

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Způsoby zvyšování účinnosti vodních elektráren

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: **2016/2017**

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Petr MORONG**

Osobní číslo: **E13B0134P**

Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**

Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**

Název tématu: **Způsoby zvyšování účinnosti vodních elektráren**

Zadávající katedra: **Katedra technologií a měření**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Popište základní principy a vlastnosti vodních elektráren
2. Popište současný stav vodních elektráren na území ČR
3. Popište možné způsoby navýšení účinnosti vodních elektráren
4. Proveďte celkové zhodnocení daných způsobů navyšování účinnosti z hlediska energetického, ekonomického a environmentálního

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**

Rozsah kvalifikační práce: **30 - 40 stran**

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

Student si vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího práce.

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Vladimír Vajnar

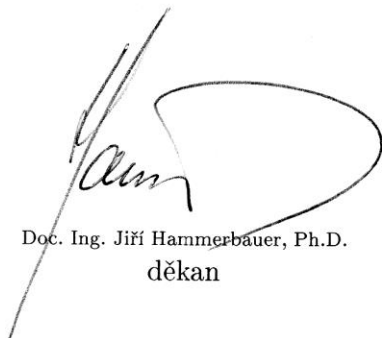
Regionální inovační centrum elektrotechniky

Konzultant bakalářské práce:

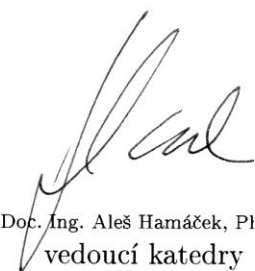
Ing. Martin Adámek

Datum zadání bakalářské práce: **14. října 2016**

Termín odevzdání bakalářské práce: **8. června 2017**


Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.
děkan




Doc. Ing. Aleš Hamáček, Ph.D.
vedoucí katedry

V Plzni dne 14. října 2016

Abstrakt

Předložená bakalářská práce se zabývá vodními elektrárnami. Za prvé jsou zde uvedeny základní parametry vodních elektráren. Pak jsou zde popsány vodní turbíny. V druhé části je práce zaměřena na největší přečerpávací a akumulární vodní elektrárny v České republice. V poslední části práce jsou uvedeny způsoby, jak zvýšit účinnost vodních elektráren. Hlavním tématem je zde volba vodní turbíny a její technické parametry.

Klíčová slova

Vodní elektrárny, spád, průtok, účinnost, instalovaný výkon, otáčky turbíny vodní turbíny, vodní energie České republiky.

Abstract

This bachelor thesis is focused on hydropower plants. Firstly, there are introduced the basic parameters of the hydropower plants. Then there are described water turbines. In the second part, the thesis deals with the largest hydropower plants in the Czech Republic. The last part of the thesis suggests various methods of increasing hydropower efficiency. The main aim of the last part is choose the best possible water turbine and its technical parameters.

Key words

Hydro power plants, hydraulic head, water flow, efficiency, installed capacity, turbine speed, water turbines, water energy in the Czech Republic.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské práce, je legální.

.....

podpis

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval Ing. Vladimíru Vajnarovi za cenné rady, připomínky a ochotu vedení této bakalářské práce.

Obsah

OBSAH	8
ÚVOD	10
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	11
ZÁKLADNÍ PRINCIPY A VLASTNOSTI VODNÍCH ELEKTRÁREN	13
1.1 ENERGIE VODY	13
1.2 ROZDĚLENÍ VODNÍCH ELEKTRÁREN	13
1.3 POPIS VODNÍ ELEKTRÁRNY	14
1.4 ZÁKLADNÍ PARAMETRY VODNÍCH ELEKTRÁREN:	15
1.4.1 Spád	15
1.4.2 Průtok	15
1.4.3 Výkon	16
1.4.4 Účinnost turbíny	16
1.4.5 Otáčky turbínou a soustrojí	17
1.5 VODNÍ TURBÍNY	19
1.5.1 Rozdělení vodních turbín	19
1.5.2 Francisova turbína	20
1.5.3 Kaplanova turbína	21
1.5.4 Dériazova turbína	22
1.5.5 Peltonova turbína	22
1.5.6 Bánkiho turbína	24
2 HYDROENERGETIKA V ČESKÉ REPUBLICE	25
2.1 VÝVOJ VODNÍ ENERGETIKY NA ÚZEMÍ ČR	25
2.2 PŘEČERPÁVACÍ VODNÍ ELEKTRÁRNY V ČESKÉ REPUBLICE	27
2.2.1 PVE Dalešice	27
2.2.2 PVE Dlouhé Stráně	28
2.2.3 PVE Štěchovice II	29
2.3 NEJVĚTŠÍ AKUMULAČNÍ VODNÍ ELEKTRÁRNY V ČESKÉ REPUBLICE	29
2.3.1 VE Kamýk	30
2.3.2 VE Lipno I	30
2.3.3 VE Orlick	32
2.3.4 VE Slapy	33
2.3.5 VE Štěchovice I	34
2.4 VÝROBA ELEKTRICKÉ ENERGIE V ČESKÉ REPUBLICE	34
3 ZPŮSOBY ZVYŠOVÁNÍ ÚČINNOSTI VODNÍCH ELEKTRÁREN	36
3.1 VÝBĚR VHODNÉHO TYPU TURBÍNY	36
3.1.1 Návrh podle charakteristik turbín	38
3.2 ZMENŠENÍ ZTRÁT V TURBÍNĚ	40
3.2.1 Ztráty objemové	40
3.2.2 Ztráty hydraulické	41
3.2.3 Ztráty mechanické	41
3.3 PŘIVADĚČE	41

3.3.1	<i>Beztlakové přivaděče</i>	42
3.3.2	<i>Tlakové přivaděče</i>	42
3.4	VLIV VELIKOSTI TURBÍNY NA HYDRAULICKOU ÚČINNOST	43
3.5	KAVITACE	44
3.6	MODERNIZACE VODNÍCH ELEKTRÁREN	44
3.6.1	<i>Lipno</i>	44
3.6.2	<i>Kamýk</i>	44
3.7	ZHODNOCENÍ VODNÍCH ELEKTRÁREN	45
3.7.1	<i>Z hlediska environmentálního</i>	45
3.7.2	<i>Z hlediska energetického</i>	45
ZÁVĚR		47
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ		48

Úvod

Předložená bakalářská práce se zabývá problematikou vodní energie především v České republice. Je zaměřena na velké vodní elektrárny a jejich technické parametry. Jelikož výstavba velkých vodních elektráren v ČR moc nepřipadá v úvahu, protože investice na vybudování nové velké vodní elektrárny jsou velmi nákladné, je třeba současné elektrárny modernizovat a vylepšovat jejich účinnost. Vodní elektrárny dokáží okamžitě a velmi rychle reagovat na výkyvy energie energetické soustavy. Dokáží rychle dodat elektrickou energii do sítě a v neposlední řadě je to obnovitelný zdroj energie. Práce má za cíl upozornit na problematiku vodní energie v České republice a seznámit s technickými parametry vodního díla.

Práce je rozdělena do tří kapitol. První kapitola je zaměřena na technické parametry vodní elektrárny. Jsou zde rozděleny vodní elektrárny do několika skupin. Dále se kapitola věnuje vodním turbínám.

Druhá kapitola se věnuje hydroenergetice v České republice. Jsou zde uvedeny naše největší přečerpávací a akumulární vodní elektrárny. Potom je zde uvedeno srovnání, jak se vodní energie v České republice podílí na výrobě elektrické energie v porovnání s ostatními zdroji elektrické energie.

Třetí kapitola je zaměřena na zlepšování účinnosti vodních elektráren, Důraz je kladen na technické vlastnosti vodních turbín, výběr vhodné turbíny a nakonec je zde uveden příklad dvou modernizovaných vodních elektráren na Vltavské kaskádě.

Seznam symbolů a zkratek

Veličiny

D	průměr oběžného kola	$[m]$
D_M	modelovaný průměr oběžného kola	$[m]$
E	měrná energie	$[J \cdot kg^{-1}]$
E_K	měrná energie kapaliny	$[J \cdot kg^{-1}]$
E_Z	ztracená měrná energie kapaliny	$[J \cdot kg^{-1}]$
H	spád	$[m]$
H_C	celkový spád	$[m]$
H_m	modelovaný spád	$[m]$
H_{max}	maximální spád	$[m]$
Q	průtok	$[m^3 \cdot s^{-1}]$
Q_k	část průtoku	$[m^3 \cdot s^{-1}]$
Q_m	modelovaný průtok turbínou	$[m^3 \cdot s^{-1}]$
P	výkon	$[W]$
P_h	hydraulický výkon	$[W]$
P_{teor}	teoretický výkon	$[W]$
S_{min}	nejúžší výtokový průřez kanálu	$[m^2]$
c	výtoková rychlost kapaliny	$[m \cdot s^{-1}]$
g	gravitační zrychlení	$[m \cdot s^{-2}]$
n	otáčky jmenovité	$[s^{-1}, \text{min}^{-1}]$
n_m	modelované otáčky	$[s^{-1}, \text{min}^{-1}]$
n_s	specifické otáčky	$[s^{-1}, \text{min}^{-1}]$
q	menší část průtoku	$[m^3 \cdot s^{-1}]$
η	celková účinnost	$[-, \%$
η_h	hydraulické ztráty	$[-, \%$

η_m	mechanické ztráty	[-,%]
η_q	objemové ztráty	[-,%]
η_t	účinnost turbíny	[-,%]

Zkratky

$\check{C}R$	Česká republika
JE	jaderné elektrárny
PE	parní elektrárny
PPE	paroplynové elektrárny
PVE	přečerpávací vodní elektrárny
VE	vodní elektrárny
VTE	větrné vodní elektrárny

Jednotky

GWh	giga watt hodina
MW	mega watt
MWh	mega watt hodina
kW	kilo watt
kWh	kilo watt hodina

Základní principy a vlastnosti vodních elektráren

1.1 Energie vody

Energii vody je jedním z nejstarších zdrojů energie, kterou se lidé naučili využívat. Starověcí Řekové používali dřevěná vodní kola na přeměnu kinetické energie vody na mechanickou již před tisíci lety. Vodní energie je jeden z obnovitelných zdrojů energie. Voda je v přírodě nositelem chemické, tepelné a mechanické energie [1,2,6]. Mezi hlavní výhody výroby elektrické energie pomocí vodních elektráren patří [3]:

- nevyčerpatelný zdroj elektrické energie,
- neznečisťují životní prostředí,
- nepotřebují nerostné suroviny k provozu,
- umožňují plnou automatizaci provozu (dají se ovládat na dálku),
- velmi rychle reagují na změny spotřeby elektrické energie,
- vodní přehrady chrání obyvatelstvo před povodněmi.

Mechanickou energii vody si v přírodě představíme jako [1]:

- energii vodních srážek,
- energii ledovců,
- mechanickou energii moří (vlny, proudy, příliv a odliv),
- mechanickou energii vodních toků.

