

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

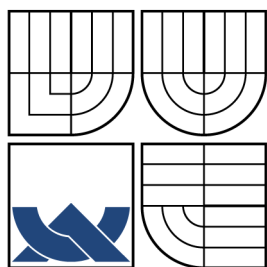
NÁVRH REKONSTRUKCE MALÉ VODNÍ ELEKTRÁRNY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

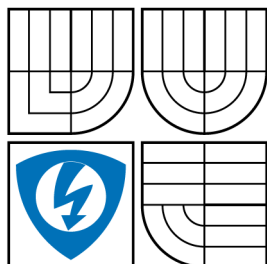
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

JAN MORÁVEK

BRNO 2010



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY
A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY



FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND
COMMUNICATION
DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

NÁVRH REKONSTRUKCE MALÉ VODNÍ ELEKTRÁRNY SMALL HYDRO POWER PLANT RESTORATION PROJECT

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

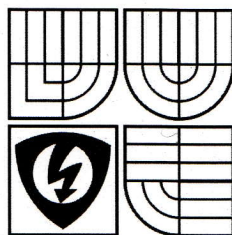
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

JAN MORÁVEK

VEDOUcí PRÁCE
SUPERVISOR

ING. LUKÁŠ RADIL

BRNO 2010



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ
Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií
Ústav elektroenergetiky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika

Student: Jan Morávek
Ročník: 3

ID: 106654
Akademický rok: 2009/10

NÁZEV TÉMATU:

Návrh rekonstrukce malé vodní elektrárny

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Teorie a rozdělení vodních elektráren
2. Obvyklé technologické vybavení malých vodních elektráren (MVE)
3. Konkrétní instalace MVE
4. Současné a návrh nového vyvedení elektrického výkonu z MVE
5. Ekonomika provozu MVE - porovnání efektivity malé vodní elektrárny s nynější koncepcí a po její modernizaci

DOPORUČENÁ LITERATURA:

podle pokynů vedoucího práce

Termín zadání: 8.2.2010

Termín odevzdání: 31.5.2010

Vedoucí práce: Ing. Lukáš Radil

Konzultanti bakalářské práce:


doc. Ing. Čestmír Ondrůšek, CSc.
předseda oborové rady



UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce shrnuje základní teoretické poznatky týkající se problematiky malých vodních elektráren. Zabývá se popisem stávajícího stavu malé vodní elektrárny, rozebírá problematiku současného řešení a jeho nevýhody. Dále popisuje návrh vylepšení současného řešení vhodným rozšířením elektrárny. V poslední části se práce zabývá odhadem výroby elektrické energie po rekonstrukci, odhadem výše investičních nákladů a výpočtu předpokládané doby návratnosti celé investice.

KLÍČOVÁ SLOVA:

malé vodní elektrárny; návrh MVE; rekonstrukce MVE.

ABSTRACT

This thesis summarizes the basic theoretical knowledge concerning of small hydro power plants. It describes the current state of small hydro power plant, analyzes the current solution and its drawbacks. The thesis further describes options of possible improvement using suitable expansion. The last part of the work deals with an estimated production of electricity after the reconstruction, the approximate investment costs and the estimated time of the investments return.

KEYWORDS:

small hydro power plant; project of the SHP; SHP restoration.

Bibliografická citace práce:

MORÁVEK J. *Návrh rekonstrukce malé vodní elektrárny*. Brno: Vysoké učení technické v Brně. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2010. 41 s. Vedoucí práce Ing. Lukáš Radil.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma „Návrh rekonstrukce malé vodní elektrárny“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Zároveň bych chtěl na tomto místě poděkovat Ing. Liboru Šimovi za odbornou spolupráci a pomoc při tvorbě této práce.

V Brně dne

28.5.2010

.....

(podpis autora)

OBSAH

Seznam obrázků	8
Seznam tabulek	9
Seznam symbolů a zkratk	10
Úvod	12
1 Teorie malých vodních elektráren	13
1.1 Vodní energie a způsob její přeměny	13
1.2 Vhodnost lokality pro výstavbu MVE	13
1.3 Typy vodních elektráren	14
1.3.1 Akumulační elektrárna	14
1.3.2 Přečerpávací elektrárna	15
1.3.3 Jezová elektrárna	15
1.3.4 Derivační elektrárna	15
1.3.5 Dělení elektráren podle výkonu	16
1.4 Dimenzování vodní elektrárny	17
1.4.1 Určení průtoku	17
1.4.2 Výpočet teoretického výkonu	18
1.4.3 Skutečný využitelný výkon	18
1.5 Turbíny	19
1.5.1 Základní části turbíny	20
1.6 Přetlakové turbíny	21
1.6.1 Francisova turbína	21
1.6.2 Reiffensteinova turbína	21
1.6.3 Kaplanova turbína	22
1.7 Rovnotlaké turbíny	23
1.7.1 Peltonova turbína	23
1.7.2 Bánkiho turbína	24
1.8 Generátory pro použití u MVE	25
1.8.1 Asynchronní generátor	25
1.8.2 Synchronní generátory	26
2 Návrh rekonstrukce MVE	27
2.1 Historie MVE firmy Kalus spol. s.r.o.	27
2.2 Lokalita MVE	27
2.2.1 Technický popis zařízení – vtokový objekt	28
2.2.2 Technický popis zařízení – strojovna MVE	28
2.3 Efektivita výchozího stavu	29

2.4	Zvýšení efektivity instalací druhé turbíny	31
2.5	Výběr nově instalované turbíny	31
2.6	Výběr generátoru	32
2.7	Návrh vyvedení výkonu	33
2.7.1	Výpočet průřezu vodiče	33
2.7.2	Návrh kompenzace	34
2.7.3	Jištění zařízení	34
3	Kalkulace návratnosti	36
3.1	Odhad výroby elektrické energie po rekonstrukci	36
3.2	Přehled předpokládaných tržeb	37
3.3	Odhad nákladů na realizaci rekonstrukce	37
3.4	Odhad provozních nákladů	37
3.5	Finanční návratnost investice	38
4	Závěr	39
	Literatura	40

SEZNAM OBRÁZKŮ

1.1	Průběh průtoku v roce [4]	14
1.2	Základní varianty řešení hydroenergetických děl [1]	16
1.3	Rozdělení malých vodních elektráren podle výkonu [1]	17
1.4	Pracovní diagram jednotlivých typů turbín [9]	20
1.5	Průběh účinnosti jednotlivých turbín k poměru jmenovitého a maximálního výkonu.[12]	20
1.6	Francisova turbína nastavená na malý a velký průtok [8]	21
1.7	Reiffensteinova turbína [1]	22
1.8	Řez Kaplanovou turbínou [3]	23
1.9	Princip Peltonovy turbíny [14]	24
1.10	Princip Bánkiho turbíny [1]	25
2.1	Malá vodní elektrárna firmy Kalus	27
2.2	Strojovna MVE	29
2.3	Oblasti použití a dosahované parametry turbín ZIROMONT [15]	32
2.4	Ochrana RUF3 a ochrana RIGA-D [13]	35

SEZNAM TABULEK

2.1	M-denní průtoky řeky Desné s odečteným sanačním průtokem	28
2.2	Parametry instalovaného zařízení	29
2.3	Výroba MVE za rok 2005 a 2006	30
2.4	Parametry turbíny Ziromont ZR 85-3L-3M	32
3.1	Předpoklad výroby elektrické energie po rekonstrukci	36
3.2	Přehled předpokládaných tržeb za rok	37
3.3	Přehled ročních příjmů	38

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

ERÚ Energetický regulační úřad

MVE malá vodní elektrárna

Značka	Veličina	Značka jednotky
E	měrná energie	$J \cdot kg^{-1}$
E_h	polohová potenciální energie	J
E_p	tlaková potenciální energie	J
E_v	kinetická energie	J
H	spád	m
H_u	užitný spád	m
I	proud	A
I_n	jmenovité proudové zatížení vodiče	A
I_z	dovolené proudové zatížení vodiče	A
N_p	provozní náklady	$Kč$
N_{ODP}	náklady na odpisy	$Kč$
P	činný výkon	W
P_j	penežní příjem	$Kč$
ΔP	ztráty ve vodiči	W
Q_t	průtok turbínou	$m^3 \cdot s^{-1}$
Q	jalový výkon	VA_r
R	elektrický odpor vodiče	Ω
S	průřez vodiče	mm^2
T	tržby	$Kč$
U	napětí	V

ΔU	úbytek napětí na vodiči	V
Z_1	hrubý zisk	$K\check{c}$
Z_{T1}	čistý zisk	$K\check{c}$
g	tíhové zrychlení	$m \cdot s^{-1}$
l	délka vodiče	m
m	hmotnost	kg
n	otáčky	$ot \cdot min^{-1}$
ρ	hustota	$kg \cdot m^{-3}$
x_k	měrná reaktance vodiče	$\Omega \cdot km^{-1}$

ÚVOD

Elektrická energie je v dnešní době velmi žádaným artiklem po celém světě. Velká část je produkována za použití neobnovitelných zdrojů. Současným trendem je však získávání energie z obnovitelných zdrojů, případně ze zdrojů, které sníží zatěžování ekosystému škodlivinami. Jedním ze zdrojů, které můžeme označit za ekologické a zároveň obnovitelné je nepochybně voda.

Pro využití energie ukryté ve vodním toku v energetice musíme zajistit přeměnu na energii elektrickou. Tu poté můžeme snáze distribuovat na velké vzdálenosti, případně přeměnit na jinou formu energie například mechanickou, tepelnou nebo světelnou a dále ji využívat.

Vodní energie je jednou z nejdéle používaných forem energie. Její využití bylo zpočátku k přepravě nákladu, později se začala využívat k pohánění jednoduchých soustrojí a s rozvojem technologií následně k výrobě elektrické energie.

