



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
ENERGETICKÝ ÚSTAV**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
ENERGY INSTITUTE

# **PŘESTAVBA MLÝNA NA MALOU VODNÍ ELEKTRÁRNU**

ADAPTATION OF THE WATER MILL

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**LENKA DOBŠÁKOVÁ**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**Ing. MARTIN HUDEC**

BRNO 2010

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Energetický ústav

Akademický rok: 2009/2010

## **ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**

student(ka): Lenka Dobšáková

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

obor: **Strojní inženýrství (2301R016)**

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

### **Přestavba mlýna na malou vodní elektrárnu**

v anglickém jazyce:

### **Adaptation of the water mill**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Stručný výčet užitečných funkcí a strojového vybavení původního mlýna doplnit popisem parametrů hydrodynamického stroje a jeho částí. Je vhodné pro zpracování na existující lokalitě.

Cíle bakalářské práce:

Seznámení se strojovým vybavením vodních elektráren malých výkonů. Základní představa o funkci, údržbě a renovaci malého vodního díla.

Seznam odborné literatury:

Gabriel, P. - Čihák, F. - Kalandra, P.: Malé vodní elektrárny, Praha, 1998.

Melichar, J. - Vojtek, J. - Bláha, J.: Malé vodní turbíny (konstrukce a provoz), Praha, 1998.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Martin Hudec

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2009/2010.

V Brně, dne 27.10.2009

L.S.

---

doc. Ing. Zdeněk Skála, CSc.  
Ředitel ústavu

---

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.  
Děkan fakulty

## **ABSTRAKT**

Tato bakalářská práce se zabývá přestavbou vodního mlýna Cacovice. V první části popisuje historii vodních pohonů a historii Cacovického mlýna. V druhé části se zabývá malými vodními elektrárnami, jejich funkcí a rozdělením. Ve třetí části je popsána technická část malé vodní elektrárny Cacovice a ve čtvrté části je návrh nové přímoproudé Kaplanovy turbíny, která by mohla nahradit stávající turbínu Francisovu.

## **ABSTRACT**

This bachelor's thesis is about adaptation of the water mill Cacovice. The first part is a description of the history of water mills and mill history in Cacovice. The second part deals with small hydroelectric power station, their functions and distribution. The third part describes the technical part of the small hydroelectric power station Cacovice and the fourth part is a proposal for a new Kaplan turbine, which could replace the existing Francis turbine.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Vodní mlýn, vodní elektrárny, vodní turbíny, technické parametry vodní elektrárny.

## **KEYWORDS**

Water mill, hydroelectric power station, hydraulic turbine, technical parameters of the hydroelectric power station.

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

DOBŠÁKOVÁ, L. *Přestavba mlýna na malou vodní elektrárnu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 29 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Martin Hudec.

## ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci *Přestavba vodního mlýna na malou vodní elektrárnu* vypracovala samostatně pod vedením Ing. Martina Hudce a uvedla v seznamu literatury všechny použité literární a odborné zdroje.

V Brně dne 25. května 2010

---

vlastnoruční podpis autora

## **PODĚKOVÁNÍ**

Na tomto místě bych ráda poděkovala Ing. Martinu Hudcovi za odborné vedení mé práce, podmětné připomínky a cenné rady, kterými přispěl k vypracování této bakalářské práce. Ráda bych poděkovala panu Ing. Miroslavu Hynkovi za poskytnutí podkladů potřebných pro vypracování bakalářské práce. Dále bych chtěla poděkovat Ing. Romanu Klasovi, Ph.D za umožnění psát toto téma bakalářské práce.

## OBSAH

<b>1. ÚVOD.....</b>	<b>5</b>
<b>2. HISTORIE.....</b>	<b>5</b>
2.1 Historie vodních pohonů.....	5
2.2 Vodní díla v Brně a okolí.....	8
2.3 Historie Cacovického mlýnu .....	9
<b>3. MALÉ VODNÍ ELEKTRÁRNY .....</b>	<b>10</b>
3.1 Základní pojmy .....	10
3.2 Obecné schéma vodní elektrárny.....	12
3.3 Rozdělení vodních elektráren .....	13
3.4 Rozdělení vodních turbín.....	15
<b>4. TECHNICKÁ SPECIFIKACE VODNÍHO DÍLA.....</b>	<b>19</b>
4.1 Hydrologické poměry .....	19
4.2 Parametry elektrárny.....	20
<b>5. PROJEKČNÍ NÁVRH NOVÉHO USPOŘÁDÁNÍ MALÉ VODNÍ ELEKTRÁRNY CACOVICE .....</b>	<b>21</b>
<b>6. ZÁVĚR .....</b>	<b>25</b>
<b>SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ.....</b>	<b>26</b>
<b>SEZNAM PŘÍLOH .....</b>	<b>27</b>

# 1. Úvod

V České republice stojí většina výroby elektrické energie na tepelných a jaderných elektrárnách. V dnešní době je stále větší snaha o využívání obnovitelných zdrojů, jako je sluneční, větrná a vodní energie a spalování biomasy.

Vodní energie je v historii lidstva nejdéle technicky využívanou formou energie. Využívání vodní energie jako zdroje energie elektrické má v porovnání s jinými využívanými zdroji mnoho výhod. Jde o prakticky nevyčerpatelný zdroj. Navíc výroba neškodí životnímu prostředí. Dalšími výhodami je rychlost náběhu a možnost snadné regulace elektráren. Přečerpávací vodní elektrárny umožňují akumulaci energie a tím snadné krytí proměnné spotřeby elektrické energie v systému, a také díky rychlému náběhu vykrytí náhlé výpadky elektrické sítě.

Díky nízkým investičním a provozním nákladům a díky rychlé návratnosti investovaných prostředků, se vodní energie stává velmi lukrativním zdrojem energie a o její využití mají zájem jak velké firmy, tak i soukromníci.

Je mnoho možností, kde malou vodní elektrárnu vybudovat. Každé takové vodní dílo je originální. Může se vybudovat zcela nová elektrárna a nebo ji lze postavit na již vybudovaných vodních mlýnech, jezích či vodních nádržích.

Cacovická malá vodní elektrárna byla vybudována v místě starého vodního mlýna na začátku 20. století. Byla použita Francisova horizontální turbína, která dnes vyrábí zhruba 302 MWh za rok. V Brně a jeho nejbližším okolí se nachází 4 funkční vodní elektrárny, které dodávají elektrickou energii do elektrické sítě.

## 2. Historie

### 2.1 Historie vodních pohonů

a) **Vodní kolo** je nejstarší a nejjednodušší vodní stroj využívající pohybovou i polohovou energii vodního toku pro vytvoření mechanické energie. Jako mechanický pohon jednoduchých zařízení se začaly používat už ve 2. století př.n.l. Vodní kola poháněla mlýny obilí, drtiče rud, kovárny, pily, apod.

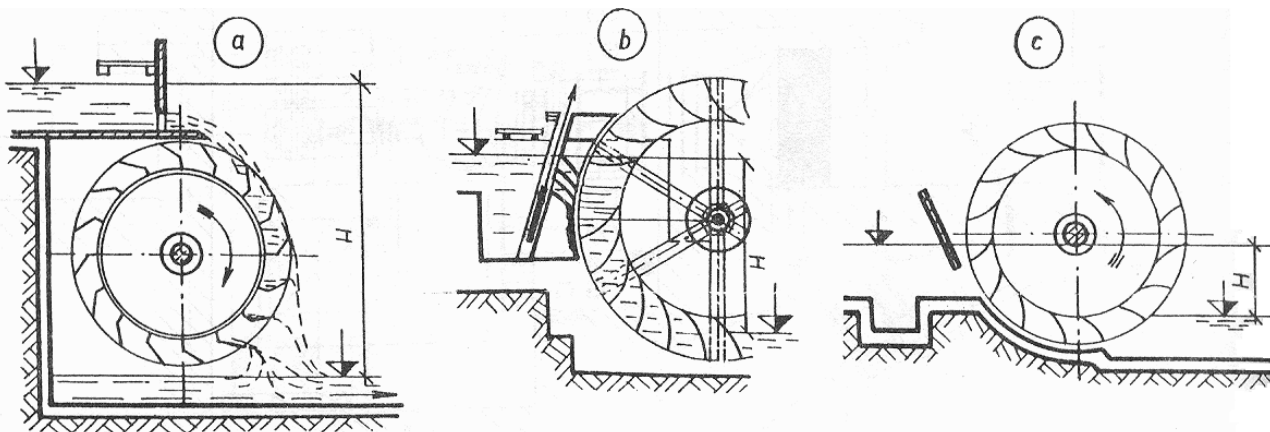
Při dobrém technickém řešení vodních kol, mohou mít rotační motory účinnost  $\eta = 0,6$  až  $0,8$ , což je srovnatelné s účinností moderních turbín. Velkou výhodou vodních kol je to, že dokáží efektivně využít vodní energii na místech s velmi malými užitnými spády, i menšími než  $0,5$  m.

Vodní kola rozdělujeme podle způsobu předávání mechanické energie vody, kterou vodní kola přeměňují na energii rotujícího hřídele na:

- korečková, využívající potenciální energii vody,
- lopatková, využívající kinetickou energii vody.

Vodní kola můžeme také dělit podle toho, jak byl proveden vtok vody na kolo. Jsou to kola se spodním, středním a vrchním nátokem.





Obr. 2.1 Vodní kola se a) spodním nátokem , b) středním nátokem , c) vrchním nátokem

Lopátková vodní kola se používají zejména v místech, kde je velmi malý užitný spád. Dokáží využívat spády i kolem 0,1m, ale bohužel pouze s dvacetiprocentní účinností.

Nejrozšířenějším typem vodního kola je *kolo s vrchním nátokem*. Jsou vhodná na místa, kde je velmi malý průtok, okolo  $0,3$  až  $1 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  a větší spád 3 až 12 metrů. Účinnost většinou bývá kolem 40 až 50 %. Voda se ke kolu přivádí zpravidla dřevěným žlabem se stavidlem. Kolo je v tzv. lednici a pohybuje se nad spodní vodou. Lopatky a postranní věnce tvoří korečky. Průměr kola je téměř stejně velký jako spád a voda na kolo vtéká kousek za jeho vrcholem.

Teoretický tvar lopatek ( korečků ) je na obr. 2. Ideální obvodovou rychlostí pro kolo je  $u = 1,5$  až  $2,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , nejvýhodnější výtoková rychlost z horního koryta je 2,5 násobek obvodové rychlosti kola. Výtoková rychlost udává také hloubku otvoru pod horní hladinou :

$$c = \varphi \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h}$$

kde  $\varphi$  je výtokový součinitel a má hodnotu 0,92. Za čas  $t$  tak uběhne částice ve

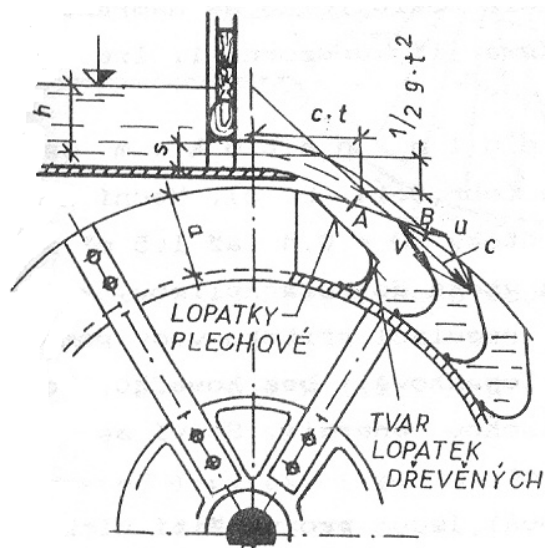
- vodorovném směru dráhu  $x = c \cdot t$
- ve svislém směru dráhu  $y = \frac{1}{2} g \cdot t^2$

Pokud rovnice sloučíme a do rovnice svislé dráhy dosadíme z vodorovné rovnice  $t = x / c$  , bude

$$y = \frac{g}{2 c^2} \cdot x^2$$

, což je rovnice paraboly.

