

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ENERGETICKÝ ÚSTAV

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
ENERGY INSTITUTE

PŘEČERPÁVACÍ VODNÍ ELEKTRÁRNA PUMP STORAGE STATION

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

PETR ŠIMEK

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

ING. JIŘÍ KUBÁLEK

BRNO 2009

ABSTRAKT

Tato práce se zabývá funkcí přečerpávacích vodních elektráren, popisuje jednotlivá strojní zařízení a jejich rozdělení dle parametrů použití. Nastiňuje také výpočet při návrhu hydraulického stroje. Dále jsou zde popisy strojních uspořádání a jejich použití v praxi. Pro konkrétní případ je zde zpracována přečerpávací vodní elektrárna Dlouhé stráně. Související téma, které je zde zahrnuto, je elektrizační soustava a denní diagram zatížení.

ABSTRACT

This bachelor thesis deals with the functions of hydro-power plants, describes the various machinery and their distribution according to the parameters of use. Outlines the calculation in the design of hydraulic machines. There are also descriptions of machine layout and their use in practice. For the particular case, there is prepared hydro power plant Dlouhé stráně. Related topic that is included here, the electricity system and the daily load diagram.

Klíčová slova

Přečerpávací vodní elektrárna, vodní energie, turbína, čerpadlo, strojní uspořádání, diagram denního zatížení, elektrická energie, elektrizační soustava

Key words

hydro-power plants, hydro power, turbine, pump, mechanical arrangement, the daily load diagram, electrical energy, electricity system

Bibliografická citace:

ŠIMEK, P. *Přečerpávací vodní elektrárna*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 32 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Jiří Kubálek.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně s použitím uvedených zdrojů.

V Brně dne 27.5.2009

.....

Podpis

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval všem, kteří mi umožnili studium a celou dobu mě podporovali. Hlavní dík patří mému vedoucímu bakalářské práce Ing. Jiřímu Kubálkovi za vstřícné a ochotné jednání a poskytování informací, rad a námětů.

V Brně dne 27.5.2009

.....
Podpis

Obsah

1	Úvod.....	12
2	Historie využívání energie vody a vodních strojů.....	13
3	Zdroje vodní energie.....	14
3.1	Rozdělení	14
4	Turbíny.....	16
4.1	Rozdělení turbín	16
4.2	Základní typy turbín	16
4.2.1	Francisova turbína.....	17
4.2.2	Historické uspořádání Francisovy vertikální turbíny	18
4.2.3	Kaplanova turbína	19
4.2.4	Historické uspořádání Kaplanovy turbíny	20
4.2.5	Peltonova turbína	21
4.2.6	Historické uspořádání Peltonovy turbíny	22
4.2.7	Bánkiho turbína	23
4.2.8	Deriazova turbína	24
4.2.9	Vírová turbína.....	24
5	Výpočet při návrhu hydraulického stroje	26
6	Funkce přečerpávací vodní elektrárny.....	27
7	Strojní uspořádání PVE.....	27
7.1	Čtyř strojové uspořádání:.....	27
7.2	Tří strojové uspořádání:.....	28
7.3	Dvou strojové uspořádání:.....	29
8	Přečerpávací vodní elektrárna Dlouhé stráně	30
9	Diagram denního zatížení.....	34
10	Závěr	36
11	Seznam použité literatury	37
12	Seznam použitých zkratk a symbolů.....	38

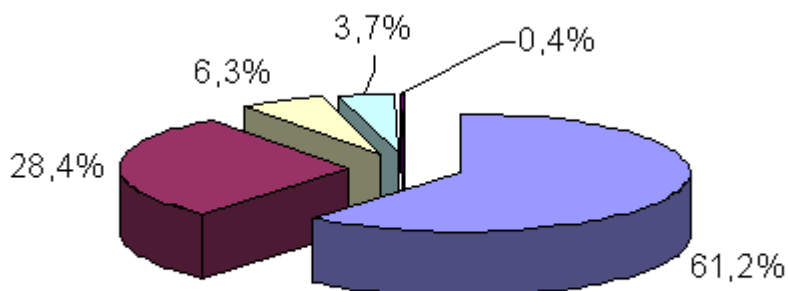
1 Úvod

Světový trend využívání obnovitelných zdrojů stále stoupá. V roce 2020 by mělo být 20% z celkové výroby elektrické energie a v roce 2050 dokonce 50%. U nás je to asi 5% z celkové výroby elektrické energie. Důvodem je zamezení produkce oxidu uhličitého, který vzniká při spalování fosilních paliv, dále možný nedostatek nerostných surovin, což znamená jejich zdražování až úplné spotřebování.

Do obnovitelných zdrojů energie patří hlavně vodní energie, větrná energie, sluneční energie, energie prostředí využívána tepelnými čerpadly, geotermální energie (např. sopky, gejzíry, horké prameny apod.), energie kapalných biopaliv a v neposlední řadě využívání energie biomasy a bioplynu.

Nejrozšířenějším obnovitelným zdrojem energie v České republice je voda, tedy získávání energie za pomoci vody. U nás nejsou zdaleka tak dobré podmínky pro stavění velkých vodních děl jako ve světě, jelikož naše řeky nemají dostatečný spád a mají málo vody. I přes tento nepříznivý stav je z obnovitelných zdrojů voda nejvíce využívána jako zdroj energie v ČR. Při jejím nedostatku či přebytku v elektrizační soustavě se využívá vodní energie prostřednictvím vodních elektráren (VE) a přečerpávacích vodních elektráren (PVE). [1]

Zastoupení jednotlivých obnovitelných zdrojů



■ Vodní elektrárny ■ Biomasa ■ Bioplyn ■ Větrné elektrárny
■ Tuhé komunální odpady, fotovoltaické systémy, kapalná biopaliva

Graf 1 Podíl jednotlivých způsobů výroby elektrické energie z obnovitelných zdrojů v roce 2007 v ČR

2 Historie využívání energie vody a vodních strojů

Za nejstarší hydraulické zařízení se považuje vodní kolo. To se využívalo jako pomocný prvek při práci, k pohonu vody či k pohonu jiných strojů, např. ve mlýnech. Vodní kola byla v prvopočátku poháněna lidmi či zvířaty a to za účelem zavlažování půdy nebo k dopravě užitkové vody tam, kam byla zapotřebí. Za vynálezce vodního lopatkového kola se považuje Ctébio (135 př.n.l.). Později se poháněly mlýny pomocí vodních kol. Kolem roku 300 po našem letopočtu se traduje stavba velkomlýnu ve Francii. Tuto stavbu tvořilo osmnáct vodních kol, ke kterým byla voda přiváděna dvěma kanály a celkový spád byl osmnáct metrů. Za pokrok v návrhu výkonnějších lopatkových strojů se zapříčinil Slovák Ján Andrej Segner, který žil v letech 1704 až 1783 a působil na Univerzitě v Göttingen. Jeho lopatkové stroje se používaly jako vodní motory. Další průkopníci byli pánové Leonard Euler ze Švýcarska (1707 – 1783) a Daniel Bernoulli z Holandska (1700 – 1782). Tito vědci byli členy Ruské akademie věd se sídlem v Petrohradě a zabývali se stavbou hydraulických strojů.

Francouzský inženýr Benoit Fourneyron navrhl první praktickou vodní turbínu a v roce 1827 postavil její prototyp. Konkrétně to byla turbína pro spád 108m, průtok 35 l/s, o otáčkách 2300 1/min a výkonu 45 kW. Toto hydraulické zařízení pracovalo celých 30 let. Dalšími významnými průkopníky v tomto oboru byli Američané James B. Francis a Lester A. Pelton, podle nichž jsou pojmenovány turbíny a v neposlední řadě Viktor Kaplan, který působil na Německé vysoké škole technické v Brně a nechal si patentovat axiální přetlakovou turbínu pro nízké spády a vyšší průtoky.

Pokud mluvíme o turbínách, je také nutné zmínit čerpadla. Dříve byla pístová a pracovala jako vodní motor. Při působení hydrostatického tlaku se pomocí šoupátek rozváděla voda střídavě pod a nad píst, čímž vznikl přímočarý vratný pohyb pístu a ten byl přeměněn klikovým mechanismem na pohyb rotační. Z Eulerovy teorie vyplývá, že funkce čerpadla je postavena na základě opačného principu funkce turbíny. [1], [3]



Obr. 1 Historické vodní kolo na spodní vodu

3 Zdroje vodní energie

V přírodě má voda potenciál mechanické, chemické a tepelné energie. Tím největším a nejvyužívanějším potenciálem je mechanická energie. Sem patří hlavně energie moří a řek. Využívání vodních toků k získání mechanické energie se nazývá tzv. bílé uhlí. Tento koloběh je zajišťován oběhem vody, vlivem působení sluneční energie a gravitace. Z pohledu moře využíváme energii vln, způsobenou větrem nebo podmořskou činností, označovanou jako tzv. fialové uhlí. Z hlediska přílivu a odlivu, vlivem přitažlivosti Měsíce a Slunce, kolísá hladina v přílivových oblastech a tu využíváme jako slapovou energii tzv. modré uhlí. Celkový potenciál využívání energie v mořích je obrovský. Další způsob využívání energie pracuje na základě rozdílných teplot v moři. Stále se rozvíjí jaderná energetika a s tou potřeba budovat vhodné doplňující zdroje pro krytí špičkových zatížení. Přesně toto kritérium splňují PVE.

