

**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V PRAZE**

FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ



**NÁVRH MALÉ VODNÍ
ELEKTRÁRNY**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

SRPEN 2021

**ČENĚK
MALÍK**



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Malík** Jméno: **Čeněk** Osobní číslo: **483552**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra elektroenergetiky**
Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**
Specializace: **Aplikovaná elektrotechnika**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Návrh malé vodní elektrárny

Název bakalářské práce anglicky:

Design of a small hydroelectric powerplant

Pokyny pro vypracování:

- 1) Charakteristika malých vodních elektráren.
- 2) Návrh malé vodní elektrárny.
- 3) Provozní režim malé vodní elektrárny.
- 4) Technicko-ekonomické vyhodnocení návrhu elektrárny.

Seznam doporučené literatury:

- 1) BEDNÁŘ, Josef. Turbíny: (malé vodní elektrárny). Českovice: Marcela Bednářová, 2013. ISBN 978-80-905437-0-6.
- 2) MASTNÝ, Petr. Obnovitelné zdroje elektrické energie. Praha: České vysoké učení technické, 2011. ISBN 978-80-01-04937-2.
- 3) MELICHAR, Jan, Jan VOJTEK a Jaroslav BLÁHA. Malé vodní turbíny: konstrukce a provoz. Praha: České vysoké učení technické, 1998. ISBN 80-01-01808-0.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Mgr. Vít Klein, Ph.D., katedra elektroenergetiky FEL

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **27.01.2021**

Termín odevzdání bakalářské práce: **13.08.2021**

Platnost zadání bakalářské práce: **30.09.2022**

Ing. Mgr. Vít Klein, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji svému vedoucímu, Ing. Mgr. Vítu Kleinovi, Ph.D., za jeho čas a cennou pomoc při vypracování této bakalářské práce po stránce studijní i osobní. Dále děkuji panu Ing. Jiřímu Korandovi a společnosti Severočeské vodovody a kanalizace, a. s., za poskytnutí dat pro vypracování práce, odbornou konzultaci a prohlídku MVE Bedřichov.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne 12. srpna 2021

.....

ABSTRAKT

V této bakalářské práci je proveden návrh řešení rekonstrukce malé vodní elektrárny Bedřichov, která je provozována společností Severočeské vodovody a kanalizace, a. s. při úpravě vod v Bedřichově. Obsahem práce je zejména analýza poskytnutých dat, rozbor poptávky a nabídek řešení a jejich posouzení s ohledem na teoretické souvislosti. Pro posouzení je použito hodinových průtoků vodní elektrárnou za období od 29. 10. 2019 do 29. 10. 2020. Poskytnutá data jsou analyzována pomocí MS Excel. V textu jsou zohledněna i některá specifika využití vodní elektrárny ve vodárenství. Práce po vyhodnocení všech možností doporučuje variantu s generální opravou současné Peltonovy turbíny a s dodávkou nového synchronního generátoru, elektrické výzbroje a všech dalších zbývajících součástí jmenovaných v poptávce.

Klíčová slova: Malá vodní elektrárna, výroba elektrické energie, vodní turbína, Peltonova turbína, obnovitelná energie, elektroenergetika ve vodárenství.

ABSTRACT

This bachelor thesis proposes a solution for the reconstruction of a small hydropower plant Bedřichov which is operated by the SčVK, a. s. together with a nearby water treatment plant in Bedřichov. The thesis contains the analysis of the provided data and the analysis of the inquiry for reconstruction, together with the review of the offered variants in context of the theoretical connections. The analysis uses hourly water flow rates through the hydropower plant for the period from 29/10 2019 to 29/10 2020 for the comparison of the options. The data is analysed using MS Excel. The text also concerns the specifics of application of a hydropower plant in waterworks engineering. After the review of all available information, the thesis recommends the variant of a general repair of the current Pelton turbine with the delivery of a new synchronous power generator, the electrical equipment and all remaining components required in the inquiry.

Keywords: Small hydropower plant, power generation, water turbine, Pelton turbine, renewable energy, power engineering in waterworks engineering.

OBSAH

ÚVOD	1
KAPITOLA 1: TEORETICKÝ ZÁKLAD	2
1.1 ENERGIE VODY	2
1.2 VÝROBA ELEKTRICKÉ ENERGIE	3
1.2.1 Střídavé stroje asynchronní.....	6
1.2.2 Střídavé stroje synchronní.....	7
1.2.3 Stejnoseměrné stroje.....	8
1.2.4 Transformátory	8
KAPITOLA 2: CHARAKTERISTIKA MALÉ VODNÍ ELEKTRÁRNY	10
2.1 KLASIFIKACE VODNÍCH ELEKTRÁREN	10
2.1.1 Rozdělení dle instalovaného výkonu.....	11
2.1.2 Rozdělení dle způsobu získání spádu.....	12
2.1.3 Rozdělení dle velikosti využívaného spádu	13
2.1.4 Rozdělení dle charakteru provozního režimu	13
2.1.5 Dělení malých vodních elektráren.....	14
2.2 PRINCIP FUNKCE TURBÍN	14
2.2.1 Rovnotlaké turbíny	17
2.2.1 Přetlakové turbíny.....	19
2.2.2 Mezní turbíny	20
2.2.3 Další typy dělení.....	20
2.2.4 Porovnání využití různých typů turbín.....	20
2.3 PRŮBĚH VODY VODNÍ ELEKTRÁRNOU	21
2.3.1 Přívod vody	22
2.3.2 Odtok vody.....	23
2.3.3 Další funkce	23
2.4 VÝROBA ELEKTRICKÉ ENERGIE	24
2.4.1 Použití asynchronního generátoru.....	24
2.4.2 Použití synchronního generátoru	25
2.4.3 Použití transformátorů.....	25
2.4.4 Vlastní spotřeba.....	25
2.4.5 Připojení k síti	25
2.4.6 Elektrické ochrany.....	27

KAPITOLA 3: NÁVRH ŘEŠENÍ REKONSTRUKCE MALÉ VODNÍ ELEKTRÁRNY (MVE) PRO ÚPRAVNU VODY V BEDŘICHOVĚ.....	28
3.1 POŽADAVKY A NÁVRH MVE.....	28
3.1.1 Výchozí data.....	28
3.1.2 Požadavky a návrh.....	32
3.2 VARIANTA 1 DLE DODAVATELE I.....	34
3.2.1 Technické parametry varianty 1.....	34
3.2.2 Cenová tabulka varianty 1.....	36
3.3 VARIANTA 2 DLE DODAVATELE I.....	36
3.3.1 Technické parametry varianty 2.....	36
3.3.2 Cenová tabulka varianty 2.....	38
3.4 VARIANTA 3 DLE DODAVATELE II.....	38
3.4.1 Technické parametry varianty 3.....	38
3.4.2 Cenová tabulka varianty 3.....	41
KAPITOLA 4: PROVOZ VODNÍ ELEKTRÁRNY, KTERÁ BYLA NAVRŽENA PODLE VARIANT 1 AŽ 3	42
4.1 PROVOZ, ÚDRŽBA, OBSLUHA A MIMOŘÁDNÉ PROVOZNÍ STAVY.....	42
4.1.1 Provoz a údržba	42
4.1.2 Spouštění a vypínání MVE	43
4.1.3 Mimořádné provozní stavy	43
4.1.4 Doba životnosti a posuzování projektu.....	44
4.2 BEZPEČNOST PROVOZU	44
KAPITOLA 5: VYHODNOCENÍ NÁVRHU.....	45
5.1 BILANCE VARIANT	45
5.1.1 Získaná energie	45
5.1.2 Výkup energie.....	48
5.1.3 Shrnutí variant z hlediska výroby energie a výnosu.....	49
5.2 ZHODNOCENÍ VARIANT.....	50
5.2.1 Provozní a technické zhodnocení	50
5.2.2 Metody ekonomického hodnocení	51
5.2.3 Ekonomické zhodnocení variant.....	53
5.3 VÝSLEDEK ZHODNOCENÍ A VOLBA VARIANTY	57
ZÁVĚR.....	58
LITERATURA.....	59

PŘÍLOHA A: SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	I
A.1 SEZNAM SYMBOLŮ	I
A.2 SEZNAM ZKRATEK.....	II
PŘÍLOHA B: VSTUPNÍ DATA – POPTÁVKA	III
B.1 POPTÁVKA REKONSTRUKCE MVE BEDŘICHOV.....	III
B.2 DATA Z DISPEČINKU MVE	XIII
B.3 POPIS PŮVODNÍ MVE.....	XIII
B.4 Q-H MĚŘENÍ A ROZBOR SOUČASNÉHO STAVU	XIV
B.5 HODNOCENÍ REKONSTRUKCE MVE BEDŘICHOV POSKYTNUTÉ K PRÁCI.....	XX
PŘÍLOHA C: VSTUPNÍ DATA – ANONYMIZOVANÉ NABÍDKY	XXI
C.1 NABÍDKA DODAVATELE I.....	XXI
C.2 NABÍDKA DODAVATELE II	XXXII
PŘÍLOHA D: SOUBORY VÝPOČTŮ A ZPRACOVÁNÍ.....	XXXVIII
D.1 ZPRACOVÁNÍ FUNKCÍ ÚČINNOSTI	XXXVIII
D.2 VÝPOČET EKONOMICKÝCH KRITÉRIÍ.....	XXXVIII
D.3 HODINOVÉ CENY ZELENÝCH BONUSŮ ZA ROK 2019	XXXVIII
D.4 ZPRACOVÁNÍ DAT Z DISPEČINKU MVE	XXXVIII

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1-1 Přeměny energie v energetice	4
Obr. 2-1 Rozdělení vodních elektráren podle instalovaného výkonu a spádu.....	12
Obr. 2-2 Příklad uspořádání Peltonovy turbíny.....	18
Obr. 2-3 Příklad uspořádání pro využití Francisovy turbíny.....	19
Obr. 2-4 Rozsah použití některých typů turbín.....	21
Obr. 2-3 Příklad schéma zapojení generátoru a dalších prvků VE k síti	26
Obr. 3-1: Čára trvání průtoku	29
Obr. 3-2: Regrese závislosti účinnosti na průtoku pro původní stav	30
Obr. 3-3: Současný stav – turbína a generátor.....	31
Obr. 3-4: Regrese závislosti účinnosti na průtoku pro variantu 1.....	35
Obr. 3-5: Regrese závislosti účinnosti na průtoku pro variantu 2.....	37
Obr. 3-6: Odhad závislosti účinnosti na průtoku pro variantu 3.....	41

SEZNAM TABULEK

Tab. 3-1: Štítkové údaje turbíny v současném stavu.....	29
Tab. 3-2: Q-H měření a určená účinnost turbíny	30
Tab. 3-3: Parametry nové turbíny pro variantu 1	34
Tab. 3-4: Parametry synchronního generátoru dodavatele I	34
Tab. 3-5: Garantované hodnoty pro variantu 1.....	35
Tab. 3-6: Cenová tabulka varianty 1	36
Tab. 3-7: Garantované hodnoty pro variantu 2.....	37
Tab. 3-8: Cenová tabulka varianty 2	38
Tab. 3-9: Štítkové údaje nové turbíny pro variantu 3.....	38
Tab. 3-10: Štítkové údaje synchronního generátoru dodavatele II.....	39
Tab. 3-11: Garantované hodnoty pro variantu 3	39
Tab. 3-12: Cenová tabulka varianty 3.....	41
Tab. 5-1: Srovnání variant a současného stavu.....	49
Tab. 5-2: Srovnání variant a současného stavu.....	50
Tab. 5-3: Finanční toky a bilance varianty 1.....	54
Tab. 5-4: Ekonomická kritéria varianty 1	54
Tab. 5-5: Finanční toky a bilance varianty 2.....	55
Tab. 5-6: Ekonomická kritéria varianty 2.....	55
Tab. 5-7: Finanční toky a bilance varianty 3.....	56
Tab. 5-8: Ekonomická kritéria varianty 3.....	56
Tab. 5-9: Shrnutí ekonomického hodnocení variant.....	57

ÚVOD

Účelem této práce je zpracovat návrh rekonstrukce malé vodní elektrárny Bedřichov při objektu úpravny vod dle instrukcí a dat společnosti Severočeské vodovody a kanalizace, a. s., (dále SČVK, a. s.) a shrnout k tomu potřebné teoretické poznatky.

Práce si nejprve klade za cíl zpracovat teoretickou problematiku návrhu a charakteristiky malých vodních elektráren. V rámci toho je nutné zpracovat obecný úvod spolu s popisem klíčových parametrů a významných veličin. Dále je třeba zhodnotit strojní hledisko problému (zejména princip vodních turbín), elektrotechnické hledisko (výrobu elektrické energie) a také další specifika, která se vztahují například k zaměření na vodárenské hledisko s ohledem na další cíle práce. Nutnou teoretickou součástí práce je i základ ekonomického hodnocení investic pro použití v posouzení zvolených řešení.

Jádrem práce je návrh řešení rekonstrukce malé vodní elektrárny Bedřichov při úpravně vod v Bedřichově, která je napájena z vodní nádrže Josefův Důl. Popis tohoto objektu je obsažen v poplávce rekonstrukce a v dalších datech, které poskytla SČVK, a. s. pro vypracování této práce, a které jsou k práci přiloženy. Návrh rekonstrukce bude založen na variantách, které byly nabídnuty dodavatelskými firmami. Tyto nabídky jsou pro účely vypracování anonymizovány a rovněž přiloženy. Práce se bude zabývat rozbořením těchto dat, jejich analýzou a na jejich základě vyhodnocením, která z variant je nejvhodnější.

Práce se bude dále zabývat analýzou provozu na základě návrhu zejména z hlediska specifik navrženého řešení elektrárny, které je dáno funkcí objektu (jehož primární funkcí je stálá dodávka vody do vodárenského objektu).

Závěrem práce bude porovnání variant po technické i ekonomické stránce a výběr řešení, které by doporučil autor této práce s ohledem na veškeré zpracované souvislosti.

V Praze dne 12. 8. 2021

Čeněk Malík

KAPITOLA 1: TEORETICKÝ ZÁKLAD

1.1 Energie vody

Základem každého technického procesu je energie. Z hlediska přenosu i využití považujeme za nejužitečnější energii elektrickou. Až na výjimky (atmosférické přepětí, statická elektřina) se elektrická energie běžně nevyskytuje v přírodě (s výjimkou procesů v organismech), a tedy jí získáváme z různých přírodních zdrojů, které lze dělit mnoha způsoby. Použijeme dělení na obnovitelné a neobnovitelné. Přírodní energii z těchto zdrojů přeměňujeme na energii elektrickou a tu poté dále využíváme.

Obnovitelnými zdroji jsou myšleny zdroje energie, které jsou z hlediska praktického časového rámce nevyčerpatelné. Jedná se zejména o energii Slunce, ve kterém probíhají jaderné reakce, při nichž se uvolňuje energie. Tato energie je ve formě záření přenášena na povrch Země. Dále lze využívat energii Země samotné, především ve formě tepla, které máme k dispozici důsledkem dějů probíhajících v zemském plášti (geotermální energie). Posledním primárním zdrojem obnovitelné energie jsou slapové jevy, které jsou důsledkem vzájemného gravitačního působení soustavy Země-Měsíc. Obnovitelné zdroje energie jako je proudění vzduchu, koloběh vody či přímé využití slunečního záření (a mnohé další) vychází z těchto tří výše zmíněných primárních zdrojů energie.

Je vhodné se krátce zmínit i o neobnovitelných zdrojích energie. Jedná se o energii chemickou, akumulovanou zejména ve fosilních palivech, nebo o energii získanou uvolněním vazebné energie jader atomů (jaderná energie). Pro její využití musíme spotřebovávat hmotu jako palivo, kterého máme k dispozici omezené množství.

Soustředíme se na energii vody, která nepřímo vychází z energie Slunce, zajišťujícího koloběh vody na zemském povrchu. Kromě mechanické energie v proudění vody je ve vodě uložena také energie chemická ve formě rozpuštěných solí (její praktické využití je obtížné) a tepelná energie uložená v tepelném spádu mezi teplotou na hladině a teplotou v hloubce (využitelná, ale nikoliv ve velkém měřítku).

V rámci mechanické energie vody je možné rozeznávat energii ledovců, energii atmosférických srážek, energii slapových dějů, energii mořských vln a energii vodních toků. Právě energie vodních toků je předmětem této práce a také složkou energie vody, která je nejvíce využívána (především pomocí vodních motorů, respektive vodních turbín, které nám umožňují jí převádět na elektrickou energii, jak bude rozvedeno dále). Konkrétně pro tuto práci je významné využití mechanické energie v umělých tocích ve vodárenských objektech a potrubích.

Mechanickou energii vodního toku můžeme popsat pomocí tří složek: energie potenciální (závisející na výšce oproti určité srovnávací hladině – např. hladina moře), energie tlaková

(závisející na tlaku kapaliny, v tomto případě vody) a energie kinetická (závisející na rychlosti proudění kapaliny).

Tyto složky můžeme vyjádřit s pomocí Bernoulliho rovnice do tvaru rovnice pro měrnou energii vody (tj. na jednotku hmotnosti)¹:

$$E_H = g \cdot H + \frac{p}{\rho} + \frac{1}{2}c^2 \quad (\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}) \quad (1-1)$$

kde:

g tíhové zrychlení ($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)

H výška nad srovnávací hladinou (m)

p tlak vody ($\text{N} \cdot \text{m}^{-2}$)

ρ hustota vody ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)

c rychlost proudění ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

Tato rovnice popisuje energii, kterou lze z vodního toku vhodným vodním dílem získat. Teoretický výkon, který lze z energie vodního toku získat, vztahujeme obecně především na spád (tj. výškový rozdíl na začátku a konci vodního díla) a na průtok (objemový nebo hmotnostní průtok kapaliny skrz vodní dílo), což bude rozvedeno v části 2.2.

Pokud nevezmeme v potaz účinnost našeho procesu získávání energie, mluvíme o teoretickém hydroenergetickém potenciálu jako o maximální energii, kterou lze získat z vodního toku za jednotku času.

Tato energie je s určitou účinností získávána pomocí vodní turbíny a elektrického generátoru a je tedy přeměněna nejčastěji na střídavý elektrický proud, který může být dál efektivně přenášen, transformován a využíván.

1.2 Výroba elektrické energie

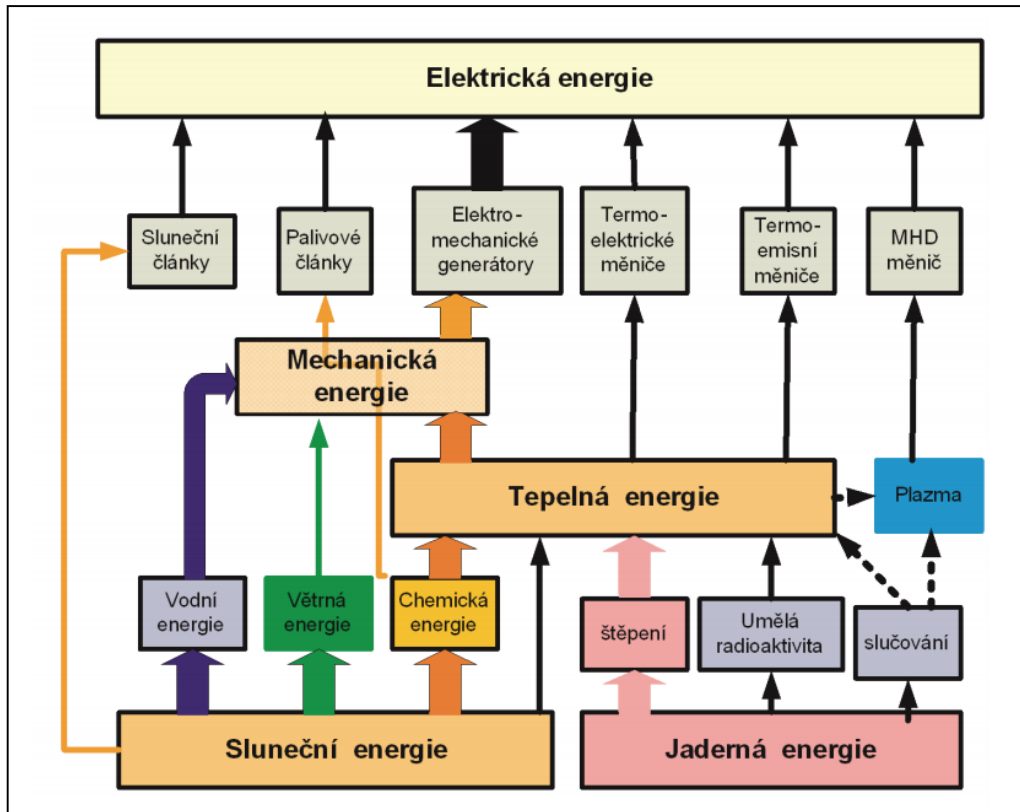
Při získávání i využívání energie používáme různé možné přeměny mezi jednotlivými typy energie. Jako příklad lze uvést chemickou energii obsaženou v palivech, která je uvolněna při hoření do podoby energie tepelné, přeměnu energie větru na mechanickou energii pomocí větrného motoru, nebo přeměnu energie vody na mechanickou energii ve vodní turbíně. Několik příkladů přeměn, kterými můžeme dojít až k elektrické energii, je uvedeno na obrázku 1-1.

Téměř každá přeměna energie je ztrátová, a proto je popsána účinností. Ztracená energie se nejčastěji uvolňuje v podobě tepla, které většinou nemůže být efektivně zachyceno a využito. Typickým případem je tření nebo elektrické Jouleovy ztráty.

Elektrická energie je v tomto ohledu výhodná, protože jí lze snadno a kontrolovaně přeměňovat na jiné druhy energie a přenášet s poměrně vysokou účinností a nízkými ztrátami.

¹ MASTNÝ, P. a kol., 2011. *Obnovitelné zdroje elektrické energie*. Praha: ČVUT. ISBN 978-80-01-04937-2.

Jedním z nejčastějších zdrojů je mechanická energie, kterou můžeme získávat přímo (vodní, větrné elektrárny) nebo nepřímo z tepelné energie získané například spalováním paliv nebo štěpením. Tepelnou energii pomocí média, nejčastěji páry, převedeme na mechanickou energii. Mechanickou energii pak ve všech případech přeměníme na elektrickou pomocí elektrických strojů.



Obr. 1-1 Přeměny energie v energetice¹

Pro výrobu elektrické energie využíváme točivých strojů na střídavý nebo stejnosměrný proud. Točivé elektrické stroje využívají elektromagnetickou indukci, tedy vazbu mezi magnetickým a elektrickým polem (dle 2. Maxwellovy rovnice):

$$u_i = \frac{d\psi}{dt} \quad (V) \quad (1-2)$$

kde:

u_i indukované napětí (V)

$\frac{d\psi}{dt}$ změna spřaženého magnetického toku v čase ($\text{Wb} \cdot \text{s}^{-1}$)

¹ DOLEŽAL, J. a kol. *Jaderné a klasické elektrárny*, 2011. Praha: České vysoké učení technické v Praze. ISBN 978-80-01-04936-5. Str. č. 11.

Mezi elektrické stroje patří také transformátory, netočivé stroje, které na základě magnetické vazby dvou vinutí se společným jádrem mění elektrickou energii na elektrickou energii s jinou úrovní střídavého elektrického napětí.

Většinu elektrických strojů popisujeme pomocí jmenovitého výkonu a jmenovité úrovně napětí, na kterých mají být provozovány, přičemž jednotlivé typy strojů mají další, vlastní definiční parametry (u točivých strojů např. jmenovité otáčky, u transformátorů přenos a hodinový úhel atd.). V podčástech 1.2.1 až 1.2.4 budou jednotlivé typy elektrických strojů krátce popsány¹.

Pro úplnost je ještě vhodné zmínit definice některých veličin, které jsou často používány při popisu elektráren. Jedná se zejména o výkon (vztah 1-3). Existuje více typů výkonu, obecně lze výkon považovat za dodání energie v čase. Přesněji, mechanický výkon definujeme jako množství práce vykonané za jednotku času².

$$P = \frac{dW}{dt} \quad (W) \quad (1-3)$$

kde:

P okamžitý mechanický výkon (W)

W vykonaná mechanická práce (J)

t čas (s)

Pro výpočet mechanické práce lze použít integrální vztah uvedený rovnicí 1-4 jako integrál síly po dané křivce (která je dána polohovým vektorem).

$$W = \int_s \mathbf{F} \cdot d\mathbf{r}_{pol} \quad (J) \quad (1-4)$$

kde platí výše uvedené a dále:

\mathbf{F} vektor působící síly (N)

$d\mathbf{r}_{pol}$ změna polohového vektoru (m)

s křivka, po které působí daná síla

Je vhodné zmínit také elektrický výkon vztahem 1-5. Další vyjádření výkonů budou uvedena v dalších částech, kde je to relevantní. Elektrický výkon je uváděn s pomocí časových průběhů příslušných veličin s ohledem na různé použití této veličiny. Jednodušší vzorce neberou v potaz speciální situace (jako je např. trojfázová soustava s harmonickým průběhem napětí, která se používá v elektrické síti).

¹ Zpracováno volně dle zdroje: VOŽENÍLEK, P., V. NOVOTNÝ a P. MINDL, 2011. *Elektromechanické měniče*. 2. vyd. Praha: ČVUT. ISBN 80-01-03137-3.

² HALLIDAY, D., R. RESNICK a J. WALKER, 2000. *Fyzika. Vysokoškolská učebnice obecné fyziky*. Vyd. 1. Brno: VUTIUM; Prometheus. Překlady vysokoškolských učebnic. s 1. ISBN 80-214-1869-9. Str. č. 165

$$p(t) = u(t) \cdot i(t) \quad (\text{W}) \quad (1-5)$$

kde:

$p(t)$ výkon v závislosti na čase (W)

$u(t)$ napětí v závislosti na čase (V)

$i(t)$ proud v závislosti na čase (A)

Výše zmiňovaná účinnost bude v rámci této práce používána zejména ve smyslu, který je uveden ve vztahu 1-6. Obecně se jedná o veličinu, se kterou popisujeme naši schopnost přeměnit dostupnou energii na jiný typ energie, resp. převést vstupní výkon (příkon) na výstupní výkon. Tak jako v případě výkonů budou typy účinnosti, které jsou specifické pro problematiku vodních elektráren, rozebrány v relevantních částech.

$$\eta = \frac{P}{P_0}, \quad (-) \quad (1-6)$$

P výkon výstupní (W)

P_0 příkon, vstupní výkon (W)

S ohledem na význam elektrických strojů ve výrobě elektrické energie budou dále rozvedeny jednotlivé typy strojů a základní popis jejich funkce.

1.2.1 Střídavé stroje asynchronní

Asynchronní střídavé elektrické stroje fungují na principu interakce točivého pole statoru a točivého pole rotoru, která se otáčí vůči sobě jinou rychlostí (tedy asynchronně).

V případě asynchronního motoru dodáváme střídavý proud na stator, čímž vzniká ve vzduchové mezeře stroje točivé magnetické pole, které způsobuje indukování napětí v rotorovém vinutí. Indukované napětí působí silou proti změně, která ho vyvolala, a tedy rotor „následuje“ točivé pole statoru. Rotor je umístěn na hřídeli, přes kterou lze tedy přenášet otáčky a moment na zátěž.