Každý rok spadne na povrch Země asi 100 000 km³ vody. Problém srážek je, že jsou rozloženy nepravidelně a za každý čas spadne jiné množství vody na zem. Pro výrobu elektrické energie nejsou moc vhodné. Ledovce na naší planetě zabírají velké množství krajiny, kdyby všechny ledovce roztály, tak by mořská hladina stoupla asi o 50 metrů. Mechanická energie pohybujících se ledovců je velká, ale prakticky jí není možné využít. Mechanická energie moří se projevuje vlnami na hladině, přílivem a odlivem. Vlivem gravitačních sil Měsíce a Slunce se příliv a odliv střídají. [1,5]

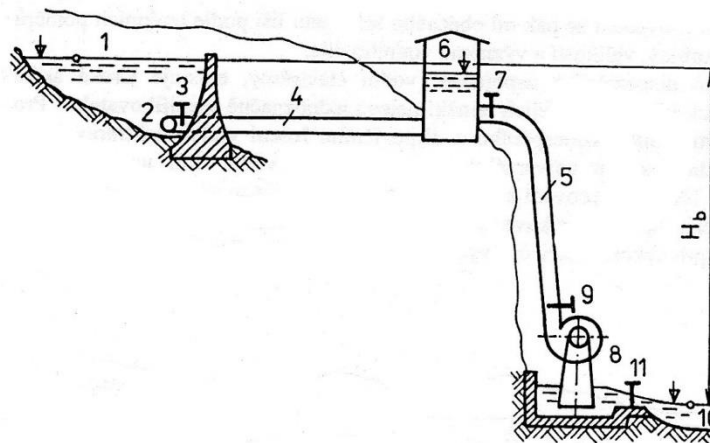
1.2 Rozdělení vodních elektráren

Vodní elektrárny dělíme podle několika hledisek [1].

- Podle instalovaného výkonu máme:

- malé VE do 10 MW,
 - střední VE do 100 MW,
 - velké VE nad 100 MW.
- Podle využívaného spádu dělíme VE:
 - nízkotlaké (spád do 20 m),
 - středotlaké (spád od 20 m do 100 m),
 - vysokotlaké (spád nad 100 m).
 - Podle využití vodního toku rozdělujeme VE:
 - průtočné,
 - akumulární,
 - přečerpávací,
 - slapové.

1.3 Popis vodní elektrárny



Obr. 1 Obecné schéma vodní elektrárny (převzato [1])

Na Obr. č. 1 je znázorněné obecné schéma vodní elektrárny, která má následující části[1]:

- 1 horní vodní nádrž vody,
- 2 jímací objekt s přepadem (zbavení nečistot, velké větve...),
- 3 stavidlo (uzavírací zařízení před vstupem do štoly),
- 4 štola,
- 5 strmě vedené potrubí,
- 6 vodní zámek (tlumí rázy, které vznikají při náhlém uzavření turbíny, také se vodnímu zámku říká otevřená vyrovnávací nádrž, která při odstavení turbín přijímá vodu přitékající štolou setrvačným účinkem),
- 7 automatický rychlouzávěr,
- 8 turbína,

- 9 uzávěr před turbínou,
- 10 kanál spodní vody,
- 11 uzávěr kanálu spodní vody.

Reálné provedení vodní elektrárny se od obecného schématu liší podle dané lokality, spádu turbíny, velikosti a významu vodního díla [1].

1.4 Základní parametry vodních elektráren:

1.4.1 Spád

Spád určuje výškový rozdíl dvou bodů hladiny. Označuje se písmenem H a udává se v metrech. Spád vodní elektrárny si můžeme představit jako výškový rozdíl horní hladiny nádrže a hladiny dolní nádrže (kanál spodní vody). V hydroenergetice rozlišujeme dva druhy spádu. Spád, který odpovídá nulovému průtoku hydraulickým systémem a spád dynamický. Spád ovlivňuje výkon turbíny. Snaha projektanta je zajistit v dané přírodní lokalitě, při výstavbě vodní elektrárny, co největší spád. To lze technicky provést, výstavbou jezu nebo přehrady. [4,5]

Hrubý nebo-li celkový spád vodní elektrárny H_G , je to výškový rozdíl mezi horní a dolní hladinou při nulovém průtoku vody vodní turbínou, jedná se o statický spád. Určuje potenciální energii, kterou můžeme přeměnit turbínou. Velikost spádu se dá zjistit z mapových podkladů, z technické dokumentace daného vodního díla a případně měřením v terénu. [1,5]

1.4.2 Průtok

Obecná definice průtoku [1,5] je, že celkové množství vody, které proteče turbínou za určitý čas. Značí se Q a základní jednotkou je $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Průtok turbínou je vždy nižší než průtok, který umožňuje koryto vodního toku. Navrhnout správný průtok je velice obtížné. Snaha je zajistit co největší výrobu elektrické energie, při minimálních investičních nákladech. Je důležité mít naměřené průtoky v korytě během celého roku, protože průtok se mění. Tyto údaje poskytuje na základě dlouhodobého měření hydrometeorologický ústav. Nebo při neznámé hodnotě průtoku, můžeme měřit průtok při stavbě vodní elektrárny. Minimální doba měření by měla být kolem jednoho roku. Můžeme použít například tyto metody měření průtoku [1]:

- měření průtoku přepadem na jezu,

- měření průtoku měrnými přelivy,
- objemové měření,
- měření průtoku plovákem.

1.4.3 Výkon

Voda, která protéká z horní nádrže do dolní nádrže, vykonává práci. Spád vodní elektrárny H [m] a průtok vodní turbínou Q [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$], bude teoretický výkon [7,8]

$$P_{teor} = \rho g Q H, \quad (1)$$

kde P_{teor} je teoretický výkon [W], ρ je měrná hmotnost vody [$1000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$] a g je gravitační zrychlení [$9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$].

Skutečný výkon vodního zdroje bude o něco menší než teoretický výkon. Při změně hydraulické energie na mechanickou energii v turbíně a mechanické energie na elektrickou vznikají ztráty. Skutečný výkon lze vyjádřit vztahem [7]

$$P = \eta \rho g Q H, \quad (2)$$

kde η je celková účinnost vodní turbíny.

1.4.4 Účinnost turbíny

Účinnost turbíny si vysvětlíme jako poměr naměřeného skutečného výkonu se všemi ztrátami, k teoretickému bezztrátovému výkonu. Dáno vztahem [8]

$$\eta_t = \frac{P}{P_{teor}}, \quad (3)$$

účinnost turbíny η_t musí být dále zahrnuty ztráty hydraulické η_h , objemové ztráty η_q , které vznikají při protékání vody jednotlivými částmi turbíny a mechanické ztráty η_m , které najedeme při tření v ložiskách a ucpávkách turbíny. Celá účinnost turbíny je pak daná jejich násobkem [8]:

$$\eta_t = \eta_h \eta_q \eta_m \quad (4)$$

Vodní turbína je jeden z nejdokonalejších mechanických motorů. Hodnota účinnosti závisí zpravidla na spádu a průtoku. Účinnost turbíny η_t bývá od 0,8 až do 0,94[4,8]. Je to bezrozměrná veličina a je vždy menší než 1. Čím větší má turbína výkon, tím má zpravidla lepší účinnost, což dokládá přiložené hodnoty (tab.1).

Tab. 1 Závislost dosažitelné účinnosti na výkonu turbíny [2]

P (kW)	30	60	100	200	300	600	1000
η (%)	7	83	84	85	86	87	88
P (MW)	12	3	6	10	20	30	60
η (%)	89	90	91	92	93	94	95

Skutečnost, že při větším výkonu a větších rozměrech turbíny roste účinnost, dokumentuje vzorec pro přepočet účinnosti modelu turbíny na turbínu skutečnou, resp. z menšího průměru oběžného kola na větší průměr. Dokládá například M o o d y h o vzorec ve tvaru [5]

$$\eta = 1 - (1 - \eta_M)^4 \sqrt{\frac{D_M}{D}}^{10} \sqrt{\frac{H_M}{H}}, \quad (5)$$

kde η je celková účinnost větší turbíny, D , H určují průměr oběžného kola a spád větší turbínou (m). Dále η_M je celková účinnost menší (modelové) turbíny, D_M , H_M udává průměr oběžného kola a spád menší turbínou (m).

1.4.5 Otáčky turbíny

Provozní otáčky turbíny se pohybují v širokém rozmezí. Asi od 53 do 1500 otáček za minutu. Provozní otáčky by se měly nazývat otáčkami jmenovitými n_n . Vyplynají z konstrukčního a hydraulického řešení turbíny. Jsou určeny z obvodové rychlosti oběžného kola stroje dané velikosti a měrné energie. Když, je spojena přímo turbína s generátorem, volí se otáčky podle typu elektrického generátoru. [1,5]

Při určování vhodných provozních jmenovitých otáček turbíny je náročné. Lze použít vztah [5]

$$n = \frac{n_s H^{\frac{4}{3}} \sqrt{H}}{\sqrt{P_T}} \cdot 1,166, \quad (6)$$

kde n jsou jmenovité provozní otáčky turbíny (min^{-1}), n_s jsou specifické otáčky geometricky podobné turbíny, které mají průměr oběžného kola, že při spádu $H = 1$ m poskytují výkon 0,736 kW (výkon jedné koňské síly) [5]. H je čistý spád turbíny a P_T udává výkon na hřídeli turbíny.

Při zmenšování oběžného kola při stejné spádu se zvyšují otáčky turbíny. Je to výhodné dělat u malých spádů. Při zmenšení oběžného kola je nižší cena turbíny. Avšak to nemůžeme dělat donekonečna, protože se zvyšuje průtoková rychlost turbíny a tím i vznikají ztráty turbíny. Z toho důvodu je zmenšování oběžného kol, tedy zvyšování otáček, jen do určitých hodnot, kdy je ještě účinnost příznivá. Proto, abychom mohli určit vhodné provozní otáčky navrhované turbíny, je třeba znát specifické otáčky, které zavedl roku 1905 Camerer [5,8]. V tab. 2 je uveden přehled specifických otáček některých turbín.

Tab. 2 Specifické otáčky turbín [5]

Typ turbíny	Obvyklé rozmezí n_s (min-1)
Peltonova	4 – 32
Bánkiho	70 – 150
Francisova pomaloběžná	50 -150
Francisova normální	150 – 250
Francisova rychloběžná	250 – 450
Kaplanova a vrtulová	300 -1000

Dále je také důležité z provozních důvodů nevolit vyšší spády, než udává tab. 3 pro specifické otáčky. Je to ochrana před kavitací.

Tab. 3 Specifické otáčky turbín [5]

n_s (min-1)	70	110	150	200	300	400	500	600	700	800
H_{max} (m)	260	181	111	75	41	26	17	13	10	8

1.5 Vodní turbíny

Vodní turbína představuje vodní motor, který využívá mechanickou energii vody k přeměně na mechanickou energii vodní hřídele. Je to jedna z hlavních částí vodní elektrárny, společně s elektrickým generátorem, který je spojen s turbínou. Současné turbíny se dělají v různých tvarech a velikostech, proto je velmi důležité vybrat správný typ vodní turbíny pro danou lokalitu. [2,12]

1.5.1 Rozdělení vodních turbín

Vodní turbíny lze dělit podle následujících hledisek [2,3]:

- podle způsobu přenosu energie vody,
- podle průtoku vody oběžným kolem,
- podle polohy hřídele.

Z hlediska způsobu přenosu energie vody rozeznáváme:

- rovnotlaké turbíny,
- přetlakové turbíny.

