



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO
INŽENÝRSTVÍ
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

MOEDLOVÝ VÝZKUM VODNÍCH TURBÍN

A SIMILITUDE ANALYSIS IN CASE OF WATER TURBINES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

PAVEL DOKOUPIL

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

DOC. ING. JAROSLAV ŠTIGLER, PH.D.

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav automobilního a dopravního inženýrství

Akademický rok: 2010/2011

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Pavel Dokoupil

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Stavba strojů a zařízení (2302R016)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem c.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a
zkusobním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Modelový výzkum vodních turbín

v anglickém jazyce:

A Similitude Analysis in Case of Water Turbines

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Přes to, že v současné době je při návrhu vodních turbín stále více využíváno numerického
modelování proudění, má modelový výzkum nezastupitelnou roli. Pokud neověříme návrh
hydraulického stroje měřením na modelu, pak můžeme jen těžko říct, že je dobrý.

Cíle bakalářské práce:

Popsat postupy, principy, možnosti a přínos modelového výzkumu se zaměřením na návrh
hydraulických strojů.

Seznam odborné literatury:

Podklady poskytnuté vedoucím diplomové práce.

Internet

Vedoucí bakalářské práce: doc. Ing. Jaroslav Štigler, Ph.D.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2010/2011.

V Brně, dne 26.10.2010

L.S.

prof. Ing. Václav Pištek, DrSc.

Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.

Děkan fakulty



ABSTRAKT

Takhle zpráva se zabývá modelovým výzkumem vodních turbín. Zpráva je rozdělena na dvě základní části a to na část teoretickou, kde je stručně popsána teorie modelového výzkumu vodních turbín. A na část praktickou, kde se zabývám měřením a vyhodnocením dat v praxi.

KLÍČOVÁ SLOVA

vodní turbína, Francisova turbína, účinnost, kavitace, charakteristika, model, prototyp, kalibrace, snímač, podobnost, měření

ABSTRACT

This paper is concerning in model testing of water turbines. Paper is divided in two sections. In first section is brief summary of theoretical basis of water turbine model testing. Second section is concerning with practical measurement of Francis turbine and evaluation of basic characteristics.

KEYWORDS

Water turbine, Francis Turbine, Efficiency, cavitation, characteristics, model, prototype, calibration, sensor, affinity, measurement



BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

DOKOUPIL, P. Modelový výzkum vodních turbín. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 60 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Jaroslav Štigler, Ph.D .



ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením doc. Ing. Jaroslava Štiglera, Ph.D. a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 26. května 2011

.....

Pavel Dokoupil



PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval všem, kteří mě umožnili studium a podporovali při studiu. Zejména pak mému vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Jaroslavu Štiglerovi, Ph.D. za kladný přístup, odborné rady a ochotu při řešení problémů v mé bakalářské práci.



OBSAH

Úvod	12
1 Cíle bakalářské práce.....	13
2 Úvod do hydraulických strojů a měření	14
2.1 Termíny, definice.....	14
2.1.1 Vodní turbína (VT).....	14
2.1.2 Účinnost.....	14
2.1.3 Kavitace [5]	14
2.1.4 Bod	15
2.1.5 Zkouška	15
2.1.6 Hydraulická charakteristika.....	15
2.1.7 Měrná hydraulická energie stroje [6].....	16
2.1.8 Thomovo číslo [6]	16
2.1.9 Spád turbíny nebo dopravní výška čerpadla [6]	16
2.2 Rozdělení vodních turbín.....	16
2.2.1 Podle základní kategorie vodních turbín	16
2.2.2 Z hlediska polohy hřídele oběžného kola	16
2.2.3 Rozdělení VT podle orientace proudění v OK	16
2.3 Peltonova turbína (PT).....	16
2.4 Kaplanova turbína (KT).....	17
2.5 Deriazova turbína (DT).....	18
2.6 Francisova turbína.....	19
2.7 Použitelnost vodních turbín	20
3 Modelový výzkum.....	21
3.1 Teorie hydraulické podobnosti	21
3.2 Základní podobnostní čísla v oboru hydraulických strojů.....	21
3.2.1 Reynoldsovo číslo (Re) [1][5]	22
3.2.2 Eulerovo číslo (Eu) [1][5].....	22
3.2.3 Froudeovo číslo (Fr) [1][5].....	22
3.2.4 Strouhalovo číslo (Sh) [1][5].....	22
3.3 Jednotkové parametry podobnosti [5].....	22
3.3.1 Systém ED	22
3.3.2 Systém 11	23
3.3.3 Shrnutí a přepočtové vztahy	23
3.4 Výsledky měření na modelu	25
3.4.1 Energetické charakteristiky [5].....	25



3.4.2	Kavitační charakteristiky [5]	25
3.4.3	Silové a dynamické charakteristiky[5]	25
3.4.4	úplné charakteristiky[5]	25
4	Návrh zkušební stanice	26
4.1	Schéma měřicí tratě	26
4.2	Popis zkušebního okruhu	26
4.3	Parametry měřicí tratě	26
5	Základní údaje modelu	28
5.1	Modelové zkoušky	28
5.2	Parametry OK	28
5.3	Re-číslo modelu	28
5.4	Fyzikální konstanty zkušebny	28
5.4.1	Tíhové zrychlení	28
5.4.2	Hustota vody	28
5.4.3	Tlak nasycených par vody	28
5.4.4	Kinematická viskozita	29
5.4.5	Obsah plynu ve vodě	29
5.5	Vztažné průřezy měrného úseku	29
6	Veličiny	30
6.1	Objemový průtok	30
6.2	Tlakové parametry	30
6.2.1	Spád / dopravní výška modelu (turbíny či čerpadla v případě modelu ČT).....	30
6.2.2	Tlak na nízkotlaké straně modelu	31
6.2.3	Atmosférický tlak	31
6.3	Teplota tekutin	31
6.3.1	Teplota vzduchu	31
6.3.2	Teplota vody	31
6.4	Krouticí moment na hřídeli modelu	32
6.5	Otáčky modelu	33
6.6	Dynamické parametry	33
6.6.1	Axiální síla	33
6.6.2	Tlakové pulzace ve spirále a v kuželu sací trouby	34
7	Snímače senzory	35
7.1	Rozdělení snímačů [1]	35
7.1.1	Aktivní	35
7.1.2	Pasivní	35



7.2	Kalibrace	35
7.2.1	Kalibrace průtokoměru	36
7.2.2	Kalibrace silových veličin	36
7.2.3	Kalibrace tlakových veličin	36
7.2.4	Další kalibrace	36
8	Měření jak probíhá.....	37
8.1	Příprava na měření	37
8.1.1	Rozměrová kontrola [6].....	37
8.1.2	Vhodná volba a kalibrace snímačů	38
8.2	Účinnostní měření.....	39
8.2.1	Postup pro účinnostní měření	39
8.2.2	Výpočetní vzorce potřebné pro účinnostní měření.....	39
8.3	Kavitační měření.....	40
8.3.1	Postup pro kavitační měření	40
8.3.2	Výpočetní vzorce pro kavitační měření.....	40
8.4	Průběžné otáčky	41
8.5	Měření ztrátového momentu T_{LM}	41
9	Vyhodnocení dat.....	42
9.1	Tabulky	42
9.2	Účinnostní charakteristika	42
9.3	Kavitační charakteristika	43
9.4	Sběr dat a vyhodnocení chyb a nejistot měření	43
9.4.1	Náhodná nejistota zkoušky	43
9.4.2	Střední hodnota měřené veličiny	44
9.4.3	Směrodatná odchylka	44
9.4.4	Hodnota Studentova rozdělení.....	44
9.4.5	Výběrová směrodatná odchylka střední hodnoty	44
9.4.6	Náhodná nejistota	44
9.4.7	Nejistota stanovení účinnosti modelu.....	44
9.4.8	Systematické relativní nejistoty.....	45
9.4.9	Náhodné nejistoty měření hodnot.....	45
9.4.10	Celková nejistota stanovení účinnosti	45
10	Výsledky měření.....	46
10.1	Předběžné výsledky.....	46
10.2	Konečné výsledky	47
11	Návrh prototypu VT z její účinnostní charakteristiky [1]	48



12	Přijímací zkoušky a kontrolní výpočet	50
12.1	Rozsah předváděcích zkoušek.....	50
12.2	Průběh předváděcích zkoušek	50
	Závěr.....	52
	Seznam použitých zkratk a symbolů	54
	Seznam příloh.....	59



ÚVOD

I přes čím dál větší rozmach numerického modelování se modelový výzkum vodních strojů používá pro experimentální ověření vodního stroje na modelu. Zkoušky fyzikálních modelů jsou základní částí výzkumu a vývoje velkých a středních vodních turbín. I sebelepší matematický model nedokáže v dnešní době nahradit skutečné chování stroje při podobných podmínkách, jaké budou panovat na skutečné elektrárně.

Modelový výzkum se provádí nejčastěji ze dvou důvodů: za účelem vývoje nového typu vodní turbíny, a za účelem ověření parametrů turbíny před instalací na elektrárnu. Ověření parametru se zpravidla používá pro velké vodní turbíny (výkon přesahuje 10MW).

V České Republice a bývalém Československu má výroba vodních turbín velkou tradici, která přetrvává do dnešní doby. Pro kvalitní a spolehlivé vodní turbíny je výzkum a vývoj velmi důležitým článkem ve výrobním programu. Dnes v ČR mezi největší výrobce vodních turbín patří ČKD Blansko Holding, a.s. a ČKD Blansko Engineering a.s., oba výrobci disponují zkušebními laboratořemi pro provádění modelových zkoušek. Další laboratoř se nachází na VUT Brno - Fakulta strojního Inženýrství.



1 CÍLE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

ZADANÍ:

Popsat postupy principy, možnosti a přínos modelového výzkumu na návrh hydraulických strojů.

CÍLE:

Vzhledem k rozsáhlému zadání práce není možné v rozsahu práce zahrnout všechny informace, co se týká modelového výzkumu.

Práci se pokusím směřovat více směrem k praxi, ale v úvodu práce budou uvedeny i teoretické poznatky potřebné k modelovému výzkumu. Dalším vytyčeným cílem je se pokusit spojit hrubou teorii s měřením v praxi.

Práce je z velké části směřována na praktické měření, popis zkušebního okruhu. Základní postupy, principy, návrh snímačů, atd. Dále se v práci vyskytují naměřené hodnoty z měření (grafy, tabulky, charakteristiky), fotky snímačů.

Z hlediska alespoň částečné úplnosti jsem zavedl na začátku práce kapitoly termíny, definice, rozdělení vodních turbín, dále pak teorie hydraulické podobnosti. A na konci práce je zmínka o návrhu prototypu vodní turbíny.

Vzhledem k tomu, že modelový výzkum se provádí na všech typech vodních turbín (VT) a nelze v tomto rozsahu práce zachytit výzkum na všech typech VT, tak zpráva je zpracovaná pouze na modelový výzkum, který se provádí na Francisově turbíně (FT).

Tahle zpráva může zároveň sloužit, jako studijní text pro studenty a pracovníky, kteří mají o stručně shrnutou problematiku zájem.



2 ÚVOD DO HYDRAULICKÝCH STROJŮ A MĚŘENÍ

2.1 TERMÍNY, DEFINICE

V této kapitole budou uvedeny nejdůležitější termíny a definice používané v této zprávě. Definice jsou pouze stručným popisem a nejsou zde uvedeny všechny termíny, které se v této zprávě vyskytují. Další vysvětlení a rozšíření zde uvedených pojmů a definic najdete v odborné literatuře viz. použité informační zdroje.

2.1.1 VODNÍ TURBÍNA (VT)

je točivý mechanický stroj, který přeměňuje kinetickou či tlakovou energii vody na mechanickou energii. Předchůdcem VT bylo vodní kolo (známé také jako mlýnské kolo). Spolu s elektrickým generátorem (G) resp. alternátorem spojeným s turbínou je hlavní součástí vodních elektráren (VE). G převádí mechanickou energii turbíny na energii elektrickou. [7]

2.1.2 ÚČINNOST

Ve fyzice je účinnost fyzikální veličina, která udává poměr mezi výkonem a příkonem stroje při vykonávání práce. Energie dodaná stroji musí být vždy větší než práce strojem vykonaná (v opačném případě bychom mluvili o tzv. Perpetuum mobile), kvůli ztrátám – přeměně energie na neužitečné druhy (např. v důsledku tření se mění mechanická energie v teplo). Proto účinnost je vždy menší než 100 %. Značka - η , Základní jednotka - bez jednotky, příp. %. [8]

2.1.3 KAVITACE [5]

Kavitace je fyzikální jev v kapalině (v daném případě ve vodě), při němž vznikají, vyvíjejí se a zanikají kavitační bubliny (dutiny), které jsou naplněny vodními parami nebo plyny. Kavitace nastává při dosažení určitých podmínek a to při odpovídajícím tlaku a teplotě v daném místě rotujícího průtočného kanálu mezi lopatkami oběžného kola. Kavitačním tlakem je tlak blízký tlaku nasycených par (pva) při odpovídající teplotě a závisí na obsahu plynu v kapalině. Závisí také na druhu, tvaru, velikosti a počtu kavitačních jader a na době jejich výskytu v kritické oblasti.

STUPNĚ KAVITACE jsou charakterizovány stádiem vývoje kavitační oblasti.

POČÁTEK KAVITACE je určen vznikem prvních viditelných kavitačních bublin, které lze sledovat přes průhlednou stěnu modelu pomocí stroboskopu.

ČÁSTEČNÁ KAVITACE je přechodnou fází mezi počáteční a vyvinutou kavitací, při které může přechodně dojít i ke zvýšení hydraulické účinnosti stroje, v důsledku snížených ztrát třením mezi provzdušněnou vodou a povrchem tělesa.

VYVINUTÁ KAVITACE je charakterizována takovou velikostí kavitační oblasti, která ovlivňuje proudové pole, kdy dochází k nezanedbatelným změnám energetických parametrů stroje (např. poklesem účinnosti, ale také průtoku zúžením průtočného profilu kavitační zónou).



KRITICKÁ KAVITACE je určena dohodnutou změnou specifikovaného energetického parametru stroje v oblasti s trvalým poklesem (např. hydraulické účinnosti o 1%), proti bez-kavitační úrovni účinnosti v závislosti: $[\eta_h = f(\sigma)]$, kde: $\eta_h = \text{konst}$ i při změnách kavitačních poměrů.

MECHANICKÉ ÚČINKY KAVITACE na materiál jsou vyvolány rázy při zániku kavitačních bublin, které působí na velmi malé plošky řádově: 10^{-9} m^2 , což je srovnatelné s velikostí jednotlivých strukturních složek daného kovového materiálu (např. feritu, martenzitu apod.). Mechanické účinky jsou rozhodujícím účinkem kavitace, které se projevují pružnými a trvalými deformacemi, vnitřní napjatostí, vznikem mikro-trhlinek a únavou materiálu.