V České republice dosahuje využití hydroenergetického potenciálu asi 35%. Z dosud nevyužitého potenciálu lze asi 25% využít ve velkých a středních tocích. Zbylých 75% představuje potenciál malých vodních elektráren.[2]

Z těchto důvodů se v posledních 20–ti letech rozšířil zájem jak o výstavbu nových MVE, tak i o rekonstrukci stávajících, mnohdy nepoužívaných vodních děl.

Cílem této bakalářské práce, je shrnout základní teoretické požadavky týkající se malých vodních elektráren a dále využít těchto poznatků při rozboru a následně návrhu rekonstrukce konkrétního vodního díla. Cílem práce je předložit návrh technického řešení, určení vhodného typu soustrojí včetně vyvedení výkonu a následně zhodnotit tento návrh z hlediska finanční návratnosti.

1 TEORIE MALÝCH VODNÍCH ELEKTRÁREN

1.1 Vodní energie a způsob její přeměny

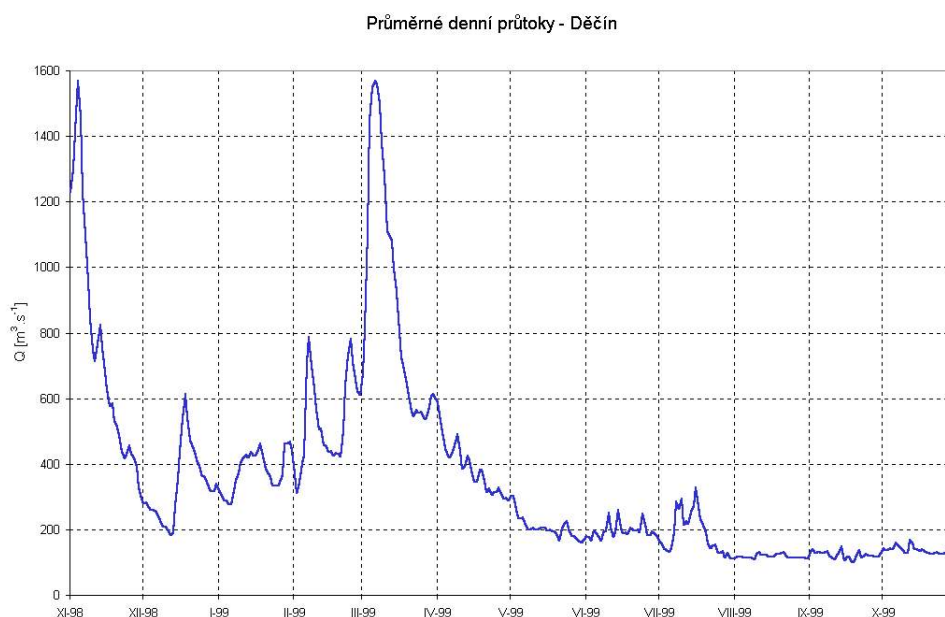
Energii uloženou ve vodní masě můžeme vyjádřit jako součet její potenciální a kinetické mechanické energie. V praxi se vodní tok nejčastěji využívá k výrobě elektrické energie. Ve vodních elektrárnách se využívá především potenciální složka energie ukryté ve vodním toku. Voda dopadající na lopatky turbín způsobuje točivý moment na hřídeli turbíny, která následně roztáčí generátor. V něm na základě Faradayovy magnetické indukce dochází k přeměně mechanické energie na energii elektrickou, která se dále transformuje na vyšší napěťové hladiny a distribuuje až ke spotřebiteli. Přenos pomocí vysokého napětí omezuje ztráty elektrické energie na vedení.

1.2 Vhodnost lokality pro výstavbu MVE

Velké množství různých typů vodních turbín rozšířilo možnosti využití vodních toků s rozličnými parametry. Základními parametry pro ověření vhodnosti dané koncepce řešení elektrárny na vodním toku jsou především využitelný spád a průtok říčním profilem.

Spád je výškový rozdíl vodních hladin před a za elektrárnou. Můžeme jej dále rozdělit na hrubý spád, což je výškový rozdíl hladin za nulového průtoku elektrárnou a užitný spád, který vyjadřuje rozdíl energetických hladin před a za turbínou. Vychází z hrubého spádu odečtením hydraulických ztrát v přivaděči a v odpadu.[2]

Průtok říčním profilem je druhým nejdůležitějším faktorem ovlivňující využitelný výkon vodního toku. V České republice je vytvořena síť hlásných profilů, která zaznamenává údaje týkající se stavů vodních hladin a aktuálních průtoků na vybraných vodních tocích. Aktuální data z této sítě lze zdarma najít na stránkách Českého hydrometeorologického institutu, případně je možné si je za poplatek vyžádat i zpětně. Pro návrh vodní elektrárny nás budou zajímat především takzvané M-denní průtoky. Tento údaj vychází z naměřených dat a určuje minimální průtok po dobu M dní.[7]



Obr. 1.1: Průběh průtoku v roce [4]

Vhodnost lokality pro výstavbu MVE určují i další parametry, které však primárně neovlivňují využitelnost potenciálu vodního toku, ale je nutné je při návrhu brát v úvahu. Například se může jednat o vyřešení vyvedení výkonu z elektrárny. Je důležité zvážit, zda je v blízkosti vedení o dostatečné napěťové hladině, případně zda by byla výstavba přípojky technicky proveditelná a náklady na její zřízení neprodloužily neúměrně dobu návratnosti celé investice. Dalšími faktory mohou být dopad na ráz krajiny, zvýšení hladiny hluku, dostupnost lokality s vhodnou přístupovou cestou atd.[7]

1.3 Typy vodních elektráren

Podle způsobu využití říčního koryta, můžeme rozlišit několik základních typů vodních elektráren.

1.3.1 Akumulační elektrárna

Můžeme ji popsat jako elektrárnu umístěnou na hrázi jezera, rybníku nebo přehradě. Vodní nádrž umožňuje akumulaci vody a tím pádem i energie v ní ukryté. Nespornou výhodou je menší závislost na aktuálním průtoku. Tím, že má elektrárna dostatečnou zásobu hnacího média se také eliminuje počet odstávek celého soustrojí.

Určitou nevýhodou mohou být investiční náklady spojené s výstavbou přehrady. Vytvořením hráze vysoké několik desítek, či stovek metrů sice přivedeme více energie na lopatky turbíny, ale výstavba se tím prodrazí a musíme vzít v úvahu i dopad výstavby takového vodního díla na ráz krajiny.

V praxi proto obvykle plní akumulární elektrárny, jak účel výroby elektrické energie, tak i funkci regulace vodního toku. Příkladem může být Vltavská kaskáda regulující tok řeky Vltavy – například výstavba nádrže Lipno zabránila každoročnímu vylití Vltavy z břehů v jarních měsících na jejím horním toku.[11] [2]

1.3.2 Přečerpávací elektrárna

Elektrickou energii lze velmi snadno transformovat na jiné formy energie. Bohužel má jednu velkou nevýhodu. Prakticky ji zatím nelze ve velkých objemech skladovat. Pokud ale využijeme dostatečně velký zásobník vody s co největším spádem, máme k dispozici jakýsi dočasný zdroj energie, který můžeme využívat ve chvíli, kdy je v přenosové soustavě nedostatek elektrické energie. Tuto myšlenku v sobě obsahuje právě přečerpávací elektrárna. V době kdy je energie nadbytek (především v noci) čerpá pomocí čerpadel, případně reverzních turbín, vodu z říčního koryta, či dolní nádrže do nádrže umístěné na kopci. Tato energie uložená ve vodní masě je poté připravena k využití v době akutního nedostatku elektrické energie v síti. Jedná se o krátkodobé využití, ovšem doba najetí přečerpávacích elektráren se pohybuje v desítkách sekund až několika minut. Této vlastnosti se využívá k pokrytí špičkových potřeb do té doby, než najedou jiné zdroje elektrické energie.[11] [2]

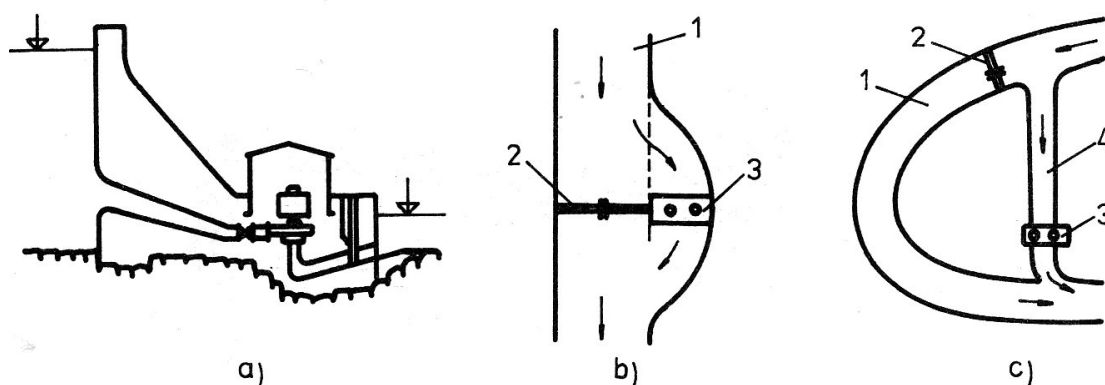
1.3.3 Jezová elektrárna

Principiálně se jedná o elektrárnu umístěnou přímo na říčním korytě, která využívá vzduť hladiny na jezu. Jez bývá vyšší než je zapotřebí u derivačních elektráren. Jezová elektrárna může částečně využívat akumulované vody přímo za jezem. Nevýhodou tohoto typu elektrárny je její menší odolnost při povodních, kdy hrozí nebezpečí zaplavení strojovny vodou. Dále je nutné při výstavbě počítat s vytvořením kanálu pro migraci ryb, což se projeví na zvýšení nákladů. Přínosem jezových elektráren pro vodní tok, je schopnost okysličovat vodu. Voda padající přes jez s sebou strhává okolní vzduch a ve vývařišti dochází k rozpouštění kyslíku ve vodě a tím i k lepšímu okysličení.[11] [2]

1.3.4 Derivační elektrárna

Elektrárna je umístěna mimo vodní tok. Voda je obvykle přiváděna otevřeným přívodním kanálem k elektrárně a je odpadním kanálem vracena zpět do řečiště.