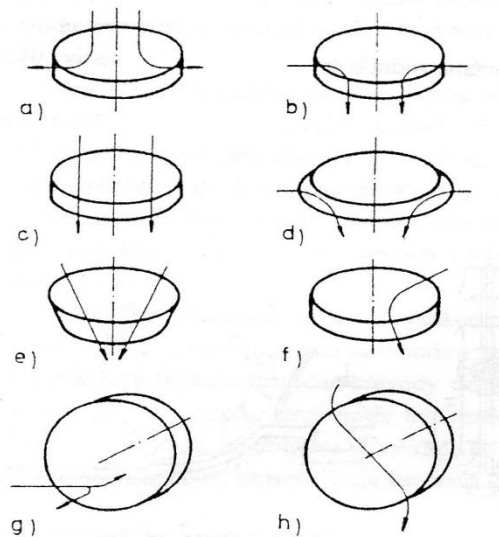
U rovnotlakých turbín se měrná energie vody mění už v zařízení pro přívod vody na kinetickou měrnou energii. Na lopatky oběžného kola turbíny působí proud vody. Na vstupu i výstupu oběžného kola stejný tlak, proto se jim říká rovnotlaké turbíny. Někdy bývají nazývány rovnotlaké turbíny jako turbíny akční. [2,3]

U přetlakových turbín v kanálech rozváděcího kola se mění jen část tlakové měrné energie na rychlost (kinetická energie). Zbývající část tlakové měrné energie se mění až při průchodu vody v oběžném kole. Tlak vody se od vstupu do oběžného kola k výstupu zmenšuje, tím pádem vzniká v nich přetlak. Přetlakovým turbínám můžeme říkat také reakční, protože v kanálech oběžného kola. [2,3,7]

Rozdělení podle průtoku vody oběžným kolem je následující [3]:

- a) turbína radiálně odstředivá,
- b) turbína radiálně dostředivá,
- c) turbína axiální,

- d) turbína radiálně axiální,
- e) turbína diagonální,
- f) turbína s šikmým průtokem,
- g) turbína tangenciální,
- h) turbína s dvojnásobným průtokem



Obr. 3 Rozdělení turbín podle průtoku oběžným kolem (převzato [3])

Podle polohy hřídele dělíme [2,3]:

- vertikální,
- horizontální,
- šikmé.

1.5.2 Francisova turbína



Obr. 4 Francisova turbína (převzato [11])

Francisova turbína byla vynalezena James Bicheno Francisem roku 1849. Řadí se mezi přetlakové turbíny. Používají se pro minimální spády, až pro spády několik stovek

metrů. Najdeme je nejčastěji ve středních a velkých vodních elektrárnách. Uspořádání turbíny může být vertikální nebo horizontální. Průtok vody oběžným kolem je radiálně axiální. Turbína se skládá ze spirály nebo kašny, rozváděcího kola, oběžného kola a savky. Oběžné kolo turbíny je složeno z pevných lopatek. Lopatky se na kole se natáčejí a tím regulují průtok turbínou. Turbíny nejsou vhodné pro lokality, kde kolísá spád a průtok, protože ztrácejí účinnost turbíny. Při méně potřebě energie v síti se bude snižovat výkon turbíny natáčením lopatek. Tím pádem lopatky turbíny nebudou v optimálním natočení a účinnost bude klesat. Francisovi turbíny lze nalézt taky v přečerpávacích elektrárnách, kde lze turbínu v reverzním režimu použít jako čerpadlo. [1,3,8,12]

1.5.3 Kaplanova turbína



Obr. 4 Kaplanova turbína (převzato [13])

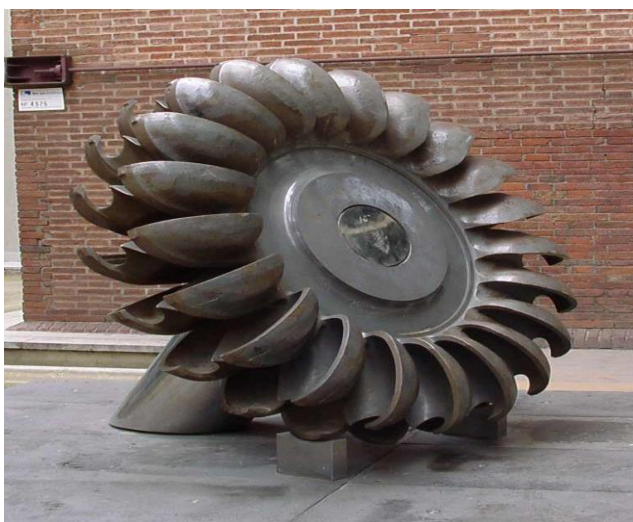
Kaplanova turbína byla vynalezena na počátku 20. století Viktorem Kaplanem. Turbína je přetlaková a axiální. Vznikla zdokonalením vrtulové turbíny. Má dobrou regulační schopnost, protože při regulaci turbíny se současně natáčejí lopatky rozváděcího kola i lopatky oběžného kola. Turbína pak může dosáhnout vyšší účinnosti ve velkém rozsahu průtoků a spádů. Tyto regulační vlastnosti způsobují, že turbína má pak složitější mechanické uspořádání a vyšší cenu. Turbíny jsou vhodné pro použití malých a středních spádů [3,10]

Kaplanova turbína se skládá ze spirály (savky), oběžného kola, rozváděcího kola. Hřídel může být umístěna vertikálně, horizontálně nebo se šikmou osou. Lopatky oběžného kola jsou upevněny na mohutném náboji na konci hřídele. Pomocí hydraulického pohonu na bázi hydromotoru se natáčejí lopatky.[2,3]

1.5.4 Dériazova turbína

Má podobný princip jako Kaplanova turbína. Je to přetlaková diagonální turbína z roku 1950. Odlišnost od Kaplanovy turbíny spočívá v tom, že osy natáčení oběžných lopatek jsou k ose kola skloněny o 30° a 60° , místo 90° který jsou Kaplanovy turbíny. Na kuželovém náboji jsou uloženy lopatky oběžného kola. Dériazova turbína je technicky náročnější než Kaplanova turbína. V rozváděcím i oběžném kole se natáčejí lopatky. Můžeme se setkat s diagonálním nebo radiálním rozvaděčem. Rozvádějící lopatky jsou také natáčivé a ovládají se vlastním regulačním mechanismem. Změna polohy oběžných lopatek se provádí současně se změnou polohy rozvádějících lopatek. [1,2]

1.5.5 Peltonova turbína



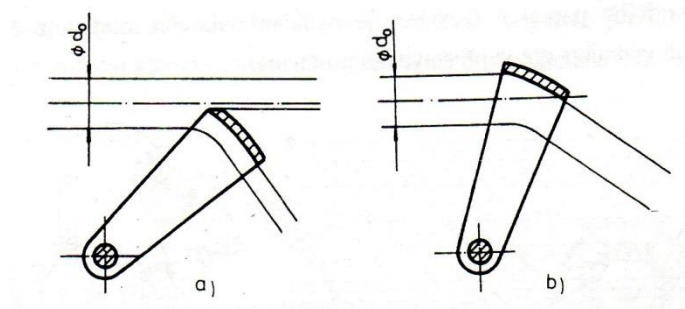
Obr. 4 Peltonova turbína (převzato [14])

Peltonovu turbínu vynalezl Lester Allan Pelton v roce 1880. Je to rovnotlaká turbína tangenciálního typu. Princip turbíny je založen na tom, že voda je přiváděna tzv. dýzou na oběžné kolo pomocí trysek, kde se nacházejí lopatky turbíny. Lopatky turbíny mají elipsoidický tvar. V dýzách se přemění celý spád vody na pohybovou energii. Voda, která se dostane na oběžné kolo, je rozdělena pomocí lopatek na dvě poloviny. Lopatky na oběžném kole se snaží otočit směr tekoucí vody zpět. Tato změna směru způsobí předání energii oběžnému kolu. Z oběžného kola se voda dostane volným pádem na spodní hladinu. K regulaci průtoku vody, tedy výkonu turbíny, se provádí, otíráním nebo zavíráním otvoru dýzy pomocí pohybu regulační jehly. Aby nedošlo k rázovým jevům, tak se regulace musí provádět plynule. Když, musíme ihned uzavřít průtok vody, tak se používá deflektor Obr. 5, který odřízne paprsek vody před vstupem na oběžné kolo a

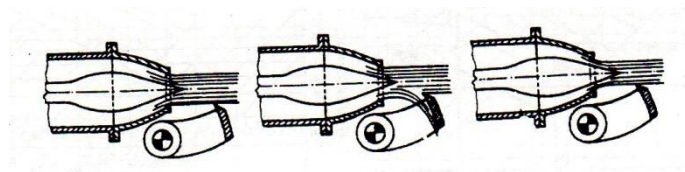
deviátor, který paprsek vody odklání. Činnost deflektoru je znázorněna na obr. 6, kde první obrázek znázorňuje ustálený provoz, pak při zásahu se chová deflektor a nakonec omezuje deflektor průměr vodního paprsku pohybem jehly.[2,3,10]

Peltonova turbína se skládá z oběžného kola, turbínové hřídele, která je uložena ve dvou valivých ložiskách, svařovací skříně, dýzy s jehlami řízeny hydraulickými nebo elektrickými servomotory a deviátory. [2]

Peltonova turbína se používá, tam kde je vysoký tlak vody a velké spády až přes 1000 metrů. [10]

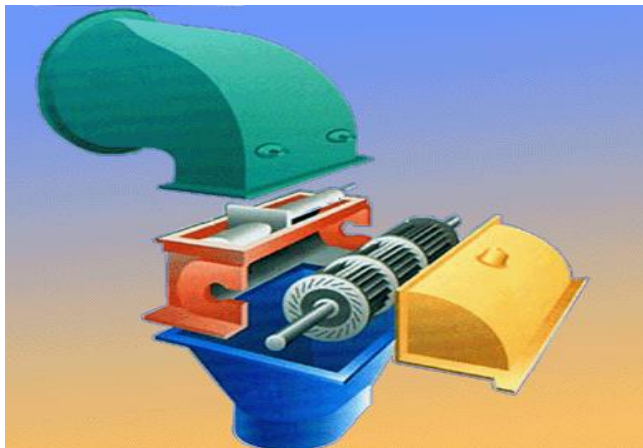


Obr. 5. a) deflektor, b) deviátor (převzato [2])



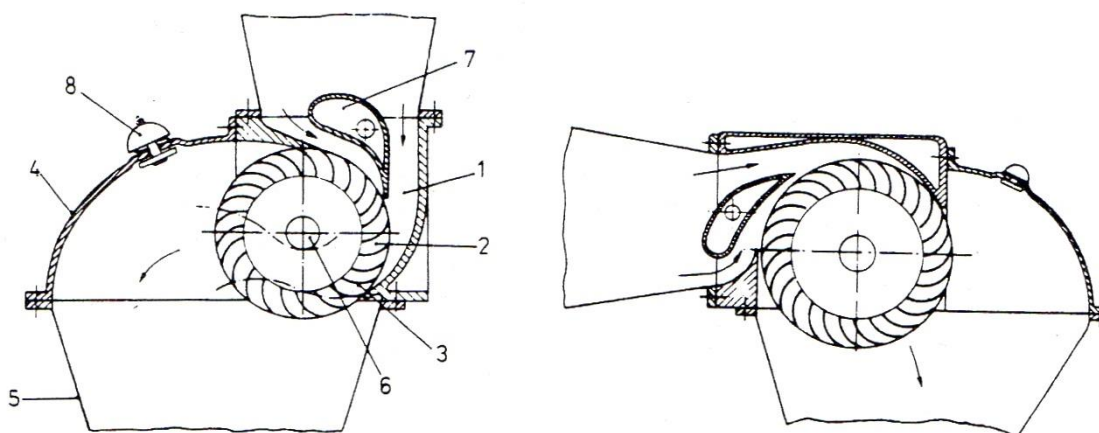
Obr. 6. Činnost deflektor (převzato [2])

1.5.6 Bánkiho turbína



Obr. 6. Bánkiho turbína (převzato [15])

Bánkiho turbína je rovnotlaký typ turbín, je radiální a má dvojnásobný průtok vody oběžným kolem. Byla vynalezena na začátku 20. století Donátem Bánkim, který pocházel z Maďarska. Používá se v malých vodních elektrárnách od 1 kW až po 1000 kW, a pro spády od 2 m do 200 m [3]. Oběžné kolo turbíny má horizontální osu a skládá se z pevných lopatek, které jsou mezi kruhovými deskami. Průtok vody jde ze vstupního tělesa na oběžné lopatky, které svedou průtok vody do středu oběžného kola, pak zase přes oběžné lopatky do výstupního tělesa, které je spojené s výstupní částí turbíny. Nejprve je tedy dostředivý a pak odstředivý průtok. Na Obr. 7 je znázorněno principiální schéma Bánkiho turbíny. [2]



Obr. 7. Principiální schéma Bánkiho turbíny (převzato [2])

Bánkiho turbína podle Obr. 7 se skládá:

- 1 vstupního tělesa,
- 2 oběžného kola,
- 3 lopatka oběžného kola,
- 4 těleso turbíny,
- 5 savka,
- 6 hřídel,
- 7 regulační lopatka,
- 8 zavzdušňovací ventil.

