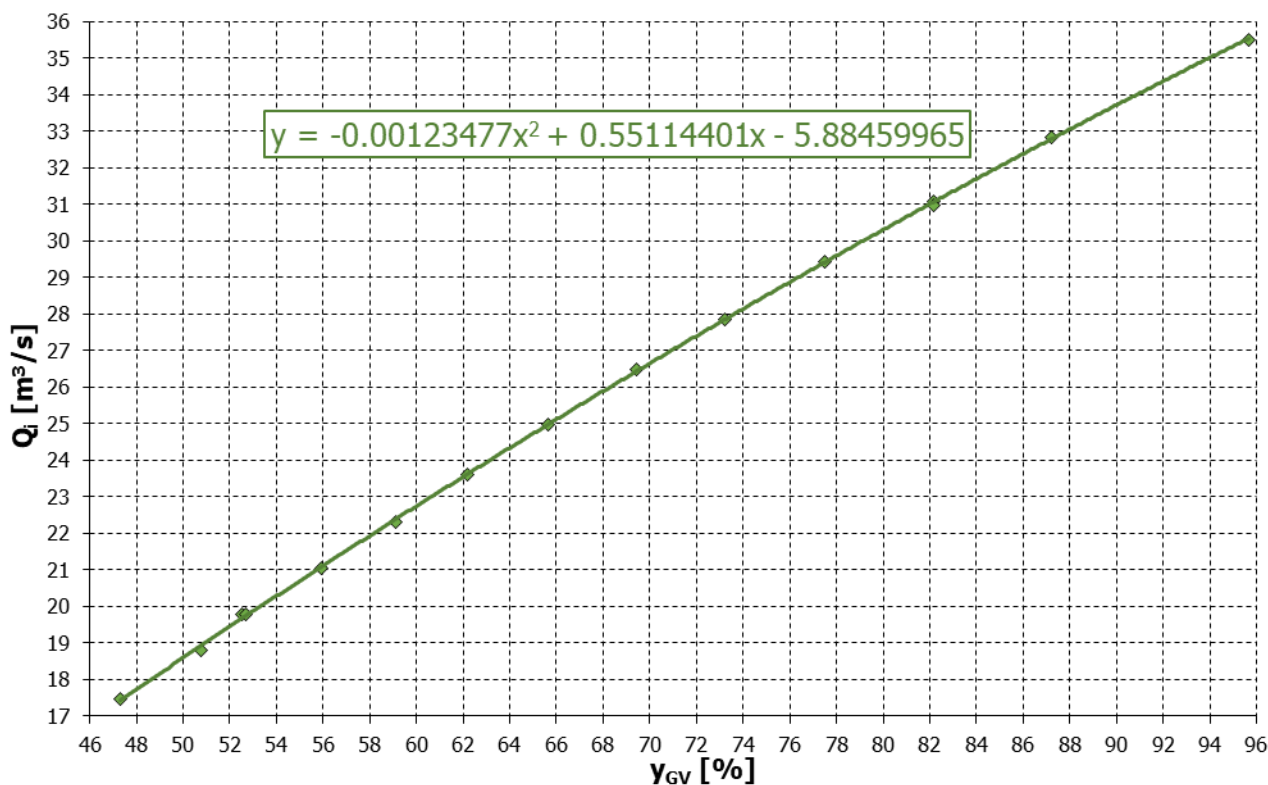
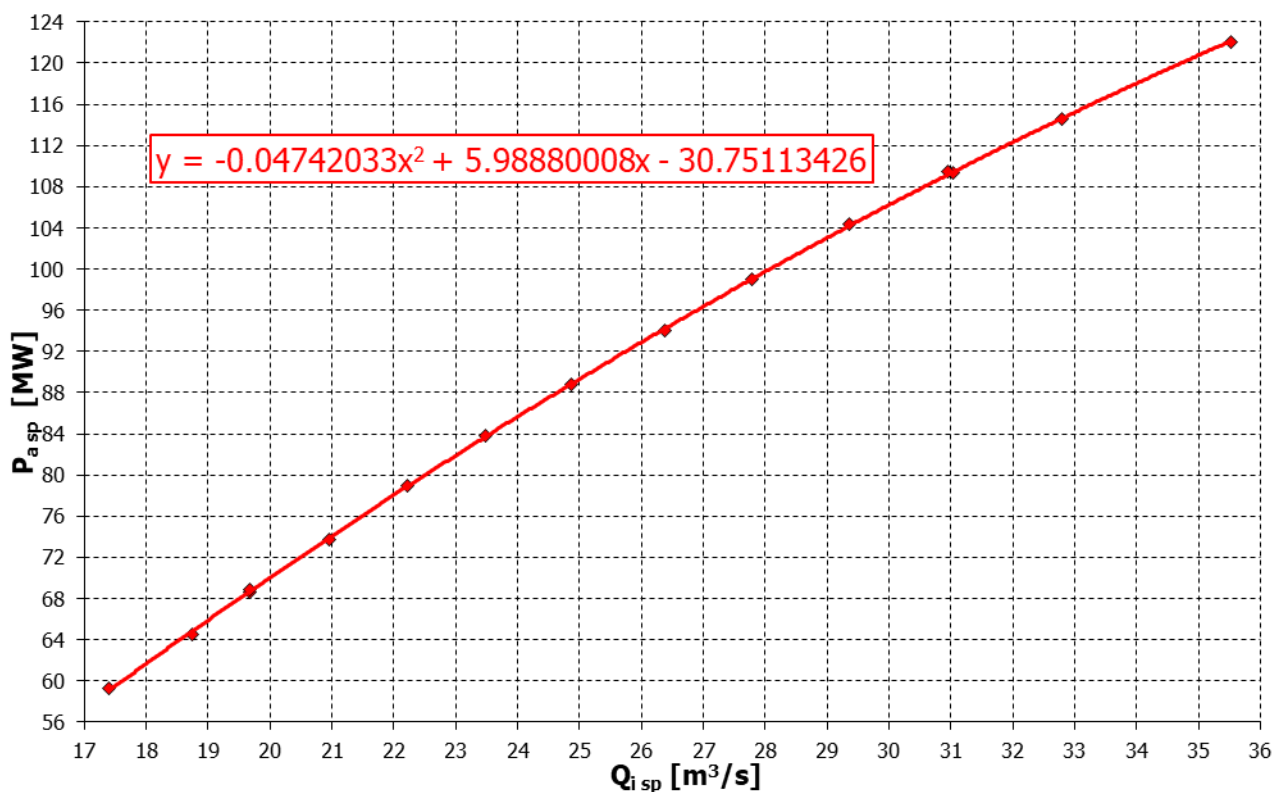
Obr. 26: Účinnost turbíny a kavitace v závislosti na výkonu pro $H_{sp} = 430$ m


