

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

---

Fakulta stavební  
Katedra hydrotechniky



Diplomová práce

**Měření a vyhodnocení charakteristiky Peltonovy turbíny**

**Measurement and evaluation of characteristic of Pelton turbine.**

Vedoucí práce: Dr. Ing. Petr Nowak

**květen 2018**

**Bc. Petr BARBORKA**

---





ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Thákurova 7, 166 29 Praha 6

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

### I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Barborka Jméno: Petr Osobní číslo: 410774

Zadávací katedra: Katedra hydrotechniky

Studijní program: magisterský

Studijní obor: Stavební inženýrství

### II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: Měření a vyhodnocení charakteristiky Peltonovy turbíny

Název diplomové práce anglicky: Measurement and evaluation of characteristic of Pelton turbine

Pokyny pro vypracování:

Provedení rešerše - předchozí práce studentů, norma; kompletní soupis snímačů fyzikálních veličin; rozbor chyby měření; úprava programového vybavení řídicího a měřicího systému se zápisem dat do databáze v prostředí Control Web; zpracování naměřených dat v prostředí MatLab; změření charakteristiky Peltonovy turbíny s vlivem polohy paprsku vzhledem k lopatce OK; porovnání charakteristik a zhodnocení

Seznam doporučené literatury:

norma EN 60193

předchozí bakalářské a diplomové práce

zprávy NTNU

Hydraulic Modelling - an Introduction - Pavel Novák

Jméno vedoucího diplomové práce: Dr. Petr Nowak

Datum zadání diplomové práce: 19.2.2018

Termín odevzdání diplomové práce: 20.5.2018

Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku

Podpis vedoucího práce

Podpis vedoucího katedry

### III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

*Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutné uvést v diplomové práci a při citování postupovat v souladu s metodickou příručkou ČVUT „Jak psát vysokoškolské závěrečné práce“ a metodickým pokynem ČVUT „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací“.*

19.2.2018

Datum převzetí zadání

Podpis studenta(ky)



### **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem ČVUT 1/2009 „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací“.

.....  
Místo zpracování, celé datum

.....  
podpis

### **Poděkování**

Na tomto místě bych rád poděkoval všem, kteří mi poskytli potřebné podklady nutné pro vypracování této diplomové práce. Zvláště pak děkuji Dr. Ing. Petru Nowakovi za odborné vedení a cenné rady při zpracování. Dále děkuji firmě Mavel a.s. za asistenci při úpravě měřicí linky Peltonovy turbíny.

**Klíčová slova**

Peltonova turbína, tryska, lopatka

**Key words**

pelton turbine, jet, bucket

**Abstrakt**

V rámci této diplomové práce jsem změřil a vyhodnotil charakteristiku Peltonovy turbíny pro sedm různých poloh vodního paprsku vůči ose OK (oběžného kola). Před zahájením měření došlo k úpravám softwarového vybavení měřícího a řídicího programu Control Web. Změřená data byla vyhodnocena v programech Excel 2013, Matlab 2014 a photoshopu GIMP 2. V závěru práce byla stanovena nejistota měřených veličin.

**Abstract**

This thesis deals with the measurement and evaluation of the Pelton turbine characteristics for seven different water jet positions depending on the turbine axis. The software program Control Web was modified before the measurements started. The measured data were evaluated using the programs Excel 2013, Matlab 2014 and GIMP 2. At the end of this thesis an uncertainty of measured values were defined.

## Obsah

1	ÚVOD.....	- 8 -
2	ROZCESTNÍK PŘEDCHÁZEJÍCÍCH PRACÍ .....	- 9 -
2.1	Turbinový stend pro modelový výzkum r. 2009 [2] .....	- 9 -
2.2	Metodika měření a sestavení účinnostních charakteristik Peltonovy turbíny r. 2015 [3] - 9 -	
2.3	Metodika měření a vývoj aplikace pro ovládání turbinového stendu r. 2015 [4].- 9 -	
2.4	Fyzikální model Peltonovy turbíny [5].....	- 10 -
3	TEORETICKÝ ROZHLED .....	- 11 -
3.1	Přeměny energie.....	- 11 -
3.2	Předání energie paprskem lopatce .....	- 13 -
3.3	Hustota, tíhové zrychlení a ostatní veličiny podle ČSN EN 60193 .....	- 16 -
4	MĚŘÍCÍ LINKA .....	- 18 -
4.1	Seznámení s měřicí linkou.....	- 18 -
4.2	Čerpadla.....	- 18 -
4.3	Potrubí .....	- 19 -
4.4	Řízená brzda a frekvenční měnič rekuperace.....	- 19 -
4.5	Oběžné kolo a tryska.....	- 19 -
4.6	Tryska a její charakteristika .....	- 20 -
4.7	Soupis snímačů.....	- 22 -
5	PRŮBĚH MĚŘENÍ .....	- 25 -
5.1	Sledované veličiny .....	- 25 -
5.2	Zápis měřených dat .....	- 25 -
5.3	Pracovní bod.....	- 26 -
5.4	Charakteristika turbíny.....	- 27 -
5.5	Poloha paprsku vůči lopatce .....	- 28 -
5.6	Vertikální posun paprsku .....	- 30 -
5.7	Úprava řídicího a měřicího nástroje - Control Web.....	- 32 -
5.8	Zjištění závady během měření .....	- 35 -
6	CHARAKTERISTIKA PELTONOVY TURBÍNY .....	- 39 -
6.1	Předpoklady hodnocení.....	- 39 -
6.2	Maximální dosažená účinnost (BEP) .....	- 41 -
6.3	Účinnostní charakteristika.....	- 44 -
6.4	Momentová charakteristika.....	- 51 -
6.5	Ostřík jako charakteristika .....	- 52 -
6.6	Stanovení nejistoty měření dle normy ČSN EN 60193 .....	- 57 -
7	ZÁVĚR.....	- 63 -
8	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ .....	- 65 -
9	SEZNAM GRAFŮ .....	- 67 -
10	SEZNAM TABULEK .....	- 67 -
11	SEZNAM OBRÁZKŮ .....	- 67 -
12	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK.....	- 68 -



13 SEZNAM PŘÍLOH..... - 69 -

# 1 ÚVOD

V první kapitole této práce získá čtenář přehled o již vykonaných pracích na měřící lince Peltonovy turbíny ve vodohospodářské laboratoři Fakulty stavební na škole ČVUT v Praze. Při této a navazujících pracích je vhodné mít v podvědomí práce předešlé. Na jednu stranu nám pomohou chápat historické souvislosti a na druhou stranu nabízejí cenné informace.

Teoretická část této práce seznámí čtenáře s přeměnami energií na měřící lince, výpočtem předané energie paprskem turbíně a stanovením hodnot fyzikálních veličin jako jsou hustota, kinematická viskozita a tíhové zrychlení podle normy ČSN EN 60193.

V navazující kapitole je stručně popsána měřící linka včetně výčtu parametrů snímačů a zařízení. Výrobní štítky, kalibrační protokoly, produktové listy a další technické podklady jsou v příloze této práce.

Před zahájením měření došlo k úpravám softwarového vybavení měřícího a řídicího programu Control Web. Vytvořené programové inovace a následný průběh měření charakteristiky Peltonovy turbíny pro 7 různých poloh paprsku jsou v práci zdokumentovány.

Každá změna polohy paprsku obnáší mechanickou přestavbu zkušební linky. Součástí této práce je i soupis potřebného nářadí a popis postupu přestavby zkušební linky. Během měření byly zjištěny i některé závady na zkušební lince.

Na popis měření navazuje vyhodnocení měřených dat a stanovení charakteristiky Peltonovy turbíny pro všechny polohy paprsku. Charakteristika turbíny byla rozčleněna do 3 různých charakteristik. Účinnostní, momentová a ostříková charakteristika.

V koncové části této práce je pak posouzena nejistota měření jednotlivých veličin podílejících se na sestavení charakteristiky Peltonovy turbíny. Dále je popsán vliv průměrování surových dat ze snímačů. Ověřen byl i soulad snímaných dat ze dvou shodných snímačů tlaku v souladu s normou ČSN EN 60193.

## 2 ROZCESTNÍK PŘEDCHÁZEJÍCÍCH PRACÍ

Model Peltonovy turbíny ve vodohospodářské laboratoři má již letitou historii, během které se zkušební linka zdokonalovala, přestavovala a měnilo se softwarové vybavení Control Webu.

Na úpravách i návrhu zkušebny se podílelo několik studentů i zaměstnanců školy.

Při této a navazujících pracích je vhodné mít v podvědomí práce předešlé. Na jednu stranu nám pomohou chápat historické souvislosti a na druhou stranu nabízejí cenné informace. V této kapitole je shrnut obsah předešlých prací.

Výtažek obsahu jednotlivých prací poslouží jako rozcestník k jednodušší orientaci v předešlých publikacích. Ty jsou všechny dostupné na <https://dspace.cvut.cz/>. [1]

### 2.1 Turbínový stend pro modelový výzkum r. 2009 [2]

- *Metodika účinnostního měření*
- *Návrh koncepce turbínového stendu*
- *Posouzení stávajícího čerpadla*

### 2.2 Metodika měření a sestavení účinnostních charakteristik Peltonovy turbíny r. 2015 [3]

- *Peltonova turbína (rešerše)*
- *Metodika měření*
- *Charakteristika turbíny*

### 2.3 Metodika měření a vývoj aplikace pro ovládání turbínového stendu r. 2015 [4]

- *Metodika měření na Peltonově turbíně*
- *Uspořádání modelového stendu*
- *Vývoj ovládací aplikace*

## **2.4 Fyzikální model Peltonovy turbíny [5]**

- *Popis modelu*
- *Popis aplikace*
- *Kontrolní měření*

### 3 TEORETICKÝ ROZHLED

Peltonova turbína je druh rovnotlaké turbíny poháněné volným paprskem, který je přiváděn skrz trysku či více trysek na lopatky oběžného kola (OK). Ve volném paprsku se jedná převážně o nestacionární proudění. Při dopadání paprsku vzniká na lopatce tříprvková oblast, ve které spolupůsobí paprsek vody přiváděný na lopatku, proudění po ploše lopatky a voda odražená od lopatek turbíny. Numerické simulace podobných prostředí zatím lze simulovat jen s omezenou přesností. Proto je stále nezbytné stavět zkušební turbínové linky, jednak k přímému vyhodnocení dat, tak i k referenčním měřením za účelem vytvoření databáze dat k validaci numerických modelů.

#### 3.1 Přeměny energie

Než dojde k předání energie vody lopatce, je energie akumulována v různých energetických výškách.

Energie vody v potrubí spočívá zejména v tlakové výšce. Ta je dána vztahem:

$$Hp = \frac{p}{\rho * g} \quad (3.1)$$

- $Hp$  – tlaková výška [m v.sl.]
- $p$  – tlak v [Pa]
- $\rho$  – hustota vody [ $\text{kg m}^{-3}$ ]

Voda přiváděná potrubím má kromě tlakové výšky i méně výraznou rychlostní výšku. Průřezovou rychlost vody proudící potrubím lze stanovit dle rovnice:

$$v = \frac{Q}{S} \quad (3.2)$$

- $v$  – průřezová rychlost proudění v potrubí [ $\text{m s}^{-1}$ ]
- $Q$  – průtok potrubím [ $\text{m}^3\text{s}^{-1}$ ]
- $S$  – průtočná plocha [ $\text{m}^2$ ]

Při průchodu vody tryskou, dojde k tlakovému skoku. Volný paprsek už ztrácí tlakovou výšku, ta je přeměněna na výšku rychlostní. Teoretická výtoková rychlost paprsku je dána vztahem:

$$v = \sqrt{2gH} \quad (3.3)$$

- $v$  – teoretická výtoková rychlost [ $\text{m s}^{-1}$ ]
- $g$  – tíhové zrychlení [ $\text{ms}^{-2}$ ]
- $H$  – čistý spád [ $\text{m v.sl.}$ ]

Když známe rychlost vody, jsme schopni dopočítat rychlostní energetickou výšku. Pro vodu proudící potrubím i pro volný paprsek se stanoví rychlostní výška shodným vztahem:

$$Hv = \frac{v^2}{2g} \quad (3.4)$$

- $Hv$  – rychlostní energetický výška [ $\text{m v.sl.}$ ]
- $v$  – rychlost proudící vody [ $\text{m s}^{-1}$ ]
- $g$  – tíhové zrychlení [ $\text{ms}^{-2}$ ]

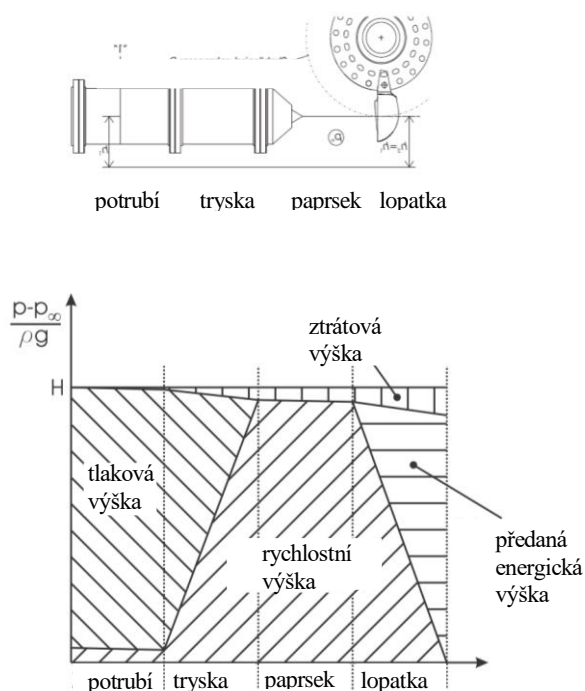
Aby byly přeměny energie kompletní, je nezbytné zmínit ztráty, které okruh přeměn energie uzavírají. Jedná se o místní ztráty (3.5) a ztráty třením (3.6).

$$Zm = \xi * \frac{v^2}{2g} \quad (3.5)$$

- $Zm$  – ztráta místní [ $\text{m v.sl.}$ ]
- $\xi$  – součinitel místní ztráty [-]
- $g$  – tíhové zrychlení [ $\text{ms}^{-2}$ ]
- $v$  – rychlost proudění [ $\text{m s}^{-1}$ ]

$$Zt = \frac{\lambda * L}{D} * \frac{v^2}{2g} \quad (3.6)$$

- $Zt$  – ztráta třením [ $\text{m v.sl.}$ ]
- $\lambda$  – součinitel ztráty tření [-]
- $g$  – tíhové zrychlení [ $\text{ms}^{-2}$ ]
- $v$  – rychlost proudění [ $\text{m s}^{-1}$ ]
- $L$  – délka protékaného potrubí [ $\text{m}$ ]
- $D$  – průměr protékaného potrubí [ $\text{m}$ ]

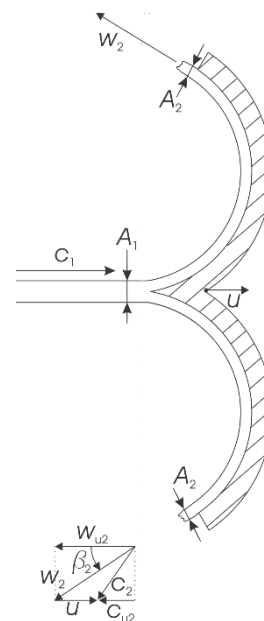


Graf 3.1 Přeměna energie u Peltonovy turbíny [6]

### 3.2 Předání energie paprskem lopatce

Při výpočtu předané energie paprskem lopatce se uplatní impulsová věta pro zjednodušené stacionární 2D prostředí Obr 3.1.

Paprsek zasahuje lopatku s relativní rychlostí  $w_1 = c_1 - u$ . Vycházíme z toho, že lopatka se pohybuje rovnoměrným pohybem a je splněna průtoková podmínka  $Q_1 = c_1 \cdot A_1$ ,  $Q_2 = w_2 \cdot A_2$ ,  $Q_1 = 2Q_2$ . K zachování ztrát na trysce a lopatce jsou zavedeny faktory  $k_c$  a  $k_w$ , pro které platí následující rovnosti (3.7) a (3.8). Význam jednotlivých zkratk je patrný z obrázku Obr. 3.1 Zjednodušené 2D prostředí. [6]



Obr 3.1 Zjednodušené 2D prostředí

$$k_c = \frac{c_1}{\sqrt{2gH}} \quad (3.7)$$

- $g$  – tíhové zrychlení [ $\text{ms}^{-2}$ ]
- $H$  – čistý spád [m v.sl.]

$$kw = \frac{w_2}{w_1} \quad (3.8)$$

$$ku = \frac{u}{c_1} \quad (3.9)$$

Výstupní rychlost vody z lopatky:

$$c_{u2} = w^2 \cos \beta_2 - u \quad (3.10)$$

Síla působící na lopatku se vypočte jako:

$$\begin{aligned} (-F) &= - \int_A \rho \vec{c} * (\vec{c} * \vec{n}) dA \\ &= -\rho A_1 c_1^2 + 2\rho A_2 c_2 (-c_{u2}) \end{aligned} \quad (3.11)$$

Platí-li  $A_1 c_1 = 2A_2 c_2 = Q$  a při využití vztahů (3.7) – (3.10) získáme sílu působící na lopatku.

$$F = \rho Q \sqrt{2gH} * k_c * (1 - k_u) * (1 + kw \cos \beta_2) \quad (3.12)$$

Kroutící moment na hřídeli a účinnost jsou pak dány vztahy:

$$M = \frac{1}{2} \rho Q \sqrt{2gH} D k_c (1 - k_u) (1 + kw \cos \beta_2) \quad (3.13)$$

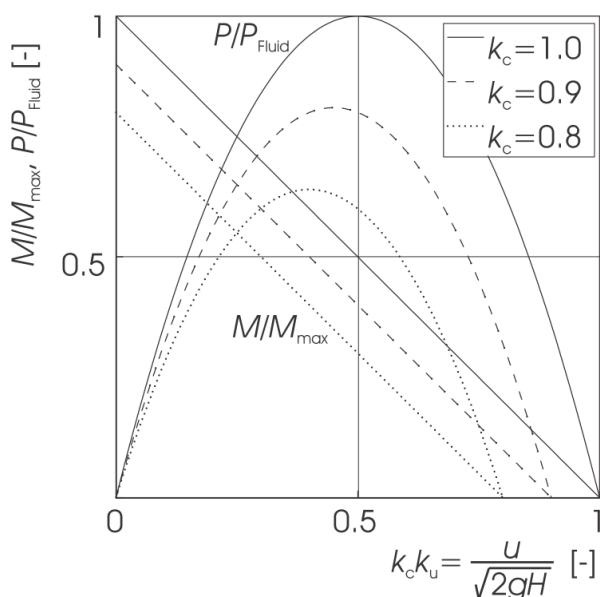
$$P = 2\rho g Q H k_c^2 k_u (1 - k_u) (1 + kw \cos \beta_2) \quad (3.14)$$

Maximální dosažený moment bude dosažen na stojící lopatce. Tomu odpovídají vztahy  $M_{\max} = \rho Q \sqrt{2gH} D$  a výkon kapaliny  $P_{\max.} = \rho g Q H$ . Při uvažování ztrát získáváme následující vztahy:

$$\frac{M}{M_{\max}} = \frac{1}{2} k_c (1 - k_u) (1 + k w \cos \beta_2) \quad (3.15)$$

$$\frac{P}{P_{\max}} = 2k_c^2 k_u (1 - k_u) (1 + kw \cos \beta_2) \quad (3.16)$$





Graf 3.2 Vývoj momentu respektive výkonu v závislosti na faktoru  $k_c$  při  $k_w=1$  [6]

Graf. 3.1 zobrazuje průběh výkonu a momentu pro faktor  $k_w = 1$  a rozdílnou hodnotu faktoru  $k_c$ . Je zřejmé, že zvýšené ztráty na trysce sníží výkon a optimum se posune ve směru nižších otáček. Hledáním maxima rovnice (3.14) dojdeme k hodnotě  $k_u = 0.5$ . Dosazením  $k_c$  do rovnice (3.12) je určena poloha optima.

$$(k_u k_c)_{opt} = 0.5k_c \quad (3.17)$$

Tímto může být stanovena hodnota pro optimální jednotkové otáčky.

$$n_{1opt}' = \frac{30\sqrt{2g}}{\pi} k_c \approx 42.3 k_c \quad (3.18)$$

V běžných výpočtech lze podle GIESECKE/MOSONYI [5] uvažovat hodnoty  $k_c = 0.96 \dots 0.99$ . Při malých otevřeních trysky můžou hodnoty  $k_c$  klesnou na ještě nižší hodnoty. Zmiňované  $k_c$  hodnoty jsou optimální hodnoty. V případě skutečného turbínového provozu vznikají reálné efekty, které polohu optimálních otáček ovlivňují. Například při malém otevření trysky se zmenšuje výtokový úhel  $\beta_2$  a může docházet ke kontaktu vytékající vody z jedné lopatky s další lopatkou v pořadí.