Regulace průtoku se dělá pomocí klapky, která je umístěna ve vtokovém tělese nebo segmentu. [1]

2 Hydroenergetika v České republice

2.1 Vývoj vodní energetiky na území ČR

Vodu jako zdroj energie, člověk využívá velmi dlouho. V roce 718 byl na našem území vybudován na řece Ohři mlýn poháněný vodní energií. V Čechách byla roku 1888 uvedena první vodní elektrárna v Jindřichově Hradci. Na konci první světové války 1918 měly vodní elektrárny na našem území výkon většinou od 10 do 100 kW. Jenom vodní elektrárna Pod Čertovou stěnou ve Vyšším Brodě, pražská Štvanice a Poděbrady na Labi měly výkon nad 1 MW. [17]

Zákon o soustavné elektrifikaci, který vyšel roku 1919 v tehdejší Československu, umožnil budování vodních elektráren z veřejných prostředků. Výstavba vodních elektráren se zrychlila a roku 1930 bylo evidováno přes 10 000 hydroenergetických děl s instalovaným výkonem 196 MW. [8,17]

Malé vodní elektrárny na území České republiky ve třicátých letech začaly ubývat. Důsledkem byl rozvoj tepelných elektráren, přesto se budovaly vodní elektrárny, které měly výkon přes 10 MW. Příkladem jsou vodní elektrárny Vrané (13,9 MW), Střekov (19,5 MW), Štěchovice I (22,5 MW). Po druhé světové válce byla dokončena první

přečerpávací vodní elektrárna Štěchovice II s výkonem 42 MW. Celkový výkon vodních elektráren na našem území v roce 1945 byl 270 MW. [8]

Od roku 1950 do 1962 došlo k výstavbě velkých vodních elektráren. Jednalo se především o Vltavskou kaskádu tab. 4. V letech 1960 – 1965 se vodní elektrárny podílely na 10 % celkové výroby elektrické energie. Pak se vývoj vodních elektráren zastavil a byly upřednostněny tepelné elektrárny. Byly rušeny malé vodní elektrárny. Nebyly vystavovány žádné velké vodní elektrárny. Podíl výroby elektrické energie z vodních elektráren se snižoval. Místo toho se více využívala energie s fosilních paliv, která velmi znečišťovala životní prostředí. Avšak v sedmdesátých letech došlo k obrovskému nárůstu cen energetických surovin ve světě. Řada vyspělých zemí se soustředila na využívání vlastních zdrojů energie, tedy i na energii získanou z vody.

V současné době se celkový podíl vyrobené elektrické energie z vodních elektráren na celkově vyrobené elektrické energii pohybuje kolem 3 %, což představuje 2376,3 GWh za jeden rok. Technický potenciál řek v ČR činí 3380 GWh za jeden rok. V České republice najdeme nejvíce přehradních vodních elektráren, které se dělí na průtočné a akumulární a pak jsou zde přečerpávací vodní elektrárny. [18]

Tab. 4 Přehled vystavěných vodních elektráren na Vltavské kaskádě do roku 1962 [17]

Vodní dílo	Uvedení do provozu	Instal. výkon celkem
Lipno I	1959	120 MW
Lipno II	1957	1, 5 MW
Orlík	1961-1962	364 MW
Kamýk	1961	40 MW
Slapy	1955	144 MW
Štěchovice I	1944	22,5 MW
Štěchovice II	1947	42MW
Vrané	1936	13,88 MW

2.2 Přečerpávací vodní elektrárny v České Republice

Úkolem přečerpávací elektrárny je zajistit stabilitu elektrizační soustavy. Musí být zajištěna rovnováha mezi aktuální spotřebou elektrické energie a výkonem, který je dodáván do sítě. V době, kdy je přebytek elektrické energie v síti, tak se voda čerpá z dolní nádrže do horní – čerpadlový režim. Když, je zase nedostatek energie v síti, elektrárna přepne do turbínového režimu a vyrábí elektrický proud. Je to velmi důležitá funkce, protože vlivem nárůstu větrných a slunečních elektráren vzniká větší nestabilita v elektrizační soustavě. A přečerpávací elektrárna má zamezit těmto výkyvům sítě a bránit elektrizační soustavu před výpadkem dodávky elektřiny označeným anglickým slovem blackout. [21]

2.2.1 PVE Dalešice



Obr. 8. Přečerpávací vodní elektrárna Dalešice. (převzato [20])

Přečerpávací vodní elektrárna Dalešice byla vybudována v roce 1978 v souvislosti s výstavbou jaderné elektrárny Dukovany. Dalešické vodní dílo se skládá z nádrže Dalešice o objemu vody 127 mil. m³, vyrovnávací nádrže Mohelno, přečerpávací elektrárny Dalešice a průtočné vodní elektrárny Mohelno.

Přehrada v Dalešicích se hojně používá k rekreačnímu chovu ryb a ke zvýšení průtoku řeky v suchém období, ale její hlavní úkolem je zajišťovat technologickou vodu pro jadernou elektrárnu Dukovany. Chrání obyvatele před povodněmi. Dlouhodobě vyrovnává průtok řeky Jihlavy. Zajišťuje sedimentaci nečistot z horního toku. Zvyšuje

čistotu vody a důsledkem je, že se v pod vyrovnávací nádrží Mohelno objevují raci a pstruzi.

Dalešice jsou vzhledem k instalovanému výkonu 480 MW druhou nejvýkonnější vodní elektrárnou v České republice. Za 60 sekund dokáže naběhnout veškerý instalovaný výkon v elektrárně. Na turbíny je voda přiváděna čtyřmi ocelovými potrubími, které mají průměr 6200 mm. V přečerpávací vodní elektrárně jsou instalovány čtyři soustrojí s reverzními Francisovými turbínami pro spád 90 metrů. Hráz je sypaná rokfilová s jílovým těsněním a výšku hráze 100 metrů a délku 350 metrů. [20,23]

2.2.2 PVE Dlouhé Stráně



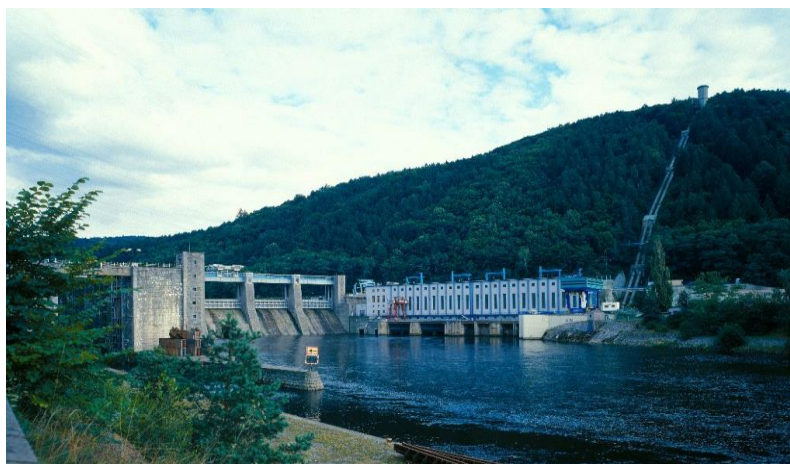
Obr. 9. Dlouhé Stráně – horní nádrž (převzato [19])

Dlouhé Stráně je přečerpávací vodní elektrárna. Výstavba elektrárny začala v roce 1978 a v provozu je od roku 1996. Nachází se na Moravě v pohoří Jeseníků v okrese Šumperk. Elektrárna disponuje největší reverzní turbínou v Evropě, která má výkon 325 MW. Dále spád elektrárny je 510,7 m, což je největší spád vodní elektrárny v České republice. Celkový výkon vodní elektrárny je 650 MW, které tvoří dvě Francisovi turbíny. Jedná se o nejvýkonnější vodní elektrárnu v České republice. [20]

Obě soustrojí elektrárny jsou v podzemí v kaverně o rozměrech 87,5 x 25,5 x 50 m. Dále se v podzemí nachází komora transformátorů o rozměrech 115 x 16 x 21,7 m. Horní nádrž elektrárny je umístěna v nadmořské 1350 m. Její objem je 2,72 mil. m³. Celkový objem vody dokáže vypustit za 6 hodin při plném výkonu pomocí dvou Francisových turbín. S podzemní elektrárnou je horní nádrž spojena dvěma přivaděči. Každý přivaděč je veden k jedné turbíně a mají délku 1 547 m a 1 499 m. Dále je elektrárna spojena s dolní

nádrží dvěma odpadními tunely, které mají průměr 5,2 m a jdou dlouhé 354 a 390 metrů. Dolní nádrž elektrárny je umístěna na říčce Divoká Desná. Její objem 3,4 mil. m³. S výškou hráze 56 metrů. Přečerpávací elektrárna je automatizována a ovládána počítači. Při provozu nemusí být ve strojovně elektrárny ani jeden technik. Centrální dispečink skupiny ČEZ, který je v Praze, může do 100 vteřin dálkově nechat naběhnout plný výkon elektrárny 650 MW. [20,21,22]

2.2.3 PVE Štěchovice II

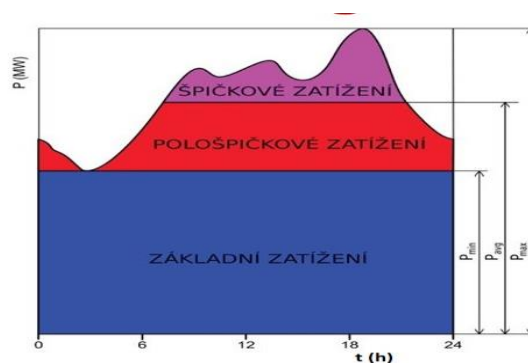


Obr. 10. Přečerpávací vodní elektrárna Štěchovice (převzato [20])

Přečerpávací vodní elektrárna Štěchovice II má spád 220 metrů. Horní nádrž je umístěna na kopci na Homole a má objem 500 000 m³. Poprvé byla uvedena do provozu v roce 1947. Elektrárna v té době již byla plně automatizována a její odpadní teplo z chlazení se používalo k ohřívání vody blízkého plaveckého stadionu. V roce 1991 byla elektrárna odstavena. Do téhle doby elektrárna vyrobila 1 650 000 MWh energie. V letech 1992 až 1996 byla elektrárna modernizována. Dvě soustrojí o výkonu 21 MW byla nahrazena jedním soustrojím s reverzní Francisovou turbínou o výkonu 45 MW. [20]

2.3 Největší akumuláční vodní elektrárny v České republice

Charakteristikou pro akumuláční vodní elektrárnu je přehrazením řeky přehradní hrází a rozsáhlou vodní nádrží, kde je shromážděna velká zásoba vody. Akumulační elektrárna se spouští jenom v případě, kdy je v přenosové soustavě nedostatek elektrické energie. Akumulační elektrárny pracují tedy v pološpičkové a špičkové oblasti denního zatížení obr. 11. [25]



