



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

REGULACE TURBÍN MALÝCH VODNÍCH ELEKTRÁREN

THE TURBINE REGULATION OF THE SMALL HYDRO-POWERPLANTS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jiljí Horký

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jakub Stareček

BRNO 2019

Zadání bakalářské práce

Ústav: Energetický ústav
Student: **Jiljí Horký**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Jakub Stareček**
Akademický rok: 2018/19

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

Regulace turbín malých vodních elektráren

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Malé vodní elektrárny jsou nezastupitelným zdrojem elektrické energie, i když dosahují výkonů jen do 10MW. Tak jako u turbín ve větších vodních elektrárnách, je i u těchto malých strojů důležitá regulace. Výkon vodní turbíny je dán převážně spádem, průtokem a účinností, přičemž spád a účinnost bývají konstantní. Regulace se tedy zpravidla realizuje změnou průtoku.

Cíle bakalářské práce:

V rámci této bakalářské práce bude uveden přehled používaných turbín a bude zhotovena rešerše metod pro regulaci průtoku u turbín v malých vodních elektrárnách. Případně mohou být popsány i jiné, alternativní způsoby regulace.

Seznam doporučené literatury:

NECHLEBA, M. Vodní turbíny, jejich konstrukce a příslušenství. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1962. ISBN 04-241-62.

BEDNÁŘ, J. Turbíny: (malé vodní elektrárny). Češkovice: Marcela Bednářová, c2013. ISBN 978-8-905437-0-6.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2018/19

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce pojednává o regulaci turbín v malých vodních elektrárnách. V první kapitole je uvedena základní teorie týkající se této problematiky. V následujících dvou kapitolách je blíže představena charakteristika jednotlivých typů turbín, jejich konstrukce a konstrukce regulačních mechanismů. Pro doplnění je na rychlostních trojúhelnících názorně ukázáno, jak se mění proudové poměry ve stroji při zásahu regulace a jaký vliv má regulace na hydraulický stroj.

Klíčová slova

malé vodní elektrárny, regulace turbín, Peltonova turbína, Turgo turbína, Bánkiho turbína, Kaplanova turbína, Francisova turbína, rychlostní trojúhelníky

ABSTRACT

This bachelor thesis deals with the regulation of water turbines in small-hydro power plants. The first chapter presents the basic theory of this issue. In the next following two chapters, the characteristics of individual types of turbines, their construction and construction of control mechanisms are introduced. With the help of velocity triangles is shown, how the flow conditions are changing during the work of control mechanisms and what influence the control has on the hydraulic machine.

Key words

small-hydro power plants, regulation of turbine, Pelton turbine, Turgo turbine, cross-flow turbine, Kaplan turbine, Francis turbine, velocity triangles

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

HORKÝ, Jiljí. Regulace turbín malých vodních elektráren. Brno, 2019. 50 s. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/117594>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav. Vedoucí práce Ing. Jakub Stareček.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci *Regulace turbín malých vodních elektráren* vypracoval samostatně pod vedením Ing. Jakuba Starečka. V seznamu literatury jsem uvedl všechny použité zdroje.

Datum

Jméno a příjmení

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu bakalářské práce, Ing. Jakubu Starečkovi, za cenné rady a připomínky, které mi v průběhu psaní poskytoval. Touto cestou chci také poděkovat rodině a přátelům, kteří mi byli v průběhu studia a při tvorbě práce oporou.

OBSAH

ÚVOD	11
1 ZÁKLADY TEORIE VODNÍCH ELEKTRÁREN	12
1.1 Zdroje energie na Zemi	12
1.2 Vodní turbíny	12
1.3 Vodní elektrárny	15
1.4 Regulace	16
1.5 Regulátory	18
1.6 Základní vztahy	19
2 ROVNOTLAKÉ TURBÍNY A JEJICH REGULACE	22
2.1 Peltonova turbína	22
2.2 Turbína Turgo	25
2.3 Bánkiho turbína	27
3 PŘETLAKOVÉ TURBÍNY A JEJICH REGULACE	30
3.1 Kaplanova turbína a její varianty	30
3.1.1 Kaplanova turbína	30
3.1.2 Propelerové turbíny	35
3.1.3 Thomanova turbína	37
3.1.4 Přímoproudové turbíny	38
3.1.5 Axiální turbíny se zjednodušenou regulací	39
3.2 Francisova turbína	40
ZÁVĚR	44
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	45
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	48
SEZNAM OBRÁZKŮ	49

ÚVOD

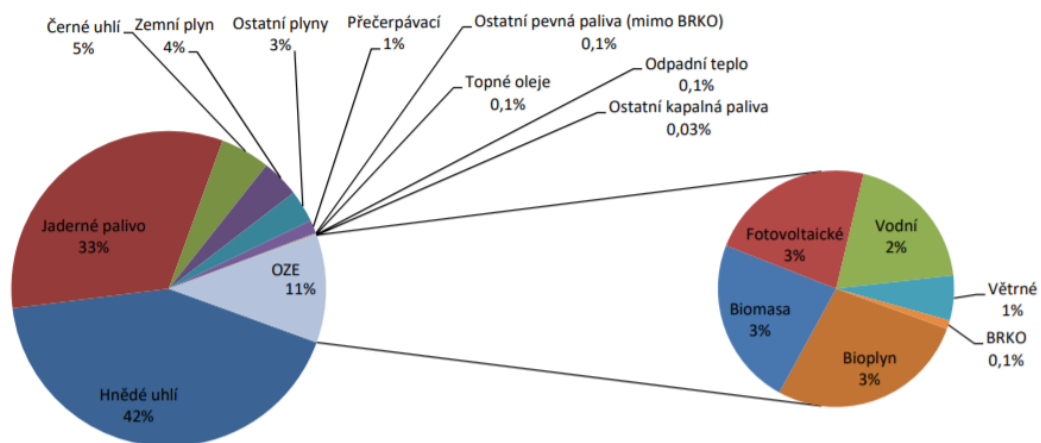
S postupným zvyšováním počtu obyvatel na Zemi roste i potřeba získávání energie, která je jedním z nejdůležitějších faktorů ovlivňující celosvětový rozvoj a kvalitu života. Mezi nejdéle používané zdroje energie patří využití mechanické potenciální energie vody. Její získávání je vysoce efektivní a ekologické. Často se dá spojit i s jiným užitečným faktorem, jako například stavba přehrad, sloužící k regulaci a zajištění stálosti průtoku v řekách, prevenci záplav, využití k rekreaci, nebo jako zásoba pitné vody. V České republice již nezbývá mnoho míst pro stavbu větších vodních nádrží a s nimi spojených vodních elektráren. Do popředí se však dostává potřeba využít menší části vodních toků a výstavba malých vodních elektráren. S rozšířením solárních panelů se potýkáme s dalším problémem, jímž může být nestabilita a velké výkyvy v přenosové síti. Tento problém se dá řešit výstavbou přečerpávacích vodních elektráren, u jejichž turbín se předpokládá, že budou schopny pracovat v čerpadlovém i turbínovém režimu a jejich rychlý náběh dokáže v případě zvýšení odebíraného proudu kompenzovat případné výchylky. Pro každou konkrétní oblast je důležité vybrat správný typ instalované vodní turbíny s ohledem na návratnost investice a efektivitu. Dalším důležitým faktorem je možnost regulace turbíny a v případě odstavení od proudu, zvláště v odlehlejších oblastech, i její rychlé odstavení.

Cílem této bakalářské práce je seznámit čtenáře se způsoby regulace, které se uplatňují v malých vodních elektrárnách. Některé typy však platí i pro elektrárny vyšších výkonů. Pro lepší pochopení dané problematiky je v první kapitole uvedeno základní rozdělení vodních turbín a vodních elektráren, dále jsou popsány základní vztahy týkající se těchto strojů a je stručně uvedeno základní rozdělení způsobů regulace a důvody, proč se vlastně regulace provádí. V dalších dvou kapitolách jsou vybrány nejpoužívanější typy vodních turbín, detailně popsána jejich konstrukce a konstrukce jejich regulačních mechanismů. Pomocí rychlostních trojúhelníků je ve třetí kapitole názorně ukázáno, co regulace způsobuje a jak mění proudové poměry ve stroji.

1 ZÁKLADY TEORIE VODNÍCH ELEKTRÁREN

1.1 Zdroje energie na Zemi

Většina energie na Zemi, kromě geotermální a jaderné, pochází ze Slunce. Pro lidstvo je důležité její získávání a následná doprava na ta místa, kde je využívána a spotřebována. Nejvýhodnějším způsobem, jak ji přepravovat, je přeměnit ji na její elektrickou formu. Zdroje energie se nejčastěji dělí na obnovitelné a neobnovitelné. Obnovitelné zdroje energie jsou většinou přírodní jevy, které dokážeme využít k získání energie a jsou prakticky nevyčerpatelné. Nejpoužívanější elektrárny pracující s obnovitelnými zdroji jsou vodní, větrné, sluneční, geotermální a elektrárny využívající biopaliva. Méně známé jsou také přílivové elektrárny využívající slapových sil. Mezi neobnovitelné zdroje energie patří především fosilní paliva jako uhlí, ropa a zemní plyn. Do této kategorie se také řadí látky pro výrobu jaderné energie (uran), a i když se tento zdroj zdá z dlouhodobého hlediska prakticky nevyčerpatelný, jeho problémem je vznik radioaktivního odpadu, který zatím dokážeme jen skladovat. Procentuální zastoupení zdrojů energie v České republice je uvedeno na obrázku 1.1. [3]



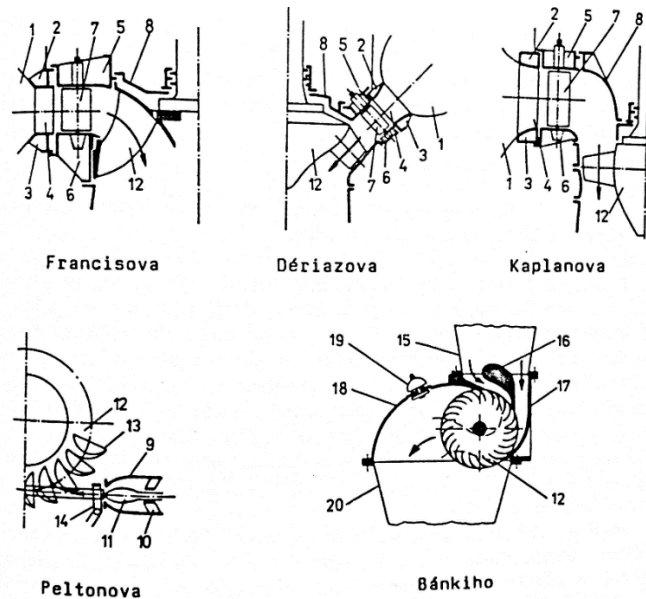
Obr. 1.1 Výroba elektřiny podle typu paliv v České republice v roce 2017 [6]
OZE - Obnovitelné zdroje energie
BRKO - Biologicky rozložitelný komunální odpad

1.2 Vodní turbíny

Vodní turbíny jsou stroje, které přeměňují energii vody na mechanickou energii rotující hřídele, která může pohánět elektrický generátor, nebo jiné připojené zařízení. V minulosti se často používaly pro pohon mlýnů, pil nebo hamrů. V dnešní době nejčastěji generují elektrický proud, který může být dodáván do sítě, nebo pohánět stroje v provozech nacházejících se v blízkosti turbíny. [1]

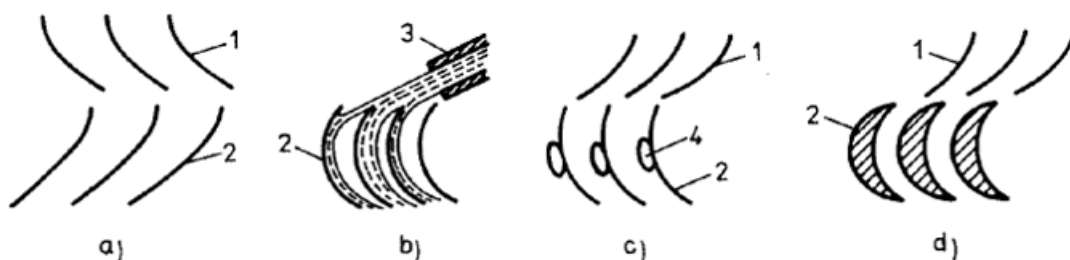
Vodní turbína se skládá ze tří základních částí. První částí je zařízení pro přívod vody k oběžnému kolu, které může být podle typu různých tvarů. Často má tvar spirály, na jejímž konci jsou umístěny rozváděcí lopatky. Peltonova turbína má přívod vody řešen ve tvaru dýzy, v níž je uložena jehla sloužící k regulaci. Druhou částí turbíny je samotné oběžné kolo. Skládá se z lopatek upevněných jedním koncem na hřídeli, a druhým koncem volným nebo upevněným ve vnějším věnci. Zde dochází k přeměně energie vody na mechanickou energii. Třetí část slouží

k odvedení vody od oběžného kola. U turbín s plným vtokem je nejčastěji tvaru difuzoru, který mění kinetickou energii vody na tlakovou. Součástí této části bývá tzv. savka, která snižuje tlak za oběžným kolem a výrazně zvyšuje účinnost celé turbíny. U některých typů turbín má zařízení pro odvod vody tvar skříně, která zachytává vodu a slouží jako nosná konstrukce celého zařízení. [1] Schématické znázornění nejčastěji používaných typů turbín rozdělených dle jejich vynálezece je uvedeno na obr. 1.2. Vodní turbíny se dělí na rovnotlaké a přetlakové. Pokud je na vstupu a výstupu z oběžného kola stejný tlak, turbína se nazývá rovnotlaká. Potenciální energie vody se v tomto případě zcela přemění na kinetickou ještě předtím, než vstoupí do oběžného kola. U přetlakových turbín se jen část potenciální energie přemění na kinetickou před vstupem do oběžného kola. Zbytek přeměny probíhá při průchodu vody skrz oběžné kolo. Přetlakové turbíny se také nazývají reakční. Speciálním případem jsou turbíny mezní. Jedná se o přechod mezi rovnotlakou a přetlakovou turbínou. Potenciální energie vody je zcela přeměněna na kinetickou již při vstupu na oběžné kolo, s tím rozdílem, že kanály pro průtok vody skrz oběžné kolo jsou zcela zaplněny vodou a proud vody je spojitý. Výhodou tohoto uspořádání je možnost umístit oběžné kolo pod spodní hladinu vody beze ztráty účinnosti. Znázornění tohoto rozdělení je možné vidět na obrázku 1.3. [1]



Obr. 1.2 Znázornění nejčastěji používaných typů turbín [3]

- | | |
|---------------------------|---------------------------|
| 1 - spirála | 2 - horní výztužný kruh |
| 3 - dolní výztužný kruh | 4 - výztužná lopatka |
| 5 - horní lopatkový kruh | 6 - dolní lopatkový kruh |
| 7 - rozváděcí lopatky | 8 - víko turbíny |
| 9 - dýza | 10 - vodící kříž |
| 11 - regulační jehla | 12 - oběžné kolo |
| 13 - lopatky (korečky) | 14 - deflektor a deviátor |
| 15 - vtokové těleso | 16 - regulační klapka |
| 17 - skříň | 18 - kryt |
| 19 - zavzdušňovací ventil | 20 - odpadní kanál |



Obr. 1.3 Členění turbín podle přenosu energie [1]

- a) přetlaková turbína b) rovnotlaká turbína
c) rovnotlaká turbína se zavzdušňovacími otvory d) mezní turbína s tvarovanými lopatkami
- 1 - rozvaděč
2 - oběžné kolo
3 - dýza
4 - zavzdušňovací otvory

Existují i další možnosti, jak vodní turbíny rozdělit. Z konstrukčního hlediska může být důležité, jakým směrem protéká voda skrz oběžné kolo. Schématické znázornění těchto uspořádání je znázorněno na obrázku 1.4 a je následující:

a) Centrifugální turbína

Voda protéká skrz oběžné kolo směrem od hřídele.

b) Centripetální turbína

Voda protéká skrz oběžné kolo směrem k hřídeli.

c) Axiální turbína

Voda protéká skrz oběžné kolo ve stále stejné vzdálenosti od hřídele.

d) Radiálně axiální turbína

Voda protéká skrz oběžné kolo nejprve směrem ke hřídeli, poté se její směr mění na axiální a teče ve stále stejné vzdálenosti od hřídele.

e) Diagonální turbína

Voda protéká skrz oběžné kolo v šikmém směru k ose hřídele.

f) Turbína se šikmým průtokem

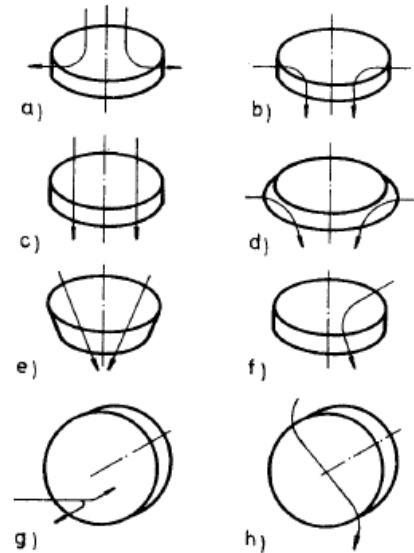
Voda vstupuje na oběžné kolo z boční strany a odtéká axiálním směrem.

g) Tangenciální turbína

Voda se pohybuje v tečném směru na oběžné kolo.

h) Turbína s dvojnásobným průtokem

Voda teče nejprve směrem k oběžnému kolu, poté pokračuje směrem od oběžného kola. [1]



Obr. 1.4 Členění turbín podle směru průtoku vody oběžným kolem [1]

Dalším kritériem pro rozdělení vodních turbín je podle jejich měrné energie, tj. na nízkotlaké, středotlaké a vysokotlaké.

