

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**Návrh malé vodní elektrárny**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
Fakulta elektrotechnická  
Akademický rok: 2013/2014

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

Jméno a příjmení: **David RANC**  
Osobní číslo: **E13B0458P**  
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Elektrotechnika a energetika**  
Název tématu: **Návrh malé vodní elektrárny**  
Zadávající katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

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

1. Analyzujte a popište typy vodních motorů pro MVE.
2. Uveďte právní předpisy a normy týkající se malé vodní elektrárny.
3. Pro vybranou lokalitu navrhnete vhodné řešení využití jejího energetického potenciálu a návrh zhodnoťte z hlediska energetického, ekologického a ekonomického včetně přibližného výpočtu průměrných ročních výnosů elektrické energie a proveďte rozbor návratnosti stavby.
4. Zpracujte předběžný technický návrh.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah pracovní zprávy: 20 - 30 stran

Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

1. Dušička, P.: Malé vodní elektrárny, Bratislava, 2003, ISBN 80-88905-45-1
2. Holota, M.: Malé vodní elektrárny : projektování a provoz, Praha, 2002, ISBN 80-200-0828-4
3. Gabriel, P.: Malé vodní elektrárny, Praha, 1998, ISBN 80-01-01812-1
4. Melichar, J.: Malé vodní turbíny : konstrukce a provoz, Praha, 1998, ISBN 80-01-01808-0


Vedoucí bakalářské práce: Ing. Jaroslav Holý  
Katedra elektroenergetiky a ekologie

Datum zadání bakalářské práce: 14. října 2013

Termín odevzdání bakalářské práce: 9. června 2014

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



  
Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.  
vedoucí katedry

V Plzni dne 14. října 2013

## **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 bakalářské práce, je legální.

.....  
podpis

V Hůrkách dne 8. 3. 2014

David Ranc

## **Poděkování**

Rád bych poděkoval předně svému vedoucímu práce panu Ing. Jaroslavu Holému za cenné rady a odbornou pomoc při tvorbě této práce. Dále své rodině a přítelkyni za morální podporu, panu Vlastimilu Bradu za odborné konzultace a panu Vladimíru Frausovi za poskytnutí informací o jeho elektrárně.

## **Abstrakt**

V první části bakalářské práce je stručně popsána stavba, funkce a výhody či nevýhody malých vodních elektráren. Předmětem je mimo jiné také poukázat na různé typy vodních motorů pro malé vodní elektrárny a seznámení s právními předpisy a normami týkajícími se jejich výstavby a provozu. V druhé části je popsán návrh rekonstrukce malé vodní elektrárny v Přešticích na řece Úhlavě a je posouzeno, jestli se vzhledem k hydroenergetickému potenciálu v dané lokalitě ekonomicky vyplatí obnovovat zastaralé části původní elektrárny.

## **Klíčová slova**

Malá vodní elektrárna, vodní turbína, vodní energie, generátor, spád, průtok, výkon, účinnost, hydroenergetice potenciál, náhon, životní prostředí.

## **Abstract**

In first part of bachelor's thesis is briefly described construction, function and advantages or disadvantages of small water power stations. The subject is also to point out to various types of water engines used in small water power stations and introduction with legislations and norms, which refer to their construction and service. In the second part is described the project of reconstructing a small water power station in Přeštice on Úhlava river and is assessed if due to hydroenergetic potential in given region is economically profitable to restore outdated parts of original power station.

## **Key words**

Small water power station, water turbine, water energy, generator, slope, flow, power, efficiency, hydroenergetic potential, drive, environment.

## Obsah

<b>Seznam symbolů a zkratk</b> .....	<b>8</b>
<b>Úvod</b> .....	<b>9</b>
<b>1 Využití vodní energie v ČR</b> .....	<b>10</b>
<b>2 Malé vodní elektrárny</b> .....	<b>11</b>
2.1 Přeměna vodní energie na mechanickou.....	13
2.2 Hlavní části MVE.....	14
2.3 Vodní turbíny.....	17
2.3.1. <i>Francisova turbína</i> .....	18
2.3.2. <i>Kaplanova turbína</i> .....	19
2.3.3. <i>Peltonova turbína</i> .....	19
2.3.4. <i>Archimédova (šneková) turbína</i> .....	21
2.4 Elektrotechnické zařízení MVE.....	22
2.4.1. <i>Generátory používané v MVE</i> .....	22
<b>3 Legislativa MVE</b> .....	<b>26</b>
3.1 Vodní zákon.....	26
3.2 Energetický zákon .....	28
3.3 Podklady pro návrh a rekonstrukci MVE.....	29
3.3.1. <i>Hydrologické podklady</i> .....	30
3.3.2. <i>Hydroenergetické řešení</i> .....	30
<b>4 MVE Přeštice</b> .....	<b>31</b>
4.1 Popis lokality .....	31
4.2 Hydrologická data .....	32
4.3 Hydroenergetický potenciál .....	34
4.4 Návrh nové turbíny .....	35
4.5 Technické příslušenství .....	37
4.6 Ekonomické zhodnocení rekonstrukce .....	37
4.7 Výhody a nevýhody rekonstrukce.....	39
<b>5 Závěr</b> .....	<b>40</b>
<b>Použitá literatura</b> .....	<b>41</b>
<b>Seznam příloh</b> .....	<b>43</b>
<b>Přílohy</b> .....	<b>44</b>



## **Seznam symbolů a zkratk**

MVE – malá vodní elektrárna

Q – průtok turbínou

H – výškový rozdíl hladin (spád)

g – konstanta gravitačního zrychlení

$\eta_t$  – účinnost turbíny

$\eta_g$  – účinnost generátoru

$\eta_p$  – účinnost převodů

$\rho$  - hustota

s – skluz

P – výkon

n – otáčky

$n_s$  – synchronní otáčky

MZP – minimální zůstatkový průtok

## Úvod

„Voda jako matka života, voda jako geniální superpočítač, voda jako médium s vlastní pamětí i reakcemi.“ [1]

Energie vody je jeden ze stálých zdrojů obnovitelné energie na světě. Společně se sluneční a větrnou energií tvoří důležitou součást světového energetického systému. Na rozdíl od předchozích dvou uvedených typů zdrojů obnovitelné energie je síla vody daleko stálější a méně kolísavá. Díky tomu je také nejvyužívanější formou získávání energie jak v současné době, tak i z historického hlediska. Hydroenergetický potenciál patří mezi velmi cenné bohatství téměř každé země. Díky různým přírodním podmínkám a především míry technického a hospodářského rozvoje v dané zemi lze využívat mnoho rozdílných typů přeměn energie vody na elektrickou.

Vyspělé státy Evropy (např. Francie, Velká Británie, Německo, Rakousko, atd.) věnují výstavbě vodních elektráren velkou pozornost. Hydroenergetický potenciál svých řek, moří nebo nádrží využívají z 65 – 95 % a i nadále pokračují v dalších výstavbách. V České republice se v současné době využívá hydroenergetický potenciál pouze okolo 36 %. Česká republika své nejideálnější lokality pro výstavbu velkých vodních děl již vyčerpala, avšak získávání energie z vody v rozmezí malých výkonů má ještě nezanedbatelný význam i na našem území.

V naší zemi se projevuje konstantně rostoucí poptávka po obnovitelných a levných zdrojích energie. Cena fosilních paliv se neustále zvyšuje a jednoho dne navíc dojde k jejich totálnímu vyčerpání. Proto je nutné obracet veškerou pozornost směrem k obnovitelným zdrojům. Mezi moderní trendy navíc patří nejen výroba energie z přírodních zdrojů, ale i minimální zatěžování životního prostředí vlastní výrobou.

Cílem této práce je stručně vysvětlit funkci vodních elektráren a jejich strojních částí a následně popsat návrh rekonstrukce malé vodní elektrárny na řece Úhlavě v Přešticích jak ze strojního, tak i z energetického a ekonomického hlediska.

# 1 Využití vodní energie v ČR

Dnes už voda kuje železo a otáčí mlýnským kolem zpravidla jenom ve skanzenech lidové řemeslné výroby. I dnes využíváme vodní energii, avšak voda většinou neotáčí mlýnskými koly, zato roztáčí lopatky vodních turbín, jejichž točivý pohyb dokážeme využít k výrobě elektrické energie. [2]

Nejstarším zařízením v Čechách na přeměnu mechanické energie vody na elektrickou byla vodní elektrárna v Písku, vybudovaná v roce 1888. Byla zřízena v návaznosti na velký úspěch propagačního osvětlení centra města Františkem Křížikem 23. června 1887. (Písek se stal prvním městem v Čechách se stálým veřejným elektrickým osvětlením). Také v Praze existovaly již na začátku 20. století dokonce dvě vodní elektrárny – na Těšnově a na Štvanici. Těšnovská byla roku 1929 zrušena, štvanická je po rekonstrukci dodnes v provozuschopném stavu.

I když v ČR nejsou přírodní poměry pro budování velkých vodních energetických děl ideální, hrají v rámci obnovitelných zdrojů u nás vodní elektrárny velkou roli. Toky na našem území nemají takový potřebný spád ani množství vody, díky čemuž je podíl celkové výroby elektrické energie ve vodních elektrárnách v České republice poměrně malý. Důležitou úlohu však vodní elektrárny hrají jako doplňkový zdroj výroby elektrické energie a především je využíváno jejich schopnosti rychlého najetí na velký výkon a tudíž velmi flexibilního vyrovnání okamžité energetické bilance v elektrizační soustavě ČR.