Obr. 27: Průtok turbínou v závislosti na otevření rozvaděče pro $H_{sp} = 430$ m

Obr. 28: Činný výkon turbíny v závislosti na průtoku pro $H_{sp} = 430$ m


Obr. 29: Účinnost turbíny a kavitace v závislosti na průtoku pro $H_{sp} = 405\ m$



Obr. 30: Účinnost turbíny a kavitace v závislosti na výkonu pro $H_{isp} = 405$ m


Obr. 31: Průtok turbínou v závislosti na otevření rozvaděče pro $H_{sp} = 405$ m

Obr. 32: Činný výkon turbíny v závislosti na průtoku pro $H_{sp} = 405$ m

6.2 Tlakové pulzace

Tlakové pulzace byly vyhodnoceny ve vstupním profilu spirály (p_{1T}), výstupním profilu čerpadla ($p_{1č}$), v savce turbíny (p_{DT_T}) i čerpadla (pravá strana p_{DT_P} , levá strana p_{DT_L}) a v průřezích měření tlaku pro Gibsonovu metodu v turbínovém chodu (p_{2GT}) i čerpadlovém chodu (p_{2GPa} , p_{2GPb}) jako dvoj-amplituda špička-špička pro interval spolehlivosti 95%. Hodnoty dvoj-amplitud uvedené v tlakových jednotkách i v relativních jednotkách vzhledem k maximálnímu geodetickému spádu $H_{g\ max} = 435.5\ m$ jsou v Tab. 13 a Tab. 14 pro turbínu a Tab. 15 pro čerpadlo. Dvoj-amplitudy jsou graficky znázorněny jako funkce výkonu na Obr. 33 a Obr. 34 pro turbínu a na Obr. 35 pro čerpadlo. Pro srovnání je zde také zobrazena mezní hodnota 7 % maximálního geodetického spádu $H_{g\ max}$ (obvykle používaná mez pro posuzování tlakových pulzací).

Pulzace byly vyhodnoceny pro podmínky, za jakých je soustrojí normálně provozováno – tzn. v turbínové chodu zavzdušnění savky při nižších a vyšších výkonech, přičemž u výkonových hladin, při kterých je zavzdušnění aktivováno byly v turbínovém chodu proměřeny jak režimy se zavzdušněním, tak i bez zavzdušnění. V některých případech jsou tyto body charakterizovány skokovou změnou ve velikosti pulzací – viz grafy na Obr. 33 a Obr. 34. Ve stejných grafech jsou režimy odlišeny tvarem značky a odstínem barvy datové řady – kosočtverce (tmavší barvy) značí režim „bez zavzdušnění“, čtverce (světlejší barvy) režim „se zavzdušněním“, v Tab. 13 a Tab. 14 jsou pak body se zavzdušněním označeny fialovým orámováním.

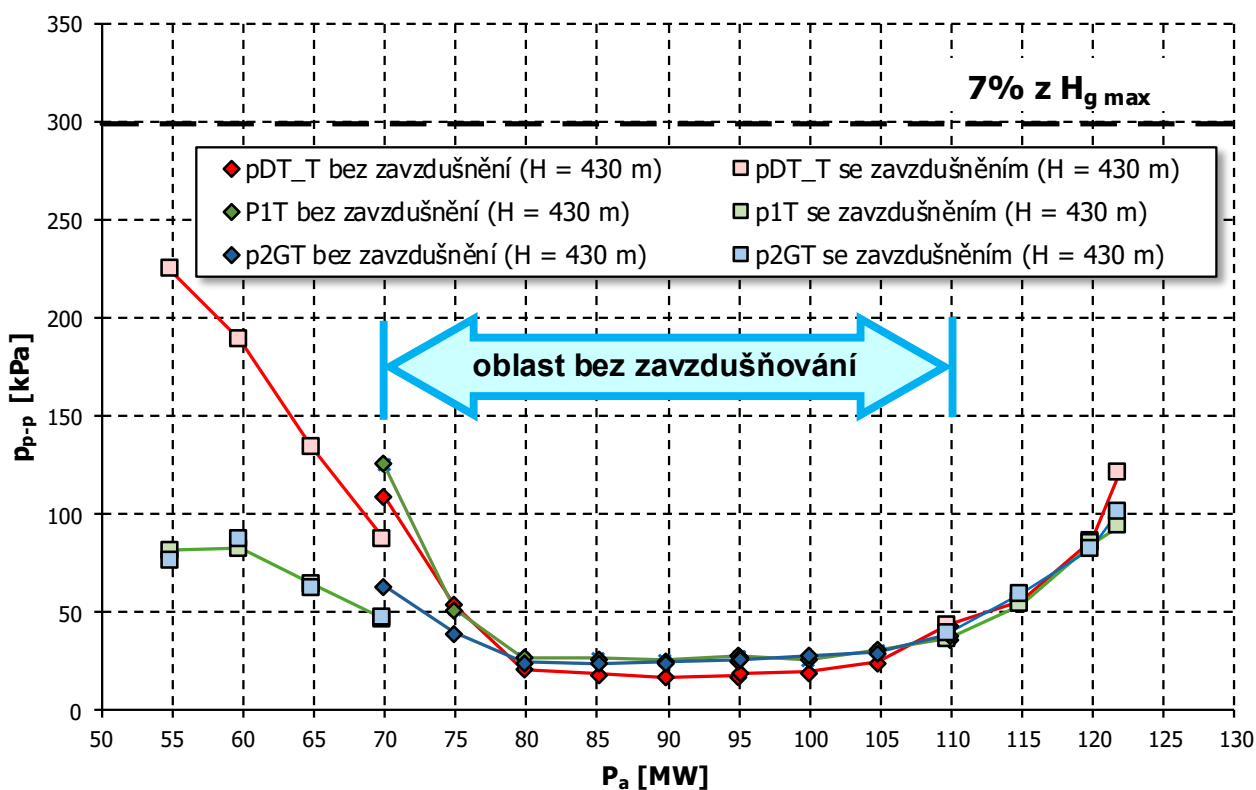
Z výsledků lze konstatovat, že zavzdušnění má na snížení tlakových pulzací příznivý vliv. V turbínovém chodu jsou tlakové pulzace nízké v celém provozním rozsahu, v čerpadlovém chodu jsou zvýšené pulzace ve výstupním průřezu čerpadla.