Přívodní kanál slouží k zvětšení spádu na turbíně, protože oproti přírodnímu řečišti má menší sklon. Jez u derivačních elektráren nemusí být také vysoký jako u jezových, slouží pouze k odklonu vody do přívodního kanálu, označovaného také jako náhon. Začátek náhonu je opatřen stavidlem pro regulaci množství přiváděné vody a hrubými česlemi pro zachycení naplavených nečistot. Nevýhodou derivačních elektráren jsou velké investiční náklady na výstavbu přívodního kanálu a dále pak náklady na jeho údržbu a čištění. Podle volby typu turbín také může docházet k odkysličování vody.[11] [2]



Obr. 1.2: Základní varianty řešení hydroenergetických děl [1]

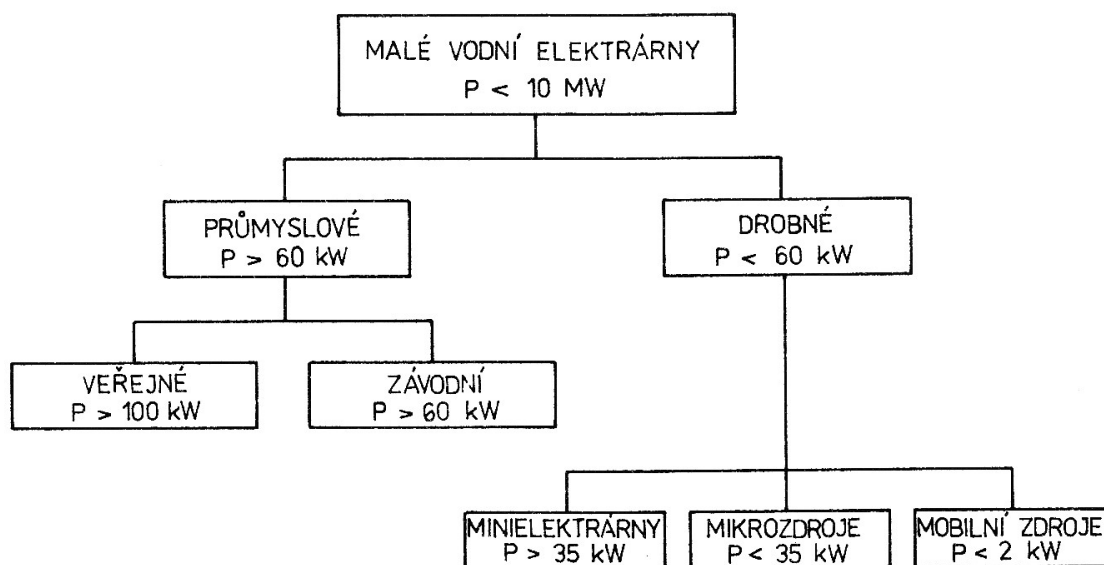
a) akumulční, b) jezová, c) derivační

1–koryto řeky, 2–vzdouvací zařízení, 3–elektrárna, 4–derivační přivaděč

1.3.5 Dělení elektráren podle výkonu

Podle velikosti instalovaného výkonu můžeme dále rozdělit vodní elektrárny na:

- velké – $P > 100 \text{ MW}$
- střední – $P < 100 \text{ MW}$
- malé – $P < 10 \text{ MW}$



Obr. 1.3: Rozdělení malých vodních elektráren podle výkonu [1]

1.4 Dimenzování vodní elektrárny

1.4.1 Určení průtoku

Základem dimenzování jsou již výše zmíněné M-denní průtoky, od nichž se musí odečíst tzv. sanační průtok, což je minimální průtok korytem řeky. Tento průtok nemůžeme využít pro výrobu elektrické energie, protože slouží k zachování biologické rovnováhy vodního toku. Sanační průtok je stanoven při vodoprávním řízení. Zpravidla se pohybuje na úrovni 330, 355 nebo 364 - denního průtoku.[7]

Po odečtení sanačního průtoku získáme využitelný průtok, podle kterého můžeme přistoupit k volbě turbíny. V praxi se při dimenzování turbíny vychází ze 180-denního průtoku. V závislosti na průběhu průtoku říčním korytem během roku musíme zvážit vhodnost turbíny na dané lokalitě. Určitě nebude cílem návrhu dosáhnout pouze co nejvyšší výkon, protože tohoto výkonu budeme dosahovat v případě dostatku vody. Proto je nutné opět přihlédnout k M-denním průtokům a určit dobu využitelnosti instalovaného výkonu. Záhy můžeme dojít ke zjištění, že sice máme instalovanou turbínu o vysokém výkonu, ale tato turbína může být v provozu pouze jednu třetinu roku, kdy je hladina v řece zvýšena táním sněhu v horských lokalitách.[7]

Řešením může být volba turbíny s jiným typem konstrukce, případně i s jiným

typem regulace. Samotný způsob regulace totiž může značně ovlivnit rozsah použitelnosti turbíny i na průtoky, které by v případě systému bez regulace nebyly dostatečné k její činnosti. Alternativou může být také použití několika turbín. A to jak stejných parametrů, kdy můžeme navyšováním počtu soustrojí uvedených do provozu ovlivňovat výrobu energie podle aktuálních možností, tak i instalací turbín různého typu s různými parametry a opět jejich vzájemnou kombinací docílit většího využití energetického potenciálu vodního toku.

1.4.2 Výpočet teoretického výkonu

Energie vodního toku představuje součet polohové potenciální energie E_h , tlakové potenciální energie E_p a kinetické energie E_v , přičemž platí následující vztahy:

$$E_h = m \cdot g \cdot H \text{ [J]} \quad (1.1)$$

$$E_p = m \cdot \frac{p}{\rho} \text{ [J]} \quad (1.2)$$

$$E_v = \frac{m \cdot v^2}{2} \text{ [J]} \quad (1.3)$$

kde g je tíhové zrychlení [$m \cdot s^{-2}$],

H spád [m],

m hmotnost vody [kg],

p tlak [Pa],

ρ hustota vody [$kg \cdot m^{-3}$],

v rychlost vody [$m \cdot s^{-1}$].

Pro teoretický využitelný výkon vodního toku platí následující vztah odvozený z Bernoulliho rovnice:

$$P = \rho \cdot Q_t \cdot g \cdot H \text{ [W]} \quad (1.4)$$

kde ρ je hustota vody [$kg \cdot m^{-3}$],

Q_t průtok turbínou [$m^3 \cdot s^{-1}$],

g tíhové zrychlení [$m \cdot s^{-2}$],

H spád [m].

1.4.3 Skutečný využitelný výkon

Skutečný výkon je však menší důsledkem ztrát při přeměně energie v turbíně a v generátoru. Je tedy možné využít vztahu, ve kterém budeme uvažovat účinnost elektrárny. Po úpravách lze pro určení přibližného výkonu MVE definovat vztah:

$$P = k \cdot Q_t \cdot H_u \text{ [kW]} \quad (1.5)$$

kde k je koeficient vyznačující účinnost elektrárny vynásobenou hustotou vody a tíhovým zrychlením:

$$k = \frac{\eta \cdot \rho \cdot g}{1000} [kg \cdot m^2 \cdot s^{-3}] \quad (1.6)$$

pro MVE se k pohybuje v rozmezí $5-7 [kg \cdot m^2 \cdot s^{-3}]$,

Q_t průtok turbínou $[m^3 \cdot s^{-1}]$,

H_u užitný spád $[m]$.

Účinnost elektrárny v sobě zahrnuje všechny ztráty, které během přeměny energie vznikají. Jedná se o hydraulické ztráty η_h , objemové ztráty η_v , mechanické ztráty η_m . Tyto ztráty jsou zahrnuty v celkové účinnosti turbíny η_t . Účinnost turbíny η_t můžeme definovat jako podíl skutečného výkonu měřeného na hřídeli k teoretickému výkonu turbíny.

$$\eta_t = \frac{P}{P_0} [-] \quad (1.7)$$

Přičemž v praxi se účinnost správně dimenzované a regulované turbíny pohybuje v rozmezí $85 - 94\%$

Pokud není generátor umístěn na společné hřídeli s turbínou, je nutné uvažovat účinnosti převodu η_p . Dále je nutné uvažovat účinnost samotného generátoru η_g ($85 - 97\%$) a v případě transformace napětí na vyšší hladinu také účinnost transformátoru η_{tr} ($92 - 98\%$).

Pro celkovou účinnost elektrárny můžeme tedy zapsat vztah:

$$\eta = \eta_t \cdot \eta_p \cdot \eta_g \cdot \eta_{tr} \quad (1.8)$$

a v praxi může být účinnost elektrárny značně snížena, někdy až na 50% . [11]

1.5 Turbíny

Hlavním prvkem určující účinnost elektrárny je turbína, která po roztočení způsobeném tlakem vody na lopatky pohání generátor elektrické energie. V turbíně dochází k přeměně hydraulické energie na energii mechanickou. Turbíny se dělí na několik kategorií, podle způsobu jakým pracují.