Všechny velké vodní elektrárny (instalovaný výkon nad 10 MW), s výjimkou Dalešic, Mohelna a Dlouhých Strání, jsou situovány na toku Vltavy, kde tvoří kaskádový systém – *Vltavskou kaskádu*. Jejich provoz je automatický a jsou řízeny z centrálního dispečinku ve Štěchovicích. [3]

Na rozdíl od velkých vodních děl pracují malé vodní elektrárny převážně na menších vodních tocích, jejichž průtok závisí na ročním období a srážkách. Při výběru vhodné lokality pro konstrukci však může patřit MVE k neekologičtějšímu a neekonomičtějšímu zdroji vůbec. V ČR je v současné době v provozu okolo 550 malých vodních elektráren s instalovaným výkonem do 10 MW. [12]

## 2 Malé vodní elektrárny

Ve své podstatě lze považovat malé vodní elektrárny za velmi jednoduchá zařízení. Na vodní tok navazuje vtokový objekt (jez, přehrada), který soustřeďuje průtok a zvyšuje spád vodního toku. Voda je přivedena přivaděčem přes česle (hrubé a jemné), které zadržují mechanické nečistoty, do strojovny. Tam se hydraulická energie vody v turbíně mění na mechanickou. Mechanická energie z turbíny je přes hřídel přenášena do generátoru, kde se mění na elektrickou energii. MVE se skládají z několika základních částí [5] [12]:

- vzdouvací zařízení (hráze, jezy) - slouží ke vzduť vodní hladiny (zvětšení spádu) a k usměrnění průtoku do přivaděče,
- přivaděče - přivádějí vodu k vodní turbíně,
- česle - slouží k odstranění mechanických nečistot a zabraňují jejich vniknutí do turbíny,
- technologická zařízení – turbíny slouží k přeměně hydraulické energie vody na mechanickou, generátory přeměňují mechanickou energii na elektrickou,
- odpadní kanály - vrací vodu do původního koryta

Vodní elektrárny lze dělit do různých skupin podle rozdílných kritérií. Podle normy ČSN 75 0120 se vodní elektrárny dělí podle instalovaného výkonu na:

- *Malé vodní elektrárny (MVE) s instalovaným výkonem do 10 MW*
- *Střední vodní elektrárny s instalovaným výkonem od 10 MW do 200 MW*
- *Velké vodní elektrárny s instalovaným výkonem nad 200 MW*

Malé vodní elektrárny se dále dělí na:

- *Domácí vodní elektrárny s instalovaným výkonem do 35 kW*
- *Vodní mikroelektrárny s instalovaným výkonem od 35 kW do 100 kW*
- *Vodní minielektrárny s instalovaným výkonem od 100 kW do 1000 kW*
- *Průmyslové vodní elektrárny s instalovaným výkonem od 1 MW do 10 MW*

Pro správný výběr lokality na výstavbu MVE a při pořizování strojních částí jsou důležité především dvě veličiny – *využitelný spád* a *průtočné množství vody* v profilu toku, na který je daná elektrárna navrhovaná.

### **Spád**

Spád je výškový rozdíl vodních hladin. Rozlišují se dva typy spádů – hrubý a užitný. Hrubý spád,  $H_b$ , označuje rozdíl hladin při nulovém průtoku elektrárnou. Stanovuje se výškovou nivelací úseku od vtokového objektu (nad jezem) po úroveň spodní hladiny odpadu turbíny. Užitný spád,  $H$ , je výsledná hodnota, pokud od hrubého spádu odečteme hydraulické ztráty vznikající před a za vodním motorem, v přivaděči a v odpadu následkem poklesu hladiny horního toku při provozu a vzdmutím hladiny spodního toku.

### **Průtok**

Průtok,  $Q$ , je množství vody, které proudí měřeným místem za jednotku času. Údaje o průtoku v České republice poskytuje Český hydrometeorologický ústav a příslušná správa toku. Udávají se jako dlouhodobý průměrný průtok (např. roční, měsíční nebo denní). Z hlediska využitelnosti vodní energie jsou nejdůležitější denní průtoky, které informují o zaručeném průtoku v dané lokalitě po určitý počet dní.[11]

## 2.1 Přeměna vodní energie na mechanickou

Strojní část MVE je prostředek pro přeměnu energie vody, která je jejím zdrojem, na energii mechanickou a posléze pomocí generátoru na elektrickou. Lze využít mnoho typů vodních motorů, které se volí dle vlastností a stavebních možností na jednotlivých tocích tak, aby účinnost dané soustavy byla co největší.

První způsob je přímé využívání potenciální (polohové) energie vody na konkrétním spádu. Takto se v principu uplatňuje funkce některých vodních kol (např. Sagebienova i Zuppingerova turbína) nebo lze využít pro roztáčení netradiční vodní motory (Archimédův šroub). Velikost potenciální energie je závislá na místě, kde je postavena MVE. Voda proudí přívodem z přehrazeného místa, kde je soustředěna vyšší hladina, do míst s nižší hladinou. Tlak vytvořený rozdílnou velikostí těchto dvou potenciálů koná ve vodním motoru práci.

Druhý způsob, kterým je přeměna potenciální energie na kinetickou (pohybovou) a posléze na mechanickou práci, umožňuje efektivní využívání všech druhů turbín. Kinetická energie je přímo úměrná rychlosti proudícího média ve vodních tocích. Rychlost je také závislá na spádu toku, čehož se převážně využívá v rovnotlakých strojích. Obvodová rychlost těchto strojů musí být nižší než rychlost proudění vody. Při nesplnění této podmínky by lopatky rovnotlakého motoru pouze ustupovaly před proudem vody a nebyla by možná přeměna kinetické energie na mechanickou práci.

Všechny typy vodních motorů mají své specifické výhody a nevýhody. Je zcela běžné, že použití jednoho kola nebo turbíny v určité lokalitě bude bezproblémové, avšak kdyby na stejné lokalitě bylo použito jiné kolo, jiná turbína, mohlo by být provoz celé elektrárny spojen s velkými obtížemi. Díky těmto problémům se správný výběr vodního motoru musí velice pečlivě zvažovat, protože neexistuje žádný univerzální typ turbíny nebo kola, který by se mohl využít pro všechny lokality. Nelze dokonce ani s určitostí prohlásit, jestli je turbína lepší než vodní kolo nebo naopak. Záleží pouze na vlastnostech konkrétní lokality, způsobu provozu a druhu stroje, který má být vodním motorem poháněn. [6] [12]

## 2.2 Hlavní části MVE

Malá vodní elektrárna se neskládá pouze z turbíny a generátoru, který je s ní spojen. Pokud si máme představit, jak dílo ve skutečnosti vypadá, je nutné uvést několik dílčích částí.

### Odběrný objekt

Jedná se o speciální objekt postavený v hrázi (jezu) sloužící k odklonění vody z hlavního toku směrem do elektrárny. Za jakékoli situace musí zajistit dostatečný odběr čisté vody (bez znečištění od plovoucích těles, která by mohla vážně poškodit elektrárnu). Tuto funkci zajišťují tzv. *česle*, což jsou mřížové clony zapuštěné na dno toku, přes které se filtruje voda od velkých nečistot (kusy ledu, větve, listí). Většinou bývají na vodních elektrárnách česle dvoje za sebou – jedny hrubé (s širšími mezerami pro zastavení velkých těles) a druhé jemné (s úzkými mezerami pro zachycení menších plovoucích těles, která neprojdou turbínou). Jemné česle se musí pravidelně čistit a stírat od zachyceného odpadu. Odběrný objekt je někdy doplněn o lapák písku, aby zabránil zanášení náhonu nebo přívodního potrubí. Samotná elektrárna je navíc ještě chráněna stavidly, která mohou v krizových situacích nebo při údržbě přerušit průtok vody do potrubí.

### Náhon

Bývá zpravidla řešen buď lichoběžníkovým korytem, nebo v některých případech (např. pokud je v trase nějaká překážka) lze přivádět vodu do elektrárny potrubním systémem. Je navrhován tak, aby průtok vody nepřesahoval vymílicí rychlost pro materiál koryta a nedocházelo k jeho poškozování.

### Bezpečnostní přepad

Slouží k ochraně náhonu a samotné elektrárny před nadměrným přívalem vody. Musí být schopen zachytit všechny nadbytečné průtoky s dostatečnou rezervou tak, aby nedošlo k přeplnění hrázi náhonu nebo k jeho poškození. Čím delší je samotný náhon, tím je přepad potřebnější. Někdy bývá spojen s jalovou propustí a osazován před česlemi, kde strhává zachycené plovoucí předměty a odvádí je níže po toku.

### **Jalová propust'**

Jedná se o propust převádějící jalový průtok při odstavení elektrárny. Stavidlo zajišťuje úplné vypuštění náhonu při uzavření odběrného objektu. Využívá se při odstávkách, kontrole, čištění a údržbě náhonu a objektu elektrárny. Konstruuje se těsně před jemné česle, aby zajistila proplach celého náhonu.

### **Uzavírací stavidlo**

Je schopné úplně omezit průtok vody do objektu elektrárny. Neslouží však k regulaci průtoku. Používá se vždy při potřebě zastavit nebo rozběhnout vodní kolo nebo turbínu. Při přímé dodávce elektrického proudu do sítě je stavidlo spojeno s vypínačem, který ho uzavře, dojde-li k výpadku proudu.

### **Strojovna**

Nachází se v hlavní budově elektrárny a obsahuje strojní a elektrotechnické komponenty – generátor, převody, transformátor, ovládání, rozvaděč a další.

### **Vodní motor**

Jedná se buď o turbínu, nebo vodní kolo. Výjimečně se lze setkat se zvláštními typy vodních motorů, z nichž za zmínku stojí asi hlavně Archimédův šroub, který je popsán v kapitole 2.3 *Vodní turbíny*.

### **Převody**

Převod rotace turbíny nebo kola na generátor je řešen pomocí převodního systému skládajícího se z ozubených kol a klínovým nebo plochým řemenem. Zajišťuje se tak transformace relativně malých otáček turbíny na vysoké otáčky (750 ot/min a výš), které generátor potřebuje pro indukci napětí.



## Savka

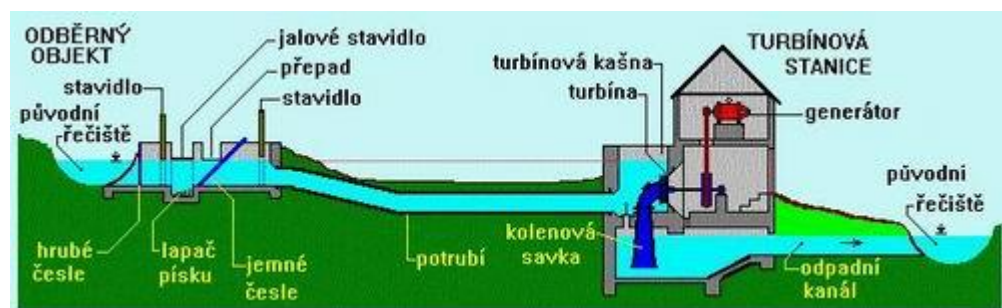
Savka neboli sací roura se nachází převážně v přetlakových turbínách. U turbín rovnotlakých se jedná o odpadní kanál. Pokud je za oběžným kolem vytvořen sloupcem vody podtlak, jedná se o savku. Díky ní lze umístit turbínu v libovolné výšce nad spodní hladinou (až do mezí daných kavitací). Stroj mohl být takto přizpůsoben potřebám provozovny i dané lokalitě a často se nemusely řešit složité převody.