### 3.3 Hustota, tíhové zrychlení a ostatní veličiny podle ČSN EN 60193

Pro výpočet přesné charakteristiky turbíny je vhodné přesnější stanovení tíhového zrychlení  $g$ , hustoty vody  $\rho$ .

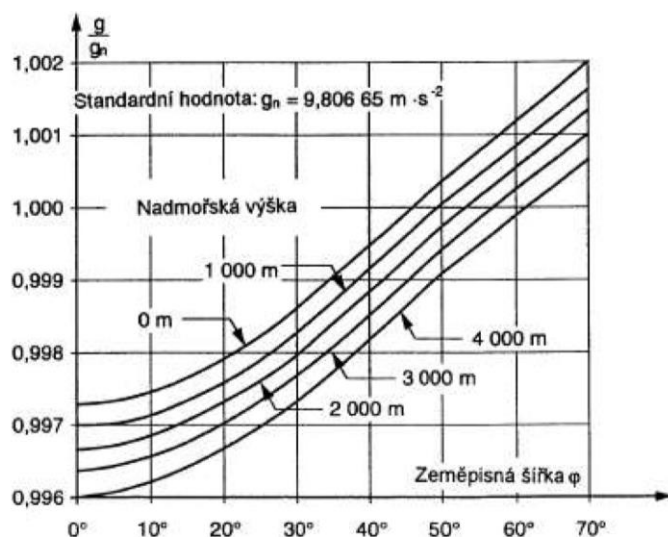
Tíhové zrychlení lze změřit pomocí kyvadla nebo volného pádu (ve vákuu). Hodnota nebyla změřená, lze ji tedy alespoň zpřesnit na základě geografické polohy laboratoře v Praze. Poloha je  $50^{\circ}6'17''$  zeměpisné šířky a 217 m nadmořské výšky. Tomu odpovídá tíhové zrychlení dle následujícího vztahu. [6]

$$g = 9.7803 * (1 + 0.0053 * \sin^2(\varphi)) - 3 * 10^{-6} * z \quad (3.19)$$

$$g = 9.8102 \text{ ms}^{-2}$$

- $\varphi$  - zeměpisná šířka [ $^{\circ}$ ]
- $z$  - nadmořská výška [m n.m.]

Po dosazení do zmiňované rovnice z normy ČSN EN 60193 vychází hodnota tíhového zrychlení  $9.8102 \text{ ms}^{-2}$ . Tato hodnota byla uvažována při výpočtu charakteristiky Peltonovy turbíny. Standardní hodnota tíhového zrychlení je  $9.80665 \text{ ms}^{-2}$ .



Graf 3.3 Zpřesnění tíhového zrychlení dle normy ČSN EN 60193

Hustota a viskozita vody se budou během měření měnit. Očekávají se nevýrazné změny z důvodu ohřevu vody v uzavřeném okruhu. V případě výrazné změny teploty došlo k upravení hodnot hustoty a viskozity dle tabulek.

Protože se laboratoř nachází v podzemních prostorách pod vodohospodářskou laboratoří, teplota vody je v rezervoáru po celý rok téměř konstantní. Střední teplota vody je 10°C. Z tabulek teplotní závislosti vody jsou odečteny hodnoty pro hustotu 999.701 kgm<sup>-3</sup> a kinematickou viskozitu 1.307\*10<sup>6</sup> m<sup>2</sup>s<sup>-1</sup> při 10°C. [7]

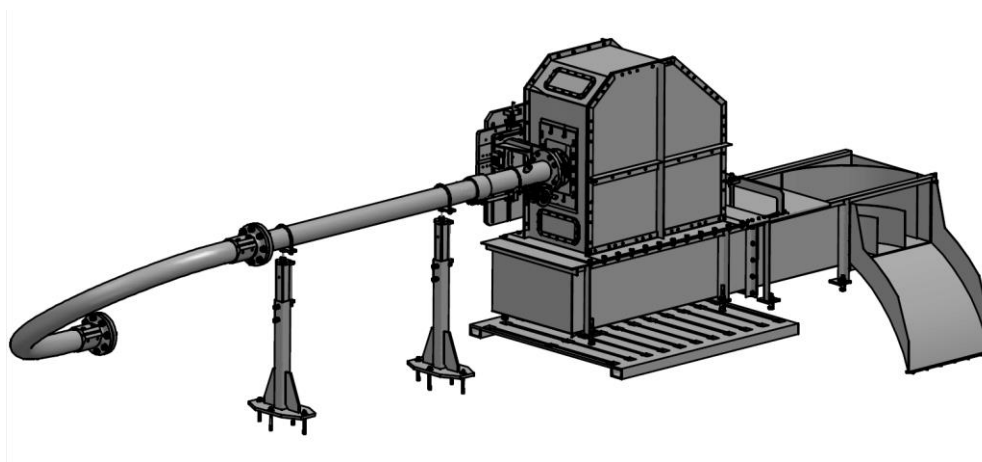
Mezi proměnné veličiny, které by bylo možné sledovat, můžeme zařadit i další. Avšak není tak učiněno buď z důvodu přístrojové vybavenosti měřící linky, nebo z důvodu zanedbatelného či žádného vlivu na výsledek měření. Mezi další veličiny patří např. tlak nasycených par, obsah zárodečných jader ve vodě (neviditelné vzduchové nebo plynové bubliny o poloměru menším než 50 mm), hodnota atmosférického tlaku, hustota suchého vzduchu a hustota rtuti.

## 4 MĚŘÍCÍ LINKA

### 4.1 Seznámení s měřicí linkou

Zkušební linka se nachází v prostorách Fakulty stavební univerzity ČVUT V Praze. Trubní linka se skládá ze sacího koše, dvou čerpadel, trubních armatur, uzávěrů, vysokotlaké hadice, konstrukčních prvků (stojany, ocelová základová deska), odpadního žlabu, ocelo-skleněné měřicí skříň, oběžného kola, rekuperační brzdy s horizontální hřídelí, frekvenčních měničů, převodníků, měřících čidel, aj.

Podrobný popis zkušební linky ve vodohospodářské laboratoři není náplní této práce. Detailním popisem se zabírají práce zmíněné v kapitole č. 2. Rozcestník předcházejících prací. Zde je pouze zmíněn základní popis.



Obr 4.1 Přívodní potrubí, měřicí skříň, odpadní žlab [13]

### 4.2 Čerpadla

„Oběžná kola čerpadel ve zkušebně jsou poháněna dvěma třífázovými asynchronními elektromotory od značky SIEMENS. Řada výrobků je označována jako 1LA9. Kódové číslo motoru je 1LA9206-2WA66-ZX66. Nízkonapětové elektromotory se zvýšeným výkonem čerpají ze sítě napětí 400/690V o frekvenci 50 Hz. Jsou schopné vyvinout výkon 30 kW při otáčkách 2950 za minutu. Jeden stroj váží 192 kg. Třída účinnosti obou stojů je IE2, tedy 92%.

Spouštění a řízení asynchronního motoru je ve zkušebně prováděno pomocí polovodičových měničů, které mění kmitočet napájecího napětí a tak mění rychlosti otáčení rotoru.

Otáčky motorů jsou zadávány v aplikaci Control Web, která komunikuje s frekvenčními měniči. Komunikace je realizována přes standardní sběrnici CAN do programu na počítači. “ [4]

### 4.3 Potrubí

Potrubí je litinové o vnějším průměru 108 mm a o tloušťce stěny 4 mm. Spoje na potrubí jsou přírubové. Změna směru přívodního potrubí o 180° je umožněna vysokotlakou hadicí. Potrubí je v prostoru před tryskou rozpojitelné a zajištěné pružnou spojkou, rozpojením potrubí je umožněna pohodlná manipulace s polohou trysky.

### 4.4 Řízená brzda a frekvenční měnič rekuperace

„Pro zpětné generování byl na zkušebním standu osazen asynchronní servomotor MDFQARS 160-32.31 od firmy Lenze. Je to elektromotor v rekuperačním módu s třífázovým vinutím statoru. Při zapojení generátoru do hvězdy dosahuje výkon 32.6 kW. Dokáže pojmout jmenovitý krouticí moment 433 Nm při jmenovitých otáčkách 498 za minutu. Získáme elektrickou energii s vlastnostmi: jmenovitá frekvence 18 Hz, jmenovité napájecí napětí 360 V a jmenovitý proud 51.5 A.

Z důvodu chlazení byl generátor osazen ventilátorem. Odvádění tepla je řízeno rekuperační jednotkou, která je od firmy Lenze, typ 9300.

Abychom mohli vrátit energii do veřejné elektrorozvodné sítě, musí se její hodnoty transformovat ve frekvenčním měniči, které jsou také od firmy Lenze typ 9340, zpět na frekvenci 50 Hz a napětí 230 V a 16 A.“ [4]

### 4.5 Oběžné kolo a tryska

Pro účely této práce firma Mavel a.s. nainstalovala ve zkušebně OK s 19 lopatkami. Průměr OK je 320 mm. Kolo bylo ustaveno do optimální pozice vůči paprsku, jak ve vertikálním tak i horizontálním směru.

Vertikální umístění je ověřeno šuplerou viz kapitola 5.6.2 Dosažení optima. Horizontální ustavení OK vůči paprsku pak laserovým ukazovátkem přimontovaným na ústí trysky.

Odborně způsobilý zaměstnanec firmy ověřil kolmost osy paprsku na osu hřídele rekuperační brzdy, na které je osazeno OK. Osy jsou kolmé s přesností na setinu stupně.

průměr OK .....320 mm

počet lopatek ..... 19 ks  
 průměr trysky ..... 35 mm  
 maximální zdvih ..... 30.25 mm

## 4.6 Tryska a její charakteristika

Byly změřeny různé polohy trysky a tomu odpovídající průtoky za daného tlaku. Vyhodnocením měření byla stanovena tzv. charakteristika trysky. V následující tabulce je vyhodnoceno 11 změřených poloh otevření trysky.

Interpolací v této tabulce je možné stanovit nutné vysunutí jehly v mm v závislosti na požadovaném průtoku za určitého spádu.

Jako univerzální parametry pro popis trysky byly zvoleny relativní posun, jednotkový průtok a průtokový součinitel  $k_v$ .

**Relativní posun [%]** – udává hodnotu otevření trysky vztaženou k průměru ústí (35 mm).

$$\text{Rel. posun [\%]} = \frac{\text{posun [mm]}}{\text{průměr ústí [mm]}} * 100 \quad [4.1]$$

**Jednotkový průtok [ $\text{m}^{1/2}\text{s}^{-1}$ ]** – je v tomto případě průtok vztažený na spád a průměr ústí.

$$Q_{11} [\text{m}^{1/2}\text{s}^{-1}] = \frac{\text{průtok } \left[\frac{\text{m}^3}{\text{s}}\right]}{\text{průměr ústí}^2 [\text{m}] * H [\text{m}]} \quad [4.2]$$

- H – čistý spád [m v.sl.]

**Průtokový součinitel  $k_v$  [-]** - je bezrozměrný parametr udávající poměr mezi teoretickým a skutečným výtokem dýzou.

Mezi jednotkovým průtokem a  $k_v$ -číslem je konstantní poměr  $\sqrt{g} \frac{\pi}{2\sqrt{2}}$  tj. číselně přibližně 3.48.

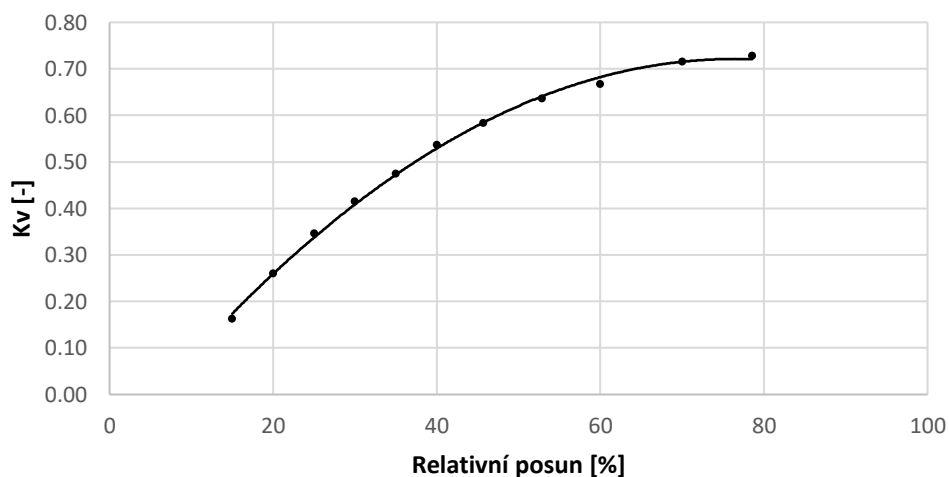
$$k_v (-) = \frac{\text{průtok } \left[\frac{\text{m}^3}{\text{s}}\right]}{\sqrt{2gH} \left(\frac{\text{m}}{\text{s}}\right) * S [\text{m}^2]} \quad [4.3]$$

- S – průtočná plocha ústí [ $\text{m}^2$ ]
- H – spád [m v.sl.]
- g – tíhové zrychlení [ $\text{ms}^{-2}$ ]

Tabulka 4.1 Charakteristika trysky

měření charakteristiky trysky							
č. měření	jehla trysky			H [m]	Q [l/s]	Q <sub>11</sub> [m <sup>1/2</sup> s <sup>-1</sup> ]	Kv [-]
	čtení [mm]	posun [mm]	relativní posun [%]				
1	8.00	5.25	15	60.00	5.4	563.9	0.16
2	9.75	7.00	20	60.87	8.7	905.1	0.26
3	11.50	8.75	25	60.07	11.4	1204.8	0.35
4	13.25	10.50	30	59.77	13.7	1441.3	0.41
5	15.00	12.25	35	59.42	15.6	1648.9	0.47
6	16.75	14.00	40	60.62	17.8	1867.3	0.54
7	18.75	16.00	46	60.80	19.4	2031.0	0.58
8	21.25	18.50	53	60.60	21.1	2212.6	0.64
9	23.75	21.00	60	61.27	22.3	2321.5	0.67
10	27.25	24.50	70	62.10	24.0	2486.2	0.71
11	30.25	27.50	79	61.30	24.3	2533.6	0.73

Charakteristika trysky



Graf 4.1 Charakteristika trysky

Maximální otevření trysky je 30.25 mm. Jehlu lze zasunout ještě více, avšak průtok už zůstává téměř stejný. Lze tedy konstatovat, že pro daný průměr ústí lze jehlu trysky dostatečně zasunout.

## 4.7 Soupis snímačů

### 4.7.1 Průtokoměrný snímač

„Na modelu Peltonovy turbíny ve vodohospodářské laboratoři je osazen magneticko-indukční průtokoměr s kapacitními elektrodami a keramickou výstelkou. Měřič se skládá z budících cívek a elektricky izolované trubice.

Elektricky vodivá kapalina proudí elektricky izolovanou trubicí v magnetickém poli, které je vytvářeno párem budících cívek napájených elektrickým proudem. Pohybem kapaliny v magnetickém poli je generováno napětí  $U$ .

Napěťový signál  $U$  je snímán elektrodami a je přímo úměrný střední rychlosti proudění a tedy i průtoku  $Q$ . Převodník signálu pak tento napěťový signál zesílí, filtruje a převede na signály pro načítání, záznam a výstupy.“ [8]

Výrobce.....	Krohne CZ spol. s.r.o.
Označení přístroje .....	OPTIFLUX 2300, DN 100 mm / 4 inch
Princip .....	magnetická indukce
Rozsah.....	+4 .....+ 20 mA, 0.....70.0 l/s (zpřesněno 0....30 l/s)
Přesnost dle výrobce .....	0.20% FSO (Full Scale Output – rozsah čidla)
Výrobní štítek .....	příloha této práce č. A.1.1. výrobní štítek
Technický list.....	příloha této práce č. A1.2. technický list
Kalibrační protokol.....	příloha této práce č. A1.3. kalibrační protokol
Návod k obsluze.....	příloha této práce č. A1.4. návod k obsluze

### 4.7.2 Tlakoměrná čidla

„Na modelu Peltonovy turbíny ve vodohospodářské laboratoři jsou dva snímače tlaku s polovodičovým tenzometrem. Základními součástkami tlakoměru s difundovaným polovodičovým tenzometrem jsou kruhová membrána z nerezové oceli a měřická buňka.

Membrána, sevřená ve válcovém pouzdře, je rovnoměrně namáhána tlakem. Tloušťka membrány je většinou okolo 5 mm. Působením tlaku se membrána deformuje v oblasti pružných deformací.