Nízkotlaké - Měrná energie je menší než 200 J.kg^{-1} . Mohou to být např. turbíny Kaplanovy.

Středotlaké - Měrná energie se nachází v rozmezí od 200 do 1000 J.kg^{-1} a patří sem např. turbíny Francisovy.

Vysokotlaké - Například turbíny Peltonovy, jejich měrná energie se pohybuje v hodnotách vyšších než 1000 J.kg^{-1} . [1]

Podle elektráren, ve kterých jsou turbíny instalované, se také dělí na velké, jejichž výkon je větší než 200 MW, dále na střední s výkonem nižším než 200 MW a malé s výkonem nižším než 10MW. Toto rozdělení však platí pouze pokud uvažujeme jednu turbínu v elektrárně. [3]

Podle směru osy oběžného kola se vodní turbíny dělí na horizontální, vertikální a turbíny se šikmým hřídelem. [1]

1.3 Vodní elektrárny

Vodní elektrárny jsou obecně zařízení, která slouží k výrobě elektrické energie, využívající energii vody a obsahující různé typy vodních turbín. Vodní turbína přeměňuje měrnou energii vody na mechanickou energii na hřídeli.

Podle velikosti instalovaného výkonu se vodní elektrárny dělí následovně [3]:

a) Velké vodní elektrárny

Instalovaný celkový výkon elektrárny, tj. součet všech výkonů turbín v elektrárně používaných, je vyšší než 200 MW.

b) Střední vodní elektrárny

Celkový výkon elektrárny se pohybuje v rozmezí od 10 do 200 MW.

c) Malé vodní elektrárny

Instalovaný výkon elektrárny je nižší než 10 MW.

Malé vodní elektrárny se dále mohou rozdělit na [3]:

a) Průmyslové malé vodní elektrárny

Výkon elektrárny je v rozmezí od 1 do 10 MW.

b) Minielektrárny

S výkonem od 100 kW do 1 MW.

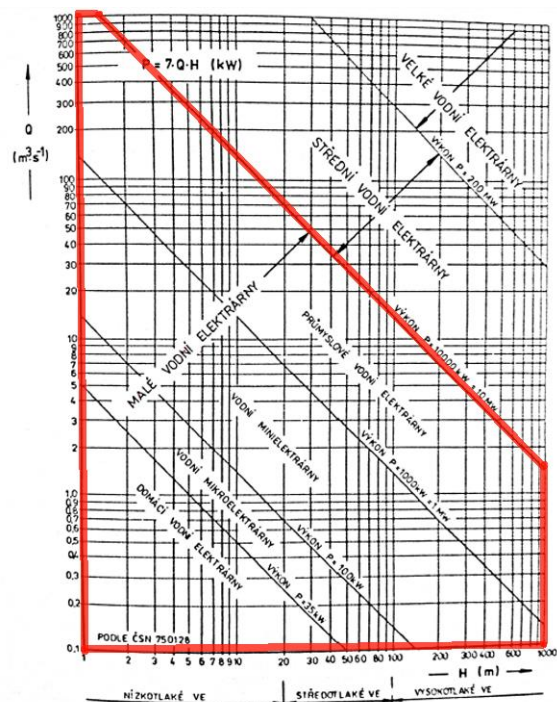
c) Mikroelektrárny

Výkon je od 35 kW do 100 kW.

d) Domácí malé vodní elektrárny

Jejich výkon je nižší než 35 kW.

Toto rozdělení je znázorněno na obrázku 1.5.



Obr. 1.5 Rozdělení vodních elektráren podle instalovaného výkonu [3]

H - spád [m]
 Q - objemový průtok [$m^3 \cdot s^{-1}$]

Dalším kritériem rozdělení vodních elektráren může být způsob získání spádu [3].

a) Přehradové

Spádu se dosáhne přehrazením vodního toku hrází a vytvořením přehrady.

b) Jezové

Podobně jako u přehradových vodních elektráren s hrází, k vytvoření spádu u jezových elektráren slouží výstavba jezu, který přehradí vodní tok a zvedne horní hladinu. Jedná se však o rozměrově podstatně menší stavby.

c) Derivační

Pomocí uměle vybudovaného koryta nebo potrubí je voda odvedena z říčního kanálu do elektrárny a po využití energie vody vrácena zpět do řeky v místě s

nižší nadmořskou výškou, než byla odvedena. Zařízení vedoucí vodu k turbínám se nazývají přivaděče.

d) Přehradně derivační

Jedná se o kombinaci přehradové a derivační elektrárny.

e) Bez vzdouvací stavby

Elektrárny nižších výkonů, nebo elektrárny postavené ve vhodných geografických podmínkách nepotřebují pro svou funkci vzdouvací zařízení.

Podobně jako vodní turbíny se vodní elektrárny dělí podle měrné energie na:

a) Nízkotlaké

Měrná energie je nižší než 200 J.kg^{-1} .

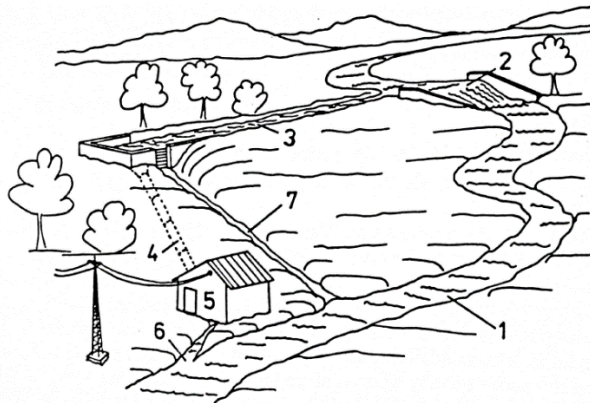
b) Středotlaké

Měrná energie se pohybuje v rozmezí od 200 do 1000 J.kg^{-1} .

c) Vysokotlaké

Měrná energie bývá vyšší než 1000 J.kg^{-1} .

Existují i další možnosti členění vodních elektráren. Schéma klasického uspořádání malé vodní elektrárny s derivačním přivaděčem je zobrazeno na obr. 1.6. Přivaděč je v tomto případě kombinovaný a skládá se ze dvou částí, otevřeného náhonu a ocelového potrubí. [3] [7]



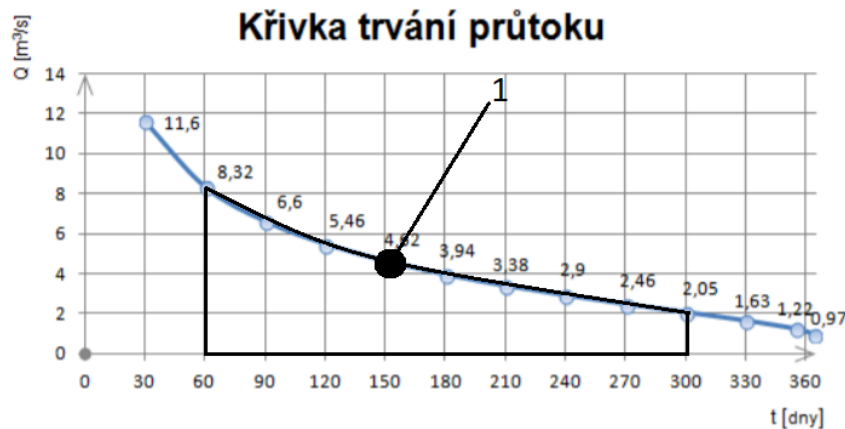
Obr. 1.6 Schéma uspořádání derivační malé vodní elektrárny [3]

1 - koryto vodního toku 2 - jez 3 - náhon 4 - potrubí 5 - strojovna 6 - odpadní kanál 7 - jalová propust

1.4 Regulace

V průběhu roku se průtok vody říčním korytem mění. Na obrázku 1.7 je znázorněna tzv. křivka trvání průtoku. Ta charakterizuje závislost velikosti průtoku na počtu dní v roce, kdy je daného průtoku dosaženo. Při výběru a návrhu dané vodní turbíny do příslušné lokality se určí střední hodnota průtoku. V obr. 1.7 to může být například bod označen číslem 1. Jedná se o ideální, někdy také nazývaný jmenovitý průtok, na jehož parametry je dané zařízení navrženo. Pokud by byla turbína neregulovatelná, docházelo by při vyšších a nižších průtocích k rychlému snižování její účinnosti, při vyšších průtocích pak také k nevyužití určitého objemu kapaliny protékající vodním korytem. V případě nízkých průtoků by musela být turbína odstavena, neboť množství kapaliny by nestačilo na její roztočení. Použití regulace způsobuje, že bod ideálního průtoku a tím i maximální účinnosti je jejím zásahem posunut do vyšších nebo nižších hodnot. Tím je využita širší oblast průtoků a dní v roce, kdy je možné turbínu provozovat. Oblast je v obrázku 1.7 znázorněna černým ohraničením. Ideální situace by nastala, kdyby byla pokryta

celá oblast průtoků. V praxi se však uvažuje i podle ekonomického hlediska a návratnosti investic, takže určitá oblast nízkých a extrémně vysokých průtoků pokryta není. U některých typů turbín navíc regulace slouží k odstavení turbíny z provozu a úplnému uzavření průtoku. Dalším požadavkem je zachování neměnných otáček turbíny, aby bylo při výrobě elektřiny zachováno fázování se sítí. Obrázek 1.7 je pouze ilustrativní, a slouží ke znázornění potřeby regulace, proto zobrazená oblast nemusí odpovídat skutečnosti a bod 1 označující ideální střední průtok se může nacházet v jiných hodnotách. Při skutečném návrhu se zahrnuje více faktorů, které však nejsou předmětem zájmu této bakalářské práce [3] [25].



Obr. 1.7 Křivka trvání průtoku [25]
1 - ideální střední průtok

Regulace se dá rozdělit následovně:

1) Mechanická regulace

a) Natáčením lopatek

Regulace se provádí natáčením lopatek. Vodní turbína má nejčastěji dva druhy lopatek nazývaných rozváděcí (statorové) a oběžné (nacházejících se na oběžném kole). Natáčet se mohou rozváděcí, oběžné nebo obojí, záleží na typu turbíny. Detailnější popis této regulace bude popsán v kapitole č. 3.[1]

b) Zásahem regulačního zařízení

Některé typy turbín mají speciální mechanické části, které slouží k regulaci. Například u Peltonovy turbíny jím může být tzv. dýza, kde posuv jehly snižuje průměr paprsku z ní tryskající a tím i omezující průtočné množství kapaliny dopadající na lopatku oběžného kola. Dalším příkladem může být deflektor nebo deviátor, které budou popsány v kapitole č. 2. Do této kategorie se dají zařadit i některé netypické způsoby regulace, které budou zmíněny v kapitole č. 3. [1]

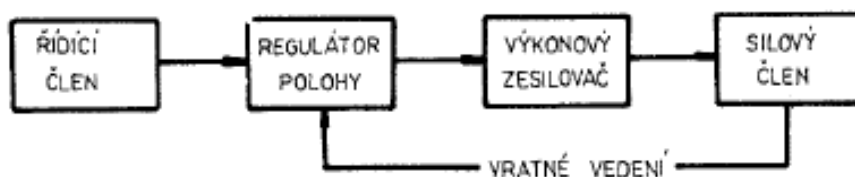
2) Elektrická regulace

U strojů nižších výkonů může být výhodnější regulovat pomocí elektrické části stroje. Tím se sice nemění průtok vody turbínou, ale pomocí frekvenčního měniče je zajištěna stálá frekvence na výstupu do sítě při proměnných otáčkách turbíny. Požadavkem je však použití turbíny s plochou křivkou účinnosti. To znamená, že turbína bude při různých průtocích na obr. 1.7 dosahovat stále vysoké účinnosti. Použitím tohoto typu regulace se také dají snížit investiční náklady o mechanickou část regulačních zařízení. [3]

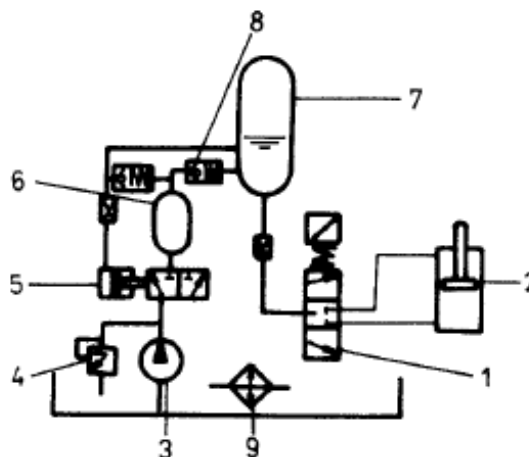
1.5 Regulátory

Zatímco u větších vodních elektráren, které jsou instalovány u nádrží a přehrad, je průtok v průběhu roku téměř neměnný, u malých vodních elektráren je regulace velice důležitá. Aby se dosáhlo nejekonomičtějšího využití daného úseku vodního toku v průběhu celého roku, je většina malých vodních elektráren vybavena regulátorem, který umožňuje celkovou automatizaci výroby elektřiny. V praxi je běžně používán elektrohydraulický a elektrický regulátor. Blokové schéma regulátoru je na obrázku 1.8.

Řídicím členem je obecně zařízení, které obsahuje regulátor otáček, hladiny a otevření turbíny. Výstupním signálem je údaj žádané polohy, který je předáván regulátoru polohy. Údaj žádané polohy je porovnáván s údajem skutečné polohy získaném přes vratné vedení. Výstupní signál z regulátoru polohy je veden do výkonového zesilovače, kterým je u elektrohydraulického regulátoru elektromechanický převodník. U elektrického regulátoru je výkonovým zesilovačem zařízení, které mění proud napájení silového členu. Schéma elektrohydraulického regulátoru je na obr. 1.9. Skládá se z elektrohydraulického převodníku, který řídí polohu hydraulického servomotoru. O zásobování oběhu tlakovým olejem se stará čerpadlo, na jehož výtlaku je pojistný ventil. Tlakový olej se také dodává do akumulátoru, jenž je řízen regulátorem tlaku oleje. Prvek zabráňující úniku oleje z akumulátoru se nazývá zpětný ventil. V oběhu je dále zařazen tlumič hydraulických rázů a chladič oleje. Akumulátor slouží k havarijnímu odstavení turbíny uzavřením průtoku turbínou v případě odpojení elektrohydraulického převodníku od elektrického napájení. [1] [2] [3]



Obr. 1.8 Blokové schéma regulátoru [1]



Obr. 1.9 Schéma elektrohydraulického regulátoru [3]

- | | | |
|----------------------------------|----------------------------|--------------------|
| 1 - elektrohydraulický převodník | 2 - hydraulický servomotor | 3 - čerpadlo oleje |
| 4 - pojistný ventil | 5 - regulátor tlaku oleje | 6 - tlumič rázů |
| 7 - akumulátor | 8 - zpětný ventil | 9 - chladič oleje |

1.6 Základní vztahy

Základní veličina popisující vodní elektrárny a turbíny je tzv. měrná energie $E [J.kg^{-1}]$. Ta udává míru energetického obsahu $A [J]$ v kapalině. Je určena následujícím vztahem [3].

$$E = \frac{A}{m} \quad (1.1)$$

Z rovnice je patrné, že se jedná o energii vztaženou na jednotku hmotnosti dané kapaliny. Měrná energie může být také charakterizována jako součet polohové měrné energie E_z , tlakové měrné energie E_p a kinetické měrné energie E_c [3].

$$E = E_z + E_p + E_c \quad (1.2)$$

Kde polohová měrná energie je dána vztahem [3]:

$$E_z = g \cdot z \quad (1.3)$$

V této rovnici je $g [m.s^{-2}]$ gravitační zrychlení a $z [m]$ je vzdálenost těžiště průtočného průřezu a základní vztážené roviny. Tlaková měrná energie je dána následovně [3]:

$$E_p = \frac{p}{\rho} \quad (1.4)$$

Kde $p [Pa]$ je tlak kapaliny a $\rho [kg.m^{-3}]$ je její hustota. Kinetická měrná energie je vyjádřena vztahem [3]:

$$E_c = \frac{c^2}{2} \quad (1.5)$$

V této rovnici $c [m.s^{-1}]$ znamená střední rychlost proudění dané kapaliny, nebo také absolutní rychlost. Měrná energie kapaliny se tedy dá zapsat jako [3]:

$$E = g \cdot z + \frac{p}{\rho} + \frac{c^2}{2} \quad (1.6)$$

Pokud se provede porovnání energií mezi vstupem do turbíny (1) a výstupem z turbíny (2), jedná se o vyjádření známe Bernoulliho rovnice [26]:

$$g \cdot z_1 + \frac{p_1}{\rho} + \frac{c_1^2}{2} = g \cdot z_2 + \frac{p_2}{\rho} + \frac{c_2^2}{2} + E_T \quad (1.7)$$

E_T značí maximální měrnou energii, kterou je schopna turbína protékající kapalině odebrat při 100% účinnosti. Další důležitou veličinou popisující vodní turbíny je jejich výkon $P_h [W]$. Je dán následovně [3]:

$$P_h = \rho \cdot Q \cdot E \quad (1.8)$$

Písmeno $Q [m^3 \cdot s^{-1}]$ značí objemový průtok, který je definován jako objem kapaliny procházející daným průřezem za jednotku času. Hmotnostním průtokem rozumíme hmotnost kapaliny procházející daným průřezem za jednotku času. Vodní elektrárna ale nemusí obsahovat jen jednu turbínu, u více soustrojí se celkový výkon elektrárny spočítá jako součet jednotlivých výkonů vodních turbín v ní instalovaných. Předchozí rovnice však zanedbávaly působení hydraulických ztrát, které jsou způsobeny viskozitou kapaliny. Proto je zavedena veličina E_d , která se nazývá disipovaná měrná energie, a udává míru hydraulických ztrát. Skutečný výkon se tedy vypočítá tímto vztahem [3]:

$$P = \rho \cdot Q \cdot (E - E_d) \quad (1.9)$$

Veličina nazývaná hydraulická účinnost porovnává skutečný výkon P a teoretický výkon P_h a je vyjádřena v procentech [3].

$$\eta_h = \frac{P}{P_h} = \frac{E - E_d}{E} = 1 - \frac{E_d}{E} \quad (1.10)$$

K popisu proudění skrze lopatkování turbíny se používá tzv. rychlostní trojúhelník. Je zobrazen na obr. 1.10. Strany trojúhelníku představují tři rychlosti značené c , u a w . Indexy číslování rychlostí jsou následující:

- 0 značí výstup z rozvaděče
- 1 vstup na oběžnou lopatku
- 2 výstup z oběžné lopatky.

