

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA ELEKTROMECHANIKY A VÝKONOVÉ ELEKTRONIKY**

## **BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**Návrh malé vodní elektrárny pro provoz v síti ČR**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
Fakulta elektrotechnická  
Akademický rok: 2012/2013

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

Jméno a příjmení: **Marek TOBRMAN**  
Osobní číslo: **E10B0085K**  
Studijní program: **B2644 Aplikovaná elektrotechnika**  
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**  
Název tématu: **Návrh malé vodní elektrárny pro provoz v síti ČR**  
Zadávací 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. Odůvodněte výstavbu MVE v podmínkách elektrizační soustavy ČR.
2. Uveďte přehled současných technologií a možností realizací MVE.
3. Proveďte konkrétní návrh MVE.
4. Posuďte ekonomickou náročnost a návratnost této elektrárny.

## **Abstrakt**

Tato bakalářská práce v první části seznamuje s výhodami výstavby malých vodních elektráren v podmínkách elektrizační soustavy ČR a jejich vlivem na přenosovou síť. V druhé části se věnuje rozdělení malých vodních elektráren z hlediska různých parametrů a možnosti realizací, zároveň popisuje jejich současné technologické provedení. Dále je proveden návrh konkrétní malé vodní elektrárny na vodním díle Lučina s ohledem na zvýšení hydroenergetické účinnosti a spolehlivosti. Závěrem je tento návrh zhodnocen z hlediska ekonomické náročnosti a návratnosti této konkrétní elektrárny.

## **Klíčová slova**

Návrh, malá vodní elektrárna, vodní turbína, generátor.

## **Abstract**

The first part of this thesis presents the advantages of building small hydroelectric power stations under the conditions of the Czech electricity supply system and their influence on the national grid. The second part concerns the classification of small hydroelectric power stations with regards to various parameters and the conditions necessary for their realisation while also describing the technology currently used. The design of a specific small hydroelectric power station at the Lučina reservoir is also presented with a view to increasing hydropower efficiency and reliability. The conclusion includes an evaluation of this design with regards to the economic costs of this power station and the potential returns on investment.

## **Key words**

Project, small hydro power station, water turbine, generator.

## Prohlášení

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

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

.....  
podpis

V Chlumčanech dne 5/6/2013

Marek Tobrman

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce

prof. doc. Ing. Janu Mühlbacherovi, CSc. za cenné profesionální rady a připomínky.

## Obsah

<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK .....</b>	<b>1</b>
<b>ÚVOD .....</b>	<b>2</b>
<b>ODŮVODNĚTE VÝSTAVBU MVE V PODMÍNKÁCH ELEKTRIZAČNÍ SOUSTAVY ČR .....</b>	<b>3</b>
<b>UVEĎTE PŘEHLED SOUČASNÝCH TECHNOLOGIÍ A MOŽNOSTÍ REALIZACE MVE .....</b>	<b>5</b>
1.1 MALÉ VODNÍ ELEKTRÁRNY SE DĚLÍ PODLE: .....	5
1.2 VODNÍ TURBÍNY .....	6
1.3 NEJPOUŽÍVANĚJŠÍ TYPY TURBÍN .....	8
1.3.1 Rovnotlaké turbíny .....	8
1.3.2 Přetlakové turbíny .....	11
1.4 REGULACE OTÁČEK TURBÍN .....	12
1.5 ELEKTROTECHNICKÁ ZAŘÍZENÍ MVE .....	13
1.5.1 Generátory .....	13
1.5.2 Transformátory .....	15
1.5.3 Kompenzace .....	15
1.5.4 Elektrické ochrany .....	15
1.5.5 Snímání neelektrických veličin .....	17
<b>PROVEĎTE KONKRÉTNÍ NÁVRH MVE .....</b>	<b>19</b>
1.6 LOKALITA STÁVAJÍCÍ STAV .....	19
1.7 ÚČEL NÁVRHU .....	21
1.8 PODMÍNKY PRO VÝPOČET TURBÍNY .....	21
1.9 HYDROENERGETICKÉ ŘEŠENÍ MVE .....	22
1.9.1 Technické parametry .....	24
1.10 NÁVRH KOMPENZACE JALOVÉHO VÝKONU .....	24
1.11 NÁVRH VODIČŮ VYVEDENÍ VÝKONU .....	26
<b>POSOUZENÍ EKONOMICKÉ NÁROČNOSTI A NÁVRATNOSTI MVE .....</b>	<b>30</b>
1.12 EKONOMICKÁ INVESTICE .....	30
1.13 ODHAD VÝROBY PO REKONSTRUKCI .....	31
1.14 FINANČNÍ NÁVRATNOST .....	31
<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>34</b>
<b>SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ .....</b>	<b>35</b>

## Seznam symbolů a zkratek

$I$	.....	Proud [A]
$P$	.....	Činný výkon [W]
$Q$	.....	Jalový výkon [Var]
$R$	.....	Elektrický odpor [ $\Omega$ ]
$S$	.....	Průřez vodiče
$U$	.....	Elektrické napětí [V]
$l$	.....	Délka vodiče [m]
$X_k$	.....	Reaktance vodičů [ $\Omega km^{-1}$ ]
$E$	.....	Měrná energie vodičů [ $J kg^{-1}$ ]
$E_k$	.....	Kinetická energie [J]
$H$	.....	Spád [m]
$m$	.....	Hmotnost [kg]
$Q_p$	.....	Průtok [ $m^3 \cdot s^{-1}$ ]
$n$	.....	Otáčky [ $ot \cdot min^{-1}$ ]
$\rho$	.....	Hustota [ $kg \cdot m^{-3}$ ]
$g$	.....	Gravitační zrychlení [ $m \cdot s^{-2}$ ]
$\eta$	.....	Účinnost [%]
$N_p$	.....	Kinetická energie [Kč]
$T$	.....	Tržby [Kč]
$Z$	.....	Zisk [Kč]



## **Úvod**

Tato práce seznamuje s výhodami výstavby malých vodních elektráren v podmínkách elektrizační soustavy ČR.

Text je rozdělen do tří částí. První se věnuje výhodám výstavby malých vodních elektráren v podmínkách elektrizační soustavy ČR a jejich vlivem na přenosovou síť. Druhá uvádí rozdělení a technologické možnosti v malých vodních elektrárnách. Třetí část popisuje konkrétní návrh rekonstrukce malé vodní elektrárny na vodním díle Lučina včetně odhadu ekonomické návratnosti.

## Odůvodněte výstavbu MVE v podmínkách elektrizační soustavy ČR

Česká republika se nachází na rozvodí oddělující povodí tří moří Severního, Baltského a Černého moře. Velké řeky u nás jen pramení, a proto je značná část vodní energie rozložena ještě v malých tocích. V České republice se využívá hydroenergetický potenciál vodních toků jen asi z 35%. Z nevyužitého potenciálu lze jen 25% využít na velkých a středních tocích, protože pro tak velká vodní díla už nejsou prakticky žádné vhodné lokality z důvodu poměrně vysoké hustoty obyvatelstva. Na rozdíl od velkých a středních elektráren je zde pro malé vodní elektrárny ještě spousta vhodných lokalit, ať už se jedná o jezy, bývalé mlýny, hamry, pily a třeba i rybníky s dostatečným průtokem, kde jsou dosud využity lokality jen z asi 25-30%.

Malé vodní elektrárny se vyznačují jako trvalý a skoro nevyčerpatelný zdroj elektrické energie s nulovými náklady na těžbu a dopravu surovin potřebných k provozu. Mohou použít potenciál i těch toků, kde se projevuje nestálý průtok vody, který je závislý na ročním období. Pro srovnání 1 kWh vyrobená z vodní energie ušetří cca 1 kg energetického uhlí, který by spotřebovala pro stejný výkon tepelná elektrárna. Mají malou poruchovost, minimální provozní náklady a na rozdíl od ostatních obnovitelných zdrojů má vysoký a hlavně stálý počet provozních hodin.

Malé vodní elektrárny jsou jedním z levných zdrojů jalové energie, který zvyšuje efektivitu spolupracujících elektráren a snižuje ztráty v sítích vysokého napětí. Velkou výhodou je rozložení malých vodních elektráren po celé rozloze České republiky, tak že vyrobená energie se prakticky spotřebuje v nejbližším okolí a zbytečně nezatěžuje přenosovou soustavu. Případný výpadek dodávky je z hlediska sítě bezvýznamný, oproti výpadkům velkých centrálních zdrojů. Je to zdroj, který dokáže velice rychle reagovat na změny v zatížení v elektrizační soustavě. Je zde také možnost kompenzování přebytků z ostatních obnovitelných zdrojů (solární a větrné elektrárny). V sousedních zemích se dokonce uvažuje o stavbě přečerpávacích vodních elektráren, které by v případě přebytku energie, čerpaly vodu do akumulacních nádrží a při nedostatku by pracovaly jako klasická vodní elektrárna.

Přečerpávací elektrárny jsou proto považovány za dosud jediné prakticky využitelné akumulátory energie.

Využití energie z vody má proto ve shrnutí řadu nesporných výhod oproti jiným energetickým zdrojům:

- *je to trvalý zdroj elektrické energie, který je prakticky nevyčerpatelný;*
- *nemá žádné nároky na těžbu a dopravu surovin potřebných k provozu;*
- *jako absolutně čistý zdroj neznečišťuje ovzduší a nemá žádný odpad;*
- *má poměrně nízké investiční a minimální provozní náklady;*
- *má dlouhou životnost, malou poruchovost a vysoký počet provozních hodin za rok;*
- *je to nejlevnější zdroj jalové energie, která zefektivňuje chod spolupracujících elektráren a zmenšuje ztráty v přenosové soustavě;*
- *je to zdroj vlastní, nezávislý na okolních zemích;*
- *pro svůj chod potřebují minimální počet zaměstnanců obsluhy (některé jsou dokonce plně automatizované). [2]*

## Uved'te přehled současných technologií a možností realizace MVE

### 1.1 Malé vodní elektrárny se dělí podle:

#### *Výkonu*

- *domácí vodní elektrárny s instalovaným výkonem do 35 kW*
- *vodní mikroelektrárny s instalovaným výkonem 35-100 kW*
- *vodní minielektrárny s instalovaným výkonem 100-1000 kW*
- *průmyslové vodní elektrárny s instalovaným výkonem 1-10 MW*

#### *Podle velikosti spádu:*

- *Nízkotlaké*

Nízkotlaké využívají spád do 20m. Jsou nejrozšířenějším typem s velkým potenciálem do budoucnosti. Jsou s náhonem, který má volnou hladinu, nebo jako součást jezu s přímým vtokem na turbínu. Zde jsou nejvíce použity přímoproudé turbíny, ale používají se i turbíny Kaplanovy, Francisovy, Bankiho.