Český hydrometeorologický ústav provádí hydrologickou bilanci množství a jakosti vod, která monitoruje aktuální stav povrchových i podzemních vod v ČR. Z této analýzy vyplývá možnost využití vodní energie na daných tocích. Naše republika je pomyslnou střechou Evropy. Většina řek tvoří horní části toků, které jsou charakteristické velkou rozkolísaností průtoků a to je nevhodné pro využívání vodní energie. Hojně využívána je např. Vltava, na které leží celkem 9 přehrad, produkujících asi 750 MW. Tomuto uskupení se říká Vltavská kaskáda. Mezi další významná vodní díla patří PVE Dalešice nebo PVE Dlouhé stráně a spoustu malých vodních elektráren (MVE). Můžeme také jmenovat Slovenskou Vážskou kaskádu na řece Váh se soustavou 22 přehrad nebo VE Orava, VE Gabčíkovo a PVE Čierny Váh. [2], [3], [4]

3.1 Rozdělení

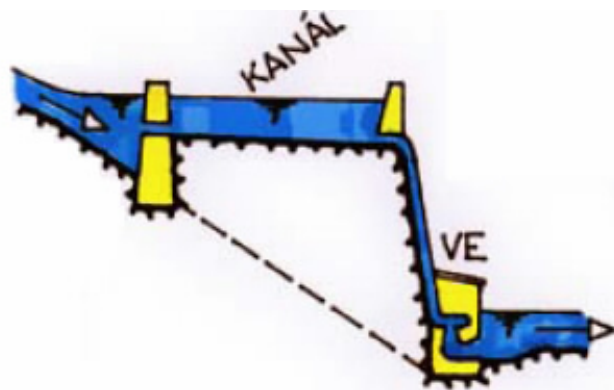
Zdroje vodní energie můžeme rozdělit na **přírozené** a **umělé**. Do přírodních zdrojů patří mořský příliv a odliv, vlny, tepelnou energii nebo různé mořské proudy. Dále sem řadíme povodí řek a potoků, které díky svému geografickému tvaru umožňují přímé využití pro zpracování jejich energie. Přírodní útvary jsou např. vodopády, přírozené prahy nebo velké sklony na tocích apod. V přírodě se těchto úkazů příliš mnoho neobjevuje a tolik se nevyužívají.



Obr. 2 Ukázka přírodního zdroje

Často se však používají umělé zdroje, které jsou realizovány různými, ať už složitějšími nebo méně náročnými stavbami, či technickými zařízeními. Záleží, zda soustředujeme spád, průtok, nebo spád i průtok.

Soustředění spádu jehož příkladem je jez, má několik účelů. Především slouží pro využívání energie vody, také zvyšuje hladinu, což umožňuje odběr vody a zároveň zlepšuje podmínky pro plavbu.



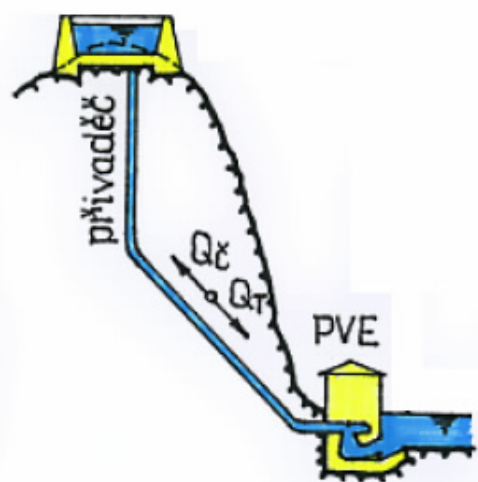
Obr. 3 Ukázka soustředění spádu

Soustředění průtoku se provádí v kopcovitých terénech zachycováním menších potůčků či jiných přírodních zdrojů vody, pomocí úbočního beztlakového kanálu.



Obr. 4 Ukázka soustředění průtoku

Soustředění spádu i průtoku je typický případ PVE, kdy na základě výběru vhodné lokality, jak z hlediska topografického, hydrologického, geologického a jiných, můžeme ovlivnit zároveň spád i průtok. [3], [5]



Obr. 5 Ukázka soustředění spádu i průtoku

4 Turbíny

Vodní turbína je zařízení, které za pomoci generátoru převádí pohybovou energii vody na elektrickou energii. V případě, že se k tomuto zařízení přivádí voda kanálem s volnou hladinou, vtéká do kašny, v níž je umístěná turbína. Pokud se voda vede v potrubí, vtéká do tlakové spirální skříně. V závislosti na typu turbíny a dalších parametrech mají tyto skříně různý tvar. Voda proudí přes rozváděcí lopatky, které regulují účinnost, na lopatky oběžného kola turbíny. Odtud voda odchází do sací trouby (savky) a odpadním kanálem pryč. V případě rovnotlakých turbín, např. Peltonova nebo Bánkiho, ústí voda z přiváděče přes dýzu na lopatky oběžného kola. [5]

4.1 Rozdělení turbín

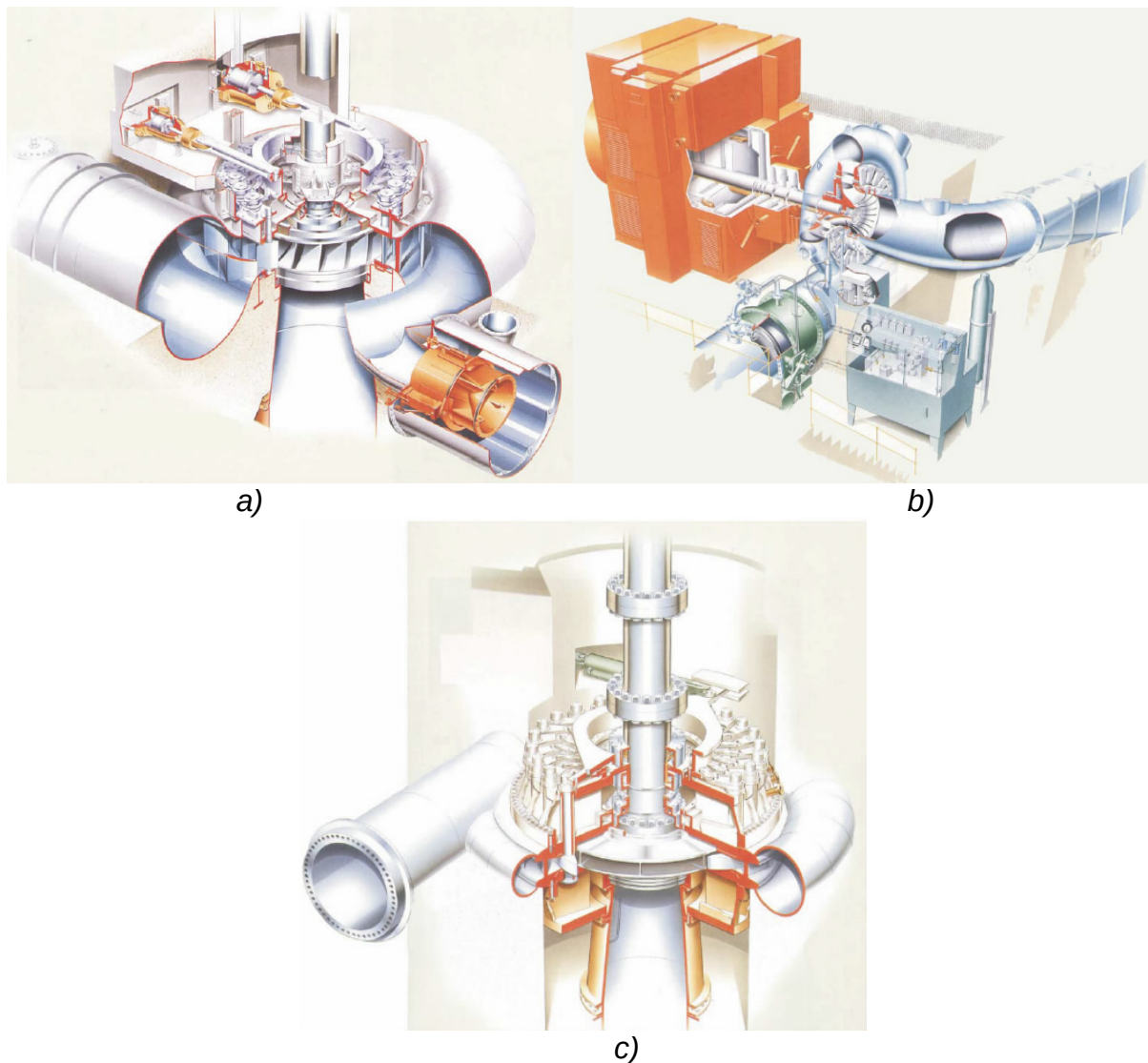
- podle způsobu přenosu energie vody: - rovnotlaké
- přetlakové
- podle polohy hřídele oběžného kola: - horizontální
- vertikální
- šikmé

4.2 Základní typy turbín

- Francisova: - spirální
- kašnová
- reversní
- Kaplanova: - spirální
- přímoproudá
- Peltonova
- Bánkiho
- Deriázova
- Vírová