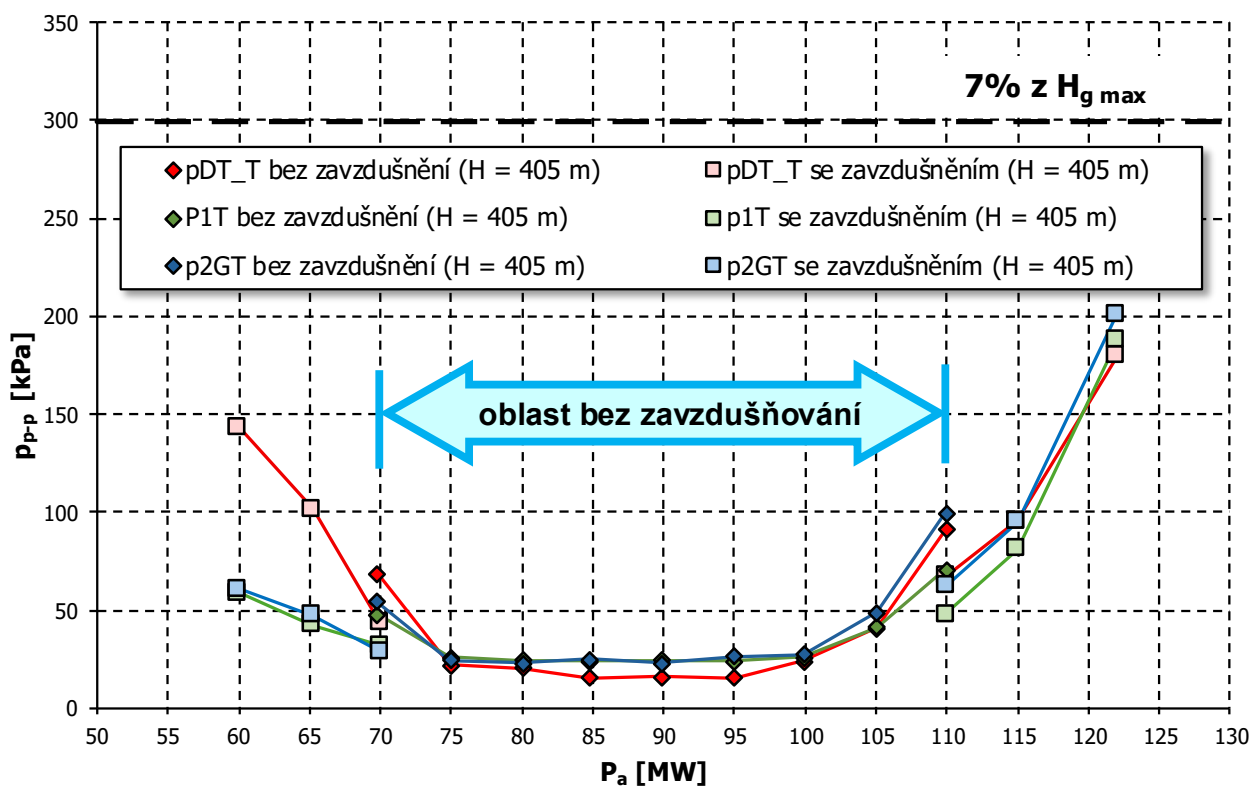
CM	Q	P _a	H	p _{DT_T p-p}		p _{2GT p-p}		p _{1T p-p}	
-	m ³ /s	MW	m	kPa	%H _{g max}	kPa	%H _{g max}	kPa	%H _{g max}
Turbína H = 430 m									
5	18.91	69.9	431.75	109.67	2.6	63.57	1.5	126.27	3.0
6	20.11	74.9	431.57	54.10	1.3	39.55	0.9	51.56	1.2
7	21.28	79.8	431.38	21.34	0.5	24.90	0.6	27.25	0.6
8	22.52	85.0	431.06	18.85	0.4	24.32	0.6	26.66	0.6
9	23.68	89.8	430.71	17.29	0.4	24.90	0.6	25.49	0.6
10	25.01	94.9	430.44	17.58	0.4	25.78	0.6	28.13	0.7
11	26.32	99.8	430.13	19.82	0.5	28.42	0.7	26.37	0.6
12	27.71	104.8	429.80	24.61	0.6	29.59	0.7	31.05	0.7
13	29.19	109.8	429.47	43.70	1.0	38.67	0.9	36.62	0.9
14	29.14	109.7	429.37	43.46	1.0	39.55	0.9	36.62	0.9
15	30.68	114.9	428.85	55.57	1.3	59.47	1.4	54.20	1.3
16	-	119.8	-	86.67	2.0	82.62	1.9	85.25	2.0
17	18.85	69.9	430.78	87.74	2.1	47.75	1.1	46.88	1.1
18	17.75	64.8	430.90	134.86	3.2	62.70	1.5	64.75	1.5
19	16.67	59.8	430.99	189.26	4.4	87.01	2.0	82.91	1.9
20	15.49	54.9	431.06	225.29	5.3	76.17	1.8	81.45	1.9
21	25.09	95.0	429.63	19.04	0.4	26.37	0.6	27.54	0.6
22	33.00	121.8	427.81	121.39	2.8	101.66	2.4	94.34	2.2