Z hlediska výroby elektrické energie ve vodních elektrárnách je podstatnější princip asynchronního generátoru. Jeho konstrukce je stejná jako v případě motoru, avšak rotor je otáčen vyšší než synchronní rychlostí (dána frekvencí sítě, do které generátor dodává energii). Díky tomu působí indukované napětí proti hnacímu momentu a mechanická energie je tedy přeměňována na elektrickou. Pro asynchronní stroje jsou podstatné pojmy synchronní rychlosti (definován rovnicí 1-7 jako úhlová rychlost točivého magnetického pole vyvolaného napětím sítě) a skluzu, který je určen synchronní rychlostí a rychlostí rotoru (dle rovnice 1-8).

$$\omega_s = \frac{2\pi \cdot f_s}{p_{pol}} \quad (s^{-1}) \quad (1-7)$$

kde:

f_s frekvence napětí v síti (Hz)

p_{pol} počet pólových dvojic - pólpárů (-)

Skuz je definován vztahem 1-8:

$$s = \frac{\omega_s - \omega}{\omega_s} \quad (s^{-1}) \quad (1-8)$$

kde:

ω_s úhlová rychlost točivého pole vyvolaného elektrickým napětím sítě (s^{-1})

ω úhlová rychlost rotoru asynchronního motoru (s^{-1})

Skuz tedy umožňuje snadno posoudit, v jakém režimu (brzda, motor, generátor) asynchronní stroj pracuje.

Pro provoz asynchronního generátoru je třeba dodávat jalový výkon, který je nutný pro magnetizaci rotoru. Jejich použití u malých vodních elektráren bude více rozvedeno v části 2.4.2.

Asynchronní střídavé stroje mají oproti jiným strojům jednoduchou konstrukci (zejména proti synchronním, jak bude popsáno dále). Jsou především rozšířené jako motory, avšak mají velký význam právě v oblasti menších jednotek pro výrobu elektrické energie. U menších vodních elektráren se s nimi často můžeme setkat díky jejich jednoduché konstrukci, jednoduchému ovládání a nízké pořizovací ceně.¹

1.2.2 Střídavé stroje synchronní

Princip synchronních strojů spočívá opět v interakci pole rotoru a statoru, avšak v tomto případě se tato pole otáčejí stejnou rychlostí a jsou vůči sobě pouze posunutá o určitý zátěžný úhel. Toto uspořádání vyžaduje napájení statoru (obdobně jako u asynchronních strojů) a také buzení rotoru (jedná se v principu o elektromagnet vložený do otáčivého pole statoru).

Tento princip umožňuje kromě standardního motorického a generátorického chodu také funkci kompenzátoru, protože změnou buzení lze využít synchronní stroj pro dodávání (nebo naopak odebrání) jalového výkonu.

Tyto stroje jsou z hlediska elektroenergetiky jedny z nejvýznamnějších, standardně se používají pro výrobu elektrické energie ve velkém měřítku, vzhledem ke své vyšší účinnosti a nižším nákladům (přepočteným na jednotku výkonu)².

¹ HODÁK, T. a P. DUŠIČKA, 1998. *Malé vodné elektrárne*. 1. vyd. Bratislava: Jaga. ISBN 80-967676-8-2. Str. č. 107-106

² VOŽENÍLEK, P., V. NOVOTNÝ a P. MINDL, 2011. *Elektromechanické měniče*. 2. vyd. Praha: České vysoké učení technické v Praze. ISBN 80-01-03137-3.

Frekvence pole statoru (tedy napětí dodávaného do sítě) je přímo úměrná rychlosti, se kterou stroj pracuje dle vztahu 1-9.

$$f = \frac{p_{pol} \cdot n}{60} \quad (V) \quad (1-9)$$

kde:

f frekvence indukovaného napětí (Hz)

p_{pol} počet pólových dvojic - pólpárů (–)

n rychlost rotoru (ot/min)

Při využití v hydroenergetice se používají stroje s vyniklými póly, které pracují na nižších otáčkách. Z hlediska využití v menších vodních elektrárnách se používají zpravidla méně.¹ I tak své užití nalézají, jako například i u objektu, který bude předmětem této práce, což bude rozvedeno v části 3.1.

1.2.3 Stejnoseměrné stroje

Stejnoseměrné točivé stroje pracují (jak název napovídá) na principu stejnoseměrného proudu. Pro vytvoření točivého magnetického pole se používá komutace vinutí na rotoru. Stejnoseměrný stroj se skládá ze statorového budícího vinutí (případně permanentních magnetů), z rotoru (zpravidla se do rotorového vinutí indukuje napětí, tj. jedná se o kotvu) a komutátoru, který zajišťuje komutaci vinutí kotvy (tj. střídavé připojení k zápornému a kladnému potenciálu dle požadavků pro vytvoření točivého magnetického pole). Díky správné komutaci v případě motoru působí na rotor síla, která se přenáší přes hřídel do poháněného zařízení. V případě generátoru dochází k indukovanému napětí ve vinutí rotoru, pokud jím otáčí poháněcí soustrojí.

Stejnoseměrné stroje se používají zejména jako motory, v některých případech jako dynamo např. v automobilech. V případě vodních elektráren je využití méně časté, maximálně pro menší aplikace a specifické funkce, jako je například dobíjení záložních baterií či jiné přímé napájení zařízení stejnoseměrným proudem².

1.2.4 Transformátory

Funkce transformátoru je založená na interakci magnetických toků dvou či více vinutí na společném jádře. Elektrická energie je přiváděna na primární vinutí transformátoru ve formě střídavého napětí, kde se ve vinutí vlivem jeho indukčnosti přeměňuje na magnetický tok, který je přenášen přes magnetický obvod transformátoru do sekundárního vinutí.

¹ BEDNÁŘ, J., 2013. *Turbíny. (malé vodní elektrárny)*. Českovice: Marcela Bednářová. ISBN 978-80-905437-0-6. Str. č. 320-321

² GABRIEL, P., F. ČIHÁK a P. KALANDRA, 1998. *Malé vodní elektrárny*. Vyd. 1. Praha: ČVUT. ISBN 80-010-1812-1. Str. č. 255-256

V sekundárním vinutí (které má zpravidla jiný počet závitů než primární) dochází díky elektromagnetické indukci k přeměně magnetického toku na elektrické napětí v závislosti na počtu závitů. Tímto způsobem je tedy možné změnit napětíovou hladinu při konstantní frekvenci, čehož se využívá při přenosu elektrické energie, kdy může být z praktických důvodů (např. nižší ztráty) přenášena, vyráběna a spotřebována na jiných napětíových hladinách.

Kromě této funkce mohou sloužit transformátory ke galvanickému oddělení (primární a sekundární vinutí není elektricky propojeno) – výjimku tvoří autotransformátory, ve kterých je jako sekundárního vinutí využito části primárního vinutí, a tedy jsou obě vinutí galvanicky propojena.

Funkci transformátorů popisuje transformátorová rovnice (vztah 1-10).

$$U_i = 4,44 \cdot f \cdot N \cdot \phi_m \quad (V) \quad (1-10)$$

kde:

U_i indukované napětí na příslušném vinutí (V)

f elektrická frekvence (Hz)

N počet závitů vinutí (–)

ϕ_m amplituda magnetického toku (Wb)

Dále je vhodné zmínit, že v rámci energetiky používáme běžně třífázový či obecně vícefázový přenos, čemuž musí odpovídat i uspořádání transformátoru. Počet vinutí tedy odpovídá počtu fází na příslušné straně transformátoru.

Tato vinutí jsou zakončena třemi základními způsoby zapojení:

- Trojúhelník (D),
- Hvězda (Y),
- Lomená hvězda (Z).

Mezi další parametry, kterými transformátor charakterizujeme, patří i hodinový úhel, který definuje fázový rozdíl mezi primární a sekundární úrovní napětí. Transformátory jsou dále definovány svým jmenovitým napětím obou hladin a poté výkonem, které jsou schopné přenášet.

KAPITOLA 2: CHARAKTERISTIKA MALÉ VODNÍ ELEKTRÁRNY

2.1 Klasifikace vodních elektráren

Vodní elektrárnou nazýváme obecně objekt, ve kterém přeměňujeme vodní energii na energii elektrickou. Jedná se tedy o zařízení, využívající mechanickou energii vody tak, jak je zmíněna v části 1.1 (vztah (1-1)). Tato část je zahájena rozlišením jednotlivých typů vodních elektráren, tak, aby bylo možné termíny dále používat, případně se na ně dále odkazovat.

Existuje více hledisek, podle kterých lze vodní elektrárny dělit. Zde budou uvedeny pouze některé základní z výběru uváděného v literatuře¹, přičemž primárně dělení vychází z normy ČSN 75 0120 Vodní hospodářství - Terminologie hydrotechniky.²:

- a) Dle instalovaného výkonu:
 - 1) domácí vodní elektrárny (do 35 kW),
 - 2) malé vodní elektrárny (od 35 kW do 10 MW),
 - 3) střední vodní elektrárny (od 10 MW do 200 MW),
 - 4) velké vodní elektrárny (od 200 MW).
- b) Dle způsobu získání spádu:
 - 1) přehradová vodní elektrárna,
 - 2) jezová vodní elektrárna,
 - 3) derivační vodní elektrárna,
 - 4) vodní elektrárna bez vzdouvací stavby.
- c) Dle velikosti využívaného spádu:
 - 1) nízkotlaké (spád do 20 m),
 - 2) středotlaké (spád nad 20 m do 100 m),
 - 3) vysokotlaké (spád nad 100 m).
- d) Dle charakteru provozního režimu:
 - 1) průtočné vodní elektrárny,
 - 2) regulační (akumulační) vodní elektrárny.

Dále lze dělit vodní elektrárny i dle např. umístění strojovny, uspořádání strojovny, řízení (automatická, poloautomatická atd.) a dalších možností.

¹ GABRIEL, P., F. ČIHÁK a P. KALANDRA, 1998. *Malé vodní elektrárny*. Vyd. 1. Praha: ČVUT. ISBN 80-010-1812-1. Str. č. 27-35

² ČSN 75 0120. *Vodní hospodářství - Terminologie hydrotechniky*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011. Třídící znak 75 0120.

Malé vodní elektrárny je možné dle starší literatury¹ dále dělit podle výkonu (který i souvisí s účelem, z čehož vyplývají názvy jednotlivých kategorií):

- a) domácí vodní elektrárny – do 35 kW,
- b) vodní mikroeletřárny – od 35 kW do 100 kW,
- c) vodní minielektrárny (drobné malé vodní elektrárny) – od 100 kW do 1000 kW,
- d) průmyslové malé vodní elektrárny – od 1 MW do 10 MW.

Tato dělení sama o sobě dávají představu o možnostech využití a různých konstrukčních řešení vodních elektráren a je možné se s nimi setkat, i když se nejedná o standardizované termíny.

Dále budou v této části rozebrány jednotlivé typy dělení a parametry, podle kterých jsou vodní elektrárny děleny.

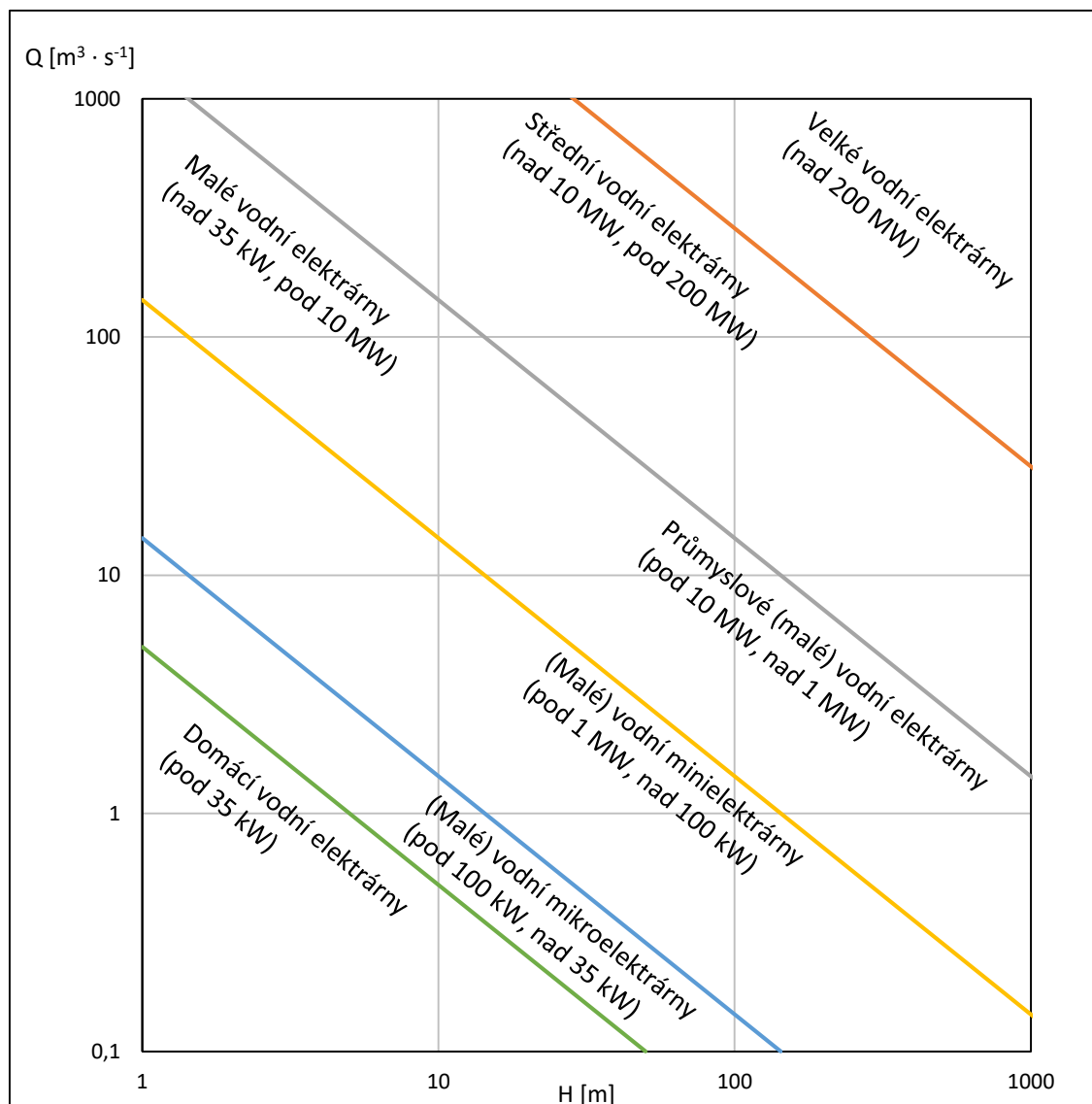
2.1.1 Rozdělení dle instalovaného výkonu

První možnost dělení popisuje do jisté míry „rozsah“ vodního díla. Čím se jedná o větší vodní dílo (větší průtok, větší spád), tím větší bude výsledný instalovaný výkon. Jedná se o výkon elektrický, tedy po zohlednění ztrát a účinnosti přeměny energie ve vodní elektrárně, který elektrárna dodává za optimálních podmínek.

Malé vodní elektrárny jsou početnější a zpravidla mají nízké investiční náklady, zatímco velké a střední vodní elektrárny jsou méně časté a jedná se o velké projekty, jak z hlediska stavby, tak z hlediska provozu, které jsou často přiřazené k jinému dílu významnému z vodohospodářského hlediska.

Na obrázku 2-1 je znázorněno toto dělení i s pomocí průtoku a spádu, který udává výkon vodní elektrárny, jak bude rozvedeno v části 2.2.

¹ GABRIEL, P., F. ČIHÁK a P. KALANDRA, 1998. *Malé vodní elektrárny*. Vyd. 1. Praha: ČVUT. ISBN 80-010-1812-1 Str. č. 28



Obr. 2-1 Rozdělení vodních elektráren podle instalovaného výkonu a spádu.¹

2.1.2 Rozdělení dle způsobu získání spádu

Druhý způsob dělení odpovídá řešení soustředění energie, která bude využita. Průtok je vždy dán vodním tokem samotným, spád je však udán konstrukčním řešením.

V případě přehradové vodní elektrárny je spád vytvořen na základě vodní nádrže, která vede k vzednutí hladiny. Voda zadržaná ve vodní nádrži slouží i k dalším účelům. Často jsou budovány vodní nádrže za účelem vodohospodářství a možnosti regulace vodních toků a teprve sekundárním účelem je výroba elektřiny. Nádrž může fungovat i dalšími způsoby (rekreace,

¹ Překresleno dle: GABRIEL, P., F. ČIHÁK a P. KALANDRA, 1998. *Malé vodní elektrárny*. Vyd. 1. Praha: ČVUT. ISBN 80-010-1812-1 Str. č. 27

rezervoár vody atd.), avšak jedná se o poměrně velký zásah do krajiny a velký projekt pro výstavbu, zvláště u větších děl.

V případě jezové vodní elektrárny je využito jezu, tedy nízkého přehrazení toku, přes který voda přepadává. Vzniklý spádový rozdíl může využívat vodní dílo, které je u jezu vybudováno. Toto provedení je častější u menších vodních elektráren.

Dále je možné používat derivaci vodního toku, tj. umělé odklonění vodního toku na dané výšce a získání spádu vedením toku např. tlakově potrubím, popřípadě beztlakově kanálem (tzv. náhon). Po průchodu vodní elektrárnou se voda vrací zpět do vodního toku. Toto řešení může být kombinováno s jezem či menší vodní nádrží.

Závěrem lze zmínit vodní elektrárny, které pracují bez vzdouvání toku. Turbína je tedy umístěna v potrubí či v otevřeném kanálu a využívá pouze přirozený spád toku spolu s jeho průtokem.

Poněkud specifickou kategorií elektráren tvoří elektrárny ve vodárenských objektech, ve kterých je zpravidla použito potrubí pro vedení vody k vodárenskému objektu. Vlastnosti vodní elektrárny jsou poté dány vlastnostmi vodárenského objektu (vodárna, úpravná vody apod.). Více rozdílů bude popsáno v kapitole 3 a 4 této práce, které se právě takovou vodní elektrárnou zabývají.

2.1.3 Rozdělení dle velikosti využívaného spádu

Třetí způsob dělení slouží zejména pro získání představy o dílu a jeho řešení a často charakterizuje, jaký typ turbín bude s největší pravděpodobností využit.

Kromě spádu lze použít i měrnou energii vody, kterou lze v turbíně získat, přičemž se používá ekvivalentních názvů (dělení na nízkotlaké, středotlaké a vysokotlaké elektrárny). Jak je uvedeno v části 1.1, měrná energie vody bere v potaz nejen spád, ale i průtok vody. U vodních elektráren se zpravidla používá pouze dělení podle spádu a nikoliv podle měrné energie, která má význam hlavně u členění vodních turbín.

Jednotlivé typy elektráren rozdělených podle spádu se běžně liší zejména v použití jiných řešení turbín, která budou dále rozvedena v části 2.2.

2.1.4 Rozdělení dle charakteru provozního režimu

Čtvrtý typ dělení je významný z hlediska elektroenergetiky a je možné podle něj posuzovat roli vodní elektrárny vzhledem k soustavě, kterou napájí.

Průtočné elektrárny jsou závislé na průtoku a nelze je přizpůsobit požadavkům soustavy, do které vodní elektrárna dodává energii. Naproti tomu akumulární elektrárny mohou pokrývat i některé špičky v rámci denního diagramu odběru energie v soustavě, do které pracují. V této

skupině jsou zejména významné přečerpávací elektrárny¹, tedy významně přispívají k regulaci sítě, do které pracují.

Všeobecně se tedy akumulární vodní elektrárny vyjímají z běžného profilu energetického zdroje, protože mohou fungovat jako poměrně spolehlivý zdroj energie (v porovnání např. s fotovoltaickými či větrnými elektrárnami) a zároveň je možné je široce regulovat a poměrně rychle uvádět do provozu (v porovnání s uhelnými či jadernými elektrárnami).²

Tato funkce může být významná i z hlediska malých vodních elektráren přečerpávacích, pokud by jich bylo instalováno dostatečné množství. Z tohoto hlediska by bylo nejspíš nutné využít možností vodárenské soustavy. V současné době toto využití malých vodních elektráren není v ČR všeobecně aplikováno, ale existují studie zabývající se těmito možnostmi, např. ve Švýcarsku³.

2.1.5 Dělení malých vodních elektráren

Malé vodní elektrárny dále dělíme rovněž podle výkonu, což má souvislost i s jejich uplatněním, od kterého jsou odvozeny i názvy kategorií.

Domácí vodní elektrárny lze využít pro napájení menšího objektu, například jedné domácnosti. Mikro- a minizdroje obecně mohou pracovat samostatně v menší síti (ostrovní režim) nebo být napojeny do distribuční soustavy. Může se jednat například o záložní či pomocné zdroje elektrické energie. Malé vodní elektrárny průmyslové mohou napájet jeden objekt s vyšším odběrem, například síť průmyslového závodu, ale také mohou pracovat pouze do nadřazené sítě.

2.2 Princip funkce turbín

V této části bude rozvedeno, na jakém principu probíhá přeměna energie vody na energii elektrickou, respektive na mechanickou energii na hřídeli, kterou může využívat elektrický generátor.

Tak, jak je uvedeno v části 1.1 (vztah (1-1)), dochází ve vodní elektrárně k přeměně kinetické, tlakové a potenciální energie vody na mechanickou energii v turbíně a tato energie je přenášena přes hřídel na generátor, ze kterého je dodávána elektrická energie do připojené sítě (přes transformátor).

Turbína je vodní motor, ve kterém energie vody působí na lopatky, které otáčejí oběžným kolem na hřídeli. Voda musí být na lopatky přivedena a k tomu je využito rozvaděče a přívodního

¹ MASTNÝ, P. a kol., 2011. *Obnovitelné zdroje elektrické energie*. Praha: ČVUT. ISBN 978-80-01-04937-2. Str. č. 143-144

² MASTNÝ, P. a kol., 2011. *Obnovitelné zdroje elektrické energie*. Praha: ČVUT. ISBN 978-80-01-04937-2. Str. č. 130

³ MAILLER, Benoît, Philippe HELLER a Nicolas CRETENAND, 2011. *Pumped-storage with small hydropower – an option?* Konference SHF, *Pumped-Storage Powerplants*. Lyon. [cit. 2021-18-07]. Dostupné z: <https://infoscience.epfl.ch/record/170415>

systému, který bude dále krátce rozebrán v části 2.3.1. Turbína roztáčí hřídel a pohání generátor elektrické energie.

Provoz turbíny můžeme popsat pomocí několika základních parametrů. Tyto parametry většinou bereme v určitém pracovním režimu – například průtok je třeba brát s ohledem na jeho proměnlivost v průběhu roku. Při návrhu turbíny a elektrárny volíme parametry tak, aby byl provoz optimální (aby při nejčastějších podmínkách pracovalo soustrojí s největší účinností).

Parametry elektrárny jsou dány konstrukcí turbíny a dalšími částmi vodního díla a při návrhu o nich rozhodují zejména vlastnosti lokace budované či rekonstruované vodní elektrárny a požadavky na její provoz.

Základní parametry jsou následující:

- Průtok vody Q [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$],
- Užitečný spád H [m],
- Účinnost turbíny η [–, popř. %],
- Otáčky n [$\text{ot} \cdot \text{min}^{-1}$].

Výše uvedené parametry souvisí s energií, která se v turbíně přeměňuje. Pro dané parametry vodního díla lze vypočítat mechanický výkon turbíny dle vztahu 2-1.

$$P = \rho \cdot Q \cdot E \cdot \eta \quad (\text{W}) \quad (2-1)$$

kde:

ρ hustota vody ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)

Q provozní objemový průtok vody ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)

E měrná energie turbíny ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$)

η účinnost turbíny (–)

Ekvivalentně lze uvést vztah 2-2.

$$P = \rho \cdot g \cdot Q \cdot H \cdot \eta \quad (\text{W}) \quad (2-2)$$

kde platí výše uvedené a dále:

g tíhové zrychlení ($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)

Na základě parametrů lze definovat různé typy výkonových veličin a turbíny podle nich dělit. Instalovaný výkon uvedený v části 2.1.1 odpovídá jmenovitým podmínkám (na které byla turbína navržena). Pokud mluvíme o instalovaném výkonu turbíny, jedná se o výkon, který je přenášen na hřídeli do generátoru.

Dále lze pro popis použít teoretický hydraulický výkon P_H , při kterém považujeme účinnost turbíny rovnou jedné (zanedbáváme mechanické ztráty, ke kterým dochází v turbíně).

Pokud je turbína správně navržena, jmenovité hodnoty by měly odpovídat optimálnímu provozu (při kterém je účinnost maximální).

Z hlediska elektrotechnického návrhu je vhodné uvést další klíčové parametry elektrárny, které byly již zmíněny vzhledem k funkci vodní elektrárny:

- Instalovaný výkon elektrárny P_i [W]
- Roční výroba energie E_r [J, W · hod]

Okamžitý výkon elektrárny závisí na použitém typu generátoru a je závislý na čase (např. v důsledku změn průtoku či jiných požadavků na provoz vodní elektrárny). Výkonem v tomto případě je myšlen výkon odebíraný na svorkách generátoru.

K výše uvedeným parametrům je vhodné přidat i parametry generátoru, například jmenovité napětí pro návrh připojení k nadřazené síti.

Z hlediska strojního lze uvádět další významné parametry turbíny, např. průměr oběžného kola D , které jsou rozvedeny v literatuře, která se zabývá návrhem turbín¹. Obecně je významný i minimální průtok Q_{min} a maximální průtok Q_{max} (také zvaný hltnost turbíny).

Pro porovnávání turbín navzájem používáme zejména dvě veličiny:

- a) Měrná energie turbíny [$J \cdot kg^{-1}$]: Jedná se o energii vztaženou na kilogram proudící kapaliny, která je předána při průchodu vody turbínou. Obecně se tedy jedná o rozdíl měrné energie vody před turbínou a za turbínou. Tato energie vychází z Bernoulliho rovnice (dle vztahu (1-1)).
- b) Měrné (specifické) otáčky turbíny [–]: Jedná se o parametr vycházející z teorie hydraulické podobnosti turbín, který umožňuje porovnávat z hlediska účinnosti turbíny různých průtoků a spádů. Turbíny s blízkými měrnými otáčkami mají podobná hydraulická řešení, ač mohou mít zcela rozdílné rozměry či provozní parametry.

Pro výpočet měrných otáček turbíny lze využít následující vztah²:

$$n_q = \frac{333 \cdot n \cdot \sqrt{Q}}{\sqrt[4]{E^3}} \quad (-) \quad (2-3)$$

kde:

n provozní otáčky (s^{-1})

Q pracovní objemový průtok vody ($m^3 \cdot s^{-1}$)

E měrná energie turbíny ($J \cdot kg^{-1}$)

Tyto výše popsané principy a parametry slouží při návrhu vodní elektrárny k vhodnému výběru turbíny podle vodního toku a také lokace vodní elektrárny. Výběr turbíny dále určuje parametry pro výběr generátoru.

¹ BEDNÁŘ, J., 2013. *Turbíny. (malé vodní elektrárny)*. Češkovice: Marcela Bednářová. ISBN 978-80-905437-0-6. Str. č. 160-167

² MASTNÝ, P. a kol., 2011. *Obnovitelné zdroje elektrické energie*. Praha: ČVUT. ISBN 978-80-01-04937-2. Str. č. 134

Pro turbíny jsou možné různé konstrukce, které můžeme dle literatury¹ obecně dělit podle způsobu, jakým je energie přenášena na lopatky:

- 1) Rovnotlaké turbíny,
- 2) Přetlakové turbíny,
- 3) Mezní turbíny.

Dále budou nastíněny principy fungování jednotlivých typů turbín. Zvolená turbína ovlivňuje konstrukční řešení celé vodní elektrárny a je tedy vhodné popsat základní typy a rozdíly mezi nimi. V závěru budou uvedeny i některé další typy dělení turbín, které jsou běžně používány.