Při její deformaci vzniká napětí na povrchových vláknech membrány, která se měří tenzometricky. Při deformaci membrány se mění elektrický odpor vyvozovaný na



tenzometrech. Tyto změny v odporu zaznamenává měřická buňka a převádí tak aktuální tlak na elektrický signál.“ [9]

Výrobce.....	BD Sensors
Označení přístroje .....	DMP 331i
Princip .....	tenzometr
Rozsah.....	+4 .....+ 20 mA, 0.....0-17 bar
Přesnost dle výrobce .....	0.2% FSO (Full Scale Output – rozsah čidla)
Výrobní štítek .....	příloha této práce č. A.2.1. výrobní štítek
Produktový list.....	příloha této práce č. A.2.2. produktový list

#### 4.7.3 Senzor kroučícího momentu

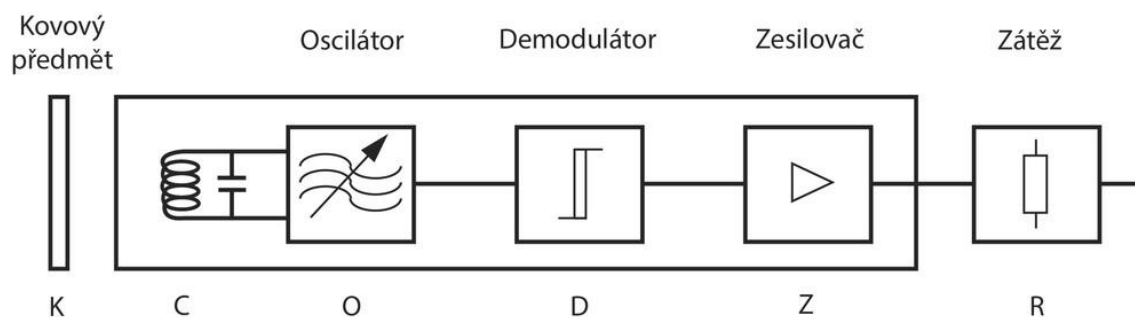
„Na modelu na Fakultě stavební ČVUT bylo pro měření kroučícího momentu použito tenzometrického dynamometru. Torzní deformace hřídele je snímána tenzometrem, následně je signál zesílen a upraven elektronickou jednotkou, která je umístěna na rotující části snímače. Statická část snímače zajišťuje napájení elektroniky na části rotační a dále zajišťuje přenos signálu měřeného momentu a jeho další úpravu do standardního napěťového výstupu.“ [3]

Výrobce.....	Lorenz Messtechnik GmbH
Označení přístroje .....	Dr-2531
Princip .....	tenzometrický pásek
Rozsah.....	0 ..... $\pm 5V$ , 200 a 2000 Nm
Střední přesnost.....	0.29 % FSO pro 200 Nm
.....	0.31 % FSO pro 2000Nm
Výrobní štítek .....	příloha této práce č. A.3.1. výrobní štítek
Kalibrační list.....	příloha této práce č. A.3.2. kalibrační list
Zkušební certifikát .....	příloha této práce č. A.3.3. zkušební certifikát
Technický list.....	příloha této práce č. A.3.4. technický list

#### 4.7.4 Snímač otáček

„Aktivním prvkem indukčního snímače je cívka navinutá na feritovém jádru (polovina feritového hrníčku). Střídavý proud generovaný oscilátorem protéká cívkou a vytváří v jejím okolí magnetické pole. Jestliže umístíme do tohoto pole předmět z elektricky vodivého

materiálu, jsou v něm indukovány vířivé proudy. Změna pole vlivem vířivých proudů působí zpětně na cívku tak, že změní její impedanci. Tato změna je vyhodnocena elektronikou senzoru a po následném zesílení převedena na výstupní signál.“ [10]



Obr 4.2 Indukční snímač [10]

Princip.....indukční

Snímaný prvek .....pulzy na cívku

Technický list.....příloha této práce č. A.4.1. technický list

## 5 PRŮBĚH MĚŘENÍ

### 5.1 Sledované veličiny

Před započítím samotného měření je nezbytné zvolení vhodných veličin k měření. Sledované veličiny budou měřeny snímači zmíněnými v kapitole 4.7 Soupis snímačů. Na jednotlivé snímače jsou kladeny požadavky na přesnost. Nejistota snímaných dat je vyhodnocena v závěrečné části práce.

Měřené veličiny k sestavení charakteristiky Peltonovy turbíny:

- Tlak [Pa]
- Průtok [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]
- Moment [Nm]
- Otáčky [ot/min]

Další sledované veličiny:

- Poloha regulační jehly trysky [mm]
- Teplota vody ve zkušebním okruhu [ $^{\circ}\text{C}$ ]

### 5.2 Zápis měřených dat

Snímané veličiny momentu, průtoku, obou tlaků a otáček byly digitalizovány pomocí modulu AI3 s osmi diferenciálními 14-ti bitovými DA převodníky. Modul byl osazen do jednotky DataLabIO s komunikací pomocí USB rozhraní.

V počítači jsou hodnoty následně v prostředí Control Web přepočteny, vyhodnocovány a zobrazovány. Program Control Web zároveň slouží i jako řídicí jednotka pro celé soustrojí.

Po dosažení požadovaného pracovního bodu (tj. určitého spádu, průtoku a otáček turbíny) je možné spustit zapisování měřených dat. Program umožňuje zápis ve formátech .mdb nebo .xls.

Změřená data byla přepočtena na jednotkové veličiny. K přepočtu byly užity následující vztahy:

Jednotkový průtok  $Q_{11}$  [l/s]:

$$Q_{11} = \frac{Q}{D^2 * \sqrt{H}} \quad (5.1)$$

- Q – průtok [l/s]

- D – průměr OK [m]
- H – čistý spád [m v.sl]

Jednotkové otáčky  $n_{11}$  [ot/min]

$$n_{11} = \frac{n * D}{\sqrt{H}} \quad (5.2)$$

- n – otáčky [ot/min]
- D – průměr OK [m]
- H – čistý spád [m v.sl]

Jednotkový moment  $M_{11}$  [Nm]

$$M_{11} = \frac{M}{D^3 * H} \quad (5.3)$$

- M – moment na hřídeli [Nm]
- D – průměr OK [m]
- H – čistý spád [m v.sl.]

### 5.3 Pracovní bod

Pracovní bod turbíny je charakterizován otáčkami, tlakem a průtokem pro dané ustavení soustrojí. Měřený pracovní bod je průměrován přes předem specifikovaný časový úsek. Zprůměrováním je dosaženo zpřesnění měření na jednotlivých čidlech, které vykazují určitou míru rozkolísanosti pro teoreticky statický pracovní bod. Na této rozkolísanosti se podílejí nedokonalosti snímačů, nehomogenita proudění vody, nestálost provozu čerpadel, vůle na trysce apod.

Pro účely této práce byl zvolen časový úsek 90 sekund, během kterého čidla sledovala daný pracovní bod. Výsledná hodnota byla průměrována přes 900 měřených hodnot. To odpovídá periodicitě čtení čidel 0.1s. Podle normy ČSN EN 60193 dojde průměrováním ke snížení náhodné chyby, neboť náhodná chyba střední hodnoty z n nezávislých měření je  $n^{-1/2}$  krát menší než náhodná chyba jednotlivého měření. Pro 900 měření je náhodná chyba redukována 30 krát.

Minutu a půl dlouhý záznam z čidel byl v CW zprůměrován a zapsán. Zvolená doba je dostatečně dlouhá, aby pokryla rozkolísanost záznamu z čidel, nehomogenity proudění a jiné neznámé faktory. Výsledná hodnota je brána jako reprezentativní.

Samozřejmě kromě výsledných zprůměrovaných hodnot jsou zapsány i průběžně sledované hodnoty, umožňující zpětnou kontrolu průběhu měření.

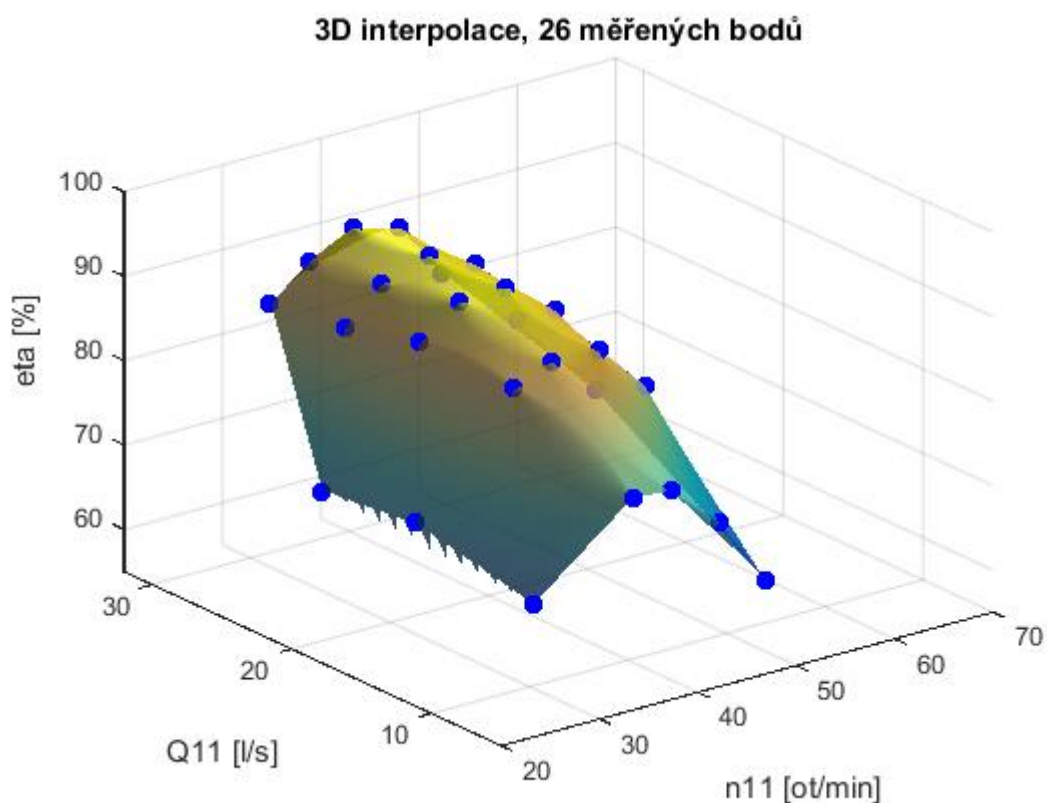
## **5.4 Charakteristika turbíny**

Za komplexní charakteristiku turbíny považujeme hustou síť nekonečně blízko vzdálených pracovních bodů, ve kterých je stanovena účinnost soustrojí. Protože, sestavit takto hustou síť by bylo časově náročné až nemožné, je přistoupeno k vytvoření reprezentativní sítě s dostatečným počtem měřených bodů v předem zvoleném rastru. Hustota volených bodů se odvíjí od inženýrského odhadu v závislosti na sledovaném jevu.

Účinnost turbíny je poměrem mezi mechanickým výkonem na rotující hřídeli mezi turbínou a brzdou a příkonem daným mechanickou energií vody, která je podrobně rozepsána v kapitole 3.1. Přeměny energie.

Pro měření charakteristiky Peltonovy turbíny byl zvolen rastr s 26 pracovními body. Každý pracovní bod byl měřen minimálně dvakrát, aby se předešlo náhodným chybám nebo chybám měření. V případě, že se druhé měření od prvního výrazně odchylovalo, bylo provedeno další měření, které ověřilo správnost jednoho z předchozích měření. Dvě shodující se měření byla zprůměrována a byla stanovena účinnost v daném pracovním bodě.

Pro síť 26 reprezentativních pracovních bodů byly interpolovány hladké 3D plochy v programu Matlab, které slouží jako podklad pro další numerické a grafické vyhodnocení charakteristiky turbíny.

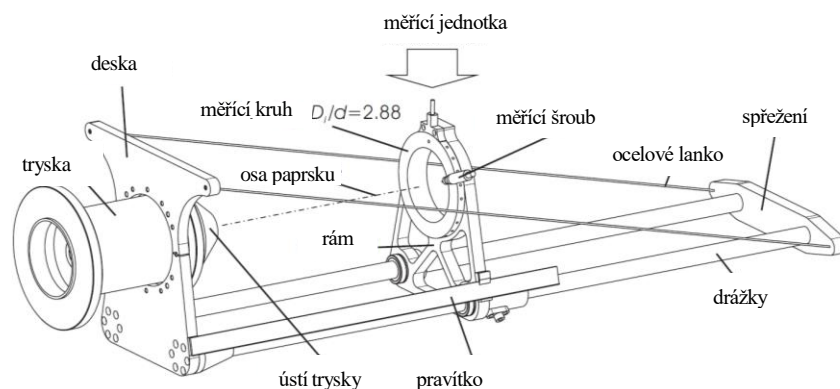


Graf 5.1 3D interpolace měřených dat

## 5.5 Poloha paprsku vůči lopatce

### 5.5.1 Paprsek

Při vyhodnocení účinnosti OK Peltonovy turbíny vstupuje do hry i energická ztráta na trysce, a tedy i homogenita paprsku vycházejícího z trysky. Právě vlastnostem paprsku přiváděného na lopatku je věnována doktorandská práce Svena Riemanna z Mnichova z roku 2009. [11]

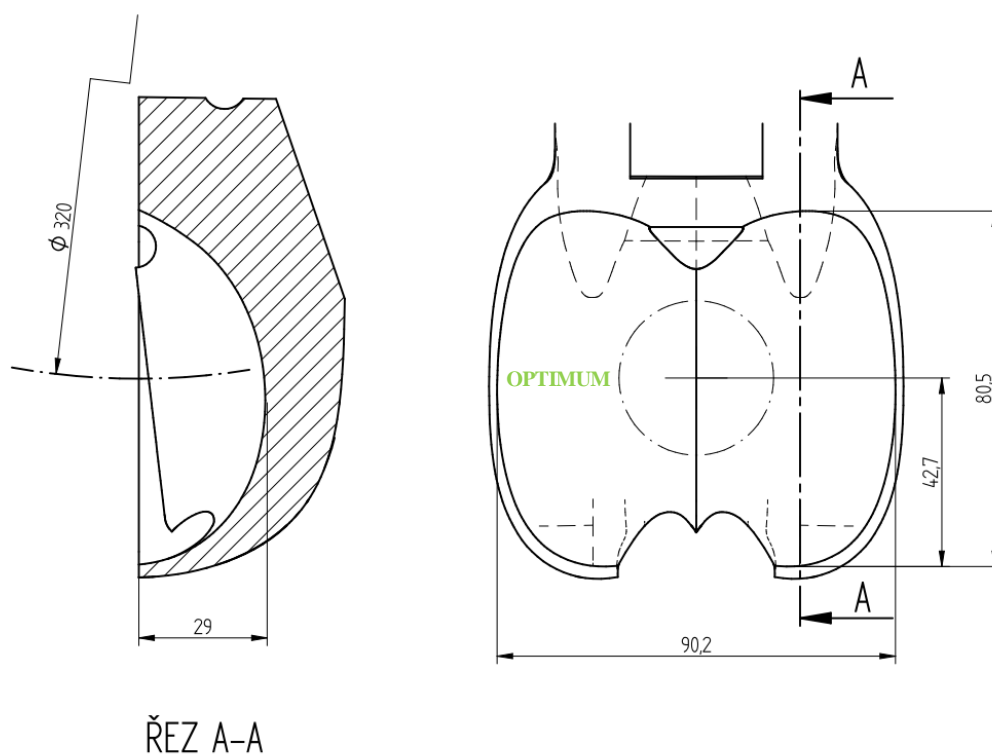


Obr. 5.1 Zkušební linka užita při vyhodnocení homogenity paprsku v Mnichově 2009 [11]

### 5.5.2 Lopatka

Charakteristika Peltonovy turbíny záleží na několika aspektech. Mezi tyto aspekty patří zejména geometrický návrh lopatek turbíny a dodržení navržené geometrie při výrobě.

Pro lopatku OK Peltonovy turbíny je při návrhu stanovena optimální poloha dopadu paprsku na lopatku (tzv. optimum). Teoreticky dojde-li k ustavení paprsku do optimální polohy k ose OK dle návrhu konstruktéra, měla by turbína pracovat s maximální účinností.



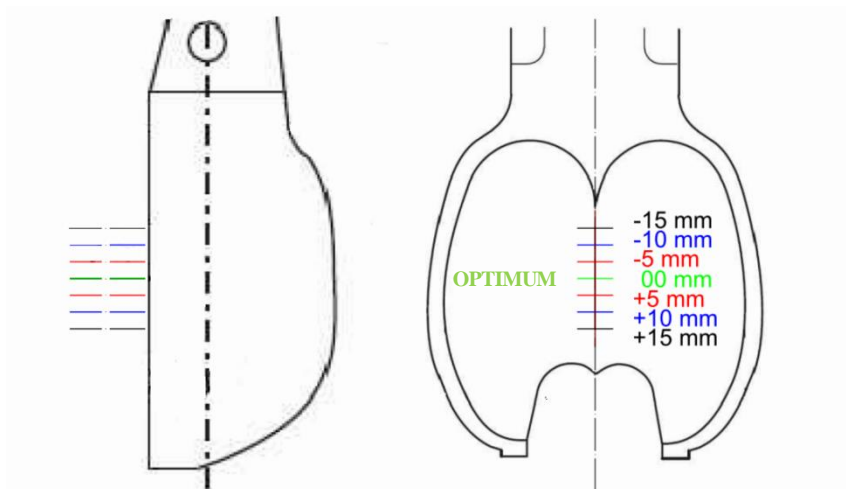
Obr 5.2 Výkres lopatky Peltonovy turbíny ve vodohospodářské laboratoři [13]

### 5.5.3 Vzájemná poloha paprsku vůči lopatce

O tom, zda je konstruktérem stanovené optimum pro dopad paprsku opravdu správné, pojednává kapitola 6.1.3. Vliv změny polohy paprsku na účinnost. Během měření došlo k přestavbě měřicí linky do 7 různých poloh paprsku. Pro každou polohu byla změřena kompletní sada 26 pracovních bodů.

Ekvidistantní vzdálenost mezi měřenými polohami paprsku byla zvolena 5 mm. Optimální návrhová poloha je značena jako 00 mm (optimum). Další zkoumané polohy ve vertikálním směru jsou označeny -5 mm, -10 mm a -15 mm pro zdvih osy paprsku blíže k ose OK a +5 mm,

+10 mm a +15 mm pro pokles osy paprsku dále od osy OK. Posun paprsku vůči ose OK je zřejmý z následujícího zobrazení.



Obr 5.3 Porovnávané polohy paprsku

## 5.6 Vertikální posun paprsku

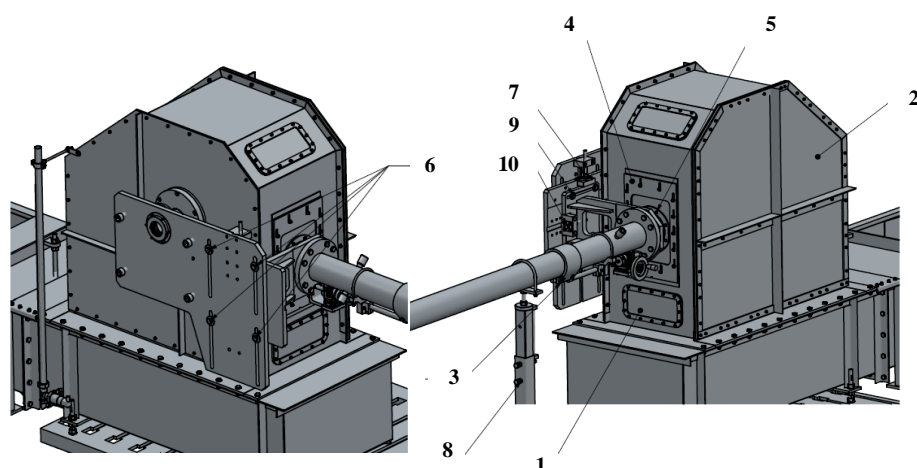
### 5.6.1 Přestavba

K přestavbě polohy paprsku je zapotřebí speciální nářadí. Pro dokončení kompletní přestavby jsou nezbytné následující kusy nářadí:

- Otevřené klíče vel. 10, 13, 14, 17, 19, 22
- Vodováha
- Posuvné měřítko
- Inbusový klíč 6 mm
- Silikonový olej

Na následujících obrázcích je zobrazena měřicí skříň Peltonovy turbíny. Pod obrázkem je popsán postup přestavby polohy paprsku ve vertikálním směru. Číselné poznámky na obrázcích doprovázejí popis přestavby.