VEDLEJŠÍ ÚČINKY KAVITACE jsou účinky:

KOROZIVNÍ, tj. napadení chemickým nebo elektro-chemickým působením prostředí (kapaliny) na materiál při kavitačních podmínkách.

ELEKTRICKÉ, vyvolané v oblasti imploze v důsledku potenciálního spádu na hranicích různých strukturních míst o různé okamžité napjatosti či teplotě.

TEPELNÉ, tzn. při místním (lokálním) ohřevu povrchové vrstvy vlivem deformační práce a kompresním teplem stlačovaného plynu v kapalině, což vyvolává pnutí z tepelné dilatace.

PRŮVODNÍ JEVY KAVITACE zahrnují:

AKUSTICKÉ JEVY, způsobující charakteristický kavitační hluk, vyvolaný hlavně implozemi kavitačních bublin, přičemž při změně provozního režimu stroje mimo optimální bod, dochází i k výrazné změně hladiny akustického tlaku.

KAVITAČNÍ VIBRACE, které jsou vyvolány pulsujícími silovými účinky implodujících dutin a nestabilitou kavitační oblasti.

LUMINISCENCE (světélkování), vznikající při zániku kavitačních bublin, kdy zbylý plyn je krátkodobě avšak velmi intenzivně stlačen, přičemž teplota vystoupí na vysokou hodnotu; kromě toho může dojít i k elektrickým výbojům mezi ionty látek rozpuštěných v kapalině nebo při dosažení kritické rychlosti plynu a tím k rázu plynových molekul.

2.1.4 BOD

Je určen jedním nebo několika po sobě jdoucími soubory odečtů a/nebo záznamů při stejných provozních stavech a nastaveních, sloužící k výpočtu charakteristik stroje při tomto provozním stavu a nastavení. [6]

2.1.5 ZKOUŠKA

Zkouška se skládá ze souborů bodů a výsledků postačujících ke stanovení charakteristiky stroje ve specifikovaném rozsahu provozních stavů. [6]

2.1.6 HYDRAULICKÁ CHARAKTERISTIKA

Obsahuje všechny parametry vztahující se ke stroji při působení hydrodynamických sil. [6]



2.1.7 MĚRNÁ HYDRAULICKÁ ENERGIE STROJE [6]

Měrná energie vody, která je k dispozici mezi vysokotlakým a nízkotlakým vztažným průměrem stroje, v úvahu je brán vliv stlačitelnosti.

$$E = \frac{p_{abs1} - p_{abs2}}{\bar{\rho}} + \frac{v_1^2 - v_2^2}{2} + g \cdot (z_1 - z_2) \quad (1)$$

2.1.8 THOMOVO ČÍSLO [6]

Bezrozměrný termín určující stavy kavitace, při kterých pracuje stroj. Je vyjádřen jako poměr čisté kladné sací měrné energie NPSE k měrné hydraulické energii E.

$$\sigma = \frac{NPSE}{E} \quad (2)$$

2.1.9 SPÁD TURBÍNY NEBO DOPRAVNÍ VÝŠKA ČERPADLA [6]

Definice E, viz 2.1.7

$$H = \frac{E}{g}, \quad (3)$$

2.2 ROZDĚLENÍ VODNÍCH TURBÍN

Vodní turbíny se mohou dělit podle několika hledisek, v této zprávě zmíním pouze tři.

Další rozdělení lze najít v literatuře [1][2][4]

2.2.1 PODLE ZÁKLADNÍ KATEGORIE VODNÍCH TURBÍN

Vychází z průtokové (Bernoulliho) rovnice pro rotující kanál a podle tohoto hlediska připadají v úvahu dvě varianty Rovnotlaké (akční) a Přetlakové (reakční) turbíny.

Představitelem rovnotlaké turbíny je Peltonova turbína a hlavními a nejdůležitějšími představiteli přetlakových turbín jsou Francisova, Kaplanova a Deriazova.

2.2.2 Z HLEDISKA POLOHY HRÍDELE OBĚŽNÉHO KOLA

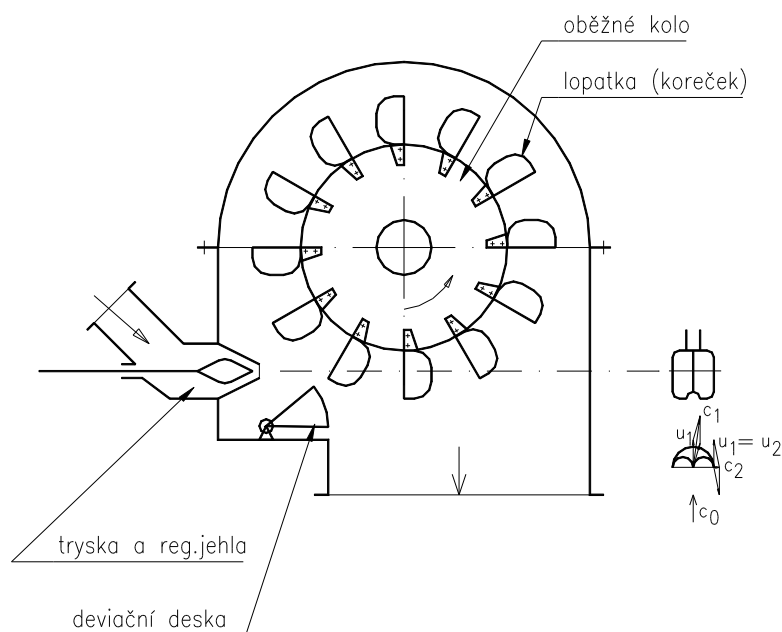
Na horizontální, vertikální a šikmé.

2.2.3 ROZDĚLENÍ VT PODLE ORIENTACE PROUDĚNÍ V OK

Centrifugální, Centripetální, Axiální, Radiálně-axiální, Diagonální, se šikmým vtokem, Tangenciální, s dvojnásobným nátokem.

2.3 PELTONOVA TURBÍNA (PT)

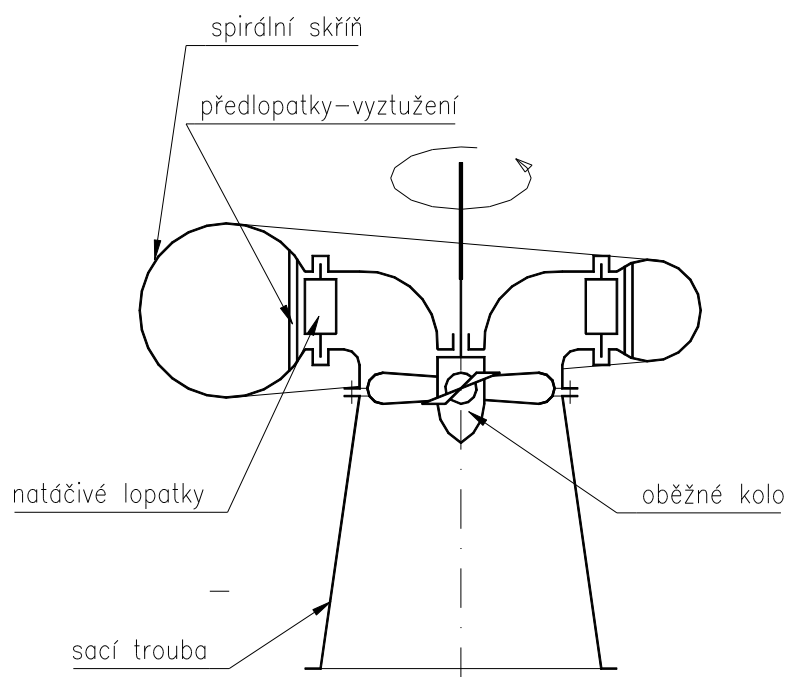
Je rovnotlaká tangenciální turbína se dvěma regulačními orgány, kterými jsou: dýza s regulační jehlou a deflektor, nebo deviátor. Regulační jehla slouží jako primární orgán regulace výkonu. Deflektor nebo deviátor slouží jako sekundární orgán regulace výkonu a jako bezpečnostní orgán (pro rychlé odstavení ze sítě). PT se používá pro vysoký spád (H) a malé průtoky (Q). Rozsah použití viz. Obr. 6. Účinnost může dosahovat až 95% na prototypu. Varianty PT: Horizontální uspořádání (tzn. s vodorovnou hřídelí) může mít maximálně dvě dýzy a vertikální uspořádání (tzn. se svislou hřídelí) může být až šesti dýzová. Byla vynalezena americkým vynálezcem Lesterem Allanem Peltonem v roce 1880.



Obr. 1 Schéma Peltonovy turbíny

2.4 KAPLANOVA TURBÍNA (KT)

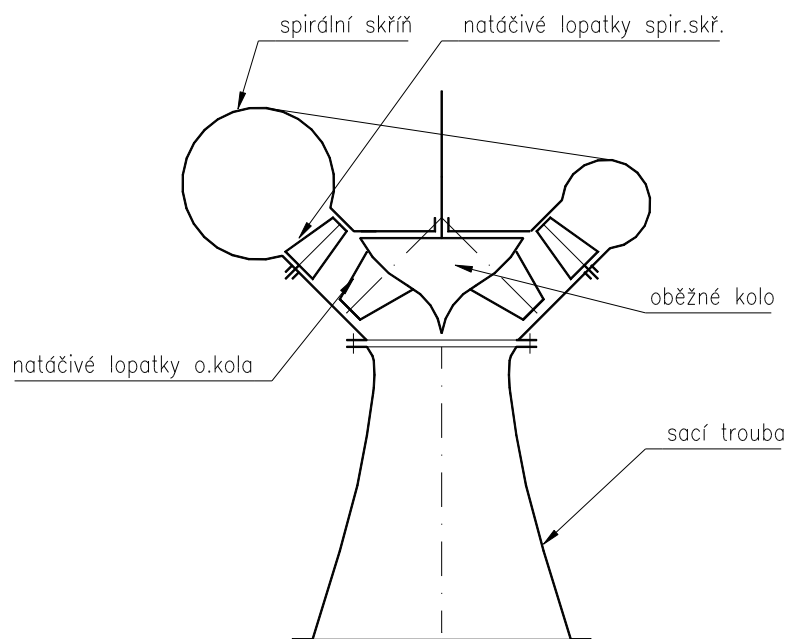
Je přetlaková axiální turbína, umožňující regulaci výkonu dvěma regulačními orgány. Jednak jsou to natáčivé lopatky rozváděcího kola (RK) a druhým regulačním orgánem jsou natáčivé lopatky oběžného kola (OK). Jednotlivé typy KT se rozlišují počtem lopatek OK ($z=3$ až 10) podle rychloběžnosti. Minimální počet lopatek OK ($z=3$) přísluší KT s nejvyšší rychloběžností. Maximální počet lopatek OK vychází u VE pro hraniční hodnoty spádu ($H \leq 70\text{m}$). Má vyšší účinnost než FT, ale je výrazně složitější a dražší. Používá se pro spády od 1 do 70,5 m a průtoky 0,15 až několik desítek m^3/s viz. Obr. 6. KT se používají na malých H při velkých Q , které nejsou konstantní. Konstrukce může být horizontální i vertikální. Varianty KT: klasická KT, propelerova turbína, Thomannova turbína, neregulovatelná turbína za provozu, přímoproudé turbíny. Turbínu vynalezl Profesor brněnské techniky Viktor Kaplan. První prototyp byl vyroben v roce 1919.



Obr. 2 Schéma Kaplánovi turbíny

2.5 DERIAZOVA TURBÍNA (DT)

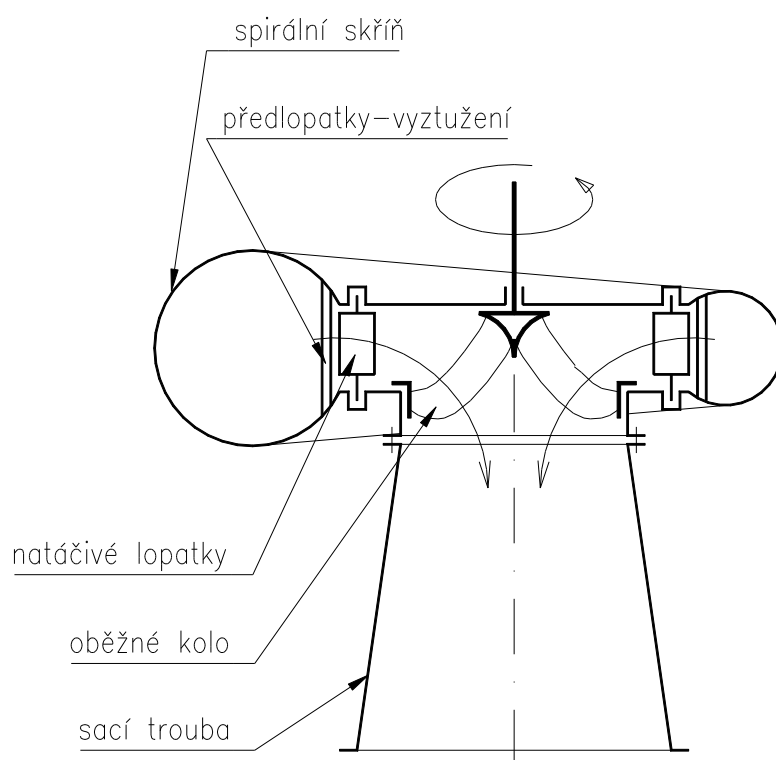
DT je přetlaková diagonální turbína, umožňující regulaci výkonu také dvěma orgány a to lopatkami RK a OK. Varianty: klasická DT, čerpadlová DT (reverzní). Využívá se pro spády přes 80m asi do 120m.viz. Obr. 6 Je to zdokonalená kaplanova turbína. Vyvinuta byla v roce 1955.