Obr. 11. Diagram denního zatížení spotřeby el. energie (převzato [24])

2.3.1 VE Kamýk



Obr. 12. Vodní elektrárna Kamýk (převzato [20])

Vodní elektrárna Kamýk byla uvedena do provozu roku 1961. Je součástí Vltavské kaskády. Objem přehrady je 12,8 mil. m^3 . Slouží především jako k vyrovnávání nerovnoměrného odtoku z vodní elektrárny Orlík. Provoz elektrárny ze Štěchovic, kde se nachází centrální dispečink Vltavské kaskády. Hlavní význam elektrárny spočívá v umožnění špičkového provozu vodní elektrárny Orlík. Elektrárna Kamýk má čtyři soustrojí s Kaplanovými turbínami. Její celkový výkon je 40 MW. Vodní dílo Kamýk má plavební komoru, která umožňuje lodní dopravu mezi přehradou Slapy a Kamýkem. Přehrada má výšku 24,5 metrů a je dlouhá 158 metrů. [20,26]

2.3.2 VE Lipno I

Vodní elektrárna Lipno I byla dokončena v roce 1959. Je také součástí Vltavské kaskády. Vodní nádrž Lipno je největší uměle vybudovaná vodní plocha s rozlohou téměř 50 km^2 na území České republiky. Do nádrže se vejde 306 mil. m^3 vody. Jelikož je vodní dílo Lipno I na začátku Vltavské kaskády, tak regulací odtoku se zvyšují minimální

průtoky vody, chrání celou oblast kolem řeky Vltavy před povodněmi a zvyšuje výrobu elektrické energie v ostatních elektrárnách Vltavské kaskády. Jezero Lipna je dlouhé 44 kilometrů a na šířku má až 5 kilometrů. Vodní nádrž láká také k turistice. V zimě, při dobrých klimatických podmínkách je zde upravována nejdelší přírodní bruslařská dráha na světě a v létě slouží pro letní rekreaci. [20]

Elektrárna Lipno I má celkově instalovaný výkon 120 MW. Je poháněna dvěma Francisovými turbínami. Vyrábí především špičkovou elektrickou energii a používá se při regulaci celostátní energetické soustavy. Její celkový výkon dokáže naběhnout za 150 vteřin a je ovládána dálkově z centrálního dispečinku ve Štěchovicích. Vodní elektrárna se nachází v podzemí kaverně o rozměrech 65 x 27 metrů a výšce 37 metrů, v hloubce 160 metrů pod terénem v blízkosti hráze. Voda se přivádí na turbíny dvěma tlačnými ocelovými šachtami o průměru 4,5 metrů a délky 160 metrů. Pak je voda odváděna 3,6 kilometrovým dlouhým tunelem, který je široký 8,4 metrů a vysoký 7,8 metrů do vyrovnávací nádrže Lipno II. Lipno II je malá průtočná elektrárna s výkonem 1,5 MW, která je vybudovaná pod Lipnem I. [20]



Obr. 13. Vodní elektrárna Lipno I (převzato [20])

2.3.3 VE Orlík



Obr. 14. Vodní elektrárna Orlík (převzato [20])

Přehrada Orlík na řece Vltavě, od Prahy je přehrada vzdálena 91 kilometrů. Výstavba přehrady probíhala v letech 1954 – 1961. Do přehrady se vejde 720 mil m³ vody. Je to neobjemnější akumulací nádrž v České republice. Orlík a jezero Lipno řídí průtok vody na řece Vltavě i na dolním Labi. Přehrada Orlík má rozlohu 26 km². Slouží také k letní rekreaci, plavbě po jezeře a rybaření. [27]

Vodní elektrárna Orlík má 4 Kaplanovy turbíny o celkovém výkonu 364 MW. Její spád je 70,5 metru. Vyrábí levnou, ekologicky čistou, špičkovou elektrickou energii. Podílí se řízení celostátní energetické soustavy. Její celkový výkon dokáže naběhnout za 128 vteřin. Elektrárna je dálkově řízena z centrálního dispečinku ve Štěchovicích. Přehrada je vysoká 91, 5 metru. Vodní elektrárna o rozměrech 17 x 127.5 metru a výšce 20 metrů je umístěna v leté části řeky pod hrází. Voda se na 4 turbíny přivádí ocelovým potrubím o průměru 6250 milimetrů, které je zabetonované v hrázi. Po předání své energie turbíně proudí voda savkou do vývaru v dolní nádrži. Všechna čtyři soustrojí jsou zapojena v tzv. dvojblokovém uspořádání – vždy dvě soustrojí jsou připojena ke skupině tří jednofázových transformátorů. Vlastní spotřeba elektrárny je zajišťována z cizích zdrojů kabelovým vedením o napětí 10 kV z rozvodny Milín a z elektrárny Kamýk a dále odbočkami z dvojbloků z rozvodny 15 kV přes staniční transformátory 15kV / 0,4 kV. [20]

2.3.4 VE Slapy



Obr. 15. Vodní elektrárna Slapy (převzato [20])

Vodní elektrárna Slapy byla postavena po II. Světové válce v letech 1949 – 1955. Je také součástí Vltavské kaskády. Do nádrže se vejde 270 mil. m³ vody. Slapy mají betonovou gravitační hráz, která je vysoká 65 metrů. Jezero má plochu 14 km². Akumulační nádrž má energetický význam, ale také se používá k dlouhodobé regulaci vodního režimu na řece Vltavě. Jako Lipno i Orlik se Slapy využívají k letní rekreaci a vodních sportů.

Vodní elektrárna Slapy je vybavena třemi soustrojími s Kaplanovými turbínami o celkovém výkonu 144 MW. Její spád je 56 metrů. Voda na turbíny je přiváděna 3 ocelovými potrubími, které jsou zabetonovány v hrázi. Slapy jsou plně automatizovaná elektrárna, která se podílí na řízení výkonové bilance celostátní energetické soustavy. V těle hráze je umístěna strojovna, velín, vnitřní rozvodna 110 kV, rozvodna 22 kV, potřebné transformátory a dvě základové výpustě. Celý výkon elektrárny dokáže naběhnout za 136 vteřin. Je také řízena dálkově ze Štěchovic. Nádrž ve Štěchovicích a Vraném vyrovnávají kolísání odtoku vody z nádrže Slapy. [20,28]

2.3.5 VE Štěchovice I



Obr. 16. Vodní elektrárna Štěchovice (převzato [16])

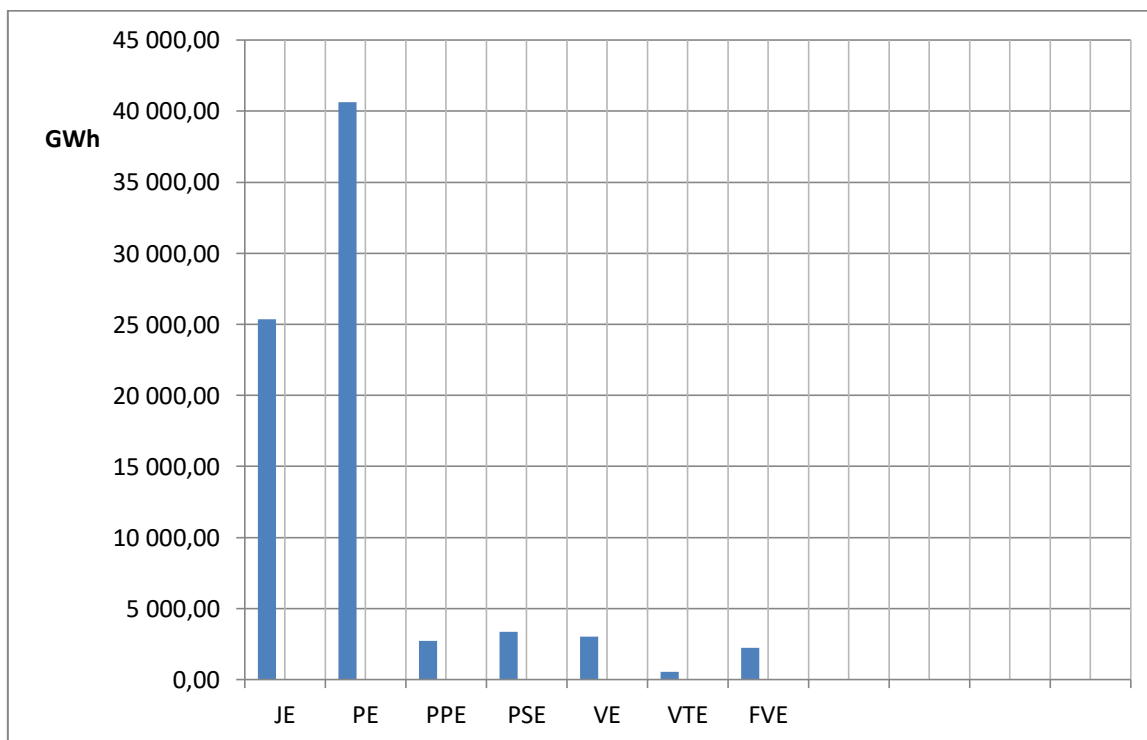
Vodní dílo Štěchovice bylo budováno v letech 1938 a stavba byla dokončena roku 1944. Vodní elektrárna Štěchovice I byla budována jako druhý článek Vltavské kaskády. Přehrada byla navržena tak, aby byla umožněna plavba vorů a lodí. Lodě ve Štěchovické přehradě překonávají spád 20,1 metru. Dalším úkolem vodního díla je zdržovat a regulovat průtok vody.

Hráz přehrady je betonová a má pět přelivových polí hrazenými stavidly, je 120 metrů dlouhá a 22,5 metrů vysoká. Do nádrže se vejde 11,2 mil. m³ vody. Slouží především ke kolísavému odtoku vody ze špičkové elektrárny Slapy. Štěchovice spolu s Vraným, vyrovnávají celý odtok elektráren Vltavské kaskády. Vodní elektrárna Štěchovice I se řadí mezi středotlaké akumulární pološpičkové vodní elektrárny, má dvě soustrojí s Kaplanovými turbínami s celkovým výkonem 22,5 MW. Je řízena dálkově z dispečinku Vltavské kaskády, který se nachází nedaleko elektrárny na levém břehu. Součástí elektrárny je venkovní rozvodna 110 kV. [20,26]

2.4 Výroba elektrické energie v České republice

V České republice za rok 2015 se vyrobilo 77 881, 4 GWh elektrické energie ve všech typech elektráren. Ve vodních a přečerpávacích elektrárnách se vyrobilo za rok 3038 GWh. Z celkového množství vyrobené energie, je to malé množství, ale vodní energie je důležitá a výhodná v tom, že rychle naběhne a může se díky ní regulovat elektrizační

soustava. Vodní energie tvoří špičkovou energii Obr. 11. V grafu číslo 1 je znázorněno množství vyrobené energie jednotlivými energetickými zdroji, kde znamená JE – jaderné elektrárny, PE – parní elektrárny, PPE – paroplynové elektrárny, VE – vodní elektrárny a VTE – větrné elektrárny.



Graf 1. Výroba elektrické energie v ČR 2015 [16]

V tabulce číslo 5 je uvedena vyrobená energie v České republice ve vodních elektrárnách za rok 2015.