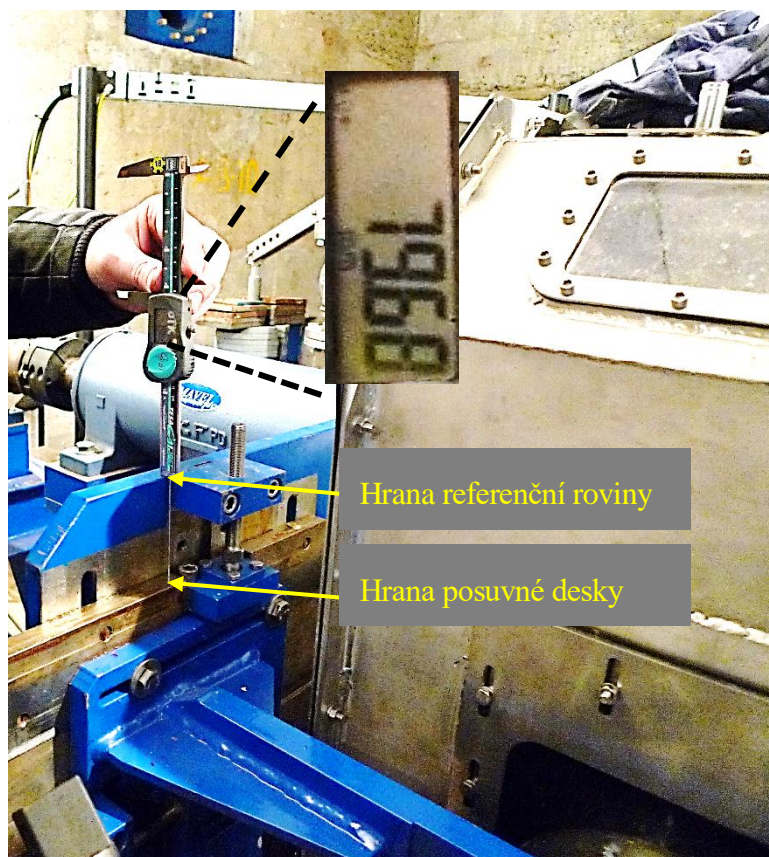
Obr 5.4 Posun paprsku - vertikální směr [13]

1. Odpojit celé zařízení z elektrické sítě v hlavním rozvaděči
2. Doporučená demontáž krytů POZ 1 s 2
3. Demontovat spojku potrubí POZ 3
4. Povolit (případně demontovat šrouby víka) POZ 4 pro přesun v rozmezí drážek v desce
5. V případě většího přestavení ve vertikálním směru demontovat šrouby POZ 5
6. Přetočit těsnící gumu a krycí plech o 180° (v případě nutnosti většího rozsahu)
7. Uvolnit lehce šrouby POZ 6
8. Otáčením šroubů POZ 7 přestavit dýzu do požadované polohy
9. Odměřit polohu a přepočítat vzdálenost dle rozměrů
10. Utáhnout šrouby POZ 6
11. Nasadit kryt a gumové těsnění POZ 4 - gumu lehce potřísnit silikonovým olejem
12. Utáhnout šrouby POZ 4 a POZ 5
13. Vyrovnat potrubí pod spojkou pomocí konzol POZ 8
14. Utáhnout spojkou POZ 3
15. Namontovat víka POZ 1 a POZ 2, v případě předchozí demontáže
16. Před uvedením do provozu optická a mechanická kontrola linky - protočení OK [13]

### 5.6.2 Dosažení optima – poloha paprsku 00 mm

Poloha paprsku v optimu odpovídá poloměru OK 160 mm. Posun paprsku se přesto neodměřuje od osy OK, ale od pevné desky, která slouží jako referenční rovina. Následně se měří vzdálenost posuvné desky pevně spřažené s tryskou na konzoli.

Vertikální vzdálenost hran těchto dvou desek je pro optimum 79.68 mm. Celkem bylo měřeno 7 poloh paprsku. 3 polohy nad optimum a 3 pod optimum v ekvidistančních vzdálenostech 5 mm. Vzdálenosti od referenční roviny byly 84.68 mm, 89.68 mm a 94.68 mm pro polohy měřené pod optimum a 4 mm, 69.68 mm a 64.68 mm pro polohy měřené nad optimum.

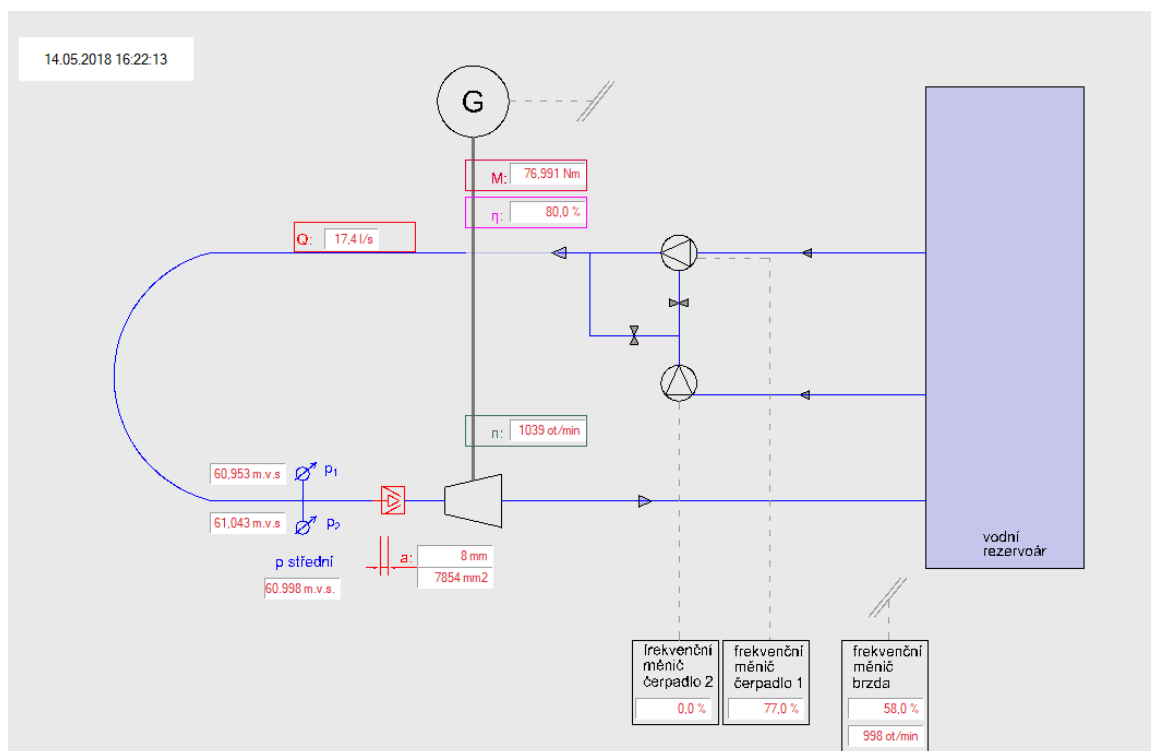


Obr 5.5 Měření polohy paprsku od referenční hrany

## 5.7 Úprava řídicího a měřicího nástroje - Control Web

### 5.7.1 schematizace měřicí linky

K vytvoření nového schéma měřicí linky v aplikaci Control Web došlo za účelem zpřehlednění. Nové schéma odpovídá koncepčnímu rozložení zařízení ve vodohospodářské laboratoři. Objekty jako čerpadla, vodní rezervoár, frekvenční měniče čerpadel a brzdy byly umístěny stejně jako ve zkušebně na pravou stranu. Naopak ve střední a levé části jsou nově tlakoměry, průtokoměr, brzda a turbína. Zároveň bylo užito grafických značek.



Obr 5.6 Nové schéma měřicí linky – Control Web

### 5.7.2 Nastavení řídicího panelu pro druhé čerpadlo

Aplikace pro řízení trubní linky byla vybavena panelem pro ovládání dvou čerpadel. Ty mohou pracovat jak v paralelním tak i v sériovém zapojení. Panel pro druhé čerpadlo se sice zobrazoval, avšak nebyl naprogramován a byl tedy neaktivní.

Panel pro ovládání druhého čerpadla se skládá ze tří tlačítek - start a stop tlačítek a tlačítka pro zadání požadovaných otáček čerpadla v rozsahu 0-100%.

- **Tlačítko orbit 1a – start**

```

procedure OnOutput( Output : boolean );
begin
    if o2 = true then;
        Menic_cerpadlo_2 :=00;
        obit1.SetValue(false);
        obit1.Enable();
        elsif o1 = false then;
    else end;
end_procedure;

```

- **Tlačítko orbit 1 – stop**

```

procedure OnOutput( Output : boolean );
begin
    if o2 = true then;

```

```

Menic_cerpadlo_2 :=0;
o2 = false;
control_2a.Update();
obit1a.SetValue(false);
obit2a.Enable();
obit1a.Enable();
elsif o2 = false then;
o2 = true;
control_2a.Update();
obit1a.SetValue(true);
obit1.Disable();
obit1a.Enable();
obit2a.Disable();
obit2.Disable();
else end;
end_procedure;

```

- **Tlačítko control\_2a – požadované otáčky**

```

procedure OnActivate();
begin
    if Cerpadlo_2 = false then;
        control_2a.DisableInput();
    elsif Cerpadlo_2 = true then;
        control_2a.EnableInput();
    else end;
end_procedure;
procedure OnOutput( Output : real );
begin
    control_2a.Update();
end_procedure;

```

### 5.7.3 Stanovení fyzikálních veličin

Byly zpřesněny hodnoty fyzikálních veličin hustoty a tíhového zrychlení. Upravené hodnoty vstupují do výpočtu v Control Webu.

### 5.7.4 Restrukturalizace archivovaných dat

Původní verze Control Webu při spuštění zápisu shromažďovala veškerá změřená a vypočtená data do jednoho souboru. Restrukturalizací je míněno rozčlenění balíčku dat v databázi do 3 různých kategorií s různou periodicitou zápisu.

První kategorie shromažďuje „surová data“, to jsou všechna měřená data s periodou zápisu 0.1 s. Tedy pro zápis dat dlouhý 90 s je do databáze uloženo 900 záznamů.

Druhá kategorie jsou „vyhlazená data“, to jsou data z předchozí kategorie zprůměrovaná za časový úsek. Zápis zprůměrovaných dat proběhne po dokončení zápisu „surových dat“.

Třetí poslední kategorií jsou „parametry sestavy“, jedná se o data charakterizující stav měřící linky při daném měření. (otevření trysky, poloměr OK, aj.). Tato kategorie se zapisuje stejně jako kategorie „zprůměrovaná data“ po dokončení zápisu „surových dat“.

### **5.7.5 Zobrazení snímaných a zapisovaných hodnot**

V aplikaci již fungoval panel pro zobrazení základních snímaných veličin v tzv. live režimu. Jednalo se o graf zobrazující průtok, moment, tlak a otáčky s časovým krokem 1 sekunda. Graf sloužil pro přímou kontrolu snímaných veličin a ověření jejich ustálení po změně pracovního bodu.

Graf pracoval dobře, pouze absence legendy uživateli znesnadňovala orientaci v zobrazovaných veličinách. V rámci této práce byla legenda doplněna.

Následně byly doplněny dva šikovní grafy pro zobrazení zapisovaných dat. Grafy jednotkové otáčky vs. účinnost a jednotkové otáčky vs. moment.

### **5.7.6 Čtení z databáze .mdb**

Připojíme-li databázi formátu .mdb ke správci databází ODBC, je následně databáze čitelná v programu Matlab. V rámci práce byla funkčnost spojení ověřena a v Matlabu byl naprogramován přepočítání čtení ze snímačů na základní fyzikální veličiny.

## **5.8 Zjištěné závady během měření**

### **5.8.1 Netěsnosti**

Netěsnosti na měřící skříni by se daly rozdělit do dvou kategorií.

V první kategorii by byly průsaky kolem pryžových těsnění na měřící skříni. Jedná se o minoritní kontinuální průsaky. V druhé kategorii jsou průsaky nahodilé. Objevovala se různá místa kolem hřídele, kudy prosakovala voda pro některé pracovní body.

V poloze paprsku pro optimum se nahodilé průsaky téměř nevyskytovaly. K těm docházelo zejména při posunu paprsku dále od osy OK.



Obr 5.6 Průsaky kolem hřídele



Obr 5.7 Průsaky kolem hřídele 2

### 5.8.1 Koroze – bezodtoký prostor

Protože ve zkušební skříni Peltonovy turbíny budou vždy větší nebo menší netěsnosti, měl by být umožněn odtok prosáklé vody. Během rozsáhlého měření v rámci této práce vznikla v prostoru pod zkušební linkou kaluž o průměru 2 m. Podlaha je zřejmě nedostatečně vyspádovaná a voda stála pod linkou v mocnosti několika mm.

Prosáklá voda nemá šanci z podlahy odtéci, ocelové stojany v ní stojí do doby, než se voda vypaří. Protože v neoddělené místnosti je i vodní rezervoár, bude zřejmě vlhkost vzduchu výrazná a znesnadňuje odpar vody z podlahy.

Nepřízeň prostředí má za následek povrchovou korozi ocelových stojanů. Protože je chladná zkušebna většinu času bez osvětlení a nemá přístup denního světla, nevznikají na podlaze a stěnách plísně.

Jako vhodné řešení se nabízí vytvořit v betonové podlaze několik odvodňovacích žlábků svažitých zpět do rezervoáru.



Obr 5.7 Povrchová koroze, prosáklá voda

### 5.8.2 Riziko kavitace

Během měření za vyšších průtoků (kolem 30 l/s) byl pozorován výskyt vodní pěny pod odpadním žlabem. Usměrnující žebra v odpadním žlabu nestíhala proud vody rovnoměrně rozprostřít a vzniklo preferenční proudění středovou částí žlabu.

Toto preferenční proudění nedopadá na koncovou rozrážecí hranu odpadního žlabu, ale vysokou rychlostí proniká skrz hladinu. S sebou stahuje velké množství vzduchu. Během měření byla udržována hladina v rezervoáru na maximální kótě hladiny. Zřejmě i díky dostatečné hloubce nebyly pozorovány známky kavitace. Riziko kavitace by vzniklo při najetí druhého čerpadla, kdy by se průtok ještě zvýšil, nebo kdyby voda v rezervoáru nebyla pravidelně doplňována, hladina byla pod maximální kótou.

Přítok do vodního rezervoáru je roven cca 1.7 l/s. Lze tedy jednoduše odhadnout, na základě objemu chybějící vody, dobu nezbytnou pro dopuštění.



Obr 5.8 vodní pěna, preferenční proudění



## 6 CHARAKTERISTIKA PELTONOVY TURBÍNY

Pod názvem této kapitoly se skrývá vyhodnocení 7 různých charakteristik pro jediné oběžné kolo. Charakteristiky daného OK se budou lišit z důvodu posunu polohy paprsku vůči lopatce.

Před zahájením měření byly vyřčeny některé předpoklady, které mělo měření ověřit.

### 6.1 Předpoklady hodnocení

#### 6.1.1 Vliv změny polohy paprsku na jednotkové otáčky

Posunem paprsku jiné vertikální polohy dochází k umělé změně poloměru OK. Protože se jedná stále o téže OK, záměrně nedocházelo k úpravě poloměru OK ve výpočtech v aplikaci Control Web. Tomu by měla odpovídat i teoretická změna otáček pracovních bodů dle následujících vzorců pro jednotkové veličiny.

Základní průměr OK je 320 mm. Vliv na jednotkové otáčky posunem paprsku bude demonstrován na nejvzdálenější polohách, tzn. 15 mm pod a nad optimum. Rovnice (7.1) odpovídá teoretickému průměru OK 335 mm a rovnice (7.2) teoretickému průměru OK 305 mm.

$$n_{11} = \frac{n * D'}{\sqrt{H}} \quad (6.1)$$

$$\frac{D}{335} * n_{11} = \frac{n * 335}{\sqrt{H}} * \frac{D}{335}$$

$$0.955 * n_{11} = \frac{n * D}{\sqrt{H}}$$

$$n_{11} = \frac{n * D''}{\sqrt{H}} \quad (6.2)$$

$$\frac{D}{305} * n_{11} = \frac{n * 305}{\sqrt{H}} * \frac{D}{305}$$

$$1.049 * n_{11} = \frac{n * D}{\sqrt{H}}$$

- n – otáčky (ot/min)

- $n_{11}$  – jednotkové otáčky (ot/min)
- $D$  – průměr OK [m]
- $D'$  – teoretický průměr OK +15 mm [m]
- $D''$  – teoretický průměr OK -15 mm [m]
- $H$  – čistý spád [m v.sl.]

Jak je patrné, vliv polohy paprsku na jednotkové otáčky OK je nevýrazný, ale je dobré ho mít na podvědomí. Zjistili jsme tedy, že teoretickým zvětšením  $D_{ok}$  dojde ke zmenšení jednotkových otáček a naopak.

### 6.1.2 Vliv změny polohy paprsku na moment

Teorie mechaniky říká, že moment je přímo úměrný délce ramena, na kterém síla působí.

$$M = F * L \quad (6.3)$$

- $M$  – moment [Nm]
- $F$  – působící síla paprsku [N]
- $L$  – rameno síly [m]

Tedy lze předpokládat, že maximální dosažený moment na hřídeli bude v poloze  $D_{ok} + 15\text{mm}$ , kdy dojde ke zvětšení ramena síly. Avšak svoji roli sehrají i tvar lopatky, plocha dopadu paprsku a změna unášecí rychlosti. Ty mají vliv na velikost působící síly paprsku.

### 6.1.3 Vliv změny polohy paprsku na účinnost

Hydraulická účinnost turbíny je dána poměrem dodané energie vůči energii přejaté. Dodanou energii nazýváme příkon a energii přejatou výkon. Rozdíl mezi příkonem a výkonem jsou ztráty. Účinnost nazýváme  $\eta$ .

$$\eta = \frac{P'}{P} * 100 \% \quad (6.4)$$

- $P'$  – výkon [W]
- $P$  – příkon [W]
- $\eta$  – hydraulická účinnost [%]

Velikost příkonu je dána součtem tlakové a rychlostní energie vody. Během měření různých poloh paprsku byla dodávaná téměř shodná energie.

To však neplatí o výkonu. Ten je přímo úměrný součinu dvou proměnných veličin. Obvodová rychlost i moment se budou pro různé polohy parku měnit. Maximální výkon a tedy i účinnost budou zastiženy v poloze ideálního poměru hodnot momentu a obvodové rychlosti.