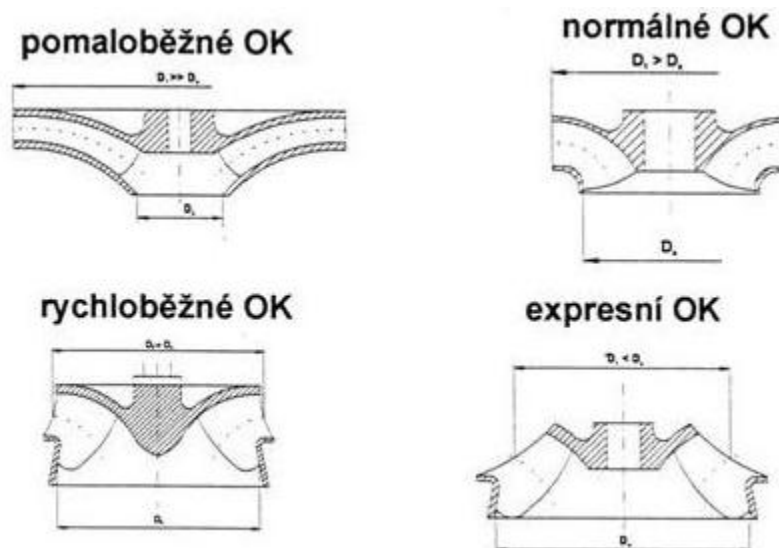
Obr. 3 Schéma Deriazovi turbíny

2.6 FRANCISOVA TURBÍNA

FT je přetlaková radiálně-axiální turbína s jedním regulačním orgánem, kterým jsou lopatky RK. Zavřená poloha lopatek RK je při $\alpha_0=0$ a maximální otevření RK je dáno požadovaným výkonovým rozsahem dané VE nebo křivkou omezení použitelnosti (ve specifikovaném spádovém rozsahu), za kterou již výkon stroje klesá. FT jsou nejrozšířenějším druhem turbíny. Jednotlivé typy FT jsou odlišeny rychloběžností, podle které rozlišujeme tzv. turbíny pomaloběžné, normální, rychloběžné a expresní viz Obr. 5. Používají se především pro střední stabilní Q a střední H viz. Obr. 6. Jsou výhodné zejména u přečerpávacích elektráren, kde lze turbínu zapojit jako čerpadlo. Varianty: klasická FT spirální, FT kašnová, Čerpadlová turbína (reverzní), Reiffensteinova turbína, Kvjatkovského turbína. Byla vyvinuta americkým vynálezcem Jamesem B. Francise v roce 1848.



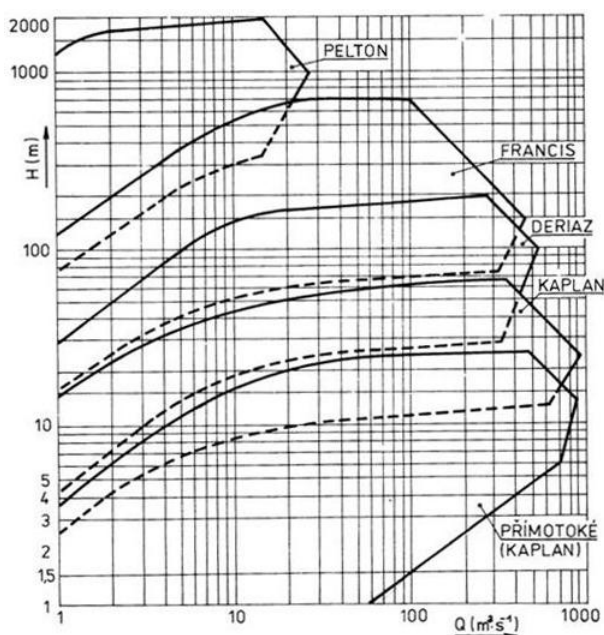
Obr. 4 Schéma Francisovi turbíny



Obr. 5 Tvary oběžných kol FT[5]

2.7 POUŽITELNOST VODNÍCH TURBÍN

Závislost nasazení vodních turbín v praxi ukazuje Obr. 6. Oblast použití základních typů turbín. Graf udává závislost H (m) a Q (m³/s). Z obrázku je patrné, že oblasti použitelnosti různých druhů vodních turbín se navzájem překrývají. To znamená, že v určitých lokalitách lze použít 2 typy vodních turbín. Výběr zaleží na mnoha faktorech: rozhodnutí projektanta, ekonomické záležitosti, ...



Obr. 6 Oblast použití základních typů turbín [9]



3 MODELOVÝ VÝZKUM

Modelové měření VT se provádí na zkušební stanici, v této publikaci budu uvažovat měření na modelu FT. Měření může probíhat jak v turbínovém a v případě reverzní turbíny i v čerpadlovém chodu.

3.1 TEORIE HYDRAULICKÉ PODOBNOSTI

Z mnohých jevů a zákonitostí hydromechaniky vyplývá, že je nelze vždy přesně matematicky popsat. Tam, kde lze za jistých zjednodušujících předpokladů sestavit odpovídající diferenciální rovnice jevu, je mnohdy obtížné najít obecný integrál nebo jeho řešení např. numerickou metodou je příliš složité. [1]

Modelový výzkum umožňuje vyřešení mnohých problémů a stanovení obecných vlastností určitého hydraulického systému na fyzikálních modelech, které charakterizují skutečné zařízení či stroj prototypu (díla). [1]

Výsledky měření na modelu, zpracované do výsledných charakteristik, se na základě teorie hydraulické podobnosti dají aplikovat na dílo. Důležitou podmínkou je dodržení geometrické, kinematické, a dynamické podobnosti modelu (M) a prototypu (P). [1]

Geometrická podobnost znamená: všechny rozhodující průtočné oblasti hydraulického profilu modelu a prototypu (rozměry, úhly), jsou úměrné součiniteli. [5]

V oboru VT se geometrická podobnost týká celého hydraulického profilu průtočných částí, které obecně zahrnují spirálu, prostor lopatek RK a OK, mezilopátkový prostor, sací troubu. [1]

Geometrická podobnost zahrnuje také dodržení ekvivalentních hydraulických ztrát (hlavně ztrát třením), tzn. dodržení drsnosti povrchu průtočných částí, vyjádřené poměrem relativních drsností. [1]

V praxi to znamená, že výroba modelové turbíny je velice přesná a náročná práce. Máme-li dodržet geometrickou podobnost třeba OK a na prototypu je předepsaná povrchová úprava broušení vyplývá z geometrické podobnosti, že OK modelu musí být leštěné.

Kinematická podobnost znamená: pohybové přemístění elementárních částic modelu a díla jsou paralelní a časové úseky jsou úměrné měřítku času. [1]

Prakticky to znamená, aby v odpovídajících si místech na modelu a prototypu byly hodnoty rychlostí ve stejném poměru a směry rychlostí svíraly se zvoleným směrem stejný úhel. [1]

Dynamická podobnost znamená: má-li být proudění fyzikálně podobné, musí jejich hlavní síly být ve stejném poměru. [1]

3.2 ZÁKLADNÍ PODOBNOSTNÍ ČÍSLA V OBORU HYDRAULICKÝCH STROJŮ

Vychází z Navier – Stokesovy rovnice, která popisuje proudění skutečné kapaliny při laminárním proudění. Rovnice popisuje silovou rovnováhu, ze které lze vyjádřit dynamickou podobnost.



$$F_m + F_p + F_t = F_{Sk} + F_{St}, \quad (4)$$

Jsou to bezrozměrná čísla, která vycházejí z poměrů různých typů sil v proudovém poli. Tato podobnostní čísla se používají při rozboru experimentálních výsledků modelování hydrodynamických jevů a k sestavení obecných závislostí (charakteristik) rozhodujících veličin, které vyjadřují podobnost zkoumaného jevu. [1]

3.2.1 REYNOLDSOVO ČÍSLO (Re) [1][5]

Vychází z poměru síly setrvačné F_s a síly třecí F_t , tzn., že charakterizují vliv vnitřního tření při proudění skutečné kapaliny.

$$Re = \frac{F_s}{F_t} = \frac{\rho \cdot L^2 \cdot v^2}{\eta \cdot L \cdot v} = \frac{L \cdot v}{\frac{\eta}{\rho}} = \frac{L \cdot v}{\nu} = \frac{D \cdot \sqrt{E}}{\nu} = \frac{D \cdot u}{\nu}, \quad (5)$$

3.2.2 EULEROVO ČÍSLO (Eu) [1][5]

Vychází z poměru tlakové síly F_p a setrvačné síly F_s , tzn., že charakterizuje podobnost hydrostatických tlaků v proudovém poli.

$$Eu = \sqrt{\frac{F_s}{F_p}} = \sqrt{\frac{\rho \cdot L^2 \cdot v^2}{p \cdot L^2}} = \frac{v}{\sqrt{\frac{p}{\rho}}} = \frac{\frac{Q}{L^2}}{\sqrt{E}} = \frac{Q}{D^2 \cdot \sqrt{E}}, \quad (6)$$

3.2.3 FROUDEOVO ČÍSLO (Fr) [1][5]

Vychází z poměru setrvačné F_s a tíhové síly F_g a charakterizuje proudění vlivem tíhových sil.

$$Fr = \sqrt{\frac{F_s}{F_g}} = \sqrt{\frac{\rho \cdot L^2 \cdot v^2}{p \cdot g \cdot L^3}} = \frac{v}{\sqrt{\frac{g}{L}}} = \sqrt{\frac{E}{g \cdot D}}, \quad (7)$$

3.2.4 STROUHALOVO ČÍSLO (Sh) [1][5]

Vychází z poměru hybnostní F_h a setrvačné F_s síly a charakterizuje podobnost neustáleného či vířivého proudění.

$$Sh = \frac{F_h}{F_s} = \frac{\rho \cdot L^3 \cdot \frac{v}{t}}{\rho \cdot L^2 \cdot v^2} = \frac{L \cdot v}{\frac{\eta}{\rho}} = \frac{1}{t} \cdot \frac{L}{v} = \frac{n \cdot D}{\sqrt{E}}, \quad (8)$$

V této zprávě jsou uvedeny pouze některé čísla. Další čísla jako jsou Weberovo „We“, Machovo „Ma“, ... jsou uvedeny v dalších literaturách. [1][4][5]

3.3 JEDNOTKOVÉ PARAMETRY PODOBNOSTI [5]

3.3.1 SYSTÉM ED

Charakteristiky stroje, které jsou sestaveny na základě výsledků měření na modelovém zařízení, vycházejí z bezrozměrných parametrů, které jsou vztaženy k měrné hydraulické energii stroje: $E=1$ (J/kg), k průměru oběžného kola: $D=1$ (m) a k hustotě: $\rho=1$ (kg/m³). Mezi jednotkové parametry, patří jednotkové otáčky „ n_{ED} “, jednotkový průtok Q_{ED} , jednotkový moment T_{ED} , jednotkový výkon P_{ED} a Thomovo číslo σ , přičemž u každé základní definice uvedeme přepočtové vztahy k jiným kritériím podobnosti.



JEDNOTKOVÉ OTÁČKY (SPEED FACTOR):

$$n_{ED} = \frac{n \cdot D}{\sqrt{E}} \quad (9)$$

JEDNOTKOVÝ PRŮTOK (DISCHARGE FACTOR):

$$Q_{ED} = \frac{Q}{D^2 \cdot \sqrt{E}} \quad (10)$$

THOMOVO KAVITAČNÍ ČÍSLO

$$\sigma = \frac{NPSE}{E} \quad (11)$$

3.3.2 SYSTÉM 11

Stále používané jednotkové parametry podobnosti, jsou parametry vztažené na spád: $H=1(\text{m})$ a průměr OK (na vstupní hraně věnce): $D \equiv D_{le}=1(\text{m})$.

JEDNOTKOVÉ OTÁČKY:

$$n_{11} = \frac{n \cdot D}{\sqrt{H}} \quad (12)$$

JEDNOTKOVÝ PRŮTOK:

$$Q_{11} = \frac{Q}{D^2 \cdot \sqrt{H}} \quad (13)$$

Výše uvedené jednotkové parametry jsou parametry hydraulicky podobného stroje o průměru OK $D=1\text{m}$ a spádu $H=1\text{m}$, což souvisí s označením indexů „11“. Takto definované parametry nejsou rozměrově homogenní, přesto si zachovávají svůj rozměr plynoucí z fyzikálního významu (jednotkové otáčky: 1/min, jednotkový průtok: m^3/s , jednotkový moment: N.m, jednotkový výkon: kW). Z hlediska matematické aplikace je však nutno je chápat jako veličiny bezrozměrné, protože jsou dynamickými kritérii podobnosti. Z tohoto důvodu je patrná výhoda nově definovaných jednotkových parametrů podle [6], která jsou fyzikálně i matematicky veličinami jednoznačně bezrozměrnými.

3.3.3 SHRUTÍ A PŘEPOČTOVÉ VZTAHY

V průmyslové praxi se stále používají staré jednotkové parametry Q_{11} a n_{11} více o jednotkových parametrech podobnosti v literatuře [1][4][6].

Pro úplnost dodávám tabulku bezrozměrných parametrů s přepočtovými vztahy.