4.2.1 Francisova turbína

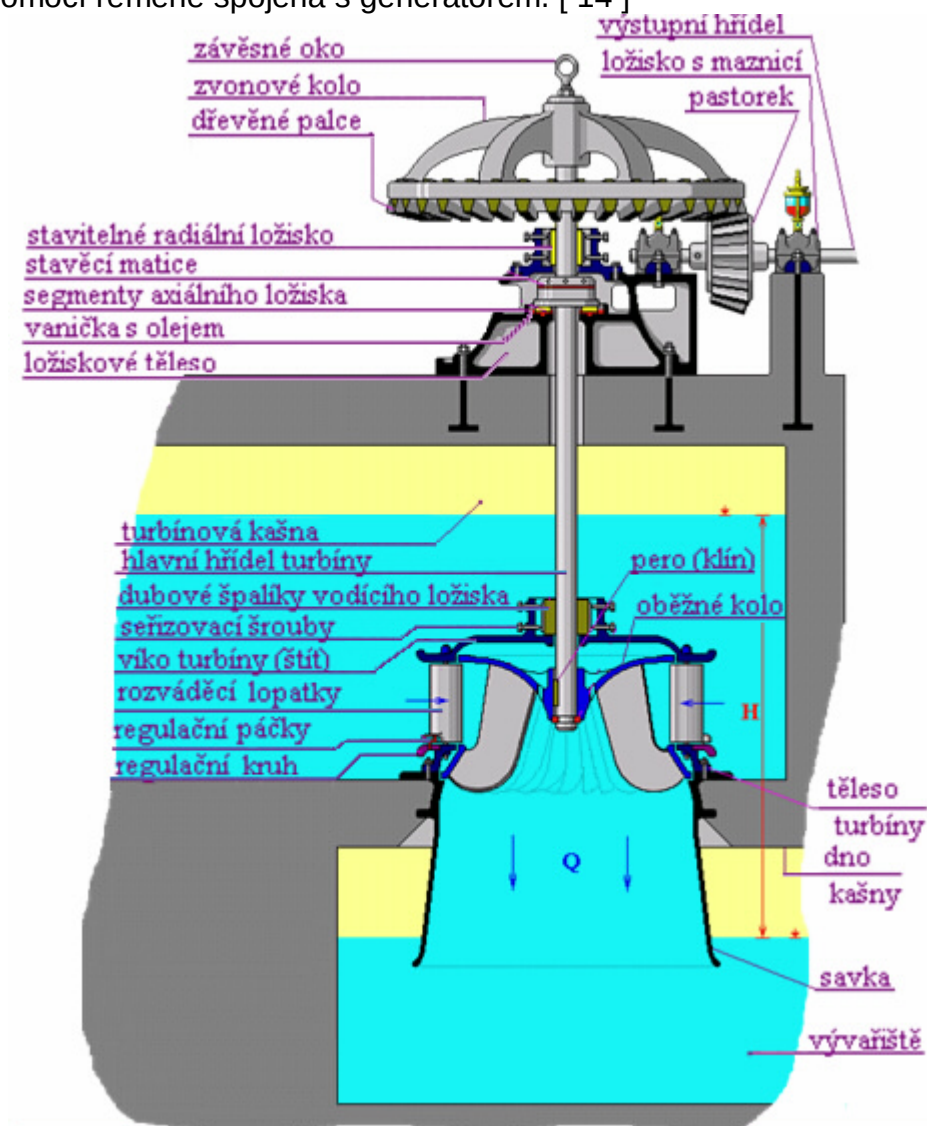
Je přetlaková radiálně axiální turbína, která se užívá pro střední a vyšší spády, asi 700 m, při různých průtocích, např. 68,5 m³/s PVE Dlouhé stráně nebo PVE Čierny Váh 30 m³/s. Lopatky oběžného kola jsou napevno, není tedy možnost jejich natáčení. K regulaci ovšem dochází pomocí rozváděcích lopatek, které jsou naklápěcí a ovlivňují výkon v rozsahu 50% až 100%. [5]



Obr. 6 a) Vertikální Francisova turbína s obtokem na spirále pro velkou VE
b) Malá horizontální Francisova turbína pro MVE
c) Vysokotlaká čerpadlová Francisova turbína pro PVE

4.2.2 Historické uspořádání Francisovy vertikální turbíny

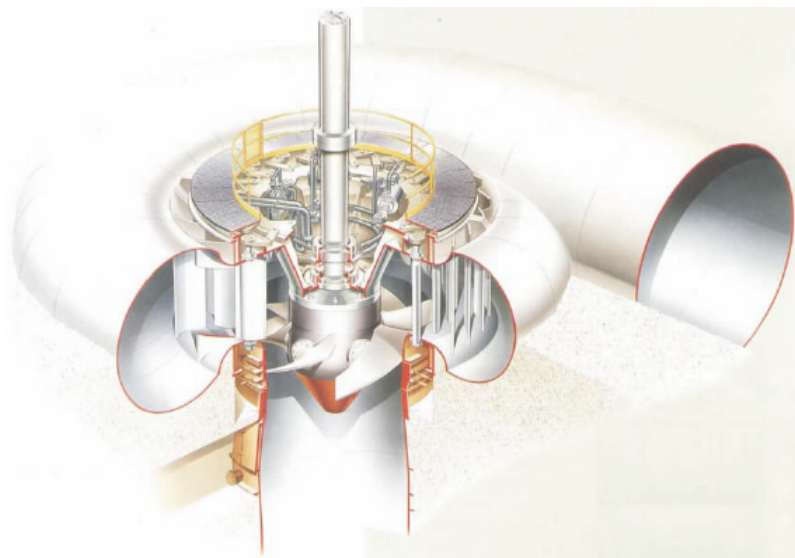
Vlastní těleso turbíny, umístěné pod vodou, leží na dně kašny. V tělese turbíny jsou zabudovány čepy, na kterých jsou připevněny rozváděcí lopatky. Pomocí otáčení regulačního kruhu, usazeného po obvodě tělesa turbíny, se tyto rozváděcí lopatky ovládají. Tento regulační kruh spojuje hřídel s ručním regulačním sloupkem nebo automatickým regulátorem. Za oběžným kolem se nachází savka a z ní ústí voda do vývařiště. Oběžné kolo je zavěšeno na hřídeli a krouticí moment přenáší pero nebo klín. Ve víku nad oběžným kolem je umístěno vodící ložisko, které zamezuje pohybu hřídele mimo osu. Ve stojanu ložiskového tělesa s axiálním ložiskem je zavěšena hřídel. Krouticí moment hlavního hřídele turbíny přenáší zvonové kolo na kuželový pastorek výstupního hřídele s naklínovanou řemenicí, která je pomocí řemene spojena s generátorem. [14]



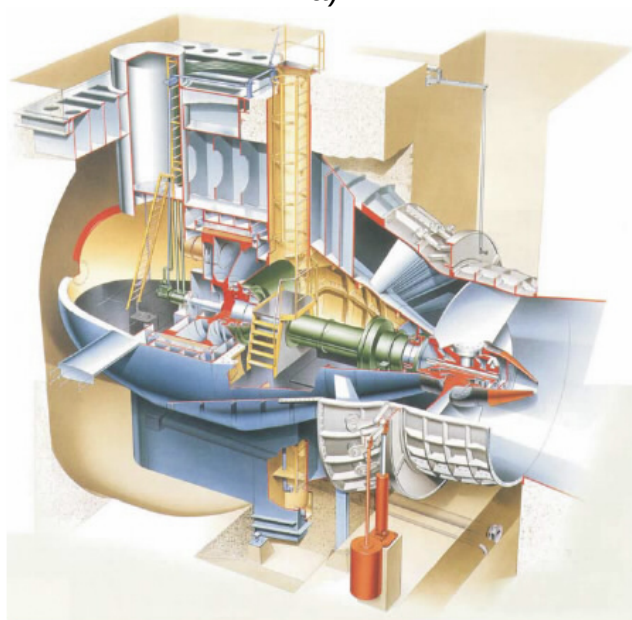
Obr. 7 Historické uspořádání Francisovy vertikální turbíny

4.2.3 Kaplanova turbína

Je přetlaková axiální turbína, využívaná pro menší spády (do 80 m) a vyšší průtoky. Příkladem použití Kaplanovy turbíny je VE Orlík, která byla konstruována na spád 70,5 m a průtok 300 m³/s nebo VE Gabčíkovo s průtokem 630 m³/s. K regulaci výkonu dochází dvěma způsoby. Na rozdíl od Francisovy turbíny jsou lopatky oběžného kola naklápěcí. To je první způsob regulace a druhý zůstává stejný, možnost natáčení lopatek rozváděcího kola. Kaplanova turbína se vyrábí s počtem 3 až 10-ti lopatek oběžného kola a to v závislosti na různých parametrech např. průtoku, spádu, provozních otáčkách stroje a dalších. [5]



a)



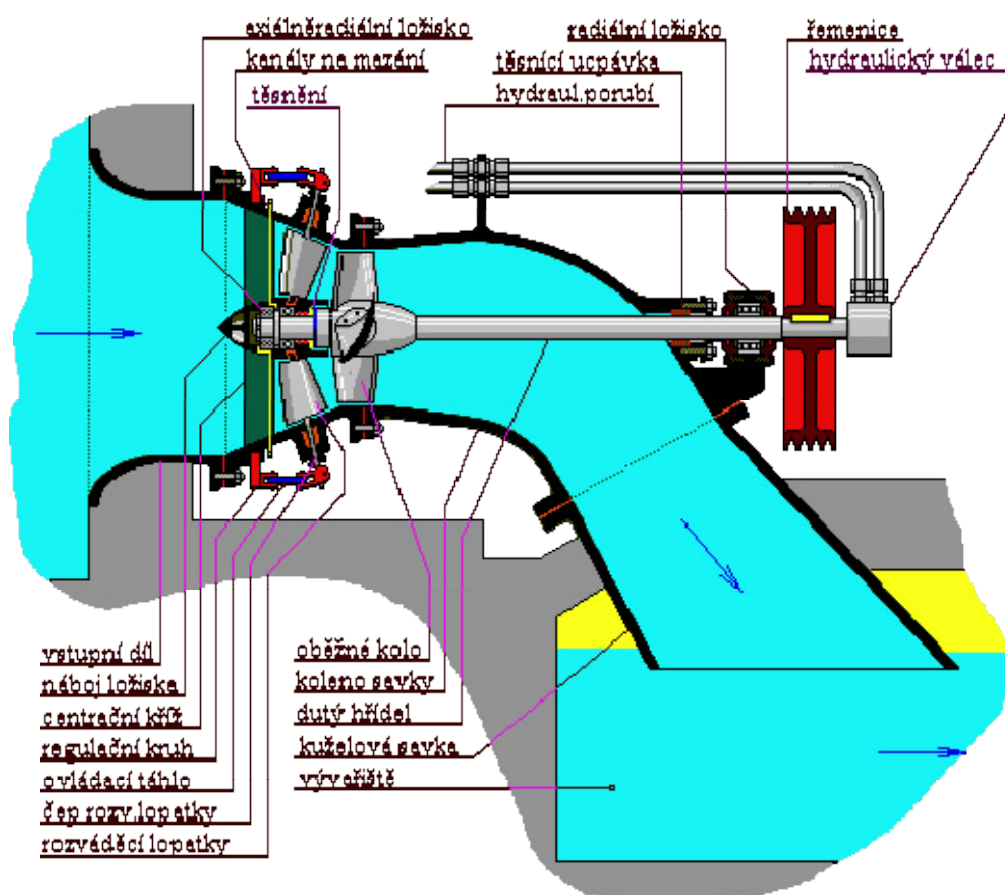
b)

Obr. 8 a) Vertikální Kaplanova turbína s ocelovou spirálou
b) Přímoproudá Kaplanova turbína s obtékaným generátorem

4.2.4 Historické uspořádání Kaplanovy turbíny

Na začátku, kdy voda vtéká do přechodového kusu je umístěn centrační kříž. Ten drží náboj, ve kterém je umístěno ložisko, hřídel, čepy lopatek apod. Centrační kříž má čtyři i více ramen kapkovitého tvaru pro co nejmenší odpor proudící vody. Dále jsou umístěny naklápěcí rozváděcí lopatky, které jsou ovládány pomocí regulačního kruhu, umístěného po obvodu tělesa turbíny.