Tab. 13: Tlakové pulzace v turbínovém chodu pro spád $H_{sp} = 430\ m$

CM	Q	P _a	H	p _{DT_T} p-p		p _{2GT} p-p		p _{1T} p-p	
-	m ³ /s	MW	m	kPa	%H _g max	kPa	%H _g max	kPa	%H _g max
Turbína H = 405 m									
23	19.77	69.8	409.44	68.90	1.6	54.20	1.3	48.05	1.1
24	19.77	69.9	409.35	43.80	1.0	28.71	0.7	31.93	0.7
25	21.05	74.9	409.16	21.97	0.5	24.32	0.6	25.78	0.6
26	22.31	80.0	408.68	20.31	0.5	23.14	0.5	24.32	0.6
27	23.58	84.8	408.48	15.58	0.4	24.90	0.6	23.73	0.6
28	24.96	89.8	408.21	15.92	0.4	22.85	0.5	24.32	0.6
29	26.47	94.9	407.81	15.72	0.4	26.37	0.6	24.02	0.6
30	27.85	99.9	407.37	23.73	0.6	27.54	0.6	26.07	0.6
31	29.41	105.1	406.90	41.02	1.0	48.93	1.1	41.60	1.0
32	31.07	109.9	406.46	91.41	2.1	99.61	2.3	70.61	1.7
33	30.97	109.9	406.26	67.38	1.6	62.40	1.5	47.75	1.1
34	32.83	114.9	405.89	95.65	2.2	94.92	2.2	81.15	1.9
35	35.51	122.0	404.89	179.59	4.2	200.98	4.7	187.50	4.4
36	18.80	65.2	407.93	101.61	2.4	47.17	1.1	42.19	1.0
37	17.46	59.9	408.04	143.46	3.4	60.94	1.4	58.59	1.4

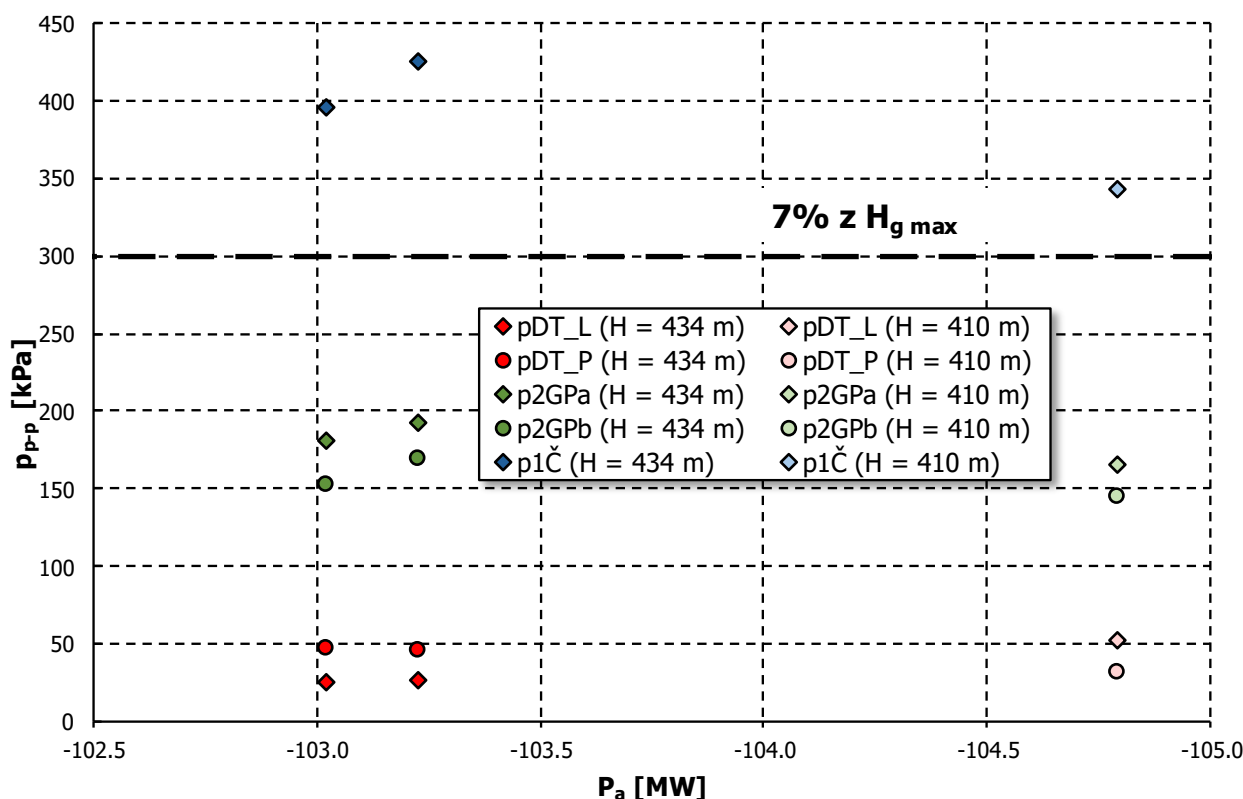
Tab. 14: Tlakové pulzace v turbínovém chodu pro spád H = 405 m