V některé technické literatuře se užívá vztah pro měrnou energii vody vztaženou na $1kg$ její hmotnosti místo v praxi užívaného pojmu spád — H . Převodní vztah je:

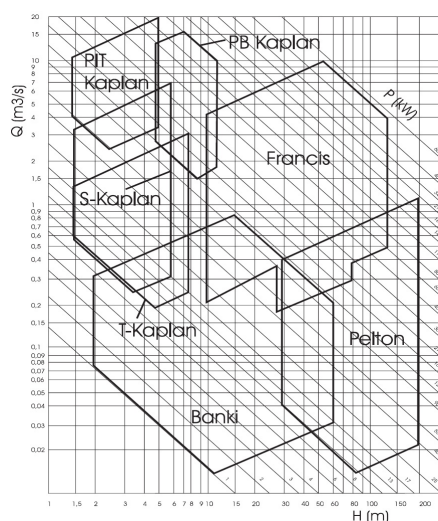
$$E = g \cdot H = 9,806 \cdot H [J \cdot kg^{-1}] \quad (1.9)$$

kde g je tíhové zrychlení $[m \cdot s^{-2}]$,

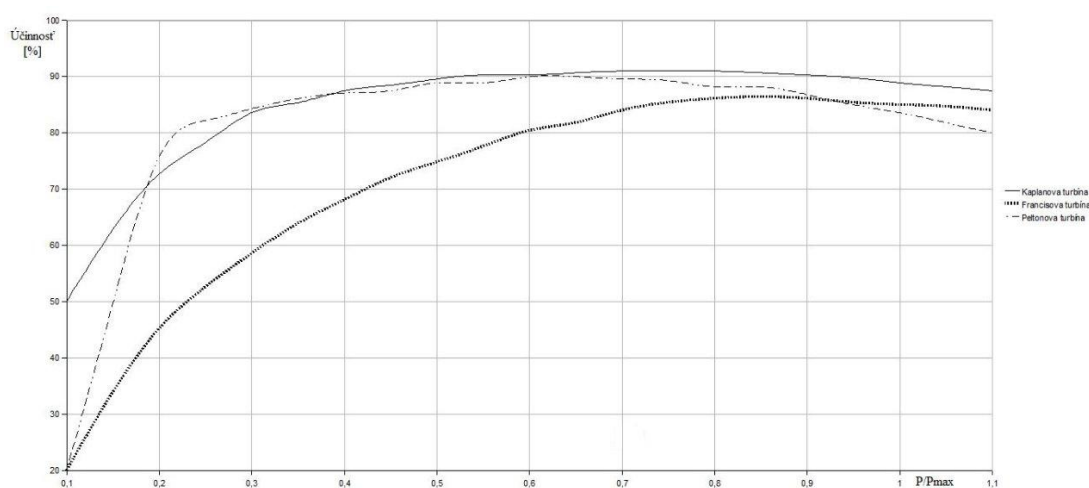
H spád $[m]$.

1.5.1 Základní části turbíny

Turbína se skládá ze tří základních částí. Jedná se o oběžné kolo, přivaděč vody k oběžnému kolu a zařízení pro odvod vody od oběžného kola. Přivaděč vody může být proveden jako spirálové potrubí nebo pouze jako kašna. Dále následují lopatky rozváděče, které usměrňují tok vody přiváděný na lopatky oběžného kola. Oběžné kolo je pracovní část turbíny, na které dochází k přeměně hydraulické energie na energii mechanickou. Zařízení pro odvod vody slouží k postupnému snížení rychlosti vody a tedy k nárůstu potenciální energie vody. Hlavní částí zařízení pro odvod vody je savka, která zvyšuje účinnost turbíny tím, že snižuje tlak za turbínou. [1]



Obr. 1.4: Pracovní diagram jednotlivých typů turbín [9]



Obr. 1.5: Průběh účinnosti jednotlivých turbín k poměru jmenovitého a maximálního výkonu. [12]

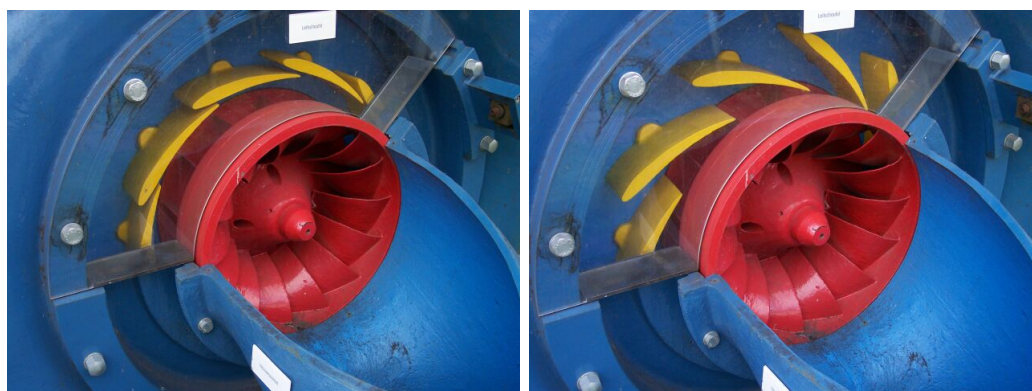
1.6 Přetlakové turbíny

U přetlakových turbín se část potenciální energie přeměňuje v rozváděči na energii kinetickou. Turbína se označuje jako přetlaková, protože tlak na vstupu do oběžného kola je větší, než-li tlak za turbínou.

1.6.1 Francisova turbína

V oblasti MVE se používá pro měrné energie v rozmezí $E = (50 - 3000) \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$. Francisova turbína se časem dočkala mnoha obměn a vzniklo z ní mnoho variant. Základním znakem je oběžné kolo, tvořené nábojem na hřídeli, vnějším věncem a lopatkami umístěnými mezi nábojem a věncem. Dále je turbína tvořena dvěma víky, přičemž nosné víko je pevně uchyceno do kašny a druhé víko je zakončeno savkou a odvádí vodu do odpadního kanálu. V nosném víku je umístěn lopatkový kruh s rozváděcími lopatkami, které je možné natáčet tahélky připojenými k otočnému regulačnímu kruhu. V dnešní době lze regulaci provádět automaticky s využitím hydraulického ovládání rozváděče a s napojením hydrauliky na řídicí systém.

S postupným vývojem Francisovy turbíny se kvůli zmenšení rozměrů oběžného kola při dosahování velkých výkonů, začalo místo kašnového řešení používat spirální Francisovy turbíny. Hlavní změna nastala ve způsobu přivedení vody do turbíny. Toto řešení je ovšem dražší než pouhé vybudování kašny. Francisova turbína je poměrně hodně rozšířena, protože její rozsah použití je značný a výrobní náklady na samotnou turbínu nejsou velké. Nejdražší částí Francisovy turbíny je složitý systém její regulace.[1]

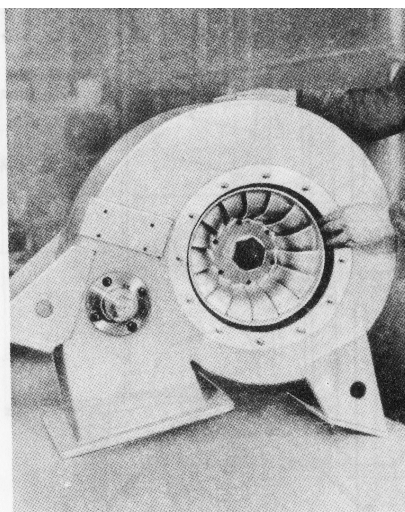


Obr. 1.6: Francisova turbína nastavená na malý a velký průtok [8]

1.6.2 Reiffensteinova turbína

Vznikla odvozením z Francisovy turbíny. Základním problémem je zajištění osově symetrického přívodu vody k oběžnému kolu. U Francisovy turbíny je toho dosaženo

náročným systémem rozváděcích lopatek a spirály. Reiffensteinova turbína nemá rozváděcí lopatky a osově symetrického přívodu je docíleno pouze vhodným tvarem spirály. Spirála je tvořena rovnoběžnými bočními stěna a kuželovým přechodovým kusem. Samotná spirála je ve tvaru logaritmické spirály. Mezi stěnami vstupní části spirály je umístěna otočná regulační klapka. Reiffensteinova turbína se užívá pro měrné energie $E = (50 - 350) \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ a průtoky $Q = (0,4 - 5) \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. [1]



Obr. 1.7: Reiffensteinova turbína [1]

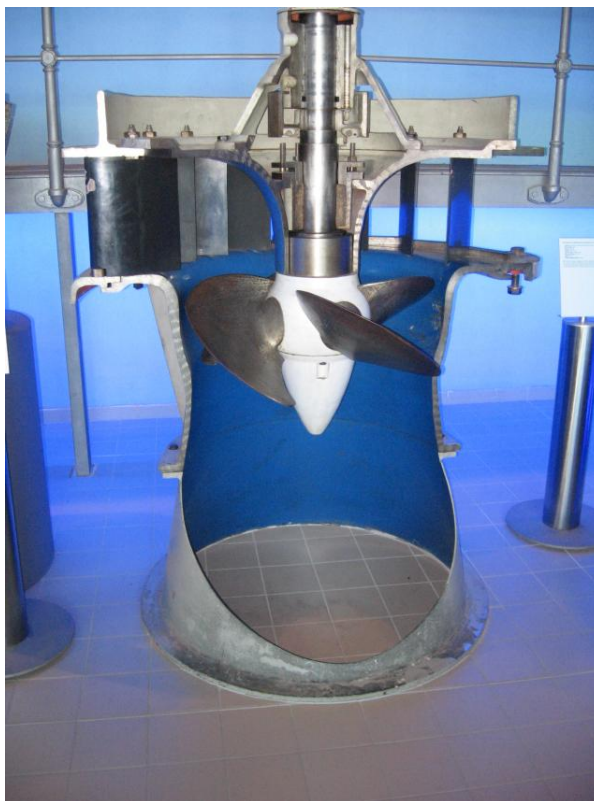
1.6.3 Kaplanova turbína

Kaplanova turbína je turbína s velkým regulačním rozsahem. Vyznačuje se možností řízení natočení lopatek, jak oběžného, tak i rozváděcího kola. Vzájemným natočením těchto lopatek lze dosáhnout velké efektivity turbíny při různých průtocích. Turbína tak dosahuje maximální účinnosti 88-90%. Nevýhodou jsou vyšší pořizovací náklady, způsobené složitější konstrukcí soustrojí. Základním znakem je axiální průtok oběžným kolem a podle konkrétního typu radialní, diagonální a axiální průtok rozváděčem.