Tab. 5 Přehled vystavěných vodních elektráren na Vltavské kaskádě do roku 1962 [29]

Typ elektrárny	Vyrobená el. Energie v MWh
Vodní elektrárny do 1 MW	441 163,7
Vodní elektrárny od 1 MW do 10 MW	518 855,8
Vodní elektrárny nad 10 MW	789 422,3
Přečerpávací vodní elektrárny	126 8739

3 Způsoby zvyšování účinnosti vodních elektráren

Dnešní obavy ohledně energetické bezpečnosti a změn klimatum vedou k politickým regulacím energetických trhů. Například v Německu [30] se rozhodli, po havárii japonské jaderné elektrárny Fukušima v roce 2011, že do roku 2022 zastaví výrobu elektřiny z jaderných elektráren a jejich výkon by měli nahradit převážně obnovitelné zdroje. Jedním z obnovitelných zdrojů je energie získaná pomocí vodních elektráren, která se dá regulovat na rozdíl od energie ze slunce a větru. Protože v České republice už pro výstavbu velkých vodních skoro nenacházejí vhodné lokality, je zapotřebí současné elektrárny modernizovat. Proto energetická společnost ČEZ, investovala téměř 2 miliardy korun do modernizace vodních elektráren.

3.1 Výběr vhodného typu turbíny

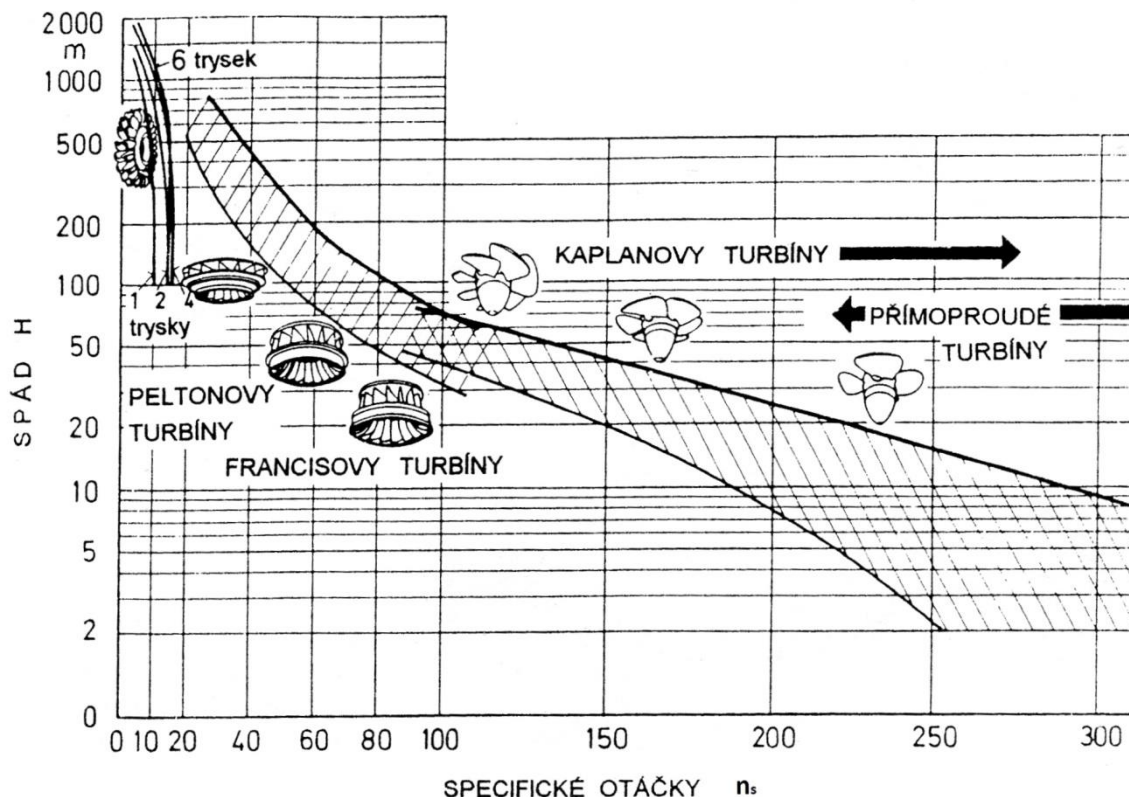
Vodní turbína je považována za základní součást vodní elektrárny. Projektant vodní turbíny se musí řídit hydraulickými parametry daného vodního díla (průtokem Q a spádem H). Na Obr. č. 18 je znázorněno pro jaké spády a průtoky se hodí daný typ turbíny. Dále musí vycházet z konkrétních podmínek v dané lokalitě a z charakteru budoucího pracovního režimu vodní elektrárny. Mezi důležité body při návrhu turbíny patří [3]:

- spád a jeho kolísání,
- průtok a jeho proměnnost během roku,
- velikost instalovaného výkonu,
- charakter denního zatížení elektrárny.

Po zhodnocení těchto bodů pak přistoupíme k návrhu turbín podle tohoto postupu:

- určení počtu soustrojí, která budou ve vodní elektrárně instalována,
- určení typu turbín a jejich rychloběžnosti,
- určení hlavních rozměrů turbín a jejich otáček,
- výpočet pracovní charakteristiky turbín,
- výpočet výkonu a volba typu generátoru.

Pro celkovou orientaci při výběru turbíny nám slouží Obr. 17, kde je přehled využitelnosti hlavních typů turbín v závislosti na H spádu a specifických otáčkách n_s . Dále je také důležité zvolit správný počet turbín. Rozhodujícím kritériem pro volbu počtu turbín je ekonomické hledisko a také velikost elektrárny. U malých vodních elektráren zpravidla volíme 1 turbínu a u větších by měla mít elektrárna minimálně 2 turbíny. [3]

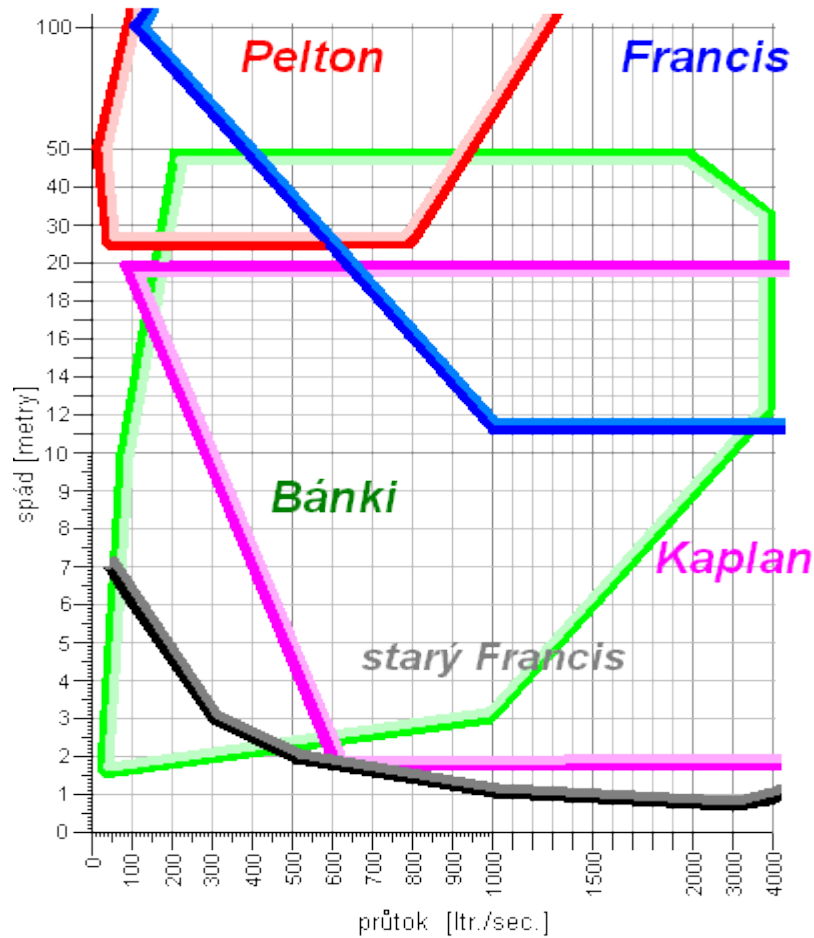


Obr. 17. Rozsahy využitelnosti hlavních typů vodních turbín (převzato [3])

V praxi se provádí přibližný návrh turbín třemi způsoby [3]:

- návrh podle charakteristik turbín,
- návrh podle diagramu výrobce turbíny,
- návrh turbín podle specifických otáček.

Volba daného způsobu návrhu závisí na dostupnosti materiálů od výrobců turbín. Stavební inženýr-vodohospodář si musí však vypracovat orientační vlastní návrh turbín pro jednotlivé varianty řešení.



Obr. 18. Volba typu turbíny s ohledem na spád a průtok (převzato [33])

3.1.1 Návrh podle charakteristik turbín

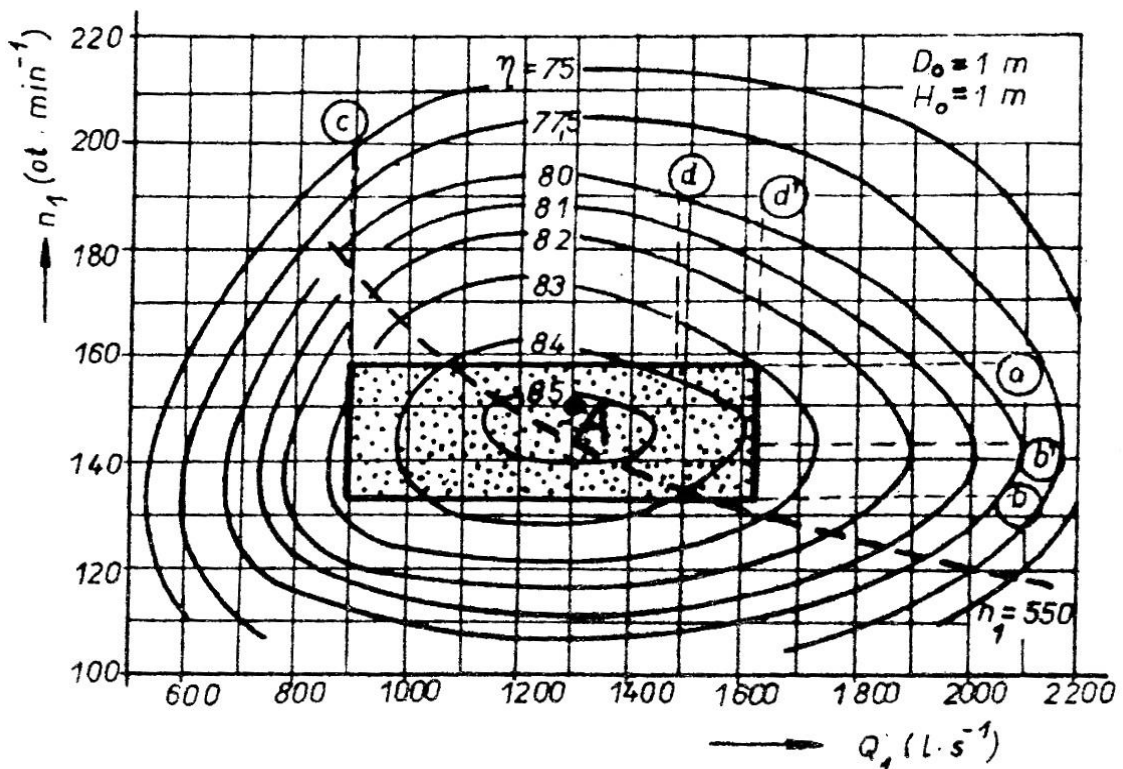
Návrh je založen na to, že projektant má k dispozici univerzální charakteristiku turbíny $\eta = f(Q, n)$, při konstantním H , kterou mu pro dané hodnoty průtoku a spádu poskytl výrobce turbíny. Pro účely projekce se univerzální charakteristika turbíny přepočítává na jednotkové hodnoty průměru oběžného kola $D_0 = 1$ m a jednotkovou hodnotu spádu turbíny $H_0 = 1$ m. Aby projektant navrhl turbínu, musí znát některé zákony z hydraulické podobnosti vodních turbín. Rovnice 7 udává podobnostní vztah pro průtoky a rovnice 8 podobnost pro otáčky mezi skutečnými a modelovanými parametry vodní turbíny:

$$\frac{Q}{Q_m} = \frac{D^2}{D_{m1}^2} \sqrt{\frac{H}{H_m}} \quad (7)$$

$$\frac{n}{n_m} = \frac{D_m}{D} \sqrt{\frac{H}{H_m}} \quad (8)$$

kde D - průměr oběžného kola, D_m - průměr modelovaného oběžného kola, n - skutečné otáčky turbíny, n_m - modelované otáčky turbíny, Q - průtok turbínou, Q_m - modelovaný průtok turbínou, H - spád a H_m je modelovaný spád. Při navrhování rozměrů turbíny, využijeme charakteristiku poskytnutou výrobcem Obr. 18. Podle průtoku a spádu zvolíme v charakteristice bod, kde daná turbína má nejlepší účinnost a podle rovnic 7 a 8 vypočítáme další parametry. Podklady pro předběžný návrh turbíny tedy jsou [3]:

- navrhované hodnoty H a průtoku Q ,
- univerzální charakteristika turbíny $\eta = f(Q, n)$,
- hydraulický profil (rozměry) turbíny pro $D_0 = 1$ m,
- zákony hydraulické podobnosti.