Tab. 1 Definice bezrozměrných parametrů

systém: „ED“	systém: „nD“	původní systém: „11“
Jednotkový průtok: $Q_{ED} = \frac{Q}{D^2 \cdot \sqrt{E}} = \frac{Q_{nD}}{\sqrt{E_{nD}}}$	Průtokový součinitel: $Q_{nD} = \frac{Q}{n \cdot D^3} = \frac{Q_{ED}}{n_{ED}}$	Jednotkový průtok: $Q_{11} = \frac{Q}{D^2 \cdot \sqrt{H}}$
Jednotkové otáčky: $n_{ED} = \frac{n \cdot D}{\sqrt{E}} = \frac{1}{\sqrt{E_{nD}}}$	Energetický součinitel: $E_{nD} = \frac{E}{n^2 \cdot D^2} = \frac{1}{n_{ED}^2}$	Jednotkové otáčky: $n_{11} = \frac{n \cdot D}{\sqrt{H}}$
Jednotkový moment: $T_{ED} = \frac{T_m}{\rho \cdot D^3 \cdot E} = \frac{T_{nD}}{E_{nD}}$	Momentový součinitel: $T_{nD} = \frac{T_m}{\rho \cdot n^2 \cdot D^5} = \frac{T_{ED}}{n_{ED}^2}$	Jednotkový moment: $M_{11} = \frac{M}{\rho \cdot D^3 \cdot H}$
Jednotkový výkon/příkon: $P_{ED} = \frac{P_m}{\rho \cdot D^2 \cdot E^{1.5}} =$ $= Q_{ED} \cdot \eta_{hT} \text{ turbína}$ $= Q_{ED} / \eta_{hP} \text{ čerpadlo}$	Výkonový/příkonový součinitel: $P_{nD} = \frac{P_m}{\rho \cdot n^3 \cdot D^5} = \frac{T_{ED}}{n_{ED}^3}$	Jednotkový výkon/příkon: $P_{11} = \frac{P}{\rho \cdot D^2 \cdot H^{1.5}}$
Thomovo číslo: $\sigma = \frac{NPSE}{E} = \frac{\sigma_{nD}}{E_{nD}}$	Kavitační součinitel: $\sigma_{nD} = \frac{NPSE}{n^2 \cdot D^2} = \sigma \cdot E_{nD} = \frac{\sigma}{n_{ED}^2}$	Thomovo číslo: $\sigma = \frac{NPSH}{H}$
Měrné objemové otáčky: $n_{QE} = \frac{n \cdot Q^{0.5}}{E^{0.75}} = n_{ED} \cdot Q_{ED}^{0.5}$ $n_{QE} = 0,003 \cdot n_q$		Měrné objemové otáčky: $n_q = \frac{n \cdot Q^{0.5}}{H^{0.75}} = n_{11} \cdot Q_{11}^{0.5}$ $n_q = 332,5 \cdot n_{QE}$
Jednotkový krouticí moment: $T_{ED,i} = \frac{T_i}{\rho \cdot D^3 \cdot E}$	Součinitel kroutícího momentu: $T_{nD,i} = \frac{T_i}{\rho \cdot n^2 \cdot D^5}$	Jednotkový moment: $M_{11,i} = \frac{M_i}{\rho \cdot D^3 \cdot H}$
Jednotková síla: $F_{ED,i} = \frac{F_i}{\rho \cdot D^2 \cdot E}$	Součinitel síly: $F_{nD,i} = \frac{F_i}{\rho \cdot n^2 \cdot D^4}$	Jednotková síla: $F_{11,i} = \frac{F_i}{\rho \cdot D^2 \cdot H}$
Součinitel pulsací tlaku: $\tilde{p}_E = \frac{\tilde{p}}{\rho \cdot E}$		Měrné pulsace tlaku: $\bar{p} = \frac{\Delta p}{\rho \cdot g \cdot H}$



VYBRANÉ PŘEPOČTOVÉ VZTAHY:

Mezi jednotkovými parametry původního systému 11 a podle systému ED:

$$n_{11} = \frac{n \cdot D}{\sqrt{H}} = (60 \cdot \sqrt{g}) \cdot n_{ED} = K_n \cdot n_{ED} \quad (14)$$

$$Q_{11} = \frac{Q}{D^2 \cdot \sqrt{H}} = (\sqrt{g} \cdot Q_{ED}) = K_Q \cdot Q_{ED} \quad (15)$$

kde: přepočtové konstanty: $K_n = 60 \cdot g^{0,5}$; $K_Q = g^{0,5}$

3.4 VÝSLEDKY MĚŘENÍ NA MODELU

Z výsledků měření se zpracovávají charakteristiky, které přesně definují chování a vlastnosti VD. Charakteristiky se následně používají při projektování VE. Slouží jako podklad pro projektanty při výběru typu vodní turbíny na zvolené dílo.

V této zprávě se budou dále zmiňovat pouze charakteristiky. účinnostní a kavitační - všechny snímáče, konstanty, metody měření,... budou vztaženy pouze k prvním dvěma charakteristikám.

3.4.1 ENERGETICKÉ CHARAKTERISTIKY [5]

Které zahrnují účinnostní, průtokové a momentové závislosti pro volená otevření regulačních orgánů vlastního stroje (např. lopatek RK, OK, dýzy a regulační jehly). Viz. Příloha I

3.4.2 KAVITAČNÍ CHARAKTERISTIKY [5]

Které vyjadřují kavitační vlastnosti daného stroje. Viz. Příloha II

3.4.3 SILOVÉ A DYNAMICKÉ CHARAKTERISTIKY[5]

Např. axiálních a radiálních sil od rotoru HS, kroutících momentů na otočné lopatky OK, tlakové pulsace ve spirále či sací troubě, chvění důležitých částí stroje apod. Viz. Příloha III

3.4.4 ÚPLNÉ CHARAKTERISTIKY[5]

Např. čtyř-kvadrantové charakteristiky (ČT, AČ), které jsou nutné při řešení nestacionárních pochodů soustrojí (VT+G) konkrétního systému VE; tyto charakteristiky obsahují průtokové a momentové závislosti jednotlivých otevření regulačních orgánů i v přechodových (brzdových) oblastech, kterými nestacionární pochod může probíhat. Viz. Příloha IV



4 NÁVRH ZKUŠEBNÍ STANICE

Zkušební stanice může mít orientaci horizontální (ČDK Blansko Holding, a.s., VUT Brno) i vertikální (ČBE). Výsledná orientace turbíny na díle nemá vliv na orientaci měření na modelu. Na díle může být orientace turbíny vertikální a je možné ji měřit na horizontální stanici a obráceně (tohle platí pro FT a KP) naopak zkušební stanice pro PT musí být vertikální a horizontální.

Každá zkušební stanice nesmí negativně ovlivňovat měření.

Každá zkušební stanice se skládá z modelové turbíny, technologické částí (nádrže, potrubí, uzavěry,...), pohonů (motor co pohání čerpadla, dynamometr co brzdí turbínu, ...), snímačů (tlaku, síly, průtoku, ...), vyhodnocovacího zřízení (PC pro sběr dat, lidská obsluha).

4.1 SCHÉMA MĚŘICÍ TRATĚ

Jako příklad jsem zvolil schéma měřicí tratě ze zkušebny VÚVS - ČKD Blansko Holding pro zkoušení Francisových a Francisových reverzních turbín. Další schéma měřicí tratě lze najít v literatuře [1]

4.2 POPIS ZKUŠEBNÍHO OKRUHU

Zkušební okruh (viz. Příloha XI) se skládá z:

- dvou horizontálních čerpadel (10) poháněných stejnosměrným motorem s max. příkonem 1600 kW
- sacího kotle (8) o průměru 2600 mm a objemu 32,5 m³
- systém pro změnu tlaku v sacím kotli, atmosférický tlak, přetlak (11) a podtlak (12);
- měřicího úseku s průtokoměrem KROHNE (5)
- zkušebního rámu, na kterém je instalován model (1) a horizontální dynamometr (2)
- sací jímky (13)
- místnost s řídícím PC a měřícím PC

4.3 PARAMETRY MĚŘICÍ TRATĚ

Parametry jsou voleny pro zkušebnu ČKD Blansko Holding, a.s. vesměs jsou parametry ostatních zkušeben podobné. Pro názornost udávám parametry další zkušebny.

ČKD BLANSKO HOLDING:

- | | |
|--------------------------------|-----------------------------------|
| • maximální spád | 75 m |
| • maximální průtok | 1 m ³ .s ⁻¹ |
| • maximální výkon dynamometru | 270 kW |
| • maximální otáčky dynamometru | 1600 ot.min ⁻¹ |



ČKD BLANSKO ENGINEERING:

- maximální spád 120 m
- maximální průtok $1,2 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
- maximální výkon dynamometru 300 kW
- maximální otáčky dynamometru $2000 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$



5 ZÁKLADNÍ ÚDAJE MODELU

Pro přesné měření a další vyhodnocení je důležité znát co nejpřesněji všechny údaje modelu, co vystupují v měření a následném vyhodnocení dat.

5.1 MODELOVÉ ZKOUŠKY

Modelové zkoušky mají být v souladu s doporučeními normy: **ČSN EN 60193**. Geometrickou podobnost je nezbytné dodržet mezi M a P v celém tzv. hydraulickém profilu.

5.2 PARAMETRY OK

- Maximální průměr (po labyrinty): $D_{\max}$
- Vstupní průměr (index „1“) na věnci (index „e“): $D_{1e} \equiv D_1$
- Vztažný průměr OK – resp. výstupní průměr (index „2“) na věnci: $D_{2e} \equiv D$

5.3 RE-ČÍSLO MODELU

$$Re = \frac{u \cdot D}{\nu} = \frac{\pi \cdot D^2 \cdot n}{60 \cdot \nu} \quad (16)$$

5.4 FYZIKÁLNÍ KONSTANTY ZKUŠEBNY

5.4.1 TÍHOVÉ ZRYCHLENÍ

Tíhové zrychlení lze získat dvěma základními způsoby a to vypočítat z níže uvedeného vzorce, anebo si je nechat změřit například od ČMI, nebo od jiného subjektu, který má na tohle měření akreditaci.

$$g = 9,7803 \cdot (1 + 0,0053 \cdot \sin^2 \varphi) - 3 \cdot 10^{-6} \cdot z \quad (17)$$

5.4.2 HUSTOTA VODY

Jako u tíhového zrychlení, lze hustotu vody vypočítat, anebo změřit (ČMI). Hodnoty hustoty vody pro konkrétní teplotu vody lze najít v [6] - příloha B, tabulka B. 2, str. 197

$$\rho \equiv \rho_w = \sum_{i=0}^3 a_i \cdot t_w^i \quad (18)$$

kde: a_i konstanty polynomu 3.stupně:

VUT Brno: $a_0=1002$; $a_1=-0,2716$; $a_2=0,01047$; $a_3=-0,00027$

Další polynomy pro výpočet hustoty vody udává ČBE, ČMI, ...

5.4.3 TLAK NASYCENÝCH PAR VODY

$$p_{VA} = 10^{(2,7862+0,0312 \cdot t_w - 0,000104 \cdot t_w^2)} \quad (19)$$

Hodnoty lze také najít v [6] - příloha B, tabulka B.4str.200



5.4.4 KINEMATICKÁ VISKOZITA

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} = e^{\left(-16,921 + \frac{396,13}{107,41 + t_w}\right)} \quad (20)$$

Hodnoty lze také najít v [6] - příloha B, tabulka B.3str. 199

5.4.5 OBSAH PLYNU VE VODĚ

Voda obsahuje plyny (vzduch, oxid uhličitý CO₂) a to v rozpuštěné a nerozpuštěné formě – blíže viz. [6]

5.5 VZTAŽNÉ PRŮŘEZY MĚRNÉHO ÚSEKU

Plocha vysokotlakého průřezu: A_1

Plocha nízkotlakého průřezu: A_2



6 VELIČINY

6.1 OBJEMOVÝ PRŮTOK

Definice: Objem vody, který proteče za jednotky času libovolným průřezem systému. [6]

Průtok je měřen indukčním průtokoměrem (IP). (V případě, že není možné z nějakého důvodu použít IP, je možné použít Venturiho trubici, avšak tento způsob měření průtoku se již téměř nepoužívá). Další variantou je Ultrazvukový průtokoměr.

Systematická relativní nejistota měření objemového průtoku je $\pm 0,2\%$.

Pro měření lze použít například indukční průtokoměr Krohne Optiflux 2000 se zesilovačem IFC 300W (DN 400, 0-4000 m³/h).



Obr. 7 Indukční průtokoměr

6.2 TLAKOVÉ PARAMETRY

6.2.1 SPÁD / DOPRAVNÍ VÝŠKA MODELU (TURBÍNY ČI ČERPADLA V PŘÍPADĚ MODELU ČT)

Jedná se o měření diferenčního tlaku mezi vztažným průřezem vysokotlakým (index „1“) a nízkotlakým (index „2“), systematická relativní nejistota: $\pm 0,1\%$.

Pro měření lze použít například snímač diferenčního tlaku Rosemount 2051 CD (0-250 kPa).



Obr. 8Diferenční snímač tlaku

6.2.2 TLAK NA NÍZKOTLAKÉ STRANĚ MODELU

Tlak vztažený k atmosférickému tlaku okolí ve vztažném průřezu „2“ (na nízkotlaké straně) systematická nejistota měření tlaku je: $\pm 0,15$ %.

Pro měření lze použít například snímač absolutního tlaku BD Senszors DMP 331 (0-250 kPa).

6.2.3 ATMOSFÉRICKÝ TLAK

Okolní tlak je měřen absolutním tlakoměrem, jehož systematická nejistota měření atmosférického tlaku je: $\pm 0,3$ %.

6.3 TEPLOTA TEKUTIN

6.3.1 TEPLOTA VZDUCHU

Teplota vzduchu je měřen platinovým teploměrem, třídy přesnosti: $\pm 0,1\%$. Pro měření teploty vzduchu se dá použít platinový teploměr PTP10 (Rawet).

6.3.2 TEPLOTA VODY

Teplota vody je měřen také platinovým teploměrem, třídy přesnosti: $\pm 0,1\%$.

Pro měření lze použít ZPA - PT 100 + převodník Rawet PP 200 (0-30°C).



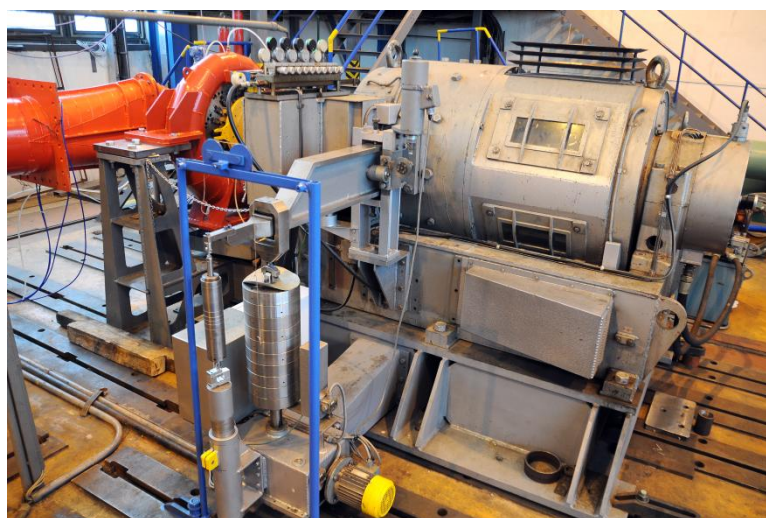
Obr. 9 Snímač teploty PT100

6.4 KROUTICÍ MOMENT NA HŘÍDELI MODELU

Lze měřit dvěma způsoby nepřímou: siloměrnou krabicí na rameni dynamometru, zde se přímo měří tahová a tlaková složka síly a krouticí moment se vypočítává a přímo kde je krouticí moment měřen přímo snímačem krouticího momentu, který je vložen mezi model a motor.

NEPŘÍMÁ:

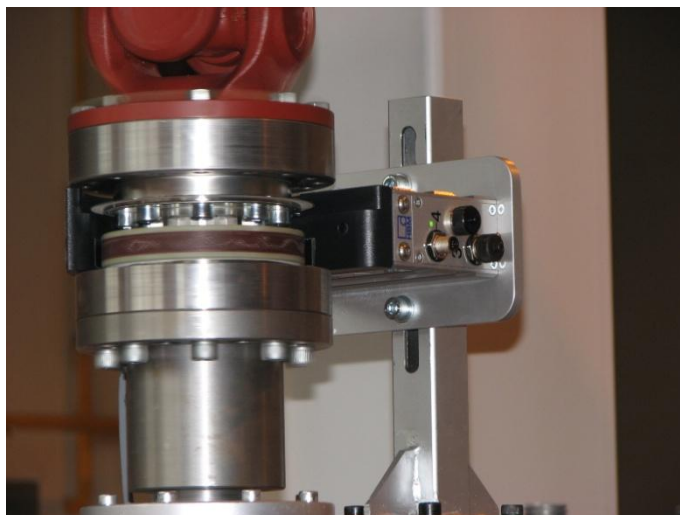
Krouticí moment je měřen (jako reakční moment) stejnosměrným dynamometrem, který má výkyvný stator a je uložen na hydrostatických ložiskách. Rameno dynamometru je spojeno s dovažovacím zařízením a tensometrickým snímačem síly (HBM - S2, který je propojen s digitálním kompenzátorem. Systematická relativní nejistota: $\pm 0,1\%$. Tento způsob měření využívá ČKD Blansko Holding.