Obr. 33: Tlakové pulzace v turbínovém chodu pro spád $H_{sp} = 430 \text{ m}$


Obr. 34: Tlakové pulzace v turbínovém chodu pro spád $H_{sp} = 405$ m

CM	Q	P_a	H	p_{DT_L} p-p		p_{DT_P} p-p		p_{2GPa} p-p		p_{2GPb} p-p		$p_{1čp-p}$	
-	m ³ /s	MW	m	kPa	% H_{max}	kPa	% H_{max}	kPa	% H_{max}	kPa	% H_{max}	kPa	% H_{max}
Čerpadlo H = 434 m													
3	21.17	-103.2	434.11	26.3	0.6	46.3	1.1	192.4	4.5	169.4	3.96	426.3	9.97
4	20.77	-103.0	434.17	25.2	0.6	47.7	1.1	181.6	4.3	152.8	3.58	396.5	9.28
Čerpadlo H = 410 m													
38	22.43	-104.8	409.9	51.9	1.2	31.3	0.7	165.5	3.9	145.0	3.39	343.3	8.03

Tab. 15: Tlakové pulzace v čerpadlovém chodu



Obr. 35: Tlakové pulzace v čerpadlovém chodu

6.3 Vibrace

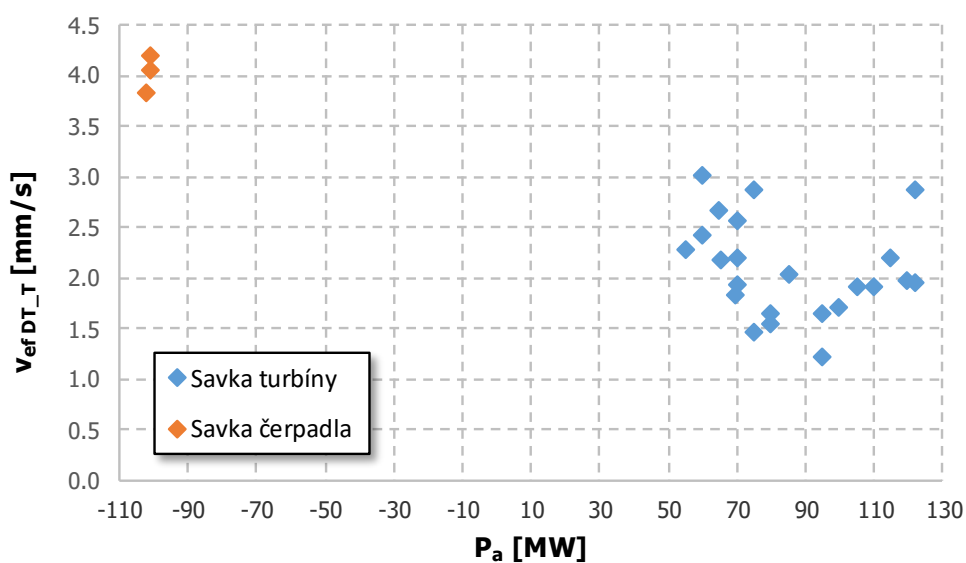
6.3.1 Měření OSC na savkách

Doplňkové měření vibrací savek turbíny i čerpadla (signály $a_{DT,T}$ a $a_{DT,P}$) nepřineslo zejména s ohledem na rozšíření informací o kavitačním chování žádné zásadní výstupy. Proto výsledky tohoto měření nejsou ve zprávě detailně prezentovány. Naměřené efektivní rychlosti absolutních vibrací čerpadlové i turbínové savky jsou uvedeny na Obr. 36. V turbínovém režimu při obou spádech průběh vibrací zhruba odpovídá křivkám tlakových pulzací, tzn. nejmenší hodnoty mezi výkony cca $70 \div 110$ MW s nárůstem směrem k oběma okrajům provozního rozsahu stroje.

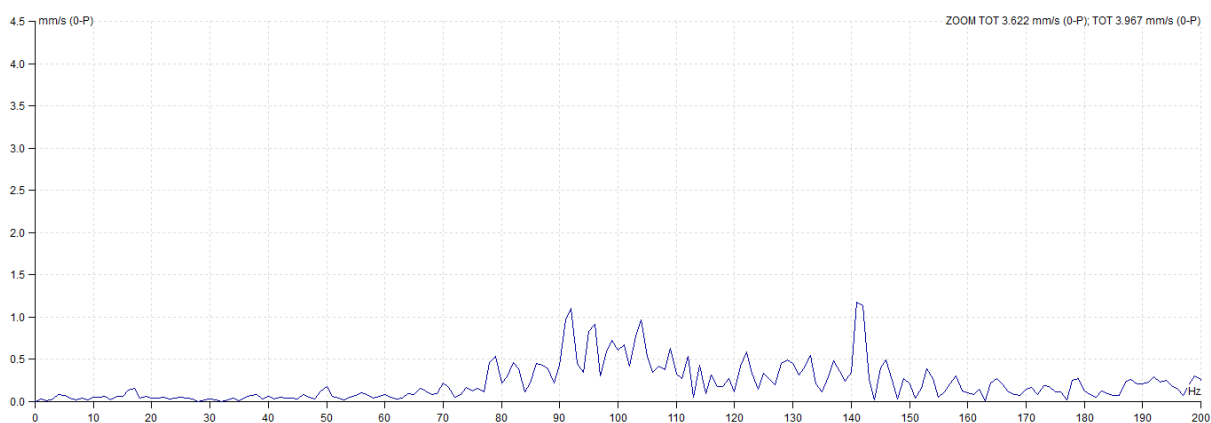
6.3.2 Měření vibrodiagnostické skupiny SE