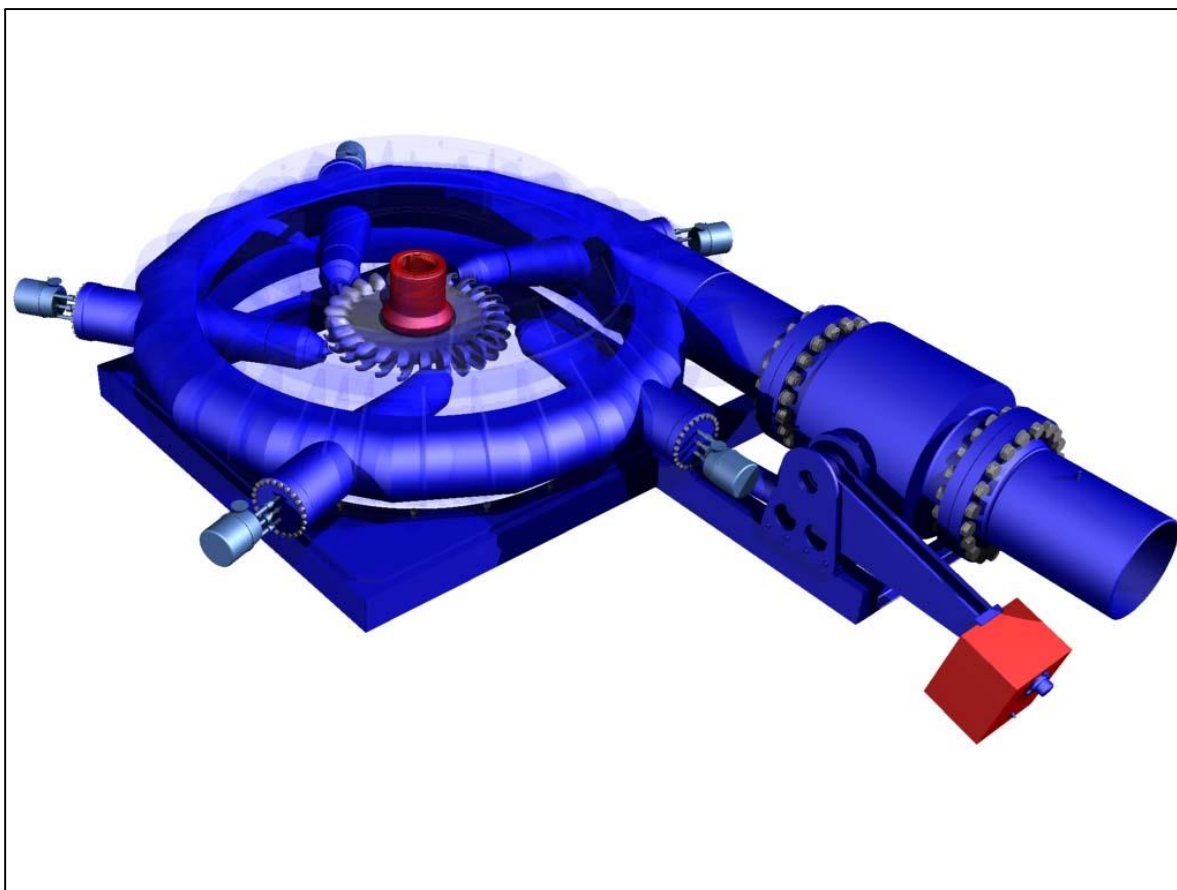
2.2.1 Rovnotlaké turbíny

V případě rovnotlakých turbín je tlak na vstupu a výstupu turbíny stejný. Rozváděcí systém tedy přeměňuje celou energii vody na kinetickou, které je poté využíváno pro roztáčení oběžného kola. V těchto turbínách je běžně použito dýzy, která soustřeďuje průtok do podoby vodního paprsku a kterou lze využít pro regulaci výkonu. Voda nevyplňuje prostor lopatek, ve kterém je zčásti i vzduch o atmosférickém tlaku.

Mezi příklady těchto turbín patří například Peltonova turbína či Bánkiho turbína. Peltonova turbína je využívána zejména u malých vodních elektráren vzhledem ke své jednoduchosti, která snižuje investiční náklady (což je u malých vodních elektráren často velmi významný parametr). Bánkiho turbína je specifická dvojitým průtokem vody turbínou (voda protéká nejprve dostředivě a poté odstředivě vztaheno k oběžnému kolu). Bánkiho turbína je také vhodná pro malé vodní elektrárny vzhledem k rozsahu výkonů, ve kterých jí lze aplikovat (1 až 1000 kW).²

¹ Tato část volně dle zdroje: BEDNÁŘ, J., 2013. *Turbíny. (malé vodní elektrárny)*. Českovice: Marcela Bednářová. ISBN 978-80-905437-0-6. Str. č. 85-99

² BEDNÁŘ, J., 2013. *Turbíny. (malé vodní elektrárny)*. Českovice: Marcela Bednářová. ISBN 978-80-905437-0-6. Str. č. 197.



Obr. 2-2 Příklad uspořádání Peltonovy turbíny¹

Rovnotlaké turbíny jsou také někdy nazývány akční, kvůli působení paprsku vody na lopatky turbíny silou akce. Avšak i u těchto turbín vzniká celkový účinek složením akce a reakce vody působící na lopatky.

U rovnotlakých turbín může být v případě malých vodních elektráren dosahováno přibližně účinnosti 92 % až 93 %.² Těto ideální účinnosti však není dosahováno za běžných podmínek vzhledem k proměnlivosti průtoku vodními toky a dalším parametrům běžného provozu.

Peltonovy turbíny lze řadit mezi vysokotlaké turbíny a jejich měrná energie se běžně pohybuje nad hodnotou³ $200 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$. Bánkiho turbíny lze používat v širším rozsahu parametrů a jejich měrná energie se nachází v rozsahu⁴ 10 až $2000 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$.

¹ HYDROHROM s. r. o., vodní elektrárna Belle, [online]. [cit. 2021-04-08]. Dostupné z [www: http://hydrohrom.cz/](http://hydrohrom.cz/)

² GABRIEL, P., F. ČIHÁK a P. KALANDRA, 1998. *Malé vodní elektrárny*. Vyd. 1. Praha: ČVUT. ISBN 80-010-1812-1. Str. č. 181.

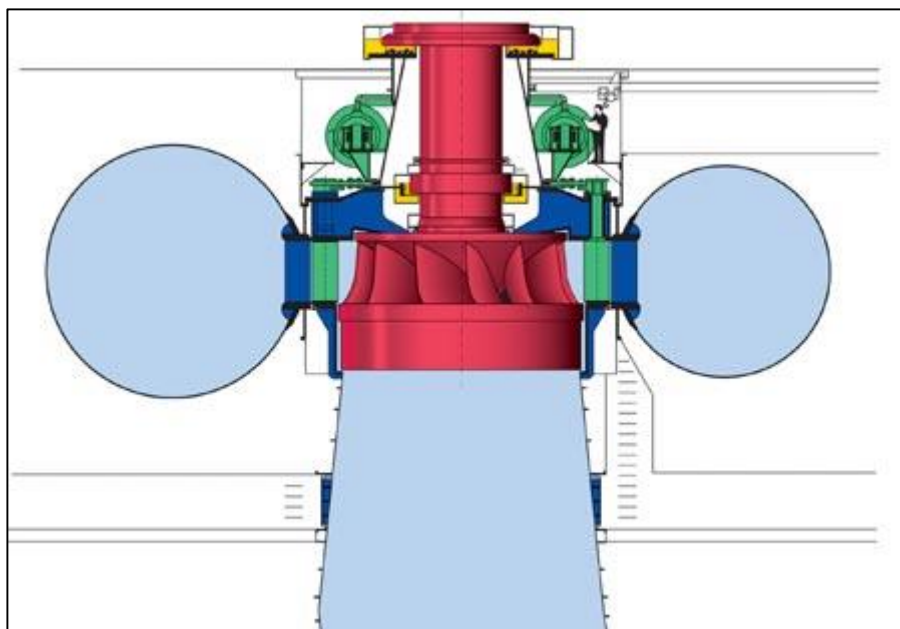
³ BEDNÁŘ, J., 2013. *Turbíny. (malé vodní elektrárny)*. Českovice: Marcela Bednářová. ISBN 978-80-905437-0-6. Str. č. 181.

⁴ BEDNÁŘ, J., 2013. *Turbíny. (malé vodní elektrárny)*. Českovice: Marcela Bednářová. ISBN 978-80-905437-0-6. Str. č. 197.

2.2.1 Přetlakové turbíny

U přetlakové turbíny je využito kinetické i tlakové energie vody. Tedy pracujeme s rozdílem tlaku dvou hladin – tlak na vstupu turbíny je vyšší, než na jejím výstupu. U těchto turbín je voda přiváděna rozvaděčem na lopatky oběžného kola, na které působí silou na základě rozdílu tlaků a své kinetické energie. Vzhledem k tomu, že využíváme i energii tlaku, musí být prostor lopatek a oběžného kola zcela uzavřen a vyplněn vodou. Uspořádání a geometrie turbíny musí být uzpůsobena působení vody a navržena tak, aby nedocházelo ke ztrátám vlivem vzniku vírů.

Mezi nejčastější typy přetlakových turbín patří Kaplanova turbína a Francisova turbína. Francisovy turbíny jsou obecně určeny pro vyšší spády (od 100 m do 500 m)¹, které nemusí být u malých vodních elektráren k dispozici, pokud se nejedná o lokace např. v horských oblastech (tzv. alpínský typ vodní elektrárny). Kaplanova turbína je naproti tomu vhodná i pro nižší spády a vzhledem ke svému uspořádání umožňuje i regulaci přímo na lopatkách turbíny, díky čemuž se tato turbína může přizpůsobovat proměnlivému průtoku na menších tocích.



Obr. 2-3 Příklad uspořádání pro využití Francisovy turbíny²

Přetlakové turbíny jsou nazývány reakční, protože při průchodu vody oběžným kolem je významné reakční působení lopatek na vodu, díky kterému je konána práce.

Francisova turbína je použitelná v širokém rozsahu parametrů, běžná měrná energie se pohybuje v rozmezí³ 50 až 3000 J · kg⁻¹. Kaplanovy turbíny mohou mít s obdobnou účinností

¹ GABRIEL, P., F. ČIHÁK a P. KALANDRA, 1998. *Malé vodní elektrárny*. Vyd. 1. Praha: ČVUT. ISBN 80-010-1812-1. Str. č. 212.

² Mastný, P. a kol., 2011. *Obnovitelné zdroje elektrické energie*. Praha: ČVUT. ISBN 978-80-01-04937-2. Str. č. 135

³ BEDNÁŘ, J., 2013. *Turbíny. (malé vodní elektrárny)*. Češkovice: Marcela Bednářová. ISBN 978-80-905437-0-6 Str. č. 212.

a hydraulickým provedením jako Francisovy turbíny (tj. obdobné měrné otáčky) nižší hmotnost a tedy mohou být použity místo nich (i díky svým větším možnostem regulace). Běžně se používají pro měrnou energii v rozmezí¹ 15 až 150 J · kg⁻¹.

2.2.2 Mezní turbíny

Pro turbíny, které tvoří přechod mezi přetlakovými a rovnotlakými turbínami, je používáno označení mezní turbíny. Základní konstrukce turbíny odpovídá rovnotlakým turbínám, avšak prostor oběžného kola je zcela zaplněn vodou a tomu je konstrukce turbíny příslušně uzpůsobena. Jedná se o konstrukci, která už není běžně používána, ač by se mezi ně mohla řadit Bánkiho turbína².

2.2.3 Další typy dělení

V závěru této části je vhodné dodat, že existují další možnosti dělení turbín, například podle uspořádání soustrojí turbíny a generátoru (vertikální, horizontální, šikmé...), podle průtoku vody oběžným kolem (dostředivé, odstředivé aj.) či podobně jako elektrárny – tj. na nízkotlaké, středotlaké a vysokotlaké (zde je rozhodujícím faktorem měrná energie, nikoliv spád).

Možnosti dělení vychází z mnoha parametrů, které u turbín rozlišujeme, včetně jejich konstrukčního řešení a uspořádání. Základní dělení, které je uváděno téměř vždy, je dělení podle působení vody na lopatky, respektive podle tlakových poměrů na vstupu a výstupu turbíny, které je zde uvedeno.

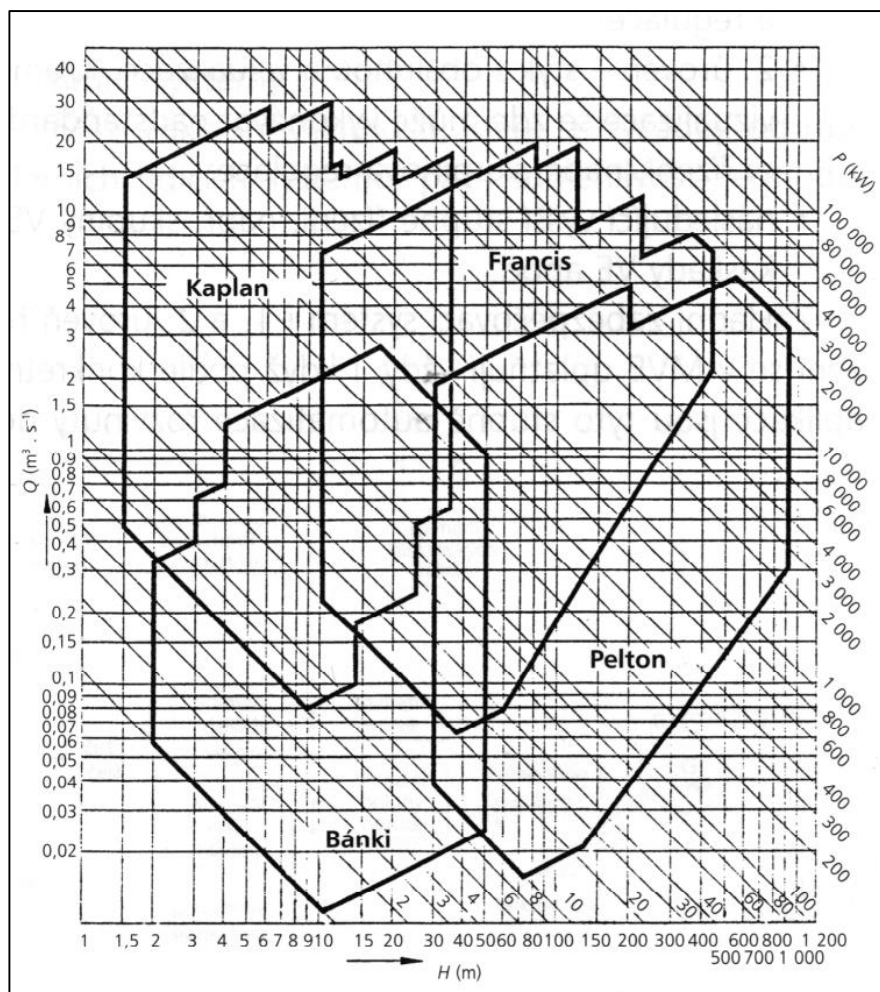
2.2.4 Porovnání využití různých typů turbín

Na základě výše uvedené vhodnosti různých provedení turbíny pro různé spádové a průtokové poměry lze vytvořit diagram, který umožňuje odhadovat, která turbína bude nejužitečnější v dané lokalitě, což je vhodné v předběžném návrhu řešení.

Tyto možnosti využití lze zobrazit graficky, jak je znázorněno na obrázku 2-4.

¹ BEDNÁŘ, J., 2013. *Turbíny. (malé vodní elektrárny)*. Českovice: Marcela Bednářová. ISBN 978-80-905437-0-6. Str. č. 236.

² MELICHAR, J., J. VOJTEK a J. BLÁHA, 1998. *Malé vodní turbíny. Konstrukce a provoz*. 1. vyd. Praha: ČVUT. ISBN 80-01-01808-0. Str. č. 154



Obr. 2-4 Rozsah použití některých typů turbín¹

2.3 Průběh vody vodní elektrárnou

Pro správnou a efektivní funkci vyžaduje vodní turbína dostatečný a vhodně řešený přívod a odvod vody. Tato část je věnována průchodu vody celým objektem vodní elektrárny.

Průběh vody objektem přímo závisí na stavebním řešení vodního díla. Jiné bude řešení u přehradové elektrárny, elektrárny derivační nebo menšího zdroje umístěného v přívodu, který má jiné účely (např. vodárenské). Z hlediska všech těchto řešení lze uvést několik základních funkcí, které musí vtoková a výtoková zařízení zajišťovat.

- 1) Efektivní přivedení vody na lopatky turbíny (přivaděčový systém, rozvaděčové lopatky, popř. dýza),
- 2) Odvod vody poté, co předala svou energii lopatkám turbíny (odpad, savka),
- 3) Zajištění bezproblémové a ekologické funkce turbíny – zejména odstranění cizích objektů (česle, vtokový práh).

¹ MASTNÝ, P. a kol., 2011. *Obnovitelné zdroje elektrické energie*. Praha: ČVUT. ISBN 978-80-01-04937-2. Str. č. 136.

2.3.1 Přívod vody

Ve většině vodních elektráren je voda přiváděna z prostoru, kde je vzdouvána – jez, náhon či přehrada. Voda musí být usměrněna a přivedena do prostoru turbíny, nejčastěji přes kašnu a rozvaděč nebo dýzu. Je snaha při přívodu vody minimalizovat hydraulické ztráty. Tyto ztráty vznikají jako důsledek víření vody a tření vody o povrchy, což lze popsat snížením využitelného spádu o tzv. hydraulickou účinnost:

$$H_{ef} = \eta_h \cdot H \quad (\text{m}) \quad (2-4)$$

kde:

H_{ef} využitelný spád (m)

H spád na vstupu přívodu objektu (m)

η_h hydraulická účinnost objektu (–)

Hydraulická účinnost obecně představuje poměr mezi dostupnou měrnou energií v objektu a měrnou energií, která je v turbíně využita. Kromě poměrů na přívodu bere v potaz i účinnost průchodu vody lopatkami a další aspekty. Rozbor závisí na použitém typu turbíny a celkové konstrukci.¹

Obdobně dochází při přívodu vody na lopatky turbíny ke ztrátám v objemu (tj. dochází ke snížení využívaného průtoku). Tyto ztráty jsou způsobeny neúčinným průtokem vody skrz prostor turbíny, například mezerami mezi stěnami a lopatkami. Vyjadřuje tedy efektivitu a správnou funkci těsnění turbíny.

Na základě těchto ztrát definujeme objemovou (volumetrickou) účinnost a efektivní průtok objektem:

$$Q_{ef} = \eta_V \cdot Q \quad (\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}) \quad (2-5)$$

kde:

Q_{ef} využitelný průtok ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)

Q průtok vstupující do objektu ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)

η_V objemová účinnost objektu (–)

Celkovou účinnost díla tvoří kromě těchto dvou typů účinnosti také mechanická účinnost. Ta je vázána na ztráty ve strojní části elektrárny, např. v elektrickém generátoru, na hřídeli a v ložiskách.

U řešení s přetlakovou turbínou přivádí vodu na lopatky rozvaděč (viz obr. 2-3), který je navržen tak, aby vodu směřoval na lopatky s co nejmenšími ztrátami. V případě rovnotlaké

¹ Podrobnější rozbor např. GULLIVER, J. S. a R. E. A. ARNDT, 1991. *Hydropower engineering handbook*. New York: McGraw-Hill. ISBN 0-07-025193-2.

turbíny se jedná o dýzu (viz obr. 2-2) s jehlou pro regulaci průtoku. Při regulaci průtoku (jehlou, nebo např. natáčivými lopatkami rozvaděče nebo samotné turbíny) není proudění optimální a tedy narůstají ztráty a klesá účinnost.

Přívodní systém může být otevřený (s volnou hladinou) nebo přetlakový (potrubí), podle řešení turbíny.¹

2.3.2 Odtok vody

Poté, co voda projde prostorem turbíny a předá část své energie lopatkám, odchází odtokovým systémem do vodního toku. I tato část ovlivňuje množství energie, kterou lze získat z vody v turbíně, a to zejména tlakem při použití přetlakových turbín, které tlakovou energii vody využívají.

Vzhledem k tomu, že v takovém případě je měrná energie turbíny také dána rozdílem tlaků na vstupu a na výstupu turbíny, je možné vhodným uspořádáním odpadu snížit tlak na výstupu a tím zvýšit energii, kterou může voda předat lopatkám turbíny.

Za tímto účelem se využívají savky, tedy rozšiřující se potrubí ústící do odpadního prostoru, které vede ke snížení tlaku. Tyto savky mohou způsobovat nežádoucí vírové proudění v prostoru za turbínou, které musí být zohledněno při návrhu turbíny. Savky se primárně využívají u přetlakových turbín, ale v některých případech se používají i u rovnotlakých turbín².

Speciální kategorii s ohledem na odtok vody tvoří turbíny ve vodárenských objektech, kdy voda, která odchází z turbíny, musí mít daný tlak pro použití například v úpravně vody nebo ve vodárenském systému. V tomto případě tedy voda odtéká do příslušného zařízení např. potrubím a nevrací se do žádného vodního toku.

2.3.3 Další funkce

Pro správnou funkci turbíny je nutné zabránit vniku cizích předmětů do turbíny – např. splavenin nebo nečistot. Ze stejného důvodu a zároveň z ekologických důvodů je nežádoucí, aby se do objektu turbíny mohli dostat živočichové, zejména ryby, z toku, ze kterého je voda odebírána.

Za tímto účelem jsou u všech vodních elektráren instalovány česle. Zpravidla se jedná o hrubé česle na vtoku do přívodního systému a jemné česle za nimi. Vzhledem k tomu, že zastavují splaveniny a jiné cizí objekty, které se na nich zachytávají, musí být náležitě čištěny. U větších objektů je čištění česlí automatické, u menších může být ruční.

Podobný účel splňuje i například vtokový práh a další součásti vtoku. Na přítoku mohou být rovněž umístěny uzávěry pro zastavení přítoku v případě nehody či jiného problému.

¹ MELICHAR, J., J. VOJTEK a J. BLÁHA, 1998. *Malé vodní turbíny. Konstrukce a provoz*. 1. vyd. Praha: ČVUT. ISBN 80-01-01808-0. Str. č. 113-115

² MELICHAR, J., J. VOJTEK a J. BLÁHA, 1998. *Malé vodní turbíny. Konstrukce a provoz*. 1. vyd. Praha: ČVUT. ISBN 80-01-01808-0. Str. č. 96-97

Mezi další součásti objektu vodní elektrárny patří také často vedlejší kanál, který zajišťuje sanační průtok (nutný pro vodohospodářství ve vodním toku), případně může být součástí jezu nebo jiného vzdouvacího tělesa.

Touto vedlejší cestou také odchází průtok vody nad hltností turbíny, který nelze využít. Do ní také většinou ústí odpad turbíny.

2.4 Výroba elektrické energie

Vodní turbína rozebírána v předchozích částech je nejčastěji umístěna na jedné hřídeli s generátorem, někdy s využitím převodu. Otáčky a moment se přenáší přes hřídel na rotor generátoru, který přeměňuje mechanickou energii na elektrickou.

V případě vodních elektráren se nejčastěji používají střídavé generátory, protože otáčky turbíny, na které je koncipována, jsou předem známy, a střídavé generátory jsou více dostupné a jednodušší¹. Pro připojení na vnější síť je také střídavý proud praktičtější z hlediska přenosu a transformace. Použitý generátor je zpravidla dimenzován tak, aby co nejlépe odpovídal maximálnímu výkonu turbíny.

2.4.1 Použití asynchronního generátoru

U malých vodních elektráren je často použit asynchronní generátor, protože je v porovnání se synchronním generátorem jednoduchý na konstrukci a má tedy nižší pořizovací náklady. Asynchronní generátor může být také díky principu své funkce (viz 1.2.1) konstrukčně stejný, jako asynchronní motor.

Nevýhodou, zvláště z hlediska vyšších výkonů, je nutnost dodávání jalového výkonu do asynchronního motoru ze sítě, který je nutný pro magnetizaci vinutí rotoru. Vzhledem k udržení stabilních poměrů v síti je třeba tento výkon kompenzovat (např. pomocí kondenzátorové baterie) nebo platit za odběr jalového výkonu.

U menších strojů, které se mohou objevit u malých vodních elektráren, není jalový výkon neúměrně velký a zátěž sítě nemusí být tak výrazná na to, aby kompenzace jalového výkonu převážila nižší pořizovací cenu asynchronního motoru.

Spouštění asynchronního generátoru má oproti synchronním generátorům výhodu, protože proces připojení (přifázování) k síti je daleko jednodušší než u synchronního generátoru (lze ho provést při určitém zjednodušení přímým připojením). Vzniká zde riziko proudových rázů při nájedu do asynchronních otáček, které je třeba zohlednit při spouštění generátoru².

¹ HODÁK, T. a P. DUŠIČKA, 1998. *Malé vodné elektrárne*. 1. vyd. Bratislava: Jaga. ISBN 80-967676-8-2. Str. č. 104.

² BEDNÁŘ, J., 2013. *Turbíny. (malé vodní elektrárny)*. Češkovice: Marcela Bednářová. ISBN 978-80-905437-0-6. Str. č. 324-325.

2.4.2 Použití synchronního generátoru

U větších vodních elektráren je často použit synchronní generátor, podobně jako u například parních turbín v tepelných elektrárnách a v jiných větších objektech. V případě vodních elektráren se setkáváme zejména s pomaluběžnými stroji s vyniklými póly rotoru (hydroalternátory), což je dáno otáčkami použité turbíny, ke které je generátor mechanicky připojen.

Vzhledem k principu jejich funkce jsou schopné dodávat i odebírat jalový výkon (na základě změn budícího proudu, který je třeba dodávat) a také pracovat i bez vnější sítě v ostrovním režimu. Na rozdíl od asynchronního generátoru tedy nevyžadují kompenzaci. Jedná se však o složitější a zpravidla dražší zařízení.

2.4.3 Použití transformátorů

Generátor, který je použit pro přeměnu mechanické energie na elektrickou, je k síti připojen přes blokový transformátor (transformátorům je ve zkratce věnována část 1.2.4¹). Pokud je v objektu elektrárny použito více napěťových hladin, jsou potřebné i další transformátory, například pro přenos na úroveň vlastní spotřeby.

Dále mohou být použity menší, měřicí transformátory proudu, napětí či výkonu, které slouží k odečtu hodnot pro regulaci nebo kontrolu provozu. Malé transformátory zároveň slouží ke galvanickému oddělení různých napěťových hladin, například mezi vedením vlastní spotřeby a vedením, které přenáší vyráběný výkon.

2.4.4 Vlastní spotřeba

U většiny malých vodních elektráren není vlastní spotřeba příliš významná z hlediska snížení výkonu, který elektrárna dodává do sítě. Z hlediska fungování elektrárny je potřeba tuto vlastní spotřebu ošetřit, a to lze učinit dalším transformátorem nebo případně vyvedením odbočky z hlavního, blokového transformátoru.

2.4.5 Připojení k síti

System malé vodní elektrárny lze popsat pomocí obrázku (obr. 2-3), který je platný pro vodní elektrárny obecně. Pro malé vodní elektrárny se uplatní specifika, která odpovídají dané lokaci, účelu a použitému vybavení (napěťové hladiny atd.). K síti je však potřeba generátor při spouštění provozu připojit. Způsob připojení závisí přímo na použitém typu generátoru.