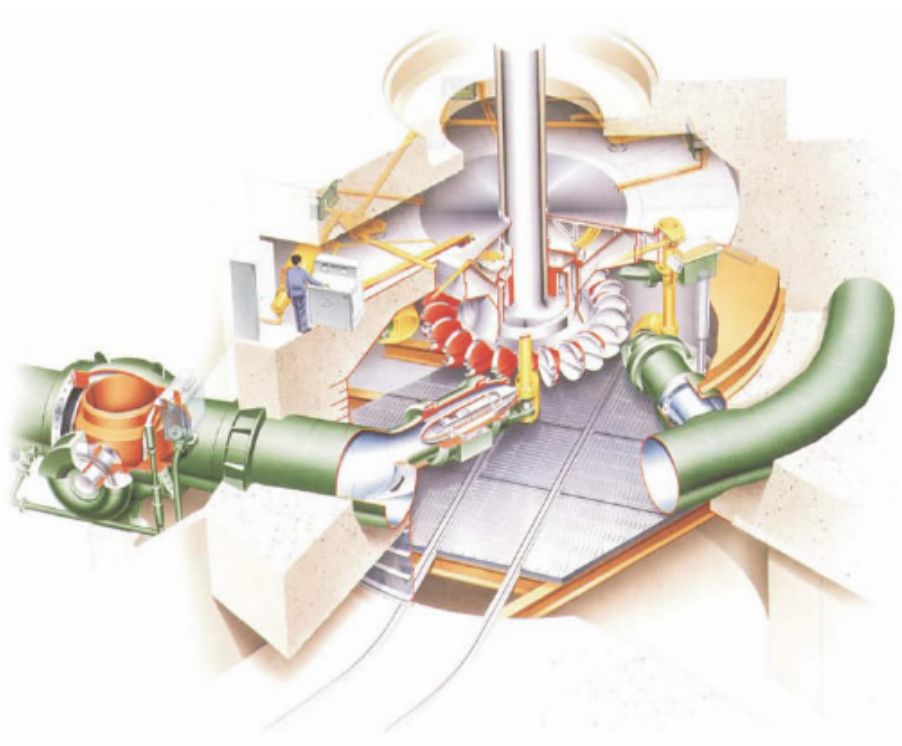
V prostoru mezi lopatkami rozváděcího a oběžného kola se proudová vlákna spojí, sjednotí si směr a jednotně vstupují na lopatky oběžného kola. U Kaplanových turbín mají oběžná kola dutý náboj, ve kterém se nachází tzv. křížová hlava. Ta slouží k synchronnímu natáčení lopatek pomocí táhel. Za oběžným kolem vede hřídel, která prochází prostorem savky do strojovny. Zde je masivní radiální ložisko a řemenový převod, spojující hřídel s generátorem a hydraulický válec s potrubím pro rozvádění oleje. [14]



Obr. 9 Historické uspořádání Kaplanovy turbíny

4.2.5 Peltonova turbína

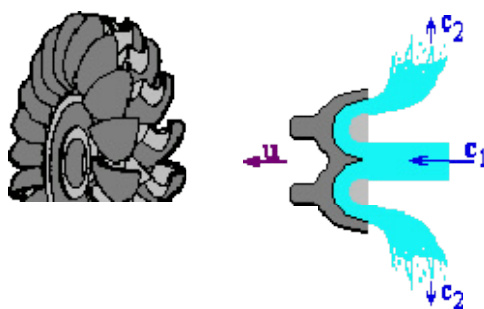
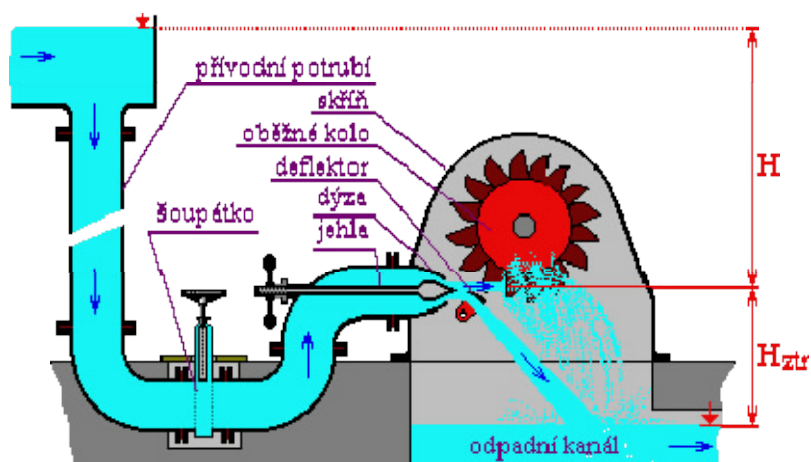
Rovnotlaká tangenciální turbína, která se používá pro vysoké spády až do 1200 m a menší průtoky. Regulační členy jsou dva. V první řadě je to regulační jehla, která se přímočarým pohybem vysouvá nebo zasouvá a tím tak ovlivňuje průtok vody dýzou. Druhý způsob regulace je defektor, který zároveň slouží jako bezpečnostní prvek pro rychlý odklon vodního paprsku v případě odlehčení soustrojí při odstavení ze sítě. Pro zvýšení otáček slouží možnost využití uspořádání až s 6-ti dýzami. Také se provádí konstrukční provedení s dvěma oběžnými koly na jednom hřídeli. To se využívá převážně u horizontálního uspořádání, které se konstruuje s maximálním počtem dvou dýz. [5]



Obr. 10 Pěti-dýzová vertikální Peltonova turbína pro velkou VE

4.2.6 Historické uspořádání Peltonovy turbíny

Voda přitéká k turbíně kruhovým potrubím, které končí jednou nebo několika dýzami. Dýza je zařízení kruhového průřezu, usměrňující proud vody tak, že dopadá přesně do míst lžícovitých lopatek oběžného kola. Jako regulační člen zde působí jehla, která svým pohybem směrem k dýze nebo od ní, ovlivňuje průtok vody. Uprostřed lopatek vede břit, rozdělující proud vody na dvě poloviny. Ve chvíli kontaktu vody s lopatkou dochází k předávání energie a pak ji po vnější straně lopatky voda opouští. Voda padá do odpadního kanálu pod turbínou. Uzavírací ventil (šoupátko) je zde pro nutné uzavření přívodu vody před dýzou, např. při poruše nebo údržbě. [14]



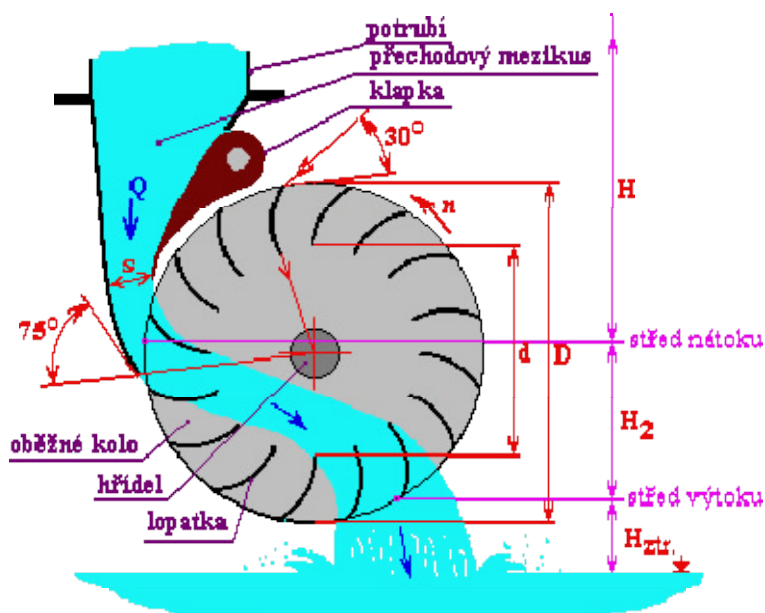
Obr. 11 Historické uspořádání Peltonovy turbíny

4.2.7 Bánkiho turbína

K turbíně přitéká voda potrubím kruhového průřezu, které se mění v potrubí obdélníkové. Na konci je umístěna klapka, regulující průtok. Hned za klapkou oběžné kolo, které má po obvodu hustě uspořádané dlouhé lopatky. Ty jsou směřovány tak, aby voda, která z nich vytéká, směřovala ke středu oběžného kola, tedy k hřídeli. Touto změnou směru vody, zapříčiněno tvarem lopatek se předává asi 79% z celkového výkonu turbíny. Vytékající voda z lopatek díky pohybu oběžného kola nemíří na hřídel, ale protéká zavzdušněným prostorem oběžného kola a dopadá na protější straně oběžného kola na vnitřní stranu lopatek, kde opět díky tvaru lopatek mění směr a dodává tak turbíně zbylých 21% celkového výkonu. Z lopatek volně voda vytéká pod oběžné kolo.