Voda by měla do kola vstupovat bez nárazů na lopatky, tedy bez tříštění a rozstříkávání proudu vody. Začátek lopatky by musel být zakřiven ve směru této relativní rychlosti a celá lopatka by měla mít tvar relativní dráhy vodních částic vzhledem k otáčejícímu se kolu. Takto provedené korečky by byly velice mělké a voda by z nich příliš brzy vytékala., čímž by se ztrácela velká část energie, větší než rozstříkáváním vody nárazem na lopatky. Proto se tvar lopatek relativní dráze jen přibližuje. Rozteč lopatek by měl být o něco větší než délka oblouku A-B, v němž vodní proud protíná obvod kola. Korečky se tak snáze plní, protože z nich může lépe unikat vzduch. Hloubka korečků bývá  $a = 0,25$  až  $0,4 \text{ m}$ ., šířka kola  $b$  musí být v souladu s rovnicí  $Q = \psi \cdot a \cdot b \cdot u$ . Součinitel plnění korečků  $\psi$ , většinou mívá hodnotu  $0,3$  až  $0,25$  , což znamená, že se korečky plní jen do  $1/4$  až  $1/3$  celého mezilopátkového obsahu. Lopatky jsou plechové nebo



Obr. 2.2 Teoretický tvar

lopatky dřevěné. Žlab kterým se voda na kolo přivádí má šířku o 20 – 100 mm menší, než je šířka kola. Kolo i hřídel jsou většinou ze dřeva. Protože je kolo veliké a těžké, je počet otáček kola maximálně 10 za minutu, obvykle jen 5 – 8. Takto nízký počet otáček nejde prakticky využít. Připojením dvojnásobného převodu do rychla lze dosáhnout alespoň 150 otáček za minutu. Převodová kola jsou veliká a obvykle s dřevěnými zuby. Převodová kola i s vodním kolem zabírají mnoho místa a vytvářejí ztráty v účinnosti.

Nejvyšší účinnosti, které lze při ideální konstrukci dosáhnout, je kolem 75%. Největší ztráty snižující účinnost jsou:

- Ztráta na spádu při vstupu vody na kolo (pohybová energie vody se zužitkuje jen zčásti).
- Přestřikování korečků při vstupu vody na kolo.
- Předčasným výtokem vody z korečků.
- Umístěním kola nad spodní vodou.
- Ztráty mechanické v ložiskách a převodem do rychla.

V dnešní době jsou kola nahrazována moderními turbínami a v chodu zůstávají pouze jako historické. Většinou jsou nahrazovány Francisovou turbínou, případně při malém spádu a malém množství vody turbínou Bánkiho.

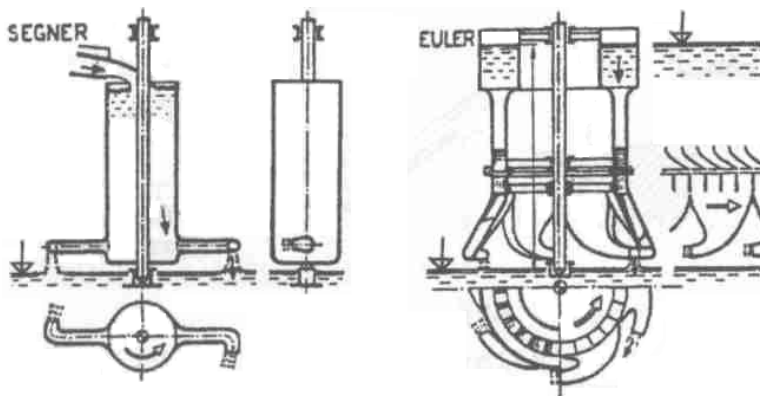
Kolo se středním nátokem se používalo v místech se spády 1,5 až 5 metrů a s průtokem 0,4 až 1,5 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>. Kolo se pohybuje ve vyzdřeném žlabu. Na rozdíl od kola s vrchním nátokem nemělo korečky, ale jen lopatky, tzn. bez postranních věnců na kole. Voda vtéká do kola kulísou, která dává vtékající vodě patřičný směr. Výkon kola se řídí stavidlem. V dnešní době je většina těchto kol nahrazena Francisovou turbínou.

Kolo se spodním nátokem je také bez korečků stejně jako kolo se středním nátokem. Stavěli se pro ty nejmenší spády a pro průtoky 0,6 až 4 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>. Voda působí hlavně nárazem na lopatky. Účinnost byla nanejvýš 40% a při zvýšené hladině vody se ještě zmenšovala. Téměř všechna kola byla nahrazena Francoisovými turbínami.

**b) Segnerovo kolo** se stalo základem pro přetlakové turbíny. Je to v podstatě vodní kolo využívající reakční princip.

**c) Eurlův stroj** je zdokonalení využití reakčního principu. Tento stroj dosahoval účinností až 70%, což je skoro dvojnásobek oproti segnerovu kolu.

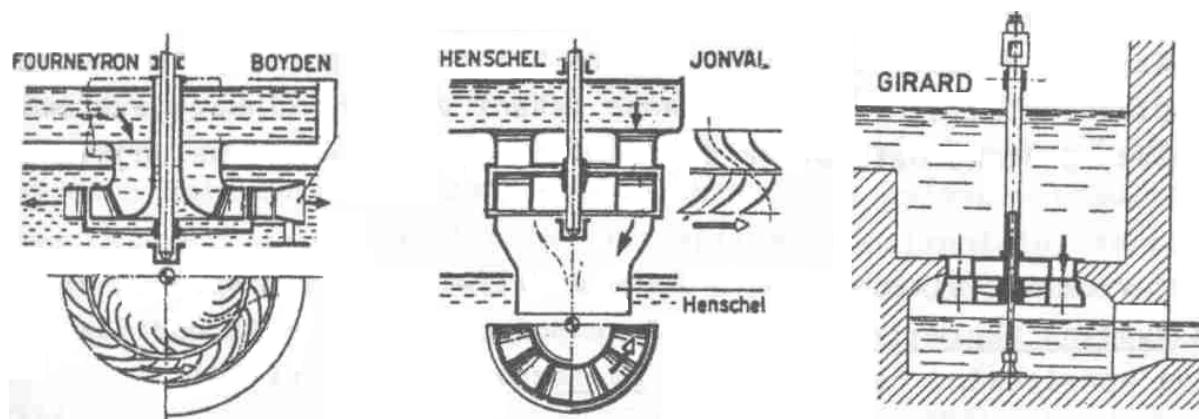
Obr. 2.3 Segnerovo kolo a Eurlův stroj



**d) Fourneyronova turbína** byla první provozuschopná přetlaková turbína. Byla radiální s vnítním vtokem a odstředivým průtokem. Používá rozváděcí kanály a v pozdějších verzích i difuzor.

**e) Jonvalova turbína** navazovala na dřívější řešení Henchelovy turbíny, byla axiální přetlaková s rozváděčem. Uzavíráním rozváděčích kanálů byl regulován průtok. U turbíny byla použita savka. Tyto turbíny byly v pozdějších letech nahrazovány Francisovými turbínami.

f) *Girardova turbína* byla odvozena z Jonvalovy turbíny. Byla to turbína rovnotlaká, která byla v pozdějších letech různě modifikována. Ve Schwamkrugově úpravě byla používána na místech s velkými průtoky a velkými spády. Na počátku 20. století byly nahrazovány Peltonovými turbínami.



Obr. 2.4 Fourneyronova turbína , Jonvalova turbína , Girardova turbína

## 2.2 Vodní díla v Brně a okolí

### a) *Povodí Svatky*

- Brno – Kníničky: MVE je postavena na Brněnské přehradě, která vznikla zatopením obce Kníničky. Byla dostavěna roku 1940. Rozloha přehrady činí 259 ha a objem je 7 600 000 m<sup>3</sup>. Hydroelektrárna obsahuje jednu Kaplanovu turbínu o výkonu 2,88 MW.

- Brno – Komín: MVE je postavena na jezu řeky Svatky. Plní funkci vyrovnávací elektrárny pro MVE Kníničky. Byly instalovány dvě Kaplanovy turbíny s horizontální hřídelí o výkonu 100 kW. V provozu je od roku 1923 a v roce 2007 bylo vyměněno jedno soustrojí za horizontální kolenovou Kaplanovu turbínu s výkonem 104 kW.

### b) *Povodí Svitavy*

- Brno – Cacovice: malá vodní elektrárna je umístěna v bývalém mlýně. Před postavením turbíny bylo v činnosti 12 vodních kol. Instalována je jedna dvojité Francisovy horizontální turbína s výkonem 75 kW a s asynchronním motorem.

- Brno – Husovice: MVE je postavena na jezu řeky Svitavy. Byla instalována Kaplanova turbína s hltností 4,17 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup> a výkonu 2x30 kW – obsahuje dva asynchronní motory ve funkci generátorů.

MVE byla uvedena do provozu roku 1993, mimo provoz je od roku 1995, v roce 1997 byla poškozena při povodních.

- Brno – Husovice II: MVE je umístěna na jezu, který je z roku 1863 postaven ze dřeva a kamení. Jez byl dvakrát opravován, a to v roce 1943 a po povodních roku 1997. Vodní elektrárna je v provozu od roku 1989. Elektrárna obsahuje dvě repasované Francisovy turbíny se svislou hřídelí o celkovém výkonu 65 kW.



Obr. 2.5 Orientální mapa

### 2.3 Historie Cacovického mlýna

Cacovický mlýn je jediným pozůstatkem zaniklé osady Cacovice. Do první světové války byl Cacovický mlýn rozložený po obou stranách náhonu řeky Svitavy s hospůdkou a panským dvorem na levém břehu. Náhon tvořil hranici mezi Maloměřicemi a Husovicemi.

Mlýn stál již v roce 1170. V první polovině 14. století byl darován klášteru Králové Panny Marie. Dvůr s mlýnem a zahradou, které se v Cacovicích nacházely, přenechal klášter Konrádovi ze Židenic a jeho manželce až do jejich smrti.

Lze se domnívat, že objekty byly před třicetiletou válkou zničeny, ale v roce 1610 byl znovu zřízen, jak je patrné ze zápisu na faře v Obřanech. Roku 1782 byl klášter zrušen a Cacovice i Maloměřice byly zabaveny pro náboženský fond. Po vrchnosti byl prvním majitelem mlýna Antonín Svoboda, který od kláštera na Starém Brně koupil mlýn s pozemkem, zahradou i veškerým mlýnským příslušenstvím. Dalším majitelem byl Eduard Ryba. Ten vybudoval nový jez, který nahradil předchozí, zničený v roce 1830 ledovými krami a jarní povodní. Poté se stal majitelem Josef Kottowetz a dále jeho syn Eduard. Od něj koupili mlýn v roce 1884 manželé Frankovi.