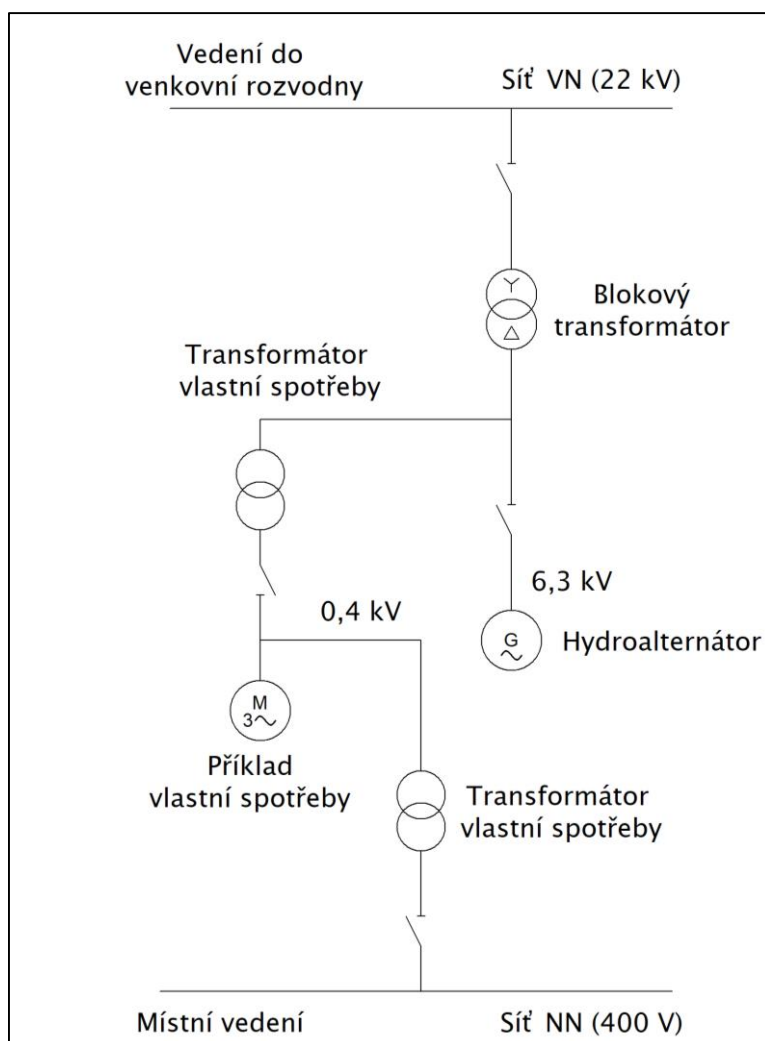
U asynchronních generátorů by docházelo při přímém připojení na síť k velkému proudovému rázu, který je způsobený magnetizačním proudem. Tento proud může být snížen

¹ Zpracováno dle: VOŽENÍLEK, P., V. NOVOTNÝ a P. MINDL, 2011. *Elektromechanické měniče*. 2. vyd. Praha: ČVUT. ISBN 80-01-03137-3. Kap. 3.

například jiným uspořádáním rotoru s odpory, ale většinou je postačující nepřipojovat generátor v klidu (jako by bylo potřebné u asynchronního motoru), ale až po roztočení turbíny¹. Generátor je spouštěn v motorickém režimu a dalším přiváděním vody na turbínu je dosaženo nadsynchronních otáček, při kterých může generátor dodávat energii do sítě. Tímto způsobem připojení se proudový náraz sníží.

U synchronních generátorů je potřeba stroj k síti přifázovat poté, co je turbínou roztočen, tedy připojit tak, aby se shodoval sled fází, napěťové hladiny, frekvence (resp. otáčky) a fázový posun. Kontrola těchto parametrů může být provedena automaticky, či případně je možné, aby je prováděla obsluha s pomocí přístrojů².

Příklad zapojení generátoru je uveden na obrázku 2-4:



Obr. 2-3 Příklad schéma zapojení generátoru a dalších prvků VE k síti³

¹ BEDNÁŘ, J., 2013. *Turbíny. (malé vodní elektrárny)*. Češkovice: Marcela Bednářová. ISBN 978-80-905437-0-6. Str. č. 324-325

² VOŽENÍLEK, P., V. NOVOTNÝ a P. MINDL, 2011. *Elektromechanické měniče*. 2. vyd. Praha: ČVUT. ISBN 80-01-03137-3. Str. č. 117-118

³ Překresleno, dle: MASTNÝ, P. a kol., 2011. *Obnovitelné zdroje elektrické energie*. Praha: ČVUT. ISBN 978-80-01-04937-2. Str. č. 145.

2.4.6 Elektrické ochrany

Generátor a další zařízení v objektu elektrárny musí obsahovat příslušné elektrické ochrany¹, které zajišťují bezpečnost provozu a chrání před škodou jak zařízení elektrárny, tak její obsluhu. Pro ochrany jsou používány přístroje dimenzované dle vlastností dané elektrárny (tj. s ohledem na přetížitelnost, provozní parametry apod.)

Zařízení musí být zpravidla jištěna proti zkratovým proudům (pomocí pojistek, resp. zkratové ochrany jističů) a proti nadproudům (pomocí tepelných relé), které by mohly způsobit poškození zařízení. Může být nutné hlídat také riziko zemního spojení (závisí na typu uspořádání vedení z generátoru)

Dále je třeba kontrolovat hladinu napětí, a to zejména prostřednictvím přepětových ochran. Z hlediska provozu generátorů může být rizikové i podpětí, které může vést např. ke ztrátě synchronismu a k přechodu turbíny do průběžných otáček. Vzhledem k tomu, že je používáno ve většině případů třífázové vedení, je třeba kontrolovat i symetrii zatížení (tedy jistit proti vzniku nesymetrických proudů), které je nežádoucí z hlediska stability sítě.

Kromě toho je třeba sledovat také frekvenci napětí na výstupu a zajistit, že bude blízká síťové frekvenci (50 Hz), jinak může hrozit vypadnutí generátoru ze synchronního chodu, což by vedlo k nutnosti přerušování provozu.

Vzhledem ke komplexnosti zařízení je třeba kontrolovat i mnohé další veličiny pro bezpečný provoz elektrárny. Některé z nich nemusí přímo souviset s elektrotechnickým vybavením (např. průtok, hladina vody atd.). Podrobný rozbor parametrů, které je nutné kontrolovat, souvisí i s provedením a umístěním dané vodní elektrárny².

¹ Zpracováno volně dle: GABRIEL, P., F. ČIHÁK a P. KALANDRA, 1998. *Malé vodní elektrárny*. Vyd. 1. Praha: ČVUT. ISBN 80-010-1812-1. Kap. 9.12.

² Více např. ve zdroji: GABRIEL, P., F. ČIHÁK a P. KALANDRA, 1998. *Malé vodní elektrárny*. Vyd. 1. Praha: ČVUT. ISBN 80-010-1812-1. Str. č. 273-275.

KAPITOLA 3: NÁVRH ŘEŠENÍ REKONSTRUKCE MALÉ VODNÍ ELEKTRÁRNÝ (MVE) PRO ÚPRAVNU VODY V BEDŘICHOVĚ

3.1 Požadavky a návrh MVE

3.1.1 Výchozí data

Pro návrh malé vodní elektrárny je potřeba mít k dispozici vstupní data, která popisují lokaci dané malé vodní elektrárny. Při návrhu jakéhokoliv objektu je třeba brát v potaz zamýšlený účel, požadavky zákazníka a právní předpisy, které se na stavbu vztahují. Pro vyhotovení stavby MVE je potřeba zajistit stavební povolení, přístup ke staveništi i připojení MVE k soustavě a další podstatné aspekty, jako jsou vodohospodářské poměry apod. Tento proces musí být podložen projektovou dokumentací, na jejímž základě je prováděn.

Z hlediska této práce je stěžejní technické hledisko návrhu, tedy provedení MVE z hlediska jejích částí, které jsou stručně rozvedeny v kap. 2. Základem je výběr turbíny a stanovení očekávaného výkonu elektrárny.

Výchozím bodem tedy musí být hydrologické poměry pro danou lokaci (využitelný spád, využitelný průtok, průtokové poměry v čase – čáry trvání). Tato práce bude vycházet z dat společnosti Severočeské vodovody a kanalizace a. s. (SČVK a. s.), která ve svých vodárenských objektech často MVE využívá.

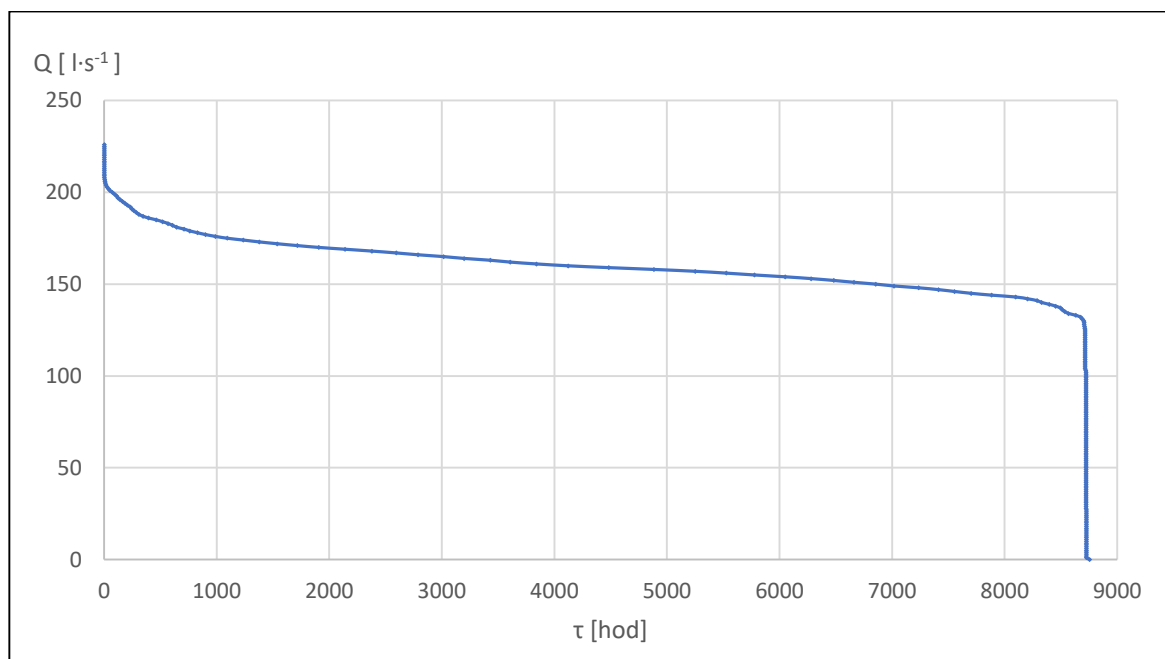
Konkrétně se bude jednat o vodárenský objekt úpravny vody v Bedřichově, ve které je umístěna MVE pro potřeby úpravy tlaku pro účely vodárenství (ekvivalentní roli v objektu zastává regulační ventil, který energii maří). Tato MVE vyžaduje rekonstrukci, kterou se bude tento návrh zabývat. Díky volbě už existujícího zařízení jsou k dispozici dostatečná data pro vyhotovení návrhu.

Zejména se jedná o požadavky na průtok. U běžné MVE na vodním toku se návrh soustřeďuje na výrobu elektrické energie, a tedy je MVE optimalizována podle měření průtoků na vybrané lokaci pro nejefektivnější výrobu energie. V tomto případě, tedy v případě vodárenského objektu, je primárním účelem dodávat průtok daný řízením úpravny vody a výroba elektrické energie je sekundární.

V rámci přípravy rekonstrukce provedla SČVK a. s. měření současného stavu MVE a poskytla data hodinových průtoků skrz turbínu za jeden rok provozu, resp. od 1. 10. 2019 do 29. 10. 2020. Analýza se bude týkat dat od 29. 10. 2019 (čas 00:05:00) do 29. 10. 2020 (čas 00:05:00). Jedná se o hodinové průtoky za celkem 8755 hodin, přičemž 28 hodin protékal turbínou nulový průtok, tj. turbína nebyla v provozu. Průměrný průtok byl $159,6 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, MVE za dané období pracovala s průměrným výkonem 86,11 kW a dodala energii 753,89 MWh do sítě.

Údaje o hodinových průtocích byly zpracovány do křivky trvání průtoků, která je uvedena na obrázku 3-1. V současném provedení je MVE vybavena Peltonovou turbínou od firmy Hydrohrom, s. r. o.

Štítkové údaje použité turbíny jsou uvedeny v tabulce 3-1. Tato turbína byla uvedena do provozu v roce 2003.



Obr. 3-1: Čára trvání průtoků

Parametr	Hodnota
Jmenovitý spád H [m]	70,4
Jmenovitý průtok Q [$m^3 \cdot s^{-1}$]	0,3
Jmenovitý výkon P [kW]	182,3
Jmenovité otáčky n [ot·min ⁻¹]	750,0
Maximální otáčky n_{max} [ot·min ⁻¹]	1350,0
Počet dýz	4,0

Pro provoz úpravny vody je požadován rozsah průtoků turbínou od 130 $l \cdot s^{-1}$ do 210 $l \cdot s^{-1}$, přičemž očekávaný nejčastější průtok je 160 $l \cdot s^{-1}$.

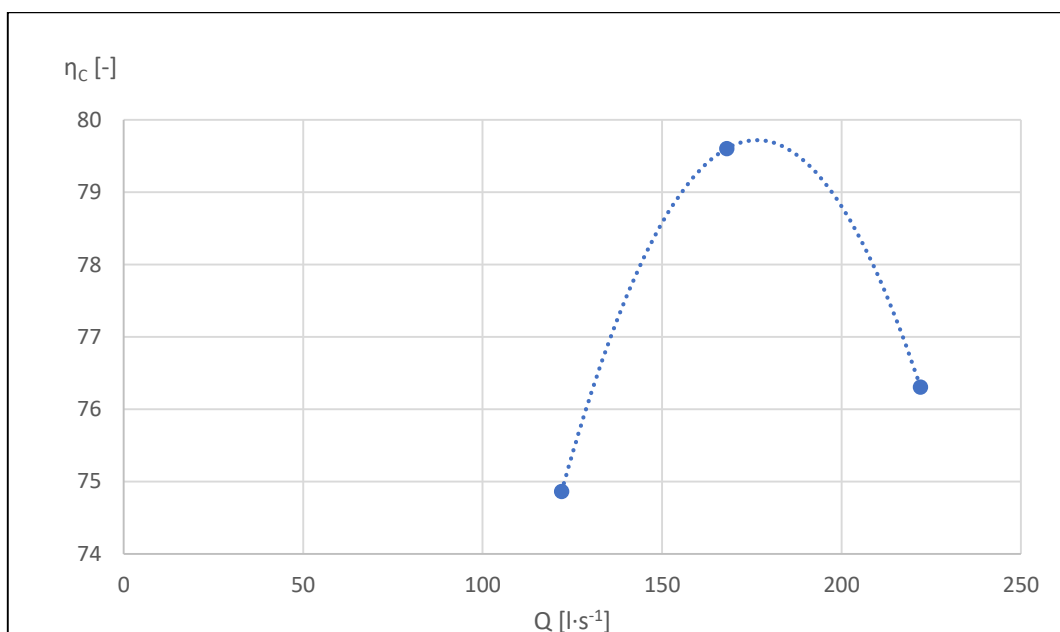
Pro posouzení současného stavu lze využít naměřené hodnoty závislosti $Q-H$, ze kterých lze určit reálnou účinnost po 18 letech provozu (uvedena do provozu 2003). Hodnoty poskytnuté SČVK a. s. jsou uvedeny v tabulce 3-2. Účinnost je ovlivněna jednak vlastnostmi turbíny a také počtem dýz, které jsou používány k pohánění oběžného kola. Závislost účinnosti na průtoku je charakteristická pro dané řešení turbíny, a zpravidla má tato funkce parabolický průběh s maximem pro průtok, který je přibližně o 10 % nižší než je průtok jmenovitý (kvůli ztrátám

účinnosti v objemu)¹. Regresí (např. pomocí metody nejmenších čtverců) z uvedených dat lze získat rovnici, která popisuje vztah účinnosti a průtoku. Toho lze využít pro přesnější určení energie, kterou turbína vyrobí. Bude toho využito pro posuzování různých variant rekonstrukce.

Tab. 3-2: Q-H měření a určená účinnost turbíny

Q (l · s ⁻¹)	H (m)	P (kW)	P _{teoretický} (kW)	η (%)
122	69,2	62	82,82	74,86
168	68,6	90	113,06	79,60
222	68,0	113	148,09	76,30
252	67,5	130	166,87	77,91
299	66,5	147	195,06	75,36

Vzhledem k rozsahu očekávaných průtoků turbínou budou po konzultaci se zadavatelem pro regresi použity pouze hodnoty pro průtoky 122 l · s⁻¹ až 222 l · s⁻¹. Data budou proložena polynomem 2. stupně, který tuto závislost přibližně charakterizuje po určitém zjednodušení². Tato závislost účinnosti na průtoku pro původní stav je zobrazena na obrázku 3-2. Bude použita pro výpočet energie, kterou lze s pomocí turbíny získat.



Obr. 3-2: Regrese závislosti účinnosti na průtoku pro původní stav

K poměrům v objektu je vhodné zmínit, že spád není konstantní, jak je také patrné z tabulky 3-2. To je důsledkem určité závislosti spádu na průtoku a také důsledkem různých míst odběru (dle kvality vody v různé výšce v nádrži, která turbínu napájí). Dle konzultace

¹ BEDNÁŘ, J., 2013. *Turbíny. (malé vodní elektrárny)*. Českovice: Marcela Bednářová. ISBN 978-80-905437-0-6. Str. č. 164-165

² BEDNÁŘ, J., 2013. *Turbíny. (malé vodní elektrárny)*. Českovice: Marcela Bednářová. ISBN 978-80-905437-0-6. Str. č. 164

s provozovatelem turbíny je možné proměnlivý spád vyjádřit jako lineární závislost spádu na průtoku na základě bodů z tabulky 3-2. Podrobněji to bude rozebráno v části 5.1.1, ve které budou bilancovány jednotlivé varianty rekonstrukce vůči současnému stavu.

Tato turbína dimenzována na vyšší průtoky, než jsou potřebné pro napájení úpravy vody. Z toho vyplývá ne zcela efektivní provoz. Dle poptávky SČVK a. s. musí být nová turbína navržena na vhodnější rozsah průtoků a dále musí dojít k modernizaci celého zařízení, včetně ovládání a nové elektrické výbavy v podobě nové rozvodné skříně, která je nutná dle vyjádření zadavatele kvůli snížené spolehlivosti současného vybavení.

Součástí modernizace je také generátor, na který je turbína napojena. V současné době se jedná o třífázový synchronní generátor se jmenovitým zdánlivým výkonem 210 kVA od firmy Siemens AG pracující s otáčkami $750 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$, se jmenovitým napětím 400 V a jmenovitým proudem 303 A, navržený pro účinník 0,8 a budící napětí 51 V a budící proud 3,9 A. Izolační třída je H/F (tj. teplota vinutí max. $180 \text{ }^\circ\text{C}$, resp. $155 \text{ }^\circ\text{C}$, pro dostatečnou rezervu přetížení).



Obr. 3-3: Současný stav – turbína a generátor

3.1.2 Požadavky a návrh

Navržené řešení musí zejména splňovat požadavky na průtok a mělo by fungovat optimálně při nejčastěji očekávaném průtoku $160 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1}$. Spádové poměry zůstávají stejné jako v původním zařízení, pro volbu turbíny budeme uvažovat ekvivalentní hodnotu. Teoretický výkon, který bude možné získat při nejčastěji očekávaném průtoku a průměrném spádu (z analyzovaných dat, viz příloha D.4), vypočteme ve vztahu 3-2 (dle rovnice 2-2 s teoretickou účinností rovnou 1):

$$P_{teor} = Q \cdot H \cdot g \cdot \rho \rightarrow P = 0,160 \cdot 68,73 \cdot 9,81 \cdot 1000 \doteq 107,9 \quad (\text{kW}) \quad (3-2)$$

kde:

P_{teor} teoreticky získatelný výkon (W)

ρ hustota vody ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)

Q průměrný objemový průtok vody ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)

H užitý spád (m)

g tíhové zrychlení ($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)

Při výběru turbíny je potřeba vzít v potaz i maximální možný průtok, na který musí být turbína uzpůsobena. Tento průtok bude udávat maximální možný teoretický výkon, který je vypočten v rovnici 3-3.

$$P_{max} = Q_{max} \cdot H_{max} \cdot g \cdot \rho \rightarrow P_{max} = 0,210 \cdot 71,10 \cdot 9,81 \cdot 1000 \doteq 146,5 \quad (\text{kW}) \quad (3-3)$$

kde platí výše uvedené a dále:

P_{max} max. možný teoreticky získatelný výkon (W)

Q_{max} max. očekávatelný objem. průtok dle poptávky – příloha B.1 ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)

H_{max} max. očekávatelný užitný spád dle zpracování dat – příloha D.4 (m)

Na základě znalosti spádových a průtokových poměrů lze dle kapitoly 2 (např. obrázek 2-4) usuzovat, že může být využita Peltonova nebo Francisova turbína.

V současné době je MVE uzpůsobena použití vertikální Peltonovy turbíny. V rámci přestavby by bylo možné použít Francisovu turbínu, ale pouze pokud by splňovala podmínky na regulaci, což by vyžadovalo instalaci rozvaděče s natáčivými lopatkami pro regulaci průtoku turbínou.

V případě použití Peltonovy turbíny je regulace možná s využitím jedné nebo více dýz (v současném stavu jsou použity 4 dýzy). V rámci rekonstrukce lze také využít stávající potrubní systém bez větších úprav. V současnosti voda z turbíny odpadá na volnou hladinu, což rovnotlaká

turbína umožňuje. Přetlaková turbína by vyžadovala úpravu odpadu, což by navýšilo cenu investice.

Vzhledem k výše uvedenému by bylo vhodné zvolit Peltonovu turbínu. S ohledem na to, že s dalšími prvky rekonstrukce a ovládání se jedná o poměrně velký projekt, provádí návrh turbíny do většího detailu dodavatel.

Volba a požadavky generátoru jsou dány výkonem, který je k dispozici na základě průtoků. Tento generátor by měl mít jmenovitý výkon alespoň 110 kW, který odpovídá nejčastějšímu zatížení turbíny. V tomto případě ale musí mít generátor dostatečnou přetížitelnost, aby mohla turbína bez problémů fungovat i pro maximální průtok. Na základě tohoto faktu by bylo lepší volit generátor s vyšším jmenovitým výkonem (140 kW).

V současnosti je instalován synchronní generátor, který je připojen na hřídel turbíny bez převodové skříně. Díky tomu nedochází ke vzniku ztrát, avšak konstrukce stroje musí být uzpůsobena daným otáčkám turbíny. Využití asynchronního generátoru by mohlo být prospěšné díky možnosti využít levnějších standardních řad generátorů (asynchronní generátory mají zpravidla nižší investiční náklady). Toto řešení by však vyžadovalo kompenzaci jalového výkonu, který asynchronní generátor odebírá ze sítě, a dále zohlednění špičkových fázovacích proudů, které vznikají při připojení generátoru (viz část 2.4.1). Řešením by mohlo být použití frekvenčního měniče, což by však mohlo vést k zanášení sítě neharmonickými signály (vliv tzv. vyšších harmonických). Dále je očekáván požadavek na dispečerské řízení U/Q (řízení napětí a jalového výkonu), který může synchronní generátor dobře zastávat pomocí regulace účinníku změnou budícího proudu.

Vzhledem k tomu, že tato MVE pracuje téměř nepřetržitě a není u ní zapotřebí regulovat otáčky, synchronní motor je vhodnější. a proto byl jmenován jako požadavek v rámci poptávky SČVK a. s. na rekonstrukci.

Další body detailnějšího návrhu využijí dvou anonymizovaných nabídek od dodavatelů (dodavatel I a dodavatel II), přičemž dodavatel I nabízí dvě varianty řešení (dále varianty 1 a 2) rekonstrukce a dodavatel II nabízí jednu variantu (dále varianta 3). Vhodnost těchto variant bude shrnuta ve zbytku této kapitoly (části 3.2 až 3.4).

3.2 Varianta 1 dle dodavatele I

3.2.1 Technické parametry varianty 1

Varianta 1 dodavatele I (nabídka je uvedena v příloze C.1) zahrnuje zcela novou vertikální Peltonovu turbínu doplněnou o nový synchronní generátor spolu s dodávkou požadovaných řídicích systémů, rozvaděče, transformátoru a měřících zařízení, včetně záložního zdroje napětí pro ovládání ventilů a všech sad kabelů. Součástí nabídky je také dodání uzavírací klapky na turbíně s označením DN400 PN16 a nový regulační ventil DN400 PN16.

Parametry nově dodané turbíny jsou uvedeny v tabulce 3-3.

Tab. 3-3: Parametry nové turbíny pro variantu 1

Parametr	Hodnota
Rozsah spádů [m]	66,5 až 69,2
Rozsah průtoků [$l \cdot s^{-1}$]	122,0 až 250,0
Jmenovitý výkon P [kW]	140
Jmenovité otáčky n [$ot \cdot min^{-1}$]	750
Průběžné otáčky n_{max} [$ot \cdot min^{-1}$]	1153
Počet dýz [-]	4
Průměr oběžného kola [mm]	440

Nabízený synchronní generátor má parametry uvedené v tabulce 3-4. Je vybaven pro potřeby měření a kontroly provozu odporovými snímači teploty pro kontrolu teploty ložisek a vinutí. Součástí je také snímač otáček a regulátor BASLER DECS150 5NS2V s ochranným proudovým redukčním modulem ICRM 7.

Tab. 3-4: Parametry synchronního generátoru dodavatele I

Parametr	Hodnota
Jmenovitý výkon P [kW]	148
Jmenovitý zdánlivý výkon S [kVA]	164
Jmenovité napětí U [V]	400
Frekvence [Hz]	50
Jmenovité otáčky n [$ot \cdot min^{-1}$]	750
Průběžné otáčky n_{max} [$ot \cdot min^{-1}$]	1153
Účinník [-]	0,9
Krytí generátoru	IP23

Tento generátor bude využit i v případě rekonstrukce stávající turbíny (varianta 2). Je navržen pro stejné otáčky jako obě turbíny, a tedy může být použit bez převodové skříně. Součástí této nabídky je i dodávka a instalace řízení generátoru, včetně PLC (*Programmable Logic Controller*) a řídicí jednotky obsahující nadproudovou i zkratovou ochranu.

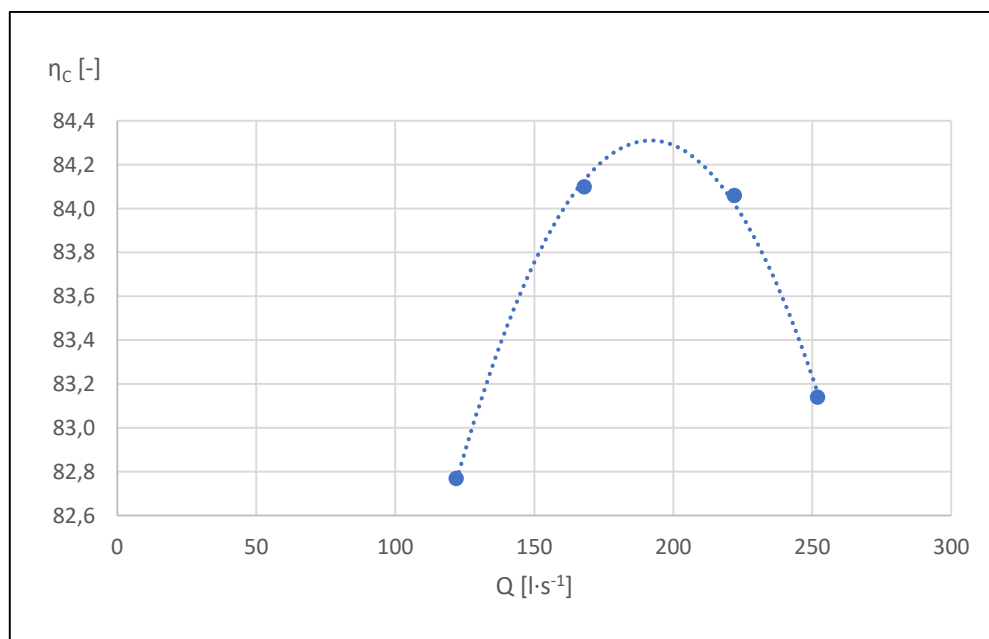
Součástí této varianty je i dodávka ovládání ostatních částí zařízení – tedy pohonů regulujících turbínu (ovládání dýz), pohonů uzavíracích a regulačních klapek na potrubí a dodávka záložního zdroje napětí (záložní napájení má podobu baterie schopné dodat výkon 4 kW se schopností akumulovat náboj 100 Ah).