Rychlost označená písmenem c představuje tzv. absolutní rychlost kapaliny. Značí směr proudnic a velikost rychlosti kapaliny při pozorování z nepohyblivého se bodu, např. skříň turbíny. Oproti tomu rychlost w představuje směr a velikost rychlosti kapaliny pozorovanou z bodu pohybujícího se s rotorem turbíny, tj. například nacházejícím se na oběžném kole. Rychlost u je obvodová (unášivá) rychlost kapaliny v příslušné vzdálenosti od osy oběžného kola, která odpovídá rychlosti otáčení turbíny v daném bodě. Z rychlostního trojúhelníku je patrná následující vektorová rovnice:

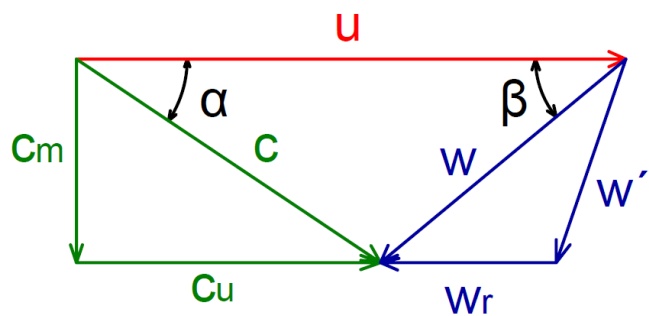
$$\vec{c} = \vec{u} + \vec{w} \quad (1.11)$$

Tato rovnice vyjadřuje skutečnost, že vektorový součet obvodové rychlosti u a relativní rychlosti kapaliny w se musí rovnat absolutní rychlosti c .

Úhel, který svírá absolutní rychlost c s obvodovou rychlostí u , se značí α . V praxi jeho změna značí změnu úhlu natočení rozvaděče. Úhel β se nachází mezi relativní rychlostí w a obvodovou rychlostí u a v praxi jeho změna značí změnu natočení oběžných lopatek.

Absolutní rychlost kapaliny c má dvě složky:

- c_m - tzv. meridiální složka absolutní rychlosti kapaliny, která je vždy kolmá na obvodovou rychlost u a udává velikost průtoku u přetlakových turbín



Obr. 1.10 Rychlostní trojúhelník

- c_u - obvodová složka absolutní rychlosti, která se nachází ve směru obvodové rychlosti u a udává velikost cirkulace kapaliny
- Stejně tak relativní rychlost kapaliny w má dvě složky:
- w' - jedná se o složku relativní rychlosti, která je vždy tečná ke střednici lopatky, v případě ideálního průtoku je rovna relativní rychlosti
- w_r - tzv. rázová složka relativní rychlosti, nacházející se ve směru obvodové rychlosti kapaliny u a značí ztrátovou rychlost kapaliny při neideálním průtoku, při ideálním průtoku je nulová

V další části této práce budou vynechány složky relativní rychlosti kapaliny a pro zjednodušení bude zobrazován pouze jejich vektorový součet, tj. relativní rychlost kapaliny w . Při neoptimálních průtocích tedy nemá relativní rychlost kapaliny směr ideálně tečný ke střednici lopatky. Dochází tak k nerovnoměrnému proudění skrze lopatkovou mříž a snížení účinnosti z důvodu existence rázové složky rychlosti. [3] [2]

Rychlostní trojúhelníky se používají při prvotním návrhu geometrie lopatek u turbín a čerpadel. V této bakalářské práci jsou použity pro znázornění změn proudění probíhajících při regulaci, které jsou zvláště patrné u přetlakových turbín.

Při zavedených složkách absolutní rychlosti se dá Bernoulliho rovnice (1.7) zapsat také v její formě pro rotující souřadný systém bez uvažování ztrát [26]:

$$g \cdot z_1 + \frac{p_1}{\rho} + \frac{w_1^2}{2} - \frac{u_1^2}{2} = g \cdot z_2 + \frac{p_2}{\rho} + \frac{w_2^2}{2} - \frac{u_2^2}{2} \quad (1.12)$$

Při odečtení rovnic 1.7 a 1.12, s využitím rychlostních trojúhelníků a kosinové věty se dá získat další důležitá rovnice nazývaná Eulerova turbínová rovnice [26]:

$$E_T \cdot \eta_h = u_1 \cdot c_{u1} - u_2 \cdot c_{u2} \quad (1.13)$$

Levá strana rovnice udává měrnou energii, kterou dokáže turbína protékající kapalině odebrat. Pokud zůstává měrná energie kapaliny konstantní, tak z pravé strany rovnice je patrné, že při zmenšení obvodové složky absolutní rychlosti c_{u2} a při zvětšení c_{u1} roste celková účinnost turbíny. Smyslem regulace je proto co nejvíce snížit rotaci kapaliny za oběžným kolem a v savce turbíny při dodržení ideálních proudových poměrů na vstupu, tj. směru relativní rychlosti w . Tato skutečnost neplatí pro vírovou turbínu, kde se naopak eliminuje rychlost c_{u1} a c_{u2} má opačný směr než u_2 . [3] [19]

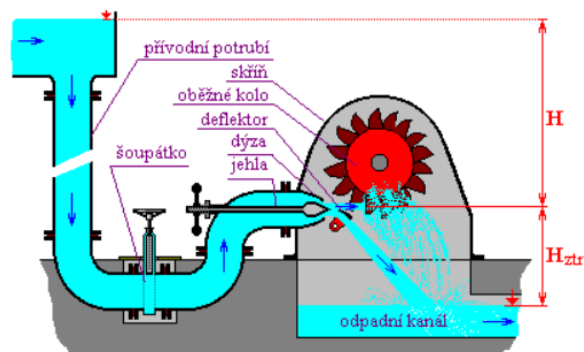
2 ROVNOTLAKÉ TURBÍNY A JEJICH REGULACE

Rovnotlaké turbíny jsou obecně vhodné pro velké spády a malé průtoky, proto se nejčastěji instalují na horní části toků. Voda přiváděná k oběžnému kolu většinou putuje poměrně dlouhým potrubím a na oběžné kolo nevstupuje rovnoměrně ze všech stran, ale ostříkuje jen část oběžného kola. Oběžné kolo je umístěno nad spodní hladinou vody, jinak dochází ke ztrátě účinnosti. Vzniká tak nevyužitý spád, který je ale při srovnání s celkovým spádem zanedbatelný. Nejčastěji používané rovnotlaké turbíny jsou Peltonovy, Bánkiho a turbíny Turgo. [1]

2.1 Peltonova turbína

Jedná se o tangenciální rovnotlakou turbínu, která byla vynalezena roku 1880 Lesterem Allenem Peltonem. Tato nejvíce používaná rovnotlaká turbína dosahuje účinnosti 85 až 90 %. Z hydraulického a konstrukčního hlediska je Peltonova turbína relativně jednoduchá. U malých vodních elektráren se používá pro hodnoty měrné energie od 200 do 4000 J.kg⁻¹ a pro průtoky od 0,01 až 3 m³.s⁻¹. [1]

Přívod vody k turbíně bývá nejčastěji potrubím. To je ve spodní části přehrazeno kulovým uzávěrem nebo šoupátkem, které slouží k úplnému zastavení přívodu vody k turbíně. Na konci potrubí se nachází dýza. Podle průtoku a velikosti celého zařízení je možné použít jen jednu, nebo více dýz. U malých vodních elektráren se lze většinou setkat s maximálně čtyřmi dýzami, u turbín velkého výkonu až se šesti. V dýze se mění měrná tlaková energie na měrnou kinetickou energii vody, kterou následně předává oběžnému kolu. Regulační zařízení je umístěné za dýzou, a podle funkce se nazývá deviátor nebo deflektor. Od oběžného kola voda volně odpadá do odpadního kanálu. U elektráren s většími spády je rychlost vody tak vysoká, že z důvodu bezpečnosti je pracovní prostor turbíny zcela zakryt a někdy i zevnitř opacerován. Schéma celého zařízení je znázorněné na obrázku 2.1. [3] [4]



Obr. 2.1 Schéma Peltonovy turbíny [8]

H - využitý spád
 $H_{ztr.}$ - nevyužitý spád

Dýza

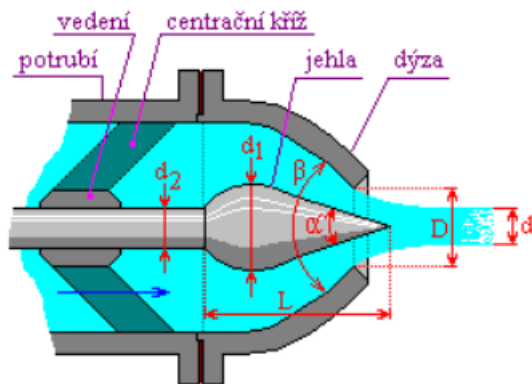
Dýza je zařízení, které mění tlakovou energii na kinetickou energii kapaliny. Jedná se vlastně o trysku, v jejímž středu je na centračním kříži uložena jehla. Pohyb jehly zaručuje regulaci. Otvor, kterým voda vystupuje z dýzy bývá kruhového průřezu. U Peltonových turbín je toto zařízení nejnáchylnější na čistotu vody, relativně úzký výstupní otvor se může ucpávat nečistotami [8]. Dýza je znázorněná na obrázku 2.2.

Oběžné kolo

Oběžné kolo se skládá z náboje, na němž jsou umístěny lopatky bez vnějšího věnce, viz. obrázek č. 2.3. Lopatky mohou být zhotoveny zvlášť a na náboj přišroubovány, nebo zároveň s ním odlity a následně obráběny. Jednotlivě vyráběné lopatky se dají snáze opracovat, výhodou litých lopatek je jejich nižší cena. Oběžné kolo se podle potřeby nachází ve vertikální nebo horizontální poloze na hřídeli. Spojení kola a hřídele je nejčastěji realizováno pomocí pera. [2]

Lopatky

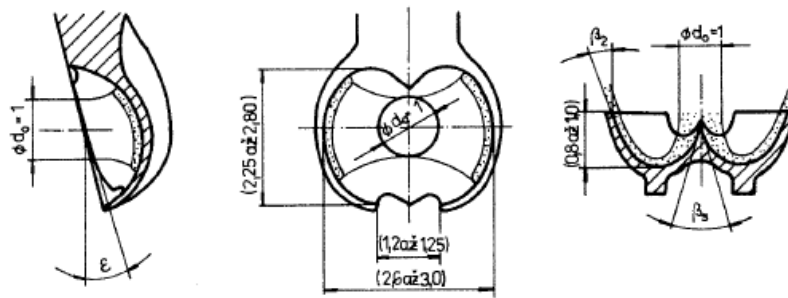
Lopatky mají lžičkovitý tvar s výřezem na konci, který se také nazývá koreček. Výřez slouží ke zmírnění rázových účinků tím, že postupně rozděljuje paprsek vody dopadající na lopatku vstupující a vstupující do záběru. Nejčastěji se počet lopatek volí v rozmezí od 18 do 26. Geometrie lopatky je uvedena na obrázku 2.4. [1]



Obr. 2.2 Schéma dýzy [8]
 D - průměr výstupního otvoru
 d - průměr paprsku
 L - délka jehly
 α - úhel jehly
 β - úhel dýzy
 d_1 - velký průměr jehly
 d_2 - průměr regulační tyče jehly



Obr. 2.3 Oběžné kolo Peltonovy turbíny [9]



Obr. 2.4 Geometrie lopatky Peltonovy turbíny [1]

ϕd_0 - průměr paprsku

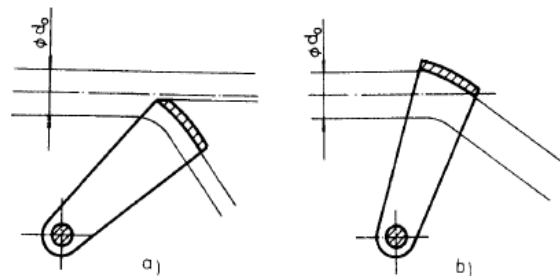
ε - sklon břitu

β_s - úhel břitu

β_2 - výstupní úhel

Regulace turbíny

Regulace výkonu Peltonovy turbíny je umožněna pomocí změny průtoku. Té se dosahuje osovým posuvem jehly v dýze, která otevírá nebo uzavírá výstupní kruhový otvor. Při příliš vysoké rychlosti posuvu jehly by mohlo dojít ke zvýšení tlaku v přívodním potrubí a nebezpečí jeho poškození. Aby byla umožněna rychlá regulace, používá se systém tzv. dvojité regulace, kdy je pohyb jehly zároveň spojen se zásahem deflektoru nebo deviátoru. Rozdíl činnosti těchto zařízení je patrný na obr. 2.5.



Obr. 2.5 Deflektor a deviátor [1]

a) deflektor b) deviátor

ϕd_0 - průměr paprsku

Konstrukční řešení deviátoru bývá méně náročné a u malých vodních turbín se mu dává přednost. Deflektor zajišťuje jemnější regulaci, a to zejména při odstavování Peltonovy turbíny nebo při náhlém snížení zatížení, kdy by mohlo dojít k dočasnému zvýšení otáček. Deflektor umožňuje rychlý zásah a snižuje průměr paprsku dopadajícího na lopatky. Kulisou je pohyb deflektoru spojen s pohybem jehly, která plynule uzavírá výstupní otvor z dýzy. Princip této činnosti je znázorněn na obrázku 2.6. Ta část deflektoru a deviátoru, na které dochází ke styku s paprskem, bývá výměnná, neboť na ní dochází k erozi. [1] [2] [4]



Obr. 2.6 Princip činnosti deflektoru [1]

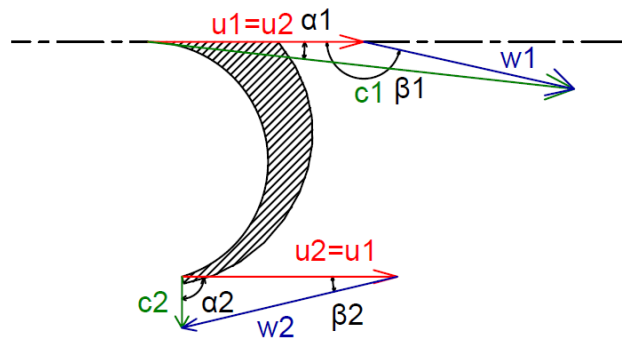
a) ustálený provoz

b) deflektor vstupuje do paprsku

c) jehla uzavírá výstupní otvor

V malých vodních turbínách je jehla ovládaná většinou mechanicky, u větších strojů přichází v úvahu hydraulické ovládání. U strojů malých výkonů nebo strojů pracujících při konstantních zatíženích se používá jednodušších dýz, ve kterých je jehla pevná bez možnosti posuvu. Regulace je v těchto případech umožněna kulovým uzávěrem nebo šoupátkem umístěným v přívodním potrubím. [1]

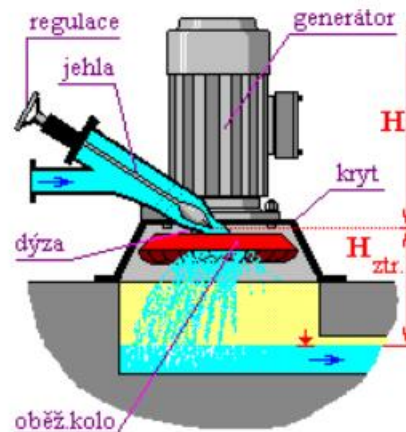
Rychlostní trojúhelníky Peltonovy turbíny jsou zobrazeny na obr. 2.7. Je zde zobrazena symetrická polovina tvaru lopatky. Velikost obvodové rychlosti na vstupu a výstupu z oběžného kola je stejná. Na výstupu kapalina volně odpadá na spodní hladinu rychlostí c_2 , jejíž úhel s obvodovou rychlostí u_2 je v ideálním případě 90° . Velikost β_2 je důležité volit tak, aby nedocházelo ke kolizi paprsku se zadní stranou následující lopatky a zároveň byla dosažena co nejvyšší efektivita. [3]



Obr. 2.7 Rychlostní trojúhelníky Peltonovy turbíny
[převzato z 3]