Obr. 2.6 Strž cacovického jezu způsobená třenicí ledu 28.12.1902

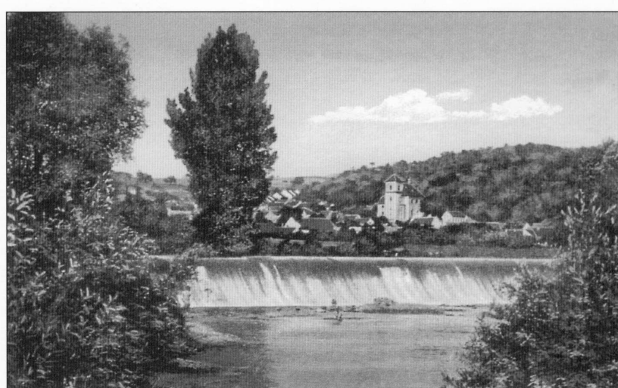


Cacovský mlýn - podoba v 19. století

V roce 1902 se stala katastrofa způsobená stržením dřevěného jezu. Tehdy se rozvodnila řeka Svitava a dne 28. prosince jej zničila. Na místě starého jezu byl vybudován betonový jez, po jehož výstavbě byla nad splavem naměřena hloubka až 3,5 metru.

Mlýn bez pozemků byl dědici prodán Antonínu Ženožičkovi, který mlýn přestavěl na třípatrovou budovu s moderním mlýnským zařízením. V budově na pravé straně náhonu byla zřízena papírna. Rok 1918 byl rokem velké přestavby mlýna, kdy byla instalována vodní elektrárna s dvojitou Francisovou turbínou. V roce 1919 byla vyčištěna cacovická strouha a roku 1926 přešel celý objekt do vlastnictví Moravské banky v Brně, od níž jej odkoupil Adolf Hynek, mlynář z Čech, který provozoval mlýn i papírnu. Nynějším majitelem je syn Adolfa Hynka ing. Miroslav. V dubnu roku 1981 mlýn vyhořel a jedině, co po něm zbylo je obrys půdorysu na dvoře, který připomíná velikost bývalého mlýna, obsahujícího 12 vodních kol. Roku 1985 proběhla obnova MVE.

Obr. 2.7 Cacovický mlýn v 19. století



Cacovický splav v roce 1915.

Velká voda pod cacovickým splavem v roce 1952.

Obr. 2.8 Vlevo cacovický splav v roce 1915 (dole) a nynější podoba, vpravo velká voda pod cacovickým splavem v roce 1952 (dole) a nynější podoba.

### 3. Malé vodní elektrárny

#### 3.1 Základní pojmy

##### *Hydroenergetický potenciál vodního toku*

Údaje o hydroenergetickém potenciálu povrchových vodních toků slouží k informaci o možnostech využití potenciální energie. Rozlišuje se hrubý, teoretický a reálně využitelný hydroenergetický potenciál.

Teoretický hydroenergetický potenciál se vypočítá jako odevzdaný výkon toku  $P$  [W],

$$P = Q \cdot \rho \cdot g \cdot H$$

kde  $Q$  [ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ] je průtok,  $\rho = 1000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$  hustota vody,  $H$  výškový rozdíl ve směru zemské tíže.

Při tom 1kg kapaliny změni svou energii o hodnotu  $E = g.H$ . Protože je energie vztahena na 1kg kapaliny, nazývá se měrnou energií. Vzhledem k tomu, že se přemístění kapaliny děje v reálném čase, odpovídá vykonané práci výkon  $P$ .

Jestliže uvažovaný tok rozdělíme na několik úseků, pak potenciální výkon jednoho úseku řeky mezi dvěma profily 1 a 2 se vypočítá podle vzorce:

$$P_{1-2} = 9,81 \cdot \frac{Q_1 - Q_2}{2} \cdot H_{1-2} \quad [\text{kW}]$$

Podle hydrologických podkladů, tedy křivky překročení průměrných denních průtoků, se počítají výkony pro dva různé průtoky, a to pro

- střední průtok  $Q_{50}$  s 50% pravděpodobnosti překročení
- minimální průtok  $Q_{95}$  s 95% pravděpodobností překročení.

Výkon  $P_{50}$  udává teoretický hydroenergetický potenciál toku. Teoretická zásoba vodní energie je energie unášená tokem za jeden den, tedy:

$$A = 3600 \cdot 24 \cdot P_{50}$$

Technicky využitelný hydroenergetický potenciál vodního toku je menší než teoretický, protože se musí uvažovat pro ztrátové využití spádu toku a ztrátové využití středních průtoků.

Reálně využitelný hydroenergetický potenciál vodního toku je vždy menší, protože vodní tok nelze beze zbytku využít celý. Do cesty se staví vybudovaná města, komunikace, velké objekty, chráněná území, apod.

V našich podmínkách je reálně využitelný hydroenergetický potenciál přibližně 40 - 50% potenciálu hydroenergetického.

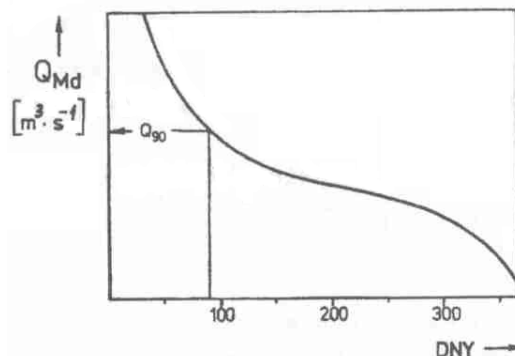
### Spád

Spád může být dvojího významu:

- Hrubý spád  $H_b$  [m], je výškový rozdíl hladin nad a pod vodní elektrárnou, při nulovém průtoku vodní turbínou.
- Užitný spád  $H$  [m] je výškový rozdíl hladin v nádrži nad vodní elektrárnou a v odpadu pod vodní elektrárnou. Je to vlastně hrubý spád s připočítanými ztrátami.

**Průtok** je množství vody protékající určitým profilem za jednotku času. Takto definovaný průtok není roven průtoku turbínou. Průtok turbínou je vždy menší než, kvůli zajištění sanačního průtoku korytem.

Průtok v průběhu roku se graficky zobrazuje v tzv. křivce překročení průměrných denních průtoků. Tato křivka má odlišný průběh pro suchý a mokřý rok, proto se uvažuje křivka stanovená pro průměrně vodný rok. Osa času udává počet dní za rok, ve kterých je průtok korytem větší než je souřadnice příslušného bodu na křivce.



Obr. 3.1 Průtoková křivka

**Průtok turbínou**  $Q$  [ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ] je množství vody které protéká turbínou za jednotku času. Je to množství vody potřebné pro provoz turbíny při měřeném zatížení. Do průtoku turbínou se zahrnuje jak množství vody protékající oběžným kolem, tak i nevyužití množství vody protékající mezerami mezi statorem a rotorem, ucpávkami a netěsnostmi turbíny, případně množství vody potřebné pro chlazení ložisek turbíny.

Důležitým pojmem je tzv. jmenovitý průtok, což je průtok turbínou při jmenovitých otáčkách a jmenovité měrné energii turbíny. Jmenovité hodnoty jsou takové, při kterých má turbína nejlepší hydraulické vlastnosti.

Hltnost turbíny udává největší možný průtok turbínou.

### 3.2 Obecné schéma vodní elektrárny

Konkrétní provedení vodní elektrárny může mít mnoho podob. Každé individuální schéma se pak od obecného více či méně odlišuje. Vodní elektrárny jsou postaveny na místech s různými terénními poměry, s jinými spády a na řekách s jinými průtoky. Neexistuje tedy žádný univerzální předpis, jak by měla vodní elektrárna vypadat. Každé vodní dílo je unikátní.

**Vodní elektrárna se obecně skládá z:** Obr. 3. Obecné schéma vodní elektrárny

- *objekt nadržování 1* bývá vzdutý vodní tok, přehrada nebo jezero. Může sloužit současně k regulaci povodňových vod a k zásobování pitnou vodou.

- *jímací objekt 2* s přepadem jíma vodu a dále ji posílá turbínám. Větší naplaveniny je třeba odstraňovat a vodu proudící k turbínám zbavovat nečistot. Valouny se usazují v zádrži před jezem nebo ve zvláštním lapači, plovoucí naplaveniny jako např. listí, dřevo, led apod. se zachytávají mříží z ocelových plochých tyčí, tzv. česlemi.

- *stavidlo 3* je uzavírací zařízení, které bývá na vstupu do štol, přivádějící vodu k turbínám.

- *přívodní objekt* se skládá ze *štol 4* a *strmě vedeného potrubí 5*. Místo nadržování může být vzdáleno od strojovny vodní elektrárny jen několik metrů, ale i několik kilometrů. Pokud se rychle zamezí přívodu vody do turbíny (např. při odstavení turbíny kvůli výpadku agregátu ze sítě), nastávají v dlouhém uzavřeném potrubí silné tlakové rázy. Je snaha tyto rázy co nejvíce omezit, aby nedošlo ke zničení potrubí. K tomu slouží vodní zámek.

- *vodní zámek 6* je otevřená vyrovnávací nádrž, která při odstavení turbín přijímá vodu protékající štolou setrvačným účinkem, čímž se výška vodního sloupce může změnit o 10 až 20 metrů.

- *tlakové potrubí 5* vyúsťující z vodního zámku má na začátku *rychlouzávěr 7*, který se uvede v činnost při nepřijatelném zvýšení rychlosti vody v potrubí.

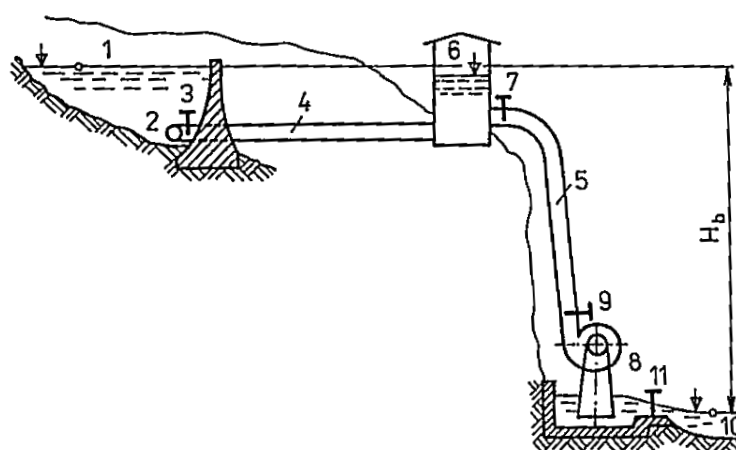
- *vodní turbína 8* je od potrubí oddělena *uzávěrem 9*. Vodní turbína sestává ze tří částí:

- zařízení pro přívod vody k oběžnému kolu (zařízení pro přívod vody k rozváděcímu ústrojí a vlastní rozváděcí ústrojí)

- Oběžné kolo

- Zařízení pro odvod vody od oběžného kola.

- *odváděcí objekt 10* je kanál spodní



vody, který je

### 3.3 Rozdělení vodních elektráren

Je mnoho hledisek, podle kterých lze elektrárny dělit. Mezi ty nejzákladnější patří výkonové hledisko, hlediska spádu a umístění.