Současně s měřením účinnosti byly skupinou provozovatele elektrárny měřeny hřídelové a ložiskové vibrace a rovněž vysokofrekvenční vibrace a kavitační emise v savkách. Výsledky tohoto měření uvedeny v samostatné zprávě – viz Příloha P3. Výsledky lze stručně shrnout takto:

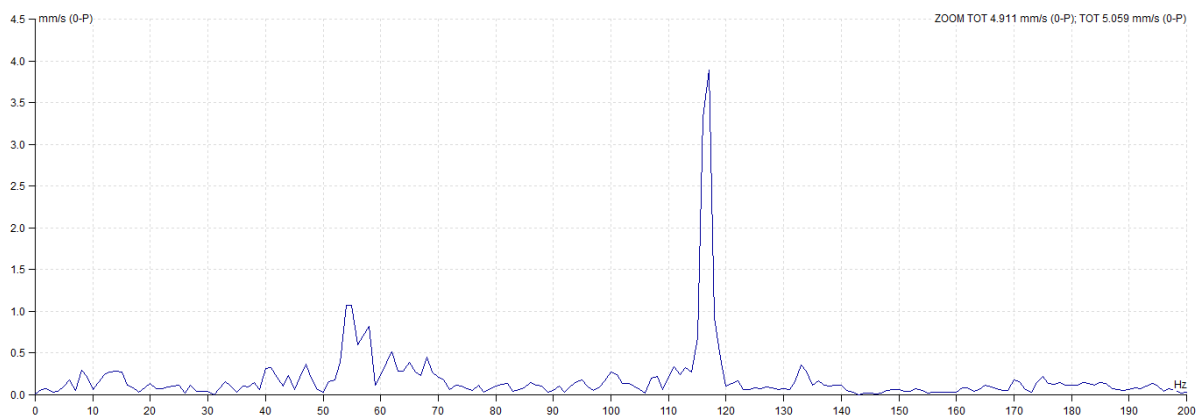
- U vibrací nedošlo k zásadní změně trendů měřených hodnot.
- V turbínovém režimu může být soustrojí TG4 bez omezení provozováno ve výkonovém rozsahu $70 \div 100$ MW.
- Minimalizovat čerpadlový provoz, a to kvůli vysokým vibracím hřídele a tělesa DVL.T.



Obr. 36: Efektivní rychlost vibrací savky turbíny a čerpadla na TG4



Obr. 37: Příklad FFT analýzy signálu vibrací savky turbíny – plný výkon (č.m. 35)



Obr. 38: Příklad FFT analýzy signálu vibrací savky čerpadla TG4 - č.m. 38

6.4 Kavitace

Kavitace byla měřena na kuželi savky v turbínovém režimu v místě, kde byla měřena i při uvádění do provozu – viz Obr. 5, kde jsou zřetelné navažené destičky se závitem pro snímač. Na čerpadle byl kontaktní mikrofon pro měření kavitační emise umístěn na savce poblíž dělicí roviny co nejblíže místu, kde byly na demontovaném stroji zřetelné stopy kavitace – viz Obr. 10. Použitý kavitoměr snímá relativně široké pásmo ultrazvuku v rozsahu do 500 kHz a vyhodnocuje z něj modulaci způsobenou především implozemi kavitačních bublinek, přičemž u Francisovy turbíny nelze vyloučit ani vliv copu v savce.

Turbína

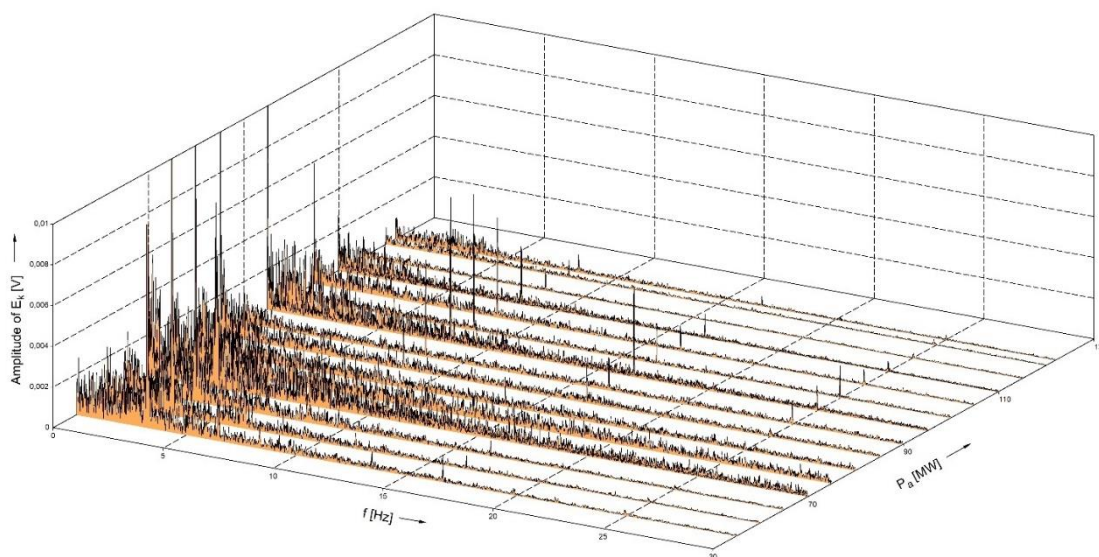
Úroveň kavitační emise na kuželi savky v závislosti na výkonu a průtoku je prezentována pro oba měřené spády v turbínovém režimu na Obr. 25, Obr. 26, Obr. 29 a Obr. 30. Z uvedených grafů je zřejmé, že zavzdušnění má velmi pozitivní vliv na uklidnění stroje, kdy se pro totožný výkon při zavedení vzduchu chod stroje výrazně zklidní a úroveň kavitační emise se sníží, což je potvrzeno i ze záznamu pulzací. Je zajímavé, že úroveň kavitace je vyšší pro nižší spád cca 405 m ve výkonovém pásmu stroje bez zavzdušnění, což dokládají i kaskádové grafy spekter kavitační emise na Obr. 39 pro spád 430 m a Obr. 40 pro spád 405 m. Přestože se ve spektrech objevují čáry otáčková frekvence a jejich násobků, hlavní podíl na energetickém obsahu signálu mají náhodné frekvence pocházející patrně z hydrauliky stroje (vírový cop atp.). Zjištěný značný rozdíl mezi výsledky při obou spádech by měl být zohledněn při návrhu nového stroje.