Tak jako bylo u stávajícího stavu provedeno Q-H měření pro její zhodnocení, byly v případě dodavatele I dodány tabulky garantovaných hodnot pro práci soustrojí pro odhad účinnosti. Tyto hodnoty jsou uvedeny v tabulce 3-5. Uvedená účinnost je celková účinnost soustrojí.

Tab. 3-5: Garantované hodnoty pro variantu 1

Q (l · s ⁻¹)	H (m)	Počet dýz (-)	η (%)	P (kW)
122	69,2	2	82,77	69
168	68,6	3	84,10	95
222	68,0	4	84,06	124
252	67,5	4	83,14	139

V případě tohoto návrhu budeme postupovat pro určení závislosti účinnosti na průtoku obdobně jako pro původní stav (část 3.1.1), tj. regresí polynomem druhého stupně. Vzhledem k tomu, že se jedná o správně dimenzovanou turbínu, můžeme použít všechny 4 hodnoty pro získání závislosti účinnosti na průtoku pro variantu 1 uvedené na obrázku 3-4.



Obr. 3-4: Regrese závislosti účinnosti na průtoku pro variantu 1

Dále je nabízeno ovládání turbíny pomocí panelu operátora TP900 Comfort PN a příprava na dispečerské řízení tak, jak bylo uvedeno v požadavcích (část 3.1.2). Tato nabídka nebyla zahrnuta

do celkové bilance této varianty, vzhledem k tomu, že by se jednalo o doplňkovou službu, která by mohla být využita, ale nejedná se o součást investičních nákladů pro rekonstrukci MVE.

3.2.2 Cenová tabulka varianty 1

V tabulce 3-6 je uvedena cenová bilance investičních nákladů na základě informací z nabídky (položky odpovídají dodávaným součástem zařízení dle části 3.2.1).

Tab. 3-6: Cenová tabulka varianty 1

Položka	Cena bez DPH (Kč)
Projektová dokumentace	150 000,-
Vertikální Peltonova turbína	2 050 000,-
Synchronní generátor	1 144 000,-
Dodávka elektrické výbavy a řídicího systému	738 000,-
Uzavírací klapka a kuželový regulační ventil	590 000,-
Demontáž, instalace, zkoušky a doprava	445 000,-
Celkem	5 117 000,-

3.3 Varianta 2 dle dodavatele I

3.3.1 Technické parametry varianty 2

Druhá varianta dodavatele I (také uvedeno v příloze C.1) zahrnuje rekonstrukci stávající turbíny. Tato turbína byla provozována s průměrnými průtoky až o polovinu nižšími než ty, na které je dimenzována. Je tedy možné, že nedocházelo k takovému opotřebení, jaké by se dalo očekávat. Rozsah opotřebení bude možné stanovit po demontáži turbíny a zhodnocení stavu oběžného kola a dýz.

V případě generální opravy by byly poškozená či opotřebená místa opravena svařováním a broušením do hydraulicky efektivního tvaru. Obdobně by byly vyčištěny a zkontrolovány dýzy a turbína by byla dovybavena obdobně jako v případě varianty 1.

V případě této varianty by byl použit stejný generátor jako v případě varianty 1. Stejně by byla provedena i dodávka nového rozvaděče a ovládacího zařízení (včetně nových servomotorů na ovládání dýz a klapek přívodu vody a regulace průtoku).

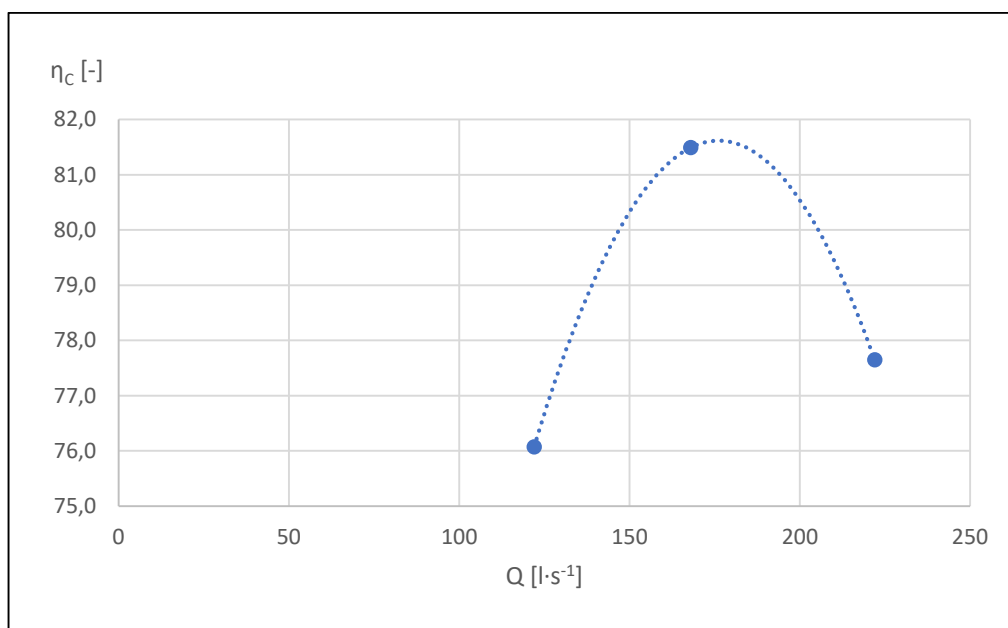
Vzhledem k tomu, že nová turbína tvoří významnou část investičních nákladů, mohla by se rekonstrukce příznivě projevit v ekonomické bilanci. Je však potřeba zohlednit rozdíly v garantovaných hodnotách. Tyto hodnoty jsou uvedeny v tabulce 3-7, obdobně jako pro variantu 1.

Tab. 3-7: Garantované hodnoty pro variantu 2

Q (l · s ⁻¹)	H (m)	Počet dýz (-)	η (%)	P (kW)
122	69,2	3	76,07	63
168	68,6	3	81,49	92
222	68,0	4	77,65	115
252	67,5	5	79,70	133

Ekvivalentně jako pro původní stav můžeme určit i zde závislost účinnosti soustrojí na průtoku. Vzhledem k tomu, že se i v tomto případě jedná o předimenzovanou turbínu, pro výpočet závislosti jsou použity pouze hodnoty od 122 l · s⁻¹ do 222 l · s⁻¹.

Získaná závislost účinnosti na průtoku pro variantu 2 je uvedena na obrázku 3-5.



Obr. 3-5: Regrese závislosti účinnosti na průtoku pro variantu 2

Všechny další součásti odpovídají variantě 1, tedy jak rekonstrukce vodního zařízení (klapky, regulační ventil atd.), tak nové měřicí systémy a rozvaděč.

3.3.2 Cenová tabulka varianty 2

Cenový rozdíl varianty 2 proti variantě 1 je pouze v rozdílu ceny nové Peltonovy turbíny a rekonstrukce stávajícího zařízení. Investiční náklady jsou uvedeny v tabulce 3-8.

Tab. 3-8: Cenová tabulka varianty 2

Položka	Cena bez DPH (Kč)
Generální oprava Peltonovy turbíny	453 000,-
Synchronní generátor	1 144 000,-
Dodávka elektrické výbavy a řídicího systému	738 000,-
Uzavírací klapka a kuželový regulační ventil	590 000,-
Demontáž, instalace, zkoušky a doprava	445 000,-
Celkem	3 370 000,-

3.4 Varianta 3 dle dodavatele II

3.4.1 Technické parametry varianty 3

Varianta 3 od dodavatele II (uvedeno v příloze C.2) nabízí rekonstrukci s novou Peltonovou turbínou, instalací synchronního generátoru, dodávkou nového rozvaděče, ovládacích a měřících prvků spolu s dodávkou nového regulačního ventilu, uzavírací klapky a dalšího ovládání, tedy v souladu s požadavky poptávky.

Problémem jsou hodnoty, pro které je turbína nabízena (uvedeny v tabulce 3-9), které neodpovídají zcela požadovanému rozsahu a vyhovují pouze průměrným očekávaným hodnotám.

Tab. 3-9: Štítkové údaje nové turbíny pro variantu 3

Parametr	Hodnota
Rozsah spádů [m]	66 až 69
Rozsah průtoků [$l \cdot s^{-1}$]	80 až 200
Jmenovitý výkon P [kW]	119
Jmenovité otáčky n [$ot \cdot min^{-1}$]	600
Průběžné otáčky n_{max} [$ot \cdot min^{-1}$]	1050
Počet dýz [-]	2
Průměr oběžného kola [mm]	550

Dále je nabízen synchronní generátor se společnou hřídelí a stejnými jmenovitými otáčkami, s jakými je navrhována turbína. Tento generátor je vybaven snímači teploty vinutí, teploty ložisek a otáček, které budou připojeny k dodávanému řídicímu systému. Generátor je chráněn proti nadproudu a zkratu. Parametry generátoru jsou uvedeny v tabulce 3-10.

Součástí řídicího systému je také rozvaděč s plně automatickým provozem. Tato nabídka je stručnější, co se týče nabízeného rozsahu, a tedy by bylo nutné některé detaily dojednat v rámci přípravy projektu. Lze však očekávat splnění rozsahu poptávky a požadavků tak, jak jsou uvedeny v části 3.1.2.

Tab. 3-10: Štítkové údaje synchronního generátoru dodavatele II

Parametr	Hodnota
Jmenovitý výkon P [kW]	120
Jmenovitý zdánlivý výkon S [kVA]	126
Jmenovité napětí U[V]	400 V
Frekvence [Hz]	50
Jmenovité otáčky n [ot·min ⁻¹]	60
Průběžné otáčky n _{max} [ot·min ⁻¹]	1050
Účinník [-]	0,95
Krytí generátoru	IP23

Pro tuto variantu není poskytnuta plná tabulka garantovaných hodnot, ale pouze hodnoty účinnosti soustrojí pro průměrnou hodnotu průtoků. Dále je uvedena také hodnota průtoků a účinnosti soustrojí pro hodnotu maximálního výkonu. Tento nedostatek v zadání můžeme doplnit vhodným výpočtem.

Pokud je hodnota maximální účinnosti brána jako lokální maximum závislosti účinnosti na průtoku, lze ze znalosti jednoho dalšího bodu (hodnoty účinnosti pro maximální výkon) dopočítat celkovou závislost účinnosti vyřešením několika rovnic, jak bude uvedeno dále.

Tab. 3-11: Garantované hodnoty pro variantu 3

Typ hodnoty	Q (l · s ⁻¹)	η (%)	P (kW)
Maximální účinnost	160	83,22	91,96
Maximální výkon	200	82,19	119,00

Řešení je založeno na předpokladu, že v blízkosti maxima závislosti účinnosti na průtoku lze tuto závislost nahradit polynomem druhého stupně s předpisem uvedeným v rovnici 3-4. S ohledem na to, že se jedná o matematický rozbor dat, zde fyzikální jednotky nedávají velký význam, a proto je použito hranatých závorek ve smyslu hodnoty dané veličiny.

$$[\eta_c] = A \cdot [Q]^2 + B \cdot [Q] + C \quad (3-4)$$

kde:

A, B, C Parametry polynomu

η_c Celková účinnost jako funkce průtoku (%)

Q Průtok jako proměnná veličina ($l \cdot s^{-1}$)

Pro hodnotu maximální účinnosti má tato funkce extrém, tedy její první derivace v tom bodě je rovná nule (rovnice 3-5). Díky tomu lze určit vztah dvou konstant polynomu (A a B), které jsou stejné i po derivaci. Následně můžeme ze vztahu 3-4 dosazením obou známých bodů určit hodnotu všech konstant polynomu, a tedy i předpis hledané funkce. Tento postup je popsán následujícími rovnicemi.

$$\frac{d[\eta_c]}{d[Q]} = 2A \cdot [Q] + B = 0 \quad (3-5)$$

Po dosazení průtoku v bodě maximální účinnosti:

$$2A \cdot 160 + B = 0 \quad (3-6)$$

Vztah 3-6 můžeme upravit na vztah 3-7.

$$B = -320 \cdot A \quad (3-7)$$

Dosazením vztahu 3-7 do 3-6 získáme rovnici 3-8.

$$[\eta_c] = A \cdot [Q]^2 - 320A \cdot [Q] + C \quad (3-8)$$

Dosazením bodu maximální účinnosti a bodu maximálního výkonu a vyřešením výsledných dvou rovnic, lze získat hodnotu pro body A a C. Dosazení bodu maximální účinnosti do rov. 3-7 je popsáno vztahem 3-8 (Tento vztah je poté i upraven pro vyjádření C na vztah 3-9).

$$83,215 = A \cdot 160^2 - 320A \cdot 160 + C \quad (3-9)$$

$$83,215 = -25600A + C \quad (3-10)$$

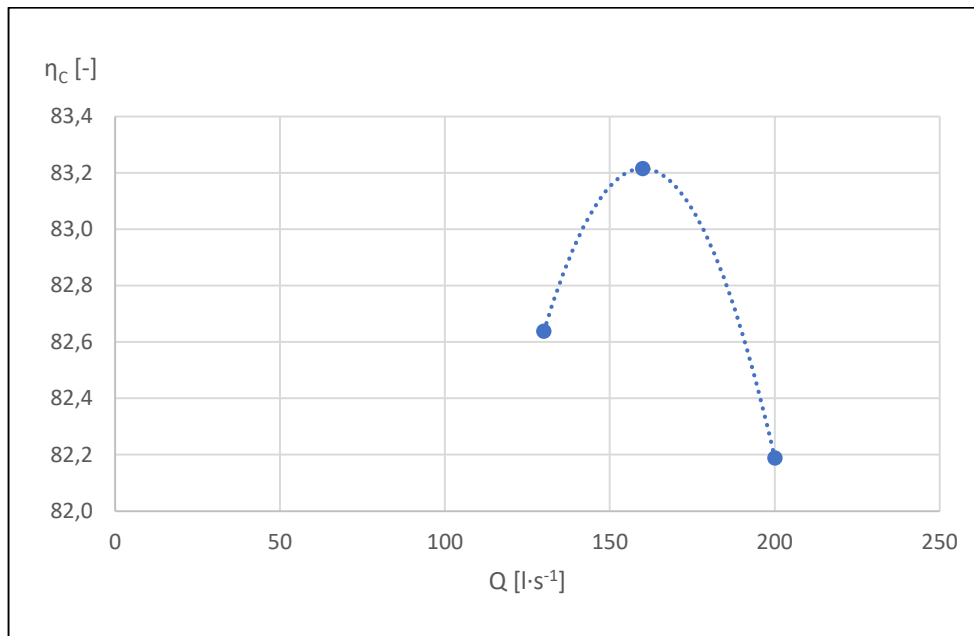
Pokud tedy dosadíme vztah 3-9 do 3-7, můžeme pomocí bodu nejvyššího výkonu určit hledanou hodnotu parametru A. Toto je popsáno vztahy 3-10 a 3-11.

$$[\eta_c] = A \cdot [Q]^2 - 320A \cdot [Q] + 83,215 + 25600A \quad (3-10)$$

$$82,188 = A \cdot 200^2 - 320A \cdot 200 + 83,215 + 25600A \quad (3-11)$$

Vyřešením lze získat hodnotu $A \doteq -0,000642$. Ze vztahu 3-9 lze dopočítat hodnotu $C \doteq 66,783$. Ekvivalentně lze dopočítat z 3-6 hodnotu parametru $B \doteq 0,2054$. Se znalostí těchto parametrů lze sestavit závislost účinnosti na průtoku (např. pro bod $Q = 130 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1}$).

Výsledná závislost účinnosti na průtoku pro variantu 3 je uvedena na obrázku 3-6.



Obr. 3-6: Odhad závislosti účinnosti na průtoku pro variantu 3

3.4.2 Cenová tabulka varianty 3

V tabulce 3-12 jsou uvedeny ceny nabízené pro variantu 3, tak jak jsou popsány v nabídce dodavatele II (příloha C.2).

Tab. 3-12: Cenová tabulka varianty 3

Položka	Cena bez DPH (Kč)
Projekt	80 000,-
Peltonova turbína	1 087 000,-
Synchronní generátor	1 328 000,-
Dodávka elektrické výbavy	448 000,-
Řídicí systém	278 000,-
Ovládací řídicí jednotka (RTU)	130 000,-
Další položky (regulační ventil, klapky atd.)	871 000,-
Celkem	4 222 000,-

KAPITOLA 4: PROVOZ VODNÍ ELEKTRÁRNY, KTERÁ BYLA NAVRŽENA PODLE VARIANT 1 AŽ 3

4.1 Provoz, údržba, obsluha a mimořádné provozní stavy

4.1.1 Provoz a údržba

Provoz navrženého řešení by měl být realizován tak, aby byl zcela automatizovaný a vyžadoval jen nutnou občasnou údržbu bez aktivní každodenní obsluhy. Důvodem je fakt, že MVE umístěná u vodárenského objektu v Bedřichově především nesmí bránit hladkému fungování úpravny vody. MVE musí být uzpůsobena k tomu, aby i při výpadku generátoru nebo napájení spotřeby MVE nebyla přerušena dodávka vody a aby spouštění turbíny neovlivnilo průtok potrubím do úpravny.

Z toho důvodu je turbína opatřena obtokovým okruhem, který obsahuje regulační ventil. V tomto obtoku může být dosaženo požadovaných hodnot tlaku vody tak jako v turbíně, i když energie vody je v něm mařena.

Vzhledem k roli MVE zajišťuje dodaný ovládací systém také autonomní provoz s ovládáním z velínu ve vodárenském objektu. Podle požadavků na pitnou vodu je upravován průtok, což vede ke změně dodaného výkonu. Najíždění a vypínání turbíny je automaticky řízeno (viz část 4.1.2).

Z hlediska nákladů na provoz a údržbu pracuje MVE autonomně a většinu času je řízená dálkově. Stálý a z větší části nepřerušovaný provoz potvrzují i data z dispečinku úpravny vod, který MVE řídí. V těchto datech jsou roční provozní hodiny rovny přibližně 8755 (dle přílohy B.2), přičemž průběh provozu byl rozveden v části 3.1.

Z tohoto a z informací od SČVK a. s. vyplývá, že náklady na provoz jsou mizivé. Největším nákladem by byly revize, opravy či rekonstrukce, které se však odvíjí od stavu vybavení MVE a nelze je předem odhadovat.

Objekt MVE byl původně projektován k tomu, aby byl přímo propojen s objektem úpravny vod silovým vedením, u které by napájel její vlastní spotřebu. Při realizaci původního objektu však byla na základě plánovaného provozu koncepce upravena tak, že bylo vedení napojeno na distribuční síť namísto přímého napájení úpravny vod, a energie vyrobená v MVE je prodávána na trhu s elektřinou.

V budoucnu lze očekávat větší fluktuace na trhu s elektrickou energií způsobené plány omezovat „tradiční“ zdroje energie (jako jsou např. tepelné elektrárny využívající uhlí jako palivo) a nahrazovat je bezuhlíkovými zdroji elektrické energie. Výroba energie pomocí některých obnovitelných zdrojů energie (větrné elektrárny, fotovoltaické elektrárny atd.) je závislá na nepředvídatelných dějích jako je počasí, což může způsobovat přebytky a nedostatky energie v průběhu daného období (dne, roku).

Z toho důvodu bude nutné měřit vyrobenou energii i v kratších časových intervalech (v poplávce na rekonstrukci jsou požadovány až 5-minutové intervaly měření) pro situaci, kdy bude podpora OZE vázána na tyto rychlejší změny energetické rovnováhy v soustavě. Navržené řešení by toto rovněž mělo zohledňovat.

Z ekonomického hlediska se toto projevuje formou podpory hodinovými zelenými bonusy. Příklad hodnot této podpory pro rok 2019 je uveden v příloze D.3.

4.1.2 Spouštění a vypínání MVE

Při spouštění turbíny, která pohání synchronní generátor, musí být postupně zvyšován průtok, dokud není dosaženo synchronní rychlosti, při které může být generátor přifázován k vnější síti. Poté dodává generátor energii do sítě.

Během spouštění či vypínání nesmí dojít k přerušení dodávky vody do vodárny, a proto je zároveň se změnou průtoku turbínou měněn i průtok regulačním ventilem. K regulaci dochází primárně pomocí dýz na turbíně. Při spouštění je tedy navyšován průtok turbínou a postupně je snižován průtok regulačním ventilem, přičemž celkový součet vody protékající objektem MVE zůstává stále stejný. To je popsáno vztahem 4-1.

$$Q_{pT} + Q_{pR} = Q_p \quad (l \cdot s^{-1}) \quad (4-1)$$

kde:

Q_p Průtok surové vody požadovaný na vstupu do úpravny vod ($l \cdot s^{-1}$)

Q_{pT} Průtok surové vody turbínou ($l \cdot s^{-1}$)

Q_{pR} Průtok surové vody regulačním ventilem ($l \cdot s^{-1}$)

Vypínání MVE probíhá obdobným způsobem, průtok turbínou je snižován a průtok regulačním ventilem zvyšován.

4.1.3 Mimořádné provozní stavy

Při provozu MVE může dojít k mimořádným provozním stavům, které mohou negativně ovlivnit její provoz. Může se jednat zejména o poruchy a výpadky napětí. Ve všech případech dochází k nebezpečné situaci v turbíně a k neúměrnému namáhání její konstrukce.

V případě výpadku napětí soustrojí není zatíženo a turbína se vlivem proudící vody roztáčí na průběžné otáčky. Turbína není na tento stav stavěna a hrozí její poškození. Zároveň dochází k omezení průtoku. Je proto žádoucí turbínu co nejdříve odstavit.

Z toho důvodu musí být objekt MVE vybaven bateriemi nebo záložním zdrojem (v případě uvedených variant jsou voleny baterie), které umožní v případě výpadku otevření regulačního ventilu (napájí ovládací servomotory a jejich řízení). Díky tomu není dodávka vody přerušena. Poté, co je mimořádná situace vyřešena, může být turbína opět spuštěna.

4.1.4 Doba životnosti a posuzování projektu

V nabídkách rekonstrukce MVE nebyla rozvedena životnost navrhovaných projektů. Zpravidla lze očekávat, že turbína bude provozuschopná v poměrně dlouhém časovém horizontu. Je možné, že dříve bude potřeba jiná úprava nebo rekonstrukce jiné části zařízení.

Pro porovnání variant je vhodné alespoň odhadnout, jakou životnost může mít rekonstruovaný objekt. Na základě literatury¹ pro velké vodní elektrárny lze předpokládat životnost až 50 let v průměru. Ze stejného zdroje lze usuzovat pro menší zdroje, jako je objekt v Bedřichově životnost 10 let a více. Původní MVE fungovala s opravami přes 17 let. U tohoto odhadu bylo pro posouzení zvoleno referenčních 20 let pro dobu hodnocení. Tato doba není přímo životností, ale poslouží pro výpočet ekonomických parametrů pro zhodnocení investice (viz část 5.2.2 a 5.2.3).

Lze předpokládat, že reálná životnost se bude lišit, zejména v případě varianty rekonstrukce stávající turbíny. V tomto případě může být životnost výrazně nižší, což se odvíjí od stavu turbíny po jejím vyřazení a vyšetření. Pokud bude naopak provedena rekonstrukce úplná, lze očekávat, že reálná životnost bude vyšší než výše uvedených 20 let doby užití.

Tyto rozdíly, včetně tohoto odhadu, budou zohledněny při porovnání jednotlivých variant, které bude provedeno v části 5.2.

4.2 Bezpečnost provozu

Při provozu jakéhokoliv elektrotechnického objektu je nutné dodržovat základní požadavky na bezpečnost, které se týkají bezpečného provozu, zabránění vniknutí cizích předmětů a doteku živých částí zařízení. Vzhledem k automatickému provozu MVE je vhodné kontrolovat správnou funkci v pravidelném intervalu.

Mezi provozní procesy, jejichž funkčnost by bylo vhodné z hlediska bezpečnosti kontrolovat, patří zejména zastavení a rozběh turbíny, včetně nouzového zastavení a otevření regulačního ventilu pro nepřerušování dodávky vody do úpravny vod. Zároveň by měla být kontrolována správná funkce elektrického vybavení a měřících přístrojů, aby se snížilo riziko poruchy.

Nad rámec těchto základních omezení je třeba vzít v potaz fungování zařízení, které upravuje pitnou vodu. Z toho důvodu nesmí z navrženého zařízení unikat žádná závadná látka a je třeba zohlednit i veškeré další požadavky, které jsou stanovené vyhláškou č. 409/2005 Sb. o hygienických požadavcích na výrobky přicházející do přímého styku s vodou a na úpravu vody.²

¹ GULLIVER, J. S. a R. E. A. ARNDT, 1991. *Hydropower engineering handbook*. New York: McGraw-Hill. ISBN 0-07-025193-2. Str. č. 9.4

² ČESKO. Vyhláška č. 409/2005 Sb., o hygienických požadavcích na výrobky přicházející do přímého styku s vodou a na úpravu vody se změnami 352/2013 Sb., 339/2015 Sb. In: Sbírká zákonů České republiky. 2005, částka 141, s. 7438-7492. ISSN 1211-1244.

KAPITOLA 5: VYHODNOCENÍ NÁVRHU

5.1 Bilance variant

5.1.1 Získaná energie

Účelem MVE v úpravně vody v Bedřichově je primárně spolehlivě zásobovat úpravnu vody a sekundárně vyrábět energii, která je prodávána do sítě. Proto by měla zvolená varianta především dostatečně splňovat technické požadavky.

Jednotlivé varianty je potřeba primárně posoudit z hlediska splnění poptávky. Tomu bude věnována část 5.2.1. Než budou však zhodnoceny, je nutné bilancovat výrobu, čehož bude využito pro porovnání variant, které požadavky splní (což by mělo platit dle očekávání pro většinu variant). Zhodnocení výroby elektrické energie a ekonomické hledisko bude předmětem části 5.2.3. Ostatní části se budou zabývat nutným základem pro tyto dva rozborů.

Pro bilanci je rozhodující množství energie, které je možné získat v turbíně za dané období, předpokládaná životnost turbíny a investiční náklady. Vzhledem k tomu, že se jedná o návrh MVE ve smyslu rekonstrukce stávajícího zařízení je vhodné bilancovat nejprve dosavadní provoz fungujícího zařízení.

Pro posouzení současného stavu použijeme data z minulého období provozu, tedy hodnoty surového průtoku za každou hodinu provozu, která jsou zaznamenána v příloze B.2. To nám umožňuje určit výkon, se kterým pracovala MVE (dle vztahu 2-2) a můžeme určit energii, která byla dodána do soustavy dle následujícího vztahu:

$$E_r = \int_0^{T_r} P(t) dt \quad (5-1)$$

kde:

E_r Roční vyrobená elektrická energie (kWh)

$P(t)$ Závislost elektrického výkon na čase (kW)

T_r Časový úsek měření, zpravidla rok (hod)

V obecném případě lze převést integraci na sumaci ze souboru zadaného diskretními body (dle vztahu 5-2), které odpovídají měřením pomocí monitoringu MVE. V případě této konkrétní MVE probíhá měření po jedné hodině.

$$E_r = \sum_{i=1}^T (P(t_i) \cdot \tau) \quad (5-2)$$

kde:

$P(t_i)$ Hodnota výkonu změřená v čase i (kW)

τ Časový interval měření, v tomto případě 1 hod

Výpočet celkové hodnoty vyrobené energie byl proveden v MS Excel a je k dispozici v příloze D.4.

Pokud určíme celkovou energii, získáme hodnotu $E_{r0B2} = 753,88$ MWh při průměrném průtoku $159,6 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1}$. Tato hodnota odpovídá přímo datům získaným z měření a není vztažena na odhad funkce účinnosti provedený v části 3.1.1.