## Kavitace

Kavitace je nežádoucí jev, při kterém vznikají dutiny v kapalině při lokálním poklesu tlaku, následovaný jejich implozí. Pokles tlaku může zapříčinit zvýšení rychlosti nebo intenzivní působení akustické vlny. Dutina je zprvu vyplněna vakuem, poté se postupně plní párou okolní kapaliny. Jakmile podtlak, který kavitaci způsobil, zmizí, dojde ke zhroucení dutiny za vzniku rázové vlny s destruktivním účinkem na okolní materiál. O kavitaci hovoříme hlavně ve spojení s turbínami, které jsou vystaveny podtlaku ve vodě při velké rychlosti a jejich lopatky mohou být po delším působení kavitace zcela zničeny.

## Odpadní kanál

Slouží k odvedení vody z elektrárny. Bývá řešen stejně jako náhon, ale neosazuje se již stavidlem na výtoku nebo jen zcela výjimečně. Takové řešení je voleno pouze v případě ochrany úseku před vzduťou spodní vodou za povodní nebo jako provizorní hrazení v případě čištění a kontroly odpadního kanálu.[9]



Obr. 1 – Obecné schéma malé vodní elektrárny [převzato z 10].

## 2.3 Vodní turbíny

Vodní turbína je rotační vodní motor, jehož rotující částí je oběžné kolo s lopatkami, kterému voda předává svou mechanickou energii. Hlavní části vodní turbíny jsou oběžné kolo a rozváděcí ústrojí, které přivádí médium do oběžného kola. Základní dělení vodních turbín je na:

- **Rovnotlaké (akční) turbíny** – veškerá polohová energie se mění na pohybovou už v rozváděcích kanálech (Peltonova a Bánkiho turbína)
- **Přetlakové (reakční) turbíny** – část polohové energie se mění v kinetickou v kanálech rozváděcího kola a část se mění přímo při přechodu vody oběžným kolem (vrtulová, Kaplanova a Francisova turbína)

Dále lze turbíny dělit dle směru proudění média oběžným kolem vzhledem k hřídeli na:

- **Radiálně-odstředivé (centrifugální)** – s vnitřním vtokem (médium protéká oběžným kolem směrem od hřídele – Fourneyronova turbína)
- **Radiálně-dostředivé (centripetální)** – s vnějším vtokem (médium protéká oběžným kolem směrem k hřídeli – Francisova turbína)
- **Axiální** – médium protéká oběžným kolem rovnoběžně s osou oběžného kola (Kaplanova turbína)
- **Radiálně-axiální** – médium protéká oběžným kolem od vstupu radiálně a dále mění směr na rovnoběžný s osou otáčení (moderně řešená Francisova turbína)
- **Diagonální** – médium protéká oběžným kolem šikmo k ose otáčení hřídele (Deriazova turbína)
- **Se šikmým průtokem** – médium vtéká na lopatky oběžného kola z boční strany a vystupuje rovnoběžně s osou
- **Tangenciální** – médium proudí na lopatky oběžného kola v tangenciálním směru (Peltonova turbína)
- **S dvojnásobným průtokem** – médium vstupuje centripetálně a vystupuje centrifugálně

Při výběru turbíny se musí zohlednit vlastnosti a podmínky vodního díla. Nejvíce osazovanými turbínami jsou Francisova nebo Kaplanova, a to i v různých moderních provedeních. Na tocích s vysokým spádem (i 500 m) se lépe uplatní akční Peltonova turbína nebo Dériazova turbína. V MVE nachází nejčastější využití malá horizontální Bánkiho turbína a modifikovaná Francisova turbína, které jsou ideální pro malé výkony na malých spádech. Moderním trendem však je nahrazovat zastaralé Francisovy turbíny šroubovými (šnekovými) turbínami. Technologie Francisových turbín se ale nadále vyvíjí a novější modely mohou dosahovat i výkonů nad 1000 MW.

Vodní turbíny jsou technologicky nejdokonalejšími mechanickými motory, které byly doposud vyrobeny. Jejich účinnost se pohybuje okolo 95 %. Teoretický výkon vodní turbíny lze spočítat pomocí vztahu:

$$P_{ef} = 9,81 * Q * H * \eta_T * \rho \quad [\text{W}], \quad (2.1)$$

kde  $Q$  je průtok turbínou [ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ],  $H$  je výškový rozdíl hladin [m],  $9,81$  je konstanta tíhového zrychlení  $g$  [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ ],  $\eta_t$  je účinnost vodního motoru (turbíny) a  $\rho$  je hustota vody ( $1000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ).

### 2.3.1. Francisova turbína

Francisova turbína byla vytvořena Jamesem B. Francisem v roce 1848, jemuž se podařilo vylepšit dosavadní typy turbín a dosáhl celkově až 90 % účinnosti. Jedná se o přetlakovou radiálně-axiální turbínu nejvhodnější pro malé (1,5 – 5 m) i větší (30 – 500 m) spády. Existují dvě varianty Francisovy turbíny, a to podle uložení hřídele – *vertikální* a *horizontální*.

Princip činnosti je jak pro vertikální, tak i pro horizontální typ takřka stejný. Médium je vedeno spirálou do rozváděcího kola, jehož lopatky jsou nutné pro udržení směru a regulaci toku vody. Rotor turbíny se nachází mezi vysokotlakým spirálovým přívodem a nízkotlakou savkou, která se nachází většinou v patě přehrady. Savka je navržena tak, aby voda poté, co předá svou energii lopatkám rotoru, opouštěla rotor za snížené rychlosti a tlaku. Oběžné kolo má lopatky pevné, což neumožňuje použití této turbíny v lokalitách s velkým kolísáním spádu nebo průtoku. Konstrukčně se však dá přizpůsobit rychlému chodu. Podle toho rozeznáváme Francisovy turbíny pomaloběžné, normální, rychloběžné a expresní. Vysokou účinnost mají pouze v místech s ideálními podmínkami pro provoz – mimo ně účinnost prudce klesá.

Vertikální turbína má v porovnání s horizontální turbínou větší účinnost, díky přímé savce. Tato výhoda se však ztrácí v převodech. Na menších spádech má za ozubeným převodem ještě druhý převod řemenový. U moderních rekonstrukcí se někdy vystačí jen se samotným řemenovým převodem na vertikálně postavený pomaloběžný generátor. U velkých turbín jsou vícepólové generátory umístěny přímo na ose. Menší a starší turbíny jsou konstruovány s oběžným kolem tzv. normáloběžným, ale velká část strojů má oběžné kolo rychloběžné.

### **2.3.2. Kaplanova turbína**

Je typickým představitelem přetlakových vodních turbín. Byla vyrobena v roce 1919 Viktorem Kaplanem, který zdokonalil již existující vrtulovou turbínu. Celkové zlepšení spočívalo v tom, že vynalezl pro vrtulovou turbínu systém natáčení lopatek oběžného kola jako další regulační prvek.

Hlavními částmi Kaplanovy turbíny jsou spirála (kašna), rozváděcí kolo, oběžné kolo a savka. Oběžné kolo je umístěno přímo pod rozváděcím, od kterého je médium odváděno savkou do odpadního koryta. Počet lopatek na oběžném kole je 3 – 10, což závisí na využívaném spádu. Při instalaci záleží na rozdílu hladin a podle toho se instalují buď svislé, nebo vodorovné osy otáčení.

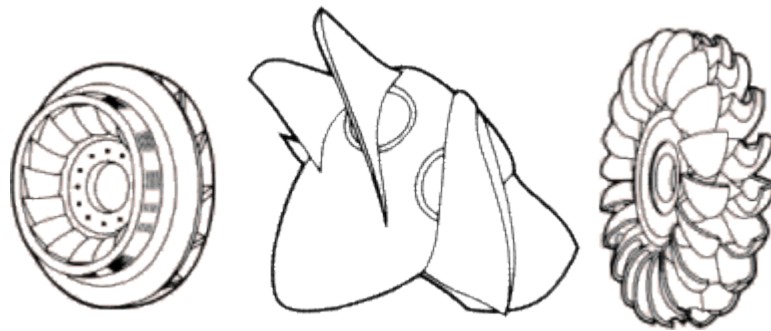
Účinnost Kaplanovy turbíny se díky regulaci lopatek pohybuje od 88 do 95 %. Vzhledem ke složité konstrukci oběžného kola jsou mnohem nákladnější než ostatní typy. Pro MVE se používají na nejnižší spády (přibližně do 10 m) a jejich oběžná kola bývají s 3 – 5 lopatkami.

### **2.3.3. Peltonova turbína**

Peltonova turbína je rovnotlaká tangenciální turbína. Byla vynalezena v roce 1880 Lesterem Allenem Peltonem, který se snažil vyřešit pohon na těžbu zlata z řeky. Účinnost se pohybuje mezi 80 – 95 % (záleží na velikosti turbíny). Je vhodná pro střední a velké spády (30 – 200 m) s malým i středním průtokem. Výkon lze regulovat změnou průtoku vody lopatkami.

Voda je přiváděna k turbíně potrubím kruhového průřezu, které vede k jedné nebo více dýzám (úzká trubice, sloužící ke zvyšování výtokové rychlosti vody). V dýze kruhového

průřezu se celý spád vody přetransformuje na pohybovou energii. Voda vstoupí tangenciálně do oběžného kola osazeného lžícovitými lopatkami. Břit uprostřed lopatek rozdělí paprsek na dvě poloviny a lžícovitý tvar lopatky se snaží otočit směr tekoucí vody zpět. Změna směru způsobí předání energie oběžnému kolu. Vzájemným souběhem rychlosti vody tekoucí po lopatce při současném otáčení oběžného kola dojde k tomu, že voda opouští lopatky na vnější straně s minimální zbytkovou rychlostí a volně odchází do obou stran z oběžného kola ven a padá do odpadu pod turbínou. [6] [9] [12]



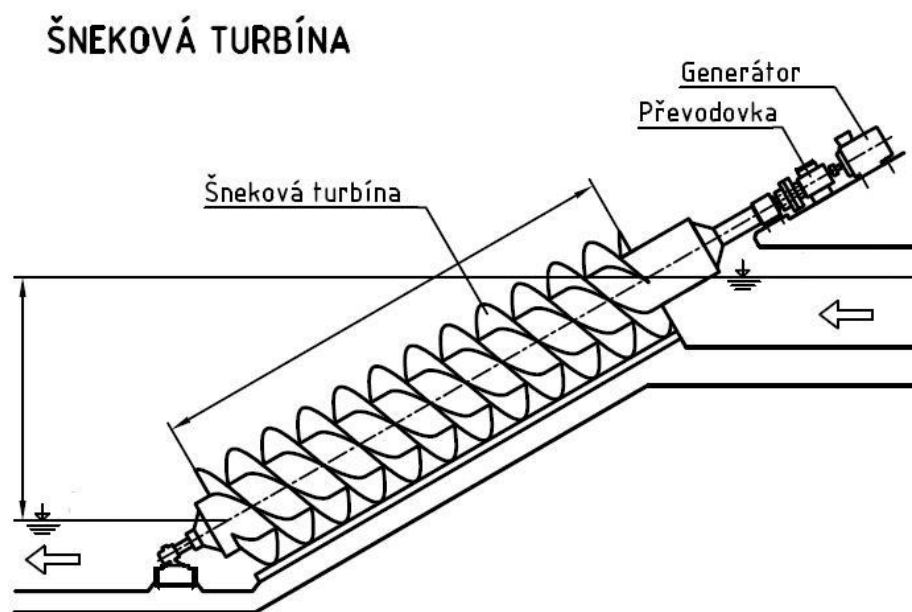
Obr. 2 – Zleva – Francisova, Kaplanova a Peltonova turbína [převzato ze 7].