- *Středotlaké*

Středotlaké využívají spád od 20 do 100m. Jsou především na středních tocích. Mají krátké tlakové přivaděče bez vyrovnávací komory, nebo jsou na dlouhých beztlakových kanálech. Turbíny se zde používají Francisovy, Kaplanovy, Bánki.

- *Vysokotlaké*

Vysokotlaké využívající spád nad 100m. Budují se převážně na horních úsecích toků s malými průtoky. Jsou pro ně charakteristické dlouhé tlakové přivaděče s vyrovnávací komorou proti rázovým jevům a vhodným uzávěrem před turbínou. Nejčastěji se používají turbíny Francis, Bánki a Pelton.

#### *Podle charakteru pracovního režimu se dělí:*

- *Průtočné vodní elektrárny*

Průtočné vodní elektrárny pracují s přirozeným průtokem a využívají spádu, který je vzdut jezem, nebo také energii nehrazeného vodního toku. Průtoky jsou využity až do určité hodnoty, na kterou je turbína dimenzována, průtoky větší než tato hodnota, nevyužitě

přetékají přes vlastní vzdouvací zařízení. Za velkých povodní může nastat vyrovnání hladin před a za vzdušným a turbína nemá potřebný spád. Tyto elektrárny tak nemají výkon jak při malých, tak ani při velkých průtocích.

- **Akumulační vodní elektrárny**

Akumulační vodní elektrárny pracují s řízeným odběrem vody akumulované v nádrži. Tyto elektrárny bývají většinou u přehradních nádrží, se kterou jsou spojeny přivaděčem. Velikost instalovaného výkonu je zde dána jak rozdílem hladin, průtokem, ale i objemem vody akumulovaným v nádrži. Při výpadku elektrárny musí být zaručen minimální odtok do odtokové části vodního díla, aby koryto toku nezůstalo suché z ekologických důvodů.

- **Přečerpávací vodní elektrárny**

Přečerpávací vodní elektrárny využívají akumulovanou vodu přečerpanou ze spodní do horní nádrže v době přebytku elektrické energie a následně odpouštění přes turbínu zpět. Zde je výroba elektrické energie provedena jen krátkodobě v době špičkové spotřeby energie v síti a voda je zde vedena jen v rámci uzavřeného okruhu.

## 1.2 Vodní turbíny

*Rozdělení podle přenosu energie rozdělujeme turbíny na přetlakové, rovnotlaké a mezní:*

- **Přetlakové**

Přetlakové mají část tlakové energie pro přívod k oběžnému kolu přeměněnou na kinetickou měrnou energii a zbývající tlak se změní v kinetickou energii při průchodu vody oběžným kolem. Označení je, že je průtok oběžným kolem proveden působením přetlaku na vstupu do oběžného kola. Někdy se také nazývají reakční, protože zde dochází při zrychlení toku vody k reakčnímu působení na oběžné lopatky. Tlak vody na vstupu do turbíny je větší než na výstupu.

- **Rovnotlaké**

Rovnotlaké mají na vstupu i výstupu stejný tlak, protože se tlaková měrná energie mění až v zařízení na kinetickou energii. Dochází zde k přenosu kinetické energie v podobě vodního paprsku přímo na hřídel turbíny. Proud vody nevyplňuje zcela průtočné kanály oběžného kola, které musí mít okolí zaplněné vzdušninou. Když je tlak vzdušiny rovný atmosférickému, tak nelze, aby tato turbína měla umístěno oběžné kolo pod spodní

hladinou vody, protože by se dostala do průtočných kanálů, narušovala by proudění a tím zhoršovala její účinnost. Tlak vody na vstupu do turbíny je stejný jako na jejím výstupu.

- **Mezní**

Mezní turbína je prakticky rovnotlaká, kde se skládají kanály oběžného kola z tvarových lopatek, že tak průtočný průřez kanálu kde proudí voda je po celé délce zaplněn vodou a nikde nedochází k odtrhávání proudu, zde je možno umístit oběžné kolo turbíny pod hladinu vody.

**Rozdělení podle průtoku oběžným kolem** - podle orientace proudění vzhledem k ose oběžného kola:

- **centrifugální turbína** s vnitřním vtokem - voda protéká oběžným kolem směrem od hřídele (turbína Fourneyronova)
- **centripetální turbína** s vnějším vtokem - voda protéká oběžným kolem směrem k hřídeli (historická turbína Francisova)
- **axiální turbína** - zde voda protéká oběžným kolem ve stálé vzdálenosti od osy oběžného kola (turbína Kaplanova)
- **radiálně axiální turbína** - zde voda proudí oběžným kolem nejprve radiálně a po přiblížení k ose se mění směr proudění na axiální (moderní Francisova turbína)
- **diagonální turbína** - zde voda protéká oběžným kolem v šikmém směru k ose hřídele (turbína Dériazova)
- **turbína s šikmým průtokem** - kde voda vstupuje na lopatky oběžného kola z boční strany a vystupuje ve směru osy (turbína TURGO)
- **tangenciální turbína** - zde voda proudí na lopatky oběžného kola v tangenciálním směru (turbína Peltonova)
- **turbína s dvojitým průtokem** - kde voda vstupuje do oběžného kola centripetálně a vystupuje centrifugálně (turbína Bánkiho)

**Podle polohy hřídele:**

- horizontální
- vertikální
- šikmé

**Podle měrné energie:**

- *nízkotlaké ( $E < 200\text{J/kg}$ )*
- *středotlaké ( $E < 1000\text{J/kg}$ )*
- *vysokotlaké ( $E > 1000\text{J/kg}$ )*

**Podle vstupní části turbíny:**

- *spirální - spirála před rozvaděčem*
- *kašnová - kašna s volnou hladinou*
- *kotlová - kotlové těleso na konci tlakového přívodu*
- *násoskové - zavzdušněním se přeruší průtok*
- *přímoproudé - přímý průtok od vstupu po výstup*

## 1.3 Nejpoužívanější typy turbín

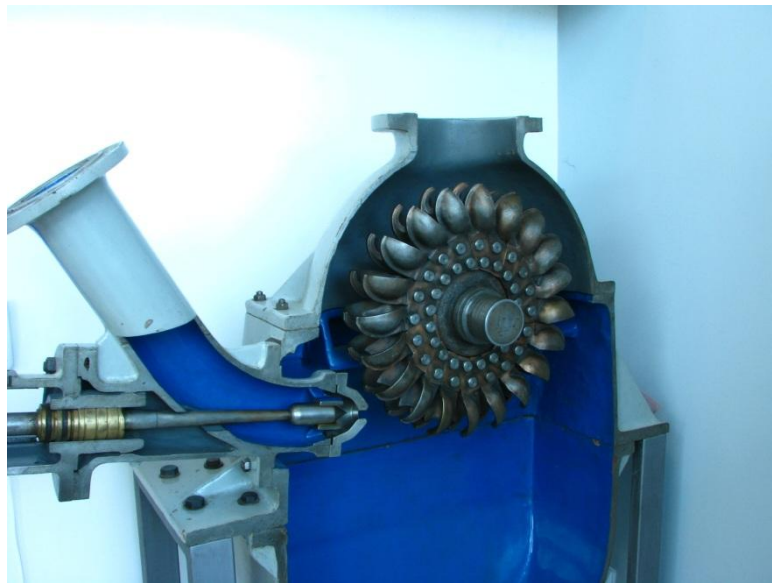
### 1.3.1 Rovnotlaké turbíny

- *Peltonova turbína*

Je to turbína s použitím pro velké spády a průtoky  $0,01\text{-}3\text{ m}^3/\text{s}$ . Provedení může být horizontální i vertikální, ale v současnosti se používá převážně horizontální uložení, které má účinnost cca 85-90%. Její předností je jednoduchost hydraulického i konstrukčního provedení a použitelnost pro okrajové hodnoty průtoku a měrné energie.

Má tangenciální vstup vody na oběžné kolo prostřednictvím trysek, ve kterých dochází ke změně tlakové energie na kinetickou energii vodního paprsku, který naráží na oběžné lopatky elipsoidického tvaru. Oběžné kolo se skládá z náboje a po obvodu rozmístěných oběžných lopatek ve tvaru dvojice korečků symetricky položených vzhledem k rovině kolmé na osu otáčení oběžného kola. Na této rovině leží také osa dýzy. Běžná turbína má 20-26 lopatek, menší lopatky dosáhnou maximální účinnosti při nižším plnění a větší lopatky naopak při plnění větším. Návrh počtu lopatek oběžného kola je určen z protichůdných požadavků. Za prvé je třeba, aby voda předala maximální kinetickou energii oběžnému kolu, a zároveň nesmí

lopatky příliš vstupovat do vodního paprsku, protože každý vstup lopatky do paprsku má vliv na jeho proudové pole. Z oběžného kola voda volně odtéká mimo konstrukci turbíny. Regulace toku se provádí změnou velikosti otvoru dýzy pomocí regulační jehly. Regulace rychlosti posunu jehly musí brát v potaz nebezpečí náhlého zvýšení tlaku při uzavírání otvoru dýzy. V současnosti se nejvíce používají trysky s úhlem regulační jehly  $42 - 50^\circ$ . Z dýzy voda ve tvaru volného paprsku kruhového průřezu ostříkuje roztečný průměr lopatky oběžného kola. V dýze se přeměňuje celková měrná energie na měrnou energii kinetickou. Větší počet trysek zvyšuje rychlost otáček, a proto se dnes využívají vícetrysková provedení turbín. Při odstavení turbíny se nepoužívá jehla, ale paprsek se odkloní pomocí deviátoru mimo oběžné kolo turbíny. Pro zvýšení bezpečnosti se používá systém dvojité regulace tak, že pohyb jehly je kombinován s pohybem deviátoru, například při odstavení nebo nečekaném odlehčení zatížení, kdy vznikne nebezpečí zvýšení otáček, je dán zároveň příkaz k rychlému zásahu deviátoru. Zároveň pomocí kulís odvozený pohyb jehly dýzy postupně zmenšuje průměr paprsku vody. [4]