2.2 Turbína Turgo

Jedná se o rovnotlakou turbínu s parciálním ostřikem. Ve srovnání s Peltonovou turbínou je schopná dosáhnout vyšších otáček, je konstrukčně jednodušší, levnější a technologicky méně náročná. Účinnost tohoto stroje se pohybuje od 80 do 85 %. Jejím vynálezcem byl roku 1920 Eric Crewdson. Používá se pro hodnoty měrné energie E od 100 do $3000 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$. Turbína Turgo je typově příbuzná Peltonově turbíně. Přívod vody je řešen ve tvaru potrubí kruhového průřezu, na jehož konci bývá šikmo umístěná jedna nebo více dýz. Voda vystupující z dýzy dopadá šikmo na oběžné kolo, kterému předává svoji kinetickou energii. Od oběžného kola voda volně odpadá na spodní hladinu vody a odpadním kanálem je odváděna zpět do řeky. Schéma celého zařízení je uvedené na obrázku 2.8. [1] [10]



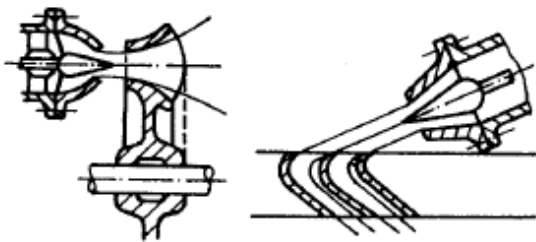
Obr. 2.8 Schéma turbíny Turgo [10]
 H - využitý spád
 $H_{ztr.}$ - nevyužitý spád

Dýza

U turbíny Turgo je dýza prakticky identická s dýzou Peltonových turbín. U malých vodních elektráren nižších výkonů se nejčastěji jehla zasouvá a vysouvá ručně pomocí pohybového šroubu, u větších strojů je regulace řešena stejně jako u Peltonových turbín. [1]

Oběžné kolo a lopatky

Oběžné kolo se skládá z vnějšího a vnitřního věnce, mezi kterými jsou umístěny zakřivené lopatky. Oběžné kolo je umístěné na vertikální, vzácně i horizontální hřídeli, která nese celou váhu oběžného kola. U menších strojů může být na jedné hřídeli umístěn generátor i samotné oběžné kolo. Průtok vody oběžným kolem je v šikmém směru, přičemž při výstupu má voda téměř nulovou obvodovou rychlost a volně odpadá do odpadního kanálu. Lopatky jsou ve tvaru korečku, přičemž vstupní hrana bývá užší než výstupní, z důvodu rozlití vody po celé lopatce. U turbín menších výkonů se lze setkat s kulovitým tvarem lopatek s menší účinností, ale jednodušší výrobou a nižší cenou. Znázornění tvaru lopatek a oběžného kola je na obrázcích 2.9 a 2.10. [1]



Obr. 2.9 Lopatky turbíny Turgo [1]

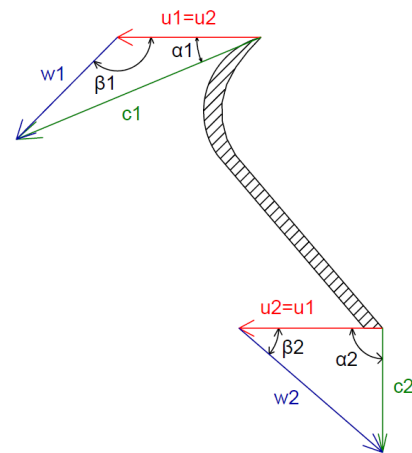


Obr. 2.10 Oběžné kolo Turgo turbíny [11]

Regulace turbíny

Regulace u turbín Turgo je prováděna vysouváním a zasouváním jehly. Existují případy, kdy soustrojí má několik neregulovatelných dýz, a jednu manuálně nebo mechanicky regulovatelnou. Použití deflektoru bývá vzácné a pro tento typ turbíny poměrně složité. K úplnému zastavení přívodu vody do turbíny slouží kulový uzávěr nebo šoupátko umístěné v přívodním potrubí. [1]

Rychlostní trojúhelníky turbíny Turgo jsou zobrazeny na obr. 2.11. Obvodové rychlosti na vstupu a výstupu z oběžného kola jsou si rovny, tj. u_1 je rovna u_2 . Na výstupu z oběžného kola je dle Eulerovy turbínové rovnice (1.13) směr absolutní rychlosti kapaliny nastaven geometrií lopatek tak, aby byl kolmý na směr obvodové rychlosti oběžného kola. Obvodová složka absolutní rychlosti kapaliny je tedy nulová a kapalina volně odpadá na spodní hladinu pod oběžným kolem turbíny. Tím je dosažena maximální hydraulická účinnost.

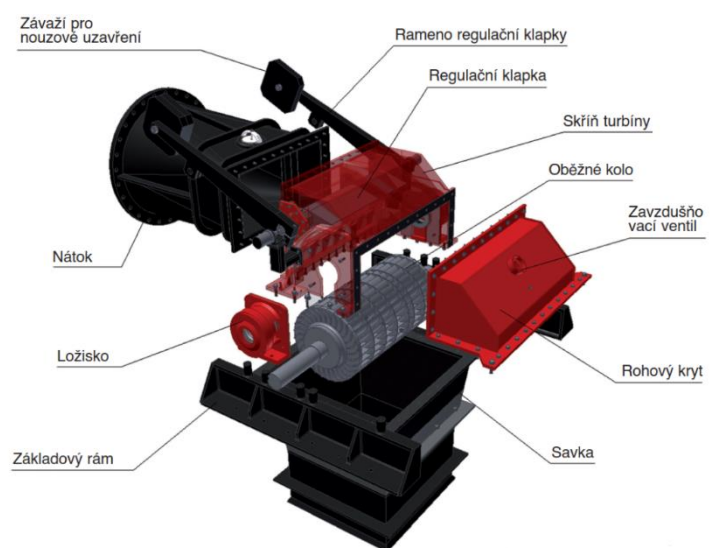


Obr. 2.11 Rychlostní trojúhelníky turbíny Turgo [převzato z 3]

2.3 Bánkiho turbína

Jednou z dalších používaných turbín u malých vodních elektráren je Bánkiho turbína. Jedná se o radiální rovnotlakou turbínu s parciálním vtokem a dvojnásobným průtokem. Používá se pro měrnou energii E od 10 do 2000 J.kg⁻¹ a pro průtok Q od 0,02 až 9 m³.s⁻¹. Obvyklý výkon P těchto turbín je v rozmezí od 1 do 1000 kW. Vynálezce této turbíny byl maďarský profesor Donát Bánki, který v letech 1912 až 1919 navázal na výzkum australského inženýra A.G.M. Mitchela a sestrojil první turbínu, které nyní nese jeho jméno. Hřídel bývá nejčastěji umístěna horizontálně, ve výjimečných případech může být i ve vertikální poloze. Účinnost Bánkiho turbíny se pohybuje až do 85 % a je vhodná pro takové malé vodní elektrárny, kde by výběr technicky dokonalejších typů, jako jsou Kaplanovy nebo Francisovy turbíny, byl příliš vysoká investice s dlouhou dobou návratnosti. Její výhodou je také širší rozsah vysokých účinností při proměnných průtocích a nenáchylnost ke kavitaci ve srovnání s Francisovou turbínou. Proto se v dnešní době stará soustrojí z Francisových turbín v malých vodních elektrárnách často nahrazují Bánkiho turbínami. [3] [12]

Konstrukční řešení Bánkiho turbíny je uvedeno na obr. 2.12. Pro přívod vody k turbíně se používá přívodní potrubí. Na konci přívodního potrubí se nachází regulační klapka nebo posuvný segmentový uzávěr. Následuje oběžné kolo s hřídelí, která se otáčí na dvou ložiskách umístěných v ložiskových domcích. Odvod vody od turbíny může být řešen ve tvaru savky, nebo jako zakrytý prostor, kde kapalina volně odpadá na spodní hladinu. V případě použití savky rozdíl tlaků v prostoru za oběžným kolem turbíny vyrovnává zavzdušňovací ventil. Konstrukce Bánkiho turbíny je v porovnání s ostatními typy poměrně jednoduchá, což je také jednou z jejích předností. [3] [13]



Obr. 2.12 Schéma Bánkiho turbíny [13]

Oběžné kolo a lopatky

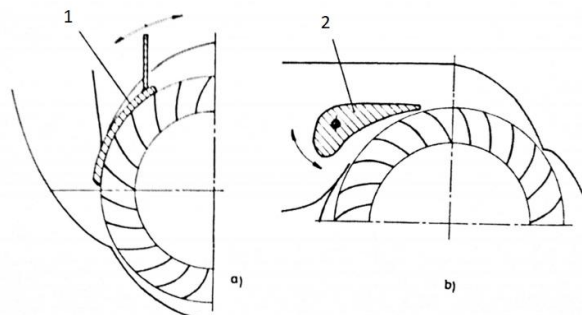
Tvar oběžného kola je znázorněn na obr. 2.13. Lopatky oběžného kola jsou vsazeny do postranních disků a svařeny s jejich vnitřní stranou. Počet lopatek oběžného kola může být podle velikosti turbíny dle [13] až 37. Disky jsou dále navařeny na hřídel. U malých vodních elektráren, kde se v průběhu provozu mění průtok, se používá dělené oběžné kolo a zároveň s tím i dělená regulační klapka nebo segmentový uzávěr. Rozdělení oběžného kola se provádí ve dvou třetinách jeho délky. [13]



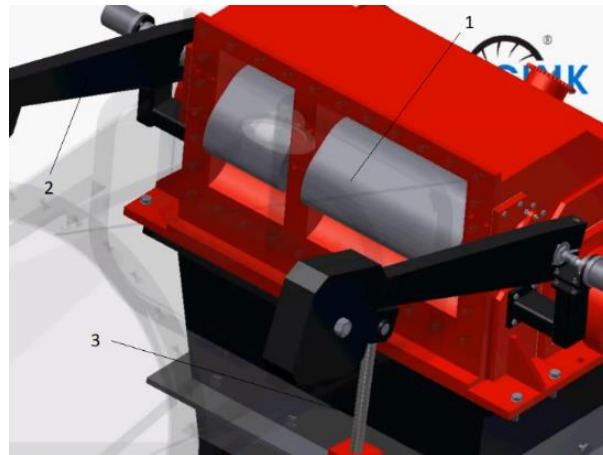
Obr. 2.13 Oběžné kolo Bánkiho turbíny [14]

Regulace turbíny

Regulace turbíny se provádí otevíráním nebo uzavíráním regulační klapky, v některých případech pak pohybem segmentového uzávěru. Schéma těchto zařízení je uvedeno na obr. 2.14 a 2.15. V případě děleného oběžného kola se používá i dělené regulační zařízení, tj. klapky nebo uzávěru. Každá oddělená část pak má vlastní ovládání. U regulačních klapek bývá v podobě prodloužených ramen, na které je možné umístit závaží, které v případě odstavení turbíny od proudu nouzově uzavře průtok vody. Ovládání těchto ramen probíhá u menších zařízení ručně, u strojů vyšších výkonů pak automaticky. Aby se dosáhlo nižšího průtoku vody turbínou, regulační klapka nebo segment se přivře a naopak. Při použití děleného oběžného kola se dá průtok vody na oběžném kole rozdělit. V případě nízkých průtoků je možné uzavřít větší klapku, která svou délkou odpovídá dvěma třetinám délky oběžného kola. Kapalina tedy protéká turbínou a vstupuje na oběžné kolo jen v jedné třetině jeho délky. Při poněkud vyšším průtoku se dá uzavřít menší regulační klapka a oběžným kolem kapalina protéká ve dvou třetinách jeho délky. Při vysokých hodnotách průtoku dojde k otevření obou klapek a kapalina proudí skrze celou délku oběžného kola. To stejné pak platí u i segmentového uzávěru. U strojů nižších výkonů lze průtok vody turbínou zastavit jen použitím regulačního zařízení, u větších se používá ještě kulový uzávěr nebo šoupátko v přívodním potrubí.

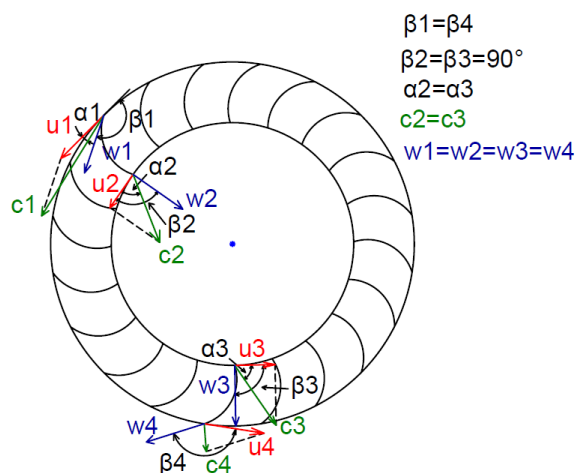


Obr. 2.14 Regulace Bánkiho turbíny [1]
1 - segmentový uzávěr
2 - regulační klapka



Obr. 2.15 Dělená regulační klapka
Bánkiho turbíny [13]
1 - regulační klapka
2 - rameno
3 - ovládací píst

Rychlostní trojúhelníky Bánkiho turbíny jsou uvedeny na obr. 2.16. Rychlostní poměry v oběžném kole jsou následující: obvodová rychlost u_1 je rovna obvodové rychlosti u_4 a obvodová rychlost u_2 je rovna obvodové rychlosti u_3 . Poměr velikostí rychlostí u_1 , u_2 a u_3 , u_4 je závislý na vnitřním a vnějším průměru lopatkového kruhu. Kapalina vtéká na oběžné kolo s absolutní rychlostí c_1 a opouští oběžné kolo s absolutní rychlostí c_4 . Velikost absolutních rychlostí c_2 a c_3 je stejná a úhly, které svírají s obvodovou rychlostí jsou také stejné, tj. úhel α_2 je roven α_3 . Velikost relativních rychlostí se při průtoku vody oběžným kolem nemění. To znamená, že velikost w_1 je stejná jako velikost w_2 , w_3 a w_4 . Úhly relativní rychlosti na vstupu a výstupu z oběžného kola Bánkiho turbíny jsou si v ideálním případě také rovny, takže β_1 je rovna β_4 . Dále úhly β_2 a β_3 relativních rychlostí w_2 a w_3 svírají s příslušnými absolutními rychlostmi úhel 90° . [1] [3] [13]



Obr. 2.16 Rychlostní trojúhelníky
Bánkiho turbíny [převzato z 3]

3 PŘETLAKOVÉ TURBÍNY A JEJICH REGULACE

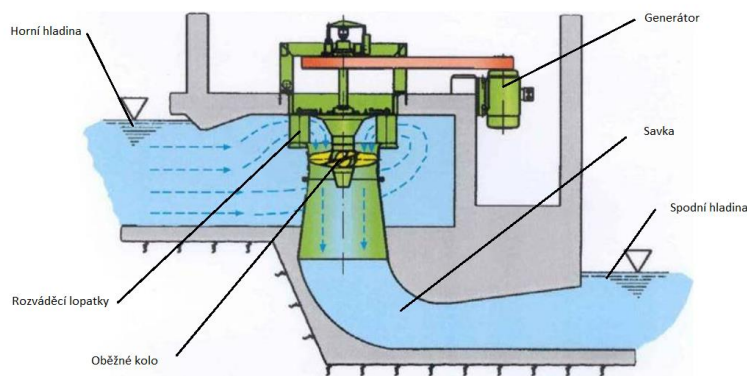
Přetlakové turbíny jsou vhodné pro střední a malé spády a velké průtoky. Běžně jsou instalované v elektrárnách, které využívají vodu z přilehlých nádrží a přehrad. U malých vodních elektráren se většího rozdílu spodní a horní hladiny dosahuje pomocí vybudování tzv. vzdouvacího zařízení. U dolních a středních toků jím může být např. jez. V některých případech je samotná turbína zabudovaná v jezovém tělese a voda vytékající z turbíny se vrací přímo do koryta řeky. Další možností, jak zvýšit spád, zvláště na spodních tocích řek, je vybudování umělého koryta, které odvede vodu do elektrárny a následně zpět do vodního toku. Délka těchto kanálů může dosahovat až několika kilometrů. Nejrozšířenější přetlakové turbíny používané v malých vodních elektrárnách jsou turbíny Kaplanovy, jejich zjednodušené verze, Francisovy a zřídka také Dériazovy turbíny.