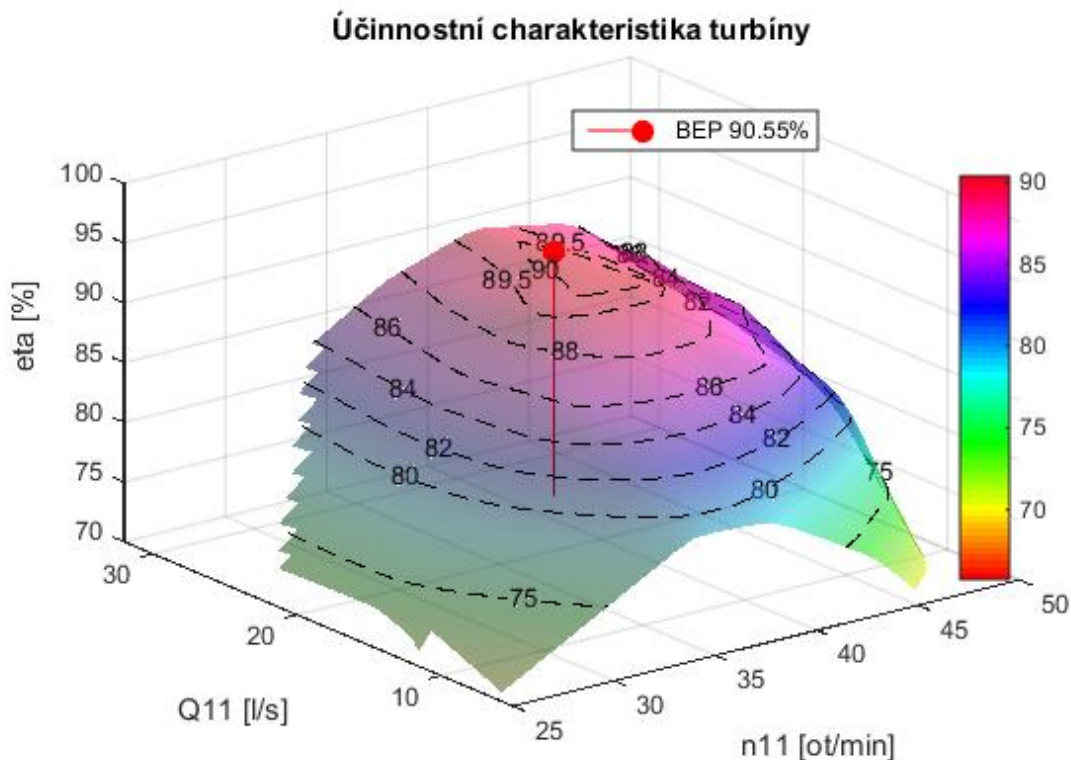
$$P' = \omega * M \quad (6.5)$$

- $P'$  – výkon [W]
- $\omega$  – obvodová rychlost [ $\text{rads}^{-1}$ ]
- $M$  – moment [Nm]

Zda pro různé polohy paprsku bude dosažena maximální účinnost v témže pracovním bodě a zda je maximální účinnost opravdu v poloze optima, jak udává konstruktér turbíny, bude vyšetřeno v následující kapitole.

## 6.2 Maximální dosažená účinnost (BEP)

Po kontrole naměřených dat jako první byla vyhodnocena účinnostní charakteristika Peltonovy turbíny v optimální poloze. Maximální hodnota účinnosti byla změřena 90.4% pro jednotkové otáčky 41.77 ot/min a jednotkový průtok 25.7 l/s. Tomuto bodu odpovídá poměr mezi unášecí a teoretickou výtokovou rychlostí cca 0.494.



Graf 6.1 Účinnostní charakteristika turbíny pro polohu paprsku v optimu

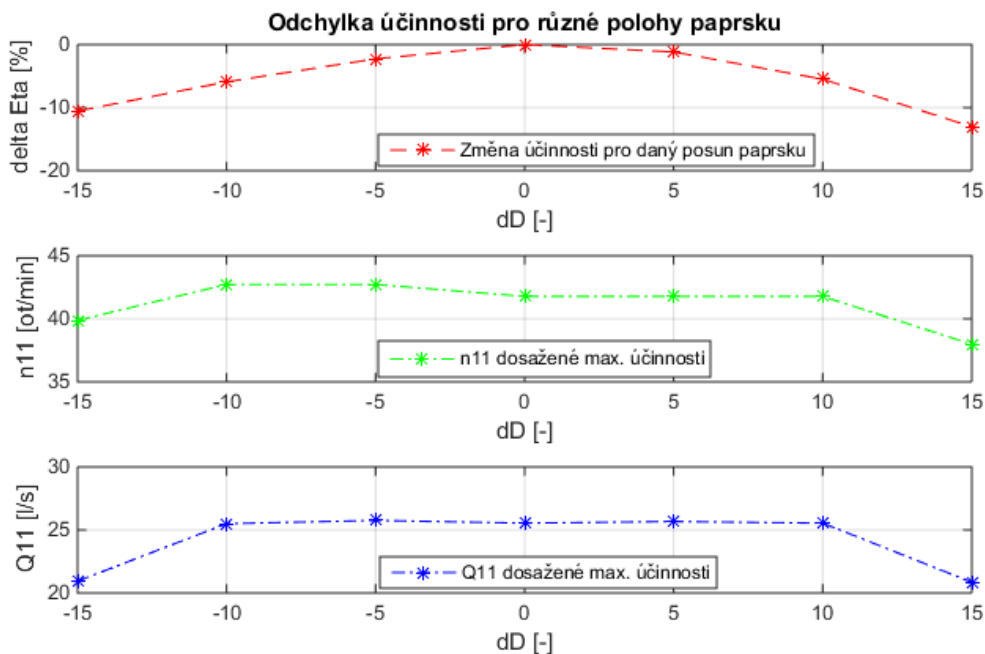
Při vertikálních posunech paprsku o  $\pm 5$  mm a  $\pm 10$  mm byla maximální účinnost (BEP) měření zastížena pro stejný  $Q_{11}$  a  $n_{11}$  jako pro optimum. Ovšem tvrzení, že se maximální účinnost pro danou polohu paprsku neposunula, nelze jednoznačně potvrdit, účinnostní plocha kolem maximální dosahované účinnosti je velmi plochá (v řádu několika jednotkových veličin dosahuje velmi vysokých hodnot).

Rastr měřených bodů by musel být několikanásobně hustší, aby mohla být přesněji sledována migrace maximální účinnosti. Zároveň by do hry vstupoval vysoký požadavek na celkovou chybu měření. Chyba měření se odvíjí od chyby jednotlivých měřících snímačů, stabilního chodu čerpadel. aj. Podrobněji je chyba měření popsána v kapitole 6.6 Stanovení nejistoty měření dle normy ČSN EN 60193. Měřící linka není se současným vybavením schopna citlivější posuny účinnosti změřit.

Plochá účinnostní charakteristika kolem maximální účinnosti je vhodná, protože daná turbína dokáže pracovat s minimálními ztrátami a to i v případě, že není z nějakého důvodu provozována v ideálním pracovním bodě.

Maximální dosažené účinnosti pro posun paprsku  $\pm 15$  mm byly zastiženy pro jednotkový průtok 20.8 l/s. Jednotkové otáčky byly v případě maxima pro posun paprsku Dok -15 mm 39.9 ot/min a v případě posunu Dok + 15 mm 38.0 ot/min.

Vyhodnocením měření všech sedmi poloh paprsku nebyl zjištěn BEP (pracovní bod o maximální účinnosti) s vyšší účinností, než pro polohu paprsku v optimu udaném konstruktérem zkoumané Peltonovy turbíny.



Graf 6.2 Porovnání BEPs pro různé polohy paprsku

Kromě ověření optimální polohy paprsku bylo zjištěno, že lopatka této turbíny velmi dobře reaguje na vychýlení polohy paprsku ve vertikálním směru do vzdálenosti 5 mm na obě strany od optima.

V případě posunu paprsku + 5mm, tzn. teoretickém zvětšení Dok, dojde ke zhoršení účinnosti o 1.1%. V případě posunu - 5mm, tzn. teoretickém zmenšení Dok, dojde ke zhoršení účinnosti o cca 2.0%. Lze tedy konstatovat, že turbína je náchylnější na ztrátu účinnosti v případě vychýlení paprsku blíže k ose OK.

Kompletní přehled BEPs pro jednotlivá měření je v následující tabulce.

Tab 6.1 Přehled BEPs

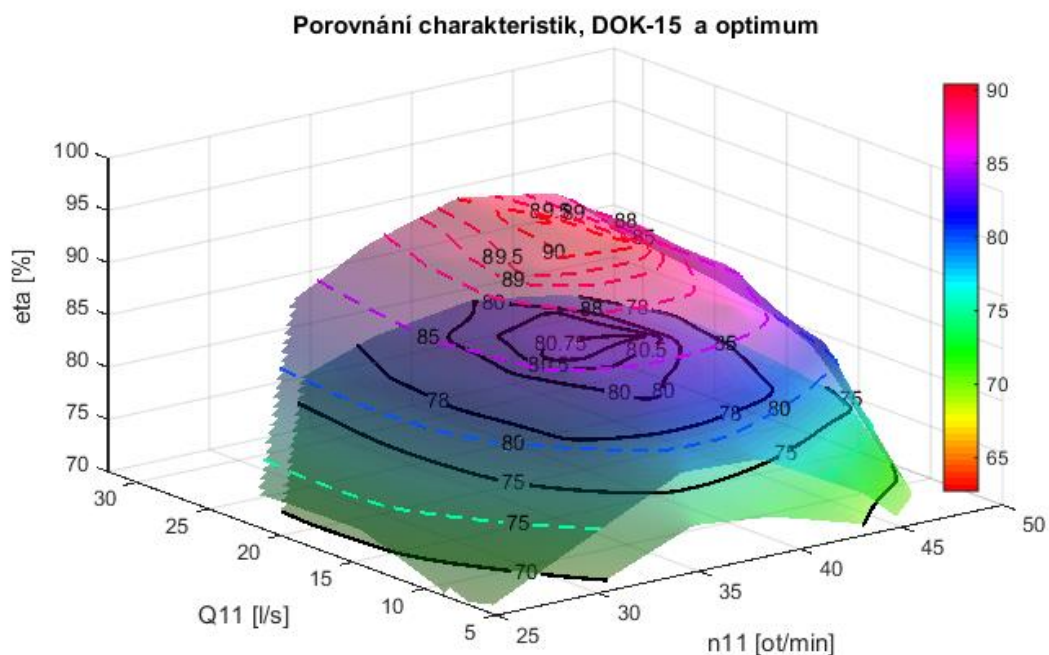
-	n11	Q11	Eta	$\Delta$ Eta
Dok	[ot/min]	[l/s]	[%]	[%]
-15	39.9	20.9	80.9	9.5
-10	42.7	25.5	85.0	5.3
-5	42.7	25.8	88.4	2.0
0	41.8	25.5	90.4	0.0
5	41.8	25.7	89.3	1.1
10	41.8	25.5	85.4	5.0
15	38.0	20.9	78.6	11.8

### 6.3 Účinnostní charakteristika

Tvar účinnostní charakteristiky Peltonovy turbíny budeme porovnávat vždy s tvarem charakteristiky pro optimální polohu paprsku. V textové části práce jsou nejčastěji porovnány výsledky měření pro polohy paprsku  $\pm 15$  mm s optimem (00 mm). Nejvzdálenější polohy byly zvoleny, protože na nich jsou nejlépe vidět souvislosti platicí i pro ostatní polohy paprsku.

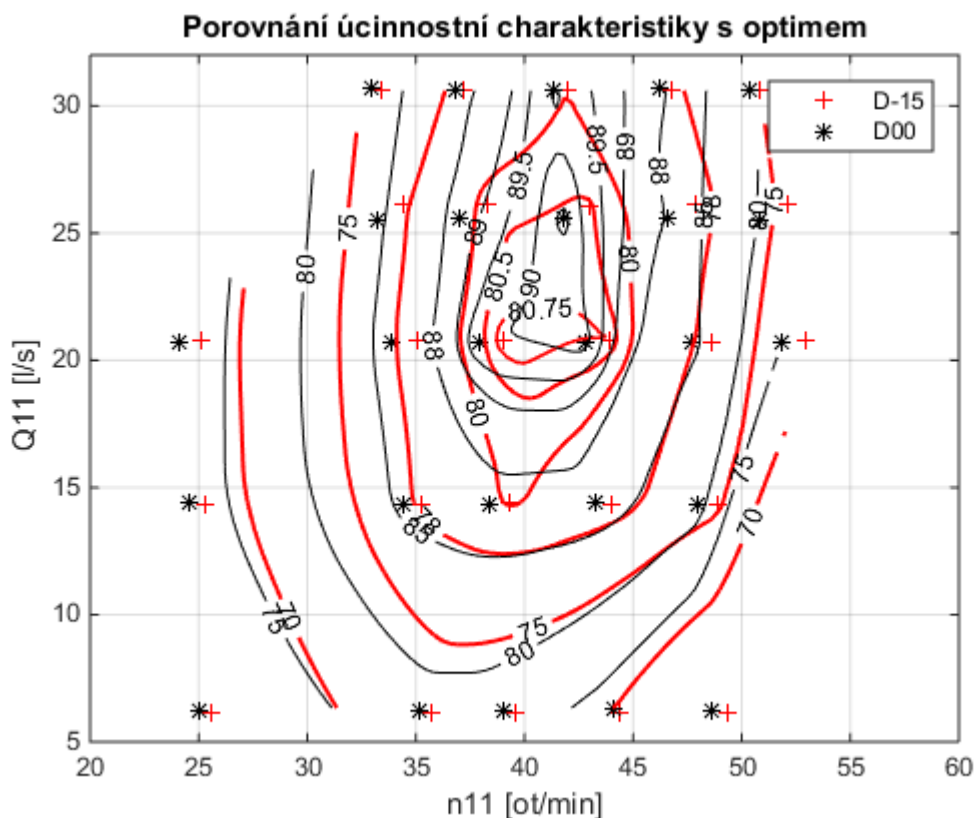
#### 6.3.1 Porovnání charakteristik pro Dok -15 mm a optima

Při pohledu na porovnání charakteristik pro polohu paprsku Dok -15 mm a v optimu, je patrné, že si jsou podobné. Dochází k nevýraznému naklonění účinnostního „kopce“ ve směru vyšších jednotkových otáček.



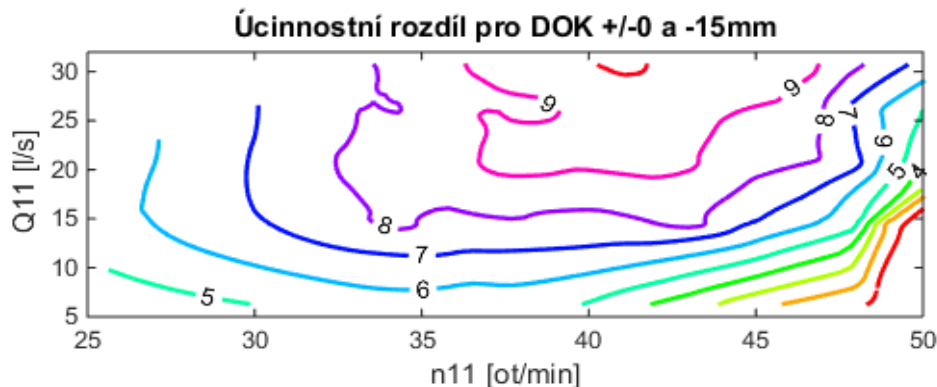
Graf 6.3 Porovnání charakteristik Dok -15 a optimum, posun účinnostního kopce

Téměř ortogonální pokles účinnosti s drobným posunem ve směru vyšších otáček je lépe vidět z vrstevnicového grafu.



Graf 6.4 Porovnání charakteristik Dok -15 a optima, vrstevnicový graf

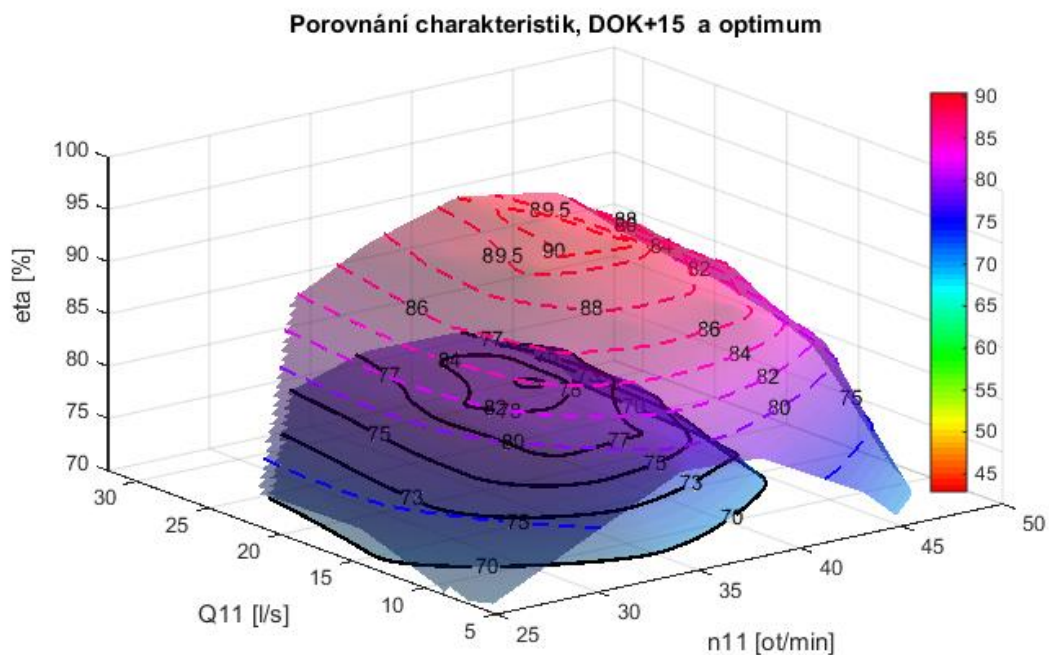
Abychom na první pohled viděli změnu účinnosti v závislosti na posunu paprsku, byl vytvořen graf s rozdílem účinnostních charakteristik turbíny pro polohy paprsku Dok -15 mm a optimum. Protože tvar rozdílových vrstevnic má kopcovitý charakter, můžeme si dovolit tvrdit, že ztráta účinnosti směrem k maximum vzrůstá. K největší ztrátě účinnosti o cca 10% došlo pro jednotkové otáčky 42 ot/min a jednotkový průtok 32 l/s.



Graf 6.5 Rozdíl účinnostních charakteristik Dok -15 a optimum

### 6.3.2 Porovnání charakteristik pro Dok +15 mm a optima

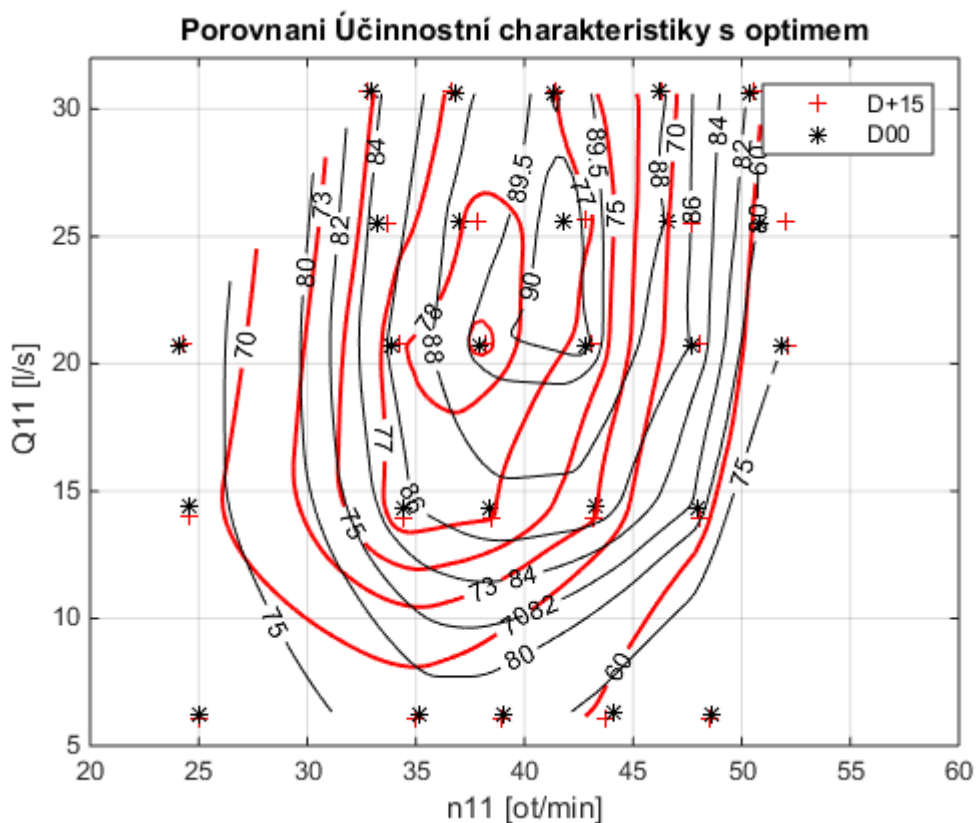
Při pohledu na charakteristiky pro polohy paprsku Dok +15 mm a optimum, je stejně jako v předešlém případě patrné, že si jsou podobné. Můžeme pozorovat posun BEP, který se posunul ve směru nižších jednotkových otáček a nižšího jednotkového průtoku.