Pro posouzení stavu po rekonstrukci můžeme tuto hodnotu použít pro porovnání. Pro další referenci lze využít i hodnoty dodané z dispečinku SČVK a. s. pro roční výrobu získanou průměrem za tři roky 2016 až 2018 včetně (Příloha B.3). K dispozici ale není celý datový soubor, pouze průměrná hodnota $E_{r0B3} = 685,78$ MWh. Tato hodnota je řádově podobná hodnotě vypočtené z přílohy B.2, ale i tak je zde znatelný rozdíl. Vzhledem k tomu, že účelem práce je najít nejlepší variantu, bude pro rozhodování použito hodnot z přílohy B.2, které jsou úplně (tj. hodinové průtoky, nikoliv jen průměrné hodnoty), které mohou být dále analyzovány.

Při rozboru dat z dispečinku (viz příloha D.4) lze dále říct, že MVE pracuje téměř nepřetržitě (přibližně 8755 hodin ročně).

Na základě parametrů variant lze podobným způsobem určit i energii, kterou by za dané modelové období jednoho roku byla schopná získat příslušná varianta. Tyto hodnoty jsou zatíženy chybou (jsou závislé na provozních poměrech v daném roce). Pro účely prostého porovnání vhodnosti variant by měly však být dostačující. Postup je pro všechny tři varianty stejný a je popsán vztahem 5-3, který vychází ze vztahu 2-2.

$$P(t_i) = \rho \cdot g \cdot Q_i \cdot H(Q_i) \cdot \eta(Q_i) \quad (W) \quad (5-3)$$

kde:

$P(t_i)$ Výkon dodávaný soustrojím v daném (i -tém) momentu (W)

ρ Hustota vody ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)

g Tíhové zrychlení ($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)

Q_i Průtok procházející turbínou v daném momentu ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)

$H(Q_i)$ Spád získaný dle dodané Q-H křivky (m)

$\eta(Q_i)$ Účinnost soustrojí v závislosti na průtoku v daném momentu (-)

V tomto vztahu je specifický proměnný spád, který zčásti závisí na průtoku a zčásti je také ovlivňován různými možnostmi odběru vody z různých výšek nádrže (dle její kvality) pro potřeby úpravy vody. Dle instrukcí zadavatele této práce je závislost H na Q brána dle naměřené Q - H křivky (příloha B.4). Pro aproximaci byl použit polynom 1. řádu (viz příloha D.1). Vzhledem k matematické aproximaci z naměřených dat je pro výpočty ze závislostí použito bezrozměrné hodnoty dané veličiny (průtoku).

Pro příklad je uveden výpočet pro 1. variantu pro 29. 10. 2019 v čase 00:05:00 (první hodnota v tabulce, tedy $Q_1 = 151 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1}$, $[Q_1] = 151$).

$$\eta(Q_i) \doteq -0,0003181 \cdot [Q_i]^2 + 0,122046 \cdot [Q_i] + 72,6046 \quad (\%) \quad (5-4)$$

$$H(Q_i) \doteq -0,0148 \cdot [Q_i] + 71,096 \quad (\text{m}) \quad (5-5)$$

Dosažením hodnot Q_1 do 5-4 a 5-5 získáme výsledky uvedené v 5-6 a 5-7.

$$\eta(Q_1) \doteq -0,0003181 \cdot 151^2 + 0,122046 \cdot 151 + 72,6046 \doteq 83,78 \quad (\%) \quad (5-6)$$

$$H(Q_1) \doteq -0,0148 \cdot 151 + 71,096 \doteq 68,86 \quad (\text{m}) \quad (5-7)$$

Výsledků můžeme poté využít dosažením do rovnice 5-3 tak, jak je provedeno ve vztahu 5-8.

$$P(t_1) \doteq 1000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \cdot 0,151 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot 68,86 \text{ m} \cdot \frac{83,78 \%}{100 \%} \doteq 85,46 \text{ kW} \quad (5-8)$$

Tímto způsobem můžeme analyzovat všechna data a použít je pro posouzení jednotlivých variant. Zpracování celého datového souboru je uvedeno v příloze D.4.

Při výpočtu nevyhnutelně dochází k odchylkám od reálných hodnot, které jsou způsobeny mimo jiné aproximacemi funkce účinnosti a nutností dopočtu hodnot spádu. Z toho důvodu je výpočet proveden i pro původní stav.

Výpočetní metodou byla získána hodnota $E_{r0D4} \doteq 744,42 \text{ kWh}$. Tato hodnota neodpovídá naměřené hodnotě o přibližně 9,49 kWh. Toto množství energie odpovídá 1,25 % naměřené hodnoty dle vztahu 5-9. Bylo by vhodné ověřit přesnost použité výpočetní metody i dalšími, přesnějšími způsoby, avšak to není možné vzhledem k nedostatku dat.

$$\varepsilon = \frac{|E_{r0B2} - E_{r0D4}|}{E_{r0B2}} \cdot 100 \% \rightarrow \varepsilon = \frac{|753,88 - 744,42| \text{ kWh}}{753,88 \text{ kWh}} \cdot 100 \% \doteq 1,25 \% \quad (5-9)$$

Rozdíl však není tak velký, aby nebylo možné metodu použít pro výpočet teoretické výroby energie navržených variant. Porovnání těchto variant je dále prováděno ve vztahu k naměřeným hodnotám výchozího stavu.

5.1.2 Výkup energie

Podpora MVE je zakotvena v zákonu č. 165/2012 Sb. ze dne 31. ledna 2012 o podporovaných zdrojích energie a o změně některých zákonů, ve znění pozdějších předpisů,¹ a vztahuje se na MVE formou zaručené výkupní ceny nebo zelených bonusů. Konkrétní výše podpory je uváděna v cenových rozhodnutích Energetického regulačního úřadu (dále také ERÚ).

Dle cenového rozhodnutí ERÚ pro rok 2020² byla výkupní cena elektřiny pro malé vodní elektrárny uvedené do provozu ve stávající lokalitě před rokem 2004 v roce 2020 rovná 2 239 Kč · MWh⁻¹ se zeleným bonusem 1 294 Kč · MWh⁻¹ v jednotarifním pásmu.

Po rekonstrukci bude dle cenového rozhodnutí ERÚ pro rok 2021³ výkupní cena 2 214 Kč · MWh⁻¹ a zelené bonusy 1 372 Kč · MWh⁻¹, avšak vzhledem k tomu, že se jedná o MVE nad 100 kW, má právo využívat pouze hodinové zelené bonusy. Pro rok 2020 tyto bonusy průměrně dosahovaly 1207 Kč · MWh⁻¹ dle informací OTE⁴, což je dopočteno v příloze D.3, která obsahuje i hodnoty hodinových bonusů.

Vlivem většího podílu intermitentních zdrojů elektrické energie (větrné elektrárny, fotovoltaické elektrárny) může docházet k poklesu ceny elektrické energie na denním trhu do záporných hodnot. Výše zmíněné cenové rozhodnutí v takovém případě ustanovuje cenu jako 0 Kč (pokud cena poklesla na 6 hodin a více).

Energie z MVE v úpravně vody v Bedřichově je prodávána společnosti Pražská energetika, a. s. Do současné doby byla výkupní cena smluvena tak, že po zohlednění zeleného bonusu odpovídala zhruba zaručené výkupní ceně zvýšené o přibližně 160 Kč · MWh⁻¹. Lze očekávat, že i s ohledem na hodinové bonusy bude tendence tento stav udržovat. Na základě toho lze stanovit výkupní cenu dosavadní na 2399 Kč · MWh⁻¹ a v budoucnu lze s určitým zjednodušením předpokládat výkupní cenu 2374 Kč · MWh⁻¹.

Zároveň je potřeba vzít v potaz fakt, že vývoj hodnoty zelených bonusů může během životnosti rekonstruované MVE přestat být předvídatelný. K tomuto jevu může dojít vlivem rozšíření dodávky energie z intermitentních zdrojů (větrné elektrárny, fotovoltaické elektrárny atd.). Více byla tato problematika rozvedena v části 4.1.1. Zhodnocení, které bude provedeno v této práci, by bylo vhodné aktualizovat podle vývoje legislativy o podpoře obnovitelných zdrojů a podle vývoje cen zelených bonusů.

¹ ČESKO. Zákon č. 165/2012 Sb. ze dne 31. ledna 2012 o podporovaných zdrojích energie a o změně některých zákonů. In: Sbírka zákonů České republiky. 2012, částka 59. Dostupný také z: <https://www.psp.cz/sqw/sbirka.sqw?cz=165&r=2012>

² ENERGETICKÝ REGULAČNÍ ÚŘAD. *Cenové rozhodnutí ERÚ č. 3/2019 kterým se stanovuje podpora pro podporované zdroje energie: Energetický regulační věstník*. 19. Jihlava: Energetický regulační úřad, 2019.

³ ENERGETICKÝ REGULAČNÍ ÚŘAD. *Cenové rozhodnutí ERÚ č. 7/2020 kterým se stanovuje podpora pro podporované zdroje energie: Energetický regulační věstník*. 19. Jihlava: Energetický regulační úřad, 2021.

⁴ OTE, a. s., webové stránky [online]. [cit. 2021-16-08]. Dostupné z www: <https://www.ote-cr.cz/>

5.1.3 Shrnutí variant z hlediska výroby energie a výnosu

Pro variantu 1 by energie získaná při stejném počtu provozních hodin a stejném průběhu průtoků jako doposud odpovídala přibližně 790,74 MWh. Tato hodnota byla získána s pomocí datového souboru v příloze B.2, jehož zpracování je uvedeno v příloze D.4 (pro svou výpočetní náročnost bylo zpracování vytvořeno v software MS Excel) za použití vztahů, které byly popsány v části 5.1.1.

Ekvivalentně pro variantu 2 je roční energie rovna 761,41 MWh a pro variantu 3 odpovídá 782,65 MWh. V tabulce 5-1 jsou shrnuty investiční náklady určené nabídkami dodavatelů, roční výroba a roční výnos z prodeje elektrické energie, které vychází z výše uvedených dat.

Tab. 5-1: Srovnání variant a současného stavu

	Investiční náklady [Kč]	Průměrný výkon [kW]	Roční výroba [MWh]	Výkupní cena [Kč · MWh ⁻¹]	Roční výnos [Kč]
Stávající	N/A	86,11	753,88	2 399	1 808 558
Varianta 1	5 117 000	90,32	790,74	2 374	1 877 217
Varianta 2	3 370 000	86,97	761,41	2 374	1 807 587
Varianta 3	4 222 000	89,39	782,65	2 374	1 828 011

Jak bylo již zmíněno v části 4.1.1, údržba MVE je vzhledem k hodnotě ročních výnosů mizivá, a navíc lze předpokládat, že bude u všech variant stejná, a tedy nebude mít vliv na porovnávání alternativ rekonstrukce.

5.2 Zhodnocení variant

5.2.1 Provozní a technické zhodnocení

Na základě nabídek a požadavků, které byly shrnuty v kapitole 3, je třeba vybrat variantu, která nejlépe požadavky shrnuje a zároveň vyhovuje provozu, který byl popsán v kapitole 4.

5.2.1.1 Zhodnocení z hlediska parametrů

V tabulce 5-2 je uvedeno shrnutí variant s ohledem na nejpodstatnější technické parametry. Je zde uvedena i pořizovací cena, avšak úplnějšímu ekonomickému rozboru se věnuje část 5.2.3. Hodnoty jsou uvedeny tak, jak byly bilancovány v části 5.1 (tj. průměrné veličiny na základě hodnoty roku běžného provozu, ostatní hodnoty dle garantovaných hodnot dodavatelů). Pro rozsah průtoků stávajícího stavu je použit požadavek poptávky na rekonstrukci.

Tab. 5-2: Srovnání variant a současného stavu

	Rozsah Q [$l \cdot s^{-1}$]	$P_{\text{prům}}$ [kW]	$\eta_{\text{prům}}$ [%]	E_r [MWh]	Cena inv. [Kč]
Stávající	130 až 210	83,27	77,32	729,0	-
Varianta 1	122 až 250	90,32	83,90	790,7	5 117 000
Varianta 2	122 až 250	84,92	80,59	743,5	3 370 000
Varianta 3	80 až 200	89,39	83,05	782,7	4 222 000

Už z této tabulky je viditelný rozdíl ve splnění požadavků. Varianta 3 nespĺňuje požadovaný rozsah průtoků, pouze hodnotu odpovídající průměrnému průtoku. To může být vážný problém s ohledem na důležitost dodávání průtoku do úpravny vody dle požadavků dispečinku. Rozhodnutí závisí na konkrétním řešení zakázky. Pokud je rozsah shora omezen hltností turbíny, není tento návrh zcela vyhovující, protože při překročení hltnosti by část energie musela být mařena v regulačním ventilu.

Z hlediska výkonu (i pokud vezmeme v potaz jmenovité výkony soustrojí uvedené v kapitole 3) jsou návrhy srovnatelné. Rozdíly jsou patrné v účinnosti, kde předpokládaná účinnost pro variantu 2 (oprava turbíny) je nejnižší. Varianty 3 a 1 se liší pouze o 0,85 procentního bodu a lepší posouzení bude možné provést z hlediska ekonomického zhodnocení.

5.2.1.2 Zhodnocení z hlediska dalších požadavků

Mezi další aspekty, které je třeba zhodnotit u jednotlivých variant, jsou další služby a části nabídek, které jsou významné z hlediska specifického určení této MVE.

Varianty 1 a 2 jsou všeobecně obsáhlejší a věnují se více i realizaci ovládání a měření, což je vhodné s ohledem na význam rekonstrukce rozvaděče.

Varianta 3 není rozvedena detailně, ale všechny požadované části jsou nabízeny, ač nejsou známá specifika, např. typ řídicí jednotky a ovládání.

Dále varianta 2 vychází z neznámého stavu turbíny. Je možné předpokládat, že zařízení je v dobrém stavu, ale jedná se pouze o předpoklad. Pokud by při demontáži a technickém nálezu byly objeveny závažné nedostatky, mohla by se rekonstrukce zkomplikovat.

Ve všech variantách je nabízeno požadované zkoušení před uvedením do provozu, v průběhu montáže a při uvádění do provozu, včetně komplexní zkoušky (72 hodin provozu).

Varianta 1 a 2 nabízí detailnější rozbor součástí práce, obsahují ocenění přípravy dispečerského řízení distributora a také stanovují zkušební provoz na dva měsíce. Průběh prací je nastíněn zevrubně, s ohledem na obecnost poptávky.

Varianta 3 nabízí přesnější popis činností, i z hlediska provedení rekonstrukce (např. detaily rekonstrukce obtokového potrubí). Obecně je více rozvedena hydrodynamická problematika rekonstrukce. Tato varianta nezmiňuje zkušební provoz, avšak zmiňuje potřebné zkoušky pro uvedení do provozu včetně komplexní zkoušky po dobu 72 hodin.

Všechny varianty nastiňují délku doby rekonstrukce. Ve všech variantách jsou brány v potaz nároky na nátěry, které přichází do kontaktu s pitnou vodou.

Na základě tohoto zhodnocení lze říct, že varianty jsou z hlediska technických parametrů poměrně blízké. Žádná varianta neobsahuje dost významný nedostatek na to, aby jí bylo vhodné přímo vyřadit z posuzování. Přesto jsou některé rozdílné skutečnosti důležité, zejména nedostatečný rozsah průtoků varianty 3. Při konečném rozhodování toto bude bráno v potaz.

Pro další posuzování variant je potřeba zhodnotit je z finanční stránky a posoudit jejich parametry na základě několika metod, které budou rozebrány v následující části.

5.2.2 Metody ekonomického hodnocení

Pro posouzení ekonomické efektivity investice lze použít kritéria pro hodnocení investic. Budou zde ve zkratce uvedeny některé základní metody, které budou použity pro posuzování investice.

Mezi běžné základní metody pro hodnocení investic patří¹:

- Metoda čisté současné hodnoty (NPV),
- Metoda vnitřního výnosového procenta (IRR),
- Metoda doby splatnosti (resp. reálné doby návratnosti investice, PP).

Pro hodnocení splacení jakékoliv investice je třeba znát její životnost (v případě energetických zařízení zpravidla jednotky až desítky let), peněžní toky (*cashflow*, CF, zde roční bilance provozu) a diskontní sazbu, kterou budeme uvažovat pro zhodnocení časové hodnoty peněz.

¹ Volně dle: RŮČKOVÁ, P. a M. ROUBÍČKOVÁ, 2012. *Finanční management*. Praha: Grada. Finance (Grada). ISBN 978-80-247-4047-8. Str. č. 32-45

5.2.2.1 Metoda čisté současné hodnoty (NPV)

Tato metoda hodnotí investice na základě NPV, kterou získáme jako sumu diskontovaných peněžních toků přes celou dobu životnosti investice (vztah 5-1).

$$NPV = \sum_{t=0}^T CF_t \cdot (1 + r)^{-t} \quad (\text{Kč}) \quad (5-10)$$

kde:

NPV čistá současná hodnota (Kč)

CF_t peněžní tok v roce/období t (Kč)

T životnost (roky, období)

r diskontní sazba (-)

Tato metoda bere v potaz časovou hodnotu peněz, ale není možné jí využít pro porovnávání investic s různými dobami životnosti. Pro posuzování investic s různou dobou životnosti je potřeba využít roční ekvivalentní peněžní tok (RCF), který získáme z NPV pomocí annuity získané na základě životnosti.

Pokud se varianty vylučují, jako v případě tohoto návrhu, volíme investice s vyšší hodnotou NPV (resp. RCF, pokud použito).

5.2.2.2 Metoda vnitřního výnosového procenta (IRR)

Při použití IRR popisujeme varianty pomocí charakteristické výnosové míry, která odpovídá takové výnosové sazbě (tj. diskontu), při které současná hodnota budoucích výnosů pokrývá náklady nutné pro realizaci varianty (vztah 5-3).

$$0 = \sum_{t=0}^T CF_t \cdot (1 + IRR)^{-t} \quad (\text{Kč}) \quad (5-11)$$

kde platí výše uvedené a dále:

IRR vnitřní výnosové procento (-)

Tato metoda rovněž zohledňuje časovou hodnotu peněz, avšak má některé problematické aspekty. Je možné, aby například IRR neexistovalo, a metoda IRR může vstupovat do rozporu s metodou NPV (což je řešitelné například použitím rozdílové investice). Při rozhodování volíme tu variantu, jejíž IRR je větší než určená diskontní míra o co největší rozdíl.

5.2.2.3 Metoda reálné doby návratnosti (PP)

Jako základní ukazatel ekonomické efektivity investice můžeme použít dobu splatnosti, která jednoduše vyjadřuje, jaká doba musí uběhnout, aby výnosy investice splatily investiční výdaje. Tato metoda je poměrně názorná, dobu splatnosti získáme sčítáním peněžních toků, dokud nedosáhnou investičních nákladů (dle vztahu 5-3).

$$N_{\text{inv}} = \sum_{t=0}^{\text{PP}} \text{CF}_t \quad (\text{Kč}) \quad (5-12)$$

kde platí výše uvedené a dále:

N_{inv} investiční náklady varianty (Kč)

PP doba návratnosti (období/roky)

Tato hodnota v základní verzi nezohledňuje časovou hodnotu peněz a nebere v potaz, jaký zisk bude varianta generovat po zbytek své životnosti.

Pro přesnější analýzu, která zohledňuje i časovou hodnotu peněz, se používá diskontovaná doba splatnosti (dle vztahu 5-4).

$$N_{\text{inv}} = \sum_{t=0}^{\text{PP}} \text{CF}_t \cdot (1 + r)^{-t} \quad (\text{Kč}) \quad (5-13)$$

kde platí výše uvedené.

5.2.3 Ekonomické zhodnocení variant

Na základě metod zmíněných v části 5.2.2 lze vypočítat kritéria ekonomického hodnocení a s jejich pomocí porovnat jednotlivé varianty. Pro výpočet těchto kritérií je použita životnost investice (resp. doba užití MVE) 20 let dle části 4.1.4. Použitá hodnota diskontu je 9% na základě doporučení a odborné konzultace s ohledem na obdobné projekty. Výpočet všech hodnot, které jsou uvedeny dále, je proveden v příloze D-2. Hodnoty jsou uváděny v Kč bez DPH.

Finanční toky a bilance jednotlivých variant na základě hodnot z části 5.1 jsou shrnuty v následujících částech pomocí tabulek spolu s vypočtenými hodnotami ekonomických kritérií.

5.2.3.1 Ekonomické zhodnocení varianty 1

V tabulce 5-3 jsou uvedeny finanční toky, jejich současná hodnota (PV) a kumulovaný diskontovaný peněžní tok (dále také DCF) varianty 1, v tabulce 5-4 jsou uvedeny hodnoty NPV, PP a IRR. Hodnoty jsou uvedeny v Kč bez DPH.

Tab. 5-3: Finanční toky a bilance varianty 1

Rok	CF [Kč]	PV [Kč]	Kumulovaný DCF [Kč]
0	-5 117 000	-5 117 000	-5 117 000
1	1 877 217	1 722 217	-3 394 783
2	1 877 217	1 580 016	-1 814 767
3	1 877 217	1 449 556	-365 211
4	1 877 217	1 329 868	964 656
5	1 877 217	1 220 062	2 184 719
6	1 877 217	1 119 323	3 304 042
7	1 877 217	1 026 902	4 330 943
8	1 877 217	942 112	5 273 055
9	1 877 217	864 323	6 137 378
10	1 877 217	792 957	6 930 335
11	1 877 217	727 483	7 657 818
12	1 877 217	667 416	8 325 234
13	1 877 217	612 308	8 937 542
14	1 877 217	561 750	9 499 292
15	1 877 217	515 367	10 014 659
16	1 877 217	472 814	10 487 474
17	1 877 217	433 774	10 921 248
18	1 877 217	397 958	11 319 206
19	1 877 217	365 099	11 684 305
20	1 877 217	334 953	12 019 259

Tab. 5-4: Ekonomická kritéria varianty 1

Kritérium	NPV	IRR	PP
Hodnota	12 019 258 Kč	37 %	3,27 let

5.2.3.2 Ekonomické zhodnocení varianty 2

V tabulce 5-5 jsou uvedeny finanční toky, jejich současná hodnota (PV) a kumulovaný diskontovaný peněžní tok varianty 2, v tabulce 5-6 jsou uvedeny hodnoty NPV, PP a IRR. Hodnoty jsou uvedeny v Kč bez DPH.

Tab. 5-5: Finanční toky a bilance varianty 2

Rok	CF [Kč]	PV [Kč]	Kumulovaný DCF [Kč]
0	-3 370 000	-3 370 000	-3 370 000
1	1 807 587	1 658 337	-1 711 663
2	1 807 587	1 521 410	-190 253
3	1 807 587	1 395 789	1 205 536
4	1 807 587	1 280 540	2 486 077
5	1 807 587	1 174 808	3 660 884
6	1 807 587	1 077 805	4 738 690
7	1 807 587	988 812	5 727 502
8	1 807 587	907 167	6 634 669
9	1 807 587	832 263	7 466 932
10	1 807 587	763 544	8 230 477
11	1 807 587	700 499	8 930 976
12	1 807 587	642 660	9 573 636
13	1 807 587	589 596	10 163 233
14	1 807 587	540 914	10 704 147
15	1 807 587	496 251	11 200 398
16	1 807 587	455 277	11 655 675
17	1 807 587	417 685	12 073 360
18	1 807 587	383 197	12 456 557
19	1 807 587	351 557	12 808 114
20	1 807 587	322 529	13 130 644

Tab. 5-6: Ekonomická kritéria varianty 2

Kritérium	NPV	IRR	PP
Hodnota	13 130 643 Kč	54 %	2,14 let

5.2.3.3 Ekonomické zhodnocení varianty 3

V tabulce 5-7 jsou uvedeny finanční toky, jejich současná hodnota (PV) a kumulovaný diskontovaný peněžní tok varianty 3, v tabulce 5-8 jsou uvedeny hodnoty NPV, PP a IRR. Hodnoty jsou uvedeny v Kč bez DPH.

Tab. 5-7: Finanční toky a bilance varianty 3

Rok	CF [Kč]	PV [Kč]	Kumulovaný DCF [Kč]
0	-4 222 000	-4 222 000	-4 222 000
1	1 858 011	1 704 597	-2 517 403
2	1 858 011	1 563 851	-953 552
3	1 858 011	1 434 725	481 174
4	1 858 011	1 316 262	1 797 435
5	1 858 011	1 207 580	3 005 015
6	1 858 011	1 107 871	4 112 887
7	1 858 011	1 016 396	5 129 282
8	1 858 011	932 473	6 061 755
9	1 858 011	855 480	6 917 235
10	1 858 011	784 844	7 702 079
11	1 858 011	720 040	8 422 120
12	1 858 011	660 587	9 082 707
13	1 858 011	606 044	9 688 751
14	1 858 011	556 003	10 244 754
15	1 858 011	510 095	10 754 849
16	1 858 011	467 977	11 222 825
17	1 858 011	429 337	11 652 162
18	1 858 011	393 887	12 046 049
19	1 858 011	361 364	12 407 413
20	1 858 011	331 527	12 738 939

Tab. 5-8: Ekonomická kritéria varianty 3

Kritérium	NPV	IRR	PP
Hodnota	12 738 939 Kč	44 %	2,66 let

5.2.3.4 Shrnutí výsledků ekonomického zhodnocení

Pro snazší porovnání jednotlivých možností rekonstrukce MVE Bedřichov jsou hodnotící kritéria shrnuta v tabulce 5-9.

Tab. 5-9: Shrnutí ekonomického hodnocení variant

	NPV	IRR	PP
Varianta 1	12 019 258 Kč	37 %	3,27 let
Varianta 2	12 742 946 Kč	52 %	2,19 let
Varianta 3	12 738 939 Kč	44 %	2,66 let

5.3 Výsledek zhodnocení a volba varianty

Volba výsledné varianty závisí jak na ekonomickém zhodnocení v části 5.2.3, tak na technických parametrech a splnění požadavků dle části 5.2.1.

Na základě ekonomických kritérií je nejvhodnější varianta 2, tedy generální oprava turbíny doplněná o dodání nových součástí strojovny, jako je generátor nebo rozvodní skříň. Tato možnost je vhodná i vzhledem k tomu, že turbína je značně předdimenzována, a tedy lze předpokládat, že není tolik opotřebená. Nevýhodou je, že stav turbíny není předem známý a rozsah jejího opotřebenění bude možné určit teprve po jejím odstavení a inspekci. Dobré ekonomické parametry jsou dány poměrně nízkými investičními náklady. Tato varianta má nejvyšší čistou současnou hodnotu, míru návratnosti i diskontovanou dobu návratnosti

Druhá nejlepší podle ekonomických kritérií je varianta 3, tedy dodání nové turbíny a vybavení MVE dle dodavatele II. Avšak tato varianta není doplněna dostatečnou dokumentací, ze které by bylo jisté splnění technických požadavků. Navíc pro určení výroby energie bylo nutné některé parametry odhadnout a dopočítat, což snižuje výpovědní hodnotu analýzy této varianty. I navzdory tomu může být tato varianta zvažována po další komunikaci s dodavatelem II.

Varianta 1 je zatížena nejméně příznivými hodnotami ekonomických kritérií, což je dáno vysokou cenou nové turbíny, která je dodána ke zbytku nutné rekonstrukce. Avšak hodnoty kritérií NPV a diskontované PP nejsou příliš vzdálené ostatním variantám. Technickými parametry a úplností dodaných informací pak tato varianta dosahuje nejlepší výsledků.

Na základě informací popsaných v odstavcích výše doporučuji variantu 2, pokud budou dořešeny detaily inspekce a generální opravy turbíny. Jako druhou nejvhodnější považuji variantu 1, s ohledem na vysokou efektivitu a jistotu provedení. Variantu 3 doporučuji pouze po doplnění informací u dodavatele II, jejich vyhodnocení a uspokojivých výsledcích.

ZÁVĚR

Práce zpracovala nutnou teorii a na jejím základě posoudila možnosti pro rekonstrukci MVE Bedřichov. Na základě všech faktorů byla doporučena varianta č. 2, tak jak je popsána v textu práce, avšak vždy je třeba zohlednit souvislosti a adaptivně se rozhodnout na základě dalších informací.