3.1 Kaplanova turbína a její varianty

Jedná se o přetlakovou axiální turbínu. Používá se pro měrné energie od $15 - 150 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ a pro velké průtoky. Účinnost těchto strojů se při ideálních průtocích pohybuje v rozmezí od 88 až do 93 %. Jejím vynálezcem byl roku 1912 Viktor Kaplan, který působil jako profesor na brněnské technice. Její nevýhodou je relativní konstrukční složitost oproti ostatním typům turbín a zároveň s tím i vyšší cena. Proto vzniklo několik zjednodušení, jejichž účinnost ale nedosahuje svých maximálních hodnot v tak širokém rozmezí průtoků jako u Kaplanovy turbíny. U strojů nižších výkonů se však z ekonomických důvodů dává přednost těmto typům. Jedná se o turbíny propelerové a turbíny Thomanovy. [1]

3.1.1 Kaplanova turbína

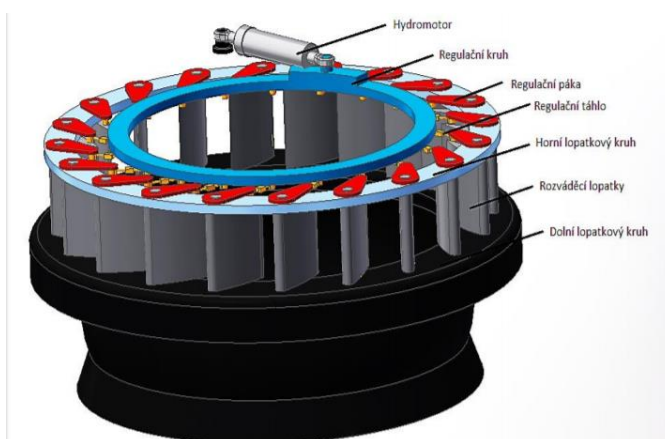
Konstrukce přívodu vody k turbíně závisí na konkrétní lokalitě. Velice často má tvar spirály, která vyvolává cirkulaci kapaliny ještě před vstupem na rozváděcí lopatky, může se však nacházet i v kašnovém uspořádání. Rozváděcí lopatky Kaplanovy turbíny, podobně jako u turbíny Francisovy, jsou nastavitelné a slouží k regulaci turbíny. Mohou se podle potřeby nacházet v radiální, diagonální i axiální poloze. Osa oběžného kola bývá umístěna ve vertikální nebo horizontální poloze. Na oběžném kole jsou umístěny lopatky, které jsou také nastavitelné, což je právě pro Kaplanovu turbínu typické. Možnost dvojí regulace výrazně zvyšuje pásmo vysoké účinnosti celého stroje a dělá jej vhodným pro instalaci tam, kde se v průběhu roku výrazně mění průtok, zvláště tedy pro malé vodní elektrárny na středních a dolních tocích. Pro odvod vody od oběžného kola se používá savka. Schéma uspořádání Kaplanovy turbíny je uvedeno na obr. 3.1. [1] [5]



Obr. 3.1 Schéma vertikální kašnové Kaplanovy turbíny [15]

Rozvaděč

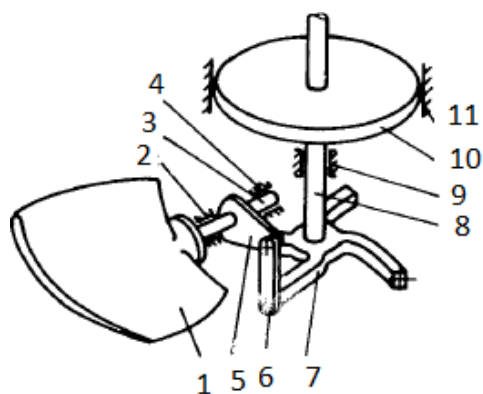
Skládá se z rozváděcích lopatek, které jsou pomocí čepů umístěny do horního a dolního lopatkového kruhu. Na horní čep lopatky, který přesahuje z horního rozváděcího kruhu jsou připojeny regulační páky. Pomocí nastavitelných táhel jsou páky připevněny k regulačnímu kruhu. Průtok vody turbínou je regulován natáčením rozváděcích lopatek, jejichž pohyb je přes regulační páky, táhla a regulační kruh ovládán připojeným hydromotorem. Jeho pohyb je vyvolán tlakovým olejem. V dnešní době je impuls k dodání tlakového oleje vydán řídicím systémem turbíny, který vyhodnocuje pomocí čidel aktuální vodní stav a plynule na něj reaguje. Schéma rozvaděče vertikální Kaplanovy turbíny je uvedeno na obrázku č. 3.2. [1] [16]



Obr. 3.2 Schéma rozvaděče Kaplanovy turbíny [16]

Oběžné kolo

Skládá se z lopatek rovnoměrně rozmístěných na náboji. U malých vodních elektráren se počet lopatek pohybuje v rozmezí od 3 do 5. Nejvyšší počet lopatek (10) byl použit na vodní elektrárně Orlick. Lopatkový kruh postrádá vnější věnec, mezi lopatkou a vnitřní stěnou pláště turbíny je tenká spára. Spárou dochází k určité objemové ztrátě, proto bývá tvar vnějšího pláště kulovitý. Tím je zajištěna minimální tloušťka spáry při různých polohách natočení lopatky. Při použití levnějšího a na výrobu jednoduššího válcového tvaru dochází ke zvyšování objemové ztráty při neoptimálních průtocích. Totéž platí pro náboj oběžného kola. Lopatky jsou uloženy na otočných čepích a radiálně zajištěny proti vysunutí, které by mohlo být způsobeno vlivem odstředivých sil. Čep bývá zpravidla uložen na dvou ložiskách. Otáčení čepu zajišťuje páka čepu, která se nachází uvnitř náboje. Ta je pomocí táhla připojena k přestavnému kříži,



Obr. 3.3 Schéma ovládní lopatek oběžného kola Kaplanovy turbíny [1]

- | | |
|--------------------------|------------------------|
| 1 - lopatka | 2 - vnější ložisko |
| 3 - čep | 4 - vnitřní ložisko |
| 5 - páka čepu | 6 - táhlo |
| 7 - přestavný kříž | 8 - ovládací tyč |
| 9 - vedení ovládací tyče | 10 - píst hydromotoru |
| | 11 - válec hydromotoru |

který zajišťuje propojení s ostatními lopatkami. Uprostřed přestavného kříže se nachází přestavná tyč, která druhým koncem spojuje píst hydromotoru. Jeho pohyb je řízen tlakovým olejem a podle potřeby natáčí lopatky. U menších zařízení se místo hydromotoru běžně používá i elektrický servomotor. Schéma ovládání lopatek oběžného kola je zobrazeno na obrázku 3.3 a 3.4. [1]

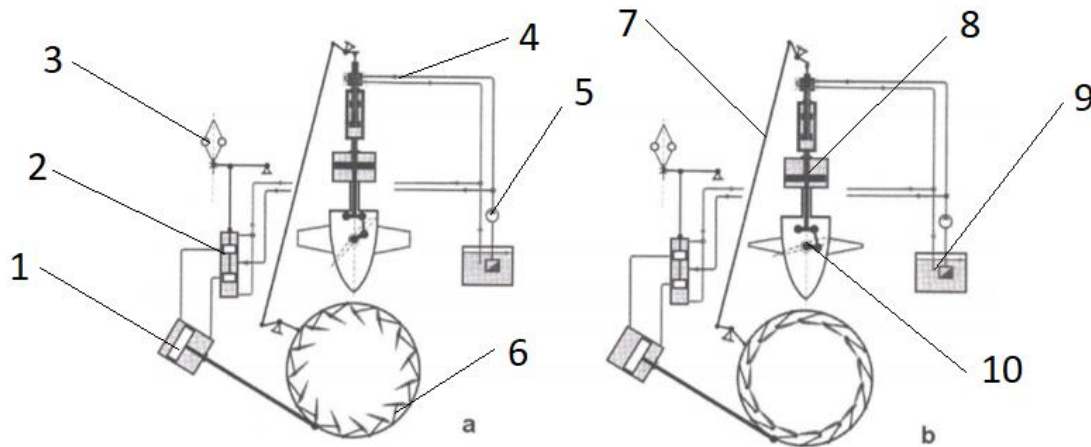


Obr. 3.4 Přestavný kříž oběžného kola [17]
1 - otvor pro ovládací tyč 2 - přestavný kříž
3 - lopatka 4 - táhlo
5 - náboj oběžného kola 6 - páka čepu

Uložení hydromotorů se dělí podle toho, zda se pohybuje společně s oběžným kolem, či nikoliv. Nerotující hydromotor může být u některých typů turbín umístěn v prostoru strojovny za oběžným kolem. Výhodou tohoto uspořádání je snadný přístup a montáž, dále taky možnost výměny hydromotoru za jiný alternativní pohon, např. elektrický servomotor. Ovládání se uskutečňuje pomocí relativně dlouhé ovládací tyče, která je vyvedena skrz celou délku rotující duté hřídele do tzv. přestavné objímky. V ní dochází k vyrušení rotačního pohybu ovládací tyče. Regulační objímka je připojena k pístnici hydromotoru, jehož pohyb vyvolává i pohyb ovládací tyče a tím i natáčení oběžných lopatek. U elektrického servomotoru se přímočarý pohyb regulační objímky vytváří pomocí pohybového šroubu nebo pákovým mechanismem. Uspořádání s nerotujícím hydromotorem se používá u strojů nižších výkonů, kde nedochází k tak vysokému namáhání pístnice z důvodu pasivních odporů.

Rotující hydromotor je připojen k rotoru turbíny. U strojů větších rozměrů může být uložen přímo v náboji oběžného kola. V tomto případě je regulační tyč podstatně kratší. Do hřídele je vyvrtán otvor, který slouží k umístění spojovací trubky na přívod oleje do hydromotoru. Spojovací trubka druhým koncem končí v rozdělovací hlavě, která usměrňuje tok oleje pod nebo nad pístnici, vyvolává její pohyb a tím i natáčení oběžných lopatek. Umístění rotujícího hydromotoru na konce hřídele umožňuje lepší přístup při montáži i servisu. Mechanismus pohybu lopatek je stejný jako v předchozím případě, jen regulační tyč bývá delší. Můžeme se setkat i s umístěním hydromotoru uprostřed, nebo v kterékoli jiné části hřídele. Nevýhodou tohoto uspořádání je nutnost umístění rozdělovací hlavy nebo rotačního přívodu oleje k pístu servomotoru a celková konstrukční složitost a velikostní nároky. [1] [16]

Aby se zajistilo správné nastavení lopatek oběžného kola a rozvaděče, je zpravidla použito pouze jednoho silového členu. Pomocí vazby pak pohyb jednoho členu zároveň vyvolává pohyb druhého, čímž je zajištěno plynulejší a jednodušší regulace, než kdyby byl každý člen ovládán zvlášť. Znárodnění této vazby je uvedeno na obr. 3.5. [18]

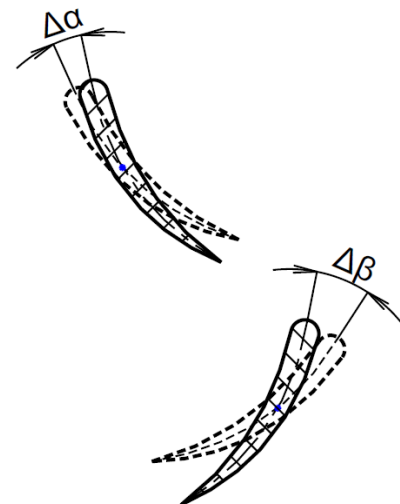


Obr. 3.5 Schéma společného natáčení rozváděcích a oběžných lopatek [18]

- | | |
|-----------------------------|---|
| <i>a - otevřeno</i> | <i>b - zavřeno</i> |
| <i>1 - píst hydromotoru</i> | <i>2 - elektrohydraulický převodník</i> |
| <i>3 - akumulátor</i> | <i>4 - dopravník oleje</i> |
| <i>5 - čerpadlo</i> | <i>6 - rozváděcí kruh</i> |
| <i>7 - táhlo</i> | <i>8 - přestavná tyč</i> |
| <i>9 - olejová nádrž</i> | <i>10 - oběžné kolo</i> |

Regulace turbíny

Při provozu vodních turbín napojených na elektrickou síť je důležité, aby turbína při různých průtocích zachovávala neustále stejné otáčky z důvodu dodržení fázování sítě a aby byly při proměnném průtoku zachovány ideální proudové poměry ve stroji. K tomu u Kaplanovy turbíny slouží natáčení rozváděcích a oběžných lopatek. Změna polohy rozváděcích lopatek vede ke změně úhlu absolutní rychlosti kapaliny na vstupu do oběžného kola $\Delta\alpha$, čímž se mění rotace kapaliny. Stejně tak změna polohy oběžných lopatek způsobuje změnu úhlu relativní rychlosti kapaliny o hodnotu $\Delta\beta$. Tyto veličiny jsou znázorněny na obr. 3.6. Na obr. 3.7 jsou uvedeny rychlostní trojúhelníky při jmenovitém průtoku, tj. ideálního, na který je dané zařízení navrženo. Z obrázku je patrné, že relativní rychlost kapaliny při vstupu na oběžné kolo w_1 má směr přibližně tečný na střednici průřezu lopatky. To způsobuje plynulý průtok kapaliny skrze prostor oběžného kola. Při jmenovitém průtoku je směr kapaliny c_2 přibližně axiální a velikost rychlosti c_{u2} se blíží k nule. To se projevuje na celkové účinnosti turbíny, neboť při

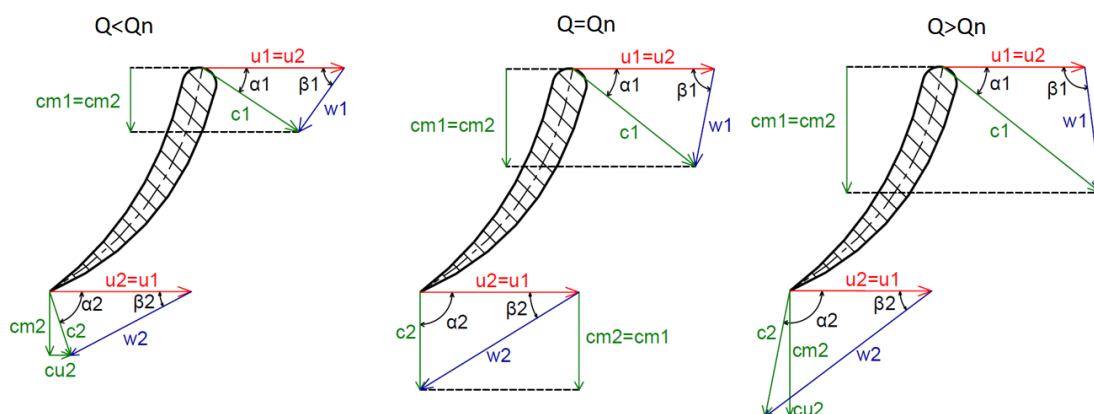


Obr. 3.6 Znárodnění natáčení lopatek Kaplanovy turbíny

nižších velikostech rychlosti c_{u2} je lépe využitelná energie vody v savce. Meridiální složka absolutní rychlosti c_{m2} je rovna absolutní rychlosti c_2 na výstupu z oběžného kola. V ideálním případě je úhel α_2 mezi absolutní rychlostí kapaliny a unášivé rychlosti roven 90° .

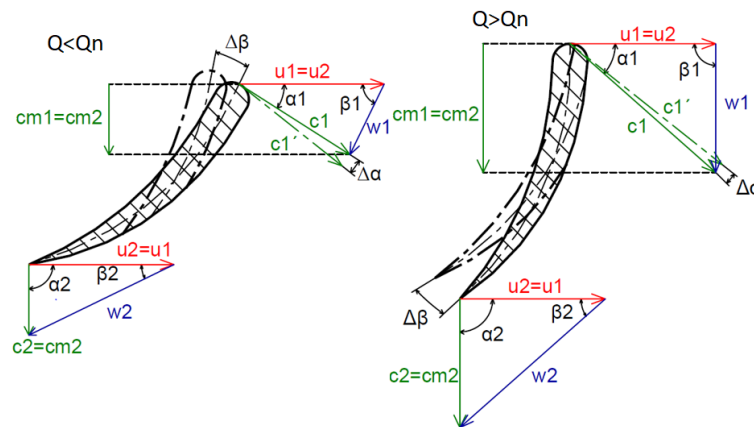
Na stejném obrázku 3.7 jsou uvedeny rychlostní trojúhelníky na vstupu a výstupu z oběžného kola pro průtok větší než je jmenovitá hodnota. Relativní složka rychlosti na vstupu do oběžného kola nemá ideální směr a vtéká na tlačnou stranu lopatky a může docházet ke snižování účinnosti. Při extrémních hodnotách dochází k odtrhávání proudu od lopatky, nežádoucí kavitaci a opotřebením lopatek. Absolutní rychlost na výstupu z oběžného kola c_2 již nemá axiální směr a úhel α_2 je větší než 90° . Meridiální složka absolutní rychlosti c_{m2} již není rovna rychlosti c_2 a tak vzniká obvodová složka rychlosti c_{u2} . To způsobuje cirkulaci kapaliny, za oběžným kolem se tvoří tzv. vírový cop, který je tvořen parními bublinami, které vznikají v důsledku náhlého snížení tlaku za lopatkou. Ty dále při vstupu do míst s vyšším tlakem zanikají a mohou při extrémních podmínkách vyvolávat tlakové pulzace, které jsou nebezpečné pro celé zařízení.