**Podle velikosti instalovaného výkonu** se vodní elektrárny dělí v souladu s ČSN 75 0128 na elektrárny:

- *velké* s instalovaným výkonem nad 200 MW
- *střední* s instalovaným výkonem od 10 MW do 200 MW
- *malé* s instalovaným výkonem do 10 MW

**Z výkonového hlediska** se malé vodní elektrárny dělí dle ČSN 75 0128 na:

- *průmyslové elektrárny* s instalovaným výkonem od 1 MW do 10 MW
- *minielektrárny* s instalovaným výkonem od 100 kW do 1 MW
- *mikroelektrárny* s instalovaným výkonem od 35 kW do 100 kW
- *domácí elektrárny* s instalovaným výkonem do 35 kW

Kategorie výkonů  $P = 5$  až 10 MW je realizována na větších tocích, při relativně vysokých investičních nákladech. Tato vodní díla jsou celospolečensky významná.

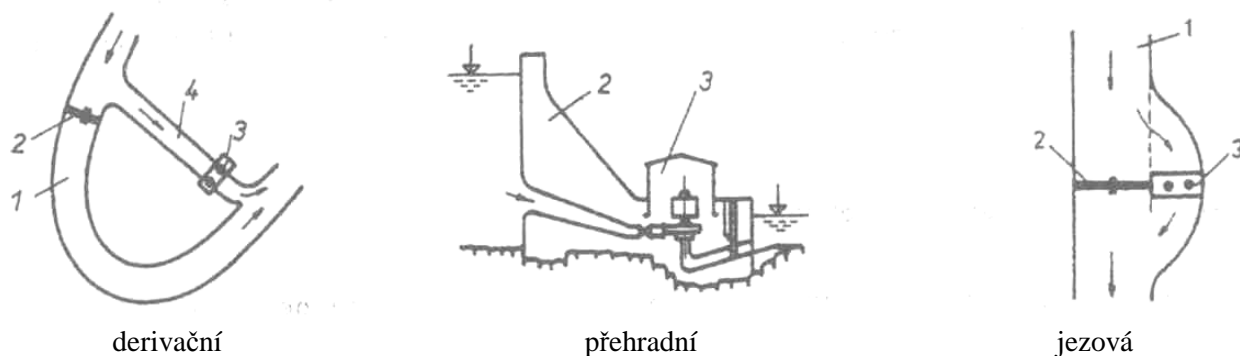
Kategorie výkonů  $P = 100$  až 500 kW je představována staršími, rekonstruovanými nebo obnovovanými MVE. Díla této kategorie jsou většinou napojena do veřejné elektrizační sítě.

**Podle celkového dosažitelného výkonu** se MVE dělí ve shodě s ČSN 73 6881 do čtyř kategorií:

- *Ia* s výkonem nad 1 MW
- *Ib* s výkonem nad 500 kW do 1 MW
- *II* s výkonem nad 100 kW do 500 kW
- *III* s výkonem nad 35 kW do 100 kW
- *IV* s výkonem nad 35 kW

**Podle získaného spádu**, resp. podle způsobu soustředění vodní energie a přívodu vody k turbíně se dělí na:

- *přehradové*: spád je tvořen přehradou
- *zdržové (jezové)*: spád je tvořen jezem
- *derivační*: využívá soustředěného spádu získaného derivací vody, tj. umělým vedením vody mimo vodní tok pomocí beztlakového nebo tlakového derivačního přivaděče
- *přehradní derivační*: kombinace dvou výše uvedených způsobů
- *bez vzdouvající stavby*: využívá energii vody proudící v potrubí, v otevřených korytech vodních toků, kanálech apod. bez vzdouvající stavby vybudované k tomuto účelu



Obr. 3.3 Základní varianty řešení MVE

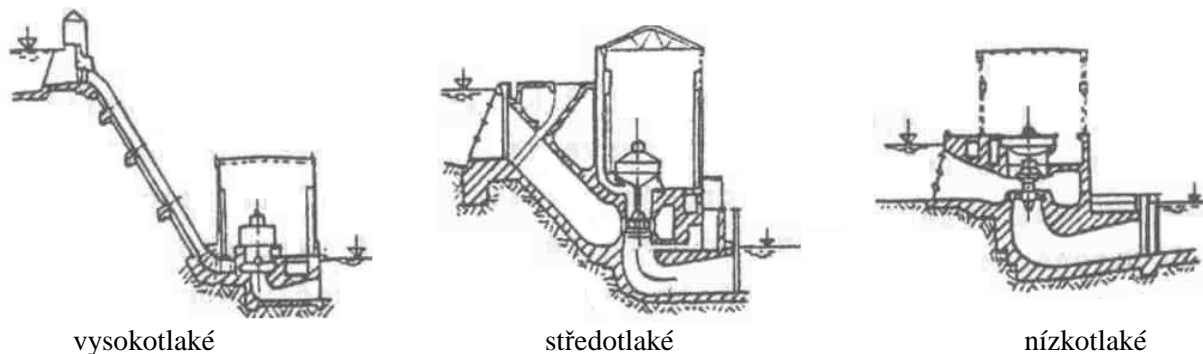
1 – koryto vodního toku , 2 – vzdouvající zařízení , 3 – strojovna , 4 – derivační přivaděč



**Podle velikosti využívaného spádu** (polohové energie vody):

- nízkotlaké využívají spád do 20m
- středotlaké využívají spád nad 20m do 100m
- vysokotlaké využívají spád nad 100m

Toto dělení je významné z hlediska použití vhodného typu vodní turbíny.

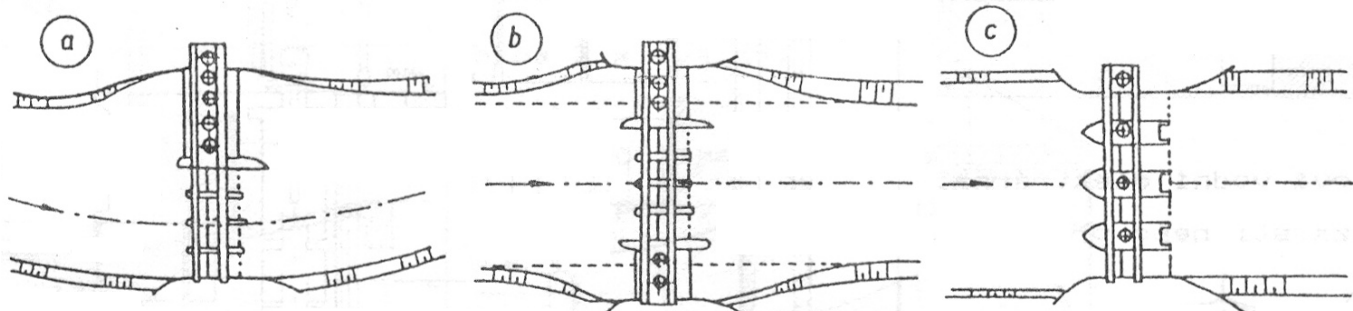


Obr. 3.4 Třídění a koncepce MVE podle velikosti využívaného spádu.

Vysokotlaká je s tlakovým derivačním přivaděčem, nízkotlaká MVE je jezová, břehová.

**Podle umístění strojovny:**

- *hrázové*: strojovna je u hráze, v tělese hráze nebo v přílivových bocích
- *jezové*: strojovna je v těsné blízkosti jezu nebo přímo ve spodní stavbě
- *věžové*: strojovna je ve sruženém objektu, ve tvaru věže nebo šachty, umístěném v nádrži nebo zdrži, příp. v břehové části
- *břehové*: strojovna je u jezu v jeho břehové části
- *členěné*: strojovna je rozdělena na několik částí, např. na obou březích
- *pilířové*: strojovna je v pilířích přelévané hráze nebo jezu
- *plovoucí*: soustrojí je umístěné na pontonu
- *individuální*: strojovna je v rekonstruovaném objektu např. v bývalém mlýně.



Obr. 3.5 Jezové MVE : a) břehová, b) členěná, c) pilířová

**Podle charakteru pracovního režimu** (způsobu provozu):

- *průtočné*: neovlivňují výrazně přirozený průtok toku, nemají akumulční nádrž
- *akumulační* (špičkové): řízený odběr vody z akumulční nádrže vytvářející spád (patří sem i přečerpávací elektrárny). U akumulční MVE se většinou jedná o krátkodobé řízení pracovního režimu, převážně denní, maximálně týdenní.

**Podle uspořádání strojovny:**

- *krytá vodní elektrárna* s budovou strojovny, tj. se zakrytým prostorem strojovny, kde je umístěn i hlavní montážní jeřáb

- *nekrytá vodní elektrárna* bez budovy strojovny, kde hydroalternátory, popř. soustrojí jsou chráněny odnímatelnými kryty
- *polokrytá vodní elektrárna* s minimální výškou strojovny, bez montážního prostoru a s venkovním montážním zařízením
- *přeléváná vodní elektrárna* se strojovnou umístěnou pod přelivy jezu nebo hráze
- *sdužená vodní elektrárna*, v jejíž spodní stavbě jsou umístěny nejen hlavní soustrojí a zařízení MVE, ale např. i výpusti nebo jalové přelivy

**Podle řízení provozu** se vodní elektrárny dělí na elektrárny:

- *s ručním ovládním*: jejíž provoz je řízen výhradně obsluhou
- *automatizované*: provoz strojovny je řízen převážně automatikou
- *částečně automatizované*: provoz strojovny je řízen z části automatikou a z části obsluhou

**Podle provozovatele** lze vodní elektrárny dělit na:

- *vodní elektrárny elektrizační soustavy*: rezortní vodní elektrárny zapojeny do elektrizační soustavy a pracující zejména podle jejich potřeb
- *závodní vodní elektrárny*: zapojené do elektrizačních soustav, ale sloužící především pro oblastní účely provozovatele, kterým je organizace mimo odvětví energetiky
- *soukromé*: zapojeny do vyčleněné elektrizační sítě, příp. i elektrizační soustavy

### **3.4 Rozdělení vodních turbín**

Hlavními součástmi vodní turbíny jsou dvě lopatková kola: kolo rozváděcí a kolo oběžné. Rozváděcí kolo je pevné a oběžné kolo je nasazeno na hřídeli.