Pro porovnání byly využity hodnoty hodinových průtoků za období od 29. 10 2019 do 29. 10. 2020, pro které byly přepočteny hodnoty vyrobené energie na základě nabídnutých řešení. Toto zjednodušení umožnilo porovnat jednotlivé možnosti, ač získané hodnoty nebudou přesně odpovídat reálným měřením v dalších letech vzhledem k proměnlivosti provozu. Oproti jiným obnovitelným zdrojům energie by však výroba v tomto typu objektu měla být dostatečně stálá, aby byly získané hodnoty pro rozhodování dostatečně přesné.

V průběhu vypracování se objevilo několik problémů, které bylo třeba překonat. Zejména se jednalo o problémy s analýzou některých částí variant, které neobsahovaly dostatečné informace. Tento problém byl řešen doplněním dat pomocí odborné konzultace, využitím výpočtů a vhodného odhadu na základě dostupné literatury.

Další komplikaci způsobil pandemický stav v průběhu vypracování, který omezil možnosti návštěv (zejména v objektu úpravny vod). Bylo možné realizovat prohlídku objektu elektrárny, která umožnila lépe porozumět současnému stavu a problémům, které je potřeba řešit (např. z hlediska ovládání a řízení MVE).

Navzdory obtížím bylo možné vypracovat celkové zhodnocení, tedy obecnou charakteristiku, návrh řešení, posouzení provozního režimu a ekonomicko-technické vyhodnocení. Bylo zvoleno řešení generální opravy současné Peltonovy turbíny, která je v dobrém stavu, s dodáním nového synchronního generátoru se jmenovitým zdánlivým výkonem 164 kVA, s celkovým investičním nákladem 3 370 000,- Kč bez DPH.

Práce bude poskytnuta SČVK, a. s. pro rozhodovací proces řešení rekonstrukce, a tedy nalezne reálné uplatnění, přičemž v budoucnu může být podkladem pro obdobné návrhy. Dalším navázáním na tuto práci může být rozšiřování zpracování problematiky využití vodní energie ve vodárenství v ČR.

Výsledek práce může být omezen zkušenostmi autora, avšak výrazně přispěl k jejich rozšíření.

LITERATURA

- [1] BEDNÁŘ, J., 2013. *Turbíny: (malé vodní elektrárny)*. Českovice: Marcela Bednářová. ISBN 978-80-905437-0-6.
- [2] COUTO, Thiago BA a Julian D OLDEN. Global proliferation of small hydropower plants - science and policy. *Frontiers in Ecology and the Environment* [online]. 2018, **16**(2), 91-100 [cit. 2021-04-07]. ISSN 15409295. Dostupné z: doi:10.1002/fee.1746
- [3] ČESKO. Zákon č. 165 ze dne 31. ledna 2012 o podporovaných zdrojích energie a o změně některých zákonů. In: Sběrka zákonů České republiky. 2012, částka 59. Dostupné také z www: <https://www.psp.cz/sqw/sbirka.sqw?cz=165&r=2012>
- [4] ČESKO. Vyhláška č. 409/2005 Sb., o hygienických požadavcích na výrobky přicházející do přímého styku s vodou a na úpravu vody se změnami 352/2013 Sb., 339/2015 Sb. In: Sběrka zákonů České republiky. 2005, částka 141, s. 7438-7492. ISSN 1211-1244.
- [5] ČEPS, a. s., webové stránky [online]. [cit. 2020-20-12]. Dostupné z www: <https://www.ceps.cz/>
- [6] ČEZ, a. s., webové stránky [online]. [cit. 2020-19-12]. Dostupné z www: <https://www.cezdistribuce.cz/>
- [7] ČSN 75 0120. Vodní hospodářství - Terminologie hydrotechniky. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011. Třídící znak 75 0120.
- [8] DOLEŽAL, J., a kol, 2011. *Jaderné a klasické elektrárny*. Praha: ČVUT, 2011. ISBN 978-80-01-04936-5.
- [9] GABRIEL, P., P. KALANDRA a F. ČIHÁK, 1998. *Malé vodní elektrárny*. Praha: ČVUT. ISBN 80-010-1812-1.
- [10] GOŇO, M., KYNCL, M. a GOŇO, R, 2011. *Provozování malých vodních elektráren ve vodárenství*. Konference Electric Power Engineering 2011. [cit. 2021-15-07]. Dostupné z www: https://www.researchgate.net/publication/302357166_Provozovani_malych_vodnich_elektraren_ve_vodarenstvi
- [11] GULLIVER, J. S. a R. E. A. ARNDT, 1991. *Hydropower engineering handbook*. New York: McGraw-Hill. ISBN 0-07-025193-2
- [12] HALLIDAY, D., R. RESNICK a J. WALKER, 2000. *Fyzika. Vysokoškolská učebnice obecné fyziky*. Vyd. 1. Brno: VUTIUM; Prometheus. Překlady vysokoškolských učebnic. s 1. ISBN 80-214-1869-9
- [13] HODÁK, T. a P. DUŠIČKA, 1998. *Malé vodné elektrárne*. 1. vyd. Bratislava: Jaga. ISBN 80-967676-8-2
- [14] HORNÍK, V., 2010. *Regulace buzení synchronního generátoru*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Vedoucí bakalářské práce Ing. Petr Huták, Ph.D. [cit. 2020-09-12]. Dostupné z www: <https://dspace.vutbr.cz/handle/11012/10806>
- [15] HYDROHROM s. r. o., webové stránky, [online]. [cit. 2021-04-08]. Dostupné z www: <http://hydrohrom.cz/>
- [16] JANČÁLEK, V., 2020. *Návrh malé vodní elektrárny*. Praha: ČVUT, Fakulta strojní. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Tomáš Dlouhý, CSc. [cit. 2020-29-11]. Dostupné z www: <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/90197>
- [17] KORNIÁK, D., 2010. *Potenciál vodní energetiky v ČR - Návrh malé vodní elektrárny*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Vedoucí bakalářské práce Ing. Petr Mastný, Ph.D. [cit. 2020-25-11]. Dostupné z www: <https://dspace.vutbr.cz/xmlui/handle/11012/18654>

- [18] LIPČÁK, O., 2020. *Šablona pro závěrečné práce na katedře elektrických pohonů a trakce*. Praha: ČVUT.
- [19] MAILLER, Benoît, Philippe HELLER a Nicolas CRETENAND, 2011. *Pumped-storage with small hydropower – an option?* Konference SHF, *Pumped-Storage Powerplants*. Lyon. [cit. 2021-18-07]. Dostupné z: <https://infoscience.epfl.ch/record/170415>
- [20] MANZANO-AGUGLIARO, Francisco, Myriam TAHER, Antonio ZAPATA-SIERRA, Adel JUAIDI a Francisco G. MONTOYA. An overview of research and energy evolution for small hydropower in Europe. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. 2017, **75**, 476-489 [cit. 2021-04-07]. ISSN 13640321. Dostupné z: doi:10.1016/j.rser.2016.11.013
- [21] MASTNÝ, P. a kol., 2011. *Obnovitelné zdroje elektrické energie*. Praha: ČVUT. ISBN 978-80-01-04937-2
- [22] MAVEL, a. s., webové stránky [online]. [cit. 2021-04-04]. Dostupné z [www: https://cz.mavel.cz](http://www.https://cz.mavel.cz)
- [23] MELICHAR, J., J. VOJTEK a J. BLÁHA, 1998. *Malé vodní turbíny. Konstrukce a provoz*. 1. vyd. Praha: ČVUT. ISBN 80-01-01808-0
- [24] OKOT, David Kilama. Review of small hydropower technology. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. 2013, **26**, 515-520 [cit. 2021-06-07]. ISSN 13640321. Dostupné z: doi:10.1016/j.rser.2013.05.006
- [25] OTE, a. s., webové stránky [online]. [cit. 2021-16-08]. Dostupné z [www: https://www.ote-cr.cz/](http://www.https://www.ote-cr.cz/)
- [26] PANDEY, B. a A. KARKI, 2017. *Hydroelectric energy. Renewable energy and the environment*. Boca Raton: CRC Press/Taylor & Francis Group. Energy and the environment. ISBN 978-1-4398-1167-2
- [27] PAŽOUT, F., 1987. *Malé vodní elektrárny 1. Ekonomika - předpisy*. 1. vyd. Praha: SNTL.
- [28] RAZAAK, D., 2016. *Studie malé vodní elektrárny*. Praha: ČVUT, Fakulta strojní. Vedoucí diplomové práce Prof. Ing. Jan Melichar, CSc. [cit. 2020-07-11]. Dostupné z [www: https://dspace.cvut.cz/handle/10467/66538](http://www.https://dspace.cvut.cz/handle/10467/66538)
- [29] RŮČKOVÁ, P. a M. ROUBÍČKOVÁ, 2012. *Finanční management*. Praha: Grada. Finance (Grada). ISBN 978-80-247-4047-8.
- [30] SCHESTAG, A., 2014. *Návrh malé vodní elektrárny*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, fakulta elektrotechniky a informatiky. Vedoucí diplomové práce: Doc. Ing. Radomír Goňo, Ph. D. [cit. 2021-02-01]. Dostupné z [www: http://dspace.vsb.cz/handle/10084/106084](http://www.http://dspace.vsb.cz/handle/10084/106084)
- [31] VOITH GmbH & Co. KGaA, webové stránky [online]. [cit. 2021-04-07]. Dostupné z [www: https://voith.com/](http://www.https://voith.com/)
- [32] VOŽENÍLEK, P., V. NOVOTNÝ a P. MINDL, 2011. *Elektromechanické měniče*. 2. vyd. Praha: ČVUT. ISBN 80-01-03137-3
- [33] VYSOUDIL, M., 2009. *Návrh malé vodní elektrárny*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. [cit. 2020-30-10] Vedoucí bakalářské práce: Ing. Martin Belatka. Dostupné z [www: https://dspace.vutbr.cz/xmlui/handle/11012/14994](http://www.https://dspace.vutbr.cz/xmlui/handle/11012/14994)

PŘÍLOHA A: SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

A.1 Seznam symbolů

c ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	rychlost proudění
E ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$)	energie, zde měrná energie turbíny
E_r ($\text{W} \cdot \text{hod}$)	vyrobená energie ročně (resp. za dané období)
E_{r0B2} ($\text{W} \cdot \text{hod}$)	ročně vyrobená energie výchozího stavu v příloze B.2
E_{r0B3} ($\text{W} \cdot \text{hod}$)	ročně vyrobená energie výchozího stavu v příloze B.3
E_{r0D4} ($\text{W} \cdot \text{hod}$)	ročně vyrobená energie výchozího stavu v příloze D.4
f (Hz)	frekvence střídavého elektrického napětí
f_s (Hz)	frekvence elektrické sítě
\mathbf{F} (N)	vektor působící síly
g ($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)	tíhové zrychlení
H (m)	spád
H_{ef} (m)	využitelný (efektivní) spád
$i(t)$ (A)	elektrický proud v závislosti na čase
n (s^{-1})	provozní otáčky (také uváděny v $\text{ot} \cdot \text{min}^{-1}$)
n_q (-)	měrné otáčky turbíny
N (-)	počet závitů vinutí
N_{inv} (Kč)	investiční náklady
p (Pa)	tlak vody
$p(t)$ (W)	elektrický výkon v závislosti na čase
p_{pol} (-)	počet pólových dvojic
P (W)	výkon, zpravidla specifikováno jako výkon instalovaný, jmenovitý apod.
P_{max} (W)	výkon maximální
$P_{teoretický}$ (W)	výkon teoretický
P_o (W)	příkon (výkon vstupní)
Q ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	objemový průtok
Q_{min} ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	objemový průtok minimální
Q_{max} ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	objemový průtok maximální, také hltnost
Q_{ef} ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	využitelný (efektivní) objemový průtok
Q_p ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	požadovaný objemový průtok (na vstup úpravny vody)
Q_{pR} ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	objemový průtok skrz regulační ventil
Q_{pT} ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	objemový průtok skrz turbínu
t (s)	čas

T (s)	životnost, zpravidla uváděna v letech
$u(t)$ (V)	elektrické napětí v závislosti na čase
u_i, U_i (V)	indukované elektrické napětí
r (-)	diskontní sazba
\mathbf{r}_{poi} (m)	polohový vektor
s	označení křivky pro definici mechanické práce
W (J)	mechanická práce
ε (%)	odchylka od reálné hodnoty vyrobené energie způsobená výpočtem
η (-)	účinnost, zpravidla specifikováno jako účinnost turbíny, generátoru apod.
η_h (-)	hydraulická účinnost (pro objekt VE)
η_V (-)	objemová účinnost (pro objekt VE)
ρ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	hustota vody
ψ (Wb)	spřažený magnetický tok
ϕ_m (Wb)	amplituda magnetického toku
ω (s^{-1})	úhlová rychlost rotoru
ω_s (s^{-1})	úhlová rychlost sítě

A.2 Seznam zkratk

DCF	<i>Discounted Cashflow</i> , diskontovaný peněžní tok (vždy za období, často roční)
CF	<i>Cashflow</i> , peněžní tok (vždy za období, často roční)
ERÚ	Energetický regulační úřad
IRR	<i>Internal rate of return</i> , vnitřní návratové procento
MVE	Malá vodní elektrárna
N/A	<i>Not applicable</i> , neaplikovatelné (pro např. určitou položku tabulky)
NPV	<i>Net present value</i> , čistá současná hodnota
OTE, a. s.	Operátor trhu s energiemi, akciová společnost
OZE	Obnovitelné zdroje energie
PLC	<i>Programmable Logic Controller</i> , programovatelný logický automat
PP	<i>Payback period</i> , doba návratnosti
PV	<i>Present value</i> , současná hodnota
SčVK, a. s.	Severočeské vodovody a kanalizace, akciová společnost
SVS, a. s.	Severočeská vodárenská společnost, akciová společnost
VE	Vodní elektrárna

PŘÍLOHA B: VSTUPNÍ DATA – POPTÁVKA

V této příloze jsou uvedena data, která byla poskytnuta od SČVK, a. s. pro vypracování této práce.

B.1 Poptávka rekonstrukce MVE Bedřichov

Poptávka je uvedena na následujících stranách. Tato stránka je dále úmyslně prázdná za účelem jednotného formátu.

Rekonstrukce MVE Bedřichov – poptávka

Severočeské vodovody a kanalizace, a.s., Přítkovská 1689, 415 50 Teplice

REKONSTRUKCE MVE Bedřichov umístěné na úpravně vody Bedřichov

Str. 1

Rekonstrukce MVE Bedřichov – poptávka

Severočeské vodovody a kanalizace, a.s., Přítkovská 1689, 415 50 Teplice

Zadavatel poptávky

Zadavatelem poptávky je společnost Severočeské vodovody a kanalizace, a.s., Přítkovská 1689, 415 50 Teplice, IČO 49099451, DIČ CZ49099451. Společnost je zapsána u krajského soudu v Ústí nad Labem Labem – oddíl B, vložka 465.

Zastupuje: Ing. David Votava, generální ředitel

Kontaktní osoba: Ing. Jiří Koranda, specialista VTZ, email: jiri.koranda@scvk.cz, mobil: 724111956

Bc. Jiří Holata, specialista provozního útvaru e-mail: jiri.holata@scvk.cz, mobil: 724495615

Termín plnění nabídky

Předpokládané termíny plnění zakázky:

Zahájení prací 1.12.2020

Ukončení prací: 31.8.2021

Zkušební provoz: 1.9.2021 do 30.9.2021

Předání zprávy o zkušebním provozu: 30.9.2021

Zpracování nabídky

Každý Dodavatel ponese sám veškeré náklady související se zpracováním nabídky na tuto poptávku. Zadavatel poptávky nebude vázán jakoukoliv odpovědností za tyto náklady bez ohledu na průběh nebo výsledek poptávkového řízení.

Nabídky budou zpracovány pouze v českém jazyce.

Zadavatel poptávky si vyhrazuje právo nevracet nabídky a zrušit poptávku bez uvedení důvodů.

Předmět poptávky

Stávající stav

Stávající parametry MVE jsou popsány v přílohách k poptávce, účinnost, hodinové průtoky a Q-H - UVUPV04001-BEDŘICHOV - 12.11.2019 a popis původní MVE.

Turbína MVE Bedřichov je umístěna v samostatném objektu úpravní vody Bedřichov s vyvedením výkonu přes samostatnou transformační stanici do distribuční soustavy VN. Turbína je nasazena na vodárenském potrubí přívodu vody z přehrady Josefův důl do úpravní vody Bedřichov.. Turbína je ovládána místně nebo dálkově z velína objektu úpravní vody

Str. 2

Rekonstrukce MVE Bedřichov – poptávka

Severočeské vodovody a kanalizace, a.s., Přítkovská 1689, 415 50 Teplice

Bedřichov, nebo centrálního dispečinku. Generátor MVE je připojený a fázovaný na úrovni napětí 400 V.

Při výpadku sítě dochází k odstavení MVE při zachování průtoku vody do úpravný vody. Pro zajištění energie na odstavení MVE při výpadku sítě slouží bateriové zdroje.

V samostatném objektu je na přívodním potrubí rozbočovací objekt, kdy jedna větev vede přes ruční klapku DN400 a elektrickou klapku uzpůsobenou požadavkům turbíny a dále na turbínu. Z turbíny odtéká voda do odpadního válce, z kterého voda odtéká do ÚV, druhý výstup vede přes ruční klapku DN600, kuželový ventil ČKD DN400 a odvodušňovací ventil DN400 do původního potrubí na úpravnu vody.

Nový požadovaný stav

Pro realizaci požadujeme provedení zahrnující celkovou modernizaci a rekonstrukci turbosoustrojí v rozsahu dokumentu „Cenové rozhodnutí ERÚ“ pro rekonstruované MVE. Za takovou rekonstrukci nebo modernizaci zařízení se považuje:

- a) výměna nebo generální oprava turbíny;
- b) výměna nebo převinutí generátoru;
- c) oprava elektročásti spočívající v zabránění působení zpětných vlivů na síť a vyhovující ČSN EN 50160;
- d) výměna regulačních zařízení;
- e) výměna nebo instalace nového automatizovaného systému řízení.

Rekonstrukce nebo modernizace zařízení výroby elektřiny je dokončena provedením všech prací uvedených pod písmeny a) až e), přičemž jednotlivé výrobní technologické celky, kterými je nahrazeno stávající zařízení, nesmí být ke dni ukončení rekonstrukce nebo modernizace starší než 5 let.

Jako hlavní variantu zadavatel požaduje kompletní rekonstrukci – optimalizaci MVE, zadavatel též souhlasí s alternativní variantou, která ale musí též vyhovět výše uvedeným podmínkám. Kompletní rekonstrukcí se myslí všechno nové zařízení, turbína, generátor, rozvaděče s regulačním zařízením a autorem řízení, všechna měřící zařízení sloužící automatickému provozu (čidla průtoku, hladiny, polohy a elektrických veličin dle současných požadavků) a výměna regulačního obtokového ventilu a elektrické klapky před turbínou.

Společnost požaduje v dostatečném předstihu pro jednání s úřady před zahájením realizace zpracovat jednostupňový projekt zahrnující strojní část (turbína+generátor), elektročást, řídicí systém a dále všechny obecné části potřebné pro jednání na úřadech (Průvodní zpráva, situace, harmonogram, konečný postup řešení rekonstrukce, návod na obsluhu a údržbu, apod.) Projekt by měl také obsahovat algoritmus řízení provozu MVE ve vazbě na příslušný objekt a tento algoritmus by měl být zpracován v koncepci nového řídicího systému.. Pro součinnost s distribuční společností bude odpovědný ing. Jiří Koranda, případně příslušný energetik dle pokynu pana Korandy.

Rekonstrukce

- 1) Části zařízení, které přijdou do styku s pitnou vodou, musí vyhovět požadavkům ČSN pro styk zařízení s pitnou vodou.
- 2) Základní obecný princip řízení

Rekonstrukce MVE Bedřichov – poptávka

Severočeské vodovody a kanalizace, a.s., Přítkovská 1689, 415 50 Teplice

- a. Základním principem řízení je řízení přítoku vody do objektu podle požadavku dispečera vodárenského systému. Výkon MVE je odvozen od požadovaného přítoku vody. Pokud je přítok do objektu zastaven, nelze spustit MVE.
- b. Výchozí stav, MVE je odstaveno, průtok je nastaven na požadovanou hodnotu průtoku regulačním ventilem na obtoku MVE. Průtok je nastaven nad minimální hodnotou průtoku pro provoz MVE. Po povelu Zapnout MVE se spustí algoritmus řízení MVE, který provede spuštění turbíny, nafázování generátoru a plynulého převedení požadovaného množství vody z obtoku (obtokový ventil zavírá, MVE otevírá) na průtok vody přes MVE. Při změnách požadovaného průtoku se průtok reguluje otevřením nebo uzavřením MVE, ve standardním provozu turbíny je obtokový ventil uzavřen, pokud se neprovádí spuštění nebo uzavření turbíny. Obtokový ventil je možné za provozu otevřít, pokud je požadovaná hodnota přítoku vody do objektu větší než hltlost turbíny, případně maximální povolený výkon MVE.
- c. Po povelu Vypnout MVE se začne snižovat průtok vody přes MVE plynulým převáděním průtoku vody z MVE na obtok MVE, odfázování generátoru a zastavení turbíny. Všechna voda teče po zastavení zase obtokem MVE – výchozí stav. **Rychlost převedení přítoku vody mezi MVE a obtokem a naopak je dána možností měřících a regulačních algoritmů při zachování požadovaného přítoku vody na objektu.**
- d. Klesne-li však přítok pod zadanou mez (požadavek dispečera, nebo zásah přítokové regulace), kdy výkon generátoru klesne pod hranici min. výkonu, dojde k automatickému odstavení MVE stejně jako při povelu Vypnout MVE. Nové připnutí MVE se neprovádí automaticky. Obsluha (dispečink) musí dálkově nebo místně povolit spuštění MVE, poté co zajistí běžný provoz (přítok) do objektu.
- e. K automatickému odstavení samozřejmě dochází v dalších naléhavých případech, kdy MVE nemůže dodávat elektrickou energii do sítě. Například při poruše MVE, vypnutí sítě apod, Poruchy MVE mohou být dvojího druhu. "Dočasná porucha" - po odeznění poruchy lze MVE dálkově nebo místně spustit, "Trvalá porucha" - k opětovnému spuštění může dojít pouze po kvitaci vážné poruchy tlačítkem na rozvaděči. To znamená, že se musí dostavit obsluha na místo, provést řádnou kontrolu zařízení a kvitací poruchy povolit další provoz MVE. Přesné rozdělení poruch bude navrženo dodavatelem a bude popsáno v návodu na obsluhu a údržbu MVE. Předběžný návrh.
 - i. Dočasné poruchy (odstavení):
 1. Výpadek napětí – spustit 20 minut po obnovení napětí
 2. Podpětí, nadpětí, podfrekvence, nadfrekvence - spustit 20 minut po skončení poruchy
 3. Snižování přítoku vody do objektu tak, že klesne výkon MVE pod minimální hodnotu výkonu
 - ii. Trvalé poruchy (odstavení)
 1. Teplota ložisek, překročení nastavené hodnoty - max. hodnota
 2. Porucha měření průtoku
- f. Napájení řídicího systému je zálohováno z baterie, tak aby se mohly automaticky provést nezbytné úkony pro zajištění provozu objektu a odstavení MVE. Kapacita baterie musí umožnit tři následující výpadky napětí po sobě, při poklesu kapacity baterie, které neumožní bezpečné zastavení, bude

Rekonstrukce MVE Bedřichov – poptávka

Severočeské vodovody a kanalizace, a.s., Přítkovská 1689, 415 50 Teplice

- blokováno spuštění MVE, dokud se baterie nanabije. Při dlouhodobém výpadku napájení se baterie odpojí po převedení průtoku z MVE na obtok a odstavení MVE. Průtok zůstane nastaven na poslední požadovanou hodnotu průtoku .
- g. Dalším požadavkem je, aby se při poruše měření přítoku automaticky nastavil žádaný přítok na nulu **v čase určeném provozem pro maximální předpokládaný průtok**. Uzavírání se provádí podle polohy regulačního prvku (MVE, regulačního ventilu). Tím dojde k automatickému odstavení MVE, nebo uzavření regulačního ventilu obtoku, podle toho, v jaké fázi provozu se objekt nachází.. Je na rozhodnutí obsluhy (dispečink), zda přepne přítokovou regulaci do režimu "regulace polohy", nastaví žádanou polohu RV a bude takto provozovat přítok do objektu obtokovým ventilem do doby opravy průtokoměru.
- h. Za chybu měření přítoku se též považuje následující situace. Na tři po sobě požadované změny průtoku (samostatné regulační zásahy MVE, nebo samostatné regulační zásahy obtokovým ventilem) není odezva v měřené hodnotě průtoku – požadované zásahy řídicího systému v čase větším jak tři regulační algoritmy + 10 s. Tato funkce není funkční při automatické spouštění nebo odstavování MVE. Má se dít za konstantního přítoku do vodojemu. Za chybu měření se též považuje skoková změna přítoku vody do vodojemu o velikosti větší než 30% z požadovaného průtoku.l/s **vody (hodnotu upřesní provoz při realizaci)**.
- i. *Měření - minimálně:*
- i. Měření hladiny v objektu
 - ii. Měření tlaku na přítoku do objektu
 - iii. Měření průtoku na přítoku do objektu
 - iv. Měření polohy regulačního ventilu na obtoku MVE do objektu
 - v. MVE - Elektrické veličiny budou snímány a zpracovány analyzátozem, který podrobně měří elektrické vlastnosti elektrické sítě jako je napětí, proud a výkon ve všech fázích, kmitočet, účinník apod. všechny tyto měřené veličiny budou zobrazeny na panelu přístroje.
 - vi. Měření polohy regulační prvku turbíny
 - vii. Měření otáček turbíny
 - viii. Měření teploty ložisek generátoru a turbíny
- j. Přítoková regulace – pokud existuje
- i. Přítok vody do objektu bude regulován na žádanou hodnotu s modifikací od stavu hladiny. To znamená, že přítok do objektu bude regulován podle požadavku regulační prvku turbíny nebo regulačním ventilem obtoku MVE. V případě, kdy hladina objektu klesne pod zadanou mez, pak se automaticky navýší žádaný přítok podle zadané křivky. Stejně to platí, když hladina překročí horní nastavenou mez, pak se úměrně sníží žádaná hodnota přítoku.
- k. Řídicí zařízení bude propojeno s dispečinkem podle místních podmínek. Na dotaz z dispečinku budou přenášena minimálně následující data:
- i. Stav regulačního ventilu přítoku (na obtoku MVE)
 1. Režim ovládání - místní ovládání/automatické ovládání/dálkové ovládání
 2. Stav RV - otevřeno/zavřeno/mezipoloha/porucha

Rekonstrukce MVE Bedřichov – poptávka

Severočeské vodovody a kanalizace, a.s., Přítkovská 1689, 415 50 Teplice

3. Povel k otevření na požadovanou polohu ventilu při poruše měření průtoku, požadovaná hodnota, skutečná hodnota
 - ii. Stav MVE
 1. Režim ovládání - místní ovládání/automatické ovládání/dálkové ovládání
 2. Povel zapnout MVE
 3. Povel vypnout MVE
 4. Stav MVE - chod MVE/trvalá porucha/přechodná porucha
 5. Stav baterie - porucha
 6. Provozní doba - motohodiny
 - iii. Měření hladiny v objektu, mezní hodnoty, pracovní hodnoty (regulační meze), skutečná hodnota
 - iv. Měření tlaku na přítoku do objektu, skutečná hodnota
 - v. Měření průtoku na přítoku- žádaná hodnota přítoku, skutečná hodnota přítoku, informace o zásahu od hladiny v objektu
 - vi. Měření polohy regulačního ventilu na obtoku MVE, mezní polohy, žádaná poloha, skutečná poloha
 - vii. Měření polohy regulační klapky turbíny, mezní polohy, žádaná poloha, skutečná poloha
 - viii. Měření elektrických veličin, výkon, el.práce, skutečné hodnoty
 - ix. Měření teploty ložisek
 1. Generátor - teplota, skutečné hodnoty
 2. Turbína - teplota, skutečné hodnoty
 - x. Měření otáček turbíny, skutečná hodnota
- 3) Optimalizovat obtokový ventil k současným průtokům, pokud je nutné z hlediska spolupráce s novou turbínou, není nutná optimalizace, odhadem maximální průtok 200% z maximálního průtoku stanoveného dispečinkem, viz níže
 - 4) Dle zákona realizovat měření výroby, vlastní spotřeby MVE a spotřeby objektu v souladu se zákonem a PPDS, měřící elektroměry musí umět komunikovat i při vypnutém stavu MVE, předpokládáme nezávislé napájení, ukládání hodinových údajů s možností měnit na kratší časové úseky, tak jak se bude vyvíjet řízení ČEPS, z hodinových údajů mohou být 5 minutové.
 - 5) Řízení MVE a obtoku realizovat z jednoho automatu a společného rozvaděče, skutečnost se upřesní v projektu dle místních podmínek.
 - 6) Podklady pro optimalizaci MVE na objektech jsou v příloze „Q-H – název objektu“, kde je změřena Q-H křivka a v příloze „Hodinové průtoky-dispečink“, kde jsou průtoky za poslední rok. V dalším období dispečink předpokládá rozsah provozních průtoků od 130 l/s do 210 l/s, nejčastěji 160 l/s, maximální průtok obtokem navrhujeme na dvojnásobek průtoku turbínou, 400 l/s.
 - 7) Předpokládáme požadavek na dispečerské řízení.