Dále jsou zde uvedeny rychlostní trojúhelníky pro průtok nižší než je jmenovitá hodnota. Relativní složka rychlosti na vstupu do oběžného kola w_1 opět nemá ideální směr a může docházet k odtrhávání proudu od lopatky a snižování účinnosti. Na výstupu z oběžného kola není absolutní složka rychlosti kapaliny c_2 v axiálním směru a úhel α_2 je menší než 90° . Meridiální složka absolutní rychlosti c_{m2} stejně jako při větším průtoku není rovna rychlosti c_2 . Vzniká obvodová absolutní rychlost kapaliny c_{u2} a kapalina cirkuluje, tentokrát v opačném směru než v případě většího průtoku. [3]



Obr. 3.7 Rychlostní trojúhelníky axiální turbíny před regulací [převzato z 3]
 Q_n - jmenovitý průtok

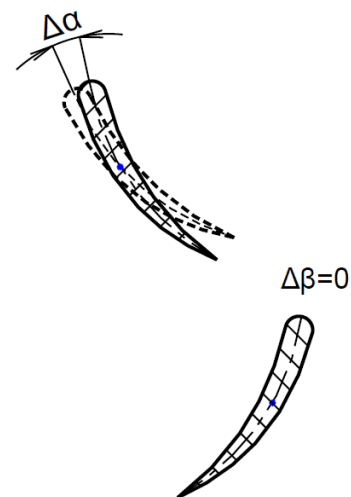
Na obr. 3.8 je znázorněno, jak se změní rychlostní trojúhelníky po natočení lopatek oběžného kola o úhel $\Delta\beta$ a rozváděcích lopatek o úhel $\Delta\alpha$ pro průtok vyšší a nižší než je jmenovitá hodnota. Z obrázku je patrné, že relativní rychlost kapaliny w_1 má ideální směr, tj. dochází k plynulému nátoku kapaliny na lopatku a nedochází k odtrhávání proudu a snižování účinnosti. Šipka označená c_1' značí směr absolutní rychlosti kapaliny c_1 před natočením rozváděcích lopatek. Absolutní rychlost c_2 na výstupu z oběžného kola má optimální axiální směr, meridiální rychlost c_{m2} je rovna c_2 a obvodová složka absolutní rychlosti c_{u2} je nulová. Úhel α_2 mezi unášivou (obvodovou) rychlostí a absolutní rychlostí c_2 je 90° . Možnost této dvojí regulace dává Kaplanově turbíně, popř. Dériazově turbíně, u které regulace probíhá za stejných podmínek, relativně vysokou účinnost pro široké pásmo průtoků, při kterých dokáže pracovat. [3]



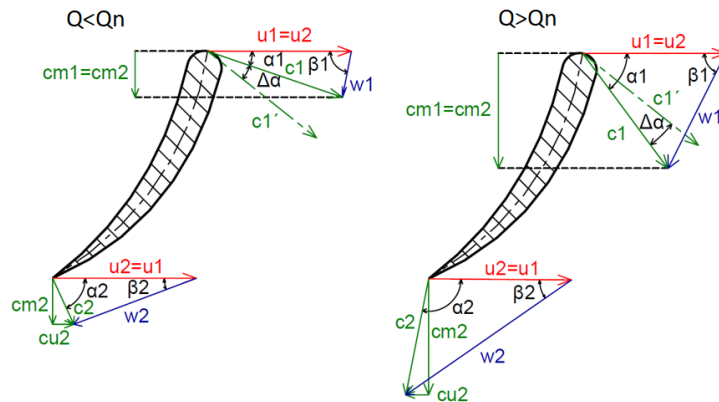
Obr. 3.8 Rychlostní trojúhelníky Kaplanovy turbíny po regulaci [převzato z 3]
 Q_n - jmenovitý průtok
 c' - směr absolutní rychlosti před natočením rozvaděče

3.1.2 Propelerové turbíny

U malých vodních elektráren nižších výkonů se používají tzv. turbíny propelerové. Jedná se o axiální přetlakové turbíny konstrukčně vycházejících z Kaplanových, jejich specifikem je neregulovatelné oběžné kolo. Regulace probíhá, podobně jako u turbín Francisových, pouze natáčením rozváděcích lopatek. Lopatky oběžného kola mohou být společně s nábojem odlity, nebo připojeny pomocí šroubového spoje a nastaveny podle příslušné lokality. Tento typ turbín je konstrukčně poměrně jednoduchý, odpadají zde problémy se složitým mechanismem natáčení oběžných lopatek za chodu stroje a také pro vytvoření vazby mezi oběma členy regulace, jako je u Kaplanových turbín. Díky tomuto zjednodušení se výrazně snižuje cena celého zařízení na úkor účinnosti. V případě malých vodních elektráren nižších výkonů by však instalace poměrně drahé Kaplanovy turbíny byla ekonomicky nevýhodná a návratnost investice příliš dlouhá. Rychlostní trojúhelníky pro jmenovitý průtok, větší průtok a nižší průtok jsou stejné jako v případě Kaplanovy turbíny a jsou uvedeny na obr. 3.7. Natáčení lopatek rozváděcího kola vede ke změně úhlu absolutní rychlosti kapaliny při vstupu na oběžné kolo o $\Delta\alpha$, úhel relativní rychlosti se z důvodu pevných oběžných lopatek nemění. Schéma je znázorněno na obr. 3.9. [1] [3]

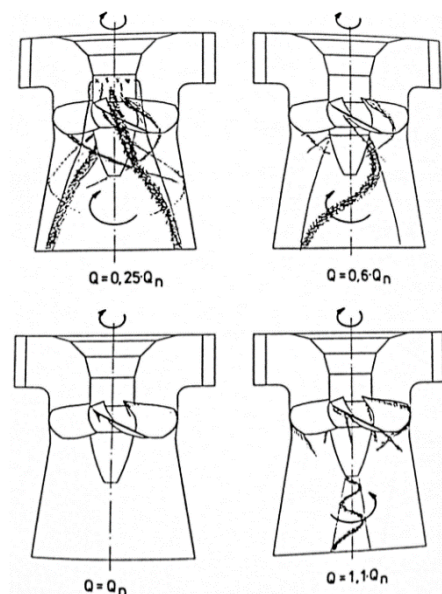


Obr. 3.9 Znárodnění natáčení lopatek propelerové turbíny



Obr. 3.10 Rychlostní trojúhelníky propelerové turbíny po regulaci [převzato z 3]
 Q_n - jmenovitý průtok
 c' - směr absolutní rychlosti před natočením rozvaděče

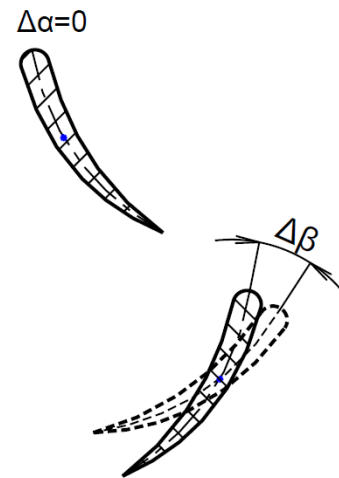
Na obr. 3.10 je zobrazeno, jak se mění rychlostní trojúhelníky při regulaci vyššího a nižšího průtoku pomocí natáčení rozváděcích lopatek o úhel $\Delta\alpha$. Rychlosti c_1 mění svůj směr. Meridiální složka rychlosti c_{m1} se při zmenšování úhlu α snižuje a při zvětšování zvyšuje. Relativní rychlost w_1 má téměř ideální směr vtoku na lopatku a nedochází tedy ke kavitačnímu opotřebení lopatek a snížení účinnosti. Z důvodu pevného nastavení oběžných lopatek nedochází ke změně o úhel $\Delta\beta$. Na výstupu z oběžného kola proto vznikají obvodové složky absolutní rychlosti kapaliny c_{u2} a za oběžným kolem se tvoří nežádoucí vírový cop. Směr jeho rotace je závislý na směru rotace turbíny a na velikosti průtoku. Znázornění tohoto jevu je uvedeno na obr. 3.11. Tvořící se víry v savce turbíny snižují celkovou účinnost tohoto zařízení oproti klasické Kaplanově turbíně při vyšších a nižších průtocích než je jmenovitá hodnota a celková účinnost nenabývá svých maximálních hodnot pro tak široké pásmo průtoků, jako je tomu u turbín s dvojitou regulací, tj. natáčení lopatek oběžného i rozváděcího kola. [3]



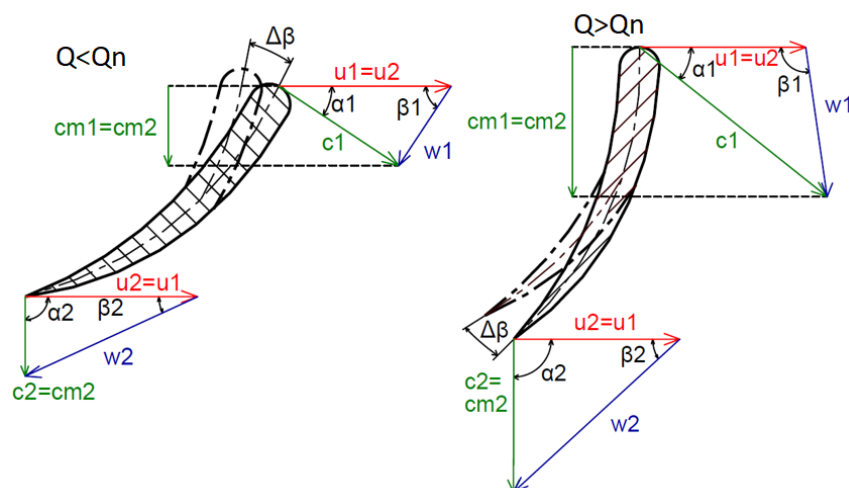
Obr. 3.11 Víry tvořící se v savce propelerové turbíny [3]
 Q_n - jmenovitý průtok

3.1.3 Thomanova turbína

Druhým způsobem, jak konstrukčně zjednodušit Kaplanovu turbínu, je použití pevného rozváděcího kola a nastavitelného oběžného. U tohoto uspořádání se opět nemusí řešit vazba mezi oběma regulacemi, nevýhodu Thomanových turbín může být složitější konstrukce regulačního mechanismu oběžného kola oproti regulaci rozvaděče propelerových turbín a nemožnost úplně zastavit průtok jen pomocí rozvaděče. Znázornění rychlostních trojúhelníků před regulací odpovídá obr. 3.7, stejně jako u Kaplanových turbín. Při regulaci se mění úhel β natočení oběžných lopatek o úhel $\Delta\beta$. Z důvodu pevného rozvaděče je změna úhlu α nulová, jak je vidět na obr. 3.12. Na obr. 3.13 je opět uvedeno, jak se změní rychlostní trojúhelníky po natočení oběžných lopatek. Z obrázku je patrné, že úhel absolutní rychlosti kapaliny na výstupu z oběžného kola c_2 má téměř optimální axiální směr, obvodová složka rychlosti se blíží k nule a kapalina za oběžným kolem necirkuluje. To má pozitivní vliv na účinnost turbíny, jak plyne z Eulerovy turbínové rovnice (1.13), a možnost využití energetického potenciálu v savce turbíny. Relativní rychlost w_1 však nemá ideální směr, což znamená že kapalina nevtéká do mezilopátkového prostoru rovnoměrně, dochází ke snížení účinnosti a může způsobovat kavitační opotřebení lopatek. Pomocí regulace se tedy co nejvíce minimalizuje obvodová složka absolutní rychlosti a zároveň je zde snaha o zachování rovnoměrného nátoku kapaliny do mezilopátkového prostoru. Nežádoucí vlastnosti však nejsou nikdy zcela eliminovány, kvůli tomuto faktu tato turbína nedosahuje tak širokého pásma vysokých účinnosti, jako v případě dvojitě regulace Kaplanovy turbíny. [1] [3]



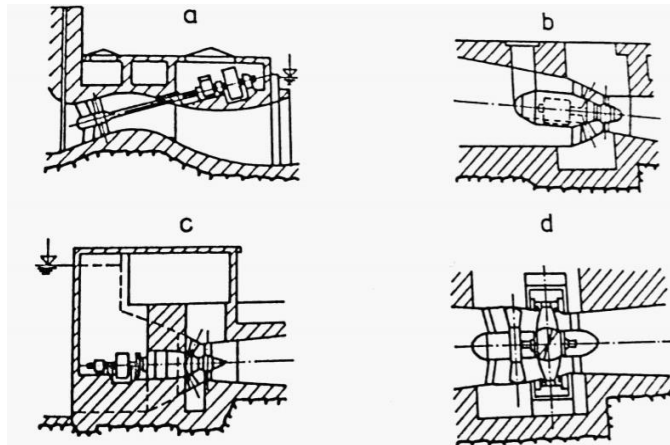
Obr. 3.12 Znázornění natáčení lopatek Thomanovy turbíny



Obr. 3.13 Rychlostní trojúhelníky Thomanovy turbíny po regulaci [převzato z 3]
 Q_n - jmenovitý průtok

3.1.4 Přímoproudové turbíny

Na konstrukci Kaplanových turbín navazují turbíny přímoproudové, někdy také nazývané přímotoké. Jsou vhodné pro místa s malou hodnotou měrné energie $E < 200 \text{ J.kg}^{-1}$ a velkými průtoky. Jedná se o axiální turbíny bez spirály, které mají vodorovnou, svislou, nebo šikmou hřídel. Jejich výhodou jsou menší a jednodušší rozměry a tím i nižší stavební náklady, což je činí vysoce vhodnými zejména pro použití v malých vodních elektrárnách. Tento typ turbín využívá diagonálního nebo axiálního rozvaděče a přímé savky. Přímoproudové turbíny jsou také méně náchylné na kavitaci. Znárodnění nejčastějších uspořádání přímoproudových turbín s

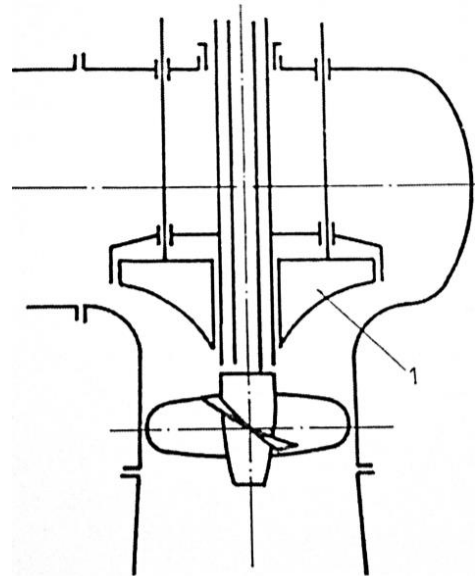


Obr. 3.14 Obvyklá uspořádání horizontálních přímoproudových turbín [3]
a - s vnějším generátorem
b - s obtékaným generátorem
c - s generátorem v šachtě
d - s protékaným generátorem

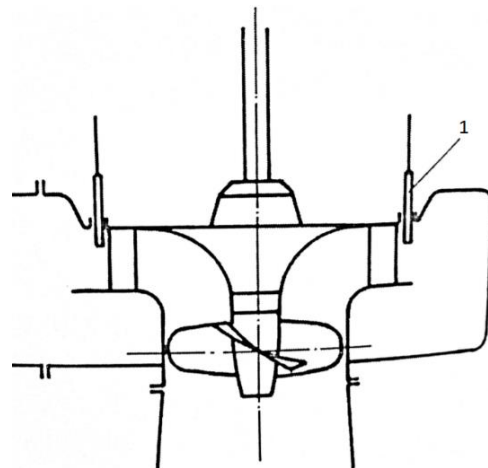
horizontální hřídelí je na obr. 3.14. Turbíny s vnějším generátorem jsou v dnešní době nejrozšířenější a při výstavbě malých vodních elektráren se jim dává přednost. Na obr. 3.14 a) je zobrazena turbína se šikmou hřídelí. Hřídel však bývá umístěna také horizontálně, toto uspořádání se někdy nazývá kolenová turbína nebo S-turbína. Oběžné kolo bývá umístěné na dlouhé štíhlé hřídeli uložené na dvojici ložisek. Ložisko nacházející se blíže oběžnému kolu je upevněno v tělese nosné hvězdy, která je pomocí lopatek přichycena k plášti turbíny. Součástí nosné hvězdy jsou i rozvaděcí lopatky. Druhý konec hřídele je vyveden do strojovny, kde je upevněn na radiálně axiálním ložisku a přes převodovku napojen na generátor. Druhou variantou je uspořádání s obtékaným generátorem. Celé soustrojí je umístěné v hydraulicky tvarované skříni, která je uložena na podpěrných lopatkách. Jejich nevýhodou je složitější přístup a nebezpečí průsaku vody do generátoru, jsou však vhodné do míst, kde je potřeba ušetřit co nejvíce stavebního místa. Výhodou turbín s generátorem v šachtě, zobrazené na obr. 3.14 c) je možnost lepšího přístupu ke generátoru, a to i za chodu stroje. Speciálním konstrukčním řešením je turbína s protékaným generátorem, obr. 3.14 d), nazývaná Straflo turbína. Toto uspořádání vzniklo z potřeby minimalizovat stavební náklady. Oběžné kolo turbíny má magnetickou vazbu na elektrický generátor. V náboji je umístěno budící vinutí a magnetický tok je přenášen na pólové nástavce umístěné na koncích oběžných lopatek. Vně celého zařízení je pak umístěno statorové vinutí generátoru. Vertikální přímoproudové turbíny bývají v provedení s vnějším generátorem nebo s generátorem obtékaným. Toto uspořádání však bývá stavebně poměrně náročné a srovnatelné s klasickým provedením Kaplanovy vertikální turbíny. Regulace přímoproudových turbín je řešeno obdobně jako u Kaplanových turbín a jejich variant. Podle potřeby je možné regulovat zároveň oběžnými lopatkami a rozvaděčem, pouze rozvaděčem a použít propelerové oběžné kolo, nebo použít pevný rozvaděč a natáčivé lopatky oběžného kola, jako je tomu u turbín Thomanových. [1] [3]