### 2.3.4. Archimédova (šneková) turbína

Funkce této turbíny je založena na principu Archimédova šroubu, kde proudí voda opačným směrem. Archimédův šroub byl používán už od starověku a díky relativně jednoduché konstrukci je účinný a spolehlivý. Obrácením šnekové hřídele začne čerpadlo fungovat jako turbína, tato turbína je velmi účinná. Uplatnění našla na malých vodních elektrárnách, kde jsou malé spády (od 1 do 10 m) a velké kolísání průtoků.

Princip činnosti je velmi jednoduchý. Voda přitéká volně k první komůrce, do níž se vlévá. Na zakřivené stěny závitů působí svou hmotností, čímž se odkrucuje směrem dolů. Ve šnekovnici se vytvoří tůň, které jsou oddělené závitem, a ty působí svou hmotností na závit po celou dobu svého klesání. Na konci šneku je voda volně vypuštěna do odpadního kanálu.

Tento nový systém se výhradně využívá jako motor v MVE spolupracující s asynchronním generátorem napojeným do veřejné sítě. Využití nachází i jako doplňkový vodní motor, který využívá mařenou energii jalovými přepady u rybníků a rekreačních nádrží. Délka šroubu záleží na spádu a sklonu vodního díla. Používané sklony jsou od 22° do 35°. Při větším spádu se využívá strmý žlab a méně chodů šneku. Strmější a vícechodý šnek má výrazně menší hltnost, avšak o trochu vyšší účinnost.



Obr. 3 – Archimédova turbína [převzato z 8].

## 2.4 Elektrotechnické zařízení MVE

Během návrhu stavební části MVE je třeba mít rozmyšlený rozsah elektrického zařízení kvůli dispozici strojovny elektrárny. Základní prvky elektrického systému tvoří:

- Generátor
- Vývody z generátoru
- Rozvodna
- Blokovaný transformátor
- Transformátor vlastní spotřeby
- Pomocná zařízení (odpojovače, budiče generátoru, vypínače, jističe)

Využití vodní energie pro přeměnu mechanické energie na elektrickou umožnilo až zdokonalení elektrických točivých strojů a možnost přenosu elektřiny na větší vzdálenosti. Generátory v MVE jsou obvykle připojeny přenosovými a transformačními zařízeními přímo k místu spotřeby. Celý obvod doplňují spínací, jisticí, řídicí, měřicí a zabezpečovací přístroje. Při vlastním návrhu napěťové úrovně generátoru je určující veličinou požadovaný výkon vodního zdroje.

Generátory stejnosměrného proudu jsou konstrukčně složité a jejich použití se v dnešní době omezuje pouze jako pomocné zdroje, proto pro většinu MVE je vhodné využít generátory na střídavý proud. [4]

### 2.4.1. Generátory používané v MVE

Generátory mohou být střídavé, ale i stejnosměrné. Střídavý generátor, nebo také hydroalternátor (termín, který se využívá v souvislosti s vodními elektrárnami), je nedílnou součástí elektrického systému elektrárny, jehož funkcí je přeměna mechanické energie hřídele na energii elektrickou. Generátory se obecně dělí na synchronní a asynchronní, přičemž synchronní nejsou tolik žádané jako asynchronní. Stejnosměrné generátory se nazývají dynamy.

### Synchronní generátory

Synchronní generátor se skládá ze statoru se střídavým trojfázovým vinutím a z rotoru s budícím vinutím. Konstrukce závisí na velikosti generátoru a počtu pólů, který musí být stejný jak pro stator, tak i pro rotor generátoru. Počet pólových dvojic společně s frekvencí sítě určuje synchronní otáčky generátoru, které lze vyjádřit vztahem:

$$n = \frac{f \cdot 60}{p}, \text{ resp. } n = \frac{3000}{p} \quad (2.2)$$

kde  $n$  jsou synchronní otáčky generátoru [ot/min],  $f$  je frekvence sítě (50 Hz) a  $p$  je počet pólových dvojic.

Rotor synchronního generátoru se otáčí synchronními otáčkami a vytváří točivé magnetické pole. Magnetické pole indukuje proud ve třech fázích, které jsou od sebe vzájemně posunuté o úhel  $120^\circ$ . Rotor je navíc vybaven tlumícím vinutím, které zabraňuje kolísání elektrických veličin generátoru. Budící stejnosměrný proud se do rotoru přivádí pomocí kroužků a kolektorů nebo přímo hřídelí. Synchronní generátor má tu výhodu, že může regulovat napětí i frekvenci, kterou vyjadřuje vztah (2.2). Pro zadanou frekvenci sítě 50 Hz lze využít otáčky 3000, 1500, 750, 600, 500, atd. Napětí je ovlivňováno změnou budícího proudu. Zmíněné způsoby regulace se používají při samostatném provozu generátoru do autonomní sítě. Volba účinníku nebo jmenovitého jalového výkonu generátoru závisí na charakteru zatížení (roli MVE v elektrizační soustavě). Činný výkon odebíraný z generátoru se musí rovnat mechanickému výkonu vodního stroje, zmenšenému o dané mechanické i elektrické ztráty. Jalový výkon nijak nezatěžuje hydroagregát mechanickým momentem, ale zatěžuje generátor statorovým proudem.

Provoz MVE v samostatném chodu se vidí dnes jen zřídka. Při výpadku sítě může nahradit zdroj nebo může sloužit k napájení objektu v přilehlé oblasti. Daleko častější je provoz synchronního generátoru paralelně s elektrizační soustavou. Síť je brána za výkonově stabilní – s pevným napětím a frekvencí, což malé výkony generátoru nemohou ovlivnit. Generátor dodává do sítě jak činný, tak i jalový výkon. Činný výkon je dán mechanickým výkonem vodního stroje a souvisí se zátěžovým úhlem generátoru. Jalový výkon, dodávaný do sítě (nebo odebíraný ze sítě), je dán velikostí budícího proudu. Pokud generátor pracuje paralelně se sítí, hrozí, že dojde k výpadku ze synchronizmu a následnému možnému poškození stroje.



Fázování generátoru na síť je jemné při synchronizaci napětí, frekvence a fáze nebo samosynchronizací. Při samosynchronizaci se připojí generátor k síti přibližně v synchronních otáčkách v nenabuzeném stavu a následně se nabudí. Vzniká ovšem 2,5 – 3krát větší proudový ráz než je velikost jmenovitého proudu.

### ***Asynchronní generátory***

Asynchronní generátor je v současné době jedním z nejpoužívanějších zdrojů na malých vodních elektrárnách. Mezi jeho největší výhody můžeme zařadit spolehlivost, jednoduchost a minimální nároky na údržbu.

Asynchronní generátor lze vyrobit z jakéhokoliv asynchronního motoru s kotvou nakrátko (výjimečně s kotvou kroužkovou) připojením na hřídel vodní turbíny. Stator má trojfázové střídavé vinutí. Pokud přivedeme na svorky statoru trojfázové napětí, vznikne točivé magnetické pole, které v rotorovém vinutí indukuje proudy, jejichž silovými účinky se rotor otáčí ve stejném směru, jaký má točivé magnetické pole, a stroj se chová jako motor. Pokud rotor dosáhne synchronních otáček (rychlost otáčení rotoru je stejná jako rychlost otáčení točivého magnetického pole), žádné proudy se neindukují. Díky tomu se v motorickém chodu rotor za točivým magnetickým polem zpožďuje a vzniká tzv. *skluz*:

$$s = \frac{n_s - n}{n_s}, \quad (2.3)$$

kde  $s$  je skluz,  $n_s$  jsou synchronní otáčky magnetického pole a  $n$  jsou otáčky stroje.

Jestliže se dodá motoru, který je připojen hřídeli na vodní turbínu, rychlost vyšší, než je rychlost točivého magnetického pole, skluz bude záporný, rotor bude brzděn a do sítě bude dodáván činný výkon. Ze sítě je však odebírán výkon jalový kvůli vlastní magnetizaci. Odběr jalového výkonu ze sítě je nevýhodný, protože ji zatěžuje zvýšeným proudem. V rámci kompenzace se do obvodu mohou zapojit kondenzátory, avšak vzniká nebezpečí vzniku přepětí na svorkách paralelní kombinace kondenzátor – generátor, samobuzením při výpadku sítě a následném zvýšení otáček hydroagregátu. Tento stav lze omezit rozpojením uvedené kombinace nebo dimenzováním kompenzačního výkonu kondenzátorů na podkritickou hodnotu, tzn. na výkon, při kterém nemůže nastat samobuzení, pokud stroj je v chodu naprázdno.

Jednotlivé generátory se mohou lišit jmenovitými otáčkami, provedením statorového vinutí, jmenovitým výkonem, atd. Asynchronní generátory se většinou dimenzují výkonově co nejlépe k maximálnímu výkonu turbíny. Pokud je jako asynchronní generátor použit

asynchronní motor, lze ho zatížit stejným elektrickým výkonem, který se rovná jeho příkonu, tedy jmenovitým proudem. V praxi se hodnota maximálního získaného výkonu na svorkách generátoru vypočítá z podílu jmenovitého výkonu a účinnosti stroje.