Obr. 1. 1 Peltonova turbína [10]

- **Bánkiho turbína**

Je to radiální turbína s dvojnásobným průtokem pro průtoky  $0,02-9 \text{ m}^3/\text{s}$ , výkonové provedení až  $1000 \text{ kW}$  při rozsahu spádů  $2-200 \text{ m}$  a účinnosti až  $85\%$ . Před turbínou je vložena speciální vložka, která mění průřez z kruhového potrubí na obdélníkový vtok turbíny. Voda zde protéká oběžným kolem vytvořeným z kruhových desek, mezi kterými jsou po



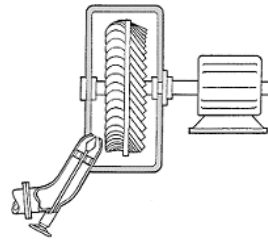
obvodu upevněny lopatky, ty mají za účel usměrnit tok vody směrem k hřídeli. Při vtoku do kola je tvořen průtok dostředivý a při výtoku odstředivý. Rovnotlakým je ale jen odstředivý výtok. Regulace otáček se provádí regulační klapkou, nebo segmentovým uzávěrem. Pro maximální účinnost je regulátor dělený po délce jako oběžné kolo. Manipulací jednotlivých částí se docílí plynulá regulace průtoku a také relativně plochá křivka průběhu účinnosti. Bánkiho turbína je nejjednodušší z hydraulického i konstrukčního hlediska. Provedení turbíny je prakticky použitelné pouze horizontální. [4]



Obr. 1. 2 Bánkiho turbína

- **TURGO turbína**

Je to méně používaný typ turbíny, která spojuje vlastnosti turbín Francis a Pelton. Používá se do výkonu 8 MW a účinnosti dosahuje až 90%. Účinnost turbíny je velmi závislá na dodržení provozních otáček. Rozváděcí ústrojí je zde provedeno stejně jako u Peltonovy turbíny. Paprsek vody je zde přiveden k oběžnému kolu pod určitým úhlem vzhledem k otáčení oběžného kola tak, že do něj vstupuje z jedné strany a vystupuje na druhé straně. Oběžné kolo je zde tvořeno dvěma prstenci, mezi kterými jsou zakřivené lopatky. Úhel sklonu paprsku se nejčastěji volí v rozmezí 18-23°. Změna směru toku vody způsobí předání energie oběžnému kolu, zde se kromě síly na oběžné kolo v obvodovém směru, která vytváří točivý moment, uplatňuje i axiální síla, která působí mimo osu otáčení. Hydraulická účinnost TURGO turbíny je málo závislá na hodnotě průtoku vody. Regulace otáček se provádí jako u Peltonovy turbíny zasouváním jehly do trysky. Provedení turbíny je pouze vertikální. [4]



Obr. 1. 3 TURGO turbína [11]

### 1.3.2 Přetlakové turbíny

- *Francisova turbína*

Tato radiálně-axiální turbína má dvě možnosti umístění hřídele horizontální a vertikální. Horizontální provedení se používá pro nižší spády při průtoku  $0,1-2 \text{ m}^3/\text{s}$ . Oproti vertikálnímu provedení má horizontální o něco menší účinnost, ale to naproti tomu umožňuje snížit potřebné stavební náklady, je přístupnější pro montáž a údržbu a snižuje zatížení axiálního ložiska. Vstupní potrubí má tvar spirály. Voda je tam s pomocí rozváděcího kola směřována na oběžné kolo radiálně. Oběžné kolo se skládá z vnějšího věnce, náboje a mezi nimi vytvořených oběžných lopatek, které jsou uloženy na hřídeli. Na věnci a náboji jsou vytvořeny válcové těsnicí plochy, které s plochami na víku a dolním lopatkovém kruhu tvoří těsnicí spáru. Náboj má odlehčovací otvory, které zajišťují snížení axiálního zatížení oběžného kola částečným vyrovnáním tlaků. Otvory nesmějí ústit do kanálů oběžného kola a zároveň musí být dostatečně daleko od osy turbíny. Víka jsou vzájemně spojeny čepy, na kterých jsou osazeny rozváděcí lopatky. Natáčení lopatek je umožněno pomocí regulačního kruhu, který je ovládán táhly z regulačního pohonu. Při regulovaném výkonu není vstup vody na lopatky tečný, vznikají rázy a tím také energetické ztráty. Lopatky rozváděcího kola jsou většinou konstruovány jako nastavitelné a provádí se jimi regulace průtoku. Z oběžného kola vystupuje voda ve směru osy otáčení (axiálně). Účinnost turbíny je v rozsahu 80-95%. [4]



Obr. 1. 4 Francisova turbína [12]

- **Kaplanova turbína**

Je to typ přetlakové axiální turbíny kde voda nejprve vteče do difuzoru, který tím, že je kuželovité konstrukce vodu zrychlí. Lopatky poté upraví směr i rychlost toku na oběžné kolo. Velkou výhodou Kaplanovy turbíny je dvojitá regulace pomocí regulačního kola i rozvaděče. Oběžné kolo je v nejužším průřezu turbíny a má otočné lopatky. Počet lopatek je sudý, (nejčastěji je použito 4 lopatek). Voda při opuštění lopatek ještě disponuje značnou zbytkovou energií a tu pak využije savka, která vzniklým podtlakem urychlí průtok. Tento typ turbíny se používá pro spády 5-75 m výkony 200kW - 100MW. [4]

## 1.4 Regulace otáček turbín

MVE menších výkonů do 200 kW mají nejčastěji asynchronní generátor, který nepotřebuje regulátor otáček, protože frekvenci udržuje elektrická soustava na kterou je generátor napojen. MVE s větším výkonem používají synchronní generátory s regulací otáček, nebo se synchronní generátory používají tam, kde je třeba provoz v ostrovním režimu. Aby mohl generátor vyrábět proud s danou frekvencí (50Hz), potřebuje mít konstantní otáčky. Pokud v napájené síti poklesne odběr elektrického proudu, tak generátoru poklesne zatížení a bez vnější regulace se roztočí vyšší rychlostí. Proto musí být před turbínou regulátor, který na tyto změny přiměřeně rychle reaguje a náležitě upraví průtok turbínou. Také v případě nenadálého výpadku elektrizační sítě, nebo vzniku jiné nebezpečné situace má tento regulátor

za účel uzavřít přívod vody na turbínu. Rychlým uzavřením přivaděče může nastat vznik hydraulického rázu, a proto se na to musí regulátor dimenzovat. Nebo se také instaluje tzv. synchronní ventil (paralelní odtok). Ten se otevírá zároveň s uzavírajícím regulátorem a ten se po určité (předem nastavené) době začne uzavírat, až nakonec zůstane otevřen v poloze, která zajišťuje daný minimální odtok z vodního díla. Po opětovném uvedení turbíny do provozu se zcela uzavře. Tento paralelní odtok musí mít i asynchronní generátory tam, kde je nutno, aby nezůstalo koryto toku za turbínou suché při odstavení elektrárny.

## 1.5 Elektrotechnická zařízení MVE

### 1.5.1 Generátory

Generátory jsou elektrické točivé stroje, které mění mechanickou energii na hřídeli v energii elektrickou. Dnes se používají prakticky jen generátory na střídavý proud. Ty se dělí na synchronní a asynchronní. Jejich velikost a typ je závislý na požadavcích majitele MVE a provozovatele elektrické distribuční sítě, v které bude MVE pracovat. Dříve se ještě používala stejnosměrná dynama (převážně kompaundní), ale dnes se prakticky používají jen v mikrozdrojích pro dobíjení baterií bez napojení na přenosovou síť.

- *Asynchronní generátor*

Asynchronní generátory mají stejnou konstrukci jako asynchronní motory. Většinou jsou v provedení s kotvou nakrátko, jen minimálně se používá provedení s kotvou vinutou. Je to trojfázový indukční stroj s prostorově rozloženým statorovým vinutím jednotlivých fází o  $120^\circ$ , tak že po připojení na přenosovou síť při otáčkách větších než synchronních, tak že skluz bude záporný, vzniká točivé pole. Asynchronní generátor se používá hlavně v provozu napojení na distribuční síť a tam, kde se s provozem v ostrovním režimu nepočítá. Při provozu se odebírá z přenosové sítě jalový magnetizační výkon, protože směr jalového proudu je stejný jako v motorickém provozu. Proto při napojení generátoru na síť o výkonu větším než 35 kW je povinnost zajistit kompenzaci nejlépe paralelním napojením kondenzátorové baterie přes stykač. Pokud se napojí baterie napřímo, tak se musí brát na zřetel riziko samobuzení. Fázování generátoru na síť se provádí jednoduchým připojením generátoru při dosažení synchronních otáček. Asynchronní generátor lze zatížit přibližně stejným výkonem jako při motorickém provozu. Účinnost asynchronního generátoru je obecně nižší než synchronního.

Výkonové dimenzování generátoru je provedeno co nejbližší maximálnímu výkonu použité turbíny.