Obr. 10 Snímač síly a dynamometr

**PŘÍMÁ:**

Snímač (HBM - T12) je umístěn mezi měřeným modelem a stejnosměrným motorem. Má podobu spojky, která je dynamicky vyvážená a s modelem je spojen kardanovou tyčí. Snímač využívá pro přenos z rotující části kroužkové sběrače. Systematická relativní nejistota: $\pm 0,1\%$. Tento způsob měření využívá ČKD Blansko Engineering.



Obr. 11 Snímač krouťicího momentu

6.5 OTÁČKY MODELU

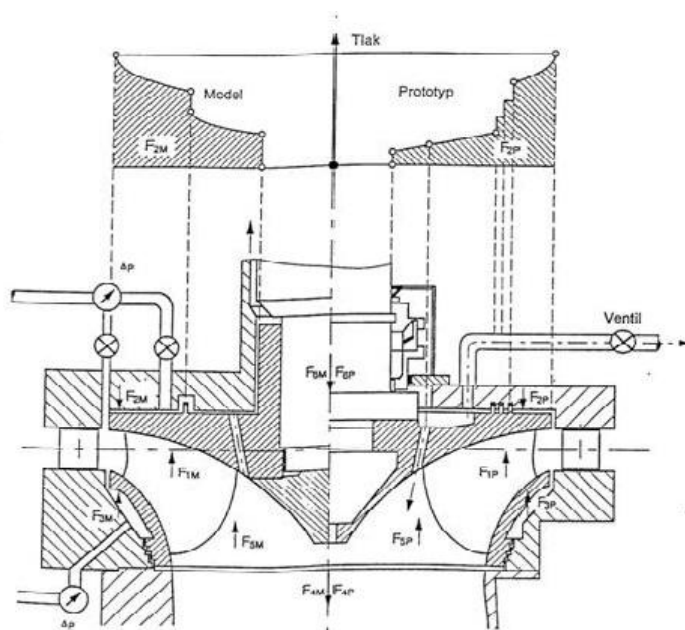
Otáčky na hřídeli modelu se měří fotoelektrickým čítačem impulsů, třídy přesnosti: $\pm 0,1\%$.

6.6 DYNAMICKÉ PARAMETRY**6.6.1 AXIÁLNÍ SÍLA**

Systém přímého měření axiální síly je navržen tak, aby axiální síla byla měřena v obou směrech, tzn. směrem do sací trouby i směrem k dynamometru.

V případě horizontálního uspořádání hřídele modelu jsou axiální složky tíhové a vztlakové síly OK nulové.

Pro nepřímé určení hydraulické síly se na modelu musí instalovat čtyři tlakové odběry. Jak udává Obr. 12



Legenda:

- F_1 – je hydrodynamická síla působící na průtočné části OK, která je stanovena měřením, přičemž jednotlivé složky F_2 až F_6 se odečtou od axiálního tahu modelu (F_{aM});
- F_2 – je síla působící na náboj OK, určená z tlakového paraboloidu (není u axiálních strojů);
- F_3 – je síla působící na věnec OK, určená také z tlakového paraboloidu (není u axiálních strojů);
- F_4 – je tíha OK, stanovena vážením (u šikmého uspořádání hřídele se uvažuje pouze axiální složka);
- F_5 – je vztlaková síla na OK, stanovena z objemu OK ($F_c = V \cdot \rho_w \cdot g$);
- F_6 – je hydrostatická síla působící na hřídel, resp. síla na plochy vystavené atmosférickému tlaku.

Obr. 12 Jednotlivé složky axiálního tahu působící na radiální stroj[5]

6.6.2 TLAKOVÉ PULZACE VE SPIRÁLE A V KUŽELU SACÍ TROUBY

Tlakové pulsace jsou snímány a vyhodnocovány speciálním počítačem, který není závislý na hlavním měřicím PC. Speciální počítač digitalizuje signál a hledá maxima a minima tlakových pulsací, přičemž výběr hodnot rozkmitu (špička – špička) je ohraničen šířkou intervalu spolehlivosti (95%). Malé oscilace, které leží v mrtvém pásmu a představují šum, jsou zanedbány.



7 SNÍMAČE SENZORY

Senzor je 1. vstupní blok měřicího řetězce, který je v přímém styku s měřeným prostředím. Někdy se slučuje ještě s transformačním a přenosovým členem – pak jej nazýváme převodník (např. převodník teploty v sobě zahrnuje odporový snímač, můstek a zesilovač s výstupem 4 až 20 mA)

Senzory se využívají ke dvěma základním účelům k získávání dat a k jejich následnému vyhodnocení. Např. sbírání dat ve zkušebních zařízeních (zkoušení vodních turbín, zkoušení motorů). A k automatickému řízení, kde senzory snímají požadované veličiny, podle kterých se následovně řídí a reguluje (zpětná vazba) řídicí řetězec.

Senzor snímá měřenou většinou neelektrickou veličinu a převádí ji na měřitelnou (většinou elektrickou) veličinu. Přenos provádí pomocí napětí 0-10 V (aktivní) a pomocí proudu 4-20 mA (pasivní) – což znamená, že senzor musí být napájen externě.

7.1 ROZDĚLENÍ SNÍMAČŮ [1]

7.1.1 AKTIVNÍ

Ve kterých vzniká měrný signál přímo ve snímači, bez vnějšího zdroje energie.

INDUKČNÍ

Na principu indukce elektromagnetické síly v cívce snímače při změně magnetického toku v magnetu, např. pro měření vibrací, mechanického napětí, úhlové rychlosti, průtoku.

TERMoeLEKTRICKÉ

Na principu termoelektrického jevu ve styku dvou kovů, vyvolávající rozdíl potenciálů, např. pro měření teplot.

7.1.2 PASIVNÍ

U kterých měřená veličina prostřednictvím čidla působí na elektrický proud nebo napětí v měřicím obvodu, musí být napájeny z vnějšího zdroje.

ODPOROVÉ

Na principu změny elektrického odporu (např. deformační tenzometry) pro měření napětí.

INDUKČNÍ

Na principu změny indukce, pro měření neelektrických veličin např. tlakové síly, kroutícího momentu, tlaku, průtoku.

KAPACITNÍ

Na principu změny kapacity, která mění impedanci obvodu pro měření např. polohy hladiny.

7.2 KALIBRACE

Je soubor úkonů, které dávají za určených podmínek závislost mezi hodnotami indikovanými měřicím přístrojem a mezi hodnotou realizovanými referenčním etalonem. Kalibrace se provádí u etalonu a pracovních měřidel. Může ji provádět akreditovaná zkušební laboratoř,



není však podmínkou. Stačí, aby vlastnila referenční etalon s platným kalibračním listem a odpovídající prostory, zařízení a kvalifikované pracovníky. [3]

7.2.1 KALIBRACE PRŮTOKOMĚRU

Kalibrace IP se provádí statickou hmotnostní metodou, která spočívá z měření hmotnosti vody m o hustotě ρ_w načerpávané do kalibrační nádrže po dobu plnění τ , přičemž hmotnost vody vychází z měření tíhové síly F_g . Celková systematická nejistota měření průtoku pomocí kalibračního systému je např.: $\pm 0,15 \%$. Výsledkem je kalibrační list, ve kterém je tabulka průtoků a chyb. Korekci lze provést v zesilovači IP, a nebo kalibraci zavést do výpočtů ve vyhodnocení naměřených hodnot.

7.2.2 KALIBRACE SILOVÝCH VELIČIN

Kalibrace siloměrné krabice se provádí přesně změřenými závažími na protírání dynamometru. Vytvoří se kalibrační křivka, ze které se vypočítá směrnice přímky a tímto koeficientem se násobí naměřená síla. Dále se dělá hystereze siloměrné krabice.

Kalibrace snímače krouticího momentu se provádí ve výrobním závodě HBM v Německu.

7.2.3 KALIBRACE TLAKOVÝCH VELIČIN

Kalibraci lze provést buďto multifunkčním kalibrátorem (Beamex MC5), a nebo se nechá přístroj nakalibrovat v nějaké externí kalibrační laboratoři (ČMI). Kalibrace se provádí vzduchem.

Výsledkem je kalibrační list, který udává závislost tlaku na proudu, nebo napětí.

7.2.4 DALŠÍ KALIBRACE

- Kalibrace teploměrů
- Kalibrace proudové smyčky

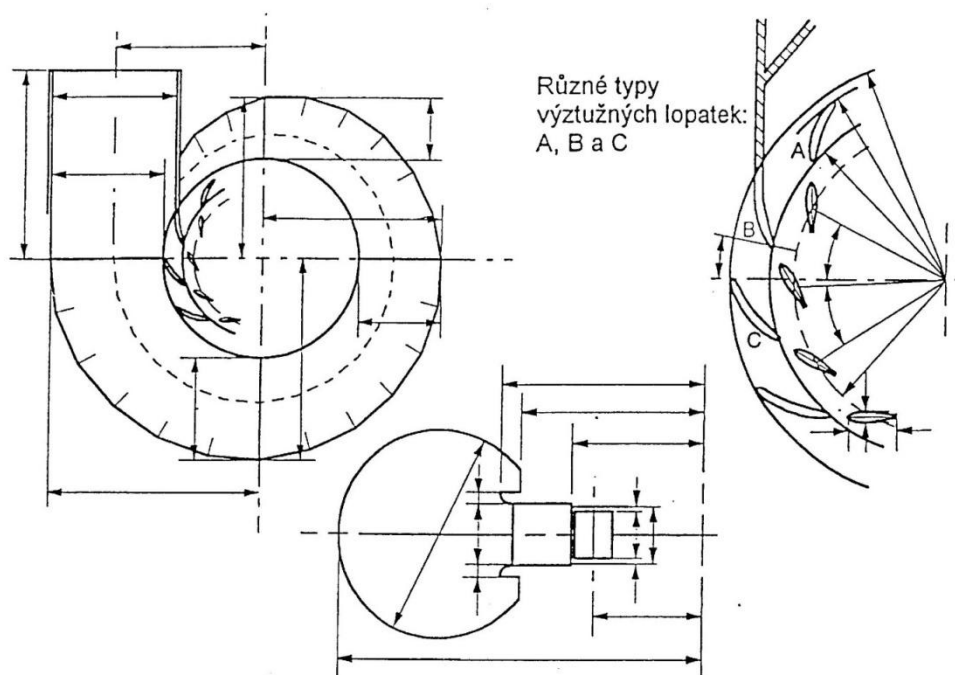
8 MĚŘENÍ JAK PROBÍHÁ

8.1 PŘÍPRAVA NA MĚŘENÍ

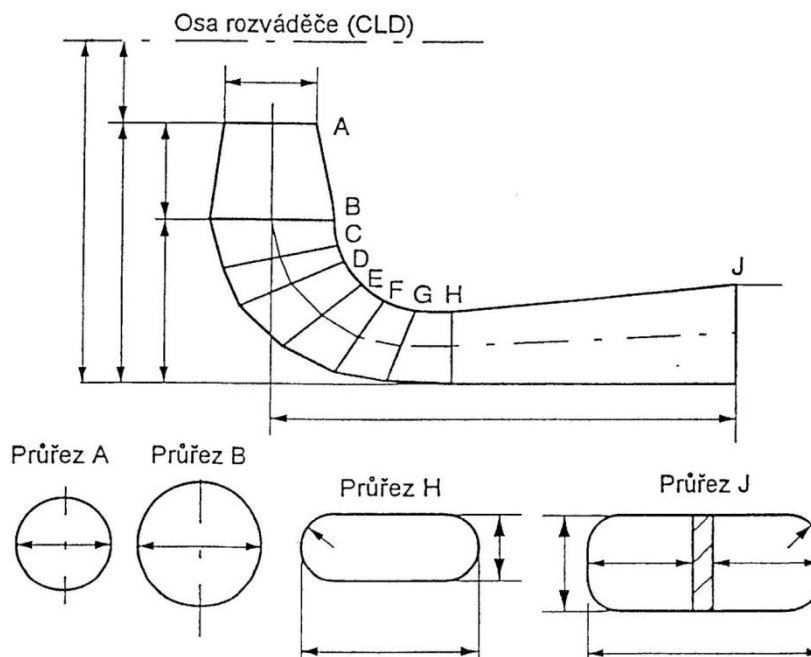
8.1.1 ROZMĚROVÁ KONTROLA [6]

ÚČEL ROZMĚROVÉ KONTROLY

- Zjištění hlavních rozměrů modelu a prototypu
- Kontrola jednotnosti tvaru M a P a jejich periodicky se opakujících součástech, tj. porovnání relativních úchylek mezi jednotlivými hodnotami a odpovídající střední hodnotu
- Kontrola geometrické podobnosti mezi prototypem a modelem, tj. porovnání relativních úchylek mezi střední hodnotou prototypu a odpovídající střední hodnotou modelu násobenou měřítkem λ_L .



Obr. 13 Příklad kontrolovaných rozměrů spirály a rozvaděče



Obr. 14 Příklad kontrolovaných rozměrů sací trouby

METODY

K měření tvaru oběžných, rozváděcích a výztužných lopatek jsou vhodné různé způsoby, včetně třísořadnicových měřicích přístrojů, optických měřicích systémů, šablon, atd..

Kontrola podobnosti hydraulických profilů pomocí třísořadnicových měřicích přístrojů nebo optických systémů se může provádět buď měřením bodů na křivkách, nebo na plochách:

- Měření na křivkách je ekvivalentní kontrole pomocí šablon, užití této metody a interpretace výsledků je podobné současně převažujícímu používání mechanických šablon.
- Měření na plochách znamená změření dostatečného počtu bodů, které definují celý profil, toto měření může být provedeno pro souřadnice, které jsou pro model a prototyp nebo jsou libovolné. Počítačový program musí najít takovou „plochu“, která zajišťuje minimální „odchylky“ naměřených hodnot od této výsledné plochy. Takové ustanovení plochy je však omezeno přípustnými tolerancemi.