Paralelně s měření kavitační emise aparaturou OSC bylo prováděno i měření kavitační emise aparaturou vibrodiagnostické skupiny SE – naměřené hodnoty viz příloha P3. Vzájemné srovnání naměřených výsledků obou skupin je uvedeno na Obr. 41 a Obr. 42. Tvary křivek jsou obdobné, zjištěné odchylky mohou být u obou přístrojů dány metodou zpracování naměřených signálů.

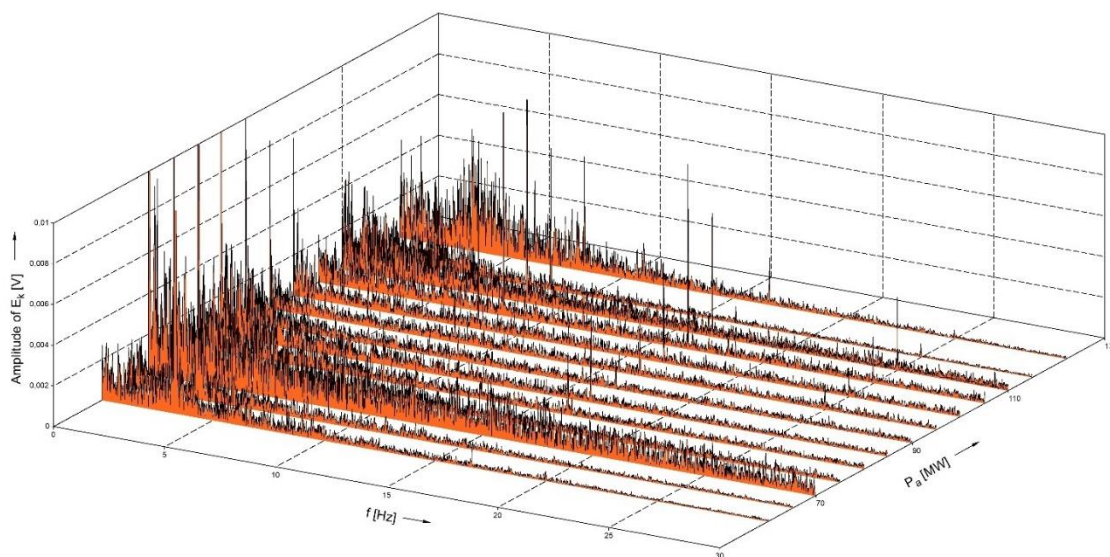
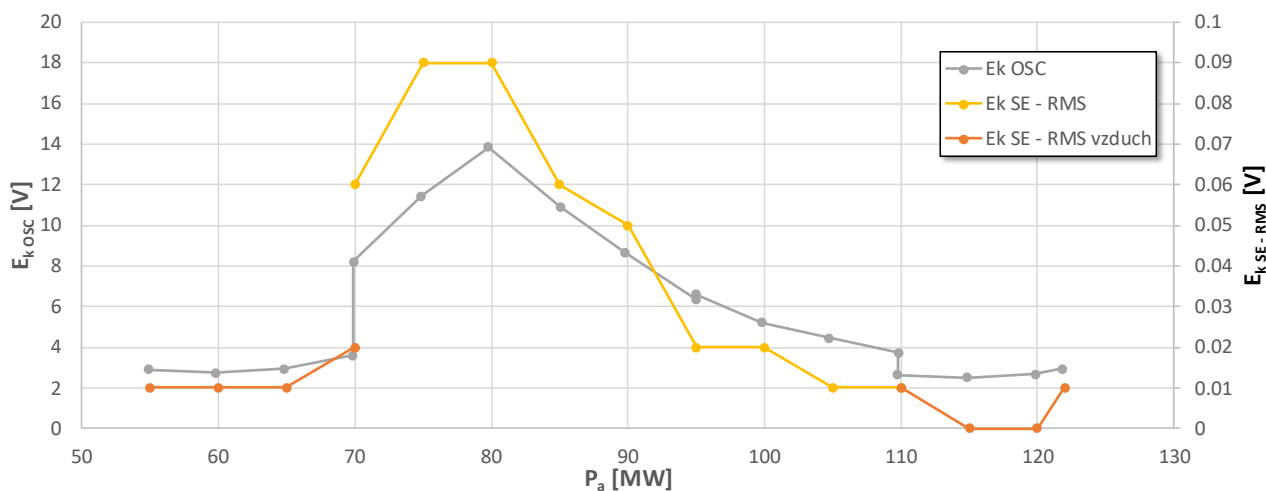
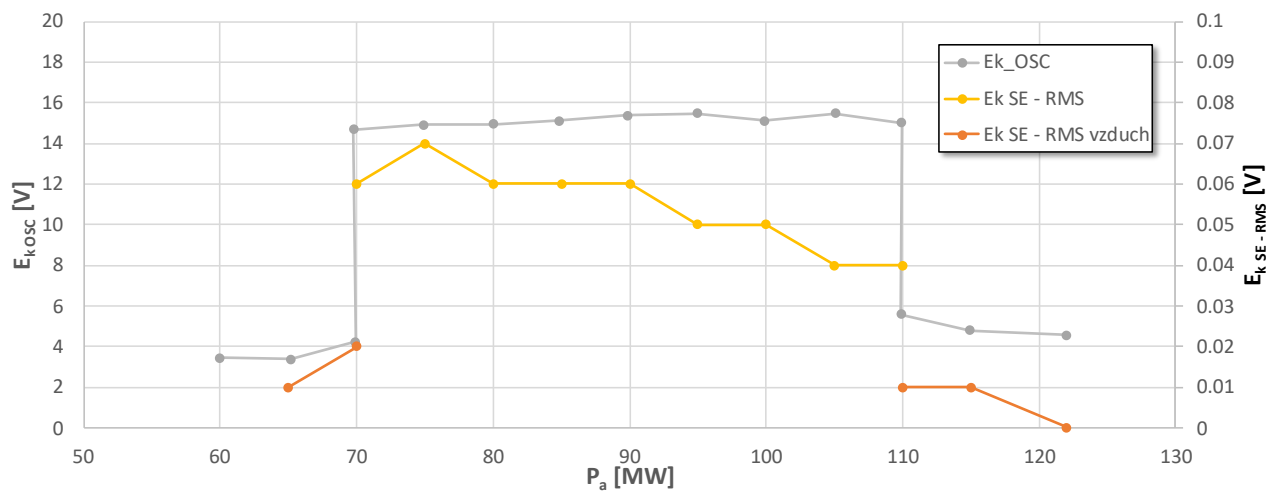
Čerpadlo