Výkon generátoru  $P_g$  je přímo závislý na synchronní úhlové rychlosti stroje  $\omega$  a točivém momentu  $M$  předaném turbínou generátoru.

$$P_g = M \cdot \omega, (W, Nm, rad \cdot s^{-1}). \quad (1. 1)$$

- ***Synchronní generátor***

Hlavním důvodem použití těchto generátorů u MVE je možnost provozu nezávislého na síti. V ostrovním provozu je třeba hlídat otáčky generátoru, aby při změně zatížení nevzniklo riziko změny otáček generátoru a tím k nestabilitě frekvence dané sítě. Stator je prakticky stejný jako asynchronní generátor, rotor je napájen budícím stejnosměrným napětím a vinutí synchronně sleduje magnetické pole statoru. Napětí na vývodu z generátoru je při změně velikosti zátěže regulováno na konstantní hodnotě změnou budícího proudu do rotoru. Synchronní generátor na rozdíl od asynchronního dodává do sítě činnou i jalovou složku výkonu, nebo ji také spotřebovává dle požadavku. Fázování generátoru k síti je tzv. jemné – synchronizují se napětí, fáze a frekvence a samosynchronizací – připojením na síť v synchronních otáčkách bez nabuzení a po připojení se nabudí, zde vzniká až 3x větší proudový náraz, než je jmenovitý proud generátoru. V případě poruchy v síti je generátor zdrojem zkratového proudu a je potřeba ho co nejrychleji odbudit. To se provádí vypnutím budícího proudu.

- ***Stejnoseměrná dynamika***

Stejnoseměrné stroje mají na statoru budící magnety a na rotoru vinutí kotvy, ze kterého se indukovaný proud usměrňuje pomocí komutátoru. U strojů menších výkonů mohou být na statoru permanentní magnety, zatímco u větších jsou to elektromagnety napájené stejnosměrným proudem. Pro použití v MVE se nejčastěji setkáváme s kompaundním dynamem, u kterého se regulace výstupního napětí provádí pomocí odporu zařazeném u derivačního vinutí. Každý stejnosměrný stroj může pracovat jako generátor i motor. Záleží pouze na způsobu mechanického a elektrického zapojení. [2]

### 1.5.2 Transformátory

Transformátor je netočivý stroj, jehož účelem je převod střídavého napětí na napětí s jinou hodnotou, ale stejnou frekvencí. Velikost změny napětí je určena převodem transformátoru.

U malých vodních elektráren jsou transformátory použity v obvodech vlastní spotřeby a na vývodu výkonu z elektrárny. Transformátory v obvodech vlastní spotřeby jsou převážně malé jednofázové suché, určené pro galvanické oddělení obvodů, nebo pro účely ovládacích a měřicích obvodů. Na vývodech výkonů jsou to transformátory třífázové, většinou s olejovým chlazením. Na straně vyššího napětí mají většinou odbočky, jejichž pomocí lze upravovat převod transformátoru v malém rozsahu (cca 5%). [2]

### 1.5.3 Kompenzace

Při použití asynchronních generátorů s výkonem větším než 35kW je nutné zajistit kompenzaci odběru jalového výkonu z přenosové sítě. Ta se u MVE provádí kompenzační baterií, která je složena z jednotlivých kondenzátorů většinou vzájemně spojených do trojúhelníku.

Tyto kondenzátory se připojují ve většině případů přes stykač. Pokud je požadována plynulá kompenzace, tak se většinou vytvoří kaskáda jednotlivých baterií. U regulované kompenzace je riziko, že v případě odlehčení zátěže dojde k zvýšení napětí na svorkách generátoru a s tím se musí počítat při návrhu kompenzace.

Výkon kondenzátoru je dán vztahem:

$$Q = \omega \cdot C \cdot U^2, [\text{var}, \text{rad/s}, \text{F}, \text{V}]. \quad (1. 2)$$

### 1.5.4 Elektrické ochrany

Generátory, které jsou v provozu napojené na síť, musí být vybavené elektrickými ochranami. Tyto ochrany mají za úkol chránit přenosovou síť před negativními vlivy generátoru při poruše, nebo selhání automatického provozu, ale zároveň také samotný generátor před poškozením.

## **Výkonová ochrana**

Tato ochrana má za účel sledovat výkon MVE a jeho směr. Pokud dojde k obrácení toku energie do generátoru a generátor se tím stane spotřebičem, nebo dojde k poklesu pod minimální mez danou provozními předpisy elektrárny, tak se soustrojí odpojí od sítě a zároveň se odstaví do klidové polohy. Zde se využívá tzv. zpětné wattové relé.

## **Frekvenční ochrana**

U synchronních generátorů je třeba hlídat jak překročení dané frekvence, tak podfrekvenci napětí na svorkách MVE. Většinou jsou na trhu relé, které spojují obě tyto hodnoty do jednoho přístroje. Nastavení mezi těchto relé je dáno požadavky provozovatele přenosové soustavy a při vybočení z dané tolerance je třeba generátor odstavit. U asynchronních generátorů není toto relé nutné, protože frekvenci si drží síť.

## **Nadproudová ochrana**

Tyto ochrany se dělí na časově závislé a nezávislé. Časově nezávislé ochrany pracují jako tzv. zkratové, které okamžitě při poruše odstaví soustrojí. Používají se zde zkratové spouště jističů, nebo pojistky. Nadproudové ochrany časově závislé (zpožděné) mají za úkol upozornit na přetížení stroje a popřípadě i stroj odpojí. U MVE se využívají pro tuto funkci nadproudové spouště jističů a nadproudová relé.

## **Napěťová ochrana**

Tento druh ochrany má reagovat na pokles, nebo naopak nárůst hodnoty napětí na svorkách MVE. Napěťové ochrany nesmí být závislé na frekvenci a musí být schopny rychle a bezpečně odstavit soustrojí.

## **Ochrana proti nesymetrickému zatížení**

Tato ochrana je použita při výpadku jedné fáze. Pokud by došlo k této situaci, byl by generátor neúměrně zatěžován a mělo by to nežádoucí vliv i na síť, proto jsou do obvodu vložena nadproudová relé se zvýšenou citlivostí na nesymetrické zatížení.

## 1.5.5 Snímání neelektrických veličin

### Snímače otáček

Snímače otáček umožňují snímání okamžité hodnoty otáček pro účely regulace a kontroly soustrojí. Nejčastěji se používá tachogenerátor napojený na hřídeli generátoru a jeho napětí je tak přímo úměrné okamžité hodnotě otáček generátoru

### Snímače teploty

Nejjednodušší provedení jsou dvouhodnotová bimetalová čidla, která upozorní na nastavenou mezní teplotu. Tyto čidla se hodí spíše pouze pro funkci bezpečnostní. Pro běžný provoz se používají odporové snímače napojené na proudovou smyčku 0-20 mA, které umožňují plynulou kontrolu a zároveň jsou schopny vydat výstrahu při mírném zvýšení teploty, kdy ještě není narušen bezpečný provoz soustrojí. Tato čidla se umísťují k ložiskům, převodovkám, vinutí generátoru a olejovým zásobníkům.

### Snímače polohy

Jako snímače polohy se nejčastěji používají koncové vypínače. Pro potřeby regulace je možné použít lineární odporové snímače s proudovou smyčkou napojené přes automatiku na pohon regulátoru a tím tak nastavit požadovaný průtok turbínou.

### Snímače tlaku

Zde jsou čidla měření tlaku absolutní, nebo vůči vnější atmosféře, popř. rozdílové. Pro potřeby automatického řízení je třeba čidel dvouhodnotových, nebo s analogovými signály. Pro účely obsluhy postačují manometry s přímým ukazatelem měřené veličiny. [2]

### Veličiny, které je třeba u turbín MVE sledovat:

- *otáčky,*
- *hladina oleje v ložiskách,*
- *cirkulace maziva,*
- *hladina oleje v systému regulace,*



- *hladina oleje v převodovce,*
- *teplota v ložiskách,*
- *teplota oleje v systému regulace,*
- *teplota oleje v převodovce,*
- *tlak oleje v systému regulace,*
- *cirkulace chladicí vody.*

Okamžité odstavení soustrojí je vyžadováno pro položky 1, 3, 9, 10. U ostatních položek může být signalizací nahlášená výstraha, umožňující opravu, ale pokud nedojde k návratu do běžných hodnot, může následovat také odstavení. [8]

## Proved'te konkrétní návrh MVE

### 1.6 Lokalita stávající stav

Řeka - Mže

Kraj - Plzeňský

Okres - Tachov

Obec - Svobodka

Vodní dílo Lučina bylo vybudováno v letech 1970-75 na horním toku řeky Mže jako vodárenská nádrž pro účely zásobování Tachova a okolí pitnou vodou. Přehrada je přímá, sypaná, kamenitá s návodním železobetonovým těsněním. Délka hráze v koruně je 183,5 m, výška nad údolím 23,5 m. Součástí hráze je železobetonový sdružený objekt se šachtovým přelivem, v němž jsou umístěny dvě spodní výpusti. Kvalita vody přitékající do nádrže není příliš ovlivněna zemědělskou výrobou. Voda v nádrži má typicky hnědé zabarvení díky přitékajícím potokům z rašelinišť a lesů.

#### V současnosti zajišťuje funkce v tomto pořadí:

1. Odběr surové vody pro úpravnu ve Světcích a následně pro skupinový vodovod pro oblast Tachovska.
2. Zlepšení průtoku pro odběry podél toku a především pro úpravnu ve Stříbře.
3. Zajištění minimálního asanačního průtoku v hodnotě 0,2 m<sup>3</sup>/s v odtokovém profilu.
4. Využití hydroenergetického potenciálu MVE, která je součástí vodního díla.
5. Snížení velkých vod na Mži a ochranu území pod vodním dílem před jejich účinky.
6. Manipulace ke zlepšení kvality vody a likvidaci havárií.

#### VD Lučina se skládá:

- *vzdouvací objekt,*
- *nádrž,*
- *sdružený objekt,*
- *MVE.*

## Vzdouvací objekt

Vzdouvací objekt vodního díla tvoří sypaná hráz, která je na 9,35 říčním kilometru řeky Mže a má návodní železobetonový těsnící štít. Koruna hráze má délku 183,5 m, je zpevněna betonovou vozovkou a na návodní straně je instalován betonový vlnolam. Vzdušní líc objektu je sypaný z kamene bez porostu. Výška hráze nade dnem je 23,5 m a kóta koruny odpovídá 535,9 m.n.m. .



Obr. 1. 5 Vodní dílo Lučina

## Nádrž

Celkový objem nádrže je 5 790 000 m<sup>3</sup> a zatopená plocha přehrady odpovídá 86,2 ha .