8.1.2 VHODNÁ VOLBA A KALIBRACE SNÍMAČŮ

Pro správné měření musí být vhodně zvoleny snímače s dostatečným rozsahem a přesností měření.

Před začátkem měření musí být všechny použité snímače nekalibrované a mít platné kalibrační listy. Viz. Příloha V



8.2 ÚČINNOSTNÍ MĚŘENÍ

8.2.1 POSTUP PRO ÚČINNOSTNÍ MĚŘENÍ

Před začátkem měření musí být turbína dokonale odvzdušněná a voda zbavená nečistot. Měření probíhá za konstantní hladiny v sacím kotli (hladina je cca. 700 mm až 500 mm od vrcholu sacího kotle), sací kotel je otevřen do atmosféry. Nastaví se konstantní a_0 na rozvaděči turbíny. Většinou se nastavují sudá čísla. Na čerpadle M103 se nastavuje konstantní spád turbíny (obvykle 15 až 25 m). Minimální spád pro měření FT je dán [6] a je 10m. Na dynamometru se nastavují otáčky dynamometru a tím se nastavují proměnlivé jednotkové otáčky n_{11} . Jeden krok je $n_{11}=5$. Zároveň s n_{11} se automaticky mění i Q_{11} . Jedno měření probíhá 2 minuty při vzorkovací frekvenci 70 Hz, za tuto dobu měřicí program nasbírá 8400 hodnot, ze kterých se vypočítá střední hodnota.

Po naměření všech potřebných bodů pro vytvoření charakteristiky se vytvoří provizorní účinnostní charakteristika. Pokud je nějaký bod špatně změřen, tak se měření v tomto bodě zopakuje a vyhodnotí se. Také se najde oblast s největší účinností, ve které leží bod s maximální účinností. U tohoto bodu se provede tzv. statistické měření bodu s maximální účinností. Je také možné v oblast s největší účinností zahustit krok n_{11} . Doba měření účinnostního měření je velice individuální, ale pohybuje se v rozmezí 40 až 50 hodin.

Zde je uveden pouze stručný návod na účinnostní měření, měření je velice individuální podle požadavků měření.

8.2.2 VÝPOČETNÍ VZORCE POTŘEBNÉ PRO ÚČINNOSTNÍ MĚŘENÍ

SPÁD

$$H = \frac{dP}{\rho_w \cdot g} + \frac{\left(\frac{Q}{A_1}\right)^2}{2 \cdot g} - \frac{\left(\frac{Q}{A_2}\right)^2}{2 \cdot g} \quad (21)$$

KROUTICÍ MOMENT OBĚŽNÉHO KOLA

$$T_M = T + T_{LM} \quad (22)$$

KROUTICÍ MOEMNT NA HŘÍDELI

$$T = (g \cdot i \cdot m_d \cdot R_{dr}) + [(F - F_0) \cdot R_{mr}] - (g \cdot m_k \cdot R_{kr}) \quad (23)$$

MECHANICKÝ VÝKON

$$P = 2 \cdot \pi \cdot n \cdot T_M \quad (24)$$

HYDRAULICKÝ VÝKON

$$P_H = \rho_w \cdot g \cdot H \cdot Q \quad (25)$$

ÚČINNOST

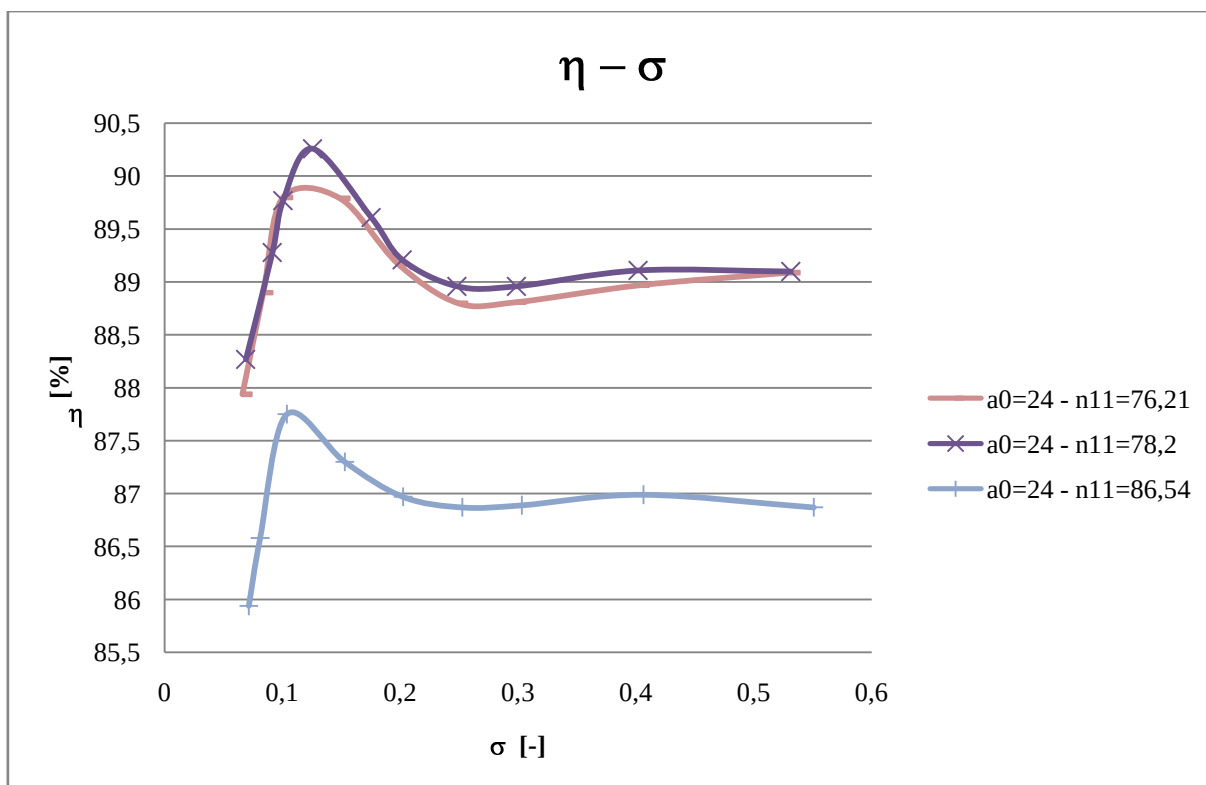
$$\eta = \frac{P}{P_H} 100 \quad (26)$$



8.3 KAVITAČNÍ MĚŘENÍ

8.3.1 POSTUP PRO KAVITAČNÍ MĚŘENÍ

Měření probíhá obdobně jako účinnostní měření. Trať musí být dokonale odvzdušněná, konstantní hladina v sacím kotli, jako u činnostního měření. Všechny armatury na sacím kotli jsou uzavřeny. Nastaví se konstantní a_0 na rozvaděči turbíny. Na čerpadle M103 se nastaví konstantní spád turbíny (obvykle 20 až 40 m). Minimální spád pro měření kavitace FT je 20m (pokud by byl spád nižší, nemuselo by se dosáhnout poklesu účinnosti). Na dynamometru se nastaví konstantní otáčky dynamometru a tím konstantní n_{11} . Pro konstantní a_0 a n_{11} se mění tlak v kotli, respektive se vyvozuje podtlak za pomoci vývěv. Rozsah podtlaku od 0 do -8m. Při změně podtlaku se mění Thomův kavitací součinitel (σ). Při měření se vytváří tzv. strhávací křivky. Při strhávacích křivkách je pro určité σ účinnost konstantní, jak dále klesá σ , dojde k mírnému nárůstu η a při dalším poklesu σ k prudkému poklesu η až o 2%. Z důvodů ne moc příznivého chování turbíny při kavitaci je možné zmenšit čas měření jednoho bodu ze dvou na jednu minutu. Jelikož je měření několikanásobně časově náročnější než účinnostní měření neprovádí se měření celé charakteristiky, ale pouze v některých oblastech účinnostní charakteristiky.



Graf 1 Ukázka strhávacích křivek

8.3.2 VÝPOČETNÍ VZORCE PRO KAVITAČNÍ MĚŘENÍ

THOMOVO ČÍSLO

$$\sigma = \frac{\frac{(p_{abs2} - p_{VA})}{\rho_w \cdot g} + z_{2A} + \frac{\left(\frac{Q}{A_2}\right)^2}{2 \cdot g}}{H} \quad (27)$$



Obr. 15 Ukázka kavitačního copu při kavitačním měření

8.4 PRŮBĚŽNÉ OTÁČKY

Jsou nejvyšší možné otáčky soustrojí. Nastávají např. při poruchovém odstavení soustrojí a současném selhání regulace rychlosti.

8.5 MĚŘENÍ ZTRÁTOVÉHO MOMENTU T_{LM}

Stanovení mechanického třecího momentu ložiska a ucpávky ložiskového tělesa se provádí odděleným měřením, při podmínkách zatížení a mazání, které odpovídají vlastním modelovým zkouškám. Pro vyvození axiální síly na ložiskové těleso se používá zvláštní zařízení, které se skládá ze statoru, disku a víka, přičemž změnou parametrů čerpadla, kterým se přivádí tlaková voda protékající přímým labyrintem, se mění axiální síla. Při kalibračním měření se hřídel ložiskového tělesa otáčí s diskem, který vyvozuje axiální tah. Určuje se ztrátový moment M_{L1} (ložiska, hřídelové ucpávky, disku), třecí moment ucpávky M_{L2} při nezatížených ložisech (bez disku) a třecí ztráty disku M_d .

Výsledný třecí moment:

$$M_{LM(n;F_{ax})} = M_{L1}(n;F_{ax}) - M_{L1}(n;0) - M_{L2}(n) \quad (28)$$



9 VYHODNOCENÍ DAT

9.1 TABULKY

Aby byly výsledky měření kompletní, je jako jeden ze základních výsledků měření tabulka naměřených hodnot. Viz. Příloha VI a VII

9.2 ÚČINNOSTNÍ CHARAKTERISTIKA

Výsledná charakteristika, zpracovaná jako produkt experimentálního modelového výzkumu, zahrnuje závislosti, které vyjadřují energetické (účinnostní) vlastnosti.[1]

Vyjadřují závislosti hydraulických účinností, průtoků, otáček rotoru vč. otáček průběžných, krouticích momentů aj., pro jednotlivá otevření regulačního orgánu FT - lopatek RK: a_0 . [5]

Energetické charakteristiky HS odpovídající rychloběžnosti jsou podkladem pro návrh velikosti prototypu a určení provozní oblasti stroje, daného požadovaným spádovým a výkonovým rozsahem. [5]

Modelová účinnostní charakteristika FT je dána touto závislostí:

$$[Q_{11} \uparrow \rightarrow n_{11} = f(a_0, \eta_h)], \text{ pro: } (D_M, n_s) = \text{konst} [1]$$

Viz. Příloha VIII

Z účinnostní charakteristiky je patrné, že vlastní turbínová oblast pro „ $M > 0$ “ je omezena tzv. křivkou **průběžných otáček**, na které je „ $\eta_h = 0, M = 0$ “. Za touto křivkou je tzv. oblast rozptylu (disipace) energie, která je dána brzdnými (zápornými) hodnotami momentů na hřídeli OK „ $M < 0$ “. Na křivce průběžných otáček dosahuje odlehčená FT, při „ $a_{0\max} = \text{konst}$ “, maximálních průběžných otáček „ $n_{p(\max)}$ “, které jsou podkladem pro dimenzování rotoru soustrojí. Na této křivce dosahuje odlehčené soustrojí maximální přechodové hodnoty otáček „ $n_{(\max)}$ “, které jsou mj. předmětem garancí.

Dalším významným bodem v charakteristice je tzv. **optimální bod** s maximální hydraulickou účinností „ $\eta_{h(\max)}$ “ který udává optimální jednotkové parametry průtoku a otáček „ $Q_{11(\text{opt})}, n_{11(\text{opt})}$ “. Tyto optimální hodnoty jsou podkladem k určení návrhového bodu N prototypu daného díla, ze kterého vychází jeho základní parametry ($\varnothing D, n, \eta_h, P$).

Do modelové charakteristiky je možné zakreslit tzv. **provozní oblast**. Tato oblast zahrnuje jednak garantovaný spádový rozsah „ $<H_{\min}, H_{\max}>$ “, který je v charakteristice vymezen rozsahem jednotkových otáček „ $<n_{11(\min)}, n_{11(\max)}>$ “, a jednak požadovaným výkonovým rozsahem „ $<P_{\max}, P_{\min}>$ “, který je vymezen rozsahem „ $<Q_{11(\max)}, Q_{11(\min)}>$ “.

V charakteristice VT jsou také tzv. přechodové oblasti, což jsou oblasti, kterými prochází okamžitý (přechodový) stav stroje, vyvolaný nestacionárním pochodem, např. při najíždění soustrojí do provozu či při jeho odstavení z provozu. [1]



9.3 KAVITAČNÍ CHARAKTERISTIKA

Vyjadřují kavitační vlastnosti HS. Jsou podkladem pro určení vztažné roviny prototypu, resp. pro určení instalované sací výšky vzhledem k minimální provozní hladině v dolní nádrži (DN) tak, aby kavitační poměry prototypu byly přijatelné a odpovídaly požadovaným hodnotám. [5]

Kavitační charakteristiky, vyjadřující kavitační vlastnosti HS, jsou u VT většinou specifikovány (σ). Kavitační charakteristiky VT jsou ve většině případů dány závislostí jednotkových průtoků (Q_{11}) na jednotkových otáčkách (n_{11}), s parametrickými křivkami kavitačního součinitele (σ). Většinou jsou vynášeny křivky kritických hodnot kavitačního součinitele „ $\sigma_k \equiv \sigma_1$ “, který odpovídá trvalému poklesu hydraulické účinnosti o (–2%): [5]

Modelová kavitační charakteristika FT je dána touto závislostí:

$$[Q_{11} \uparrow \rightarrow n_{11} = f(\sigma_k)] \text{ [5]}$$

Viz. Příloha IX

9.4 SBĚR DAT A VYHODNOCENÍ CHYB A NEJISTOT MĚŘENÍ

Zkušební stanice je vybavena automatickým sběrem dat a vyhodnocováním měřených veličin, které jsou řízeny počítačem. Vlastní měřicí systém zahrnuje: PC počítač, tiskárny, měřicí karty, snímače a sběrnice. Měřicí program je podporován standardními softwary (např. NextView, LabView aj.).

Měřicí vybavení zkušebny je otevřený a volně rozšiřitelný systém, pracující na digitální bázi s inteligentní centrální měřicí ústřednou. Tato ústředna je napojena na počítačový systém vybavený inteligentním a výkonným softwarem pro zpracování výsledků měření, s vysokým stupněm automatizace.