Princip činnosti Kaplanovy turbíny je následující. Voda je přiváděna na rozváděcí kolo turbíny, kde je pomocí lopatek usměrněna tak, aby získala co největší rychlost a byla následně přiváděna na lopatky oběžného kola. Voda pak dále vstupuje do savky a z ní do vývařiště a odpadního kanálu.

Kaplanova turbína může být obdobně jako Francisova konstruována jako vertikální nebo horizontální. Horizontální řešení je výhodnější v případě menší měrné energie $E = (15 - 20) \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ a pro průtoky $Q = (0,6 - 6) \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Pro měrné energie $E = (50 - 100) \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ je výhodnější vertikální uspořádání. Kaplanova

turbína může být řešena i jako spirální v případech ještě větší měrné energie. Vzhledem k rostoucím nákladům při tomto typu instalace je vhodnější využití Francisovy turbíny.[1]



Obr. 1.8: Řez Kaplanovou turbínou [3]

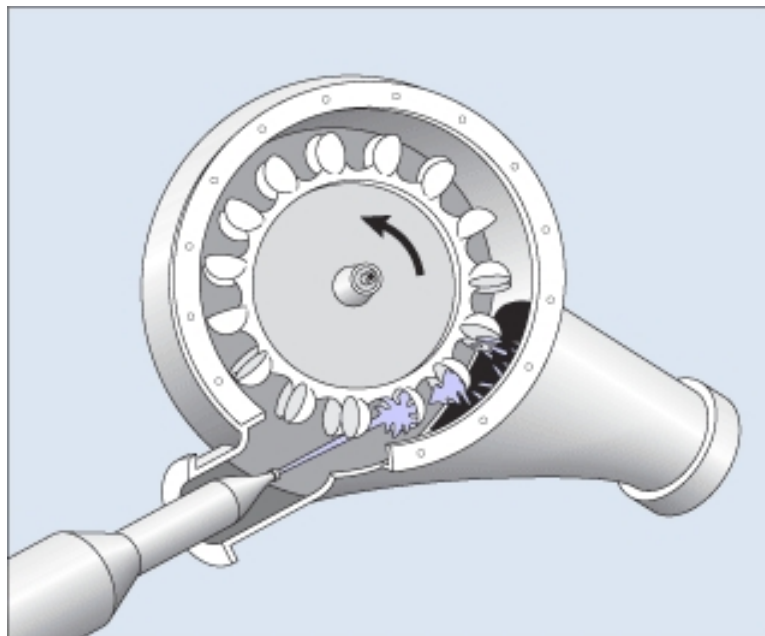
1.7 Rovnotlaké turbíny

V případě, že se celá část tlakové energie přemění v rozváděči na energii kinetickou, je na vstupu i výstupu turbíny stejný tlak a turbína se označuje jako rovnotlaká.

1.7.1 Peltonova turbína

Vyznačuje se hydraulickou i konstrukční jednoduchostí. Využívá měrných energií v rozsahu $E = (500 - 4000) \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ a průtoku $Q = (0,2 - 3) \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. V oblasti malých vodních elektráren se používají pro měrné energie $E > 200 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ a průtoky $Q = (0,01 - 0,2) \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Oběžné kolo svým tvarem vzdáleně připomíná mlýnské kolo. Rozváděcí zařízení Peltonovy turbíny tvoří dýza, z níž vystupuje vodní paprsek ideálně kruhového průřezu a ten následně dopadá na lopatky oběžného kola, které mají tvar dvojkorečků. V dýze dochází k přeměně celkové měrné energie na měrnou energii kinetickou. Uvnitř dýzy je umístěna regulační jehla, jejíž osovým posunutím,

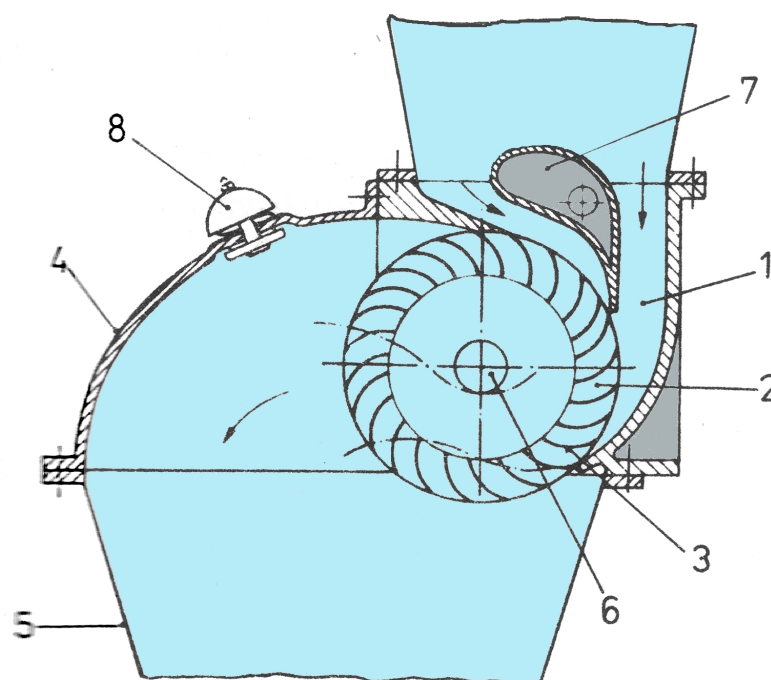
lze snadno regulovat množství vody dopadající na lopatky oběžného kola. V praxi se užívá systému dvojí regulace, kvůli zvýšení bezpečnosti provozu. V případě náhlého odlehčení, nebo rychlého odstavení stroje, by uzavření jehly způsobilo prudký nárůst tlaku v přívodním potrubí. Z toho důvodu se používá deflektor, který v případě potřeby rychle odkloní paprsek vody mimo lopatky oběžného kola. [1]



Obr. 1.9: Princip Peltonovy turbíny [14]

1.7.2 Bánkiho turbína

Jedná se o radiální turbínu s dvojnásobným průtokem. Její užití je pro měrné energie $E = (10 - 2000) \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ a průtok $Q = (0,02 - 9) \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Oběžné kolo je tvořeno dvěma věnci mezi nimiž jsou umístěny lopatky. Voda se přivádí na lopatky oběžného kola celkem dvakrát, přičemž první průtok je dostředivý, lopatky odkloní proud vody pod střed oběžného kola a voda následně dopadá na lopatky podruhé, tentokrát však odstředivě a opouští odpadním kanálem turbínu. V některé literatuře se tato turbína označuje jako mezní, protože rovnotlaký je pouze druhý průtok. První průtok je přetlakový, protože vzdálenost hrany vstupního tělesa od hrany lopatek je velmi malá, bude mít voda při prvním průtoku určité množství měrné tlakové energie.[10]



Obr. 1.10: Princip Bánkiho turbíny [1]

1–vstupní těleso, 2–oběžné kolo, 3–lopatka oběžného kola, 4– těleso turbíny,
5–savka, 6–hřídel, 7–regulační klapka, 8–zavzdušňovací ventil

1.8 Generátory pro použití u MVE

1.8.1 Asynchronní generátor

Jedná se o trojfázový indukční stroj, který má satorové vinutí rozložené tak, že po připojení na třífázovou síť vzniká točivé magnetické pole. V případě, že otáčky rotoru jsou rozdílné od synchronních otáček točivého magnetického pole satoru, začne se ve vinutí rotoru indukovat budící proud, jehož magnetické pole se snaží sledovat magnetické pole satoru. Pokud by otáčky rotoru byly synchronní s točivým polem satoru, nedojde k indukci budícího proudu v rotoru. U asynchronního stroje se tedy vyskytuje tzv. skluz, který je definován následovně:

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} [-] \quad (1.10)$$

kde n jsou otáčky rotoru [$ot \cdot min^{-1}$]

n_s jsou synchronní otáčky točivého magnetického pole satoru [$ot \cdot min^{-1}$]

Asynchronní generátor se konstrukčně nijak neliší od asynchronního motoru. Připojením asynchronního motoru k turbíně vznikne asynchronní generátor.

Zatímco u motorického režimu jsou otáčky rotoru menší než synchronní otáčky, tedy skluz $s > 0$, v případě generátorického režimu je rotor stroje poháněn turbínou na nadsynchronní otáčky a skluz je potom záporný. V tuto chvíli začíná asynchronní stroj dodávat do sítě činný výkon P , ale stále ze sítě odebírá magnetizační jalový výkon Q . Nejčastěji se asynchronní stroje provozují paralelně se sítí napájenou synchronními generátory. Ty jsou potom společně s kapacitami vedení zdrojem potřebného jalového výkonu.

V praxi je potom u asynchronních generátorů o výkonu větších jak 35 kW požadováno kompenzování jalového odběru kompenzační baterií připojenou ke svorkám generátoru [2].

1.8.2 Synchronní generátory

Obdobně jako u asynchronních strojů je i u synchronních strojů trojfázové satorové vinutí navrženo tak, aby vytvářelo točivé magnetické pole. Rotorem synchronního stroje je v podstatě elektromagnet, který se natáčí tak, že sleduje točivé magnetické pole satoru. Stejnoseměrný elektromagnet rotoru, tvoří budící vinutí, které je napájeno ze zdroje stejnoseměrného napětí.

Synchronní generátory mají uplatnění především jako zdroje elektrické energie ve velkých elektrárnách. U malých vodních elektráren se nově téměř nepoužívají vzhledem ke složitějšímu nastavení ochran a problematičtějšímu řešení automatizace provozu.

U rekonstrukcí starších MVE se lze se synchronními generátory setkat poměrně často. Hlavním důvodem jejich použití byla možnost provozu nezávisle na napájecí síti. Tato výhoda byla uplatňována především u továrních elektráren tak, aby byl provoz zajištěn i v případě výpadku napájecí sítě.

Z konstrukčního hlediska se synchronní stroje rozlišují především podle synchronních otáček. U rychloběžných generátorů v parních elektrárnách se jedná o generátory s hladkým rotorem. V případě pomaloběžných strojů vodních elektráren se potom vyskytují generátory s rotorem s vyniklými póly [2].