## Sdružený objekt

Sdružený funkční objekt je situován ve středu hráze a tvoří jej šachtový přeliv s odpadní štolou, spodní výpusti se strojovnou, přístupovou štolou a vodárenské odběry. Přeliv je šachtový s průměrem přelivné hrany 9,7 m a maximální kapacitou 99 m<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup>. Jsou instalovány 2 ocelové spodní výpusti DN 700, které jsou umístěny v dolní části funkčního objektu souměrně po stranách. Vtoky lze provizorně pomocí potápěčů zahradit ocelovou „čočkou“, která je společná s VD Nýrsko. Na každé výpusti jsou sériově za sebou revizní a provozní uzávěry. Jako revizních uzávěrů jsou použita klínová šoupátka a jako provozní roztríkovací

ventily s maximálním odtokem  $10,2 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ . V letech 1996-97 byla na vodním díle instalace nové MVE. Instalovaná malá vodní elektrárna se skládá z 2 soustrojí s Bánkiho turbínami, na které jsou přes planetové převodovky napojeny asynchronní generátory s kotvou nakrátko.

## 1.7 Účel návrhu

Účelem návrhu malé vodní elektrárny je optimalizace hydroenergetického potenciálu vodního díla pro výrobu elektrické energie, který počítá s instalací optimálního technologického zařízení se zvýšením účinnosti MVE, životnosti a především spolehlivosti zařízení s důrazem na maximální využití stávajících zařízení a omezení stavebních prací.

Oproti původním Bánkiho turbínám, které se projevily jako provozně méně spolehlivé, je návrh proveden 2 soustrojími s turbínou Francis v horizontálním provedení, která má plně regulovatelné oběžné kolo a přímým připojením na asynchronní generátor. Každá turbína bude navržena s automatickou regulací oběžného kola, které bude zároveň sloužit jako provozní uzávěr turbíny. Výkonové a rozměrové parametry turbíny i generátoru jsou převzaty z informativních nabídek a internetových zdrojů dodavatelů obdobných technologických zařízení. MVE bude navržena jako plně automatická s občasným dohledem obsluhy.

## 1.8 Podmínky pro výpočet turbíny

**Při výpočtu výkonu turbíny jsou nejdůležitější tyto parametry:**

- *návrhový spád vody,*
- *návrhový průtok turbínami,*
- *velikost instalovaného výkonu MVE,*
- *průměrná roční výroba MVE.*

**Po vyhodnocení těchto podmínek a určení výkonu vodního díla je možno určit počet a výkon turbín:**

- *určení počtu a výkonu soustrojí pro pokrytí co největšího rozmezí průtoků,*
- *určení rychloběžnosti dle měrných otáček a druhu turbíny,*
- *určení hlavních rozměrů a otáček turbíny dle univerzální charakteristiky,*
- *určení typu a výkonu generátoru.*

## Návrh počtu turbín

Návrh počtu turbín je určen především pracovní charakteristikou jednotlivých turbín. Turbíny s plochou charakteristikou lze regulovat se zachováním velké účinnosti v poměrně široké oblasti zatížení a navrhuje se tedy jejich menší počet (ideální jsou 2 turbíny). Někdy se využívá jen jedna turbína, v současnosti především u turbíny Kaplanovy. Naopak u turbín se strmou charakteristikou se navrhuje větší počet a pro regulaci průtoku postupně jednotlivé turbíny spouštíme pro dosažení požadovaného výkonu. Návrh počtu turbín ale musí zároveň brát v potaz i ekonomické hledisko – hodnota pořízení soustrojí v závislosti na ziscích a nákladech malé vodní elektrárny.

V navrhované MVE přichází v úvahu dle výšky spádu, průtoku a potřeby minimalizace stavebních úprav jako nejefektivnější řešení instalace 2 ks Francisovo turbín dle grafu [1, obr.57]. Pravá turbína s  $\varnothing$  oběžného kola 320mm, levá s  $\varnothing$  oběžného kola 400mm, tak aby výkon pokrýval co největší rozmezí průtoků a přímým napojení asynchronního generátoru s kotvou nakrátko. Pro ideální pokrytí různých průtoků je třeba rozdělit hydroenergetický potenciál vodního díla nestejně mezi turbíny, tak aby bylo pokryto co nejširší rozmezí průtoku okolo průměrné hodnoty.

## 1.9 Hydroenergetické řešení MVE

Voda protékající mezi rozdílnými výškovými hladinami vykonává práci, kterou lze teoreticky vypočítat:

$$P_t = \rho \cdot g \cdot Q_p \cdot H \cdot \eta, [\text{W}], \quad (1.3)$$

kde  $\rho$  je hustota vody ( $\rho = 1000 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ),  $g$  je gravitační zrychlení ( $g = 9,81 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ ),  $Q_p$  je průtok turbínou ( $\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ ),  $H$  je spád (m) a  $\eta$  je účinnost (%).

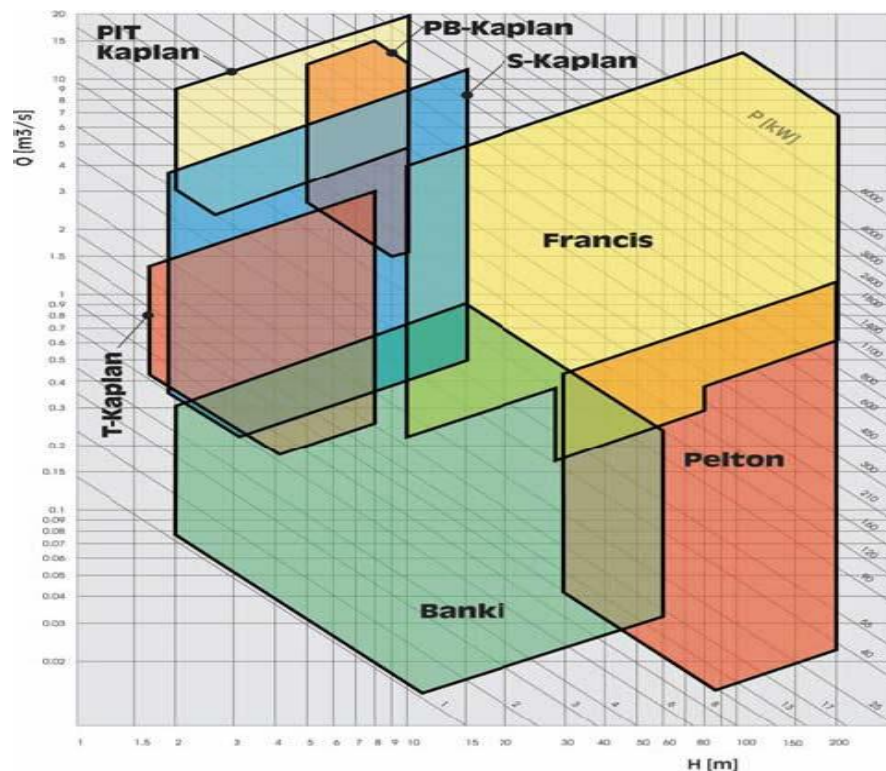
Pro výpočet potřebujeme průměrný odtok z vodního díla, který pro účely návrhu určíme statistickým průměrem z denních záznamů od 1. 1. 1996 do 12. 10. 2012, které jsou k dispozici ze záznamů dispečinku Povodí Vltavy s. p. [7]. Odtok z vodního díla kolísá od požadovaného minima  $0,2 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$  do hodnoty  $9,17 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ . Jako dlouhodobý průměr odtoku

z vodního díla za dané období vychází hodnota  $1,19 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ . Výšku spádu určíme ze stejných podkladů jako průtok. Výška nadržení vodní hladiny vodního díla se v daném období pohybovala mezi hodnotami 527,79 m.n.m. a 533,49 m.n.m.. Dlouhodobý průměr v daném časovém úseku je 531,02 m.n.m.. Střed oběžného kola turbíny se bude nacházet v poloze na 514 m.n.m.. Spád využití navrhované vodní turbíny vychází 13,79 – 19,49, pro účely výpočtu počítáme dle statistického průměru z naměřených hodnot 1996-2012 s hodnotou 17 m. Účinnost turbíny a generátoru zde budeme pro potřeby výpočtu počítat s hodnotou:

$$\eta = \eta_{\text{turbína}} \cdot \eta_{\text{generátor}} = 0,93 \cdot 0,96 = 0,89. \quad (1.4)$$

Hodnoty jsou odvozeny dle parametrů obdobných zařízení z katalogů výrobců. Generátor bude přímo napojen na turbínu, a proto se nepočítá s účinností převodu. Teoretický výkon vodního díla:

$$P_t = 1000 \cdot 9,81 \cdot 1,19 \cdot 17 \cdot 0,89 = 176,63 \text{ kW} \quad (1.5)$$



Obr. 1. 6 Diagram turbín [13]

### 1.9.1 Technické parametry

#### Pravá strana strojovny – T<sub>2</sub>+G<sub>2</sub>

Turbína T<sub>2</sub> – horizontální Francisova turbína, návrhový spád (H<sub>max</sub>) je 17 m, pracovní rozsah průtoků je 0,25 – 0,5 m<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup>, maximální výkon turbíny (P<sub>max</sub>) 80kW, průměr oběžného kola je 320 mm a jmenovité otáčky jsou 1000 ot·min<sup>-1</sup>.

Generátor G<sub>2</sub> – asynchronní horizontální generátor s kotvou nakrátko typ GAK 225M6, jmenovitý výkon generátoru (P<sub>n</sub>) je 80 kW, jmenovité napětí (U<sub>n</sub>) 400V, jmenovité otáčky 1000 ot·min<sup>-1</sup>,  $\eta = 94,0\%$  ,  $\cos\varphi = 0,86$ .

#### Levá strana strojovny - T<sub>1</sub>+G<sub>1</sub>

Turbína T<sub>1</sub> – horizontální Francisova turbína, návrhový spád (H<sub>max</sub>) je 17 m, pracovní rozsah průtoků je 0,4 – 0,7 m<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup>, maximální výkon turbíny (P<sub>max</sub>) 100kW, průměr oběžného kola je 400 mm a jmenovité otáčky jsou 1000 ot·min<sup>-1</sup>.