3.1.5 Axiální turbíny se zjednodušenou regulací

U turbín nízkých výkonů, tzv. mikrozdvořů, je ekonomicky nevýhodné používat předchozí zmíněné způsoby regulace. U propelerových turbín s pevnými lopatkami oběžného kola se dá využít jednodušších variant rozvaděče. Jedním ze způsobů je osově posuvný ventil, který je zobrazen na obr. 3.15. Ten je umístěn ve spirální skříní na ochranné trubce hřídele a svým pohybem mění průtočný průřez vstupu kapaliny do prostoru oběžného kola. Druhým způsobem je použití válcového uzávěru, jak je uvedeno na obr. 3.16. Válcový uzávěr je umístěn před vstupem kapaliny do rozvaděče a svým posunem omezuje průtočný průřez. Z hlediska efektivity a účinnosti je výhodnější použití válcového uzávěru před posuvným ventilem. Dalším zjednodušením je použití neregulovatelné turbíny. Axiální neregulovatelná turbína má pevné rozvaděcí lopatky i lopatky oběžného kola. Při výrobě je nastavena pevná geometrie lopatek a při provozu už se dále nemění. To vede ke značnému snížení účinnosti za neoptimálních průtoků. Použití axiální neregulovatelné turbíny však výrazně minimalizuje náklady na výrobu soustrojí a relativně jednoduchá konstrukce zvyšuje životnost mechanických částí turbíny. Také náklady na servis a údržbu těchto strojů jsou v porovnání s ostatními typy poměrně nižší. Tento typ turbín se používá v místech relativně stálých průtoků, nebo jen v určitém období roku a při neoptimálních průtocích se provoz přerušuje. [1] Speciálním případem axiální neregulovatelné turbíny je tzv. vírová turbína. Nejedná se o zjednodušenou variantu Kaplanovy turbíny, ale o zcela nový typ turbíny vynalezený na Fakultě strojního inženýrství v Brně, odboru Fluidního inženýrství Viktora Kaplana, prof. Pochylým a jeho týmem. Funguje na opačném principu než většina ostatních typů vodních turbín. Vodě vstupující na oběžné kolo je u klasických typů turbín udělena obvodová složka absolutní rychlosti c_{u1} pomocí rozvaděče a pomocí geometrie lopatek a regulace je nastavena obvodová složka absolutní rychlosti na výstupu z oběžného kola c_{u2} tak, aby podle Eulerovy turbínové rovnice byla co nejmenší a aby v savce v ideálním případě kapalina necirkulovala. U vírové turbíny naopak zcela chybí rozvaděč a kapalina vstupuje na oběžné kolo v axiálním směru. Složka absolutní rychlosti na výstupu z oběžného kola c_{u2} pak není nulová, ale je optimálně nastavena tak, aby bylo možné využití energetického potenciálu vody v savce turbíny. Schématické znázornění rychlostních trojúhelníků na vstupu a výstupu z oběžného kola vírové turbíny pro ideální, vyšší a nižší průtok je znázorněno na obr. 3.17. Při použití frekvenčního měniče se dá nastavit stálá frekvence pro různé průtoky a otáčky turbíny a tím je zajištěna regulace a možnost připojení turbíny do elektrické sítě. Regulaci tedy nezajišťuje mechanická



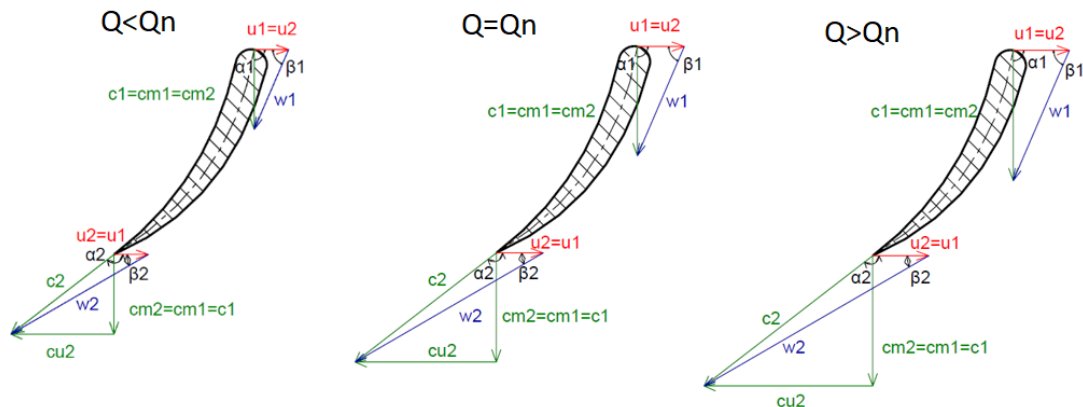
Obr. 3.15 Regulace osově posuvným ventilem [1]
1 - posuvný ventil



Obr. 3.16 Regulace válcovým uzávěrem [1]
1 - válcový uzávěr

inženýrství v Brně, odboru Fluidního inženýrství Viktora Kaplana, prof. Pochylým a jeho týmem. Funguje na opačném principu než většina ostatních typů vodních turbín. Vodě vstupující na oběžné kolo je u klasických typů turbín udělena obvodová složka absolutní rychlosti c_{u1} pomocí rozvaděče a pomocí geometrie lopatek a regulace je nastavena obvodová složka absolutní rychlosti na výstupu z oběžného kola c_{u2} tak, aby podle Eulerovy turbínové rovnice byla co nejmenší a aby v savce v ideálním případě kapalina necirkulovala. U vírové turbíny naopak zcela chybí rozvaděč a kapalina vstupuje na oběžné kolo v axiálním směru. Složka absolutní rychlosti na výstupu z oběžného kola c_{u2} pak není nulová, ale je optimálně nastavena tak, aby bylo možné využití energetického potenciálu vody v savce turbíny. Schématické znázornění rychlostních trojúhelníků na vstupu a výstupu z oběžného kola vírové turbíny pro ideální, vyšší a nižší průtok je znázorněno na obr. 3.17. Při použití frekvenčního měniče se dá nastavit stálá frekvence pro různé průtoky a otáčky turbíny a tím je zajištěna regulace a možnost připojení turbíny do elektrické sítě. Regulaci tedy nezajišťuje mechanická

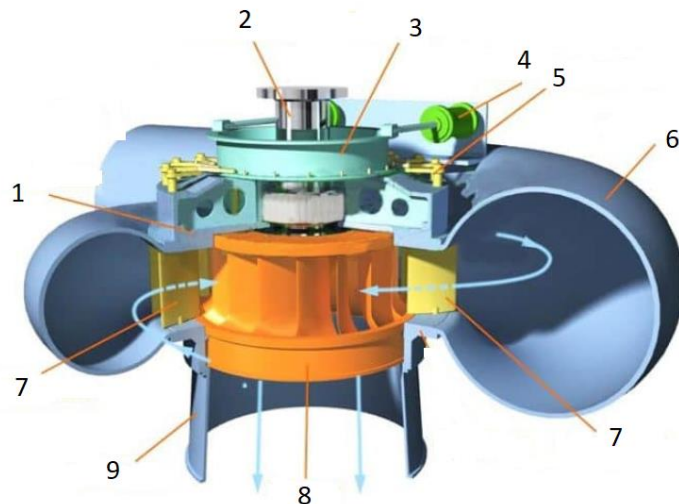
část turbíny, ale elektrická. Tento způsob se však dá použít pouze pro stroje nižších výkonů. [19]



Obr. 3.17 Rychlostní trojúhelníky vírové turbíny [převzato z 3]
 Q_n - jmenovitý průtok

3.2 Francisoa turbína

Jedná se o přetlakovou turbínu s radiálně axiálním průtokem. Jejím vynálezcem byl roku 1848 James B. Francis. U malých vodních elektráren se používá pro měrné energie od 200 do 3000 J.kg⁻¹ a pro průtok od 0,6 do 17 m³.s⁻¹. Účinnost tohoto typu turbíny se pohybuje okolo 85 - 90 %, v závislosti na průtoku. Používá se většinou v elektrárnách přehradního typu, v minulosti se běžně instalovala do míst s nízkými spády a většími průtoky, kde se však v dnešní době nahrazují novějšími typy, tj. Kaplanovou turbínou, nebo jejími zjednodušenými variantami (propelerová a Thomanova), přímoproudovými turbínami, a v určitých případech bývají také nahrazovány Bánkiho turbínou. Její výhodou však zůstává možnost provozování jak v turbínovém, tak v čerpadlovém režimu, čímž se stává vhodným strojem pro přečerpávací vodní elektrárny. Například v přečerpávací vodní elektrárně Dlouhé Stráně jsou nainstalovány dvě reverzní Francisovy turbíny, každá o výkonu 325 MW. Přívod vody k turbíně bývá nejčastěji ve tvaru spirály, používá se však i kašnové uspořádání. Lopatky rozvaděče jsou nastavitelné a



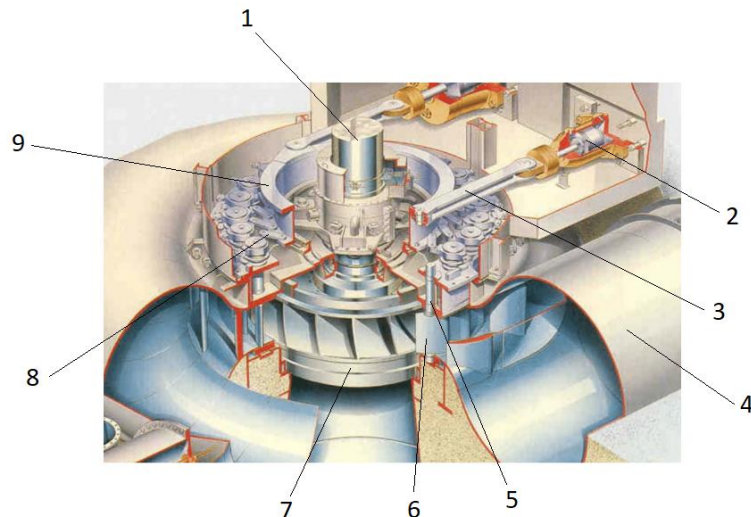
Obr. 3.18 Schéma Francisovy turbíny [22]

- | | | |
|-----------------------|---------------------|--------------------|
| 1 - horní kryt | 2 - hřídel | 3 - regulační kruh |
| 4 - hydromotor | 5 - táhlo rozvaděče | 6 - spirála |
| 7 - rozvaděcí lopatky | 8 - oběžné kolo | 9 - savka |

slouží k regulaci. Lopatky oběžného kola naopak pevné, podobně jako u axiální propelerové či neregulovatelné turbíny. Pro odvod vody od turbíny se využívá savky. Schéma Francisovy turbíny je znázorněno na obr. 3.18. [2] [3] [20] [21]

Rozvaděč

Rozvaděč Francisovy turbíny je podobné konstrukce jako rozvaděč Kaplanovy turbíny. Jeho lopatky jsou pomocí čepů umístěny do horního a dolního lopatkového kruhu a systémem regulačních pák a táhel připojeny k regulačnímu kruhu. Ten je otočný a jeho pohyb je vyvolán připojeným hydromotorem. Rozvaděč v případě potřeby dokáže úplně zastavit průtok vody turbínou. Schéma rozvaděče Francisovy turbíny je uveden na obr. 3.19. [1]



Obr. 3.19 Schéma rozvaděče Francisovy turbíny [23]

- | | | |
|-----------------|---------------------|-----------------------|
| 1 - hřídel | 2 - hydromotor | 3 - táhlo hydromotoru |
| 4 - spirála | 5 - čep | 6 - rozváděcí lopatka |
| 7 - oběžné kolo | 8 - regulační táhlo | 9 - regulační kruh |

Oběžné kolo

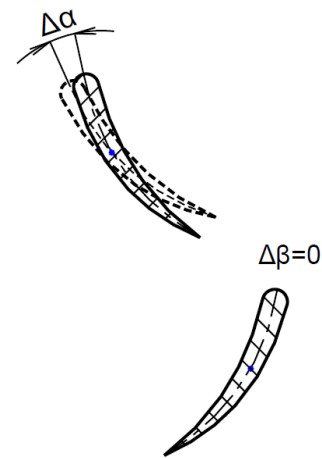
Lopatky oběžného kola jsou umístěny mezi nábojem a vnějším věncem. Oběžné kolo může být vyrobeno jako jeden celek odlitím a následným obráběním, nebo mohou být součásti vyrobeny zvlášť a následně svařeny. Svařování se používá u strojů nižších výkonů. Náboj bývá pomocí pera připojen na průchozí hřídel. Mezi víkem a vnějším věncem se nachází tenká spára, kterou může kapalina protékat nevyužita. Těsnění je prováděno pomocí výměnných těsnících kruhů. Do náboje jsou vyvrtány odlehčovací otvory, které také slouží k vyrovnávání tlaků a eliminaci axiálního zatížení soustrojí. Znárodnění oběžného kola Francisovy turbíny je uvedeno na obr. 3.20. [2] [3]



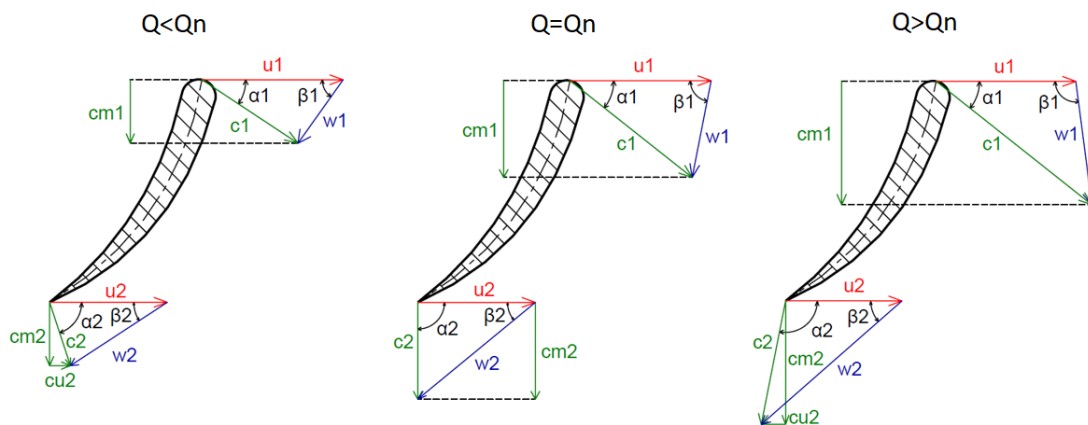
Obr. 3.20 Oběžné kolo Francisovy turbíny [24]

Regulace turbíny

Regulace turbíny probíhá podobně jako u propelerových turbín. K vytvoření obvodové složky absolutní rychlosti kapaliny na vstupu do oběžného kola c_{u1} slouží u malých vodních elektráren nejčastěji spirála společně s rozvaděčem. V rychlostních trojúhelnících se natáčením rozvaděče mění úhel absolutní rychlosti kapaliny na vstupu do oběžného kola α , přičemž úhel nastavení oběžného kola β se nemění. To je znázorněno na obr. 3.21. Na obr. 3.22 jsou pak znázorněny rychlostní trojúhelníky pro stavy turbíny bez regulace. Pro jmenovitý průtok platí, že kapalina vtéká rovnoměrně na tlačnou i sací stranu lopatky a na vstupu nedochází ke vstupnímu rázu a snižování účinnosti, popřípadě k odtrhávání proudu od lopatky a ke vzniku kavitace. Na výstupu z oběžného kola je pak obvodová složka absolutní rychlosti c_{u2} nulová, nedochází tedy k cirkulaci kapaliny v savce turbíny a meridiální složka absolutní rychlosti je rovna absolutní rychlosti. Při vyšším a nižším průtoku však platí přesný opak. Voda nevstupuje na lopatku rovnoměrně a dochází ke vstupnímu rázu a ke snižování účinnosti. Dále roste nebezpečí vzniku kavitace. Obvodová složka absolutní rychlosti na výstupu z oběžného kola není nulová a dochází tedy k cirkulaci kapaliny a ke vzniku vírového copu v savce turbíny, který je znázorněn na obr. 3.23. [3]



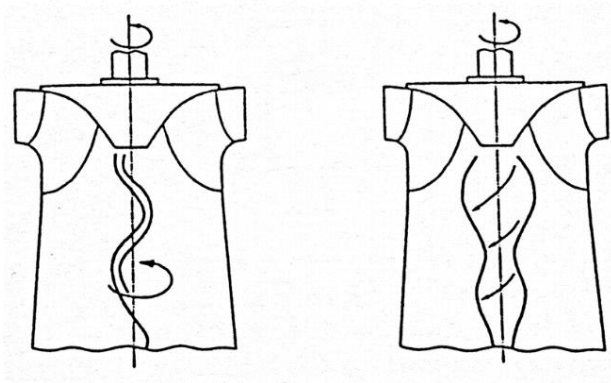
Obr. 3.21 Znázornění natáčení lopatek Francisovy turbíny



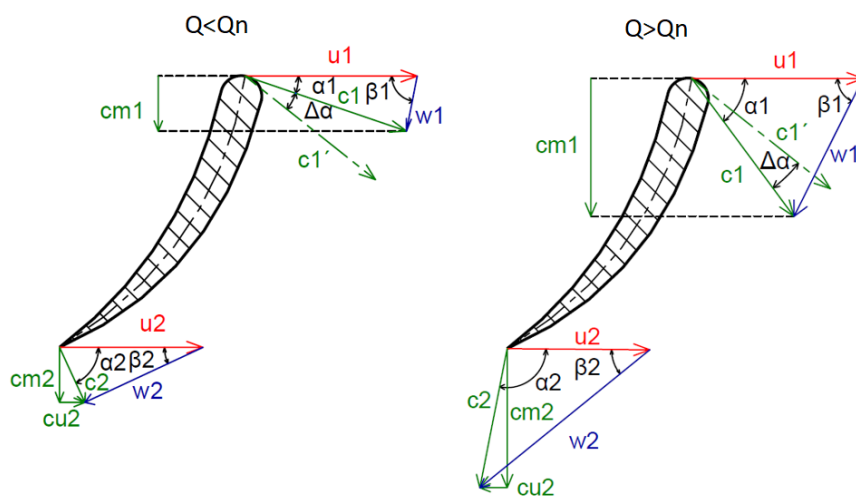
Obr. 3.22 Rychlostní trojúhelníky Francisovy turbíny před regulací [převzato z 3]
 Q_n - jmenovitý průtok