Graf 6.6 Porovnání charakteristik - účinnostní kopce

Přesun účinnostní charakteristiky včetně BEP pro polohu paprsku Dok+15 mm jsou ještě lépe patrné z vrstevnicového grafu. Posun účinnostního kopce je mnohem výraznější než v případě polohy paprsku -15 mm.

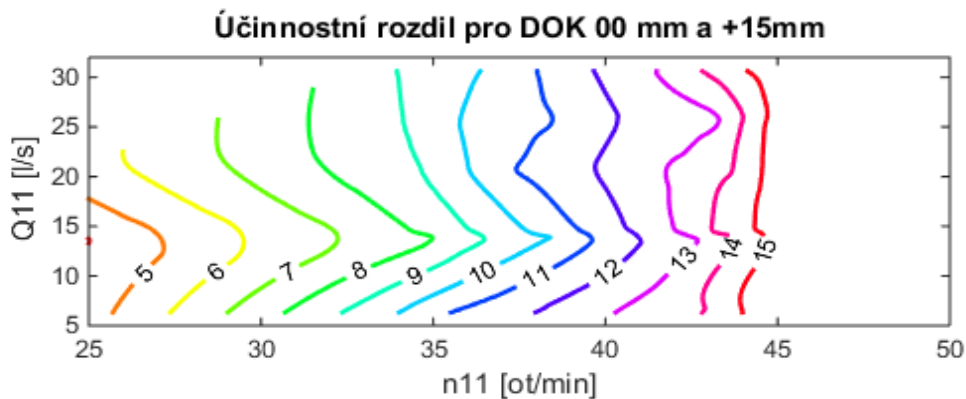




Graf 6.7 Porovnání charakteristik Dok -15 a optima, vrstevnicový graf

Abychom na první pohled viděli změnu účinnosti v závislosti na posunu paprsku byl vytvořen graf s rozdílem účinnostních charakteristik turbíny pro polohy paprsku Dok -15 mm a optimum.

Protože tvar rozdílových vrstevnic má spíš svahový než kopcový tvar, lze říci, že účinnostní pokles je rovnoměrný a odvíjí se od počtu jednotkových otáček, kdy s jejich nárůstem rostla i ztráta. K největší změřené ztrátě účinnosti o cca 15 % došlo pro jednotkové otáčky 44 ot/min a jednotkový průtok 14 l/s.

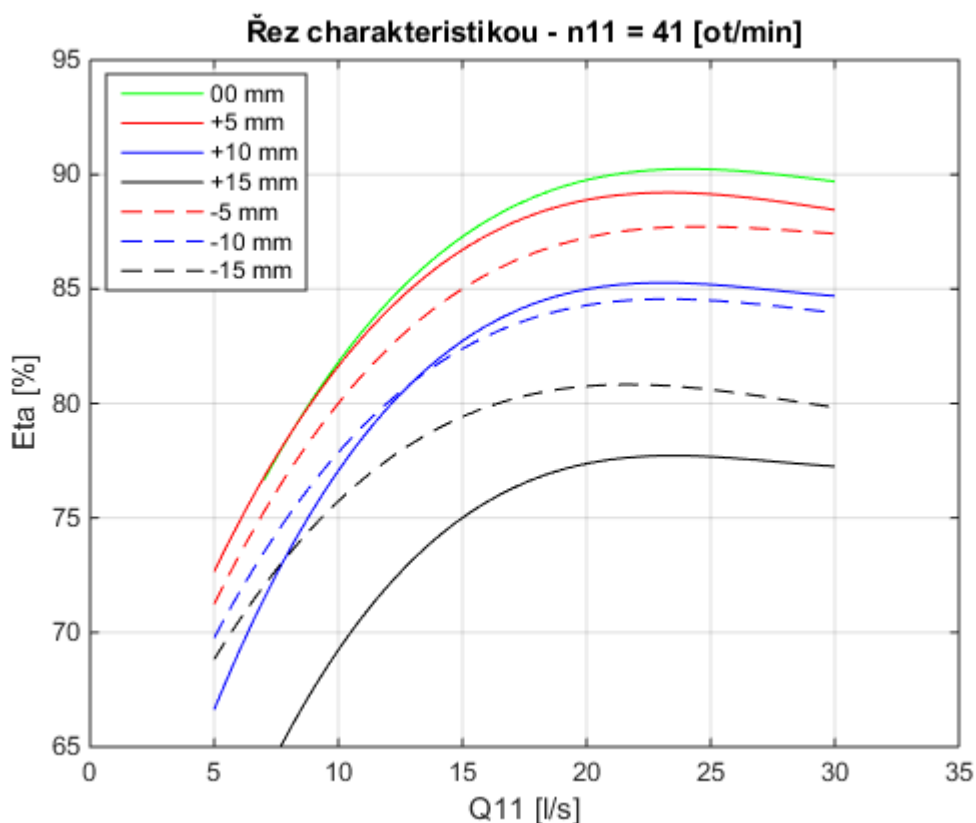


Graf 6.8 Rozdíl účinnostních charakteristik pro polohy paprsku Dok -15 a optimum

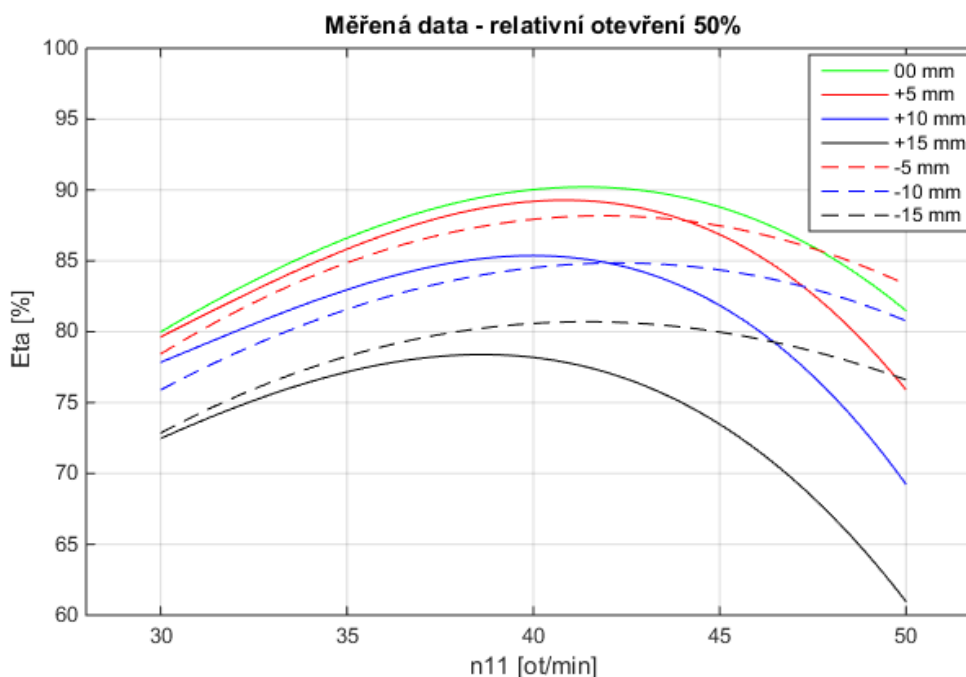
### 6.3.3 Společné porovnání charakteristik pro různé polohy paprsku

Společné porovnání 7 poloh paprsku v jediném grafu je značně náročné na přehlednost zobrazovaných dat. Jako reprezentativní část porovnávaných charakteristik byly vybrány dva řezy těmito 3D charakteristikami. Řezy jsou vedeny místem maximální dosažené účinnosti v optimální poloze paprsku. Poloha řezů je  $n_{11} = 41 \text{ ot/min}$  a  $Q_{11} = 25 \text{ l/s}$ .

Jednotkový průtok  $25 \text{ l/s}$  odpovídá relativnímu otevření trysky cca 50 %.



Graf 6.9 Řez společnou charakteristikou,  $n_{11} = 41 \text{ ot/min}$



Graf 6.10 Řez společnou charakteristikou,  $Q_{11} = 25 \text{ l/s}$

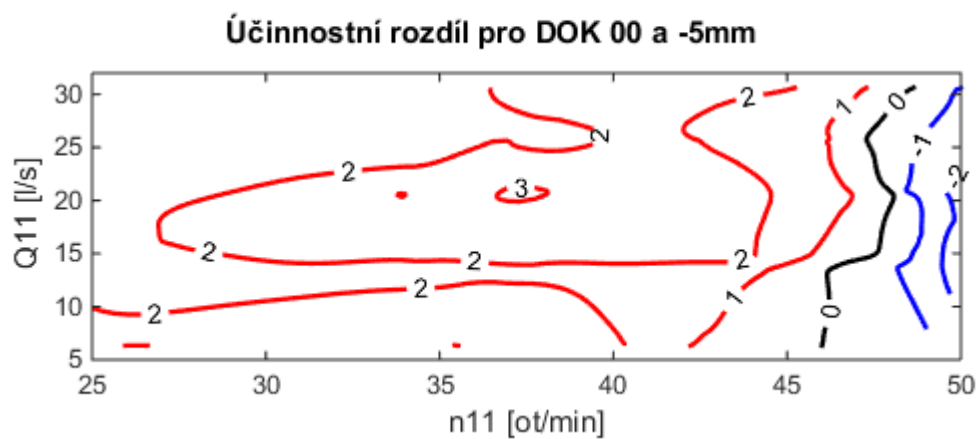
Z grafů je vidět, že turbína reaguje nižší ztrátou účinnosti při odchýlení paprsku ve směru dále od osy OK, tedy při teoretickém zvětšení Dok. Na druhou stranu při vychýlení paprsku v opačném směru, je charakteristika turbíny plošší.

Pro vychýlení paprsku do poloh paprsku  $\pm 5 \text{ mm}$  dokonce účinnostní charakteristika překoná účinnost v optimální poloze paprsku.

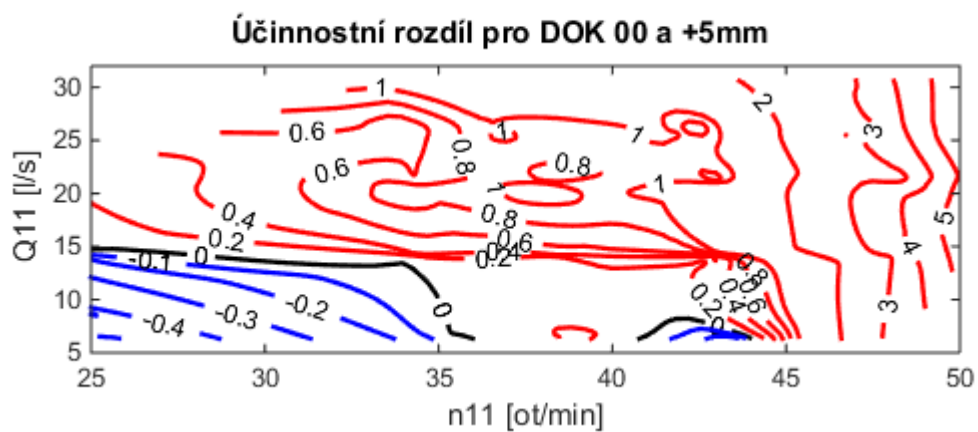
#### 6.3.4 Překonání účinnostní charakteristiky optima

Zajímavou oblast o vyšší účinnosti turbíny, než navrženém optimu, můžeme pozorovat při odečtení charakteristik turbíny  $\pm 5 \text{ mm}$  a optimum. Černou konturou bylo vyznačeno rozhraní s nulovou změnou účinnosti. Modře je pak označena oblast s vyšší účinností než v základní poloze pro optimum.

Modrá oblast s vyšší účinností je bohužel v obou případech mimo běžnou pracovní oblast zkoumané Peltonovy turbíny, a tedy této vyšší účinnosti lze jen těžko využít v běžném provozu. Dále vidíme, že při posunu paprsku dále od osy OK najdeme modrou oblast v prostoru vysokých otáček a naopak při posunu paprsku blíže k ose OK najdeme modrou oblast v prostoru nízkých otáček.

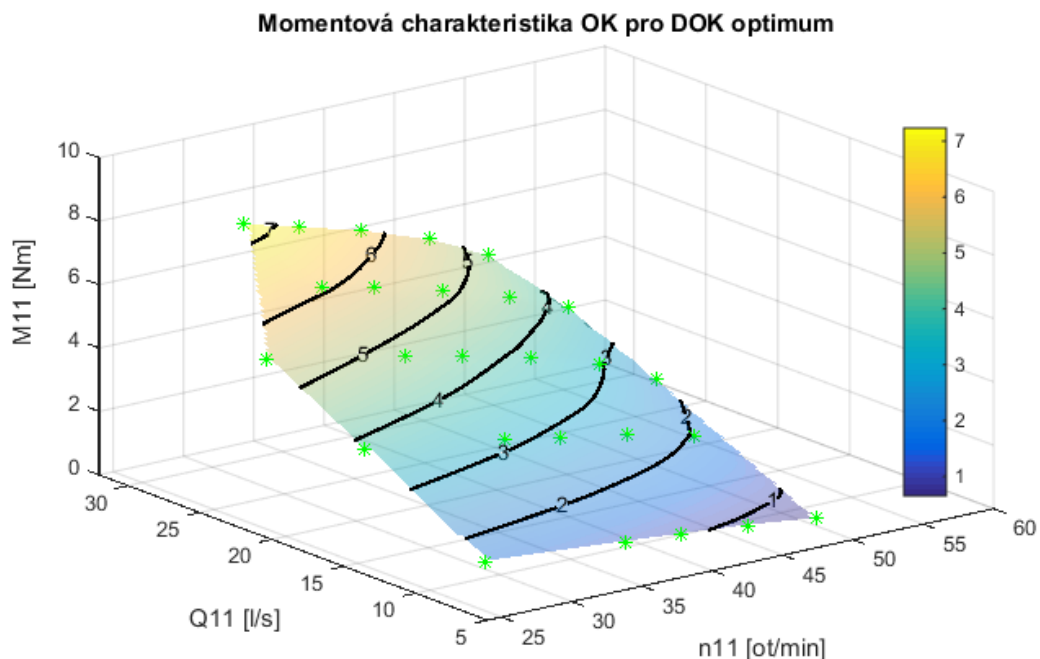


Graf 6.11 Překonání účinnostní charakteristiky optima – poloha paprsku -5 mm



Graf 6.12 Překonání účinnostní charakteristiky optima – poloha paprsku +5 mm

## 6.4 Momentová charakteristika



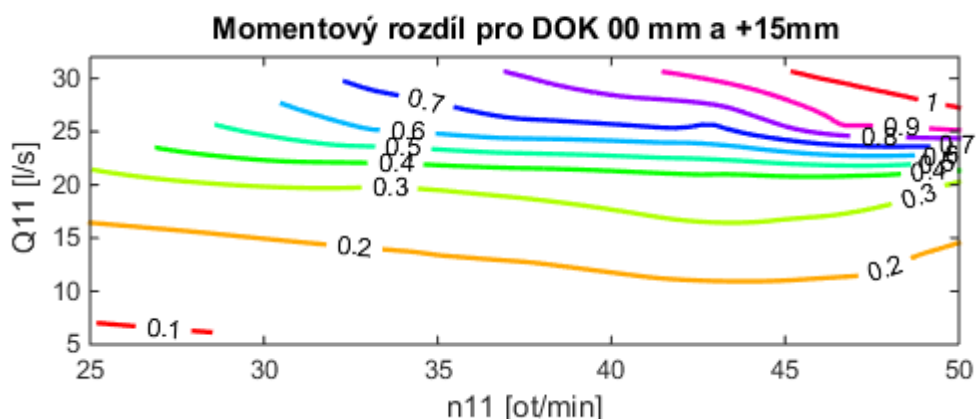
Graf 6.13 Momentová charakteristika OK pro paprsek v optimu

Měření a následné vyhodnocení momentové charakteristiky ukázalo, že změna délky ramene, na kterém paprsek působí, nemá tak významný vliv, aby hodnotu výsledného momentu radikálně ovlivnila.

Výsledná změna momentu, po vychýlení paprsku od optima, je ovlivněna kromě délky ramene ještě silou působící na lopatku. Síla se mění ze tří příčin - jiné unášecí síly, změny ostříku od lopatky a změny dopadové plochy paprsku na více lopatek OK.

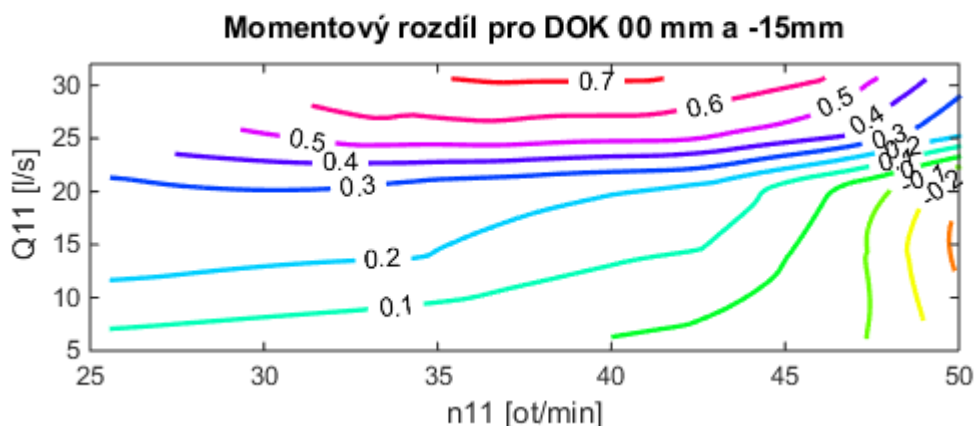
Pro žádnou ze 7 vyhodnocených poloh paprsku nebyl nalezen výrazný nárůst momentu oproti optimu. Výsledný moment se většinou s odchýlením paprsku z optima snižoval. Zde v textové části budou opět porovnány nejvzdálenější polohy paprsku od optima, avšak kompletní vyhodnocení momentových charakteristik pro všech 7 poloh je v dokladové části této práce.

Porovnáváme-li změny momentové charakteristiky v závislosti na posunu paprsku, lze zvolit za vhodné zobrazení následující dva grafy (rozdíl momentových charakteristik).



Graf 6.14 Momentový rozdíl charakteristik optimum a +15 mm

U následující rozdílové charakteristiky -15 mm a optimum pozorujeme i malý nárůst momentu oproti optimu (vrstevnice se zápornou hodnotou). Protože rameno působící síly je menší než u optimální polohy paprsku, můžeme se domnívat, že nárůst síly způsobila změna unášecí rychlosti, tvar ostříku z lopatky a spolupůsobení sil paprsku z více lopatek najednou.