Generátor G<sub>1</sub> – asynchronní horizontální generátor s kotvou nakrátko, typ GAK 225L6, jmenovitý výkon generátoru (P<sub>n</sub>) je 100 kW, jmenovité napětí (U<sub>n</sub>) 400V, jmenovité otáčky 1000 ot·min<sup>-1</sup>,  $\eta = 94,2\%$  ,  $\cos\varphi = 0,86$ .

Generátory byly navrženy dle parametrů z katalogu firmy TES Vsetín [14].

### 1.10 Návrh kompenzace jalového výkonu

Při návrhu kompenzace MVE se vychází z parametrů generátorů a požadavků správce přenosové sítě na úroveň kompenzace. V případě požadavku na kompenzaci plného jalového odběru asynchronního generátoru, který je proměnný se zatížením, musí být kompenzační baterie regulována. V případě regulace kompenzace asynchronního generátoru se musí počítat s tím, že v případě odlehčení generátoru ze zatížení, se prudce zvýší napětí na svorkách generátoru. [2]

## Druhy kompenzace

- **individuální** - kondenzátory jsou spínány zároveň s generátorem a jsou pevně nastaveny
- **skupinová a centrální** - kondenzátory jsou postupně spínány skokově nebo plynule, dle zátěže generátoru

Dle požadavků provozovatele rozvodné přenosové soustavy je třeba generátory o výkonu větším než 35 kW kompenzovat jalový odběr na účinník  $\cos\varphi = 0,95$  kompenzační baterií.

Oba generátory pracují při jmenovitém napětí s účinníkem  $\cos\varphi = 0,86$ .

$$Q_1 = \operatorname{tg}\varphi \cdot P = 0,5934 \cdot 100 = 59,34 \text{ kVAr}$$

$$Q_{k1} = \operatorname{tg}\varphi \cdot P = 0,3287 \cdot 100 = 32,87 \text{ kVAr}$$

$$Q_{c1} = Q_1 - Q_{k1} = 59,34 - 32,87 = 26,47 \text{ kVAr}$$

$$Q_2 = \operatorname{tg}\varphi \cdot P = 0,5934 \cdot 80 = 47,47 \text{ kVAr}$$

$$Q_{k2} = \operatorname{tg}\varphi \cdot P = 0,3287 \cdot 80 = 26,97 \text{ kVAr}$$

$$Q_{c2} = Q_2 - Q_{k2} = 47,47 - 26,97 = 20,5 \text{ kVAr}$$

Pro kompenzaci jalového výkonu navrhuji použít pro každý generátor regulátory typ Novar 1106, které ovládají přes stykače K3-32K00 třístupňovou kompenzační baterii z CSADG-P 440V zapojených do D. Kompenzaci navrhuji instalovat v rozvaděči RMS. [12]

## NOVAR 1106

Regulátor jalového výkonu Novar-1006 je plně automatický přístroj, umožňující optimální řízení kompenzace jalového výkonu. Přístroj je vybaven přesným napěťovým a proudovým měřicím obvodem a digitálním zpracováním naměřených hodnot je dosaženo vysoké přesnosti vyhodnocení skutečné efektivní hodnoty napětí, proudu i účinníku. Frekvence napětí sítě se může pohybovat v rozmezí 43 až 67 Hz. Proudový měřicí vstup je univerzální pro nominální hodnotu sekundárního proudu PTP 1A nebo 5A. Měřicí vstupy lze připojit k regulátoru v libovolné kombinaci, tedy libovolné fázové nebo sdružené napětí a proud libovolné fáze. Instalace přístroje je plně automatizována. Regulátor automaticky zjistí jak způsob připojení, tak velikost jednotlivých připojených kompenzačních stupňů. Ruční zadání



těchto parametrů je také možné. Regulace probíhá ve všech čtyřech kvadrantech a její rychlost je závislá jak na velikosti regulační odchylky, tak na její polaritě (překompensování/podkompensování). Spínání a odpínání kompenzačních kondenzátorů je prováděno tak, aby optimální stav kompenzace byl dosažen jediným regulačním zásahem a minimálním počtem přepínaných stupňů. Přitom přístroj volí jednotlivé stupně s ohledem na jejich rovnoměrné zatěžování a přednostně připíná stupně, které byly odepnuty nejdéle a jejichž zbytkový náboj je tedy minimální. Během regulace provádí přístroj průběžnou kontrolu kompenzačních stupňů. Při zjištění výpadku, nebo změny hodnoty stupně, je při odpovídajícím nastavení tento stupeň dočasně vyřazen z regulace. Dočasně vyřazený stupeň je periodicky testován a případně zařazen zpět do regulačního procesu. [12]

### 1.11 Návrh vodičů vyvedení výkonu

Pro návrh vodiče vyvedení výkonu do trafostanice je třeba vycházet z tabulkových hodnot instalovaných generátorů. Vzdálenost trafostanice od generátorů je 180m .

#### 1. Dimenzování dle provozní teploty

$$I_z = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U \cdot \cos\varphi \cdot \eta} = \frac{100+80}{\sqrt{3} \cdot 0.4 \cdot 0.86 \cdot 0.94} = 321.43 \text{ A} \quad (1.6)$$

Stávající napojení generátorů je provedeno z trafostanice vodičem AYKY 3x240+120mm<sup>2</sup>.

Pro splnění podmínek podle normy ČSN 33 2000-5-523, kde v tabulce 52-C3 volím tři zatížené vodiče z PVC uložené v zemi o měrném tepelném odporu 2,5 K·m/W je nutno zvýšit průřez vodičů. Proto v návrhu volím instalaci paralelního vodiče o stejném průřezu.

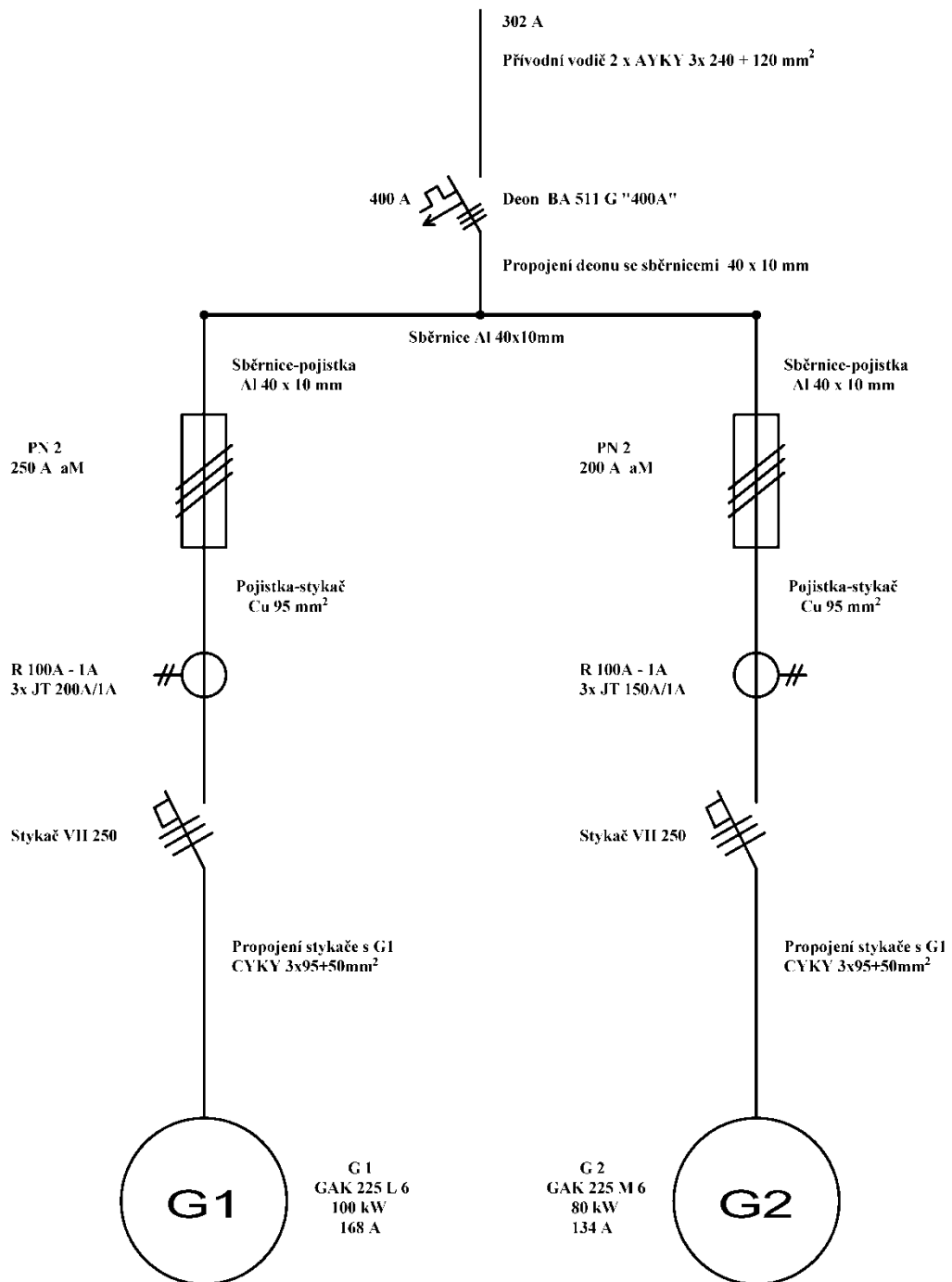
#### 2. Kontrola úbytku napětí

$$R = \rho \cdot \frac{l}{S} = 0.0267 \cdot \frac{180}{480} = 0.01 \Omega, \quad (1.7)$$