Bánkiho turbína má široké využití hlavně na malých tocích, o průměru 5 až 10 krát menší než je spád. Nevýhodou je veličina $H_{ztr.}$, což je ztracený spád. Tento problém lze řešit savkou. Nevhodná je pro toky, kde může docházet k vzestupu hladiny. [14]

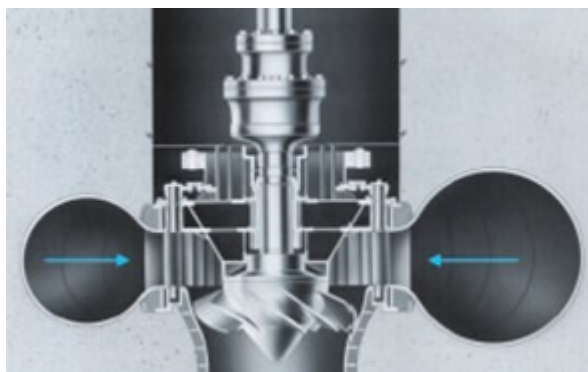
Schéma uspořádání Bánkiho turbíny:



Obr. 12 Schéma uspořádání Bánkiho turbíny

4.2.8 Deriázova turbína

Přetlaková diagonální turbína, která se používá pro spády kolem 100 m. Výkon je regulován dvěma způsoby. Natáčením rozváděcích lopatek, přivádějící proud vody na lopatky oběžného kola a zároveň vytváří vírové proudění kolem osy rotace. Právě toto proudění je převáděno pomocí oběžných lopatek na mechanickou energii a následně na energii elektrickou. Deriázova turbína se provádí také v reverzním řešení, což umožňuje čerpadlový i turbínový provoz. [5], [11]



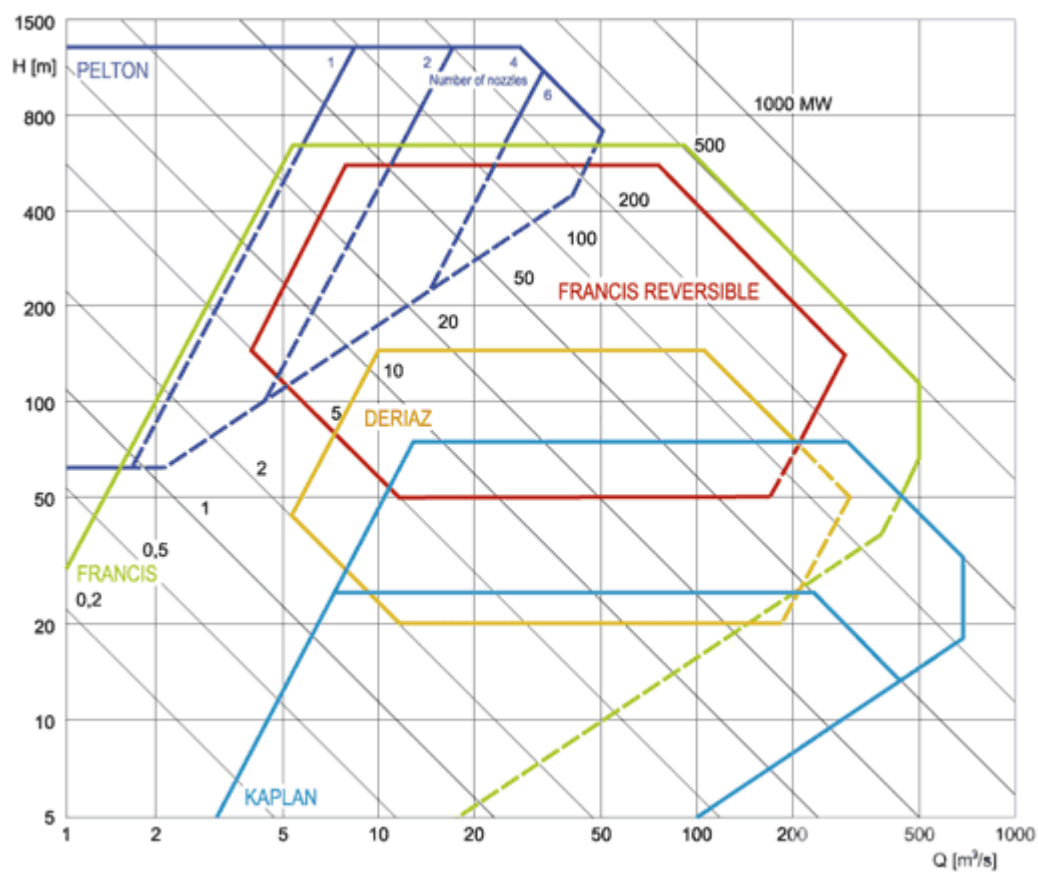
Obr. 13 Schéma Deriázovy turbíny

4.2.9 Vírová turbína

Je koncepcí odboru fluidního inženýrství Viktora Kaplana, Energetického ústavu na FSI VUT v Brně, konstruovanou pro velmi nízké spády od 1 až 3 m a průtoky asi do $4\text{m}^3/\text{s}$. Jedná se o vrtulovou turbínu s dvoulopátkovým oběžným kolem. Největší výhodou této turbíny jsou nízké pořizovací náklady, což je dáno její konstrukcí. Na rozdíl od Kaplanovy nepotřebuje lopátkový rozvaděč, který přivádí s určitou obvodovou rychlostí vodu na oběžné kolo. Vírová turbína pracuje na opačném principu. Voda vstupuje na lopatky ve směru osy rotace a vystupuje proti směru osy rotace. Testy, které proběhly na spádu 2,5 m, dopadly překvapivě dobře s dosaženou účinností 86 % a tato turbína se již využívá. [12]



Obr. 14 Vírová turbína



Graf 2 Rozdělení použitelnosti turbín v závislosti spádu na průtoku

5 Výpočet při návrhu hydraulického stroje

Před výrobou hydraulického stroje (turbíny) se vytvoří její zmenšený model a ten se zkouší ve zkušebních podmínkách. Tato turbína je označovaná jako modelová a následně se na principu hydraulické podobnosti přepočítávají její hodnoty na výsledné veličiny konečné turbíny (prototypu).

Vztah hydraulické podobnosti:

$$\frac{n}{n_M} = \frac{D_M}{D} \cdot \left(\frac{H}{H_M} \right)^{0,5}$$

Výpočet otáček

Vychází z afinních vztahů:

$$\frac{n}{n_M} = \frac{D_M}{D} \cdot \left(\frac{H}{H_M} \right)^{0,5}$$

Jestliže chceme znát jednotkové otáčky, dosadíme za hodnoty spádu a průměru 1 m a tím nám vznikne vztah:

$$n_J = \frac{n_M D_M}{H_M^{0,5}}$$

Výpočet průtoku

Vychází z afinních vztahů:

$$\frac{Q}{Q_M} = \left(\frac{D}{D_M} \right)^2 \cdot \left(\frac{H}{H_M} \right)^{0,5}$$

Jestliže chceme znát jednotkový průtok, dosadíme za hodnoty spádu a průměru 1 m a tím nám vznikne vztah:

$$Q_J = \frac{Q_M}{D_M^2 H_M^{0,5}}$$

Výpočet průtoku

Vychází z afinních vztahů:

$$\frac{H}{H_M} = \frac{(n \cdot D)^2}{(n_M \cdot D_M)^2}$$

Jestliže chceme znát jednotkový spád, dosadíme za hodnoty otáček a průměru jednotky a tím nám vznikne vztah:

$$H_J = \frac{H_M}{(n_M \cdot D_M)^2} \quad [13]$$

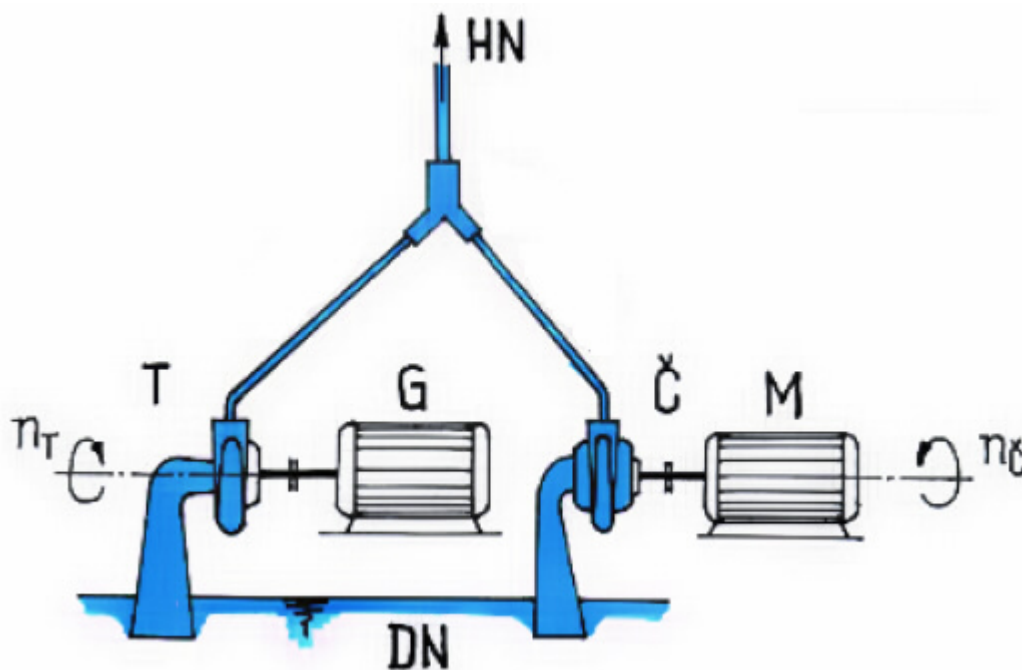
6 Funkce přečerpávací vodní elektrárny

Je velmi málo způsobů, jak skladovat elektrickou energii. Jeden z nich může být PVE a to ve formě gravitační potenciální energie vody. Zapotřebí jsou dvě vodní nádrže, horní a dolní, umístěné v různé nadmořské výšce. Voda v horní nádrži představuje potenciální energii. Tyto nádrže jsou propojeny potrubím, kterým protéká voda z horní nádrže do dolní a naopak. Při vypouštění horní nádrže se voda přivádí potrubím na turbínu, točící se vlivem působení mechanické energie pohybu vody. Turbína je spojena s generátorem a ten na principu elektromagnetické indukce mění rotační pohyb v elektrickou energii, která se přes vysokonapěťovou rozvodnu dodává do sítě.