Vzhledem ke skutečnosti, že v čerpadlovém režimu byla změřeny pouze 3 body, z čehož kavitace byla snímána pouze při vyšší dopravní výšce, jsou zde uváděny hodnoty pouze v numerické podobě. V bodě č.m. 38 nebyla kavitační emise vyhodnocena z důvodu nefunkčnosti kavitoměru.

Kavitační emise na zvoleném měřicím místě byla v souladu s očekáváním zhruba dvojnásobná ve srovnání s maximem naměřeným na savce turbíny – viz Tab. 8.



Obr. 39: FFT analýza kavitačních emisí v savce turbíny TG4 při spádu $H_{sp} = 430$ m


Obr. 40: FFT analýza kavitačních emisí v savce turbíny TG4 při spádu $H_{sp} = 405$ m

Obr. 41: Srovnání kavitačních emisí OSC a SE v savce turbíny TG4 při spádu $H_{sp} = 430$ m

Obr. 42: Srovnání kavitačních emisí OSC a SE v savce turbíny TG4 při spádu $H_{sp} = 405$ m

7 Závěr

Výsledky měření uskutečněného na TG4 PVE Čierny Váh před rekonstrukcí lze shrnout následovně:

- 1) Měření se uskutečnilo při dvou spádech, resp. dopravních výškách:
 - Turbínový režim: $H_{sp} = 430$ m a 405 m.
 - Čerpadlový režim: $H_{sp} = 434$ m a 410 m.
- 2) I přes nestandardní měřicí úsek pro Gibsonovu metodu měření průtoku bylo dosaženo věrohodných výsledků porovnatelných s měřením po uvedení do provozu.
- 3) Maximální naměřená účinnost turbíny η_T byla při obou spádech cca 91.5 %, a to v rozsahu výkonů 90 až 95 MW.
- 4) Účinnost čerpadla η_c byla při $H_{sp} = 434$ m v úrovni cca 88.5 %, při $H_{sp} = 410$ m pak cca 88 %.
- 5) Kavitační emise na savce turbíny prokazuje standardní průběh pro Francisovy turbíny zejména při vyšším spádu. Jednoznačně však byl prokázán pozitivní vliv zavzdušnění savky na zklidnění stroje, aniž by tím byla znatelně ovlivněna účinnost.
- 6) Tlakové pulzace se v turbínovém režimu na obou spádech pohybují pod hranicí 7 % $H_{g \max}$, zavzdušňování má na velikost pulzací příznivý vliv. V čerpadlovém režimu byly naměřeny vyšší pulzace pouze u tlaku ve výstupním profilu čerpadla, ale jen v úrovni cca 8 ÷ 10 % $H_{g \max}$.
- 7) Při měření vibrací nebyly zaznamenány žádné zásadní změny trendů. V turbínovém režimu je provoz stroje ve výkonovém rozsahu 70 ÷ 100 MW bezproblémový. Je však doporučeno minimalizovat čerpadlový provoz kvůli vysokým vibracím hřídele a tělesa DVLТ.
- 8) Kavitační emise dosahovala vyšších hodnot při $H_{sp} = 405$ m než při 430 m, kdy je ve spektrech patrná vyšší energetický obsah náhodných frekvencí patrně pocházejících z hydrauliky stroje. V čerpadlovém režimu dosahuje naměřená kavitační emise vyšších, cca dvojnásobných hodnot proti maximu v turbínovém režimu.

Detailní popis jednotlivých výsledků měření je uveden v příslušných kapitolách a podkapitolách této zprávy.

Literatura

- [1] ČSN EN 60041: „Přejímací zkoušky na díle pro určení hydraulických charakteristik vodních turbín, akumulárních čerpadel a čerpadlových turbín“, ČSNi, rok 1995.
- [2] Kormanec M.: „Meranie parametrov turbogenerátorov TG4 a TG5 PVE Čierny Váh, Technická špecifikácia pre nákup“, Slovenské elektrárne 20.01.2025.
- [3] ČSN EN 60041: „Přejímací zkoušky na díle pro určení hydraulických charakteristik vodních turbín, akumulárních čerpadel a čerpadlových turbín“. ČSNi 1992.
- [4] Machů T.: „ZKM 2022-275 - Měření parametrů turbogenerátoru TG5 PVE Čierny Váh, Výsledky měření“, Litostroj Engineering a.s. Prosinec 2022.
- [5] Ševčík P., Bischof R.: „Měření parametrů turbogenerátorů TG4 a TG5 PVE Čierny Váh“, technická zpráva TZ 2453/3000, OSC, a.s., 03/2025.