Vyhodnocení provádí obsluha. Export dat je možný do dalších programů (zejména do MS Exel)

Výstupní signály každé měřené veličiny (průtok, spád, otáčky, atd.) jsou měřeny n-krát v určitém časovém intervalu. Střední hodnota těchto signálů je pak nejlepší odhad skutečné hodnoty měřené veličiny.

9.4.1 NÁHODNÁ NEJISTOTA ZKOUŠKY

Při stálých provozních podmínkách.

Opakovaná měření v jednom bodě budou vykazovat rozdíly v měřeních. Střední hodnota výstupních signálů je lepší odhad skutečné hodnoty, než každé jednotlivé měření.



9.4.2 STŘEDNÍ HODNOTA MĚŘENÉ VELIČINY

Přesnost střední hodnoty měřené veličiny $\bar{Y}$ závisí na celkovém počtu měření n proměnné veličiny Y (hodnota získaná i -tým měřením Y_i) a na jejich jednotlivých odchylkách od střední hodnoty (rozptylu):

$$\bar{Y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_i \quad (29)$$

Je možné statisticky vypočítat nejistotu měření proměnné veličiny, je-li příslušná chyba čistě náhodné povahy. Proto se určuje směrodatná odchylka podle [6] při intervalu spolehlivosti 95%.

9.4.3 SMĚRODATNÁ ODCHYLKA

$$S_Y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}{n - 1}} \quad (30)$$

kde: $(n-1) \equiv v$ je počet stupňů volnosti.

9.4.4 HODNOTA STUDENTOVA ROZDĚLENÍ

Na základě stupně volnosti v , se určí hodnota Studentova rozdělení t nebo podle empirického vztahu.

$$t = 1,96 + 2,36v^{-1} + 3,2v^{-2} + 5,2v^{-3,84} \quad (31)$$

9.4.5 VÝBĚROVÁ SMĚRODATNÁ ODCHYLKA STŘEDNÍ HODNOTY

Náhodná chyba výsledku se může zmenšit provedením co největšího počtu měření proměnné veličiny a použitím výběrové směrodatné odchylky střední hodnoty.

$$\bar{S}_Y = \frac{S_Y}{\sqrt{n}} \quad (32)$$

9.4.6 NÁHODNÁ NEJISTOTA

Náhodná nejistota ve spojitosti se střední hodnotou při 95% spolehlivosti, určuje maximální přípustné hodnoty nejistoty, které jsou dohodnuty před zkouškou:

$$e_r = \pm t \cdot \bar{S}_Y \quad (33)$$

Rozsah hodnot, ve kterém musí ležet skutečná hodnota veličiny je: $(\bar{Y} \pm e_r)$.

9.4.7 NEJISTOTA STANOVENÍ ÚČINNOSTI MODELU

Celková relativní nejistota stanovení účinnosti modelu je určena ze systematických a náhodných relativních nejistot měřených veličin.



9.4.8 SYSTEMATICKÉ RELATIVNÍ NEJISTOTY

Relativní systematické nejistoty f_{sx} jsou stanoveny kalibrací nebo třídou přesnosti použitých přístrojů a jejich instalací v daném měřicím systému. Zahrnují nejistoty spádu či dopravní výšky f_{sH} , průtoku f_{sQ} , kroutícího momentu f_{sM} a otáček rotoru f_{sn} , takže systematická nejistota stanovení účinnosti:

$$f_{s\eta} = \pm \sqrt{(f_{sH}^2 + f_{sQ}^2 + f_{sM}^2 + f_{sn}^2)} \quad (34)$$

9.4.9 NÁHODNÉ NEJISTOTY MĚŘENÍ HODNOT

Náhodná nejistota f_{rx} každé měřené hodnoty odpovídajících veličin se vyhodnocuje statistickou metodou, přičemž náhodná nejistota stanovení účinnosti:

$$f_{r\eta} = \pm \sqrt{(f_{rH}^2 + f_{rQ}^2 + f_{rM}^2 + f_{rn}^2)} \quad (35)$$

9.4.10 CELKOVÁ NEJISTOTA STANOVENÍ ÚČINNOSTI

$$f_{\eta} = \pm \sqrt{(f_{s\eta}^2 + f_{r\eta}^2)} \quad (36)$$

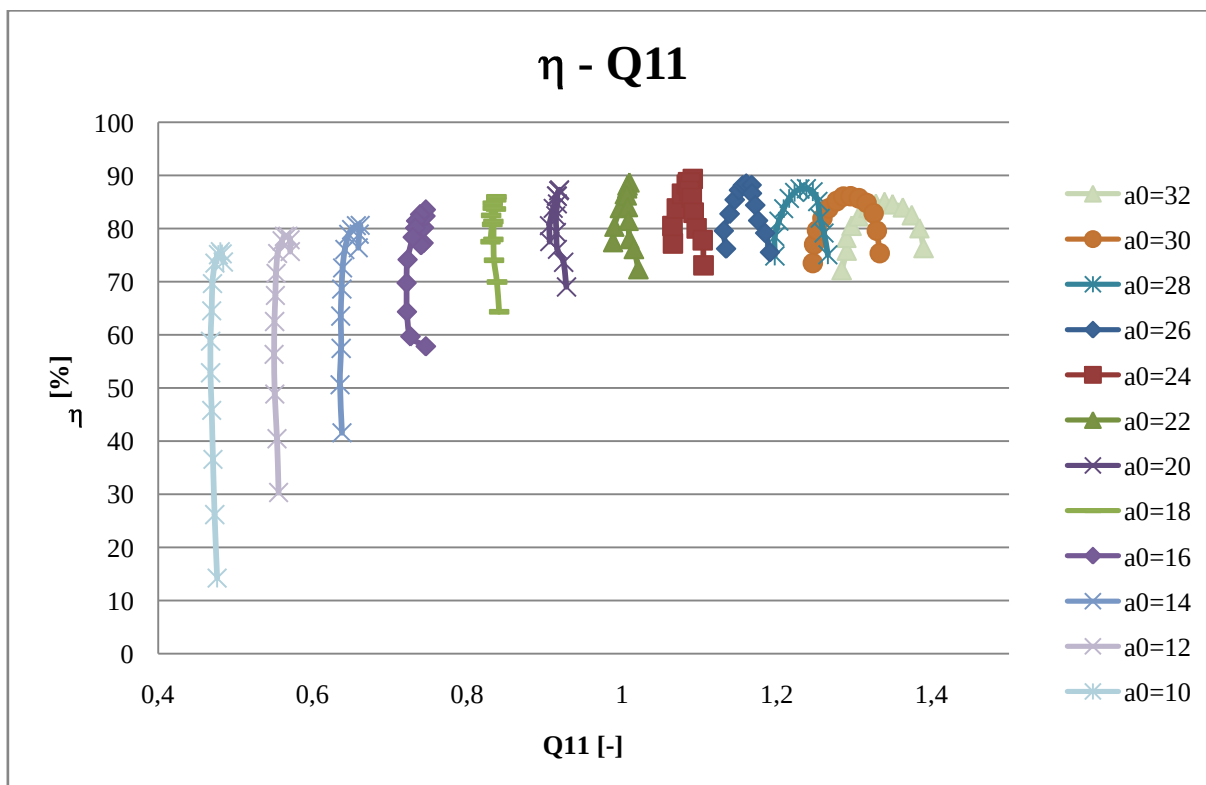


10 VÝSLEDKY MĚŘENÍ

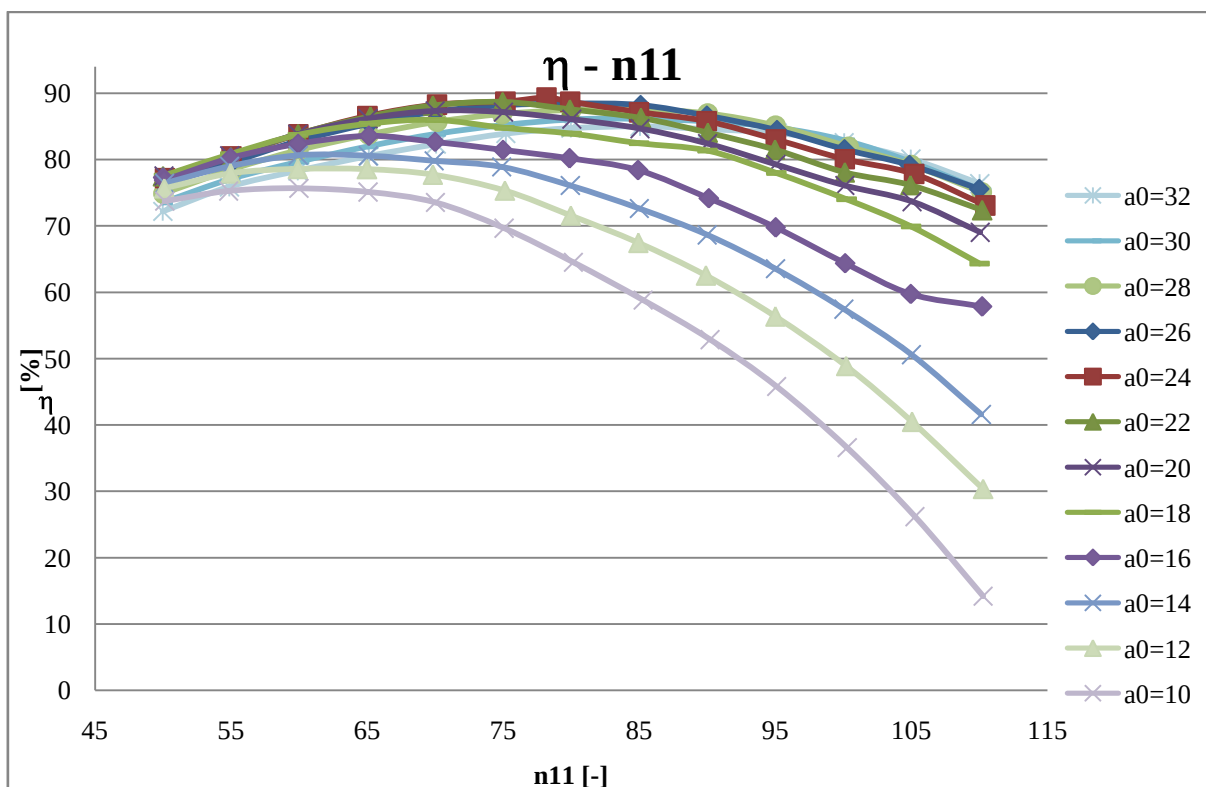
Výsledky měření se dělí na dvě části na předběžné výsledky a na konečné výsledky.

10.1 PŘEDBĚŽNÉ VÝSLEDKY

Jsou tabulky, grafy a to účinnostní ($\eta - n_{11}$, $\eta - Q_{11}$, pro jednotlivá a_0) a kavitační ($\eta - \sigma$, pro jednotlivá a_0 a n_{11}). Předběžné výsledky slouží primárně pro kontrolu správnosti měření, a vypovídají a základních vlastnostech HS.



Graf 2 Ukázka závislosti účinnosti na jednotkovém průtoku



Graf 3 Ukázka závislosti účinnosti na jednotkových otáčkách

10.2 KONEČNÉ VÝSLEDKY

Konečné výsledky jsou shrnuty v závěrečné zprávě z měření. Zpráva z měření obsahuje Charakteristiky, Tabulky, Grafy, popis měření, kalibrační listy.



11 NÁVRH PROTOTYPU VT Z JEJÍ ÚČINNOSTNÍ CHARAKTERISTIKY [1]

Uvedeme příklad stanovení základních parametrů prototypu FT dané lokality VE, na základě známé a odpovídající charakteristiky modelu o průměru OK „D_M“ a rychloběžnosti, charakterizované objemovými měrnými otáčkami optimálního bodu:

$$n_{QE(opt)} = n_{ED(opt)} \cdot \sqrt{Q_{ED(opt)}} \quad (37)$$

Předpokládáme dále, že jsou zadány návrhové hodnoty (s indexem „N“) a to: průtok „Q_N (m³·s⁻¹)“ a čistý spádu „H_N (m)“ resp. měrné energie „E_N (J·Kg⁻¹)“. Z odpovídající charakteristiky FT jsou dány parametry optimálního bodu „Q_{ED(opt)}, n_{ED(opt)}, η_{hM(max)}“, ze kterých se volí hodnoty N-bodu takto:

$$Q_{ED(N)} = (1,10 \div 1,15) \cdot Q_{ED(opt)} \quad (38)$$

kde: $n_{ED(N)} = n_{ED(opt)}$

VLASTNÍ ŘEŠENÍ VEDE KE STANOVENÍ:

- Průměru OK prototypu FT „D_p≡D (m)“ a synchronních otáček „n (s⁻¹ nebo min⁻¹)“.
- Vlivu měřítka a výpočtu účinnosti prototypu „η_{hP(i)}“ z odpovídajících modelových hodnot „η_{hM(i)}“, např. pro provozní body „i=1 až 5“.

POSTUP VÝPOČTU

Z rovnice pro jednotkový průtok určíme výpočtovou hodnotu průměru OK „D‘“, který zaokrouhlíme na desítky (mm) na konečnou hodnotu „D“

$$D' = \sqrt{\frac{Q_N}{Q_{ED(N)} \cdot \sqrt{E_N}}} \quad (39)$$

kde: $D' \rightarrow D \text{ (m)}$

Z rovnice pro jednotkové otáčky určíme výpočtovou (nesynchronní) hodnotu otáček „n‘“, kterou upravíme na nejbližší tabulkovou hodnotu synchronních otáček:

$$n' = \frac{n_{ED(N)} \cdot \sqrt{E_N}}{D} \quad (40)$$

kde: $n' \rightarrow n \text{ (s}^{-1}\text{)}$



Výpočet přírůstku účinnosti prototypu proti modelu (pro optimální bod), který pro klasické FT je dán vztahem podle **Moodyho**, vyjadřuje **vliv měřítka**:

$$\eta_{hP (opt)} = 1 - \left(1 - \eta_{hM (max)}\right) \cdot \left(\frac{D_M}{D}\right)^{0,2} \quad (41)$$

$$\Delta\eta = \eta_{hP (opt)} - \eta_{hM (max)} = kons \quad (42)$$

Výpočet účinnosti prototypu pro jakýkoliv bod „i“ v provozní oblasti charakteristiky:

$$\eta_{hP (i)} = -\eta_{hM (i)} + \Delta\eta \quad (43)$$



12 PŘEJÍMACÍ ZKOUŠKY A KONTROLNÍ VÝPOČET

Pokud si zákazník přeje, provádí si měření na zkušebně za účasti zákazníka.