Vodní turbíny se stejně jako vodní elektrárny mohou dělit podle různých hledisek. Pro základní specifikaci moderních turbín postačí hlediska pouze tři, a to:

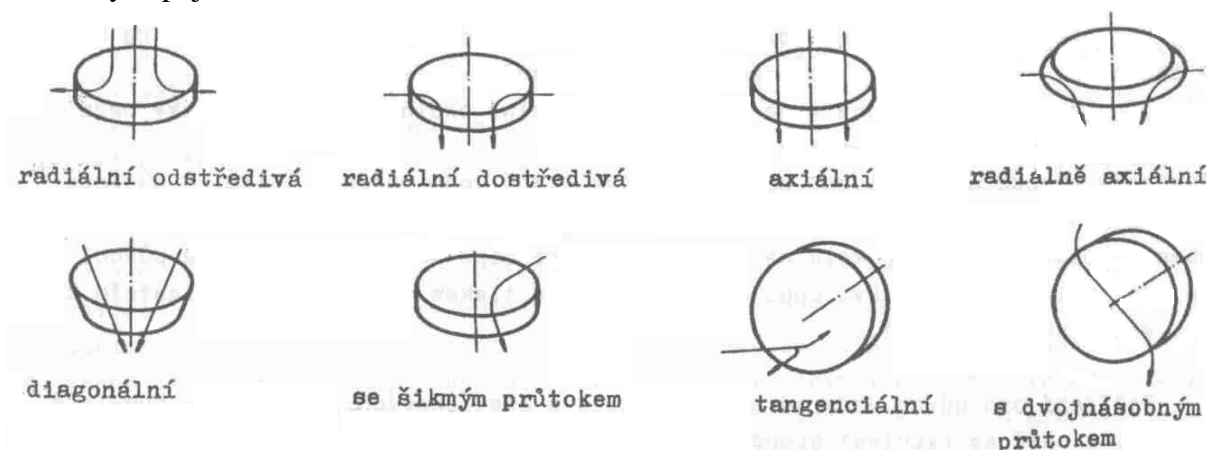
**Podle způsobu přenosu energie** vody na oběžné kolo se vodní turbíny dělí na:

- *rovnotlaké turbíny (akční)*: celá tlaková energie se v zařízení pro přívod vody k oběžnému kolu mění na kinetickou měrnou energii vody. Na vstupu i výstupu oběžného kola je stejný tlak.
- *přetlakové turbíny (reakční)*: pro přívod vody k oběžnému kolu je část tlakové měrné energie přeměněna v kinetickou měrnou energii vody. Zbývající (zpravidla větší) část tlakové měrné energie vody se přemění v kinetickou měrnou energii vody teprve při průchodu oběžným kolem. Průtok oběžným kolem se tedy uskutečňuje působením přetlaku na vstupu do oběžného kola.

**Podle průtoku vody oběžným kolem** vzhledem k hřídeli se vodní turbíny rozdělují na:

- *radiální odstředivé (centrifugální)* jsou s vnitřním vtokem vody, voda protéká mezi lopatkami oběžného kola směrem od hřídele.
- *radiální dostředivé (centripetální)* jsou s vnějším vtokem vody, voda protéká mezi lopatkami oběžného kola směrem k hřídeli.
- *axiální* jsou takové, u nichž voda protéká mezi lopatkami oběžného kola zhruba ve stejné vzdálenosti od jeho osy.
- *radiálně axiální* jsou takové, u nichž voda proudí nejprve radiálně, kolmo na osu, a po přiblížení k ose mění směr na přibližně osový.
- *diagonální* jsou s protékající vodou oběžným kolem šikmo k hřídeli
- *se šikmým průtokem* jsou takové, u nichž na lopatky oběžného kola vstupuje voda z boční strany a vystupuje v osovém směru.

- *tangenciální* jsou takové, u kterých vstupuje voda na lopatky oběžného kola ve směru tečny ke kružnici se středem na ose rotace kola
- *s dvojnásobným průtokem* jsou takové, u kterých voda vstupuje do oběžného kola dostředivě a vystupuje odstředivě.



Obr. 3.6 Rozdělení turbín podle průtoku vody oběžným kolem

**Podle polohy hřídele** se vodní turbíny dělí na:

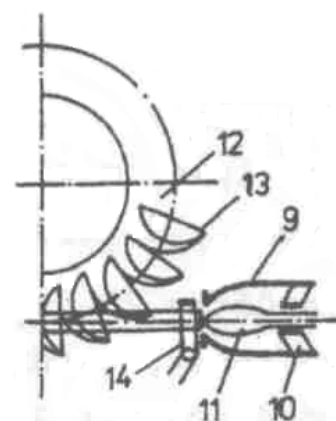
- *vertikální*
- *horizontální*
- *šikmé*

**Peltonova turbína** je rovnotlaká tangenciální, vhodná pro největší spády. Oběžné lopatky jsou ve tvaru dvojítků, jsou pevné, tedy neregulační. Rozváděcí ústrojí může být tvořeno jednou až šesti dýzami, ze kterých vystupuje voda ve tvaru paprsku, který pak naráží na lopatky oběžného kola. Rozváděcí kolo je tedy v tomto typu turbíny nahrazeno dýzami.

Regulace průtoku vody na lopatky, a tedy i regulace výkonu turbíny se provádí zavíráním či otevíráním výtokového otvoru dýzy za pomoci pohyblivé jehly. Pokud je potřeba rychle odstavit turbínu, použije se zařízení na odklánění nebo odřezávání vodního paprsku, tzv. deviátor či deflektor, jehož pohyb je kombinován s pohybem regulační jehly.

Při použití horizontálního uspořádání soustrojí lze použít jednu či dvě dýzy, při vertikálním uspořádání se může použít pět až šest dýz.

V obrázku 3.7 je 9 dýza, 10 vodící kříž, 11 regulační jehla, 12 oběžné kolo, 13 korečky, 14 deflektor či deviátor.



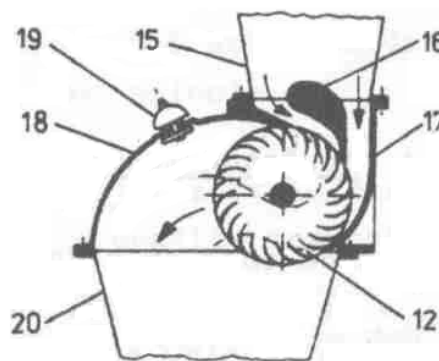
Obr. 3.7 Základní schéma Peltonova turbíny

**Bánkiho turbína** je rovnotlaká turbína, která využívá dvojnásobný průtok vody turbínou. Principem je velmi podobná vodním mlýnům. Oběžné kolo je tvořeno kruhovými deskami, mezi kterými jsou po obvodu upevněny neregulační lopatky.

Regulace průtoku turbínou je řešena zpravidla klapkou umístěnou ve vtokovém tělese, případně segmentovým uzávěrem.

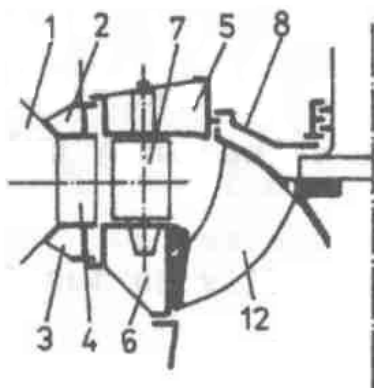
Uspořádání turbíny je horizontální, v provedení s odpadní šachtou nebo savkou.

V obrázku 3.8 je 12 oběžné kolo, 15 vtokové těleso, 16 regulační klapka, 17 skříň, 18 kryt, 19 zavzdušňovací ventil, 20 odpad.



Obr. 3.8 Základní schéma Bánkiho turbíny

**Francisova turbína** je radiálně axiální přetlaková turbína. Oběžné kolo je opatřeno pevnými oběžnými lopatkami spojenými s věncem a kotoučem kola. Regulačním orgánem je rozváděč s natáčivými rozváděcími lopatkami, které jsou ovládány regulačním mechanismem. Obvyklé provedení turbíny je vertikální nebo horizontální se spirálou a savkou. Pro nižší spády je běžně používané klasické provedení s kašnou.



Obr. 3.9 Základní schéma Francisovy turbíny

Francisovy turbíny se mohou také použít jako reversibilní stroje, tedy čerpadlové turbíny.

V obrázku 3.9 je 1 spirála, 2 horní výztužný kruh, 3 dolní výztužný kruh, 4 výztužná lopatka, 5 horní lopatkový kruh, 6 dolní lopatkový kruh, 7 rozváděcí lopatka, 8 víko, 12 oběžné kolo.

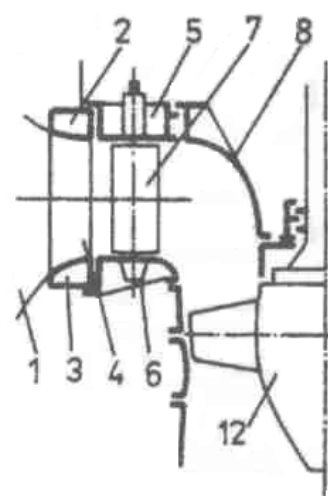
**Kaplanova turbína** je přetlaková axiální turbína, vhodná pro malé spády a velké průtoky. Oběžné kolo bez vnějšího věnce má oběžné lopatky (3 až 10) upevněné na náboji kola. Náboj má válcový tvar s částí kulové plochy. Lopatky jsou natáčivé, ovládané regulačním mechanismem umístěným uvnitř náboje kola. Osa čepů lopatek svírá s osou náboje úhel  $90^\circ$ . Plynulé natáčení lopatek se provádí za provozu stroje.

Rozvaděč má také natáčivé lopatky ovládané vlastním regulačním mechanismem. Rozvaděč může být řešen jako radiální, axiální nebo diagonální.

Změna polohy oběžných a rozváděcích lopatek je prováděna současně závisle na sobě.

Obvyklé řešení turbíny je vertikální nebo horizontální, pro vyšší měrné energie se spirálou, nejčastěji kruhového průřezu. 4stá je kolenová savka. Turbíny menších výkonů s horizontální nebo šikmou osou jsou kašnové.

V obrázku 3.10 je 1 spirála, 2 horní výztužný kruh, 3 dolní výztužný kruh, 4 výztužná lopatka, 5 horní lopatkový kruh, 6 dolní lopatkový kruh, 7 rozváděcí lopatka, 8 víko, 12 oběžné kolo.



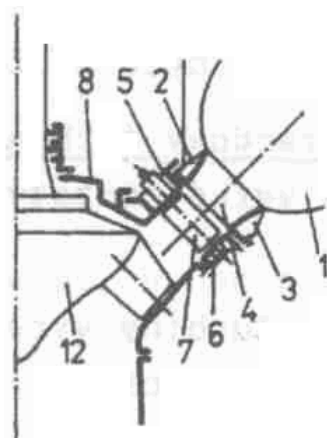
Obr. 3.10 Základní schéma Kaplanovy turbíny

**Déřiazova turbína** je přetlaková diagonální turbína. Tvoří přechod mezi turbínami Francoisovými a Kaplanovými. Lopatky oběžného kola bez vnějšího věnce umístěné na kuželovém náboji kola, jsou natáčivé.

Regulační mechanismus oběžných lopatek je uložen v náboji oběžného kola a umožňuje plynulou změnu úhlu nastavení lopatek za provozu stroje. Osy čepů oběžných lopatek svírají s osou kola úhel  $30^\circ$  až  $60^\circ$ . Tento úhel je závislý na velikosti měrné energie turbíny. Rozvaděč se používá buď v radiálním nebo diagonálním uspořádání. Rozváděcí lopatky jsou také natáčivé, ovládané vlastním regulačním mechanismem. Změna polohy oběžných lopatek je provedena při současně odpovídající změně polohy rozváděcích lopatek.

Běžné provedení turbíny je vertikální se spirálou a savkou. Lze je použít také jako stroje reversibilní, tedy jako čerpadlové turbíny.

V obrázku 3.11 je 1 spirála, 2 horní výztužný kruh, 3 dolní výztužný kruh, 4 výztužná lopatka, 5 horní lopatkový kruh, 6 dolní lopatkový kruh, 7 rozváděcí lopatka, 8 víko, 12 oběžné kolo.