7 Strojní uspořádání PVE

7.1 Čtyř strojové uspořádání:

Toto uspořádání se skládá z čerpadla (Č), generátoru (G), turbíny (T) a motoru (M). Zvlášť je spojen motor s (Č) a zvlášť (G) s (T). Obě zařízení fungují nezávisle na sobě. To znamená že (Č) i (G) mohou pracovat v optimálních hodnotách svých charakteristik s nejvyšší účinností. Stejnou výhodou je nezávislý provoz (G) a (M), kdy oba mohou mít různé otáčky. Tento způsob strojního zařízení je náročný na realizaci, kdy je potřeba velká plocha pro více zařízení, tudíž i velké vstupní náklady. I proto se toto uspořádání moc nepoužívá. [13]



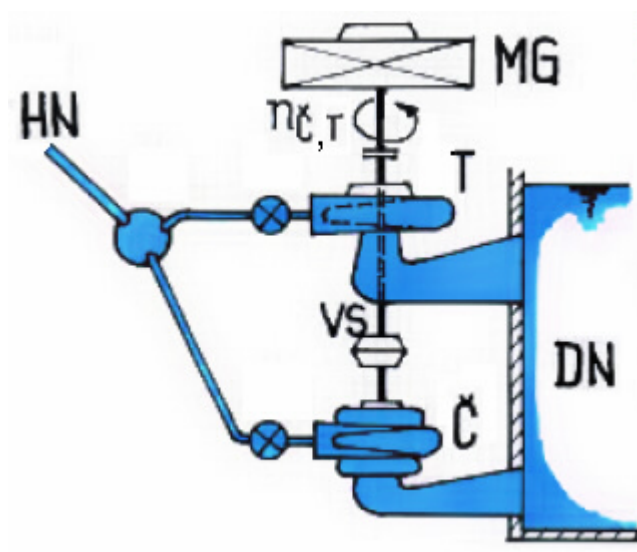
M – motor, G – generátor, T – turbína, Č – čerpadlo, HN – horní nádrž, DN – dolní nádrž, $\eta_{\text{Č}}$ – otáčky čerpadla, η_T – otáčky turbíny

Obr. 15 Schéma čtyř strojového uspořádání

7.2 Tří strojové uspořádání:

Cílem je dosáhnout co nejmenších rozměrů soustrojí a tím i nákladů na stavbu, zároveň při zachování účinnosti a flexibility v provozu. Kritéria splňuje tří strojové uspořádání. Skládá se z motorgenerátoru (MG), (T) a (Č). Obrázek 16 ukazuje schéma tří strojového uspořádání s vertikální hřídelí. MG je spojen jednou hřídelí s T a přes výsuvnou spojku s Č. Spojka slouží k odpojení Č při T provozu. V (Č) provozu pracuje (T) i (Č) zároveň. Aby se zamezilo ztrátám, zavzdušní se prostor savky a turbína jede "naprázdno". Otáčky MG musí být stejné a musí mít stejný směr otáčení. To znamená, že spirála (T) je pravotočivá a spirála (Č) levotočivá nebo naopak. Tak je zajištěna správná funkce (Č) i (T) spojené jednou hřídelí od (MG).

Příklad takového schématu uspořádání je PVE Čierny Váh. Z hlediska instalovaného výkonu je to největší PVE na Slovensku, umístěná v Nízkých Tatrách. Stavba začala roku 1974 a ukončena byla v roce 1983. Horní a dolní nádrž spojují tři tlakové přivaděče, z nichž každý má délku 1200 m a překonává převýšení 430 m. Každý z těchto přivaděčů slouží pro dvě turbosoustrojí. V srdci elektrárny je umístěno šest Francisových turbín s výkonem 6 x 122,4 MW a jedna Kaplanova turbína o výkonu 0,76 MW. Uspořádání je tří strojové, přičemž v horní části soustrojí se nachází turbogenerátor, pod ním (T) a nejnižší (Č). [13] , [10]

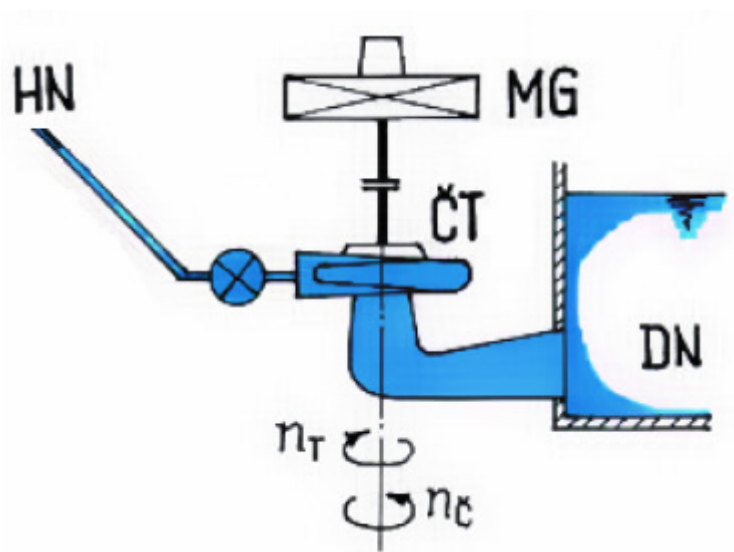


MG – motorgenerátor, T – turbína, Č – čerpadlo, HN – horní nádrž, DN – dolní nádrž, $\eta_{\text{Č,T}}$ – otáčky čerpadla i turbíny, VS – výsuvná spojka

Obr. 16 Schéma tří strojového uspořádání

7.3 Dvou strojové uspořádání:

Toto je zatím nejmodernějším a nejekonomičtějším strojním uspořádáním PVE. Skládá se z MG a čerpadlové turbíny (ČT). Reverzní turbíně se také říká ČT. Funguje v jednom smyslu otáčení jako čerpadlo a v opačném jako turbína. K tomu musí být uzpůsoben také MG, což představuje složitější konstrukci oproti MG při tří strojovém uspořádání. Nevýhodou je, že zde není možné dosáhnout ideálních charakteristik zároveň v Č provozu a T provozu. Otáčky jsou v obou provozech stejné, pouze mají opačný smysl otáčení. Výhodou tohoto uspořádání oproti ostatním jsou menší nároky na prostor, tudíž na celkovou velikost stavby, což znamená nižší vstupní náklady. Příkladem dvou strojového uspořádání je PVE Dlouhé stráně (viz níže). [13]



Obr. 17 Schéma dvou strojového uspořádání

MG – motorgenerátor, ČT – čerpadlová turbína, HN – horní nádrž, DN – dolní nádrž, $n_{\text{Č}}$ – otáčky čerpadla, n_{T} – otáčky turbíny,

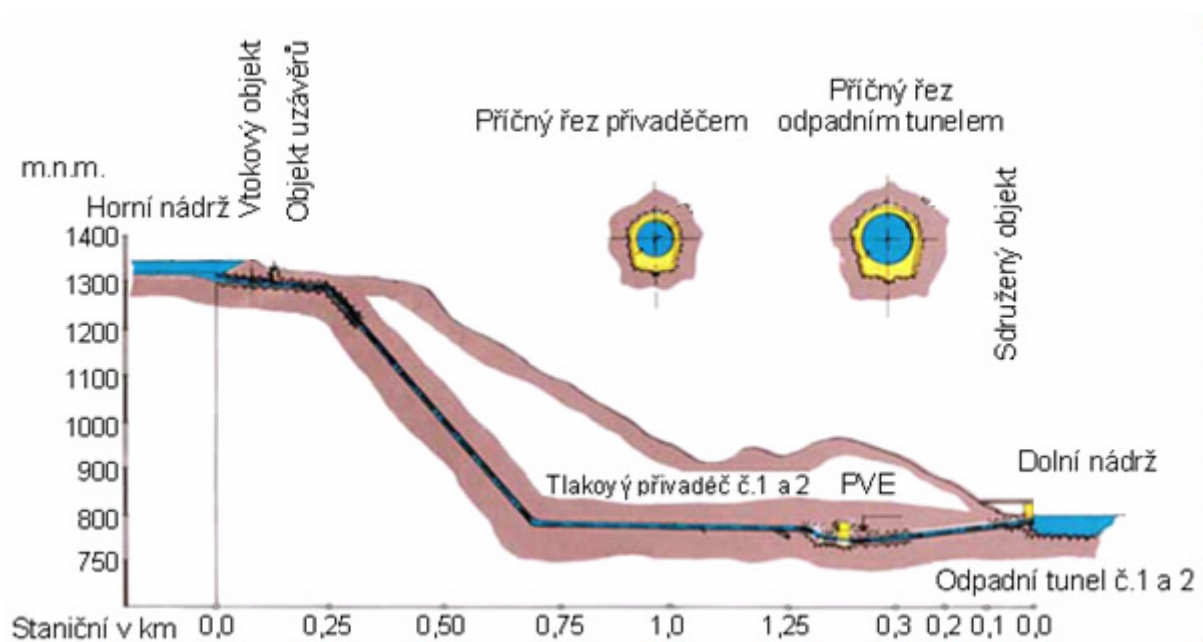
8 Přečerpávací vodní elektrárna Dlouhé stráně

Pro uvedení konkrétního případu PVE je vhodná elektrárna Dlouhé stráně, umístěná na Moravské straně Hrubého Jeseníku. Řeku Divokou Desnou přehrazuje 56 metrů vysoká hráz, která vytváří dolní nádrž. Nachází se v nadmořské výšce asi 820 m.n.m. o objemu 3 405 000 m³, přičemž zaplavená plocha činí 16,3 ha. Horní nádrž je vyhloubena na vrcholu Dlouhé stráně v nadmořské výšce 1350 m.n.m. o objemu 2 719 750 m³ a ploše 15,4 ha. Jedná se o obvodovou sypanou hráz, utěsněnou přírodním asfaltem z Albánie. Povolený průsak je 10 l/s. Tento parametr byl vlivem tvrdých přírodních podmínek překročen až na 30 l/s a celá nádrž musela být v roce 2007 nově vyasfaltována.