Ve vírovém copu zanikají parní bubliny, což vyvolává tlakové pulzace nebezpečné pro celé zařízení. Jedním ze způsobů zmírňování tlakových pulzací je zavzdušnění prostoru za oběžným kolem turbíny pomocí odlehčovacích otvorů nebo zabudování trubky doprostřed vstupní části savky. Skrze ni kapalina proudí zpět k oběžnému kolu a tlumí vznikající pulzy. Na obr. 3.24 je pak znázorněno, jak se změní rychlostní trojúhelníky po natočení rozvaděče o úhel $\Delta\alpha$. Kvůli neměnné poloze lopatek se nedá eliminovat obvodová složka absolutní rychlosti

na výstupu z oběžného kola c_{u2} a tím i vírový cop vznikající v savce turbíny. Z obrázku je však patrné, že po natočení rozvaděče se změnil směr i velikost relativní rychlosti kapaliny na vstupu do oběžného kola w_1 . Natočením rozvaděče se tedy sníží vstupní ráz kapaliny a zabezpečí se plynulý vtok na lopatku. Tím dojde ke zvýšení účinnosti a snížení nebezpečí vzniku kavitace a následnému opotřebení lopatek. [3]



Obr. 3.23 Víry tvořící se v savce Francisovy turbíny [3]



Obr. 3.24 Rychlostní trojúhelníky Francisovy turbíny po regulaci [převzato z 3]
 Q_n - jmenovitý průtok

ZÁVĚR

V této bakalářské práci se mohl čtenář seznámit se základními typy turbín používaných v malých vodních elektrárnách a způsoby jejich regulace. První část práce byla věnována obecné teorii vodních elektráren, rozdělení vodních turbín a jejich základní konstrukcí. Dále byly uvedeny základní vztahy a veličiny popisující tyto stroje. Druhá část se zabývala rovnotlakými turbínami. Byly vybrány tři nejpoužívanější typy, tj. Peltonova turbína, Turgo turbína a Bánkiho turbína. Bylo představeno a specifikováno jejich použití, konstrukce a způsoby regulace. Dále byly zobrazeny rychlostní trojúhelníky, u rovnotlakých turbín však jen pro doplnění, neboť při regulaci se celková geometrie lopatkové mříže nemění a při proměnlivém průtoku se pouze zvětšuje průtok vody turbínou, tvar rychlostního trojúhelníku však zůstává stejný a regulace ho neovlivňuje. Regulace probíhá změnou průřezu paprsku a snížením celkové kinetické energie kapaliny dopadající na lopatku turbíny u Peltonových a Turgo turbín, nebo rozdělením protékající kapaliny jen na určitou část lopatkování a snížení celkového objemu protékajícího oběžným kolem u Bánkiho turbíny. Třetí část práce byla věnována přetlakovým turbínám. Opět byly vybrány nejpoužívanější typy, a to turbíny Kaplanovy a Francisovy. V kapitole s Kaplanovými turbínami práce obsahuje rovněž uvedení jejich zjednodušených variant, tj. Thomanovy, propelerové a neregulovatelné turbíny. Byla zde uvedena jejich konstrukce a regulace a na rychlostních trojúhelnících dále ukázáno, jaké složky rychlostí se regulací eliminují a jaké proudové poměry jsou v oběžném kole žádoucí. U trojúhelníků uvedených pro ideální průtoky a průtoky po regulaci však bylo použito určité zjednodušení. V praxi není nikdy zcela eliminována obvodová složka absolutní rychlosti na výstupu z oběžného kola c_{u2} a tím zamezena cirkulace za oběžným kolem. Stejně tak nátok kapaliny na lopatku nebývá ideální. Dále nejsou uvažovány nečistoty unášené kapalinou, které se mohou zachytávat na lopatkách rozvaděče a oběžného kola a měnit celkové proudové poměry lopatkování. Dále je zde zmíněna také turbína vírová. Ta sice z Kaplanovy turbíny konstrukčně nevychází, ale pro doplnění zde byla uvedena i s rychlostními trojúhelníky.

V České republice se v posledních letech výrazně zvyšuje výstavba malých vodních elektráren nízkých výkonů, neboť místa pro výstavbu větších vodních děl jsou již téměř vyčerpána. U strojů nízkých výkonů je pak zvláště kladen důraz na samostatný chod stroje a zároveň s tím i na nízké náklady pro pořízení těchto strojů. Pro tyto potřeby se jeví jako perspektivní použít elektrický způsob regulace. Díky rozvoji polovodičové techniky jsou frekvenční měniče dostupnější a jejich použití v malých vodních elektrárnách nízkých výkonů se stává ekonomicky výhodnější, ve srovnání s poměrně složitou a drahou mechanickou regulací, které byla popsána výše. Do budoucna se předpokládá další rozvoj elektrické regulace těchto strojů a její rozšíření i pro stroje vyšších výkonů.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] BEDNÁŘ, Josef. *Turbíny: (malé vodní elektrárny)*. Českovice: Marcela Bednářová, 2013, 357 s.: ISBN 978-80-905437-0-6.
- [2] NECHLEBA, Miroslav. *Vodní turbíny, jejich konstrukce a příslušenství*. 2. vyd. Praha: SNTL, 1962, 672 s.
- [3] MELICHAR, Jan, Jan VOJTEK a Jaroslav BLÁHA. *Malé vodní turbíny: konstrukce a provoz*. Praha: ČVUT, 1998, 299 s.: ISBN 80-01-01808-3.
- [4] HALL, Dixon. *Fluid Mechanics and Thermodynamics of Turbomachinery (6th Edition)* [online]. In: . 2010 [cit. 2019-04-30]. DOI: 10.1016/B978-1-85617-793-1.00023-7. ISBN 978-1-85617-793-1. Dostupné z: https://app.knovel.com/web/toc.v/cid:kpFMTTE022/viewerType:toc//root_slug:viewerType%3Aatoc/url_slug:root_slug%3Afluidmechanicsthermodynamics?kpromoter=feration
- [5] BREEZE, Paul. *Power Generation Technologies, 2nd Edition, Hydropower* [online]. In: . Elsevier, 2014, s. 153-179 [cit. 2019-04-30]. ISBN 9780080983301. Dostupné z: https://app.knovel.com/web/toc.v/cid:kpPGTE0001/viewerType:toc//root_slug:power-generation-technologies/url_slug:francis-turbine?=&issue_id=kt00U84BXL
- [6] Roční zpráva o provozu ES ČR 2017. In: *Energetický regulační úřad* [online]. Praha, 2018 [cit. 2019-04-30]. Dostupné z: http://www.eru.cz/documents/10540/462820/Rocni_zprava_provoz_ES_2017.pdf/521bff99-fdcf-4c86-8922-3a346af0bb88
- [7] VOBOŘIL, David. Vodní elektrárny. In: *OEnergetice* [online]. OM Solutions, 2016 [cit. 2019-04-30]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/elektrina/vodni-elektrany-princip-a-rozdeleni/>
- [8] Peltonova turbína. In: *Abeceda malých vodních pohonů* [online]. [cit. 2019-04-30]. Dostupné z: <http://mve.energetika.cz/primotlaketurbiny/pelton.htm>
- [9] Obrázek Peltonovy turbíny. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2019 [cit. 2019-04-30]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Peltonova_turb%C3%ADna
- [10] Turbína Turgo. In: *Abeceda malých vodních pohonů* [online]. [cit. 2019-04-30]. Dostupné z: <http://mve.energetika.cz/primotlaketurbiny/turgo.htm>

- [11] BENZON, David S., George AGGIDIS a John S. ANAGNOSTOPOULOS. Development of the Turgo Impulse turbine: Past and present. In: *Science Direct* [online]. 2016 [cit. 2019-04-30]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S0306261915016645#!>
- [12] Bánkiho turbína. In: *Abeceda malých vodních pohonů* [online]. [cit. 2019-04-30]. Dostupné z: <http://mve.energetika.cz/primotlaketurbiny/banki.htm>
- [13] Dvoukomorová průtoková turbína. In: *CINK Hydro - Energy* [online]. [cit. 2019-04-30]. Dostupné z: <http://cink-hydro-energy.com/cs/dvoukomorova-prutokova-turbina/>
- [14] Crossflow Turbines. In: *Rickly Hydro - Harnessing the World's water* [online]. [cit. 2019-04-30]. Dostupné z: <https://www.ricklyhydro.com/crossflow-turbines>
- [15] Vertical axis Kaplan turbine drawing. In: *Renewables first* [online]. [cit. 2019-04-30]. Dostupné z: <https://renewablesfirst.co.uk/wp-content/uploads/Vertical-axis-Kaplan-turbine-drawing.jpg>
- [16] PAVELKA, František. *Řídicí systémy Kaplanovy turbíny* [online]. Brno, 2015 [cit.2019-04-30]. Dostupné z: https://dspace.vutbr.cz/xmlui/bitstream/handle/11012/40051/BP_Frantisek_Pavelka_152187_2015.pdf?sequence=2&isAllowed=y. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Ing. Miloslav Fic.
- [17] VITÁK, Tomáš. Regulační kříž Kaplanovy turbíny. In: *Kovo Viták - vodní turbíny* [online]. Praha, 2010 [cit. 2019-04-30]. Dostupné z: <https://www.opravymve.cz/wp-content/uploads/2013/02/hlava.jpg>
- [18] TURINSKÝ, Robert. *Regulační mechanismus axiální vodní turbíny* [online]. Praha, 2016 [cit.2019-04-30]. Dostupné z: https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/65575/F2-BP-2016-Turinsky-Robert-Turinsky_bakalarska%20prace.pdf?sequence=-1. Bakalářská práce. Fakulta strojní, ČVUT. Vedoucí práce prof. Ing. Jan Melichar, Csc.
- [19] HALUZA, Miloslav. *Vývoj vírové turbíny: Zkrácená verze habilitační práce* [online]. Brno, 2004 [cit. 2019-04-30]. Dostupné z: <http://www.vutium.vutbr.cz/tituly/pdf/ukazka/80-214-2731-0.pdf>. Habilitační práce. Fakulta strojního inženýrství, Vysoké učení technické v Brně.
- [20] Francisovy turbíny. *Strojírny Brno, a.s.* [online]. [cit. 2019-04-30]. Dostupné z: <https://strojirnybrno.com/vodni-turbiny/francis/>

- [21] Přečerpávací vodní elektrárna Dlouhé Stráně. *Skupina ČEZ* [online]. [cit. 2019-04-30]. Dostupné z:
<https://www.cez.cz/cs/vyroba-elektřiny/obnovitelne-zdroje/voda/dlouhe-strane.html>
- [22] RAHMAN, Fasi Ur. Francis Turbine. In: *The Constructor* [online]. [cit. 2019-04-30]. Dostupné z:
<https://theconstructor.org/practical-guide/francis-turbines-components-application/2900/>
- [23] NGUYEN, V.T.T. Guide vanes in Francis turbines. In: *ResearchGate* [online]. 2015 [cit. 2019-04-30]. Dostupné z:
https://www.researchgate.net/publication/274721814_Guide_vanes_in_Francis_Turbine
- [24] Francis turbine runner. In: *Mechanical engineering* [online]. [cit. 2019-04-30]. Dostupné z: <http://me-resetsg.blogspot.com/2016/02/francis-turbine-runner.html>
- [25] ŠEBELA, Radek. *Návrh vírové turbíny pro konkrétní lokalitu ČEZ, a.s.* [online]. Brno, 2014 [cit.2019-05-16]. Dostupné z:
<file:///C:/Users/jilek/Downloads/N%C3%A1vrh%20v%C3%ADrov%C3%A9%20turb%C3%ADny%20pro%20konkr%C3%A9tn%C3%AD%20lokalitu%20C4%8CEZ,%20a.s..pdf>.
Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Doc.Ing. Miloslav Haluza CSc.
- [26] URBAN, Ondřej. *Proudění kapaliny v rotujícím souřadnicovém systému: Podklady ke cvičení z hydromechaniky* [online]. In: Brno: Fakulta strojního inženýrství, Vysoké učení technické v Brně [cit. 2019-05-16]. Dostupné z:
<https://docs.google.com/viewer?a=v&pid=sites&srcid=dnV0YnIuY3p8bWF0ZXJpYWx5LTVoeXxneDo3ZmFmMTRlMTQ2MWJlMmYz>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symbol	Veličina	Jednotka
E	<i>měrná energie</i>	$[J.kg^{-1}]$
A	<i>celková energie</i>	$[J]$
m	<i>hmotnost</i>	$[kg]$
g	<i>tíhové zrychlení</i>	$[m.s^{-2}]$
z	<i>vzdálenost</i>	$[m]$
p	<i>tlak</i>	$[Pa]$
ρ	<i>hustota</i>	$[kg.m^{-3}]$
Q	<i>průtok</i>	$[m^3.s^{-1}]$
P	<i>výkon</i>	$[W]$
η	<i>účinnost</i>	$[\%]$
α	<i>úhel absolutní rychlosti</i>	$[^\circ]$
β	<i>úhel relativní rychlosti</i>	$[^\circ]$
c	<i>absolutní rychlost</i>	$[m.s^{-1}]$
u	<i>obvodová rychlost</i>	$[m.s^{-1}]$
w	<i>relativní rychlost</i>	$[m.s^{-1}]$
c_m	<i>meridiální složka absolutní rychlosti</i>	$[m.s^{-1}]$
c_u	<i>obvodová složka absolutní rychlosti</i>	$[m.s^{-1}]$
w'	<i>ideální relativní rychlost</i>	$[m.s^{-1}]$
w_r	<i>rázová složka relativní rychlosti</i>	$[m.s^{-1}]$

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1.1 Výroba elektřiny podle typu paliv v České republice v roce 2017 [6].....	12
Obr. 1.2 Znázornění nejčastěji používaných typů turbín [3]	13
Obr. 1.3 Členění turbín podle přenosu energie [1]	13
Obr. 1.4 Členění turbín podle směru průtoku vody oběžným kolem [1].....	14
Obr. 1.5 Rozdělení vodních elektráren podle instalovaného výkonu [3]	15
Obr. 1.6 Schéma uspořádání derivační malé vodní elektrárny [3]	16
Obr. 1.7 Křivka trvání průtoku [25].....	17
Obr. 1.8 Blokové schéma regulátoru [1].....	18
Obr. 1.9 Schéma elektrohydraulického regulátoru [3]	18
Obr. 1.10 Rychlostní trojúhelník	20
Obr. 2.1 Schéma Peltonovy turbíny [8]	22
Obr. 2.2 Schéma dýzy [8]	23
Obr. 2.3 Oběžné kolo Peltonovy turbíny [9]	23
Obr. 2.4 Geometrie lopatky Peltonovy turbíny [1]	24
Obr. 2.5 Deflektor a deviátor [1]	24
Obr. 2.6 Princip činnosti deflektoru [1].....	24
Obr. 2.7 Rychlostní trojúhelníky Peltonovy turbíny.....	25
Obr. 2.8 Schéma turbíny Turgo [10].....	25
Obr. 2.9 Lopatky turbíny Turgo [1].....	26
Obr. 2.10 Oběžné kolo Turgo turbíny [11].....	26
Obr. 2.11 Rychlostní trojúhelníky turbíny Turgo [převzato z 3].....	27
Obr. 2.12 Schéma Bánkiho turbíny [13].....	27
Obr. 2.13 Oběžné kolo Bánkiho turbíny [14]	28
Obr. 2.14 Regulace Bánkiho turbíny [1].....	28
Obr. 2.15 Dělená regulační klapka	29
Obr. 2.16 Rychlostní trojúhelníky	29
Obr. 3.1 Schéma vertikální kašnové Kaplanovy turbíny [15]	30
Obr. 3.2 Schéma rozvaděče Kaplanovy turbíny [16].....	31
Obr. 3.3 Schéma ovládání lopatek oběžného kola Kaplanovy turbíny [1].....	31
Obr. 3.4 Přestavný kříž oběžného kola [17]	32
Obr. 3.5 Schéma společného natáčení rozváděcích a oběžných lopatek [18]	33
Obr. 3.6 Znázornění natáčení lopatek Kaplanovy turbíny.....	33
Obr. 3.7 Rychlostní trojúhelníky axiální turbíny před regulací [převzato z 3].....	34
Obr. 3.8 Rychlostní trojúhelníky Kaplanovy turbíny po regulaci [převzato z 3].....	35
Obr. 3.9 Znázornění natáčení lopatek propelerové turbíny	35
Obr. 3.10 Rychlostní trojúhelníky propelerové turbíny po regulaci [převzato z 3].....	36
Obr. 3.11 Víry tvořící se v savce propelerové turbíny [3].....	36
Obr. 3.12 Znázornění natáčení lopatek Thomanovy turbíny	37
Obr. 3.13 Rychlostní trojúhelníky Thomanovy turbíny po regulaci [převzato z 3]	37
Obr. 3.14 Obvyklá uspořádání horizontálních přímoproudových turbín [3].....	38
Obr. 3.15 Regulace osově posuvným ventilem [1].....	39
Obr. 3.16 Regulace válcovým uzávěrem [1]	39
Obr. 3.17 Rychlostní trojúhelníky vírové turbíny [převzato z 3]	40
Obr. 3.18 Schéma Francisovy turbíny [22].....	40
Obr. 3.19 Schéma rozvaděče Francisovy turbíny [23]	41

Obr. 3.20 Oběžné kolo Francisovy turbíny [24]	41
Obr. 3.21 Znárodnění natáčení lopatek Francisovy turbíny.....	42
Obr. 3.22 Rychlostní trojúhelníky Francisovy turbíny před regulací [převzato z 3].....	42
Obr. 3.23 Víry tvořící se v savce Francisovy turbíny [3]	43
Obr. 3.24 Rychlostní trojúhelníky Francisovy turbíny po regulaci [převzato z 3].....	43