Měření probíhá na základě předem dohodnutého programu.

Zákazníkovi se předloží výsledky měření, z předem dohodnutého programu zkoušek, kde je uveden rozsah měřených parametrů HS.

12.1 ROZSAH PŘEDVÁDĚCÍCH ZKOUŠEK

Příklad pro rychloběžnou FT.

MĚŘENÍ NA MODELU

- Zkouška turbíny – při vysoké hodnotě kavitačního součinitele „ σ_M “
- Měření účinností pro specifikované spády a v celém rozsahu otevření lopatek RK
- ($a_{M(\min)} \div a_{M(\max)}$ po $\Delta a_M = 2 \text{ mm}$).
- Měření průběžných otáček ($M=0$) v rozsahu ($a_{\min} \div a_{\max}$)
- Zkouška turbíny – při kavitačním součiniteli díla „ σ_P “
- Měření tlakových pulsací (ve vytypovaných bodech)
- Pozorování vírového copu v prostoru za OK (především při nižších hodnotách „ a_M “)
- Měření pro maximální průtok „ $Q_{M(\max)}$ “ a pro střední specifikovaný spád „ $H_{M(\text{stř})}$ “

KONTROLA GEOMETRICKÝCH PARAMETRŮ MODELU

- Měření vytypovaných rozměrů OK (průměry, výšky kanálů aj.).
- Měření lopatek RK (výška prostoru lopatek, kontrola otevření „ a_M “).
- Měření vztažných průřezů vysokotlaké „1“ a nízkotlaké strany „2“.

12.2 PRŮBĚH PŘEDVÁDĚCÍCH ZKOUŠEK

1.DEN:

Prohlídka modelu a přístrojového vybavení zkušební stanice.

Kontrola kalibračních protokolů.

Kontrola kalibrace měřících přístrojů a snímačů.

Kontrolní výpočet.

Měření účinností modelu (v garantovaném provozním rozsahu).

2.DEN:

Měření průběžných otáček (při $M_M=0$ pro jednotlivá otevření RK).

Kavitační měření.



3.DEN:

Měření pulsací tlaku.

Ukázka kontrolního výpočtu.

Rozměrová kontrola.

Zápis z průběhu předváděcích zkoušek na modelu s podpisy zástupců.



ZÁVĚR

Tato práce nahlédla velice stručně do problematiky modelových zkoušek na modelech vodních turbín a to zejména na modelu FT. Jak už bylo dříve zmíněno, práce se skládá, ze dvou základních částí. V první části se zmiňuji o teorii modelových zkoušek a teorii podobnosti. V úvodu práce jsou také velice stručně popsány základní pojmy a rozdělení VT. První část je sepsaná velice stručně a to ze dvou základních důvodů, za prvé o této problematice pojednává řada publikací (viz. seznam použitých informačních zdrojů), kde je tato problematika velice dobře popsána, za druhé v této zprávě není, dostatečný prostor pro zpracování úplné problematiky teorie modelových zkoušek. Větší důraz jsem kladl na jednotkové parametry podobnosti, a to z důvodu existence několika systému, které se vyskytují v průmyslové praxi, jelikož existence více systémů, částečně komplikuje další práci s naměřenými a zpracovanými daty. Ve druhé části práce jsem se zaměřil na modelový výzkum a měření v praxi. Ve zprávě jsou ukázky výsledků měření, jako jsou tabulky, grafy, charakteristiky, dále jsou popsány veličiny, konstanty a výpočetní vzorce potřebné pro správné měření a následné vyhodnocení dat. Jsou zde stručně popsány základní principy a postupy při měření. Od úvodních fází, jako je výroba, vhodná volba snímačů, až po konečné výsledky z měření. Jelikož celkový řetězec modelových zkoušek, je poměrně složitější proces a výsledky měření a samotné měření mají zásadní vliv, často fatální na další budoucnost zkoušeného stroje, zabývám se v jedné kapitole výpočtem chyb a nejistot měření. Ve zprávě se dále vyskytují fotografie, aby čtenář názorně viděl měření v praxi. V závěru práce se krátce zmiňuji o práci s naměřenými hodnotami a to v kapitole návrh prototypu.

Práce může sloužit, jako podklad pro studenty, kteří mají o tuhle problematiku zájem, ale také pro osoby, které pracují v průmyslové praxi a nepřijdou s měřením přímo do styku, ale s výsledky z měření přímo pracují.



POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] ŠOB, František. *Hydromechanika*. druhé. Brno : AKADEMICKÉ NAKLADATELSTVÍ CERM, 2008. 238 s. ISBN 978-80-214-3578-0.
- [2] BEDNÁŘ, Josef . *Malé vodní elektrárny 2 : Turbiny*. první. Praha : Nakladatelství technické literatury, n.p., 1989. 240 s. ISBN 04-220-89.
- [3] ČECH, Jaroslav; PERNÍKÁŘ, Jiří; PODANÝ, Kamil. *Strojírenská metrologie 1*. páté. Brno : AKADEMICKÉ NAKLADATELSTVÍ CERM, 2009. 183 s. ISBN 978-80-214-4010-4.
- [4] NECHLEBA, Miroslav. *Vodní Turbíny : jejich konstrukce a příslušenství*. druhé rozšířené. Praha : Státní nakladatelství technické literatury, n.p., 1962. 676 s. ISBN 04-241-62.
- [5] ŠOB, František. *Vodní turbíny I* [online]. [s.l.] : VUT Brno - FSI, EÚ-OHS V.K., [2001] [cit. 2011-05-12]. Dostupné z WWW: <www.vutbr.cz>.
- [6] ČSN EN 60193. *Vodní turbíny, akumulární čerpadla a čerpadlové trubiny-Přejímací zkoušky na modelu*. [s.l.] : Český normalizační institut, Prosinec 2002. 235 s. ICS 27.140.
- [7] Vodn%C3%AD turb%C3%ADna. In Wikipedia : the free encyclopedia [online]. St. Petersburg (Florida) : Wikipedia Foundation, , last modified on 14.12.2010 [cit. 2011-05-13]. Dostupné z WWW: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Vodn%C3%AD_turb%C3%ADna>.
- [8] %C3%9A%C4%8Dinnost (fyzika). In Wikipedia : the free encyclopedia [online]. St. Petersburg (Florida) : Wikipedia Foundation, , last modified on 21.4.2011 [cit. 2011-05-13]. Dostupné z WWW: <[http://cs.wikipedia.org/wiki/%C3%9A%C4%8Dinnost_\(fyzika\)](http://cs.wikipedia.org/wiki/%C3%9A%C4%8Dinnost_(fyzika))>.
- [9] BRADA, Karel; BLÁHA, Jaroslav . *Hydrodynamická čerpadla : Vodní turbíny*. první. Praha : Ediční středisko ČVUT, 1985. 51 s. ISBN 17-51.
- [10] ŠOB, František. Projektování vodních elektráren (podklady poskytnuté při výuce kurzu)
- [11] www.ckdblansko.cz
- [12] <http://www.cbeng.cz/>



SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

$\bar{S}_Y$		výběrová směrodatná odchylka střední hodnoty
$\bar{Y}$		střední hodnota měřené veličiny
$\bar{\rho}$	[kg·m ⁻³]	aritmetický průměr hustot v nízkotlakém a vysokotlakém průřezu
α_0	[mm] [°]	otevření rozváděcího kola (úhel natočení rozváděcích lopatek)
A_1	[m]	plocha vysokotlakého průřezu
A_2	[m]	plocha nízkotlakého průřezu
AČ		akumulační čerpadlo
a_i	[-]	konstanta polynomu
ČBE		ČKD Blansko Engineering
ČT		čerpadlová turbína
D	[m]	vztažný průměr oběžného kola
D'	[m]	zaokrouhlený průměr oběžného kola
D1	[m]	průměr oběžného kola (na vstupní hraně věnce)
D1e	[m]	průměr oběžného kola (na vstupní hraně věnce)
D2e	[m]	průměr oběžného kola (na výstupní hraně věnce)
D _{max}	[m]	maximální průměr oběžného kola (po labyrinty)
DN		dolní nádrž
dP	[kPa]	diferenční tlak (výstup z diferenčního tlakoměru)
DT		Deriazova turbína
E	[J·kg ⁻¹]	měrná hydraulická energie stroje
e		základ přirozeného logaritmu
e _r		náhodná nejistota
Eu	[-]	Eulerovo číslo
f	[Hz]	frekvence
F	[N]	indikovaná síla na rameni dynamometru při měření
F ₀	[N]	indikovaná síla na rameni dynamometru při zastaveném stavu
F _g	[N]	tíhová síla
F _h	[N]	hybnostní síla
F _p	[N]	tlaková síla
Fr	[-]	Froudeovo číslo
f _{rH}	[%]	náhodná nejistota měření hodnot spádu



f_{rM}	[%]	náhodná nejistota měření hodnot momentu
f_{rn}	[%]	náhodná nejistota měření hodnot otáček
f_{rQ}	[%]	náhodná nejistota měření hodnot průtoku
f_{rx}	[%]	náhodná nejistota
$f_{r\eta}$	[%]	náhodná nejistota měření hodnot účinnosti
F_s	[N]	setravčná síla
f_{sH}	[%]	systematická relativní nejistota měření spádu
F_{Sk}	[N]	setrvačná síla konvektivní
f_{sM}	[%]	systematická relativní nejistota měření momentu
f_{sn}	[%]	systematická relativní nejistota měření otáček
f_{sQ}	[%]	systematická relativní nejistota měření průtoku
F_{St}	[N]	setravčná síla lokální
f_{sx}	[%]	relativní systematická nejistota
$f_{s\eta}$	[%]	systematická relativní nejistota měření účinnosti
F_t	[N]	třecí síla
f_{η}	[%]	celková nejistota měření
g	$[m \cdot s^{-2}]$	tíhové zrychlení
G		generátor
H	[m]	spád turbíny nebo dopravní výška čerpadla
HS		hydraulický stroj
i	[-]	počet odvažovacích závaží
i		provozní body
IP		indukční průtokoměr
K_n		přepočtová konstanta
K_Q		přepočtová konstanta
KT		Kaplanova turbína
L	[m]	charakteristický rozměr
M		model
M	$[N \cdot m]$	moment
Ma	[-]	Machovo číslo
max		maximum
m_d	[kg]	hmotnost dovažovacího závaží
M_d	$[N \cdot m]$	třecí ztráty disku



min		minimum
m_k	[kg]	hmotnost kalibračního závaží
M_{L1}	[N·m]	ztrátový moment
M_{L2}	[N·m]	třecí moment ucpávky
n	[s ⁻¹]	otáčky
n		počet měření
N		návrhové hodnoty
n'	[s ⁻¹]	zaokrouhlené otáčky na tabulkovou hodnotu
n_{11}	[ot·min]	jednotkové otáčky
n_{ED}	[-]	jednotkové otáčky
n_p	[ot·min]	průběžné otáčky
$NPSE$	[J·kg ⁻¹]	čistá kladná sací energie
n_q		měrné objemové otáčky
n_{QE}		měrné objemové otáčky
n_s		měrné objemové otáčky
OK		oběžné kolo
opt		optimum
P		prototyp
P	[W]	mechanický výkon nebo příkon
P	[W]	výkon
P_{abs1}	[kPa]	absolutní tlak v nízkotlakém vztažném průřezu
P_{abs2}	[kPa]	absolutní tlak ve vysokotlakém vztažném průřezu
P_H	[W]	Hydraulický výkon nebo příkon
PT		Peltonova turbína
p_{va}	[Pa]	tlak nasycených par vody
Q	[m ³ ·s ⁻¹]	objemový průtok
Q_{11}	[m ³ ·s ⁻¹]	jednotkový průtok
Q_{ED}	[-]	jednotkový průtok
R_{dr}	[m]	délka odvažovacího ramene
Re		Reynoldsovo číslo
RK		rozdávčí kolo
R_{kr}	[m]	délka kalibračního ramene
R_{mr}	[m]	délka měřicího ramene (zahrnuje i R_{dr})



Sh	[-]	Strouhalovo číslo
S_Y		směrodatná odchylka
t	[s]	čas, při kterém dochází ke změně hybnosti
T	[N·m]	krouticí moment na hřídeli
t		hodnota studentova rozdělení
T_{LM}	[N·m]	třecí moment
T_M	[N·m]	krouticí moment oběžného kola
t_w	[°C]	teplota vody
u	[m·s ⁻¹]	Obvodová rychlost na vztažném průměru oběžného kola
v	[m·s ⁻¹]	rychlost
v_1	[m·s ⁻¹]	rychlost v nízkotlakém vztažném průřezu
v_2	[m·s ⁻¹]	rychlost ve vysokotlakém vztažném průřezu
VD		vodní dílo
VE		vodní elektrárna
VT		vodní turbína
VUT		Vysoké učení technické
VÚVS		Výzkumný ústav vodních strojů
We	[-]	Weberovo číslo
Y		proměnná veličina
Y_i		hodnota získaná i-tým měřením
z	[-]	počet lopatek
z	[m n. m.]	nadmořská výška vztažné roviny stroje
z_{2A}	[m]	poloha absolutního snímače tlaku vzhledem ke vztažné rovině stroje
Δ		rozdíl
$\Delta\eta$	[%]	úbytek popř. nárůst účinnosti při přepočtu z modelu na prototyp
η	[%]	účinnost
η	[Pa·s]	dynamická viskozita
η_h	[%]	účinnost modelu
λ_L	[-]	měřítka
ν	[m ² ·s ⁻¹]	kinematická viskozita
ν		počet stupňů volnosti
π		Ludolfovo číslo
ρ	[kg·m ⁻³]	hustota



ρ_w	$[\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}]$	hustota vody
σ	[-]	Thomovo číslo – Thomův kavitační součinitel – Thomovo kavitační číslo
σ_1	[-]	Thomovo číslo s indexem 1 (definováno při určitém stavu kavitace)
σ_k	[-]	Thomovo číslo – kritický (při poklesu účinnosti o 2%)
σ_p	[-]	Thomovo číslo díla
τ	[s]	doba plnění kalibrační nádrže
φ	[°]	zeměpisná šířka



SEZNAM PŘÍLOH

- I Ukázka energetické charakteristiky [10]
- II Ukázka kavitační charakteristiky [10]
- III Ukázka charakteristiky tlakových pulzací [10]
- IV Ukázka dvou kvadrantové charakteristiky [10]
- V Ukázka kalibračního listu
- VI Ukázka tabulky z účinnostního měření
- VII Ukázka tabulky z kavitačního měření
- VIII Ukázka účinnostní charakteristiky FT
- IX Ukázka kavitační charakteristiky FT
- X Další fotografie
- XI Schéma měřicí tratě