Obr. 18 Horní a dolní nádrž PVE Dlouhé stráně

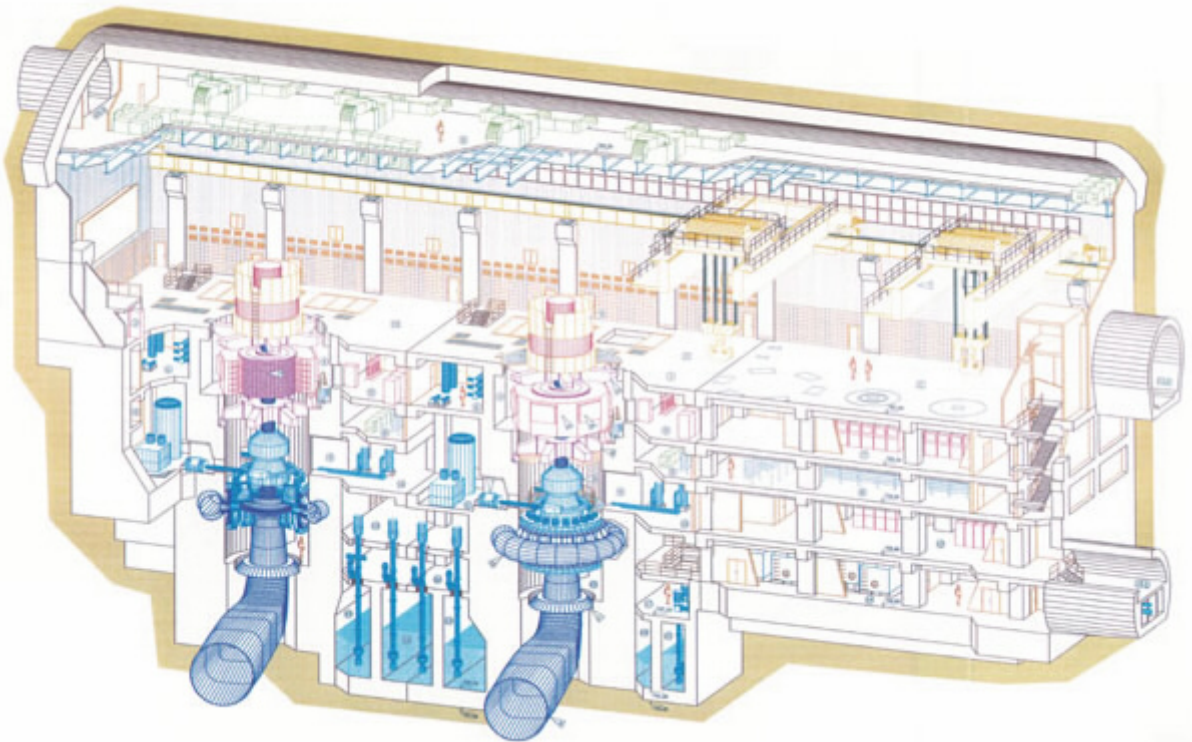
Horní nádrž je propojena s turbínami dvěma pancířovými přivaděči zalitými betonem o průměru 3,6 m, délce 1547 m a 1499 m. a tloušťce od 12 mm do 54 mm v závislosti na poloze. Od turbín vedou s mírným stoupáním odpadní tunely o průměru 5,2 m a délce 354 m a 390 m.



Obr. 19 Průřez PVE Dlouhé stráně v závislosti na nadmořské výšce

Odpadní tunely končí ve sdruženém objektu, zařízení umístěné v dolní nádrži, které umožňuje při (T) provozu výtok vody do dolní nádrže a naopak při (Č) provozu se tudy voda nasává. V horní nádrži je pro tyto účely vtokový objekt, za kterým jsou umístěny rychlouzávěry, pro případ havárie, oprav apod. Další uzávěry jsou před spirálami (T). Jsou to provozní kulové uzávěry, které se zavírají při nečinnosti (T). Otevírání a uzavírání se provádí pomocí dvou hydromotorů a trvá 60s, tlak působící na stěny uzávěru odpovídá necelým 600 m vodního sloupce.

Za nejdůležitější část elektrárny se považuje strojní zařízení, které je umístěno 250 m pod zemí v kaverně o rozměrech 87,5 x 25,5 x 50 m. V její horní části jsou umístěny dva portálové jeřáby, které slouží při manipulaci se strojním zařízením. Pro tyto účely jsou zde odkládací plochy s vyšší nosností než má podlaha. Jako optický klam jsou u stropu umístěna slepá okna, která vytváří dojem denního světla.



Obr. 20 Průřez podzemní kavernou

Strojní zařízení tvoří dvě Francoisovy reversní turbíny o průměru 4,5 m. Ty jsou umístěny na vertikální hřídeli o průměru 1100 mm a délce 24 m, společně s motorgenerátorem a rozběhovým pony motorem.

V turbínovém provozu při otáčkách 428 ot/min je maximálním výkon 325 MW jedné turbíny. Dohromady tvoří výkon 650 MW, největší instalovaný výkon v České republice. Přivaděčem proteče $68,5 \text{ m}^3/\text{s}$, po maximální provozní čas 6,5 hodin, kdy za tuto dobu klesne hladina v horní nádrži o 22 m.

Při najíždění na čerpadlový provoz se nejprve zavzdušní prostor turbíny a potom zmíněný pony motor, asynchronní motor o příkonu 25 MW, roztočí soustrojí na provozní otáčky. Po dosažení těchto otáček se přifází synchronní motorgenerátor, který má v (Č) provozu příkon 312 MW. Proces čerpání trvá asi 8,5 hodin, při průtoku $54 \text{ m}^3/\text{s}$.

Jednou z výhod PVE je velmi rychlé najetí do (T) provozu. V případě elektrárny Dlouhé stráně se uvádí doba najetí na plný výkon v (T) režimu 100 s. Dnes již tomu tak není, jelikož došlo k modernizaci centrály v Praze, odkud je celý provoz řízen, a tím se doba najetí prodloužila na 120 s. Časy přechodu z čerpadlového na turbínový provoz činí 150 s a čas přechodu z klidu do čerpadlového provozu je 400 s.

V podzemí se nachází ještě jedna kaverna o rozměrech $115 \times 16 \times 21,7 \text{ m}$, ve které jsou umístěny dva trojfázové transformátory a další zařízení. Z generátoru jde napětí 22 kV a to se mění v transformátorech na napětí 400 kV, které je vyvedené na zapouzdřené vývodové pole, umístěné u paty hráze dolní nádrže. Odtud pokračuje napětí 400kV venkovním vedením do rozvodny v Krasíkově, vzdálené 59 km.

Za provozu se muselo dobudovat na 8,5 km kabelových tunelů s výtahem, který slouží k přepravě na horní nádrž převážně v zimních měsících.



Obr. 21 Celkové schéma PVE Dlouhá stráně

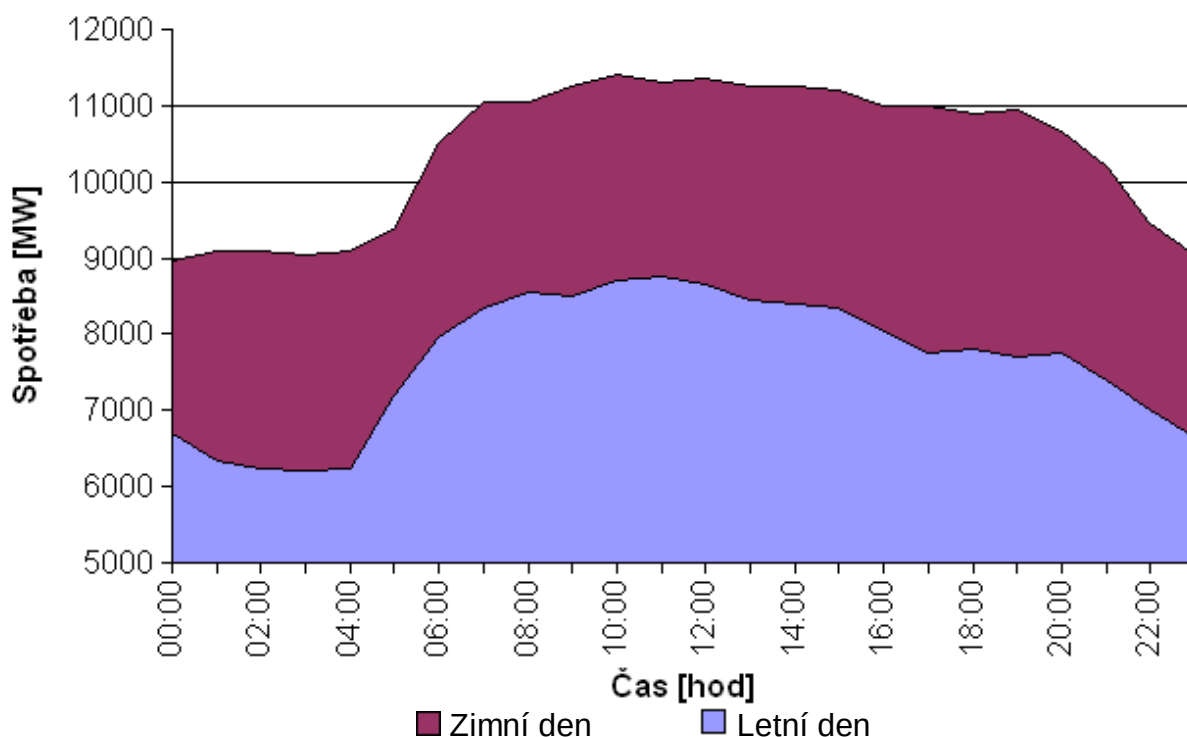
PVE plní tři základní funkce v elektrizační soustavě. Statickou, dynamickou a kompenzační. Statickou funkcí se rozumí krytí špičkové části DDZ a provalů (viz níže). Dynamická funkce má několik významů. Především je to schopnost rychlého najetí, znamenající téměř okamžitou dodávku EE do ES. S tím je související funkce zpomalení růstu spotřeby EE ve špičkách a naopak zpomalení snižování spotřeby v provalech. Dále regulace frekvence sítě, která se pohybuje na 50 Hz. Kompenzační složkou se rozumí udržování daného napětí v síti, které je ovlivněno jalovým výkonem. Ten se v PVE vyrábí v odlehčeném provozu turbín, tzn. bez zatížení oběžného kola.