Fázování generátoru se provádí připojením stroje do sítě, pokud jeho otáčky jsou blízké synchronním. Asynchronní generátor nepotřebuje oproti synchronnímu přídavná elektrická zařízení, čímž se zmenšuje jeho hmotnost a cena. Mezi jeho nevýhody patří odběr jalového výkonu ze sítě, neschopnost samostatného chodu a nižší účinnost při částečném výkonovém zatížení. [4] [12]

### ***Dynamo***

Stejnoseměrný stroj může pracovat jako motor, i jako dynamo. Jedná se v podstatě o střídavý stroj, podobný synchronnímu, ale s mechanickým usměrňovačem – komutátorem. Stator dynama se skládá z elektrotechnických plechů a jsou k němu přidělány hlavní a pomocné pólové nástavce. Rotor je složen z izolovaných elektrotechnických plechů a na jeho hřídel je připojen komutátor.

U malých dynam se používají na statoru permanentní magnety, zatímco u větších strojů jsou místo permanentních magnetů elektromagnety, které se napájí stejnosměrným proudem. Každý stejnosměrný stroj může fungovat jako generátor, ale i jako motor. Důležitý je pouze způsob mechanického a elektrického připojení.

Při volbě generátoru do MVE je tato vlastnost velice důležitá. Často se stává, že dynamo při uzavření přítoku vody fungují jako motory a pohání stroje pro čištění česel jinou údržbu na MVE.

Při volbě generátoru musíme zohlednit několik důležitých aspektů, především otáčky. U vodních turbín se otáčky pohybují v desítkách za minutu (ale i více), musíme k tomuto provozu generátor přizpůsobit. Zpravidla větší generátory pracují při nižších otáčkách a menší generátory pracují při větších otáčkách. S velikostí ovšem roste i komplikovanost uložení, chlazení a pořizovací cena, je nutná v této záležitosti najít zlatou střední cestu. Záleží pouze na majiteli, jestli si žádá větší generátor a za vyšší cenu nebo generátor menší, levnější a připojený na převodovou soustavu, aby mohl pracovat i v nižších otáčkách. Ve druhém případě je bohužel nutné počítat se ztrátami na převodech a tím i se sníženou účinností.

### 3 Legislativa MVE

Právních předpisů pro výstavbu, rekonstrukci a provoz MVE je velmi mnoho. Všechna nařízení, normy a právní předpisy úzce souvisí s normou ČSN 75 2601 s názvem a označením – *Malé vodní elektrárny – Základní požadavky*, která nabyla platnosti v listopadu 2010 a nahradila dosavadní normu ČSN 73 6881 z roku 1985. Tato norma platí pro navrhování, provoz a rekonstrukce MVE o celkovém instalovaném výkonu do 10000 kW. Z hlediska legislativy problematiku MVE definuje několik hlavních zákonů: [13]

- *Zákon č. 254/2001 Sb.*, o vodách a o změně některých zákonů (vodní zákon)
- *Zákon č. 458/2000 Sb.*, o podmínkách podnikání a o výkonu státní správy v energetických odvětvích a o změně některých zákonů (energetický zákon)

Návrh, rekonstrukce a vlastní provoz MVE je spojen s mnoha dalšími právními předpisy. Vzhledem k obsahu práce zde uvedu pouze několik důležitých:

- *Zákon č. 505/1990 Sb.*, o metrologii
- *Zákon č. 17/1992 Sb.*, o životním prostředí
- *Zákon č. 114/1992 Sb.*, o ochraně přírody a krajiny
- *Zákon č. 406/2000 Sb.*, o hospodaření s energií
- *Zákon č. 100/2001 Sb.*, o posuzování vlivů na životní prostředí
- *Zákon č. 99/2004 Sb.*, o rybářství
- *Zákon č. 183/2006 Sb.*, o územním plánování a stavebním řádu
- *Vyhláška č. 51/2006 Sb.*, o podmínkách připojení k elektrizační soustavě

#### 3.1 Vodní zákon

Účelem tohoto zákona je chránit povrchové a podzemní vody, stanovit podmínky pro hospodárné využívání vodních zdrojů a pro zachování i zlepšení jakosti povrchových a podzemních vod, vytvořit podmínky pro snižování nepříznivých účinků povodní a sucha a zajistit bezpečnost vodních děl v souladu s právem Evropských společenství. Účelem tohoto zákona je též přispívat k zajištění zásobování obyvatelstva pitnou vodou a k ochraně vodních ekosystémů a na nich přímo závislých suchozemských ekosystémů.

Zákon upravuje právní vztahy k povrchovým a podzemním vodám, vztahy fyzických a právnických osob k využívání povrchových a podzemních vod, jakož i vztahy k pozemkům a stavbám, s nimiž výskyt těchto vod přímo souvisí, a to v zájmu zajištění trvale udržitelného užívání těchto vod, bezpečnosti vodních děl a ochrany před účinky povodní a sucha. V rámci vztahů upravených tímto zákonem se bere v úvahu zásada návratnosti nákladů na vodohospodářské služby, včetně nákladů na související ochranu životního prostředí a nákladů na využívané zdroje, v souladu se zásadou, že znečišťovatel platí.

Při rekonstrukci, návrhu a provozu MVE je nutné se řídit §8, odst.1, který pojednává o povolení k nakládání s povrchovými nebo podzemními vodami. Jde-li o povrchové vody, jedná se o nakládání s těmito vodami:

1. k jejich odběru,
2. k jejich vzdouvání, popřípadě akumulaci,
3. k využívání jejich energetického potenciálu,
4. k užívání těchto vod pro chov ryb nebo vodní drůbeže, popřípadě jiných vodních živočichů, za účelem podnikání,
5. k jinému nakládání s nimi

Povolení k nakládání s vodami se vydává fyzickým nebo právnickým osobám k jejich žádosti. Fyzická nebo právnická osoba, která má platné povolení k nakládání s vodami podle odstavce 1 nebo podle předchozích předpisů (dále jen "oprávněný") je oprávněna nakládat s vodami v rozsahu a k účelu po dobu uvedenou v platném povolení (§8 odst.2).

Povolení k nakládání s vodami pro využívání jejich energetického potenciálu nemůže být vydáno na dobu kratší než 30 let. Vodoprávní úřad postupem podle § 12 odst. 2 dobu platnosti povolení prodlouží o dobu stanovenou ve stávajícím povolení, nebyla-li oprávněnému pravomocně uložena sankce za opakované porušování povinností stanovených tímto zákonem nebo podle něho (§9 odst.6).

Povolení k nakládání s vodami nezakládá práva k cizím pozemkům a stavbám ani nevzniká vodoprávnímu úřadu, správci vodního toku nebo vlastníku vodního díla právní povinnost náhrady oprávněným za nemožnost nakládat s vodami v maximálním povoleném množství a s určitými vlastnostmi (§11 odst.2).

V případě nevyužívání vydaného povolení po dobu delší než 2 let může vodoprávní úřad z moci úřední povolení k nakládání s vodami změnit nebo zrušit (podle §12 odst. 1a). To

samé může nastat, pokud oprávněný nedodrží stanovený hladinový limit podzemních vod (podle §12 odst.1c).

Vodoprávní úřad (podle §15 odst.4) zastává funkci speciálního stavebního úřadu podle zvláštního zákona a podle §15 odst.3 stanoví ve stavebním povolení povinnosti (podmínky), za kterých je vydává, a určuje účel, kterému má vodní dílo sloužit.

Při provozu MVE se musí oprávněný řídit §36 odst.1 o minimálním zůstatkovém průtoku, který ještě umožňuje obecné nakládání s povrchovými vodami a ekologické funkce vodního toku. Podle §36 odst.2 stanoví minimální zůstatkový průtok vodoprávní úřad v povolení k nakládání s vodami s přihlédnutím k podmínkám vodního toku a charakteru nakládání s vodami. Dále stanoví místo a způsob měření minimálního zůstatkového průtoku. [15]

### **3.2 Energetický zákon**

Tento zákon zpracovává příslušné předpisy Evropské unie a upravuje v návaznosti na přímo použitelné předpisy Evropské unie podmínky podnikání a výkon státní správy v energetických odvětvích, kterými jsou elektroenergetika, plynárenství a teplárenství, jakož i práva a povinnosti fyzických a právnických osob s tím spojené.

Pro vlastníka MVE je důležité se řídit §3 odst.1, který pojednává o podnikání v energetických odvětvích a zahrnuje jak výrobu elektrické energie, tak i přenos, distribuci a obchod s elektřinou.

Podle §3 odst.2 se přenos a distribuce elektřiny uskutečňuje ve veřejném zájmu a na stavby, které jsou součástí přenosu, distribuce nebo výroby může díky zákonu o vyvlastnění majitel vodní elektrárny uplatňovat svůj nárok.

Dále podle §3 odst.3 se může podnikatelem stát buď fyzická, nebo právnická osoba na území České republiky pouze na základě licence udělené Energetickým regulačním úřadem. Licence se podle §4 odst.1 uděluje na 25 let a to na výrobu, přenos i distribuci elektrické energie. Fyzická osoba musí pro udělení licence splňovat podle §5 odst.1 podmínky – dosažení věku 18 let, úplná způsobilost k právním úkonům, bezúhonnost, odborná způsobilost nebo ustanovení odborného zástupce podle §6.

Při podání žádosti o licenci je právnická nebo fyzická osoba povinna doložit, že výrobu, distribuci nebo přenos může zajistit dostatečnými finančními a technickými prostředky. Jestli

žadatel o licenci nepoužívá vlastního energetického zařízení, musí doložit písemný souhlas příslušného vlastníka, že může provozovat jeho zařízení pro vlastní potřeby. [14]

### 3.3 Podklady pro návrh a rekonstrukci MVE

Při návrhu MVE se vychází z nezbytných technických, hydrologických, geodetických a stavebních podkladů, požadavků v rámci ochrany přírody a životního prostředí. Samotný návrh je přímo závislý na zařízení, které vytváří pro MVE potřebný spád. Je nutné rovněž zhodnotit ekologický dopad na okolní prostředí při její kompletní rekonstrukci nebo výstavbě.

MVE se navrhuje jako průtočná, která neovlivňuje v dané lokalitě průtok vodního toku, nebo jako akumuláční využívající akumulace průtoků ve vodní nádrži a potřebných odběrů z jejich prostorů. V případě, že se nejedná o prvotní návrh nové MVE, nýbrž o rekonstrukci již stávající, je nutné vypracovat nový vodohospodářský plán, který vychází z podmínek energetického využití vody protékající MVE a kterým se posuzuje, zdali se hlavní parametry vzdouvacího zařízení vlivem nových podmínek nezmění. Je nutné navrhovat její nové nebo doplňující součásti tak, aby nebyla ohrožena funkce a bezpečnost vzdouvacích zařízení v době rekonstrukce.