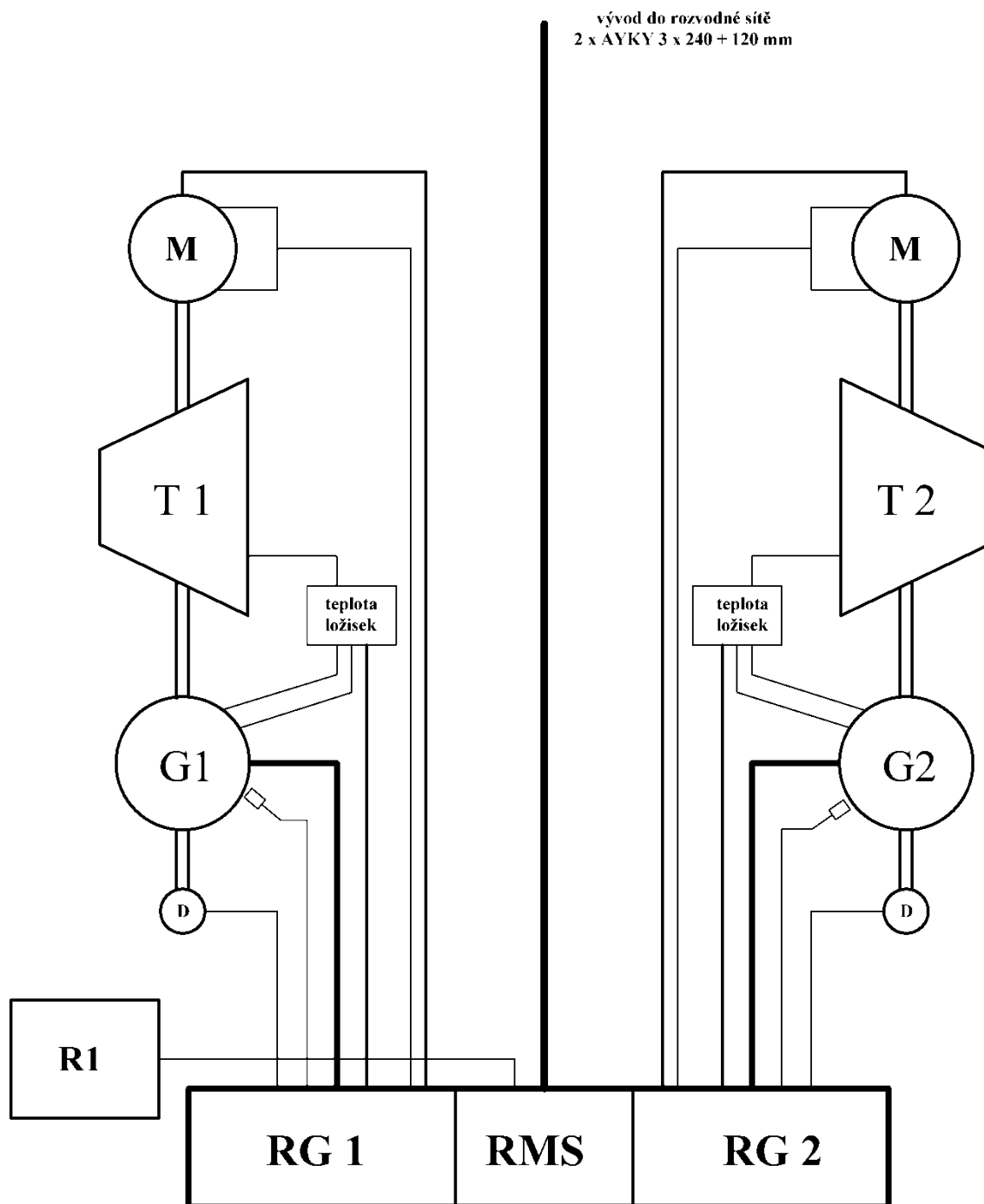
$$X = X_K \cdot l = 0.06 \cdot 0.18 = 0.0108 \Omega, \quad (1.8)$$

$$\begin{aligned} \Delta U &= (R \cdot I \cdot \cos\varphi) + (X \cdot I \cdot \sin\varphi) = 0.01 \cdot 321.4 \cdot 0.86 + 0.01 \cdot 321.4 \cdot 0.51 \\ &= 4.53 \text{ V}, \end{aligned} \quad (1.9)$$

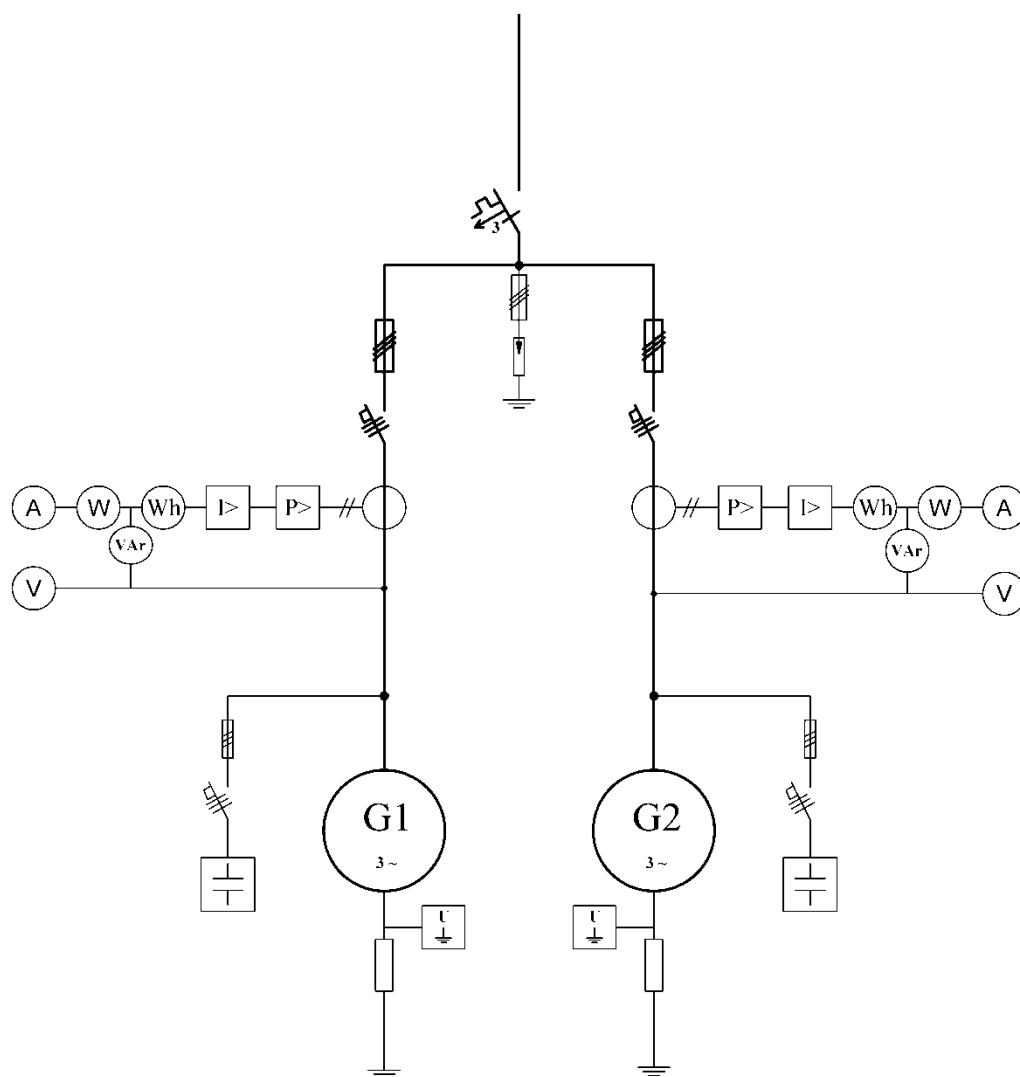
$$\Delta U\% = \frac{\Delta U \cdot 100}{U} = \frac{4.53}{400} = 1.13\%. \quad (1.10)$$



Obr. 1. 7 Průřezy vodičů a jištění v MVE



Obr. 1. 8 Kabelové propojení MVE



Obr. 1. 9 Jednopolové schéma MVE

## Posouzení ekonomické náročnosti a návratnosti MVE

### 1.12 Ekonomická investice

#### Odhad nákladů na realizaci

Při rekonstrukci strojovny bude třeba prorazit dva otvory v betonu o délce 4900mm pro vložení odpovídajícího odtokového potrubí. Místo odtoku z turbín bude nutné opacňovat ocelovými plechy šířky minimálně 6mm. Ostatní technologická zařízení zůstanou beze změn. Turbíny a generátory budou osazeny na ocelové podstavce kolmo nad odtokovým potrubím DN 700. Napojení generátoru a turbíny bude provedeno po kabelových lávkách na zdi. Kabele pro silové obvody budou v provedení AYKY a CYKY, pro ovládací a signalizační obvody v provedení JYTY a SYKFY. Rozvaděče zůstanou stávající, ale jejich vybavení se zmodernizuje.

Položka	Cena
Proražení otvorů v betonu dl. 4900mm	160000 Kč
Francisova turbína 320mm	1800000 Kč
Francisova turbína 400mm	2200000 Kč
Asynchronní generátor 80kW	190000 Kč
Asynchronní generátor 100kW	220000 Kč
Potrubí	150000 Kč
Rekonstrukce odtoku (pancéřování)	180000 Kč
Elektromontážní materiál	170000 Kč
Řídicí systém	80000 Kč
Instalace zařízení	420000 Kč
Projektové práce	100000 Kč
Celkem	5670000 Kč

#### Odhad provozních nákladů

Položka	Cena
Údržba zařízení za rok	60000 Kč

### 1.13 Odhad výroby po rekonstrukci

Vodní dílo je zdrojem stabilního nadržení a průtoku malou vodní elektrárnou, a proto není třeba počítat dle M-denních průtocích, ale vezme se v potaz statistický průměr výšky hladiny a průtoku. Při výpočtu návratnosti této malé vodní elektrárny budu vycházet z odhadu výroby elektrické energie dle průměrného průtoku a nadržení hladiny v měřeném období 1. 1. 1996 -12. 10. 2012. Uvažujeme 180 dní výroby elektrické energie za rok v ideálním výkonu 175 kW, 90 dní provozu na 80kW, 40 dní provozu při 100kW. Ostatní dny se nezapočítávají z důvodu mimořádných odstávek, povodní a poruch.

$$E_{180} = P_{180} \cdot t = 170 \cdot 180 \cdot 24 = 734,4 \text{ MWh}$$

$$E_{90} = P_{90} \cdot t = 80 \cdot 90 \cdot 24 = 172,8 \text{ MWh}$$

$$E_{40} = P_{40} \cdot t = 100 \cdot 40 \cdot 24 = 96 \text{ MWh}$$

$$E = E_{180} + E_{90} + E_{40} = 734,4 + 172,8 + 96 = 1003,2 \text{ MWh}$$

Výkupní cena elektrické energie z rekonstruované MVE v roce 2013 je dle cenového rozhodnutí Energetického regulačního úřadu č. 4/2012 ze dne 26. listopadu 2012, kterým se stanovuje podpora pro podporované zdroje energie 2499 Kč/MWh.