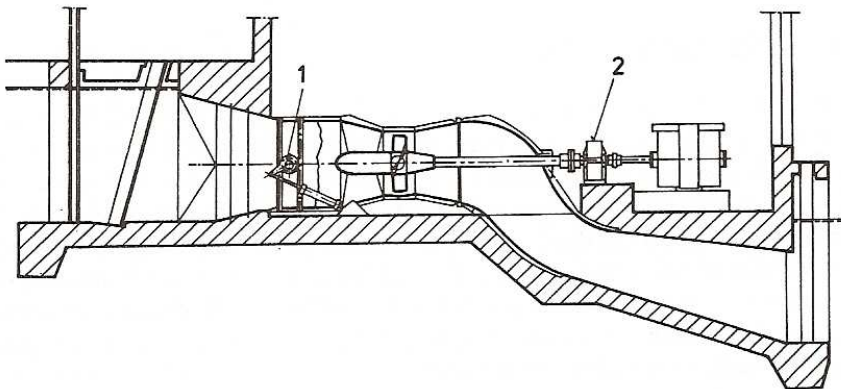
Obr. 3.11 Základní schéma Déřiazovy turbíny

**Přímoproudá turbína** má řešen přívod vody na turbínu tak, že je umožněn přímý nátok vody na turbínu. Kaplanova turbína je nejčastější přímoproudá turbína. Díky horizontálnímu uspořádání pak lze využít i poměrně malé spády. Turbína nemá spirálu a savka je použita přímá kónická nebo esovitě zahnutá. Podle uspořádání savky se přímoproudé turbíny dělí na S turbíny s dvojitým prohnutím hydraulického systému a na kolenové turbíny.

Jediné usměrnění nátoku vody na turbínu je prováděno rozváděcími lopatkami, které většinou bývají stavitelné.

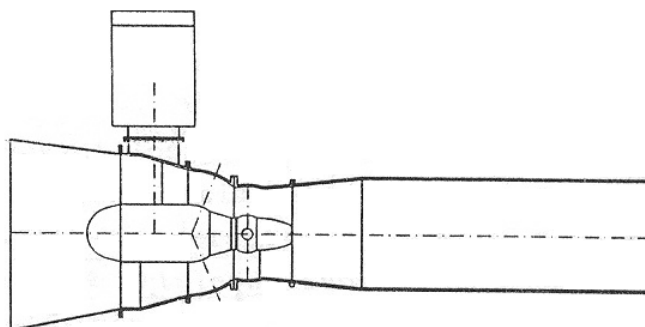
Způsoby vyvedení energie z turbíny:

- Hřídel turbíny prochází kolenem turbíny ven a mimo hydraulický systém je k němu napojen generátor. Tento způsob vyvedení je možné použít u turbíny s vertikální a šikmou hřídelí.



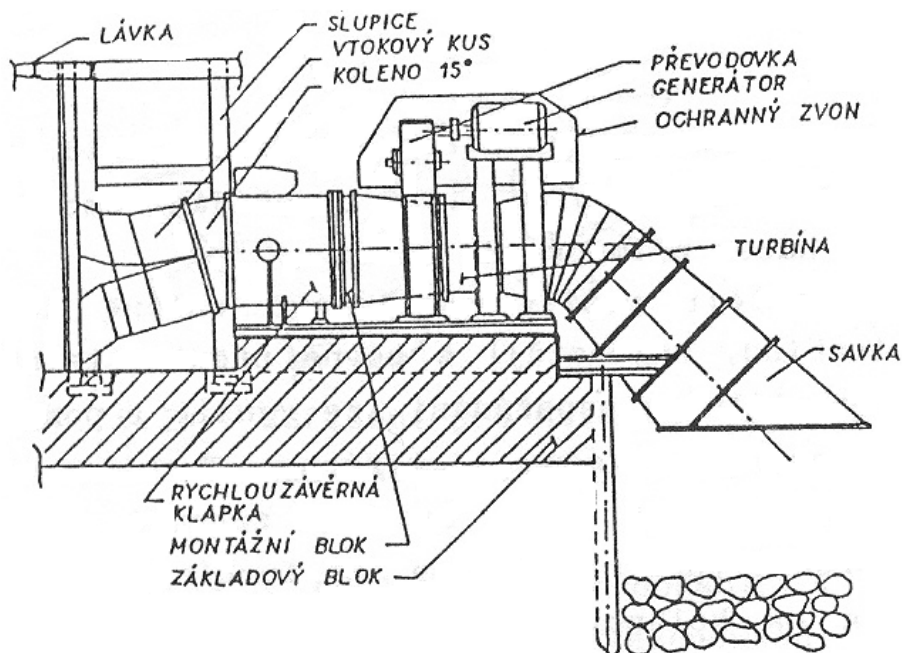
Obr. 3.12 Schéma horizontální přímoproudé Kaplanovy turbíny s hřídelí procházející kolenem turbíny

- Vyvedení energie rotujícího hřídele je provedeno pomocí pravouhlého kuželového převodu. Tento způsob vyvedení energie je velmi efektivní, protože část případně i celý převod do rychla se provede již v kuželovém pravouhlém převodu.



Obr. 3.13 Schéma zapojení turbíny s pravouhlým převodem

- Energie rotujícího hřídele turbíny je na generátor převáděna za pomoci řetězů, které prochází podpěrnými pilíři turbíny.



Obr. 3.14 Schéma přímoproudé turbíny s vyvedením energie řetězovým převodem

## 4. Technická specifikace vodního díla

### 4.1 Hydrologické poměry

- Cacovická elektrárna leží na řece Svitavě
- plocha povodí: profil jez Cacovice A = cca 1131 km<sup>2</sup>  
profil lmg Bílovice A = 1116,51 km<sup>2</sup>  
profil ústí do Svatky A = 1146,91 km<sup>2</sup>
- průměrný dlouhodobý roční průtok (1931 – 1960)  
lmg Bílovice  $Q_a = 5,01 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$   
ústí do Svatky  $Q_a = 5,11 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$

Nárůst jsou 2% na 30,4 km<sup>2</sup>. Pro profil jez Cacovice bude nárůst průtoků kolem 1% při nárůstu plochy 15 km<sup>2</sup> od profilu Bílovice nad Svitavou.

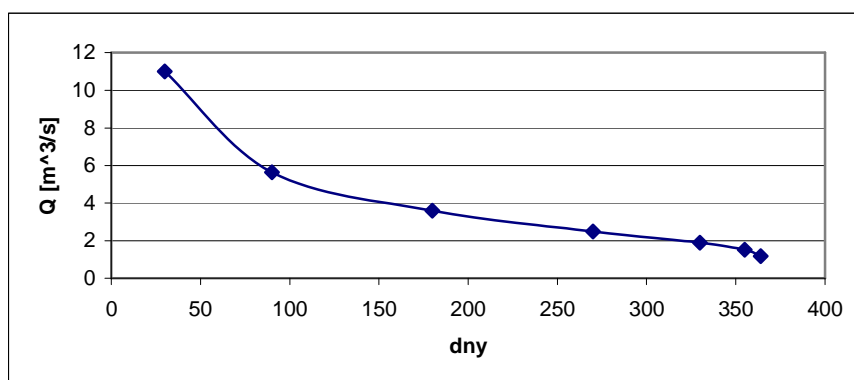
nejnovější měření:  $Q_a = 5,21 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$

- M - denní průtoky:

Tabulka 1: M-denní průtoky na  $Q_{Md}$  pro MVE Cacovice

M dny	30	90	180	270	330	355	364
$Q_{Md} [\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}]$	11	5,64	3,6	2,5	1,9	1,52	1,18

Graf 1: Průtoková křivka



- N – leté průtoky

Tabulka 2: N – leté průtoky

N [let]	1	2	5	10	20	50	100
$Q [\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}]$	40	56	85	105,5	122,5	154	179

- hydroenergetický potenciál se vypočítá dle vzorce:

$$P_{1-2} = \rho \cdot g \cdot \frac{Q_1 + Q_2}{2} \cdot H_{1-2} = 1000 \cdot 9,81 \cdot 5,21 \cdot 2,9 = 148,22 \text{ kW}$$

## 4.2 Parametry elektrárny

Malá vodní elektrárna Cacovice na Svitavě je derivační, nízkotlaká, automatická, zabudovaná vedle továrního (mlýnského) objektu, mlýnu Cacovice (dnes mimo provoz). Vodní elektrárna je vybavena jednou dvojitou Francisovou turbínou s maximální hltností  $Q_{\text{turb}} = 4,5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ . Odběr vody je prováděný z pravého mírně konkávního břehu řeky Svitavy do náhonu nad jezem v ř.km 10,16 MVE přes vtokový hradící objekt k MVE a od ní pak odpadním korytem zpět do Svitavy v ř.km 9,925.

Jde o velmi staré dílo (osazení stávající turbíny je z roku 1926) sestávajícího z těchto částí:

- pevný betonový jez s výškou asi 3,2m , šířkou přepadu 44,44m s nerovnou přepadovou korunou a průměrnou přepadovou kótou 209,48 (Bpv) a kapacitou přepadu  $Q = 135 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ .
- vtokový objekt na náhonu hrazeným dvěma dřevěnými tabulemi 2,75m / 2,15m.
- náhon (derivační) je otevřený lichoběžníkový kanál s šířkou dna 7 až 10 m s celkovou délkou asi 755m.
- plovoucí norná stěna na vtoku do náhonu
- odpadní koryto: otevřený lichoběžníkový kanál s šířkou dna 5 až 7 m, o délce asi 375m zaústěný do Svitavy, v ř. km 9,925 (jezová zdrž maloměřického jezu)

### *Parametry stroje*

- typ stroje: dvojitá Francisova horizontální turbína
- průměr oběžného kola:  $D = 0,805 \text{ m}$
- užitečný spád:  $H = 2,9 \text{ m}$
- hltnost turbíny  $Q_{\text{max}} = 4,5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , optimální průtok  $Q_{\text{opt}} = 4,13 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , minimální průtok  $Q_{\text{min}} = 2,07 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
- účinnost  $\eta = 80\%$
- instalovaný výkon 75 kW
- otáčky turbíny  $n = 120 \text{ min}^{-1}$

### *Parametry strojovny (uspořádání, rozměry, vybavení)*

- strojovna Cacovické vodní elektrárny obsahuje asynchronní generátor a samočinný regulátor dosahující asi 120 ks, tedy 75 kW při spádu  $H = 2,9 \text{ m}$ . Generátor má otáčky  $590 \text{ min}^{-1}$ , převod je realizován 7mi klínovými řetězy.
- součástí strojovny je i jalový odpad se stavidlem, vtokovými jemnými česlemi vybavené čistícím strojem (s brodicími řetězi)
- účinnost generátoru a převodem  $\eta_G = 85\%$

### *Maximální roční výroba elektrické energie*

K získání hodnoty maximální roční výroby elektrické energie je třeba znát průtokovou křivku, maximální  $Q_{\text{max}}$  a minimální  $Q_{\text{min}}$  průtok turbínou, spád  $H$  a účinnosti turbíny  $\eta$  a generátoru  $\eta_G$ .