Graf 6.15 Momentový rozdíl charakteristik optimum a -15 mm

## 6.5 Ostřík jako charakteristika

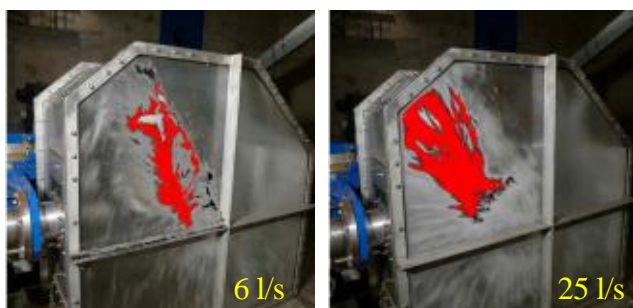
Voda „odpadající“ z turbíny má stále určitou zbytkovou energii. S touto energií dopadá na prosklenou stěnu měřicí skříně. Se změnou polohy paprsku vůči lopatce se vyvíjel i tento ostřík odpadající vodou. Protože je skříň prosklená, je možné polohu, velikost a charakter ostříku sledovat.

Během sledování ostříku se ukázalo několik dominantních jevů, které se nechaly opodstatnit a formulovat. Vybrané pracovní body turbíny byly fotograficky zaznamenány. Jejich následné fotometrické vyhodnocení ve photoshopu GIMP2 posloužilo jako podklad pro vyhodnocení ostříku jako další charakteristiky turbíny.

Fotometrickou metodou bylo vyhodnoceno všech 7 poloh paprsku. Výsledky fotometrické metody lze nejlépe pozorovat a tedy i popsat na nejvzdálenějších polohách paprsku  $\pm 15$  mm od optima.

### 6.5.1 Vliv jednotkového průtoku na velikost ostříkového obrazce

První patrný jev je vliv velikosti jednotkového průtoku na ostříkový obrazec. S rostoucím jednotkovým průtokem se velikost ostříkového obrazce rozšiřuje. Tento jev je nejlépe pozorovatelný pro polohu paprsku v optimu, avšak je platný pro všechny polohy paprsku. Vliv velikosti jednotkového průtoku na ostřík v optimu není ovlivněn změnou polohy paprsku. Následující obrázky zobrazují ostřík pro jednotkový průtok 6 a 25 l/s pro shodné jednotkové otáčky 39 ot/min.



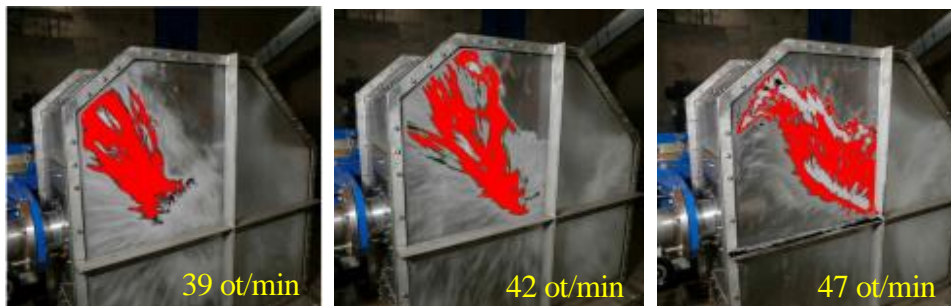
Obr 6.1 Vliv jednotkového průtoku na ostříkový obrazec

### 6.5.2 Vliv jednotkových otáček na ostříkový obrazec

Ostříkový obrazec pro různé jednotkové otáčky turbíny budeme sledovat opět na optimální poloze paprsku. Následující 3 ostříkové obrazce jsou zachyceny při jednotkovém průtoku 25 l/s. Rozdíl je však v jednotkových otáčkách turbíny. První obrazec je zaznamenán při hodnotě jednotkových otáček 39 ot/min, druhý při 42 ot/min a třetí pak při 47 ot/min.

Zadíváme-li se na obrazce pozorně, je zřejmý vliv různých jednotkových otáček na polohu ostříkového obrazce. Ten se s rostoucím počtem jednotkových otáček posouvá z přední části prosklené skříně směrem k jejímu středu. Migraci ostříkového obrazce lze dobře pozorovat vzhledem k referenčnímu konstrukčnímu kříži měřicí skříně.

Patrný je i vliv změny úhlu dopadu paprsku na lopatku. V případě nižších jednotkových otáček 39 ot/min je lopatka při dopadu ještě před ideální polohou. Tedy paprsek dopadá blíže k řezací hraně lopatky. Důsledkem toho lze pozorovat i nejvýše položený ostříkový obrazec. V případě 42 ot/min je výška obrazce trochu níže, jedná se o ideální tvar a polohu ostříkového obraze. Pro tento pracovní bod byla změřena nejvyšší účinnost. Při 47 ot/min byl obrazec nejnižší.



Obr 6.2 Vliv jednotkových otáček na polohu ostříkového obrazce

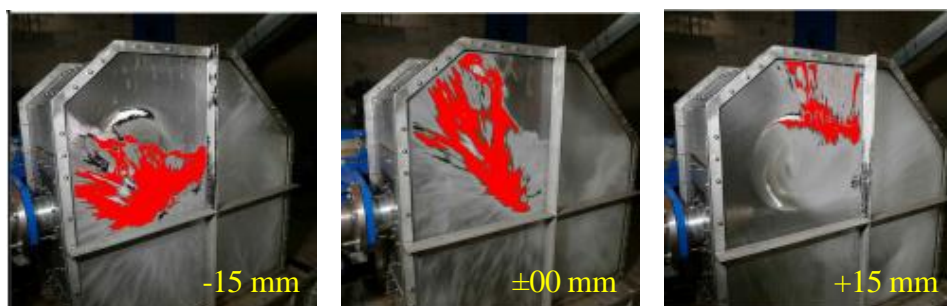
### 6.5.3 Vliv polohy paprsku na ostříkový obrazec

Dalším pozorovaným jevem je vliv změny polohy paprsku. Jev jako by spojoval předchozí dva jevy. Dochází jak k vertikální tak horizontální migraci paprsku pro shodné jednotkové otáčky a průtok.

Vezmeme-li to popořádku a zaměříme se nejprve na posun ostříkového obrazce v horizontální rovině, vidíme, že je-li paprsek posunut blíže k ose OK do polohy -15 mm, je paprsek zatlačen do přední části prosklené skříně a s následným vzdalováním osy paprsku od osy OK dochází k přesunu ostříkového obrazce směrem ke středu prosklené skříně.

Podobně tomu je i s posunem paprsku ve vertikálním směru. Pro nejbližší polohu paprsku k ose OK -15 mm je ostříkový obrazec ve středové části skříně. Následné posouvání paprsku dále od osy OK vede k přesunu ostříkového obrazce výše. Zmíněné je patrné z následující 3 ostříkových obrazců pro shodné  $n_{11}$  a  $Q_{11}$ . Liší se pouze poloha paprsku k ose OK. Uvedené obrázky jsou pro polohu paprsku v optimu a pro polohy  $Dok \pm 15$  mm.





Obr 6.3 Vliv polohy paprsku na ostříkový obrazec

#### 6.5.4 Vliv souhry více jevů na ostříkový obrazec

Dosud jsme hodnotili pouze vliv jednoho jevu na ostříkový obrazec. Protože v průběhu měření se vyskytovala souhra více jevů najednou, byla vytvořena tabulka fotografií, která souhru pozorovaných jevů přehledně demonstruje.

Tabulka je vyhotovena pro všech 7 sledovaných poloh paprsku. Kromě této základní tabulky byla vytvořena i její extrakce pro pouze 3 nejvzdálenější polohy paprsku, ve které jsou změny ostříkového obrazce v závislosti na změně polohy paprsku dominantnější. Obě tyto tabulky jsou v dokladové části této práce ve velkém rozlišení B.2.1 porovnání 3 poloh a B.2.2 porovnání 7 polohy. Poloha focených pracovních bodů je zřejmá z grafu v příloze B.2.3 porovnání graf.

Q11	n11	DOK -15	DOK -/+0	DOK +15
6 [l/s]	39 [ot/mi]			
25 [l/s]	42 [ot/mi]			
31 [l/s]	42 [ot/mi]			

Tab 6.2 Vliv souhry více jevů na ostříkový obrazec

## 6.6 Stanovení nejistoty měření dle normy ČSN EN 60193

Chybu lze označit jako rozdíl mezi skutečnou a změřenou hodnotu. Dokonale bezchybné měření neexistuje, dokážeme pouze stanovit hodnotu se smluvenou tolerancí. Chyby mohou vzniknout již při kalibraci měřících přístrojů nebo při měření. Přesnost přístrojů na měřící lince je dána kalibračními listy nebo udána výrobcem v technickém listu.

Známe tři druhy chyb: hrubé, náhodné a systematické chyby. Za chybami hrubými hledáme lidský faktor nebo přístroje. Při objevení hrubé chyby, celá sada měření je neplatná a pozbývá smysl jakýkoli další statistický rozbor či vyhodnocení. Chyby náhodné jsou způsobeny velkým počtem malých, vzájemně nesouvisejících vlivů. Souhrn těchto vlivů můžeme označit za nepřesnosti měření. Naměřené hodnoty se odchylují od středních hodnot podle zákona pravděpodobnosti. K odstranění těchto chyb dojde opakováním měření, kdy dojde k rozložení chyb po Gaussově křivce a lze stanovit hodnotu nejistoty standardní odchylky. Chyby náhodné mohou být zapříčiněny nepečlivostí při měření, nedostatečným počtem měření a nevhodnými provozními podmínkami. Nemění-li se podmínky měření má systematická chyba neměnnou velikost a znaménko. Mezi nejčastější příčiny patří chybná kalibrace měřících přístrojů a provozní podmínky. Tato chyba je těžko odhalitelná, neovlivní opakovatelnost měření. Dokážeme-li systematickou chybu popsat, jsme schopni opravit výsledek měření, v opačném případě, nedokážeme-li její hodnotu stanovit, musí dojít ke změně měřícího zařízení nebo úpravě podmínek měření. [6]

V následujících kapitolách bude stanovena nejistota měřených veličin (surová data) pro oblast jádra maximální účinnosti. Pracovní bod s maximální účinností byl změřen pro průtok 20.71 l/s, tlak 62.56 m v. sl., moment 106.06 Nm a otáčky 1036 ot/min.

Celkovou nejistotu hydraulické účinnosti stanovíme sloučením systematických a náhodných nejistot. Ke slučování nejistot je v normě uvedena metoda odmocniny součtu čtverců.

### 6.6.1 Stanovení systematické nejistoty měření hydraulické účinnosti

Chyba průtokoměru  $Q$  je dána výrobcem 0.2 % FSO. Protože rozsah přístroje je 0-30 l/s stanoví se chyba přístroje podle následujícího vzorce:

$$Q = 0.002 * 30 = 0.06 \text{ l/s} \quad (6.1)$$

Chyba tlakoměru P je dána výrobcem 0.2 % FSO. Protože rozsah přístroje je 0-17 bar, stanoví se chyba přístroje podle následujícího vzorce:

$$P = 0.002 * 170 = 0.34 \text{ m} \quad (6.2)$$

Chyba snímače momentu M je dána výrobcem 0.29% FSO. Protože rozsah přístroje je 0-200 Nm, stanoví se chyba přístroje podle následujícího vzorce:

$$M = 0.0029 * 200 = 0.58 \text{ Nm} \quad (6.3)$$

Podle normy počítadlo otáček není třeba kalibrovat, ale je důležitá jeho kontrola jiným zdrojem informace o otáčkách. Otáčky byly průběžně porovnávány s hodnotou na displeji frekvenčního měniče brzdy. Při použití čítače pulzů můžeme dle normy očekávat nejistotu měření  $f_n = 0.01 - 0.05 \%$ . Do výpočtu systematické nejistoty byla zvolena hodnota 0.025%.

Celková systematická nejistota hydraulické účinnosti podle normy ČSN EN 60193 je:

$$N_s = \pm \sqrt{fQ^2 + fP^2 + fM^2 + fn^2} * 100\% \quad (6.4)$$

$$N_s = \pm \sqrt{\left(\frac{\Delta Q}{Q_p}\right)^2 + \left(\frac{\Delta P}{P_p}\right)^2 + \left(\frac{\Delta M}{M_p}\right)^2 + fn^2} * 100\%$$

$$N_s = \pm \sqrt{\left(\frac{0.06}{20.71}\right)^2 + \left(\frac{0.34}{62.56}\right)^2 + \left(\frac{0.58}{106.06}\right)^2 + 0.00025^2} * 100\%$$

$$N_s = \pm 0.86 \%$$

### 6.6.2 Stanovení náhodné nejistoty měření hydraulické účinnosti – surová data

- **Nejistota měření průtoku pro oblast nejvyšší účinnosti**

Velikost náhodné chyby měření se stanoví směrodatnou odchylkou surových dat. Každý pracovní bod byl měřen 2 x 90 s. Periodicita čtení snímačů je 0.1 s, náhodná chyba se stanoví pro soubor 1800 vzorků.

Velikosti náhodné chyby průtoku Q vychází 0.023 l/s.

Výsledná nejistota měření tlaku se stanoví z poměru velikosti náhodné chyby k měřené hodnotě 20.71 l/s.

$$\frac{\Delta Q}{Q} = \frac{0.023}{20.71} * 100\% = \pm 0.11\% \quad (6.6)$$

- **Nejistota měření tlaku pro oblast nejvyšší účinnosti**

Velikosti náhodné chyby tlaku P vychází 0.492 m.

Výsledná nejistota měření tlaku se stanoví z poměru velikosti náhodné chyby k měřené hodnotě 62.56 m.

$$\frac{\Delta P}{P} = \frac{0.492}{62.56} * 100\% = \pm 0.79 \% \quad (6.7)$$

- **Nejistota měření momentu pro oblast nejvyšší účinnosti**

Velikosti náhodné chyby momentu vychází 1.22 Nm.

Výsledná nejistota měření momentu M se stanoví z poměru velikosti náhodné chyby k měřené hodnotě 106.06 Nm.

$$\frac{\Delta M}{M} = \frac{1.22}{106.06} * 100\% = \pm 1.15 \% \quad (6.8)$$

- **Nejistota měření otáček pro oblast nejvyšší účinnosti**

Velikosti náhodné chyby otáček n vychází 3.59 ot/min.

Výsledná nejistota měření tlaku se stanoví z poměru velikosti náhodné chyby k měřené hodnotě 1036 Nm.

$$\frac{\Delta O}{O} = \frac{3.59}{1036} * 100\% = \pm 0.35 \% \quad (6.9)$$

K výpočtu celkové náhodné nejistoty hydraulické účinnosti užijeme opět metodu odmocniny součtu čtverců. Chyba hydraulické účinnosti se dle normy nestanovuje přímo ze změřených hodnot účinností, protože se jedná o odvozenou veličinu.

$$Nn = \pm \sqrt{fQ^2 + fP^2 + fM^2 + fO^2} \quad (6.10)$$

$$Nn = \pm \sqrt{0.0011^2 + 0.79^2 + 1.15^2 + 0.35^2}$$

$$Nn = \pm 1.44 \%$$

- **Stanovení celkové nejistoty měření hydraulické účinnosti**

Celková nejistota měření je dána odmocninou součtu čtverců náhodné a systematické nejistoty.

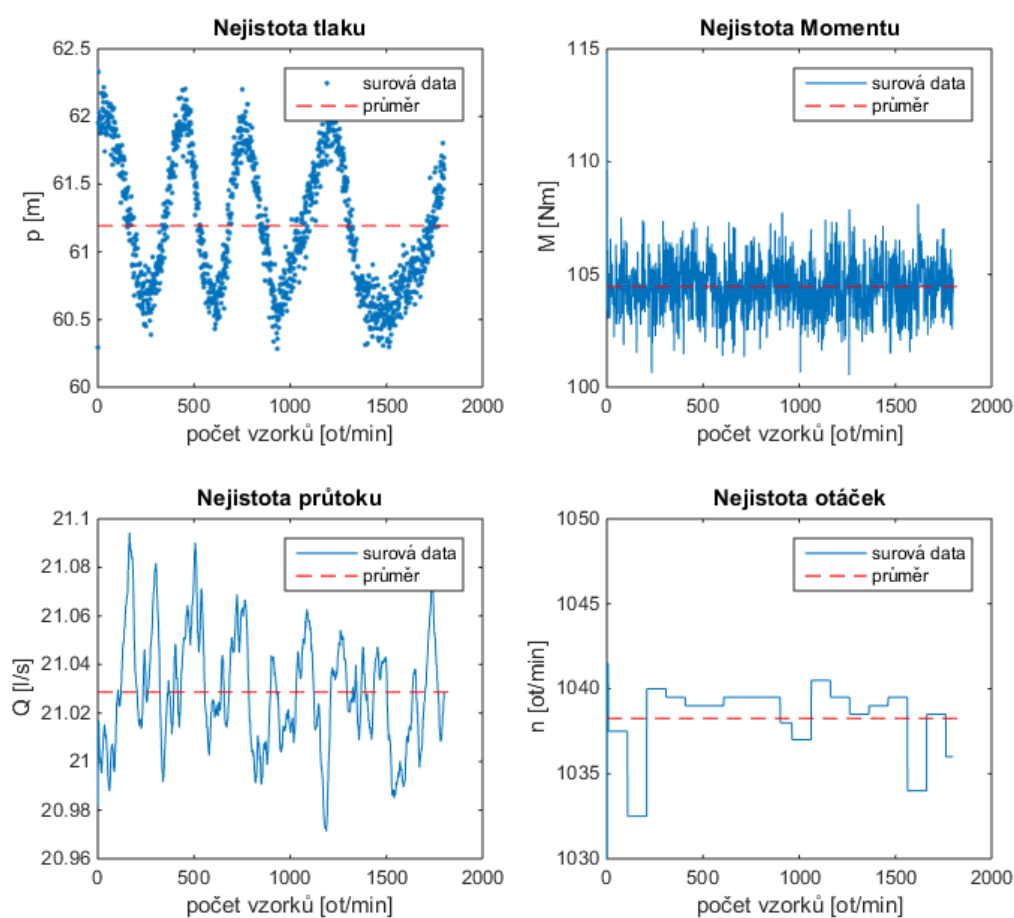
$$N = \pm \sqrt{Ns^2 + Nn^2} \quad (6.12)$$

$$N = \pm \sqrt{0.86^2 + 1.44^2}$$

$$N = \pm 1.68 \%$$

### 6.6.3 Vliv průměrování veličin na náhodnou nejistotu

V předchozí kapitole byla vyhodnocena náhodná nejistota pro surová data. Surová data jsou data nevyhlazená. Jedná se o záznam ze snímačů odečítaný 10 x 1s. Otáčky jsou odečítány 1 x 10 s. Následující grafy zobrazují záznam surových dat pro jeden pracovní bod. Pracovní bod z těchto surových dat byl vypočten jako střední hodnota.



Graf 6.16 Vliv průměrování na náhodnou nejistotu

Na první pohled jsou patrné tlakové pulzace, které očividně nemají vliv na průtok nebo na změřený moment. Tlak a moment jsou lineárně závislé, přesto lineární regrese neukázala lineární vazbu tlakových pulzací na chybu momentu. Výsledná hodnota lineární regrese nepřesáhla hodnotu  $|0.06|$ . Můžeme se tedy domnívat, že snímaná data z tlakoměrných čidel

mohou být zatíženy chybou „po cestě“. Mohou být ovlivněny elektromagnetickým polem frekvenčních měničů (to se neprokázalo, tlak pulzuje i při vypnutých měničích), chybou převodníku, eventuálně těžko zjištělnou softwarovou smyčkou. Periodicita pulzů je zhruba 30 s.