2 NÁVRH REKONSTRUKCE MVE

Na konkrétním případě malé vodní elektrárny lze shrnout výše uvedené informace a ověřit tak využití potenciálu vodního toku, případně navrhnout zvýšení jeho využití.

2.1 Historie MVE firmy Kalus spol. s.r.o.

Elektrárna se nachází v areálu bývalé firmy Moravolen, který sloužil k bělení textilií. MVE tedy sloužila k částečnému pokrytí spotřeby elektrické energie v areálu. Vzhledem k velkému využití tehdejšího areálu byla elektrárna konstruována jako obslužná s tříčlennou obslužnou četou. V roce 1996 koupila elektrárnu firma Kalus a provedla její rekonstrukci tak, že bylo dosaženo automatizovaného provozu. Po povodních v roce 1997 došlo na rekonstrukci jezu a instalaci nových česel a stavidel.



Obr. 2.1: Malá vodní elektrárna firmy Kalus

2.2 Lokalita MVE

Budova elektrárny je postavena na vodním toku řeky Desné na 10,5 říčním kilometru na okraji Šumperka. Z evidenčního listu hlásného profilu [5], zveřejněného na stránkách ČHMÚ, lze pro řeku Desnou vyčíst průměrný roční průtok $Q = 4,08 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

Tato informace ovšem nemá takovou vypovídající hodnotu jako M-denní průtoky, protože hladina řeky značně kolísá v průběhu roku a svého maxima dosahuje v jarních měsících.

M	30	90	180	270	330	355	364
$m^3 \cdot s^{-1}$	8,2	4,6	2,8	1,8	1,2	0,9	0,7

Tab. 2.1: M-denní průtoky řeky Desné s odečteným sanačním průtokem

2.2.1 Technický popis zařízení – vtokový objekt

Malá vodní elektrárna firmy Kalus v Šumperku využívá energetického potenciálu řeky Desné se spádem $H = 4,5 \text{ m}$ s průtokem turbínou $Q_{max} = 5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Přívod vody k turbíně je řešen vybetonovaným derivačním kanálem. Kanál odebírá vodu k turbíně nad jezem, který byl pro tento účel zbudován. Vtok do kanálu je opatřen vtokovými stavidly s hradíci tabulemi ovládanými ručně i elektromotoricky, a dále proplachovacím kanálem.

2.2.2 Technický popis zařízení – strojovna MVE

Ve strojovně je instalována vertikální Kaplanova turbína s regulací rozváděcích i oběžných lopatek za provozu stroje. Turbína je vyrobena s průměrem oběžného kola 1180mm.

Původní synchronní generátor, byl během rekonstrukce nahrazen asynchronním, protože už není dále zapotřebí zajišťovat napájení areálu v případě výpadku sítě. Výměna generátoru za asynchronní dále zjednodušila automatizovaný provoz elektrárny a přispěla i k ekonomickému zvýhodnění v podobě vyšší výkupní ceny elektrické energie.

Turbína je vybaveno plnou regulací rozváděcích i oběžných lopatek za provozu stroje. Regulace je hydraulická, využívá částečně původního regulátoru otáček, který byl na MVE instalován. K regulátoru je připojen hydraulický agregát, který slouží jako zdroj tlakového oleje pro ovládání turbíny a současně jsou na něm osazeny i příslušné ovládací prvky. Řízení chodu MVE je plně automatizováno pomocí řídicího systému MODICON firmy TELEMECANIQUE. Na rozváděči je osazen komunikační modul s displejem pro informaci obsluhy o poruchových stavech s možností zásahu a změny zvolených údajů.

Typ turbíny	Kaplanova turbína vertikální
Průměr oběžného kola D	1180mm
Spád H_u	4,5m
Průtok Q_t	$5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
Výkon P	160kW
Otáčky n	$250/750 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$
Typ generátoru	asynchronní generátor Siemens
Otáčky n	$239 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$
Napětí U	400V /50 Hz
Výkon P	160kW

Tab. 2.2: Parametry instalovaného zařízení



Obr. 2.2: Strojovna MVE

2.3 Efektivita výchozího stavu

Porovnáním parametrů instalované turbíny s M-denními průtoky 2.1 je vidět, že instalovaná turbína není vhodným řešením pro celoroční využívání. Přestože se Kaplanova turbína vyznačuje širokým regulačním rozsahem, využívá současné řešení potenciál vodního toku pouze částečně.

V následující tabulce jsou uvedeny hodnoty vyrobené energie v jednotlivých měsících v letech 2005 a 2006

rok	2005	2006
<i>měsíc</i>	<i>E[kWh]</i>	<i>E[kWh]</i>
leden	49 440	0
únor	4 800	0
březen	37 680	15 120
duben	98 760	88 440
květen	90 780	77 580
červen	40 020	20 340
červenec	19 860	0
srpen	36 060	46 737
září	0	21 130
říjen	0	0
listopad	0	45 413
prosinec	0	60 617
Σ	377 400	375 377

Tab. 2.3: Výroba MVE za rok 2005 a 2006

V roce 2008 byla na elektrárně provedena modernizace, tak aby byla zajištěna vyšší výkupní cena energie. Protože dle cenového rozhodnutí ERÚ č. 4/2009 platí pro elektrárny uvedené do provozu od 1.1.2005 vyšší výkupní cena a platí i pro starší elektrárny u nichž byla po 13.8.2002 provedena a dokončena rekonstrukce zařízení výrobní zvyšující technickou, provozní, bezpečnostní a ekologickou úroveň zařízení na úroveň srovnatelnou s nově zřizovanými výrobny.

Pro splnění podmínek pro přiznání výhodnější výkupní ceny elektrické energie je třeba na MVE provést investice v těchto oblastech:

- generální oprava turbíny
- výměna nebo převinutí generátoru (výměna za nový, který bude odpovídat výkonu turbíny)
- oprava elektročásti spočívající v zabránění působení zpětných vlivů na elektrickou síť dle ČSN EN 50160
- výměna regulačních zařízení
- výměna nebo instalace nového automatizovaného systému řízení

V souladu s vyjmenovanými podmínkami byl vyměněn starý nevyhovující synchronní generátor za nový od firmy Siemens s parametry uvedenými v tabulce 2.2. Dále byly splněny všechny potřebné kroky k získání vyšší výkupní ceny 2,35 Kč/kWh.

Tímto bylo dosaženo dalšího zvýšení efektivity výroby energie z finančního hlediska. Stále je však hlavní nevýhodou současného stavu nízká doba využití elektrárny.

Další části bakalářské práce budou zaměřeny na konkrétní návrh zvýšení efektivity současného stavu další modernizací elektrárny.

2.4 Zvýšení efektivity instalací druhé turbíny

V úvahu přichází instalace druhé turbíny o takových parametrech, aby bylo dosaženo vyššího využití vodního toku.

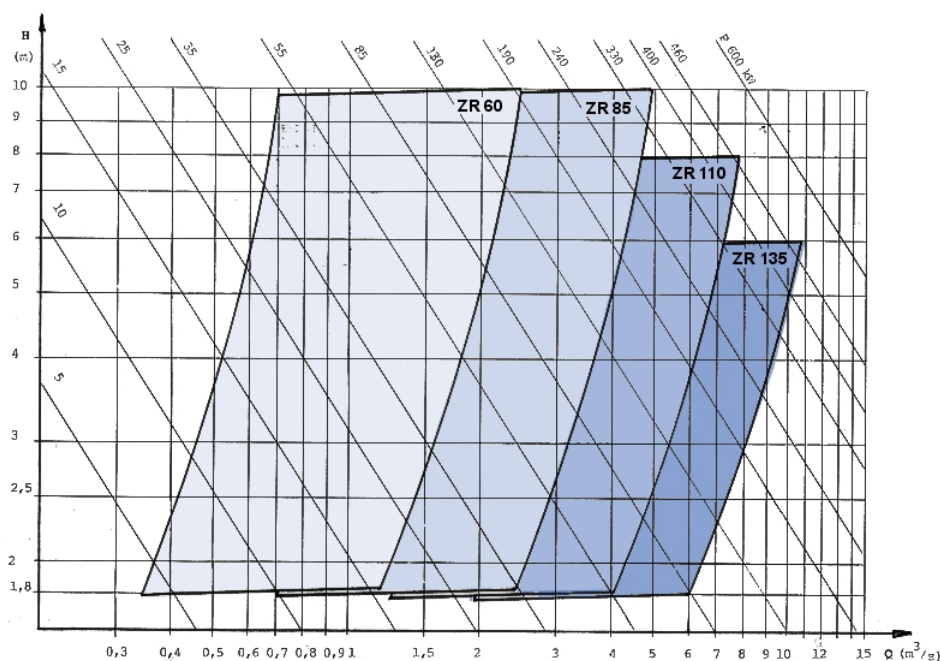
Pokud bychom dimenzovali elektrárnu podle 180-denního průtoku, dostáváme se na hltlost turbíny $Q = 2,8 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Podle této hodnoty bychom mohli použít Francisovu, Reiffensteinovu, Kaplanovu nebo Bánkiho turbínu.

Při dimenzování turbíny na spád $H = 4,5 \text{ m}$ se potom nabízí Kaplanova turbína a Bánkiho turbína.

2.5 Výběr nově instalované turbíny

Při volbě typu turbíny budeme nadále uvažovat užitný spád $H_u = 4 \text{ m}$ a dále budeme dimenzovat na průtok $Q = 2,8 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

Po oslovení několika firem zabývajících se výrobou Kaplanových turbín v ČR byla vybrána turbína od firmy ZIROMONT. Konkrétně se jedná o typ ZR 85-3L-3M s generátorem SIEMENS 75 kW. Navržená turbína je v přímoproudém uspořádání s automaticky plně regulovanými koly oběžným i rozváděcím, což zajišťuje plochou křivku účinnosti turbíny v celém rozsahu její hltlosti.