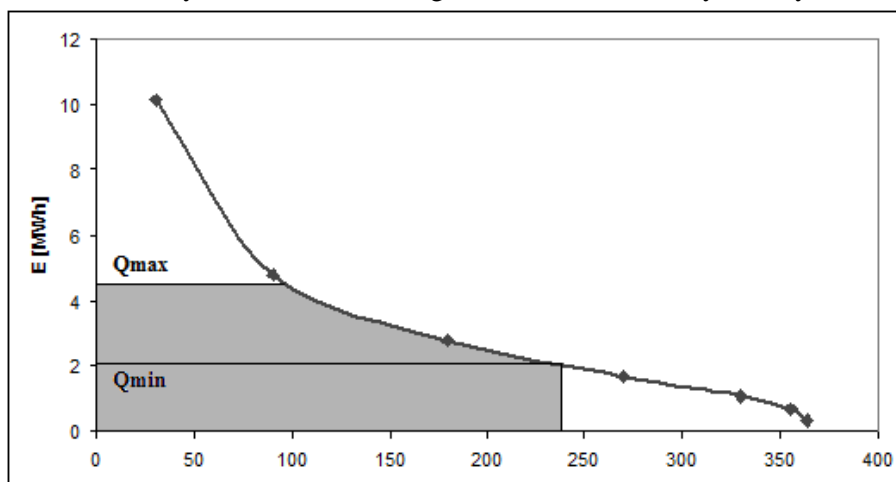
V průtokové křivce je třeba odečíst hodnotu sanačního průtoku  $Q_s$ , tedy průtoku, který je nutné ponechat téct přes jez. Dále je třeba v křivce zaznačit maximální a minimální průtok, i s připočteným sanačním průtokem.

$$Q_{\text{max}} = 4,5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}, Q_{\text{min}} = 2,07 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}, H = 2,9 \text{ m}, \eta = 80\%, \eta_G = 85\%, Q_s = 0,85 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

Minimální průtok řekou potřebný pro chod turbíny:

$$Q_{\text{minř}} = Q_{\text{min}} + Q_s = 2,07 + 0,85 = 2,92 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

Graf 2: Roční výroba elektrické energie současné Francisovy turbíny



- počet dní  $M$ , ve kterých průtok řekou překročí minimální hodnotu průtoku potřebnou pro chod turbíny se vypočítá dle vzorce:

$$M = M_1 + \frac{M_2 - M_1}{Q_2 - Q_1} \cdot (Q - Q_1) = 180 + \frac{270 - 180}{2.5 - 3.6} (2.92 - 3.6) = 236 \text{ dní}$$

- výkon turbíny:  $P = P_t \cdot \eta = Q \cdot \rho \cdot g \cdot H \cdot \eta$  [W]
  - výkon generátoru s převodem:  $P_G = P \cdot \eta_G$  [W]
  - vyrobená elektrická energie  $N = P_G \cdot h$  [Wh],
- kde  $h$  je počet hodin, který se stanoví podle počtu dní, ve kterých může turbína pracovat.

Tabulka 3: Výpočet roční výroby el. energie stávající Francisovy turbíny

$M$	[den]	30	90	180	236
$Q_{Md}$	$[m^3 \cdot s^{-1}]$	11,00	5,64	3,60	2,92
$Q_{Md} - Q_S$	$[m^3 \cdot s^{-1}]$	10,15	4,79	2,75	2,07
$Q$	$[m^3 \cdot s^{-1}]$	4,50	4,50	2,75	2,07
$P$	[kW]	81,93	81,93	50,07	37,69
$P_G$	[kW]	73,74	73,74	45,06	33,92
$h$	[hod]	720	1440	2160	1344
$E$	[kWh]	53092,66	106185,32	97336,55	45588,90
$E_c$	[kWh]	302203,43			

Během celého průměrně vodného roku vyrobí vodní elektrárna Cacovice cca 302 MWh elektrické energie s možnou odchylkou 30%. Výpočet je pouze přibližný kvůli zjednodušujícím předpokladům. Uvažujeme stálý spád a stálou hodnotu účinností.

## 5. Projektční návrh nového uspořádání malé vodní elektrárny Cacovice

Při návrhu vylepšení MVE Cacovice odpadá koncepční a dispoziční řešení, protože se využívá již vybudovaných stavebních částí. Při rekonstrukci jde tedy zejména o modernizaci její technické části. Lze očekávat, že pokud by došlo k výměně stávající Francisovy turbíny za novou, bylo by potřeba zrekonstruovat případně kompletně přestavět strojovnu vodní elektrárny.

Pro zjištění přibližného zvýšení výroby elektrické energie se použije návrh nové vodní turbíny, která by nahradila současnou již zastaralou Francisovu turbínu. Nejvhodnější turbínou, která by mohla



turbínu stávající nahradit je Kaplanova přímoproudá turbína. Vzhledem k dispozičnímu řešení stávající elektrárny lze použít turbínu s horizontální hřídelí.

Účinnostní charakteristika Kaplanovy turbíny je použita 3-PKT-194 se třemi lopatkami oběžného kola a s největším průměrem 194 mm. Jde o charakteristiku modelu Kaplanovy turbíny.

K návrhu jsou z charakteristiky turbíny 3-PKT-194 zvoleny hodnoty:

$$\text{optimální otáčky turbíny } n_{11\text{opt}} = 161,3 \text{ min}^{-1}$$

$$\text{optimální průtok } Q_{11\text{opt}} = 1,68 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

Volba *návrhového průtoku*  $Q_N$  s přihlédnutím k vlastnostem Kaplanovy turbíny (přítížitelnost o cca 25%, minimální zpracovatelný průtok 30% z  $Q_N$ ):

$$\text{návrhový průtok } Q_N = 6,16 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

$$\text{návrhový spád } H_N = 2,9 \text{ m}$$

Spád se pro zjednodušení uvažuje jako konstantní. Hodnoty skutečného spádu se v průběhu roku pohybují okolo návrhové hodnoty, odchylky jsou velmi malé.

Volba hodnoty *jmenovitého průtoku*  $Q_{11N}$ :

$$Q_{11N} = 1,25 \cdot Q_N = 1,25 \cdot 6,16 = 7,7 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

*Průměr oběžného kola*  $D$ :

$$D = \sqrt{\frac{Q_N}{Q_{11\text{opt}} \cdot \sqrt{H_N}}} = \sqrt{\frac{6,16}{1,68 \cdot \sqrt{2,9}}} = 1,312 \text{ m} \approx 1,3 \text{ m}$$

*Otáčky oběžného kola*:

$$n = \frac{n_{11\text{opt}} \cdot \sqrt{H_N}}{D} = \frac{161,3 \cdot \sqrt{2,9}}{1,3} = 211,3 \text{ min}^{-1} = 211 \text{ min}^{-1}$$

Nové hodnoty návrhového jednotkového průtoku  $Q_{11N}$  a otáček  $n_{11N}$  pro další výpočty získané kontrolou návrhového bodu:

$$Q_{11N} = \frac{Q_N}{D^2 \cdot \sqrt{H_N}} = \frac{6,16}{1,3^2 \cdot \sqrt{2,9}} = 2,14 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

$$n_{11N} = \frac{n \cdot D}{\sqrt{H_N}} = \frac{210 \cdot 1,3}{\sqrt{2,9}} = 160,3 \text{ min}^{-1}$$

*Sanační průtok*  $Q_s$  je minimální hodnota průtoku přes jez, která musí být vždy zachována.

*Průtok turbínou*  $Q_t$  je vypočten ze vzorce:

$$Q_t = Q_{11} \cdot D^2 \cdot \sqrt{H_N} \quad [\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}]$$

*Celkový průtok*  $Q_C$  je součet sanačního průtoku a průtoku turbínou.

*Účinnost modelu*  $\eta_{hM}$  se odečítá ze charakteristiky podle hodnoty jmenovitého průtoku  $Q_{11}$ .

*Účinnost prototypu*  $\eta_{hp}$  se vypočítá dle Huttonova vztahu:

$$\eta_{hp} = 1 - (1 - \eta_{hM}) \cdot \left[ 0,3 + 0,7 \cdot \left( \frac{D_M}{D_P} \right)^{0,2} \cdot \left( \frac{H_M}{H_P} \right)^{0,1} \right]$$

*Účinnost generátoru*  $\eta_G$  je odhadována pro asynchronní generátor 160 kW Siemens.

*Celková účinnost*  $\eta_C$  je součet účinností prototypu a generátoru.

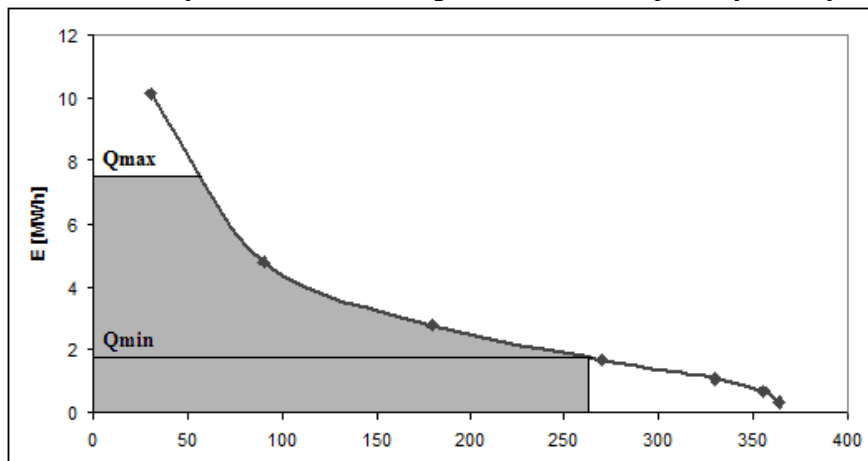
Výkon  $P$  se vypočítá pomocí vzorce:

$$P = \rho \cdot g \cdot H \cdot \eta_C \cdot \Delta \eta \cdot Q_t \cdot 10^{-6} \text{ [kW]}$$

Vyrobená energie za  $M$ -dní se vypočítá dle vzorce:

$$E = P \cdot M \cdot 24 \text{ [kWh]}$$

Graf 3: Roční výroba elektrické energie navrhované Kaplanovy turbíny



Tabulka 4: Výpočet roční výroby el. energie navrhované Kaplanovy turbíny

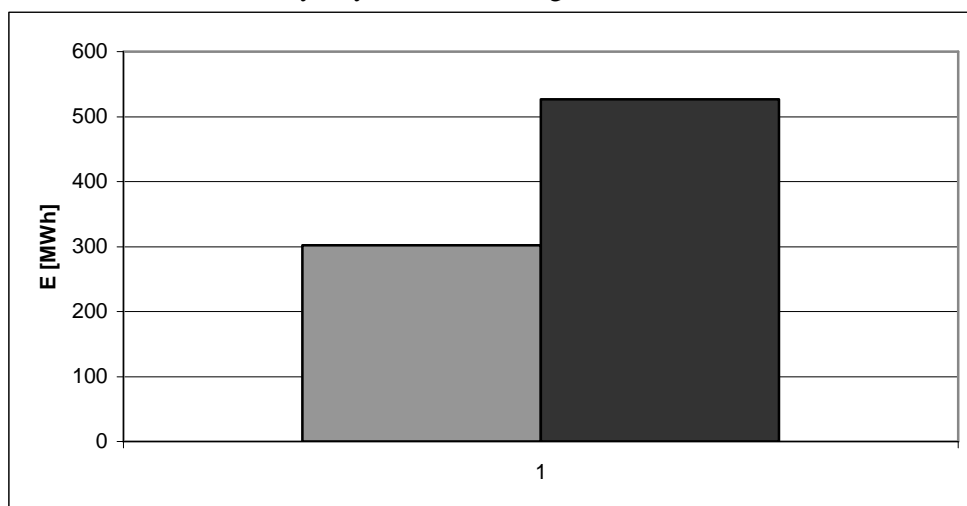
	$Q_N$	$Q_{max}$	$Q_{min}$	80% $Q_N$	60% $Q_N$	40% $Q_N$	110% $Q_N$
$Q_s$ [m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> ]	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85
$Q_t$ [m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> ]	6,16	7,54	1,73	4,93	3,70	2,46	6,77
$Q_c$ [m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> ]	7,01	8,39	2,58	5,78	4,55	3,31	7,62
$Q_{11}$ [m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> ]	2,14	2,62	0,6	1,712	1,284	0,856	2,354
$n_{11}$ [min <sup>-1</sup> ]	160,3	160,3	160,3	160,3	160,3	160,3	160,3
$\eta_{hM}$ [-]	84,4	81	71	85,6	84,3	78	82,7
$\eta_{hP}$ [-]	87,70	84,30	74,30	88,90	87,60	81,30	86,00
$\Delta \eta$ [-]				3,30			
$\eta_G$ [-]	93	92	75	90	88	80	94
$\eta_C$ [-]	81,56	77,55	55,72	80,01	77,08	65,04	80,84
$P$ [kW]	143	166	27	112	81	46	156
$M$ [dny]	75	63	260	85	125	215	69
$E$ [kWh]	20 557	251 286	29 534	26 888	77 718	98 357	22 413
$E_c$ [kWh]	<b>526 753</b>						

Během celého roku by byla vodní elektrárna Cacovice s Kaplanovou turbínou schopna vyrobit 526,8 MWh elektrické energie.