Norma ČSN EN 60193 uvádí, že průměrováním dojde ke snížení náhodné chyby, neboť náhodná chyba střední hodnoty z n nezávislých měření je  $n^{-1/2}$  krát menší než náhodná chyba jednotlivého měření. Pro 900 měření je teoreticky náhodná chyba redukována 30 krát.

Abychom určili náhodnou chybu průměrovaného pracovního bodu, musíme měření bodu vícekrát opakovat a statisticky vyhodnotit. Posuzovaný pracovní bod pro nejvyšší účinnost byl stanoven dvaceti nezávislými měřeními. Výsledná náhodná chyba veličin vyšla 0.008 l/s pro průtok, 0.17 m v.sl. pro tlak, 0.09 Nm pro moment a 1.91 ot/min pro otáčky. To odpovídá náhodným nejistotám  $\pm 0.04\%$  pro průtok,  $\pm 0.27\%$  pro tlak,  $\pm 0.10\%$  pro moment a  $\pm 0.18\%$  pro otáčky. Celková náhodná nejistota je pak odmocninou součtu čtverců jednotlivých nejistot. Její hodnota je  $\pm 0.35\%$ . Pokud nebyla smluvena jiná hodnota náhodné nejistoty, uvádí norma maximální hodnotu nejistoty  $\pm 0.1\%$ . Této hodnoty náhodné nejistoty není na měřicí lince se současným technickým vybavením možné dosáhnout.

- Následně celková nejistota hydraulické účinnosti je dána již zmiňovaným vztahem

$$N = \pm \sqrt{Ns^2 + Nn^2} \quad (6.12)$$

$$N = \pm \sqrt{0.86^2 + 0.35^2}$$

$$N = \pm 0.93\%$$

Tab 6.3 Souhrnná tabulka nejistoty měření

	Systematická nejistota	Náhodná nejistota surová data	Celková nejistota surová data	Náhodná nejistota průměrovaná data	Celková nejistota průměrovaná data
	%	%	%	%	%
Průtok	$\pm 0,29$	$\pm 0,11$	$\pm 0,31$	$\pm 0,04$	$\pm 0,29$
Tlak	$\pm 0,54$	$\pm 0,79$	$\pm 0,96$	$\pm 0,27$	$\pm 0,60$
Moment	$\pm 0,55$	$\pm 1,15$	$\pm 1,27$	$\pm 0,10$	$\pm 0,56$
Otáčky	$\pm 0,03$	$\pm 0,35$	$\pm 0,35$	$\pm 0,18$	$\pm 0,18$
Hydraulická účinnost	$\pm 0,89$	$\pm 1,44$	$\pm 1,68$	$\pm 0,35$	$\pm 0,93$

#### 6.6.4 Kontrola tlakoměrných čidel a průtokoměru ČSN EN 60193

Tlak je snímáný dvěma stejnými tlakoměry.

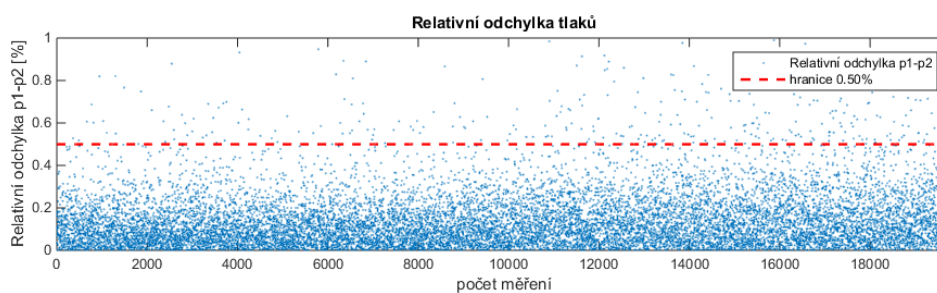
Jednotlivá měření středního tlaku kolem průřezu se dle zmiňované normy nemají navzájem lišit o více než 0.5 % měrné hydraulické energie. [6]

$$R = \frac{2 * (p1 - p2)}{p1 + p2} * 100 \quad (6.6)$$

- R – rozdíl tlaků [%]
- p1 – snímaný hodnota středového tlaku [mA]
- p2 – snímaný hodnota středového tlaku [mA]

Tato podmínka byla ověřena a byla dosažena pro 98.4 % snímaných hodnot.

Průtokoměr je osazen na zkušební lince pouze jeden. Není tedy jiná informace o průtoku pro porovnání.



Graf 6.17 Relativní odchylka snímačů tlaku



## 7 ZÁVĚR

V rámci této práce došlo k formulaci mnoha zásadních informací, které mohou být využity pro další práce na měřicí lince Peltonovy turbíny ve vodohospodářské laboratoři. Vyhodnocení samotné charakteristiky Peltonovy turbíny shrnuje její chování při vertikálních změnách polohy vodního paprsku.

Vyhotovená charakteristika trysky byla jedním z důležitých podkladů k měření. Z této charakteristiky lze jednoduše odečíst nezbytné vysunutí jehly pro dosažení požadovaného průtoku za určitého spádu.

Další užitečnou formulací je přesně stanovený postup přestavby linky při posunu paprsku do různých vertikálních poloh vůči ose OK.

Došlo ke zpřesnění fyzikálních veličin. Hustota byla upravena na hodnotu  $999.701 \text{ kgm}^{-3}$ . Hodnota tíhového zrychlení byla vypočtena pro vodohospodářskou laboratoř na základě geografických údajů. Výsledná hodnota je  $9.8102 \text{ ms}^{-2}$ .

Stanovené fyzikální veličiny vstupují do výpočtu v programu Control Web. Kromě zpřesnění těchto hodnot došlo i k úpravám softwarového vybavení tohoto programu. To obnášelo vytvoření nové schematizace celé linky, zprovoznění ovládání druhého čerpadla, restrukturalizaci archivovaných dat, doplnění užitečných grafů a došlo k prvnímu pokusu o přímé propojení databáze s Matlabem.

Během měření byly pozorovány některé mechanické závady na zkušební lince. Ty jsou zdokumentovány a v některých případech je navržena jejich náprava.

Účinnostní charakteristika byla vyhotovena pro všech 7 měřených poloh vodního paprsku. Hledané potenciální BEPs pro různé polohy paprsku nepřekonal BEP změřený pro polohu paprsku udanou konstruktérem turbíny (optimum). Zároveň bylo měřením zjištěno, že účinnostní plochy, pro všechny polohy paprsku, jsou v oblasti maximální účinnosti velmi ploché. To znamená, že daná turbína dokáže pracovat s minimálními ztrátami a to i v případě, že není z neznámého důvodu provozována v ideálním pracovním bodě. Rychlejší pokles účinnosti byl zpozorován při posunu paprsku blíže k ose OK, tzn. při teoretickém zmenšování Dok.

Maximální dosažená účinnost pro optimum byla změřena 90.4% pro jednotkové otáčky 41.77 ot/min a jednotkový průtok 25.7 l/s. Tomuto bodu odpovídá poměr mezi unášecí a teoretickou výtokovou rychlostí cca 0.494.

V koncové části práce byla vyhodnocena momentová a ostříková charakteristika Peltonovy turbíny pro všechny polohy paprsku. Ostříkový obrazec se na boční průhlednou stěnu turbínové skříně vyvíjel v závislosti na změně otáček, změně průtoku a změně vertikální polohy paprsku vůči ose OK. Na základě ostříkové charakteristiky je v budoucnu možné odhalit špatnou polohu paprsku vůči ose zkoumaného OK.

V úplném závěru práce došlo ke stanovení nejistoty měření. Systematická nejistota hydraulické účinnosti je dána nejistotou jednotlivých zařízení měřící linky a dosahuje hodnoty  $\pm 0.86 \%$ . Celková náhodná chyba snímaná na snímačích (surová data) je  $\pm 1.44 \%$ , avšak hodnota náhodné nejistoty lze výrazně snížit průměrováním většího vzorku měření. Pracovní bod byl průměrován přes 900 hodnot. Výsledná hodnota náhodné nejistoty je v případě průměrovaných hodnot  $\pm 0.35 \%$ . Celková nejistota hydraulické účinnosti se skládá z náhodné a systematické složky. Hodnota celkové nejistoty hydraulické účinnosti vychází 0.93 %.

## 8 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] *Digitální knihovna ČVUT* [online]. Praha: Duraspace, 2016 [cit. 2018-05-01]. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/>
- [2] RUDOLF, Tomáš. *TURBÍNOVÝ STEND PRO MODELOVÝ VÝZKUM*. Praha, 2009. Bakalářská práce. ČVUT v Praze. Vedoucí práce Dr. Ing. Petr Nowak.
- [3] KAČENKOVÁ, Klára. *Metodika měření a sestavení účinnostních charakteristik Peltonovy turbíny*. Praha, 2015. Bakalářská práce. Vedoucí práce Dr. Ing. Petr Nowak.
- [4] LANGOVÁ, Lucie. *Metodika měření a vývoj aplikace pro ovládání turbinového stendu*. Praha, 2015. Bakalářská práce. ČVUT v Praze. Vedoucí práce Dr. Ing. Petr Nowak.
- [5] GIESECKE, J. a E. MOSONYI. *Wasserkraftanlagen*. Berlin: Springer, ©2009. ISBN 978-3-540-88989-2.
- [6] *Norma ČSN 60193 - Vodní turbíny, akumulární čerpadla a čerpadlové turbíny - Přejímací zkoušky na modelu*. Český normalizační institut, 2002.
- [7] Engineering ToolBox. <https://www.engineeringtoolbox.com> [online]. 2001 [cit. 2018-04-21]. Dostupné z: [https://www.engineeringtoolbox.com/water-dynamic-kinematic-viscosity-d\\_596.html](https://www.engineeringtoolbox.com/water-dynamic-kinematic-viscosity-d_596.html)
- [8] FEJKL, Bc. Vlastimil. *Fyzikální model Peltonovy turbíny*. Praha, 2016. Diplomová práce. ČVUT. Vedoucí práce Dr. Ing. Petr Nowak.
- [9] JAŠEK, P. *Pasivní snímače pro zjištění okamžitých hodnot napětí a deformací*. Brno, 2014. Bakalářská práce. VUT v Brně. Vedoucí práce Ing. Kamil Podaný.
- [10] *OEM Automatic: specialista pro průmyslovou automatizaci* [online]. Praha, b.r. [cit. 2018-04-27]. Dostupné z: [http://www.oemautomatic.cz/Products/Elektricke\\_stroje/Snimace/Indukcni\\_snimace/Zasad\\_y\\_indukcni\\_detekce\\_krivky\\_detekce\\_a\\_znaceni/Indukcni\\_snimace\\_-\\_co\\_je\\_potreba\\_vedet\\_pro\\_spravnou\\_volbu/2928965-603767.html](http://www.oemautomatic.cz/Products/Elektricke_stroje/Snimace/Indukcni_snimace/Zasad_y_indukcni_detekce_krivky_detekce_a_znaceni/Indukcni_snimace_-_co_je_potreba_vedet_pro_spravnou_volbu/2928965-603767.html)

- [11] RIEMANN, Sven. *Untersuchung der instationären Strömung in einer Pelton turbine*. Mnichov, 2009. Doktorandská práce. TU München. Vedoucí práce Univ.-Prof. W. H. Polifke, Ph.D. (CCNY).
- [12] PERRIG, Alexandre. *HYDRODYNAMICS OF THE FREE SURFACE FLOW IN PELTON TURBINE BUCKETS*. Lausanne, EPFL, 2007. Doktorandská práce. Vedoucí práce Prof. P. Xirouchakis.
- [13] *ZKUŠEBNA PELTON: Podklady od firmy Mavel, a.s.* b.r. 09.2017.
- [14] *Matematika.cz* [online]. Nová Média, s.r.o., 2014 [cit. 2018-05-01].

## 9 SEZNAM GRAFŮ

GRAF 3.1 VÝVOJ MOMENTU RESPEKTIVE VÝKONU V ZÁVISLOSTI NA FAKTORU KC PŘI KW=1.....	- 15 -
GRAF 3.2 ZPŘESNĚNÍ TÍHOVÉHO ZRYCHLENÍ DLE NORMY ČSN EN 60193 .....	- 16 -
GRAF 4.1 CHARAKTERISTIKA TRYSKY.....	- 21 -
GRAF 5.1 3D INTERPOLACE MĚŘENÝCH DAT .....	- 28 -
GRAF 6.1 ÚČINNOSTNÍ CHARAKTERISTIKA TURBÍNY PRO POLOHU PAPERSKU V OPTIMU.....	- 42 -
GRAF 6.2 POROVNÁNÍ BEPS PRO RŮZNÉ POLOHY PAPERSKU .....	- 43 -
GRAF 6.3 POROVNÁNÍ CHARAKTERISTIK DOK- 15 A OPTIMUM,- ÚČINNOSTNÍ KOPCE.....	- 44 -
GRAF 6.4 POROVNÁNÍ CHARAKTERISTIK DOK -15 A OPTIMA, VRSTEVNICOVÝ GRAF.....	- 45 -
GRAF 6.5 ROZDÍL ÚČINNOSTNÍCH CHARAKTERISTIK DOK -15 A OPTIMUM.....	- 46 -
GRAF 6.6 POROVNÁNÍ CHARAKTERISTIK - ÚČINNOSTNÍ KOPCE .....	- 46 -
GRAF 6.7 POROVNÁNÍ CHARAKTERISTIK DOK -15 A OPTIMA, VRSTEVNICOVÝ GRAF.....	- 47 -
GRAF 6.8 ROZDÍL ÚČINNOSTNÍCH CHARAKTERISTIK PRO POLOHY PAPERSKU DOK -15 A OPTIMUM.....	- 47 -
GRAF 6.9 ŘEZ SPOLEČNOU CHARAKTERISTIKOU, $N_{11} = 41$ OT/MIN .....	- 48 -
GRAF 6.10 ŘEZ SPOLEČNOU CHARAKTERISTIKOU, $Q_{11} = 25$ L/S .....	- 49 -
GRAF 6.11 PŘEKONÁNÍ ÚČINNOSTNÍ CHARAKTERISTIKY OPTIMA – POLOHA PAPERSKU -5 MM.....	- 50 -
GRAF 6.12 PŘEKONÁNÍ ÚČINNOSTNÍ CHARAKTERISTIKY OPTIMA – POLOHA PAPERSKU +5 MM.....	- 50 -
GRAF 6.13 MOMENTOVÁ CHARAKTERISTIKA OK PRO PAPERSEK V OPTIMU .....	- 51 -
GRAF 6.14 MOMENTOVÝ ROZDÍL OPTIMUM, DOK+15 MM.....	- 52 -
GRAF 6.15 MOMENTOVÝ ROZDÍL OPTIMUM, DOK-15 MM .....	- 52 -
GRAF 6.16 VLIV PRŮMĚROVÁNÍ NA NÁHODNOU NEJISTOTU .....	- 60 -
GRAF 6.17 RELATIVNÍ ODCHYLKA SNÍMAČŮ TLAKU .....	- 62 -

## 10 SEZNAM TABULEK

TAB 6.1 PŘEHLED BEPS.....	- 44 -
TAB 6.2 VLIV SOUHRY VÍCE JEVŮ NA OSTŘIKOVÝ OBRAZEC.....	- 56 -
TAB 6.3 SOUHRNNÁ TABULKA NEJISTOTY MĚŘENÍ .....	- 61 -

## 11 SEZNAM OBRÁZKŮ

OBR 3.1 ZJEDNODUŠENÉ 2D PROSTŘEDÍ .....	- 13 -
OBR 4.1 PŘÍVODNÍ POTRUBÍ, MĚŘÍCÍ SKŘÍŇ, ODPADNÍ ŽLAB .....	- 18 -
OBR 4.2 INDUKČNÍ SNÍMAČ [10].....	- 24 -
OBR 5.1 ZKUŠEBNÍ LINKA UŽITA PŘI VYHODNOCENÍ HOMOGENITY PAPERSKU V MNICHOVĚ 2009 [11] .....	- 28 -
OBR 5.2 VÝKRES LOPATKY PELTONOVY TURBÍNY VE VODOHOSPODÁŘSKÉ LABORATOŘI [13].....	- 29 -

OBR 5.3 POROVNÁVANÉ POLOHY PAPERSKU.....	- 30 -
OBR 5.4 POSUN PAPERSKU - VERTIKÁLNÍ SMĚR [13].....	- 31 -
OBR 5.5 MĚŘENÍ POLOHY PAPERSKU OD REFERENČNÍ HRANY .....	- 32 -
OBR 5.6 NOVÉ SCHÉMA MĚŘÍCÍ LINKY – CONTROL WEB.....	- 33 -
OBR 5.7 POVRCHOVÁ KOROZE, PROSÁKLÁ VODA .....	- 37 -
OBR 5.8 VODNÍ PĚNA, PREFERENČNÍ PROUDĚNÍ.....	- 38 -
OBR 6.1 VLIV JEDNOTKOVÉHO PRŮTOKU NA OSTŘIKOVÝ OBRAZEC.....	- 53 -
OBR 6.2 VLIV JEDNOTKOVÝCH OTÁČEK NA POLOHU OSTŘIKOVÉHO OBRAZCE .....	- 54 -
OBR 6.3 VLIV POLOHY PAPERSKU NA OSTŘIKOVÝ OBRAZEC .....	- 55 -

## 12 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

FSO.....	Full Scale Output – rozsah čidla
OK.....	oběžné kolo
Dok.....	průměr oběžného kola
BEP.....	Best efficiency point – bod s nejlepší účinností
BEPs.....	Best efficiency points – body s nejlepší účinností
CW.....	Control Web
m v.sl.....	energie vyjádřená v metrech vodního sloupce
ot/sek.....	otáček za sekundu
Obr.....	obrázek
Tab.....	tabulka
Tzv.....	takzvaný
apod.....	a podobně
aj.....	a jiné

# 13 SEZNAM PŘÍLOH

## A SOUPIS SNÍMAČŮ

### A.1\_prutokomer

A.1.1\_prutokomer\_vyrobni\_stitek

A.1.2\_prutokomer\_techicky\_list

A.1.3\_kalibrační\_protokol

A.1.4\_navod\_k\_obsluze

### A.2\_snimac\_tlaku

A.2.1\_snimac\_tlaku\_vyrobni\_stitek

A.2.2\_snimac\_tlaku\_techicky\_list

### A.3\_snimac\_momentu

A.3.1\_snimac\_momentu\_vyrobni\_stitek

A.3.2\_snimac\_momentu\_kalibracni\_list

A.3.3\_snimac\_momentu\_zkusebni\_certifikat

A.3.4\_snimac\_momentu\_techicky\_list

### A.4\_snimac\_otacek

A.4.1\_snimac\_otacek\_techicky\_list

## B CHARAKTERISTIKA TURBÍNY

### B.1\_ucinnostni\_charakteristika

B.1.1\_vyhodnoceni\_00

B.1.2\_vyhodnoceni\_5

B.1.3\_vyhodnoceni\_10

B.1.4\_vyhodnoceni\_15

B.1.5\_vyhodnoceni\_-5

B.1.6\_vyhodnoceni\_-10

B.1.7\_vyhodnoceni\_-15

### B.2\_momentova\_charakteristika

B.2.1\_moment\_00

B.2.2\_moment\_5

B.2.3\_moment\_10

B.2.4\_moment\_15

B.2.5\_moment\_-5

B.2.6\_moment\_-10

B.2.7\_moment\_-15

B.3\_fotodokumentace\_charakteristika

B.2.1\_charakteristika\_ostriku

B.2.1.1\_porovnani\_3\_polohy

B.2.1.2\_porovnání\_7\_poloh

B.2.1.3\_porovnani\_graf