Obr. 2.3: Oblasti použití a dosahované parametry turbín ZIROMONT [15]

Ovládání RK i OK je hydraulické ze samostatného agregátu, bezpečnostní zavírání RK je gravitační bez nutnosti zálohového zdroje. Vzájemná vazba polohy RK i OK je elektronická, svázaná zadanou matematickou funkcí.

Q_{max}	$3m^3 \cdot s^{-1}$
Q_{opt}	$2,1m^3 \cdot s^{-1}$
Q_{min}	$0,4m^3 \cdot s^{-1}$
P_{max}	$70kW$

Tab. 2.4: Parametry turbíny Ziromont ZR 85-3L-3M

Přibližná cena této turbíny je 1,6 mil. Kč. Součástí turbíny je ocelový žebrovaný nátokový díl a savka.

2.6 Výběr generátoru

Generátor je volen třífázový asynchronní přírubový od firmy SIEMENS z řady 1LG6. Jmenovitý výkon $P = 75kW$ při $740ot \cdot min^{-1}$, osmipólový, s účínkem $\cos\varphi = 0,85$, účinnost $\eta = 94\%$. Přibližná cena se pohybuje kolem 160 000 Kč.

2.7 Návrh vyvedení výkonu

2.7.1 Výpočet průřezu vodiče

Při navrhování průřezu vodiče budeme vycházet z parametrů instalovaného generátoru. Navrhujeme tedy vývod výkonu pro asynchronní generátor, jehož jmenovitý výkon $P = 75 \text{ kW}$, $\cos\varphi = 0,85$, $\eta = 0,94$. Generátor bude připojen do trafostanice lokální distribuční soustavy vzdálené 35m. Kabel bude uložen v zemi.

1. Dimenzování podle provozní teploty

Dovolené zatížení vodiče je

$$I_z = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U \cdot \cos\varphi \cdot \eta} = \frac{75}{\sqrt{3} \cdot 0,4 \cdot 0,85 \cdot 0,94} = 135 \text{ A} \quad (2.1)$$

Musí platit podmínka

$$I_n \geq \frac{I_z}{k} \quad (2.2)$$

– I_n je jmenovité proudové zatížení vodiče [A] pro daný typ a průřez a pro referenční způsob uložení dle ČSN 33 2000-5-523

– k je přepočítavací součinitel [-] pro podmínky odlišné od referenčního způsobu uložení.

V tomto případě budeme uvažovat referenční způsob uložení D – vícežilové kabely v trubkách v zemi, v přímém kontaktu s půdou o měrném tepelném odporu $2,5 \text{ K} \cdot \text{m}/\text{W}$ v hloubce 0,7m

Dovolený proud hliníkových vodičů volíme dle 2.2 a dle ČSN 33 2000-5-523 pro tři zatížené vodiče PVC s $I_n = 138 \text{ A}$ vychází průřez $S = 95 \text{ mm}^2$. Volíme tedy kabel 04–AYKY $3 \times 95 \text{ mm}^2$

2. Kontrola úbytku napětí

$$R = \rho \cdot \frac{l}{S} = 0,029 \cdot \frac{35}{95} = 0,011 \Omega \quad (2.3)$$

$$X = x_k \cdot l = 0,06 \cdot 0,035 = 0,0021 \Omega \quad (2.4)$$

– pro nn kabely uvažujeme měrnou reaktanci $x_k = 0,06 \Omega/\text{km}$

$$\begin{aligned} \Delta U &= R \cdot I_z \cdot \cos\varphi + X \cdot I_z \cdot \sin\varphi \\ \Delta U &= 0,011 \cdot 135 \cdot 0,85 + 0,0021 \cdot 135 \cdot 0,527 = 1,41 \text{ V} \end{aligned} \quad (2.5)$$

$$\Delta U_{\%} = \frac{\Delta U \cdot 100}{U_n} \cdot \sqrt{3} = \frac{1,41 \cdot 100}{400} \cdot \sqrt{3} = 0,61\% \quad (2.6)$$

3. Výpočet třífázových ztrát

$$\Delta P = 3 \cdot R \cdot I^2 = 3 \cdot \frac{\rho \cdot l}{S} \cdot I^2 = 3 \cdot \frac{0,0303 \cdot 35}{95} \cdot 135^2 = 610W \quad (2.7)$$

$$\Delta p_{\%} = \frac{\Delta P}{P} \cdot 100 = \frac{610}{75 \cdot 10^3} \cdot 100 = 0,81\% \quad (2.8)$$

2.7.2 Návrh kompenzace

Asynchronní generátor bude při jmenovitém výkonu $P=75$ kW pracovat s účinníkem $\cos\varphi = 0,85$. Při výkonu větším jak 35kW je obvykle požadována distribuční společnost kompenzace jalového odběru na účinník $\cos\varphi_k = 0,95$ kompenzační baterií připojenou na svorkách generátoru [2].

Jalový výkon generátoru při účinníku 0,85 lze vyjádřit následovně:

$$Q = tg\varphi \cdot P = 0,620 \cdot 75 = 46,5kVAr \quad (2.9)$$

Jalový výkon při účinníku je :

$$Q_k = tg\varphi_k = 0,328 \cdot 75 = 24,6kVAr \quad (2.10)$$

Třífázový výkon kompenzační baterie je:

$$Q_c = Q - Q_k = 46,5 - 24,6 = 21,9kVAr \quad (2.11)$$

Pro kompenzaci jalového výkonu může být zvolen například kompenzační kondenzátor výrobce ZEZ–Silko, konkrétně typ CSADG 1-0,4/25 s třífázovým kompenzačním výkonem 25 kVAr.

2.7.3 Jištění zařízení

V rámci chránění připojeného zařízení a zajištění kvality dodávky elektrické energie musí být elektrárna vybavena následujícími ochranami:

- Nadproudové ochrany – U malých výkonů se obvykle používají pojistky nebo jističe pro chránění před účinky zkratových proudů. K ochraně proti přetížení se používají nadproudová relé, případně nadproudové spouště jističů.[2]
- Napěťové ochrany – Skládají se ze dvou částí. Podpěťová ochrana bývá realizována podpěťovým relé, které sleduje snížení napětí pod provozní hodnotu. Přepěťová ochrana musí být frekvenčně nezávislá a zajišťuje rychlé odpojení stroje při vzniku přepětí.[2]

- Frekvenční ochrany – U soustrojí je nutné sledovat dodržení mezí frekvence napětí na svorkách generátoru. Z tohoto důvodu se instalují frekvenční relé, které sledují vybočení frekvence mimo povolenou mez. V praxi bývá toto vybočení znakem odpojení elektrárny od rozvodné sítě a je nutné zajistit rychlé odstavení soustrojí.[2]
- Ochrana proti nesymetrickému zatížení – V případě přerušení jedné fáze vývodu z generátoru např. v důsledku přerušení pojistky dochází k velkému proudovému přetížení generátoru a k nežádoucímu ovlivnění sítě.[2]
- Zpětná wattová ochrana – Cílem ochrany je zabránit zpětnému toku výkonu ze sítě do generátoru, aby nedocházelo k chodu generátoru v motorickém režimu a aby se při odstavování generátoru zabránilo odpojení od sítě ve chvíli, kdy je výkon turbíny vyšší než mechanické ztráty stroje. Zbytkový výkon by totiž mohl roztočit soustrojí nad jmenovité otáčky.[2]

Jako napěťová a frekvenční ochrana byla zvolena ochrana RUF3 od firmy PROTECTION Consulting. Jedná se o třífázovou číslicovou ochranu, která chrání síť před zpětnými vlivy. Systém napěťových a frekvenčních ochran působí při náhlém odlehčení generátoru, selhání regulátoru otáček turbíny a zajišťují tak ochranu při vzniku ostrovního provozu generátoru.

Jako nadproudová ochrana, ochrana proti nesymetrii a zemní proudová ochrana je zvolena ochrana typu RIGA-D od stejného výrobce jako předchozí. Tato ochrana umožňuje komplexní nastavení jednotlivých nadproudových ochran, tak aby byla zajištěna ochrana jak proti přetížení, tak i proti zkratu.[13]



Obr. 2.4: Ochrana RUF3 a ochrana RIGA-D [13]

3 KALKULACE NÁVRATNOSTI

3.1 Odhad výroby elektrické energie po rekonstrukci

Pro výpočet kalkulace návratnosti budeme vycházet z následujícího odhadu výroby elektrické energie na základě M-denních průtoků uvedených v tabulce 2.1. Dále předpokládáme následující kooperaci instalovaných soustrojí.

Po dobu 30 dnů je dle tabulky 2.1 možné současný běh obou soustrojí, následujících 60 dnů budeme uvažovat v provozu pouze turbínu T1 s výkonem $P_1 = 160 \text{ kW}$. Dále uvažujeme odstavení turbíny T1 v důsledku nedostatečného průtoku a spuštění pouze turbíny T2 s výkonem $P_2 = 65 \text{ kW}$ po dobu 90 dní s průtokem $2,8 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

Během dalších 90 dní klesne výkon turbíny T2 na $P_2 = 42 \text{ kW}$ v důsledku snížení průtoku na $1,8 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. U výpočtu výkonu při sníženém průtoku vycházíme z rovnice 1.5 s konstantou $k = 5,19 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-3}$ a užitným spádem $H_u = 4,5 \text{ m}$. Změnu účinnosti kaplanovy turbíny při výpočtu zanedbáváme protože podle grafu 1.5 se v daném rozsahu výrazně nemění.

Po zbylou dobu uvažujeme odstavení obou turbín, přestože regulační možnosti by dovozovaly jejich provoz se sníženým výkonem.