Z výchozích podkladů, podmínek v dané lokalitě, po ekologickém zhodnocení vodního toku a po stanovení základních parametrů MVE se podle normy ČSN 75 0120 navrhne odpovídající typ MVE. Podle celkového instalovaného výkonu se MVE dělí do tří kategorií, které jsou uvedené v *Tabulce č.1*.

Kategorie MVE	Výkon MVE
I	1 až 10 MW včetně
II	100 kW až 1 MW včetně
III	do 100 kW včetně

*Tabulka č. 1 – Třídění MVE podle instalovaného výkonu [převzato z 12]*

Rozsah podkladů a hloubka zpracování průzkumu jsou závislé na kategorii MVE a složitosti podmínek daných umístěním MVE vzhledem k vodnímu toku a na druhu stávajícího vzdouvacího zařízení. U rekonstruovaných MVE, kde se pouze nahrazují staré technologické

zařízení novými, je nezbytné provést statické posouzení stávajících konstrukcí MVE v případě, že by změna ovlivnila negativně původní nosné konstrukce a nedošlo tak k lokálnímu porušení (eroze, popraskání, koroze, atd.).

### **3.3.1. Hydrologické podklady**

Základními podklady pro návrh MVE jsou hydrologické údaje, poskytované Českým hydrometeorologickým ústavem podle ČSN 75 1400. Měrné křivky průtoků u vtokové a odtokové části MVE se zpracovávají tabelárně nebo graficky. Měrné křivky je potřeba vyšetřit v rozsahu průtoků, v němž má MVE pracovat.

Údaje N-letých průtoků v profilu MVE na toku jsou podkladem pro stanovení způsobu ochrany před účinky velkých vod. Doporučuje se tyto údaje doplnit o záznamy o rozsahu záplav v dané lokalitě. Dále je nutné stanovit hodnotu minimálního zůstatkového průtoku (MZP), což je takový předepsaný průtok, který musí být zachován v řečišti.

### **3.3.2. Hydroenergetické řešení**

Hydroenergetické řešení stanovuje optimální návrh využití průtoků v MVE a tím i instalovaného výkonu, počet soustrojí MVE a určuje její průměrnou roční výrobu. Výpočty, které se provádí v rámci hydroenergetického řešení, lze dokumentovat tabelárně nebo graficky.

V návrhu MVE je nutné stanovit minimální a maximální průtok elektrárnou, popř. jednotlivých soustrojí, při kterých nebude MVE provozována s ohledem na nedostatek spádu, nebezpečí zanášení splaveninami, nebezpečí námrazy, správnou a bezpečnou funkci technologických zařízení. [13]

## 4 MVE Přeštice

V této praktické části je zdokumentován stav současné elektrárny a následně porovnán s novým návrhem rekonstrukce. Současný majitel, pan Vladimír Fraus, plánuje do budoucna rekonstrukci elektrárny a obměnu starších strojů za nové.

### 4.1 Popis lokality

Vybraná elektrárna pro návrh rekonstrukce se nachází v obci Přeštice v okrese Plzeň-jih na řece Úhlavě (říční kilometr – 32,495). Budova elektrárny je postavena pod jezem na pravém břehu řeky. Přesné umístění elektrárny je zobrazeno v Příloze č. 1. Tato MVE pracuje nepřetržitě a je navržena jako průtočná. Voda je naháněna pomocí kanálu přes stavidlo, hrubé a jemné česle do turbínové kašny, kde se momentálně nachází tři Francisovy turbíny (typ soustrojí je METAZ MT5). Na *Obr. 4* jsou patrné 3 plechové výpusti, kterými se odvádí voda z turbín zpět pod jez. Veškerá elektrická energie, která je vyráběna na MVE v Přešticích, je pomocí transformátoru, rozvaděče a měřicí techniky dodávána do veřejné sítě ČEZ. Elektrárna je v provozu od roku 1990.



*Obr. 4 – MVE v Přešticích na řece Úhlavě*



**Parametry lokality**

- Řešení MVE náhon 17 m
- Odpad zpět do Úhlavy
- Spád 2,2 m
- Strojní zařízení 3x turbína MT 5
- Výkon turbíny 12 kW
- Hltnost turbíny 855 l/s
- Celkový instalovaný výkon 36 kW

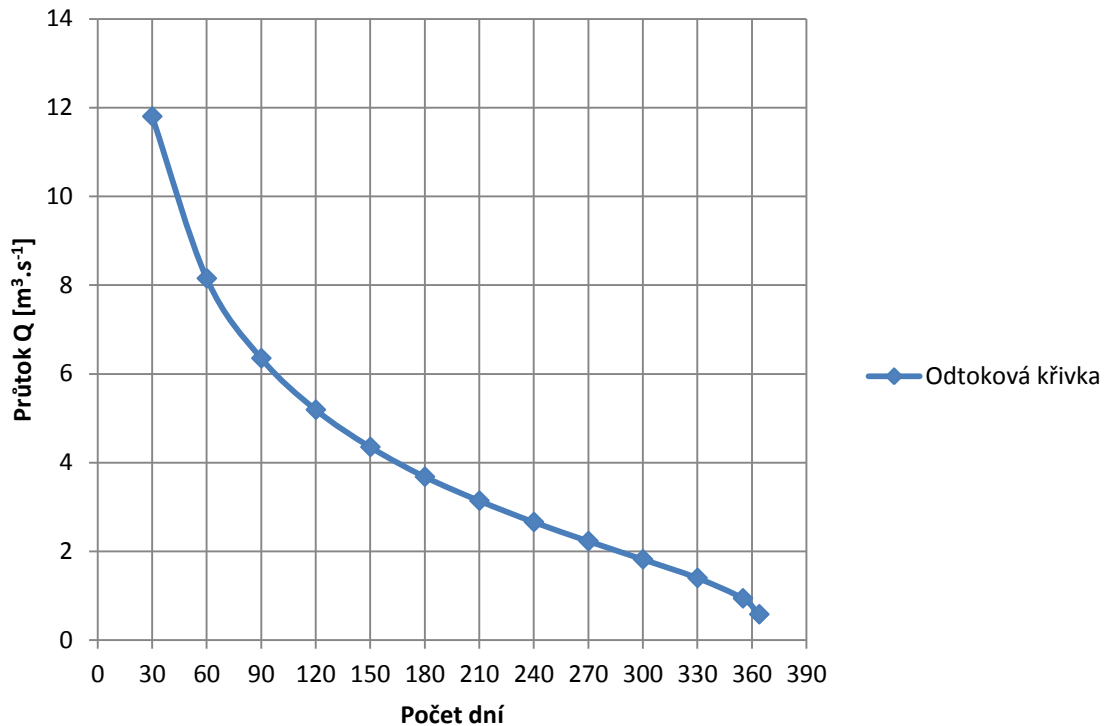
**4.2 Hydrologická data**

Dle naměřených hodnot, které byly poskytnuty hydrometeorologickým ústavem České republiky na řece Úhlavě, byla zhotovena tabulka M-denních průtoků v  $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ . M-denním průtokem rozumíme průměrný denní průtok, který je dosažen během M dní v roce. Udává se buď pro konkrétní rok, nebo pro dlouhodobé průměrné denní či měsíční průtoky. V *Tabulce č. 2* jsou uvedeny M-denní průtoky na MVE v Přešticích, které byly naměřeny v roce 2006, a z těchto hodnot vychází dosavadní plánovaná rekonstrukce.

<b>M – počet dní</b>	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	355	364
<b>Průtok - Q [<math>\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}</math>]</b>	11,8	8,15	6,35	5,19	4,35	3,68	3,14	2,66	2,23	1,82	1,4	0,94	0,58

*Tabulka č. 2 – Roční tabulka průměrných průtoků*

Z naměřených hodnot hydrometeorologickým ústavem byla vytvořena roční odtoková křivka. Ta udává závislost zaručeného průtoku v dané lokalitě po určitý počet dní. Obvykle se vodní elektrárny dimenzují na množství 180 až 210 denního průtoku vody, záleží ovšem na typu osazené turbíny a stavu vodního díla.



Obr. č. 5 – Roční odtoková křivka

Důvod, proč odtoková křivka nezačíná od nuly je ten, že se musí počítat s odstavením elektrárny v různých situacích. Například v době údržby, pokud dojde k poruše některé ze strojních částí nebo z důvodu povodní. Elektrárna se musí v době nedostatku vody uzavírat dle manipulačního řádu, který určuje povolené množství odebrané elektrárnou. Na jezu v Přešticích je zákonem dán limit udržení hladiny 3 centimetry nad jezem kvůli rybářům. Každý bod na křivce znázorňuje, po kolik dnů v roce protéká korytem řeky dané množství vody. Z *Tabulky č. 2* a z grafu lze vyčíst, že v korytě se vždy nachází minimální průměrný průtok  $0,58 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  a většího průtoku může elektrárna využívat po dobu 150 dní v roce.

Soustrojí MVE je nutné navrhnout tak, aby ve svém regulačním rozsahu pokrylo co možná největší plochu pod grafem odtokové křivky. V krátkém období, kdy průtoky nabývají vyšších hodnot, může nevyužitá voda přetéct přepadem. Není ani výhodné navrhovat příliš velkou turbínu, která by po většinu roku pracovala s menší účinností.

### 4.3 Hydroenergetický potenciál

Při stanovování hydroenergetického potenciálu pro dané vodní dílo musíme znát několik důležitých parametrů. Při počítání hrubého hydroenergetického potenciálu vycházíme jak z hodnoty spádu ve vybrané lokalitě, tak i z průměrného ročního průtoku. Celkový průměrný roční průtok určíme jako výpočet aritmetického průměru z hydrologických dat z M-denních průtoků:

$$Q_P = \frac{\sum Q_{M-denní}}{13} = 4,02 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \quad (4.1)$$

Spád na jezu je  $H = 2,2 \text{ m}$ . Z vypočítaného průměrného ročního průtoku a ze spádu lze nyní určit teoretický hydroenergetický potenciál vodního díla:

$$P = Q_P * g * H * \rho = 4,02 * 9,81 * 2,2 * 1000 = 86,76 \text{ kW} \quad (4.2)$$

Pomocí vzorce (4.2) lze vypočítat pouze teoretická hodnota hydroenergetického potenciálu v dané lokalitě. Skutečná hodnota bude však proti vypočítané zmenšená, neboť nejsou brány v úvahu ztráty (na vtoku do kašny, na česlech, v odpadu, apod.).