9 Diagram denního zatížení

V závislosti na čase je spotřeba elektrické energie různá. Tento průběh vyjadřuje diagram zatížení. S ohledem na časový úsek rozdělujeme tyto diagramy na roční diagramy zatížení, kde jsou zohledněny hlavně přírodní cykly, potom týdenní diagramy, ty jsou ovlivňovány pracovními a nepracovními dny a nakonec denní diagramy zatížení (DDZ), charakterizující střídání dne a noci.

DDZ smíšené elektrizační soustavy (ES) zaznamenává průběh výroby a spotřeby (EE). Smíšená (ES) obsahuje výrobu (EE) ze všech významných zdrojů, jako jsou jaderné elektrárny, tepelné elektrárny a vodní elektrárny. X-ová osa DDZ představuje čas v intervalu jednoho dne (24 hodin) a na y-ové ose je celkový výkon dodávaný do sítě. Plocha pod křivkou v DDZ (graf 3) představuje vyrobenou energii v daném čase. Jak je patrné z DDZ, spotřeba během dne kolísá. To je dáno potřebou zákazníka, což jsou všichni spotřebitelé (EE), v dané hodině každého dne. Ovšem nejen v průběhu dne bývá spotřeba různá, ale i v průběhu týdne, kdy je různý odběr (EE) v pracovní a nepracovní dny. [8]

Průběh DDZ ve dvou ročních obdobích



Graf 3 Denní diagram zatížení

Spotřeba je také ovlivněna ročním obdobím, jak vidíme na grafu 3, kdy je různá v zimních a letních dnech. Průběh grafu je velmi podobný, protože se jedná o stejné dny a to středy 14.01.2009 a 16.07.2008. Tyto údaje zpracovává firma České energetické přenosové soustavy (ČEPS), na jejichž internetových stránkách je možné sledovat i aktuální průběh zatížení ES. [9]

DDZ je rozdělen na čtyři základní části: - základní
 - pološpičková
 - špičková
 - provaly

V těchto částech kryjí spotřebu následující zdroje energie:

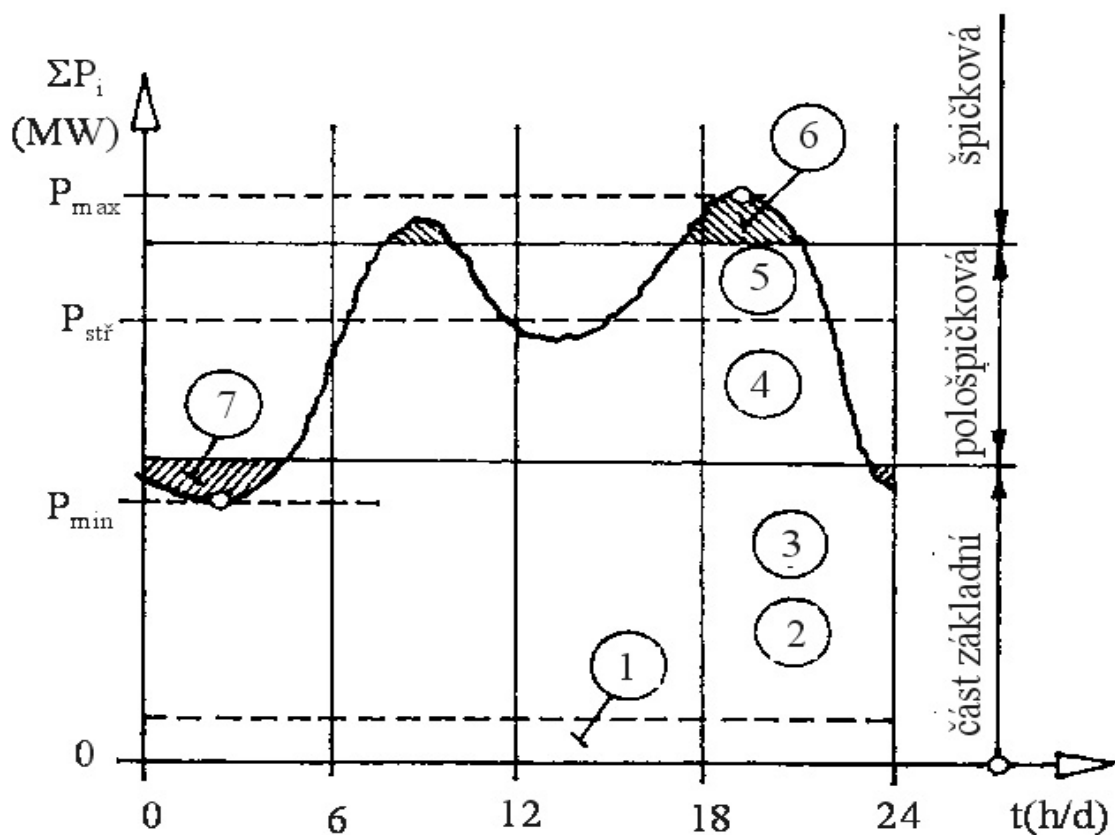
Základní část: 1) Průtočné vodní elektrárny
 2) Tepelné elektrárny
 3) Jaderné elektrárny

Pološpičková část: 4) Částečné zvýšení výkonu v tepelných a vodních elektrárnách
 nebo najetí dalších soustrojí v rezervě

Špičková část: 5) Špičkové vodní elektrárny
 6) Turbínový provoz PVE

Provaly: 7) Spotřeba energie způsobená čerpadlovým provozem PVE

Právě provaly jsou žádoucí, kdy v době "nadbytku" elektrické energie (v noci), spotřebovává levnější elektrickou energii (Č) provoz PVE. A naopak v době nedostatku (EE) (ve špičkách), nastupuje (T) provoz PVE, který téměř okamžitě dodává do elektrizační soustavy elektrickou energii. [9]



Graf 4 Rozdělení diagramu denního zatížení

10 Závěr

Cílem práce bylo nastínění funkce přečerpávacích vodních elektráren, k čemu slouží, proč jsou důležité a jak jsou spjaté s průběhem spotřeby elektrické energie v elektrizační soustavě. Tyto parametry jsou zaznamenávány v denních diagramech zatížení, jejichž význam je velmi důležitý, protože mimo jiné ovlivňují cenu elektrické energie. Dále je zde souhrn základních strojů a zařízení, která jsou zapotřebí pro funkci PVE a VE. Ta se dělí podle různých parametrů, které se analyzují a následně se volí nejvhodnější zařízení pro danou elektrárnu. Nejzajímavějším a nejpůsobivějším tématem byla PVE Dlouhé stráně, kterou jsem navštívil a mohl jsem tak konfrontovat své znalosti s realitou a doplnit si tak představu o velikosti a honosnosti těchto staveb.

Myslím, že využívání ekologických zdrojů, jako je vodní energie bude stále důležitější složkou pokrytí spotřeby elektrické energie.

11 Seznam použité literatury

- [1] < <http://www.wikipedia.org> > [cit. 2009 - 15 - 03]
- [2] <<http://energie.tzb-info.cz/t.py?t=2&i=3645&h=279&pl=49>>
[cit. 2009 - 15 - 03]
- [3] <<http://www.elektrarny.xf.cz/vyuziti.pdf>> [cit. 2009 - 15 - 03]
- [4] <<http://www.chmi.cz/hydro/opzv/bilance/bilance.htm>> [cit. 2009 - 20 - 03]
- [5] <http://hydraulika.fsv.cvut.cz/predmety/VIN/ke_stazeni/Jezy.pdf>
[cit. 2009 - 20 - 03]
- [6] ŠOB, F. Hydraulické stroje. c2002, datum poslední revize 2005-06-12.
http://khzs.fme.vutbr.cz/~sob/skripta-hydraulicke_stroje/hs.html
- [7] <<http://www.cez.cz/cs/vzdelavani/publikace.html>>[cit. 2009 - 05 - 04]
- [8] ŠOB,F.Projektování a provoz tekutinových zařízení.Část1. Projektování
vodních elektráren, Kapitola 1.
- [9] <<http://www.ceps.cz>>[cit. 2009 - 05 - 04]
- [10] <http://www.seas.sk/_cms/_files/813/t030801.htm>>[cit. 2009 - 15 - 04]
- [11] < <http://www.mujweb.cz/www/felka6/zei/elenerg.doc>>[cit. 2009 - 15 - 04]
- [12] <<http://www.inovace.cz/for-business/inovace-v-oborech/strojirenstvi/clanek/virova-turbina/>>[cit. 2009 - 10 - 05]
- [13] ŠOB,F.Projektování a provoz tekutinových zařízení.Část1. Projektování
vodních elektráren, Kapitola 2.
- [14] <<http://mve.energetika.cz>>[cit. 2009 - 20 - 04]

12 Seznam použitých zkratk a symbolů

$n [s^{-1}]$	- otáčky prototypu turbíny
$n_M [s^{-1}]$	- otáčky modelu turbíny
$n_J [s^{-1}]$	- jednotkové otáčky prototypu turbíny
$Q [m^3/s]$	- průtok prototypu turbíny
$Q_M [m^3/s]$	- průtok modelu turbíny
$Q_J [m^3/s]$	- jednotkový průtok prototypu turbíny
$H [m]$	- spád prototypu turbíny
$H_M [m]$	- spád modelu turbíny
$H_J [m]$	- jednotkový spád prototypu turbíny
PVE	- přečerpávací vodní elektrárna
VE	- vodní elektrárna
EE	- elektrická energie
MVE	- malá vodní elektrárna
ES	- elektrizační soustava
ČT	- čerpadlová turbína
T	- turbína
Č	- čerpadlo
G	- generátor
M	- motor
η_C	- otáčky čerpadla
η_T	- otáčky turbíny
HN	- horní nádrž
DN	- dolní nádrž
VS	- výsuvná spojka
DDZ	- denní diagram zatížení
ČEPS	- Česká energetická přenosová soustava