M–dní	průtok [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$]	provoz [dny]	provoz [hod]	výkon T1[kW]	energie vyrobená T1[kWh]	výkon T2[kW]	energie vyrobená T2[kWh]
30	8,2	30	720	160	115 200	70	50 400
90	4,6	60	1 440	160	230 400	–	–
180	2,8	90	2 160	–	–	65	140 400
270	1,8	90	2 160	–	–	42	90 720
Σ					345 600		281 520

Tab. 3.1: Předpoklad výroby elektrické energie po rekonstrukci

Z tabulky 3.1 je patrné, že turbína T1 vyrobí ročně 345 600 kWh, což přibližně odpovídá reálnému množství vyrobené energie uvedenému v tabulce 2.3 za roky 2005 a 2006. Budeme tedy předpokládat, že odhad výroby energie je správný a turbína T2 vyrobí ročně 352 800 kWh.

3.2 Přehled předpokládaných tržeb

Výkupní cena elektrické energie je pro obě turbíny dle cenového rozhodnutí Energetického regulačního úřadu č.4/2009 stanovena na 2,35 Kč/kWh vyrobené energie.

Turbína	E[kWh]	cena [Kč/kWh]	Tržby [Kč]
T1	345 600	2,35	812 160
T2	281 520	2,35	661 572

Tab. 3.2: Přehled předpokládaných tržeb za rok

3.3 Odhad nákladů na realizaci rekonstrukce

Odhad celkových nákladů na realizaci rekonstrukce byl konzultován s firmou Elzaco spol. s.r.o. a obsahuje následující součásti:

- Turbína Ziromont ZR 85-3L-3M, cena 1 600 000 Kč.
- Generátor Siemens 1LG6 75kW, cena 160 000 Kč,
- Stavební úpravy zajišťující vybourání prostupů v betonu, vybudování vývařiště a strojovny druhé turbíny, úprava nátoky k nově osazené turbíně, cena 500 000 Kč.
- Montáž jemných česlí a čistícího stroje s brodivými řetězy poháněnými elektromotorem přes převodovku, přibližná cena 150 000 Kč.
- Rozvadeč pro ovládání turbíny, cena 200 000 Kč.
- Řídicí systém a programování, 70 000 Kč.
- Elektromontážní materiál a práce, cena 150 000 Kč.

Celkové pořizovací cena investice činí 2 830 000 Kč bez DPH.

3.4 Odhad provozních nákladů

Mezi provozními náklady jsou zahrnuty:

- Mzda jednoho pracovníka – obsluhy MVE ve výši 10 000 Kč a sociální a zdravotní pojištění ve výši 30%. Celkem 13 000 Kč měsíčně, tj. 156 000 Kč ročně.
- Údržba a drobné opravy MVE ve výši 100 000 Kč ročně.

Celkové provozní náklady jsou odhadnuty na 256 000 Kč ročně.

3.5 Finanční návratnost investice

Pro výpočet finanční návratnosti budeme uvažovat následující parametry:

- Investiční náklady K_i jsou ve výši 2 830 000 Kč.
- Provozní náklady N_P jsou ve výši 256 000 Kč.
- Tržby nově instalované turbíny T jsou ve výši 829 080 Kč.
- Daň ze zisku d je ve výši 19%.
- Malá vodní elektrárna spadá do 4. odpisové kategorie dle zákona o daních z příjmu č. 586/1992 Sb. s odpisovou lhůtou 20 let.
- Odpisy majetku jsou rovnoměrně rozloženy na celou dobu odepisování s odpisovou sazbou v prvním roce $ODP_1 = 2,15\%$, v dalších letech $ODP = 5,15\%$.

Rok	Tržby	Provozní náklady	Náklady na odpisy	Zisk	Čistý zisk	Peněžní příjem
j	T [Kč]	N_P [Kč]	N_{ODP} [Kč]	Z_1 [Kč]	Z_{T1} [Kč]	P_j [Kč]
1	661 572	256 000	60 845	344 727	270 229	340 074
2	661 572	256 000	145 745	259 827	210 460	356 205
3	661 572	256 000	145 745	259 827	210 460	356 205
4	661 572	256 000	145 745	259 827	210 460	356 205
5	661 572	256 000	145 745	259 827	210 460	356 205
6	661 572	256 000	145 745	259 827	210 460	356 205
7	661 572	256 000	145 745	259 827	210 460	356 205
8	661 572	256 000	145 745	259 827	210 460	356 205
Σ						2 833 508

Tab. 3.3: Přehled ročních příjmů

Příklad výpočtu ročního příjmu pro 2. řádek tabulky 3.3 [6]:

$$N_{ODP} = K_i \cdot ODP = \frac{2\,830\,000 \cdot 2,15}{100} = 145\,745 \text{ Kč} \quad (3.1)$$

$$Z_1 = T - N_P - N_{ODP} = 661\,572 - 256\,000 - 145\,745 = 259\,827 \text{ Kč} \quad (3.2)$$

$$Z_T = Z_1 \cdot (1 - d) = 259\,827 \cdot (1 - 0,19) = 210\,460 \text{ Kč} \quad (3.3)$$

$$P_j = N_{ODP} + Z_{T1} = 145\,745 + 210\,460 = 356\,205 \text{ Kč} \quad (3.4)$$

Na základě tabulky 3.3 je zřejmé, že návratnost celé investice je v osmém roce, protože na konci tohoto roku příjmy z rekonstruované elektrárny převýší investiční náklady.

4 ZÁVĚR

V bakalářské práci jsou teoreticky popsány základní typy elektráren a turbín v nich používaných. Tento teoretický základ je dále využit k popsání stavu na konkrétním případě malé vodní elektrárny.

Vzhledem k tomu, že současný stav elektrárny využívá energii vodního toku na které je vybudován jen částečně, bylo cílem bakalářské práce navržení zvýšení efektivity současného stavu další modernizací elektrárny. V úvahu přichází instalace druhé turbíny o takových parametrech, aby bylo dosaženo vyššího využití vodního toku.

V práci byla vybrána turbína od firmy ZIROMONT. Konkrétně se jedná o přímo-proudou turbínu typ ZR 85-3L-3M s generátorem SIEMENS 75kW řady 1LG6. Dále je pro toto soustrojí navrženo vyvedení výkonu s kabelem 04-AYKY $3 \times 95 \text{ mm}^2$ s jednostupňovou kompenzací zajištěnou kompenzačním kondenzátorem typu CSADG 1 - 0,4 / 25 od výrobce ZEZ-Silko. Vyvedení výkonu bude zajištěno systémem ochran od výrobce PROTECTION Consulting. Jedná se napěťově-frekvenční ochranu RUF3 a nadproudovou ochranu RIGA-D.

Z hlediska finanční návratnosti se počítá s investičními náklady ve výši 2 830 000 Kč bez DPH. Na základě odhadnutých nákladů a tržeb je vypočítána návratnost celé investice během osmi let. Z tohoto hlediska je investice hodnocena jako dobrá a lze doporučit realizaci.

LITERATURA

- [1] BEDNÁŘ, J. *Malé vodní elektrárny 2 : Turbíny*, vyd. Praha : SNTL, 1989. 240 s.
- [2] GABRIEL, Pavel; ČIHÁK, František; KALANDRA, Petr. *Malé vodní elektrárny*, Praha : Vydavatelství ČVUT, 1998. 321 s. ISBN 80-01-01812-1.
- [3] *CoJeCo – Vaše encyklopedie* [online]. 2000 , 5.11.2000 [cit. 19.11.2009].
Dostupný z WWW: http://www.cojeco.cz/index.php?detail=1&id_desc=43115&cs_lang=2
- [4] ČHMÚ - Úsek hydrologie : Oddělení povrchových vod [online]. 1998 , 31.3.2000 [cit. 2009-02-12].
Dostupný z WWW: <http://www.chmu.cz/hydro/opv.html>.
- [5] ČHMÚ - hydrologická služba [online]. březen.2006 [cit. 2009-06-12].
Dostupný z WWW: http://hydro.chmi.cz/hpps/hpps_prfbk_detail.php?seq=307334
- [6] CHMELA, Michal. *Ekonomika a řízení*. Brno : [s.n.], 2007. 115 s.
- [7] *Ekowatt* [online]. c2008 [cit. 2009-12-02].
Dostupný z WWW: <http://ekowatt.cz/uspory/vodni-energie.shtml>
- [8] *Francisova turbína - Wikipedie, otevřená encyklopedie* [online]. 2004, akt. 28.3.2004 [cit. 19.11.2009].
Dostupný z WWW: http://cs.wikipedia.org/wiki/Francisova_turbína
- [9] MOTLÍK, Jan, et al. *Obnovitelné zdroje energie a možnosti jejich uplatnění v ČR*, 2007, Praha : CRUX s.r.o., 2007. 180 s.
Dostupný z WWW: <http://www.cez.cz/cs/veda-a-vzdelavani/prostudenty/materialy-ke-studiu/tiskoviny/19.html> ISBN 987-80-239-8823-9
- [10] LAIKA, Viktor. *Abeceda vodních pohonů* [online]. 2001-2004 [cit. 2009-12-02].
Dostupný z WWW: <http://mve.energetika.cz/>.
- [11] *Jzed-el-Vodni* [online]. 2004 [cit. 2009-12-02].
Dostupný z WWW: http://ok1zed.sweb.cz/s/el_vodniel.htm.
- [12] MAŤUGA, Michal. *Malé vodné elektrárne*. Posterus [online]. 16. November 2009, 2, 11, [cit. 2010-05-27]. Dostupný z WWW: <http://www.posterus.sk/?p=3649>.
- [13] *Elektrické ochrany : PROTECTION & CONSULTING s.r.o.* [online]. 2009 [cit. 2010-05-24].
Dostupné z WWW: <http://www.protection.cz/el-ochrany.html?id=41>.

- [14] *Synergy Energy Solutions* [online]. [1998] [cit. 2009-12-13].
Dostupný z WWW: <http://synergyholdings.net/esolutions/default.htm>
- [15] *ZIROMONT : Vodní turbíny pro malé vodní elektrárny* [online]. 2002 [cit. 2010-05-24].
Dostupné z WWW: <http://www.ziromont.cz/index-n.htm>