Aby vypočítané hodnoty korespondovaly se skutečností, je nutné zavést do výpočtu také ztráty v generátoru, na hřídeli, na turbíně a na převodech. Ztráty jsou ve výpočtu respektovány účinnostmi jednotlivých prvků. Skutečný výkon celého soustrojí je tedy:

$$P_S = Q_P * g * H * \rho * \eta_T * \eta_G * \eta_P \quad (4.3)$$

Ve vzorci (4.3) jsou již respektovány ztráty ve formě  $\eta_T$ , což je účinnost turbíny,  $\eta_G$ , účinnost generátoru a  $\eta_P$ , která udává účinnost převodů.

Účinnost turbíny Metaz – MT5 se pohybuje mezi 74 – 82 %. Moderní turbíny v dnešní době dosahují i na menších spádech účinnosti 80 – 96 %. Na MVE v Přešticích se nachází převodové soustrojí. V dnešní době se ztráty na převodech již tolik neuplatňují. Jejich velikost se pohybuje okolo 2 – 5 % přenášeného výkonu na jeden převodový stupeň. Lepším řešením jsou proto řemenové převody nebo nasazení hřídele turbíny přímo do generátoru. Samotná teoretická účinnost hydroalternátoru se pohybuje mezi 95 – 98 %.

Pro tyto hodnoty lze snadno spočítat celkový teoretický výkon celého soustrojí na elektrárně v Přešticích před novým návrhem:

$$P_S = 4,02 * 9,81 * 2,2 * 1000 * 0,82 * 0,98 * 0,95 = 66,23 \text{ kW} \quad (4.4)$$

Rozdíl mezi teoretickým a skutečným výkonem MVE je 20,53 kW. Do celkového výpočtu vyrobené energie ještě nejsou započítány ztráty vlivem transformace napětí při dodávce do sítě.

#### 4.4 Návrh nové turbíny

Panem majiteli bylo navrženo, že nejvýhodnějším řešením pro nahrazení starých Francisových turbín by mohl být Archimédův šroub. Konstrukční realizace nebude nijak zvlášť složitá. Archimédův šroub je uložený buď v trubce, nebo ve vybetonovaném žlabu a připojen přes převodovku na generátor (jak je naznačeno na *Obr. č. 3*). Současný stav vodního díla umožňuje využít pouze jednu šroubovou turbínu. Hlavní výhodou šroubové turbíny je její flexibilita při úbytku vody a tím i radikální změna průtoku. Velikost účinnosti šroubové turbíny se pohybuje mezi 60 – 80 %. Na první pohled to není mnoho, ale 60 procentní účinnost má šroubová turbína při průtoku, který je roven 10 % jmenovitého. V těchto hodnotách stávající Francisovy turbíny ani nefungují. Svoji maximální účinnost si turbína udržuje od 50 do 90 % velikosti jmenovitého průtoku. Podrobnější funkce této turbíny je vysvětlena v kapitole 2.3.4.

Délka šroubu je přirozeně dána spádem a sklonem. Sklon pro spád  $H = 2,2 \text{ m}$  by měl být od  $22^\circ$  do  $26^\circ$ . Větší sklon se používá pro vyšší spády (nad 5 metrů). Při menším sklonu roste hltlost turbíny a zároveň klesá její účinnost. Pokud je sklon vyšší, je tomu právě naopak. Počet chodů šroubovice se obvykle volí pro MVE mezi 3 – 5. Opět – s rostoucím počtem chodů klesá účinnost, ale lze tím zvýšit průtok. Úbytek účinnosti je zapříčiněn velkou ztrátou tření kapaliny na listech šroubovice.

Momentální hltlost jedné turbíny na MVE Přeštica je  $855 \text{ l.s}^{-1}$ , pro 3 turbíny je tato hodnota  $2565 \text{ l.s}^{-1}$ . Průměr šneku se určuje z požadované hltlosti při daném úhlu uložení. Pro úhel  $26^\circ$  a hltlost  $2000 \text{ l.s}^{-1}$  je průměr šroubu  $D = 2,5 \text{ m}$ . Průměry šroubů pro MVE se konstruují od 0,8 do 5 m.

Podle teoretického výpočtu by se nejlépe vodní tok v Přešticích využil při paralelním spojení 3 šroubových turbín s hltností  $750 \text{ l.s}^{-1}$  a menším průměrem, než jedné na  $2000 \text{ l.s}^{-1}$ . Paralelní řazení turbín je sympatické řešení jak využít jmenovitý průtok na vodním díle.

Bohužel, toto řešení je prozatím konstrukčně nemožné, protože by se musely vykopat 3 dlouhé kanály. Podle vzorce pro výpočet výkonu šroubové turbíny je možné obě varianty porovnat. Vychází se z již známého vzorce (4.3), až na úpravu, kdy můžeme ztráty a gravitační zrychlení  $g$  nahradit konstantou  $K$ , která se bude rovnat po zaokrouhlení  $K = 7$ . Výsledný výraz pro výpočet výkonu šroubové turbíny vypadá takto:

$$P = Q * H * \rho * K \quad (4.5)$$

$Q$  nyní neoznačujeme jako průtok, nýbrž jako hltnost turbíny, pomocí které budeme nyní porovnávat výsledné výkony. Celková využitelná hltnost v této době na MVE v Přešticích je  $2565 \text{ l.s}^{-1}$ . V rámci co největšího využití výkonu vody lze navrhnout paralelní kombinaci několika menších šroubových turbín, do kterých by se voda dělila v přímém poměru. Pokud bychom využili vzorec (4.5) a dosadili bychom v první řadě hodnoty pro jednu šroubovou turbínu, která je dimenzována na přibližnou hltnost  $2000 \text{ l.s}^{-1}$ , vyšel by nám výkon  $P = 30,8 \text{ kW}$ . Když však nahradíme jednu velkou turbínu třemi malými v paralelním chodu, přičemž hltnost jedné je  $750 \text{ l.s}^{-1}$ , dostaneme výkon  $P = 34,65 \text{ kW}$ .

Nyní ovšem vyvstává otázka, zdali se konstrukčně a finančně vyplatí takto investovat do tří turbín. MVE je prostorově řešena velmi úsporně, tudíž velké stavební práce nejspíše v této lokalitě nepřichází v úvahu.

## 4.5 **Technické příslušenství**

S navrženou turbínou bude nejvhodnější spojit asynchronní generátor. Důvody jsou jednoduché. Je daleko spolehlivější a jednodušší než synchronní a nevyžaduje speciální údržbu. Navíc jako asynchronní generátor lze využít kterýkoli asynchronní elektromotor s kotvou nakrátko. Generátor bude dodávat vyrobenou elektrickou energii rovnou do sítě, tudíž odpadá i problém se složitým fázováním. Jediným záporem tohoto stroje je, že při generátorickém chodu odebírá ze sítě jalový výkon, proto je nutné tuto složku vhodně kompenzovat, aby byl odběr jaloviny co nejmenší.

## 4.6 **Ekonomické zhodnocení rekonstrukce**

Současný majitel pan Fraus zadal několika firmám zpracovat cenový odhad, ale vzhledem k vyřizování legislativních záležitostí není celkový návrh ještě zcela hotový. Počítá se s tím, že se bude osazovat pouze jedna turbína pod úhlem 24° s průměrem šneku 2,5 metru a délkou 6 metrů (výpočty rozměrů turbíny jsou nad rámec této práce, čísla jsou můj vlastní pracovní odhad). Přibližný očekávaný výkon na turbíně je 30,8 kW.

Rozsah rekonstrukce zahrnuje:

- **Šroubová turbína**
- **Stavební práce**
- **Montáž**
- **Rozvaděč**
- **Projekt**
- **Asynchronní generátor**
- **Převodovka**

Asynchronní generátor:	50 000 Kč
Stavební úpravy:	720 000 Kč
Rozvaděč:	30 000 Kč
Cena turbíny, konstrukce a převodovky:	1 500 000 Kč
<b>Odhadovaná cena rekonstrukce MVE:</b>	<b>2 300 000 Kč</b>

Celková roční dodávaná energie je 250 000 kWh. Tato hodnota byla poskytnuta majitelem elektrárny a je spočítána z plochy nevyužitých trojúhelníků z odtokové křivky. Skutečná hodnota je vyšší, ztráty činí něco okolo 32 895 kWh. S rekonstrukcí se jistě zmenší i ztráty, ale pokud bychom brali dodávanou energii do sítě za stávajících podmínek (a výkupní cena 1 kWh činí pro rok 2014 2,43 Kč), můžeme snadno odvodit, kdy se náklady na rekonstrukci vrátí:

$$Doba\ návratnosti = \frac{2\,300\,000}{250\,000 \cdot 2,43 - 10\,000} = 3,786 \quad (4.6)$$

V čitateli se nachází celková cena za rekonstrukci, ve jmenovateli je celková cena za jednu kWh a od ní jsou odečteny náklady na údržbu, ale jak už bylo řečeno, šroubová turbína pracuje převážně bez údržby, tudíž odečtená cena by mohla být ještě o něco menší. Z výpočtu je patrné, že se náklady za rekonstrukci vrátí přibližně do 4 let.

## 4.7 Výhody a nevýhody rekonstrukce

Pokud bych měl srovnat přední výhody a nevýhody šroubové turbíny oproti stávajícím Francisovým turbínám, začal bych předně již zmíněnou vysokou účinností i pro minimální průtok vody (turbína začíná pracovat již při 8 % průtoku a při 15 % je již účinnost maximální). Regulace je navíc realizována pomocí hydraulicky ovládané klapky a nedochází tak k opotřebení složitých strojních částí. V době povodní umožňuje i využití průtoku vody přesahujícího její nominální průtok. Dle mého názoru jsou právě tyto aspekty hlavním důvodem, proč k rekonstrukci vůbec dochází. Další výhodou jsou nízké pořizovací náklady oproti standardním turbínám typu Francis nebo Kaplan. Úspory nejsou viditelné pouze na strojní, ale také i na stavební části. S tím souvisí i daleko menší čas potřebný pro zhotovení kanálu pro šroubovou turbínu, její zpuštění a připojení.