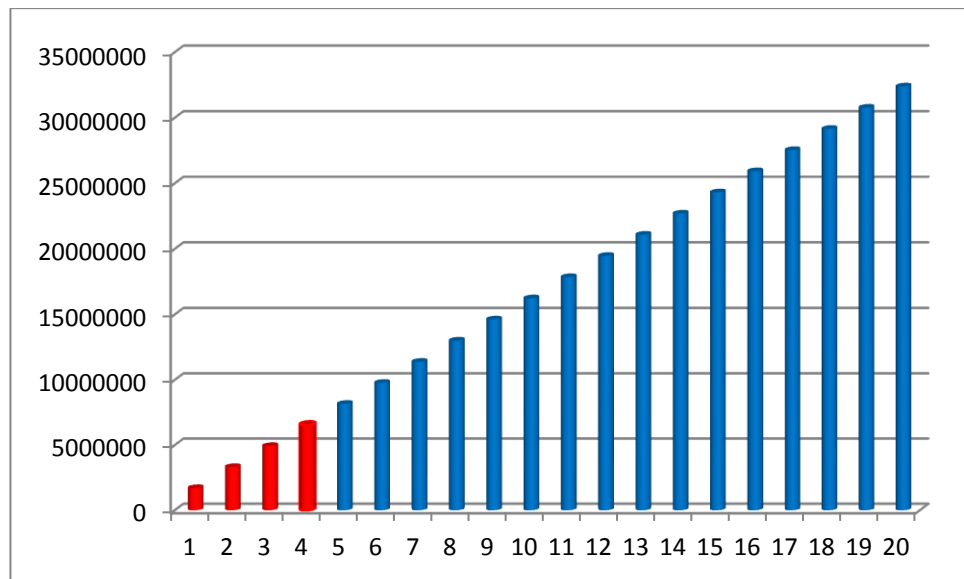
Roční tržby této navrhované MVE jsou  $T = E \cdot 2499 = 1003,2 \cdot 2499 = 2506996,8 \text{ Kč}$

### 1.14 Finanční návratnost

- investiční náklady na rekonstrukci MVE jsou 5 670 000 Kč;
- provozní náklady na jeden rok jsou ve výši 60 000 Kč;
- zisk z rekonstruované MVE za jeden rok je ve výši 2 506 996 Kč;
- daň ze zisku je ve výši 15%;
- malá vodní elektrárna je ve 4. odpisové kategorii dle zákona o daních z příjmu č.586/1992Sb. s odpisovou dobou 20 let; [13]
- odpisy majetku jsou rozloženy na celou dobu odpisu s odpisovou sazbou v prvním roce 2,05% a dalších letech 5,15%. [13]

Tab. 1. 1Přehled příjmů

Rok	Provozní náklady	Tržby	Náklady na odpisy	Zisk	Čistý zisk	Příjem	Celkový příjem
j	N[Kč]	T [Kč]	No [Kč]	Z [Kč]	Zt [Kč]	Pj [Kč]	Σ [Kč]
1	60000	2 506 996	121905	2325091	2004836	1704110	1704110
2	60000	2 506 996	292005	2154991	1900031	1615026	3319136
3	60000	2 506 996	292005	2154991	1900031	1615026	4934162
4	60000	2 506 996	292005	2154991	1900031	1615026	6549188
5	60000	2 506 996	292005	2154991	1900031	1615026	8164214
6	60000	2 506 996	292005	2154991	1900031	1615026	9779240
7	60000	2 506 996	292005	2154991	1900031	1615026	11394266
8	60000	2 506 996	292005	2154991	1900031	1615026	13009292
9	60000	2 506 996	292005	2154991	1900031	1615026	14624318
10	60000	2 506 996	292005	2154991	1900031	1615026	16239344
11	60000	2 506 996	292005	2154991	1900031	1615026	17854370
12	60000	2 506 996	292005	2154991	1900031	1615026	19469396
13	60000	2 506 996	292005	2154991	1900031	1615026	21084422
14	60000	2 506 996	292005	2154991	1900031	1615026	22699448
15	60000	2 506 996	292005	2154991	1900031	1615026	24314474
16	60000	2 506 996	292005	2154991	1900031	1615026	25929500
17	60000	2 506 996	292005	2154991	1900031	1615026	27544526
18	60000	2 506 996	292005	2154991	1900031	1615026	29159552
19	60000	2 506 996	292005	2154991	1900031	1615026	30774578
20	60000	2 506 996	292005	2154991	1900031	1615026	32389604
Σ	1200000	50139920	5670000	43269920	38105425	32389604	



Graf 1. 1 Ekonomické návratnosti

Z dat zapsaných v tabulce 1. je zřejmé, že ekonomická návratnost rekonstrukce MVE je v pátém roce provozu, protože přibližně v polovině čtvrtého roku příjmy za dodanou elektrickou energii převýší investiční náklady na rekonstrukci a pátým rokem proto začne být výroba MVE zisková.



## Závěr

V této bakalářské práci jsou popsány základní typy malých vodních elektráren a technologií v nich používaných. Tento přehled je dále aplikován na vylepšení hydroenergetických parametrů a zvýšení spolehlivosti konkrétní malé vodní elektrárny na vodním díle Lučina. Velkou výhodou navrhované rekonstrukce je, že v současné době je výkupní cena elektrické energie z MVE Lučina 2,130 Kč/KWh po rekonstrukci stoupne na výkupní cenu dle cenového rozhodnutí Energetického regulačního úřadu č. 4/2012 ze dne 26. listopadu 2012, kterým se stanovuje podpora pro rekonstruované malé vodní elektrárny pro rok 2013 na 2,449 Kč/kWh.

V tomto návrhu jsem vybral instalaci 2 ks Francisovy turbíny v horizontální poloze s přímo napojenými asynchronními generátory s kotvou nakrátko. Velikosti turbín a výkon generátorů jsem navrhl tak, aby pokrývaly co nejširší rozmezí hodnot průtoků vodního díla. Dále jsem navrhl nové vyvedení výkonu z MVE nově instalovaným paralelním kabelem AYKY 3 x 240 + 120mm<sup>2</sup> ze strojovny do trafostanice v délce 180m a stupňovitou kompenzací účinníku, která je ovládána regulátorem NOVAR 1106. Rozvaděče zůstanou původní, pouze se upraví výkonové obvody, přeprogramuje PLC a instalují se přepěťové ochrany.

Dle odhadnuté finanční náročnosti rekonstrukce a budoucích tržeb za výrobu elektrické energie je vypočítána ekonomická návratnost celé rekonstrukce MVE na čtyři roky. Z tohoto hlediska se jeví daná investice jako velmi dobrá.

## Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] ŠKORPIL, Jan a KASÁRNÍK, Milan. *Obnovitelné zdroje I.: Vodní elektrárny*. 2. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, Elektrotechnická fakulta, 2000, s. 126. ISBN: 8070826754.
- [2] GABRIEL, Pavel a ČÍHÁK, František. *Malé vodní elektrárny*. ČVUT, 1998, s. 321. ISBN: 8001018121.
- [3] PAŽOUT, František. *Malé vodní elektrárny: DI. 1 Ekonomika-předpisy, Díl. 1. 2. vyd.*, SNTL, 1990, s. 502. ISBN: 8003001927.
- [4] BEDNÁŘ, Josef. *Malé vodní elektrárny: DI. 2.: Turbíny, Svazek 1*. SNTL, 1989, s. 237.
- [5] Technické normy ČSN 75 2601. *Malé vodní elektrárny-Základní požadavky*. 2010, s. 28.
- [6] Technické normy ČSN EN 61 116. *Pravidla pro volbu technologických zařízení malých vodních elektráren*. 1997, s. 48.
- [7] Povodí Vltavy, státní podnik. *Povodí Vltavy* [online]. Poslední změna 2013. [Cit. 24.4.2013]. Dostupné z: <http://www.pvl.cz/>
- [8] HRODEK, Jiří. *Elektrina-výroba* [online]. Poslední změna 2011. [Cit. 24.4.2013]. Dostupné z: <http://vyuka.ic.cz/elektrina-vyroba/obr/>
- [9] BSH-British Hydro Association. *Mini-hydro: a step-by-step guide* [online]. Poslední změna 2004. [Cit. 24.4.2013]. Dostupné z: <http://www.british-hydro.org/mini-hydro/>
- [10] ZECO-Hydropower. *Turbine francis*. [online]. Poslední změna 2012. [Cit. 24.4.2013]. Dostupné z: <http://www.zeco.it/wp-content/uploads/2012/11/turbine-francis-01.jpg>
- [11] EKOWATT. *Diagram turbín* [online]. Poslední změna 2011. [Cit. 24.4.2013]. Dostupné z: <http://www.zeco.it/wp-content/uploads/2012/11/turbine-francis-01.jpg>
- [12] České regulátory. *Kompenzace jalového účinku* [online]. Poslední změna 2013. [Cit. 24.4.2013]. Dostupné z: <http://www.ceskeregulatory.cz/>
- [13] *Zákony pro lidi. Předpis č. 586/1992 Sb.* [online]. Poslední změna 2013. [Cit. 24.4.2013]. Dostupné z: <http://www.zakonyprolidi.cz/cs/1992-586>
- [14] TES, Vsetín. *Malé vodní elektrárny* [online]. Poslední změna 2013. [Cit. 24.4.2013]. Dostupné z: <http://www.tes.cz/male-vodni-elektrarny/>