Obr. 18. Univerzální charakteristika Kaplanovy turbíny (převzato [3])

3.2 Zmenšení ztrát v turbíně

Jedním ze způsobů jak zvýšit účinnost vodních elektráren je omezit ztráty v elektrárně, které vznikají při přeměně hydraulické energie na energii elektrickou. Podle tab. 6 vznikají ve vodní elektrárně ztráty v turbíně, generátoru, transformátoru a při převodu. Ztráty v turbíně jsou dány vztahem v kapitole 1.4.4

Tab. 6 Dosahované účinnosti v jednotlivých člancích elektrárny[1]

	Dosahované účinnosti	
	Výkon	
	do 100 kW	nad 100 kW
Turbína	0,65 až 0,85	0,75 až 0,93
Převod	0,80 až 1,00	0,80 až 1,00
Generátor	0,70 až 0,95	0,75 až 0,98
Transformátor	0,90 až 0,95	0,99 až 1,00
Celková účinnost	0,50 až 0,70	0,60 až 0,80

V turbíně jsou zahrnuty následující ztráty [1]:

- objemové,
- hydraulické,
- mechanické

3.2.1 Ztráty objemové

Ztráty objemové označujeme q . Je to bezrozměrná veličina. Představují nám průtok, který neprotéká prostorem oběžného kola. Když, zanedbáme vnější průsaky, protéká průtok Q vstupním a výstupním průřezem turbíny. Jeho podstatná část Q_K protéká mezilopatkovým prostorem oběžného kola a vykonává práci, jeho menší část q vlastním kolem neteče, může unikát např. spárami lopatkami. Průtok q tedy není využit. Objemové ztráty představují objemovou účinnost, která představuje míru průsaků [1]:

$$n_q = \frac{Q_K}{Q} = \frac{(Q - q)}{Q} = 1 - \frac{q}{Q} \quad (9)$$

3.2.2 Ztráty hydraulické

K hydraulickým ztrátám dochází jednak vazkou kapalinou obtékaných, technologicky drsných ploch průtočného prostoru turbíny, ale také existence místních ztrát v turbíně způsobených náhlou změnou směru proudění vazké kapaliny. Nebo změnou průtočného průřezu. Dále hydraulické ztráty zahrnují ztráty rázem, které vznikají při nesprávném vstupu kapaliny do lopatkové mříže oběžného kola, což značí v podstatě ztráty místní. Hydraulická účinnost je bezrozměrná a vyjadřujeme jí vztahem:

$$\eta_h = \frac{E_K}{E} = \frac{(E - E_z)}{E} = 1 - \frac{E_z}{E} \quad (10)$$

kde E_z je ztracená (disipovaná) měrná energie kapaliny v důsledku existence hydraulických ztrát, E je měrná energie a E_K je měrná energie kapaliny. [1]

3.2.3 Ztráty mechanické

Mechanické ztráty způsobuje tření v ucpávce hřídele, radiálním a axiálním ložisku a tření vnějšího povrchu oběžného kola o kapalinu. Mechanické ztráty se projeví snížením výkonu na hřídeli o hodnotu P_z odpovídající těmto ztrátám. Pomocí mechanické účinnosti vyjádříme ztráty vztahem [1]:

$$\eta_m = \frac{P}{P_h} = \frac{(P_h - P_z)}{P_h} = 1 - \frac{P_z}{P_h}, \quad (11)$$

kde P_h je hydraulický výkon a P mechanický výkon.

3.3 Přivaděče

Přivaděče jsou součástí vodního díla elektrárny, podílí se na její celkové účinnosti. Mají za úkol dovést vodu k turbínám. Při navrhování přivaděčů se musí postupovat tak, aby se ztratilo co nejméně energie. Tedy, aby průtok vody byl přibližně stejný jako ve vodním toku. U malých vodních elektráren je snaha o to, aby přivaděče byly co nejkratší, protože přivaděče omezují průtok vody z původního toku a čím delší je přivaděč, tím roste cena vodní elektrárny. Na Obr. 19 je znázorněna přečerpávací elektrárna s přivaděči. Přivaděče se dělí podle tlakových poměrů [5]:

- na beztlakové přivaděče,

- a na tlakové přivaděče.

3.3.1 Tlakové přivaděče

Tlakové přivaděče se používají převážně u vodních děl, kde jsou velké spády. Jsou nákladnější než přivaděče beztlakové. Takové přivaděče se liší použitým materiálem. Požívají se ocelová potrubí, litinová potrubí, železobetonová potrubí a plastová potrubí u velmi malých elektráren. [5]



Obr. 19. Schéma přečerpávací elektrárny s přivaděči (převzato [34])

3.3.2 Beztlakové přivaděče

Jsou stavěny tam, kde to přírodní podmínky dovolují. Bývají u malých vodních elektráren. Z konstrukčního hlediska rozdělujeme beztlakové přivaděče na otevřené a zavřené. Otevřené přivaděče jsou navrženy jako kanály s lichoběžníkovým nebo s obdélníkovým profilem. Při navrhování přivaděče si musíme dát pozor na následující podmínky [4]:

- svahy kde je vybudován přivaděč, musí být stabilní o odolné proti sesuvu a podemletí,
- přivaděč nesmí prosakovat,
- z přivaděčů nesmí přetékat voda.

Aby přivaděče neprosakovaly, používá se co nejjednodušší způsob k vylepšení těsnosti. Používají se při budování koryta přivaděče fólie, písek nebo například betonové desky. [4]

3.4 Vliv velikosti turbíny na hydraulickou účinnost

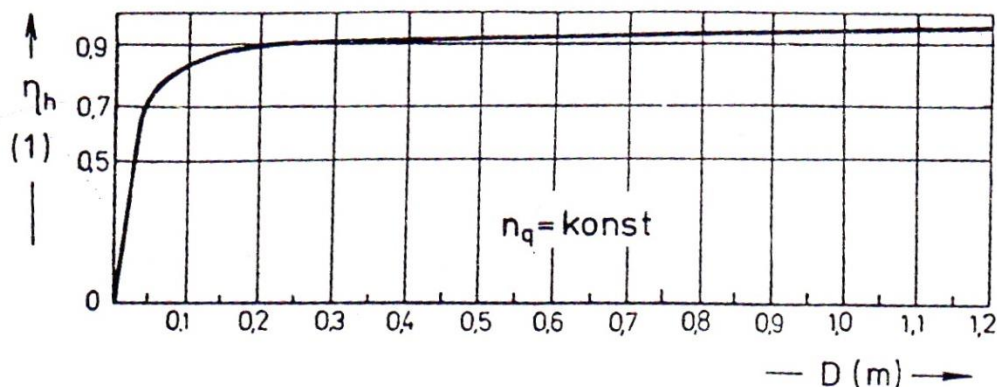
Velikost turbíny se podílí na velikosti dosahované maximální účinnosti. Základní parametr velikosti turbíny je průměr oběžného kola D , který ovlivňuje průtok turbínou. Podle rovnice kontinuity:

$$Q = S_{min} \cdot c, \quad (12)$$

v kvalitativní vazbě na průtok Q :

$$Q \sim D^2 \cdot c, \quad (13)$$

kde S_{min} je nejužší výtokový průřez kanálu, c je výtoková rychlost, Q je průtok a D je průměr oběžného kola. [1]



Obr. 20. Závislost hydraulické účinnosti na průměru oběžného kola axiální turbíny (převzato [1])

Z Obr. 20 vidíme, že při průměru oběžného kola menší než 0,2 m účinnost turbíny výrazně klesá. Proto průměr oběžného kola by měl být větší než 0,2 m. Například průměr oběžného kola 1,1 m má vůči turbíně s průměrem oběžného kola vůči stejným otáčkám hydraulickou účinnost vyšší o pět procent. [1]

3.5 Kavitace

Kavitace je termodynamický nežádoucí jev, který může poškodit části turbíny. Tam kde je nižší tlak, než tlak nasycených vodních par, vznikají dutiny (bublíny) vyplněné vodní párou. Tyto bubliny zaniknou, když tlak kapaliny naroste. Zánik těchto bublin způsobuje intenzivní tlakové rázy, které mechanicky namáhají turbínu. Kavítace se projevuje převážně u rychloběžných přetlakových turbín.

Nejčastěji se kavítace objevuje v oběžném kole, kde ovlivňuje provoz turbíny, který se projeví snížením výkonu a účinnosti. Dále se ničí materiál oběžného kola. Při dynamickém namáhání, které vzniká při kavítaci a je doprovázené chvěním turbíny a rázy, se mechanicky namáhá materiál lopatek. Povrch materiálu se narušuje a u nehomogenních materiálů dochází k elektrochemické korozi. Aby se zamezilo vzniku kavítace, musí dosahovaná měrná energie být větší než měrná energie nasycených vodních par. [2,10]

3.6 Modernizace vodních elektráren

3.6.1 Lipno

V současné době probíhala na vodní elektrárně Lipno I rozsáhlá rekonstrukce na soustrojí TG1. Tato rekonstrukce je největší od spuštění vodní elektrárny. Celá modernizace stála přibližně 200 milionů korun. Měla by se tím zvýšit účinnost vodní soustrojí o 4 %. Dále se zvýší roční výroba elektřiny o 4 miliony kWh. Elektrárna Lipno dodá elektřinu asi tisíci novým domácnostem navíc oproti dnešku. [32]

3.6.2 Kamýk

Vodní elektrárna Kamýk se po více než roční modernizaci, která probíhala v roce 2013 a 2014, stala ekologičtější a efektivnější. Probíhala generální oprava a modernizace soustrojí TG1. Po modernizaci soustrojí, elektrárna vyrobí za rok o více než 1,1 milionu kWh elektřiny více. Elektrárna pokryje spotřebu elektrické energie 300 domácností navíc, ze stejného množství vody. Ekologická modernizace elektrárny spočívala v tom, že došlo ke změně hydraulického ovládání soustrojí a rychlouzávěrů z nízkotlaké na vysokotlakou hydrauliku. Díky tomu se snížila objem provozních olejových náplní na regulaci turbíny. Z 8,5 tisíce litru, klesla spotřeba oleje na desetinu. [31]

3.7 Zhodnocení vodních elektráren

3.7.1 Z hlediska environmentálního

Vodní elektrárny nepotřebují ke svému provozu žádné nerostné suroviny jako je uhlí a uran. Jejich velkou výhodou je využívání obnovitelné energie. Dále neprodukují žádné škodlivé látky a neznečišťují životní prostředí.