Šroubová turbína je velice spolehlivá a nepotřebuje výraznou údržbu nebo péči. Občas je nutné žlab, ve kterém je turbína uložena, natřít ekologickým olejem. Životnost této turbíny je odhadována na 30 – 50 let. Nevyskytuje se u ní problém s kavitací, což značně prodlužuje její životnost.

Se šroubovou turbínou také odpadá nutnost čištění plovoucích těles pomocí jemných česlí. Jediné, co stačí, jsou česle hrubé, které zachycují turbíně nebezpečná tělesa (velké větve, velké kusy ledu). Bez jemných česlí nemusí v náhonu být žádný čistící stroj a turbína může plně fungovat i s plovoucím listím, pískem a drobnými větvičkami.

Hlavní výhodou, pokud se zaměříme na ekologii, je vstřícnost vůči vodním organismům. Nejen že turbína aktivně okysličuje vodu, ale díky její funkci vytváření vodních kapes mezi lopatkami mohou vodní živočichové volně v těchto kapsách proplout z horní části do dolní naprosto bez újmy. V období podzimu dochází na elektrárnách k největšímu úhynu úhořů, kteří migrují do Sargasového moře. Šroubová turbína je pro tyto živočichy nejlepším možným řešením.



## 5 Závěr

Předmětem bakalářské práce bylo analyzovat a popsat typy vodních motorů pro MVE. Byly zde srovnány tři základní turbíny (Francisova, Kaplanova a Peltonova) a s nimi ještě Archimédova „šroubová“ turbína. Z analýzy vlastností je patrné, že Peltonova turbína se používá pro velké spády na malých tocích, například v horách. Francisova turbína je častým řešením při osazování do MVE díky její univerzálnosti. S horizontální osou otáčení pracuje na malých spádech s malými i středními průtoky. Kaplanova turbína se nejčastěji objevuje na nejmenších spádech se středními průtoky. Šroubová turbína je, dle mého názoru, ideálním řešením pro MVE. Její nenáročnost, lehká regulace a naprostá spolehlivost z ní činí nebezpečnou konkurenci pro ostatní turbíny v MVE.

Práce se také zaměřovala na návrh rekonstrukce MVE v Přešticích na řece Úhlavě. Jde o průtočnou elektrárnu s třemi Francisovými turbínami. Práce se zaměřovala převážně na rekonstrukci turbíny, respektive její výměnu a k tomu potřebné stavební úpravy. Zvolený návrh byl energeticky porovnán s aktuálním stavem, přičemž jedna současná turbína má výkon 12 kW s hltností 855 l/s. Vlastní návrh počítá se šroubovou turbínou s výkonem 30,8 kW, což je sice méně, než se dosud na elektrárně nachází, ale musíme brát v úvahu zmenšení ztrát vlivem převodů, vlastní spotřeby elektrárny a údržby. Navíc se jedná o velice ekologické řešení, které umožňuje vodnímu organismu bezpečný přechod mezi hladinami.

Investice do takového projektu by mohla být výnosná již po 4 letech, pokud nedojde ke změně ceny za výkup elektrické energie. Faktem zůstává, že i kdyby cena výkupu energie klesla, celková životnost nové turbíny je přes 30 let z čehož lze usoudit, že tato investice je ekonomicky velmi výhodná.

## Použitá literatura

- [1] Moje pravdy. *Moje pravdy* [online]. 2012 [cit. 2014-04-02]. Dostupné z: <http://www.moje-pravdy.cz/z-jinych-zdroju/zajimave-clanky/35-neroztrideno/1100-o-vod-vdecky>
- [2] Energeticky.cz. *Malá vodní elektrárna jako hobby i zdroj energie* [online]. 2009 [cit. 2014-04-02]. Dostupné z: <http://www.energeticky.cz/53-mala-vodni-elektrarna-jako-hobby.html>
- [3] Informace o vodní energetice. *Skupina ČEZ* [online]. 2013 [cit. 2014-05-11]. Dostupné z: <http://www.cez.cz/cs/vyroba-elektriny/obnovitelne-zdroje/voda/informace-o-vodni-energetice.html>
- [4] GABRIEL, P., ČIHÁK, F., KALANDRA, P., *Malé vodní elektrárny*. 1. vyd. Praha: ČVUT, 1998. 321 s. ISBN 80-01-01812-1.
- [5] *Malé zdroje elektrické energie – Vodní energie*. Brno, 2006. Odborná práce. UEEN VUT FEKT.
- [6] Malá voda. *Abeceda malých vodních pohonů* [online]. 2008 [cit. 2014-05-11]. Dostupné z: <http://mve.energetika.cz/>
- [7] Jzed. In: *Energie vody* [online]. 2008 [cit. 2014-05-18]. Dostupné z: [http://ok1zed.sweb.cz/s/el\\_vodniel.htm](http://ok1zed.sweb.cz/s/el_vodniel.htm)
- [8] Malé vodní elektrárny. *Šneková turbína* [online]. 2012 [cit. 2014-05-18]. Dostupné z: <http://archive.today/IwYyI>
- [9] Vodní kola. *Části VME* [online]. 2010 [cit. 2014-05-18]. Dostupné z: [http://www.vodnikola.cz/casti\\_mve.html](http://www.vodnikola.cz/casti_mve.html)
- [10] Automatizace. *Vodní elektrárny - mikro, malé i velké - druhy, principy, provedení* [online]. 2013 [cit. 2014-06-01]. Dostupné z: <http://automatizace.hw.cz/clanek/2006121301>
- [11] Energeticky.cz. *Vodní energie* [online]. 2009 [cit. 2014-06-01]. Dostupné z: <http://www.energeticky.cz/64-vodni-energie.html>
- [12] DUŠIČKA, P., GABRIEL, P., HODÁK, T., ČIHÁK, F., ŠULEK, P., *Malé vodní elektrárny*. 1. vyd. Bratislava: Jaga group, v. o. s., 2003. 175 s. ISBN 80-88905-45-1
- [13] ČSN 75 2601. *Malé vodní elektrárny - Základní požadavky*. Praha: ÚNMZ, 2010, 28 s.

- [14] *Zákon o podmínkách podnikání a o výkonu státní správy v energetických odvětvích a o změně některých zákonů (energetický zákon). In: č. 458/2000 Sb. 2000*
- [15] *Zákon o vodách a o změně některých zákonů (vodní zákon). In: č. 254/2001 Sb. 2001*

## **Seznam příloh**

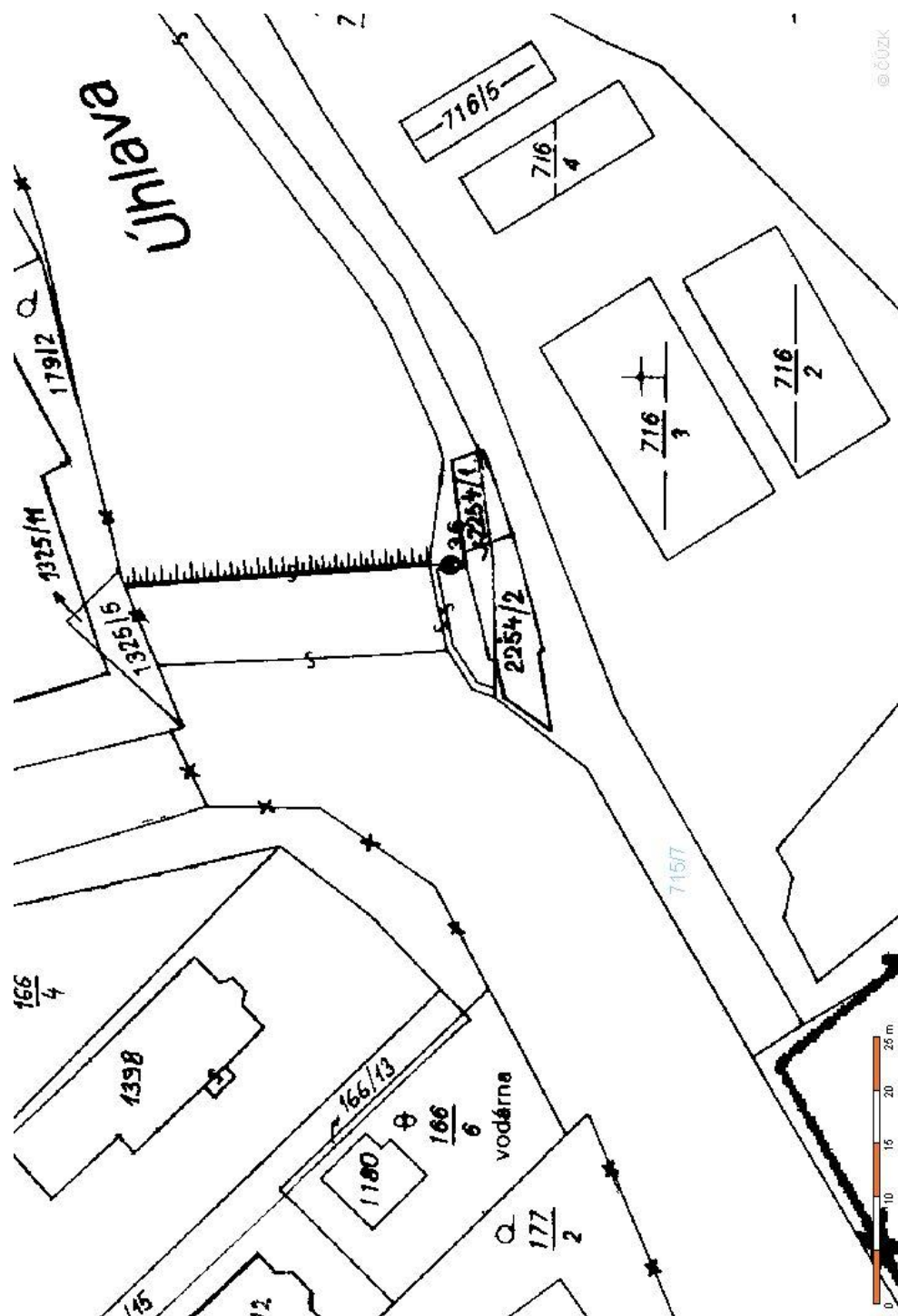
Příloha č. 1 – Kartografické zobrazení lokality

Příloha č. 2 – Náhon, hrubé česle, stavidlo

Příloha č. 3 – Jemné česle

## Přílohy

Příloha č. 1 – Kartografické zobrazení lokality



**Příloha č. 2 – Náhon, hrubé česle, stavidlo**





**Příloha č. 3 – Jemné česle**