### **Porovnání roční výroby elektrické energie**

Při porovnání výroby elektrické energie současné Francisovy turbíny a navrhované Kaplanovy turbíny je na první pohled vidět, že se roční výroba elektrické energie při použití navrhované turbíny téměř zdvojnásobí.

Graf 2: Porovnání roční výroby elektrické energie



Roční výroba elektrické energie

- stávající Francisovou turbínou  $E_{FT} = 302$  MWh
- navrhovanou přímoproudou Kaplanovou turbínou  $E_{KT} = 526,8$  MWh

Použitím navrhované turbíny lze zvýšit roční výrobu elektrické energie o zhruba 225 MWh.

## 6. Závěr

V současné době je Cacovická elektrárna plně funkční a stále využívaná. Zařízení, které obsahuje je ale velmi staré a bylo by vhodné jej vyměnit za novější. Díky přestavbě by se dala výrazně zvýšit výroba elektrické energie, což by znamenalo i zvýšení finanční výnosnosti provozu elektrárny. Při přestavbě již existujícího díla bývá velkou výhodou to, že lze použít již vybudovaných staveb, což snižuje investiční náklady.

Pro zjištění přibližného zvýšení výroby elektrické energie byl použit návrh nové vodní turbíny, která by nahradila současnou již zastaralou Francisovu turbínu. Po přihlédnutí k velikostem spádů a průtoků byla jako nová nahrazující turbína vybrána přímoproudá Kaplanova turbína. Výpočtem bylo zjištěno, že nynější Francisova turbína může vyrobit v průměrně vodném roce cca 302 MWh elektrické energie. Nová Kaplanova přímoproudá turbína by byla schopna za stejných podmínek vyrobit 527 MWh elektrické energie za rok. Jde tedy o zvýšení roční výroby o více než 40%.

Rekonstrukce vodní elektrárny je velmi náročná záležitost, z finančního i z časového hlediska. V případě Cacovické elektrárny by bylo třeba kromě výměny stávající Francisovy turbíny za novou turbínu opravit i další navazující části. Výměna turbíny by znamenala rekonstrukci, případně celkovou přestavbu strojovny. Také by se měl vyčistit v současné době dosti zanesený náhon, aby se dostatečně zvýšil průtok.

Před začátkem rekonstrukce je tedy potřeba vše řádně naplánovat a jednotlivé práce rozložit do delšího časového úseku.

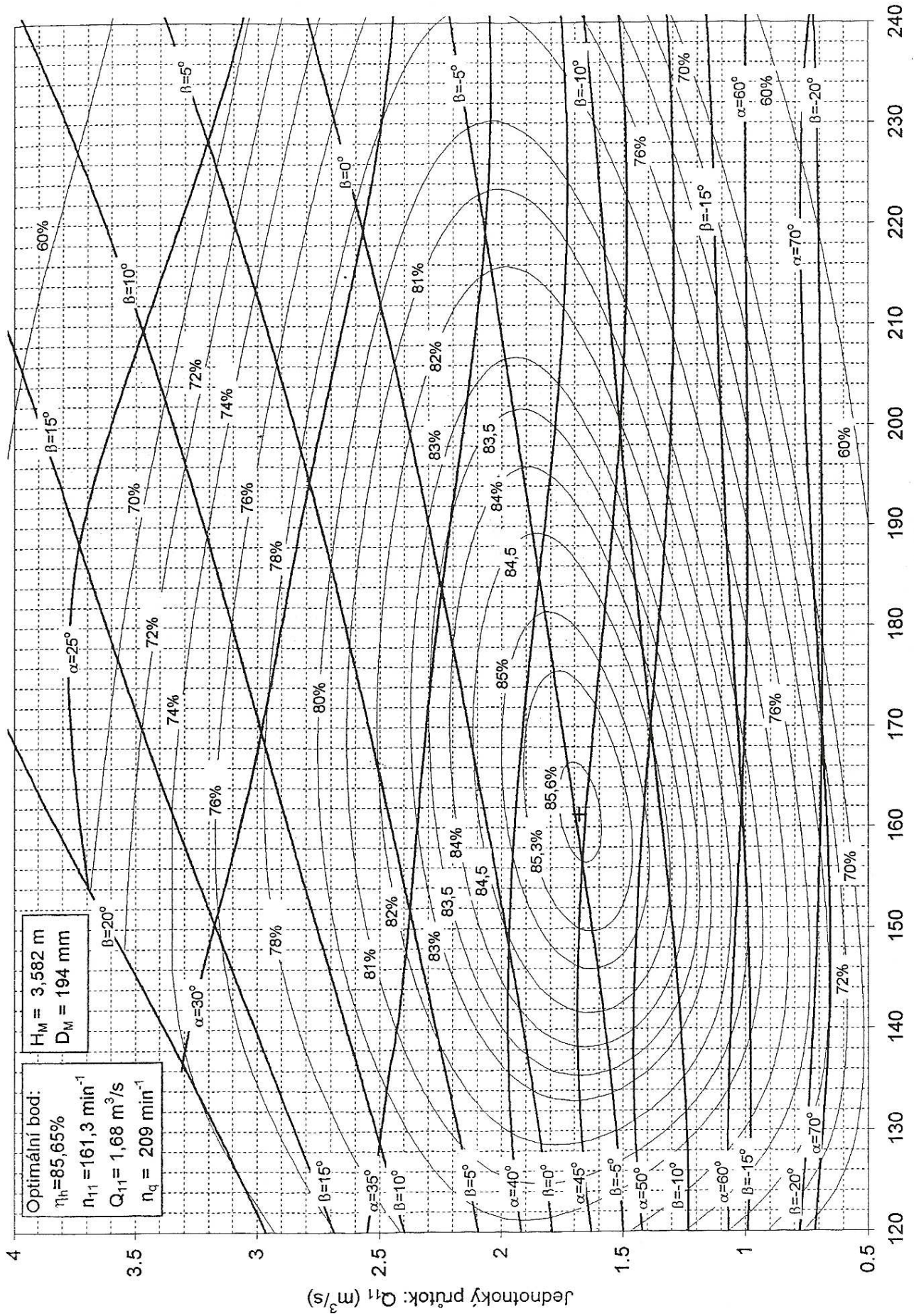
## Seznam použitých zdrojů

- [1] Melichar, J., Vojtek, J., Bláha, J. *Malé vodní turbíny: konstrukce a provoz*, Praha, ČVUT, 1998.
- [2] Melichar, J. *Malé vodní turbíny*, Praha, ČVUT, 1995.
- [3] Gabriel, P., Čihák, F., Kalandra, P. *Malé vodní elektrárny*, Praha, ČVUT, 1992.
- [4] Hájek, G. *Vodní motory*, Praha, 1947

## Seznam příloh

- Příloha 1** Účinnostní charakteristika turbíny 3-PKT-194
- Příloha 2** Orientační mapa malé vodní elektrárny Cacovice
- Příloha 3** Strojovna MVE Cacovice
- Příloha 4** Cacovická horizontální turbína pro generální opravě
- Příloha 5** Hřídel s oběžnými koly po opravě

Účinnostní charakteristika optimální vazby lopatek OK a RK: [ $\alpha; \beta; \eta_h = f(n_{11}; Q_{11})$ ] turbíny 3-PKT-194



Príloha 1: Účinnostní charakteristika turbíny 3-PKT-194



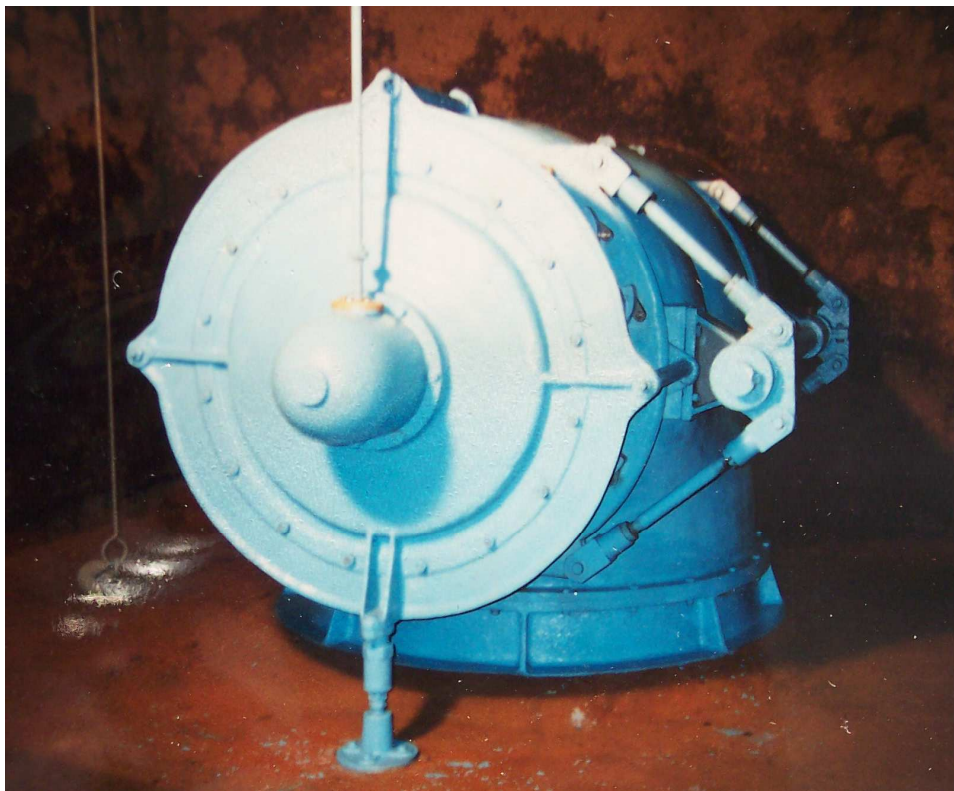
Příloha 2: Orientační mapa malé vodní elektrárny Cacovice



Příloha 3: Strojovna MVE Cacovice







Příloha 4: Cacovická horizontální turbína pro generální opravě



Příloha 5: Hřídel s oběžnými koly po opravě