Vodní elektrárny mají také spoustu aspektů, které škodí životnímu prostředí. Při výstavbě vodní akumulární elektrárny se musí zatopit velká plocha území vodou. V unikátním prostředí je tedy porušen ekosystém a jsou likvidovány ohrožené druhy. Značná část vody zadržovaná v přehradě má nepříznivé důsledky na geologické a hydrologické poměry v podloží. V nádrži se usazují nečistoty, které ovlivňují znečištění podzemních vod. Přehrada vodní nádrže tvoří nepřekonatelnou překážku pro pohyb ryb a vodních živočichů. Při stavbě nádrže se vypotřebuje velké množství betonu, kamení a oceli. Tím pádem se materiál na výstavbu vodní nádrže se musí vytěžovat z přírody. Proto v kapitole číslo 3 jsou uváděny především způsoby pro navýšení vodní účinnosti, které se zabývají navrhováním technických parametrů elektrárny. [35]

3.7.2 Z hlediska energetického a ekonomického

Navýšením účinnosti vodních elektráren při její celkové modernizaci se může dosáhnout zvýšení účinnosti kolem 5 %. Největší výhodou vodních elektráren je, že dokážou rychle dosáhnout svého maximálního výkonu. Při velkém kolísání energetické soustavy, způsobené především větrnými a slunečnými elektrárnami, dokáží velmi pohotově reagovat na okamžitou potřebu elektrické energie v elektrizační soustavě. Elektrická energie z vodních elektráren je produkována především ve špičkovém režimu. To znamená čas, kdy je potřeba elektrické energie nejvíc.

Vodní elektrárny mají řadu specifických vlastností. Přečerpávací elektrárny při přebytku elektrické energie v elektrizační soustavě odebírají ze sítě energii, tak že přečerpávají vodu z dolní nádrže do horní. Ekonomicky se to vyplatí, protože cena energie je nižší než při špičkovém provozu. Při špičkovém provozu přečerpávací elektrárny zase do sítě energii dodávají, a jelikož je elektrická energie dražší než, když energii sítě přečerpávací elektrárna spotřebovává, tak elektrárna vydělává. [36]

Z hlediska výstavby nové vodní elektrárny jsou počáteční náklady velmi vysoké. Skoro veškeré ceny energie jsou závislé na ropě. Když, je cena ropy vysoká, tak lidé mají tendenci využívat více obnovitelné zdroje energie. Pro výstavbu nové vodní elektrárny jsou za potřebí velké investiční náklady, proto jsou v uvedené práci uvedeny způsoby o navyšování účinnosti, které jsou zaměřeny na turbíny a jejich správného využití. Každá vodní elektrárna je jiná a vyžaduje jiné investiční náklady, aby se stavba vodního díla vyplatila, měly by se náklady na výstavbu vodní elektrárny vrátit do 10 let. [5]

Závěr

Práce měla za cíl upozornit na problematiku velkých vodních elektráren v České republice. Většina vodních elektráren je situována na řece Vltavě. Mezi její největší elektrárny patří Orlick, Slapy a Lipno. Byly většinou vystavěny v padesátých a šedesátých letech minulého století, proto vyžadují modernizaci. Nesmíme zapomenout také na přečerpávací vodní elektrárnu Dlouhé Stráně, která má s e svými dvěma reverzními Francisovými turbínami výkon 650 MW. A tím pádem se jedná o nejvýkonnější vodní elektrárnu v České republice. Výstavba nových velkých vodních elektráren není v současné době naplánovaná. Cílem je spíše modernizovat stávající velké elektrárny, tak aby dosahovali lepší účinnosti. O účinnosti vodní elektrárny rozhodují přírodní podmínky. To znamená, že nám záleží na velikosti spádu a průtoku, ale i turbíny.

Srdce vodní elektrárny je vodní turbíny, která se do značné míry podílí na účinnosti vodní elektrárny. Nejčastěji se v České republice vyskytuje Kaplanova a Francisova turbína. Při výběru správné turbíny je třeba znát základní parametry turbíny.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] MELICHAR, Jan, Jaroslav BLÁHA a Jan VOJTEK. Malé vodní turbíny: konstrukce a provoz. Praha: České vysoké učení technické, 1998. ISBN 80-010-1808-0.
- [2] ŠKORPIL, J. a M. KASÁRNÍK. Obnovitelné zdroje energie I: vodní elektrárny. 2. vyd., přeprac. V Plzni: Západočeská univerzita, Elektrotechnická fakulta, 2000. ISBN 978-80-7082-675-1.
- [3] GABRIEL, Pavel a Jitka KUČEROVÁ. Navrhování vodních elektráren. Vyd. 2. Praha: České vysoké učení technické, 2000. ISBN 80-01-02214-5.
- [4] DUŠIČKA, Petr, Pavel GABRIEL, Tomáš HODÁK, František ČIHÁK a Peter ŠULEK. Malé vodní elektrárny. Bratislava: Jaga, 2003. ISBN 80-889-0545-1.
- [5] HOLATA, Miroslav, GABRIEL, Pavel, ed. Malé vodní elektrárny: projektování a provoz. Praha: Academia, 2002. ISBN 80-200-0828-4.
- [6] CASTALDI, Duane, Eric CHASTAIN, Morgan WINDRAM a Lauren ZIATYK. A Study of Hydroelectric Power: From a Global Perspective to a Local Application [online]. [cit. 2017-04-22].
- [7] KMINIAK, Pavel. Vodné mikroelektrárne. Bratislava: Alfa, 1990. ISBN 800500771X.
- [8] GABRIEL, Pavel, Petr KALANDRA a František ČIHÁK. Malé vodní elektrárny. Praha: České vysoké učení technické, 1998. ISBN 80-01-01812-1
- [9] Vodní energie [online]. [cit. 2017-04-29]. Dostupné z: <https://ekowatt.cz/uspory/vodni-energie.shtml>
- [10] VEN: Vodní elektrárny [online]. , 1-17 [cit. 2017-04-17]. Dostupné z: <https://www.technicka-ekologie.zcu.cz/ven>
- [11] Vodní elektrárny – princip, rozdělení, elektrárny v ČR [online]. [cit. 2017-04-30]. Dostupné z: <http://oenergetice.cz/domains/oenergetice.cz/wp-content/uploads/2015/06/Francis.jpg>
- [12] BOYLE, Godfrey. Renewable energy. 2nd ed. New York: Oxford University Press in association with the Open University, c2004. ISBN 0-19-926178-4.
- [13] Vodní elektrárny v ČR: Vltavská kaskáda – 2. část [online]. [cit. 2017-04-30]. Dostupné z: http://oenergetice.cz/domains/oenergetice.cz/wp-content/uploads/2015/09/07_kamyk-768x1024.jpg

- [14] Turbină Pelton [online]. [cit. 2017-04-30]. Dostupné z: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/9/97/Pelton_wheel_turbine_in_Barcelona.jpg
- [15] Hydraulic Water Turbines [online]. [cit. 2017-05-04]. Dostupné z: http://members.tripod.com/hydrodocs_1/hydro-electric_turbines_past_and_present.html
- [16] Vodní elektrárna Štěchovice [online]. [cit. 2017-05-12]. Dostupné z: <http://www.odbrkvtave.cz/cs/domu/pamatky/vodni-elektrarna-stechovice/>
- [17] Historie výroby elektřiny [online]. [cit. 2017-05-05]. Dostupné z: http://www.spvez.cz/pages/history/history_01.htm#TOP
- [18] Vodní energie [online]. [cit. 2017-05-05]. Dostupné z: <http://www.nazeleno.cz/energie/vodni-energie/vodni-elektrarny-v-ceske-republice-kolik-vyrobi-elektriny.aspx>
- [19] Dlouhé Stráně [online]. [cit. 2017-05-11]. Dostupné z: <http://www.dlouhe-strane.cz/strane/fotogalerie>
- [20] Vodní elektrárny ČEZ v České republice [online]. [cit. 2017-05-11]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/vyroba-elektriny/obnovitelne-zdroje/voda/vodni-elektrarny-cez/ceska-republika.html>
- [21] Přecherčpávací vodní elektrárny v České republice [online]. [cit. 2017-05-11]. Dostupné z: <http://oenergetice.cz/elektrarny-cr/precerpavaci-vodni-elektrarny-v-ceske-republice/>
- [22] MROŽOVINY: Technický šperk v srdci Jeseníků [online]. Praha, 2004 [cit. 2017-05-11]. Dostupné z: http://archiv.neviditelnypes.zpravy.cz/clanky/2004/07/38339_21_0_0.html
- [23] Vodní elektrárna Dalešice [online]. [cit. 2017-05-11]. Dostupné z: <http://www.dalesickaprehrada.cz/vodni-elektrarna-dalesice/>
- [24] Denní diagram zatížení [online]. [cit. 2017-05-11]. Dostupné z: http://images.slideplayer.cz/40/11126918/slides/slide_24.jpg
- [25] Vodní elektrárny – princip, rozdělení, elektrárny v ČR [online]. [cit. 2017-05-11]. Dostupné z: <http://oenergetice.cz/technologie/obnovitelne-zdroje-energie/vodni-elektrarny-princip-a-rozdeleni/>
- [26] Vodní elektrárny ČEZ [online]. [cit. 2017-05-12]. Dostupné z: {
- [27] Vodní díla a nádrže [online]. [cit. 2017-05-12]. Dostupné z: <http://www.pvl.cz/vodohospodarske-informace/vodni-dila/vodni-dila-a-nadrze>

- [28] Tiskové zprávy ČEZ [online]. [cit. 2017-05-12]. Dostupné z:
<http://www.pvl.cz/vodohospodarske-informace/vodni-dila/vodni-dila-a-nadrze>
- [29] *Energetický regulační úřad* [online]. [cit. 2017-05-12]. Dostupné z:
<https://www.eru.cz/cs/elektrina/statistika-a-sledovani-kvality/rocni-zpravy-o-provozu>
- [30] SLAVÍK, Matěj. *Německý plán uzavřít jaderné elektrárny do roku 2022 není reálný. Země nemá jak napájet Bavorsko* [online]. [cit. 2017-05-18]. Dostupné z:
<http://byznys.ihned.cz/c1-64063000-nemecky-plan-uzavrit-jaderne-elektrarny-do-roku-2022-neni-realny-zeme-nema-jak-napajet-bavorsko>
- [31] *Tiskové zprávy* [online]. [cit. 2017-05-19]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/pro-media/tiskove-zpravy/>
- [32] *Historicky největší modernizace vodní elektrárny Lipno zvýší její účinnost* [online]. [cit. 2017-05-19]. Dostupné z: <http://ekolist.cz/cz/zpravodajstvi/zpravy/historicky-nejvetsi-modernizace-vodni-elektrarny-lipno-zvysi-jeji-ucinnost>
- [33] *Rozsah použití základních druhů turbín* [online]. [cit. 2017-05-21]. Dostupné z:
<http://mve.energetika.cz/vodnimotory/pouzitelnost-turbin.gif>
- [34] *VĚDA A TECHNIKA V POZADÍ* [online]. [cit. 2017-05-26]. Dostupné z:
<http://edu.techmania.cz/cs/veda-v-pozadi/663>
- [35] KUDLÁČEK, Ivan. *Ekologie pro elektrotechniky*. V Praze: České vysoké učení technické, 2009. ISBN 978-80-01-04392-9.
- [36] *Vodní energie* [online]. Brno [cit. 2017-05-28]. Dostupné z:
www.ueen.feec.vutbr.cz/~mastny/vyuka/mmze/skripta/voda.pdf