Generátor

Požadujeme synchronní generátor - účinnost generátoru minimálně IE3, alternativně požadujeme nabídnout vyšší.

Regulační ventil, klapka

Rekonstrukce MVE Bedřichov – poptávka

Severočeské vodovody a kanalizace, a.s., Přítkovská 1689, 415 50 Teplice

Servopohony - tandemové polohové spínače, mechanický ukazatel polohy, elektronický ukazatel polohy pro 3 nebo 4 vodiče 4-20mA) Zvažte napájení 3x400V, nebo navrhněte vámi preferovanou napětíovou hladinu z hlediska napájení z baterií při výpadku napětí.

Elektročást

Stávající NN rozvaděč vedle turbíny bude demontován a nahrazen novým včetně elektrické výzbroje a řídicího systému. NN rozvaděč u transformátoru vybavit podle podmínek stanovených distribucí. Výzbroj VN částí zůstane zachována. Pro vyvedení výkonu generátoru do stávající distribuční rozvodny budou využity stávající silnoproudé rozvody mezi transformační stanicí a NN rozvaděčem vedle turbíny. Fakturační měření a jeho rozvaděče budou upraveny podle podmínek smlouvy o připojení (měřicí transformátory, jističe).

Nový řídicí systém bude též měřit svorkovou výrobu generátoru za podmínek fakturačního měření, vlastní spotřebu MVE a spotřebu objektu.

Řídicí systém

Řídicí systém regulace a řízení soustrojí zajišťuje minimálně následující funkce :

Procesní funkce :

- bezobslužný provoz s občasným dozorem
- regulace výkonu turbíny podle průtoku, resp. podle požadavků dispečinku
- automatické spuštění, fázování, provoz i odstavení technologie MVE
- regulace $\cos \phi$, případně dalších hodnot dle podmínek připojení výroby
- poruchová automatika
 - (nesymetrie proudu nebo výpadek sítě, při motorickém režimu generátoru, nízké hladině, přetížení nebo přehřátí generátoru, resp. ložisek, vypnutí jističe a dalších nepřípustných provozních stavech zjištěných diagnostickým programem)
- opětovné automatické spuštění po pominutí mimořádných stavů s nastavenou prodlevou zvážit a nabídnout,
- pokud nabídnete automatické spuštění, tak při výpadku sítě je nastavená prodleva 20 minut s možností tuto hodnotu nastavovat
- deník událostí
- diagnostika poruch – nepoužívat sdružené poruchy
- dialogová komunikace s obsluhou pomocí panelu operátora
- komunikace s nadřazeným systémem
- monitorování stavu ochrany sítě a generátoru
- Režimy provozu
 - o ruční režim
 - o režim dálkové automatiky
 - o režim místní automatiky

Na dveřích rozvaděče bude umístěn přepínač režimů.

Ruční režim

Rekonstrukce MVE Bedřichov – poptávka

Severočeské vodovody a kanalizace, a.s., Přítkovská 1689, 415 50 Teplice

je určen pouze pro servisní účely, ne pro trvalý provoz. Ovládání jednotlivých funkcí je realizováno příslušnými ovladači umístěnými na dveřích rozvaděče. Funkce všech ochran a měření je zachována.

Režim dálkové automatiky

je určen pro trvalý provoz technologie MVE. Umožňuje automatické najetí turbíny a fázování generátoru k síti, regulaci požadované hodnoty průtoku, programové, resp. poruchové odstavení technologie MVE.

Povely **START / STOP a požadovaná hodnota průtoku** jsou do PLC zadávány z řídicího systému dispečinku.

Režim místní automatiky

Režim místní automatiky je určen pro trvalý provoz technologie MVE. Umožňuje automatické najetí turbíny a fázování generátoru k síti, regulaci požadované hodnoty průtoku, programové, resp. poruchové odstavení technologie MVE.

Povely **START / STOP a požadovaná hodnota průtoku** jsou do PLC zadávány z ovládacího panelu.

Výchozí podklady pro zpracování nabídky

- 1) Zadání poptávky zpracované firmou Severočeské vodovody a kanalizace, a.s.
- 2) Změřené Q-H křivky, hodinové průtoky za poslední rok
- 3) Sestava stávající MVE – pokud je k dispozici
- 4) Prohlídka lokality – zajistí kontaktní osoba – Jiří Koranda

Nabídka

V nabídce zpracujte následující informace.

- 1) Technickou specifikaci rekonstrukce s rozpadem na jednotlivé funkční celky s popisem funkčnosti zpracujte minimálně v rozpadu
 - a. Projekt
 - b. Turbína
 - c. Generátor
 - d. Elektročást
 - e. Řídicí systém
 - f. Elektrická klapka
 - g. Regulační ventil
 - h. Dispečerské řízení
 - i. Ostatní (potrubí a další)

Jednotlivé body v případě nutnosti popište detailněji. V případě variantního řešení musí být v základním řešení uveden prvotní požadavek.

- 2) Předpokládané náklady rekonstrukce s rozpadem podle technické specifikace.
- 3) Zkoušky a měření (před zahájením rekonstrukce, v průběhu rekonstrukce a zkušebního provozu)
- 4) Průběh zkušebního provozu včetně jeho vyhodnocení formou zprávy
- 5) Časový harmonogram rekonstrukce.
- 6) Garantované hodnoty rekonstruované MVE

Rekonstrukce MVE Bedřichov – poptávka

Severočeské vodovody a kanalizace, a.s., Přítkovská 1689, 415 50 Teplice

- 7) Seznam firem podílejících se na rekonstrukci.
- 8) Navrhovaná záruční doba
- 9) Návrh smlouvy o dílo s podrobnou specifikací předmětu díla a rozpisem ceny a plateb.

Forma a náležitosti nabídky

Originál nabídky musí být napsán nebo vytisknut čitelně, nesmazatelným inkoustem, bez vsuvek mezi řádky, korekcí, výmazů nebo přepisů, kromě oprav chyb, které musí být v takovém případě parafovány.

Jednotlivé listy nabídky musí být vzájemně pevně spojeny, tak aby bylo zamezeno manipulaci s jednotlivými listy nabídky.

Nabídka musí být předložena v neprůhledném a řádně uzavřeném obalu/obálce.

Obálka musí být označena následujícím způsobem v českém jazyce:

- (a) Název „Rekonstrukce MVE BEDŘICHOV - NEOTVÍRAT - NABÍDKA“
- (b) obchodní firma a kontaktní adresa zadavatele
- (c) obchodní firma a adresa dodavatele

Kontaktní adresa zadavatele:

Severočeské vodovody a kanalizace, a.s.
Ing. Jiří Koranda
Přítkovská 1689
415 50 Teplice

Vypracované nabídky, zabalené, označené musí být doručeny na kontaktní adresu nejpozději do **16.10.2020 do 12:00 hodin.**

V Teplících dne 31.8..2020

Ing. Jiří Koranda
specialista VTZ
Severočeské vodovody a kanalizace, a.s.
Přítkovská 1689
415 50 Teplice

Ing. Jiří Digitálně podepsal
Koranda Ing. Jiří Koranda
Datum: 2020.09.03
08:51:40 +02'00'

B.2 Data z dispečinku MVE

Pro analýzu byla použita data poskytnutá z dispečinku MVE, přičemž datový soubor je uveden v neupravené podobě (pouze s doplněnou legendou používaných symbolů) v souboru komprimovaných příloh *soubor_priloh.zip* pod názvem *B2_data_dispecink.xlsx*

B.3 Popis původní MVE

Následující tabulka popisu původního stavu byla přiložena k poptávce. Tato tabulka byla upravena po grafické stránce pro vložení do této práce.

Název	Okres	Vlastník	Typ turbíny	Generátor	Dodavatel	Stávající výkon (kW)	Rok spuštění
MVE Bedřichov	Jablonec nad Nisou	Sčvk	Pelton	synchronní	Hydrohrom	210	2003

Název	Stávající průměr výroby za tři rok (2016-2018) (kWh)	Průměrný roční výkon (kW)	Délka potrubí (m)	Průměr potrubí (mm)	Nadmořská výška (m)	Nadmořská výška MVE (m)	Původní průtoky (l/s)
MVE Bedřichov	685 777	78	2508	DN800	855	732	300

Následující tabulka účinností v původním stavu byla přiložena k poptávce. Tabulka zde uvedená byla upravena po grafické stránce pro vložení do této práce. Značení odpovídá značkám zavedeným v práci. Symbol procenta odpovídá nastavení turbíny.

Q	H (m)	P (kW)	%	$P_{\text{teoretický}}$ (kW)	účinnost (%)	n
122	69,2	62	25	82,82	74,86	750
168	68,6	90	33	113,06	79,60	750
222	68	113	41	148,09	76,30	750
252	67,5	130	49	166,87	77,91	750
299	66,5	147	60	195,06	75,36	750

B.4 Q-H měření a rozbor současného stavu

Provedené Q-H měření, tak jak bylo dodáno spolu s poptávkou rekonstrukce, je uvedeno na následujících stranách. Tato stránka je dále úmyslně prázdná za účelem jednotného formátu.

Zápis z měření Q/H křivky MVE

UVUPV04001-BEDŘICHOV - 12.11.2019

Provedeno :

Měření Q/H křivky MVE

Výsledky :

Q	H (m)	P (kW)	%	n	Q	průtok
122	69,2	62	25	750	H	výška
168	68,6	90	33	750	P	výkon
222	68	113	41	750	%	nastavení turbíny
252	67,5	130	49	750	n	otáčky
299	66,5	147	60	750		

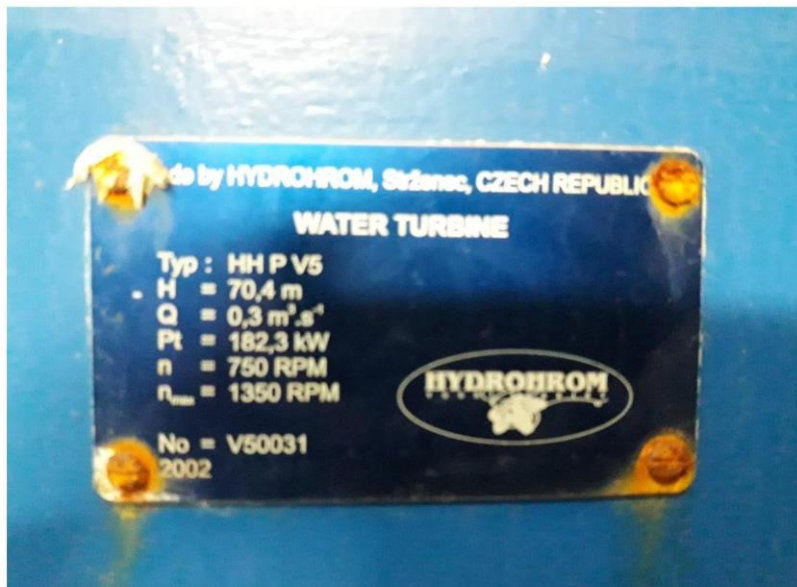
Přílohy :

Fotodokumentace

Měření provedl :

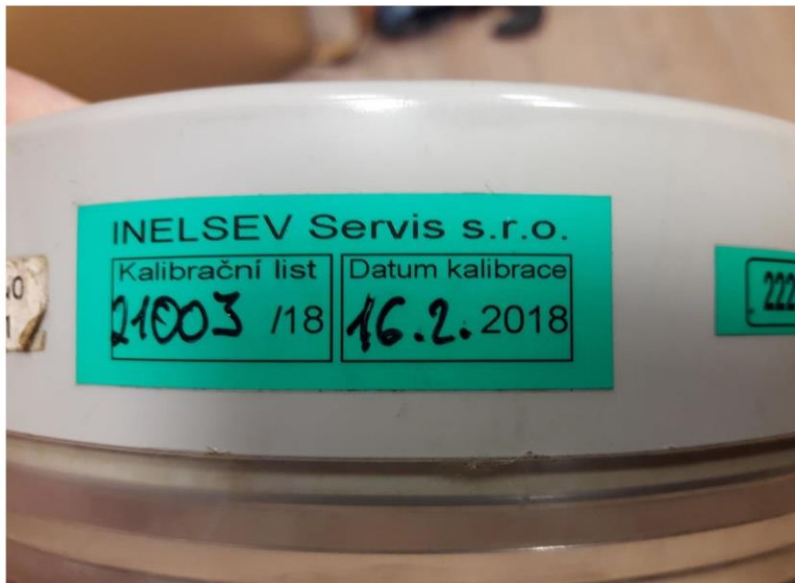
Petr Štěpán

MVE :



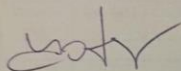


Použité měřidlo :



Kalibrační list č.: 21003 / 18List č.: 1
Počet listů: 2

Datum vystavení: 16.2.2018

**Hotař Karel**
vedoucí AKL

1. *Podatel měřidla:* Severočeské vodovody a kanalizace a.s. Přítkovská 1689, 415 50 Teplice
- 1.1 *Uživatel měřidla:* Severočeské vodovody a kanalizace a.s. Přítkovská 1689, 415 50 Teplice
2. *Měřidlo*
 - 2.1 *Předmět kalibrace:* manometr
 - 2.2 *Výrobce:* Emers
 - 2.3 *Typ:* deformační
 - 2.4 *Výrobní číslo:* EC-025861
 - 2.5 *Měřicí rozsah:* 0 MPa až 1,0 MPa
 - 2.6 *Třída přesnosti:* 1,0
 - 2.7 *Označení:* neuvedeno
 - 2.8 *Zkušební medium:* olej
 - 2.9 *Dělení:* 0,01 MPa
3. *Metoda kalibrace:* kalibrace byla provedena dle směrnice MS 2010
4. *Použití etalony:* závažový tlakoměr **Budenberg 380 CW**, v.č.17900, kalibrační list č: 6013-KL-P0025-P0026-16, navázaný na sek.etalony ČMI
5. *Barometrický tlak:* 99,4 kPa
- 6.1 *Teplota okolí:* (20 ± 2) °C
- 6.2 *Vlhkost okolí:* (40 ± 20) %
7. *Datum přijetí měřidla:* 16.2.2018
8. *Datum kalibrace:* 16.2.2018
9. Uvedená rozšířená nejistota měření je součinem standardní nejistoty měření a koeficientu rozšíření $k=2$, což pro normální rozdělení odpovídá pravděpodobnosti pokrytí cca 95%. Standardní nejistota měření byla určena v souladu s dokumentem EA 4/02.
10. *Výsledky měření:* **Měřidlo v kalibrovaných bodech vyhovuje požadované třídě přesnosti**

Výsledky měření platí pouze pro měřidlo uvedené v kalibračním listu. Kalibrační list může být rozšiřován pouze v omezeném počtu stran a bez změny. Změny a doplňky v kalibračním listu mohou být provedeny pouze laboratoří, která dokument vystavila. Kalibrační list je bez razítka a podpisu neplatný.

B.5 Hodnocení rekonstrukce MVE Bedřichov poskytnuté k práci

V rámci konzultace s panem Ing. Korandou byl poskytnut také soubor zjednodušeného hodnocení nabídek pro doplnění práce, který není součástí poptávky. Soubor obsahuje také třetího dodavatele, který však nebyl v rámci této práce a jejího zadání posuzován a proto byl proškrtnut. Tento soubor je přiložen v souboru komprimovaných příloh *soubor_priloh.zip* pod názvem *B5_zhodnoceni_scvk.xlsx*

PŘÍLOHA C: VSTUPNÍ DATA – ANONYMIZOVANÉ NABÍDKY

C.1 Nabídka dodavatele I

Nabídka je uvedena na následujících stranách. Tato stránka je dále úmyslně prázdná za účelem jednotného formátu.

DODAVATEL 1

REKONSTRUKCE MVE BEDŘICHOV

Technická specifikace

Všeobecné informace

Hranice specifikovaného zařízení

- svorky fyzikálních přístrojů
- spojení zabetonovaných částí se stavbou (volný kotevní materiál – napínáky, ocelové plechy, kotevní desky a kotvy je v rozsahu dodávky)
- příruba na nátoku do okružního potrubí
- příruby na potrubí pro připojení regulačního ventilu
- svorky rozvodny k připojení stávajícího kabelu VN

Použitá napětí

- elektrické motory: 400 V 50 Hz, třífázové, 110 V DC
- ovládací napětí 3x230 V/400 V, 50 Hz, 24 VDC,
- měřicí napětí 100VAC
- ovládání a monitorování: 24 VDC

Normy

Zařízení bude navrženo podle podnikových norem výrobce v souladu s normami ČSN, EN, DIN, IEC a ISO.

Olejové a tukové náplně

Budou dodány potřebné oleje a mazací tuky pro první náplně.

Dílenské zkoušky

Při výrobě zařízení budou provedeny dílenské zkoušky zařízení podle podnikových norem výrobce. Zkoušky budou provedeny pod kontrolou oddělení kvality výrobce. Protokoly a osvědčení o zkouškách budou předány objednateli a archivovány u výrobce.

Nátěry a konzervace

Bude proveden kompletní nátěr včetně vrchní vrstvy u všech částí vyráběných v dílnách výrobce (vyjma těch částí, u kterých bude prováděno dodatečné svařování na stavbě – u takových částí bude proveden pouze základní nátěr). Na stavbě budou provedeny pouze opravy a kompletní nátěry částí po svařování. Všechny nátěry budou provedeny podle nátěrových norem výrobce s ohledem na prostředí.

Plochy pod nátěry otryskat na Sa 2,5

NÁTĚROVÝ SYSTÉM / PAINTING SYSTEM

TYP 49

W PLOCHY VE STYKU S PITNOU VODOU / SURFACES IN CONTACT WITH DRINKING WATER

Stupeň přípravy povrchu / Prepare of surface: Sa 2 1/2 - ČSN EN ISO 8501-1

- | | | |
|---------------------------------------|-----------------------|-------------|
| - Základní nátěr / Primer coat: | HEMPADUR 35530 (šedá) | - 125 mikro |
| - Vrchní nátěr / Top coat: | HEMPADUR 35530 (šedá) | - 125 mikro |
| - Celková tloušťka / Total thickness: | | - 250 mikro |

A PLOCHY VE STYKU S ATMOSFÉROU / SURFACES IN CONTACT WITH INNER ATMOSPHERE

Stupeň přípravy povrchu / Prepare of surface: Sa 2 1/2 - ČSN EN ISO 8501-1

- | | | |
|---------------------------------------|-------------------------------|-------------|
| - Podklad / Base coat: | LAS 2688 | - 15 mikro |
| - Základní nátěr / Primer coat: | S2300 | - 40 mikro |
| - Mezinátěr / Middle coat: | LAS 2636 | - 40 mikro |
| - Vrchní nátěr / Top coat: | S2321 RAL 5010 (modrá / blue) | - 40 mikro |
| - Celková tloušťka / Total thickness: | | - 135 mikro |

Ap PLOCHY NA POHYBLIVÝCH ČÁSTECH / SURFACES ON MOVABLE PARTS

Stupeň přípravy povrchu / Prepare of surface: Sa 2 1/2 - ČSN EN ISO 8501-1

- | | | |
|---------------------------------------|--------------------------------|-------------|
| - Podklad / Base coat: | LAS 2688 | - 15 mikro |
| - Základní nátěr / Primer coat: | S2300 | - 40 mikro |
| - Mezinátěr / Middle coat: | LAS 2636 | - 40 mikro |
| - Vrchní nátěr / Top coat: | S2321 RAL 3000 (červená / red) | - 40 mikro |
| - Celková tloušťka / Total thickness: | | - 135 mikro |

Barevné řešení

RAL 5010 (modrá) – turbína, potrubí

RAL 3000 (červená) – pohybující se části regulace, synchronní generátor

Nerezové části bez nátěru.

Poznámky k nově dodávaným armaturám

- Armatury jsou do potrubí pitné vody (vhodný materiál, nátěry obtékaných ploch, ...)
- Nerezový spojovací materiál
- V případě výpadku sítě budou armatury ovládány ze záložního zdroje (dodávka elektročásti)
- Ovládání kuželového regulačního ventilu bude programově spojené s uzavíráním turbíny tak, aby nedošlo ke skokové změně průtoku vody v potrubí, která by způsobila pohyb usazenin v potrubí
- Jedná se o náhradu stávajících armatur, zachování zástavbové délky, připojovací rozměry, poloha, způsob ovládání, ...

MVE Bedřichov

Základní parametry:

Rozsah spádů H = 69,2 – 66,5 m
Rozsah průtoků Q = 122 – 250 l/s (dle předloženého grafu průtoků)

Dodávka nových armatur (provozní tlak vody v potrubí H=70 m):

- Uzavírací klapka na vstupu do turbíny DN400 PN16, ovládání elektro (napájecí napětí 3x230/400 V), mezipřírubová, signalizace koncových poloh
- Kuželový regulační ventil na obtoku DN400 PN16, ovládání elektro (napájecí napětí 3x230/400 V), přírubový (zástavbová délka L=1100 mm), lineární snímání polohy (výstupní signál 4-20mA), signalizace koncových poloh, předpokládaný max. průtok cca 0,600 m³/s
- Montážní vložka DN400 PN16, zástavbová délka L=350 mm, nerezový spojovací materiál

Varianta 1) - Nová Peltonova turbína

- vertikální Peltonova turbína, 4 dýzy, pr. 440 mm, n = 750 ot/min, Pt = 140 kW
- vertikální přírubový synchronní generátor – jmenovitý výkon 148 kW (164 kVA), 750 ot/min, 400 V, přídavné zatížení ložisek silami od turbíny
- průběžné otáčky turbíny / generátoru npr = 1153 ot/min
- ovládání dýz elektrickými servomotory (Modact), ovládací napětí 3x230/400 V, lineární snímání polohy (výstup 4-20 mA), signalizace koncových, momentové vypínače
- oběžné kolo z nerezového materiálu, uložené na prodlouženém hřídeli generátoru
- turbínová skříň bude svarek z uhlíkové oceli, vnitřní plochy opatřeny nátěrem vhodným do pitné vody. Součástí turbínové skříně je okružní potrubí pro přívod vody k jednotlivým dýzám. Skříň bude ustavena na stávající rám na víku odpadní roury
- úprava stávajícího kotevního rámu na víku odpadní roury

Provozní oblast turbíny:

1 dýza v provozu	Q1 = 0,020 - 0,060 m ³ /s
2 dýzy v provozu	Q2 = 0,060 – 0,120 m ³ /s
3 dýzy v provozu	Q3 = 0,120 – 0,175 m ³ /s
4 dýzy v provozu	Q4 = 0,175 – 0,250 m ³ /s

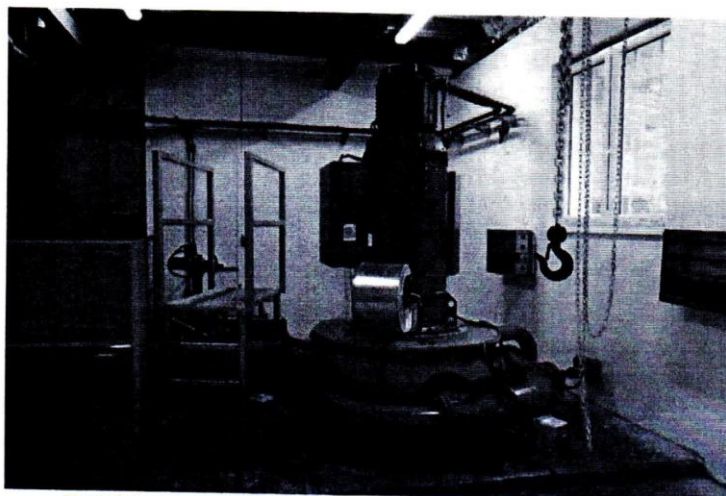


Foto Peltonovy turbíny dodávané na VD Janov (Povodí Ohře) – r.2017

Varianta 2) - Generální oprava (modernizace) Peltonovy turbíny

- stávající turbínová skříň bude zachována, budou na ní provedeny nezbytné úpravy s ohledem na připojení nového generátoru, očištění a nový nátěr, obtékané plochy budou natřeny nátěrem do pitné vody
- stávající oběžné kolo bude zachováno, bude provedena kontrola obtékaných ploch a vypracován technický nález. Poškozená místa budou zavařena a zabroušena do hydraulického tvaru
- stávající dýzy budou zdemontovány, očištěny, bude vypracován technický nález. Poškozená místa budou zavařena a zabroušena do hydraulického tvaru, dodávka nových těsnících prvků a nový nerezový spojovací materiál
- nové elektrické servopohony pro ovládání dýz, ovládací napětí 3x230/400 V, lineární snímání polohy, signalizace koncových, momentové vypínače
- nový snímač tlaku před turbínou
- nový vertikální přírubový synchronní generátor – jmenovitý výkon 148 kW (164 kVA), 750 ot/min, 400 V, přídavné zatížení ložisek silami od turbíny

Nový synchronní generátor (shodný pro obě varianty)

- trojfázový nízkonapěťový horizontální patkový asynchronní generátor. Patkový generátor je kotven na rám, který je ukotven na betonovém podstavci. Vinutí je vybaveno 6ks odporovými snímači teploty, jejichž výstup je zaveden do řídicího systému. Ložiska jsou vybavena 2ks odporovými snímači teploty, jejichž výstup je zaveden do řídicího systému. Generátorová hřídel je vybavena snímačem otáček. Ložiska jsou s trvalou tukovou náplní s možností domazávání. Na hřideli generátoru je nasazeno oběžné kolo, proto na generátor působí přídavné síly od turbíny.
- Regulátor BASLER DECS150 5NS2V + ICRM 7 instalován ve svorkovnici.
- Napěťová regulace v rozsahu +5/-10% je bez redukce výkonu generátoru.
- Antikondenzační vyhřívání 230 V, 50 Hz, ≥ 500 W.

Hlavní parametry generátoru:

typ	SG108WM8
výrobce	G&Em
jmenovitý výkon	164 kVA (148 kW)
napětí, frekvence	400 VY, 50 Hz
otáčky jmenovité	750 ot/min
otáčky průběžné	1153 ot/min po dobu max.15 min
cos φ	0,9
tvar	IM 3011 - přírubový
krytí	IP23
chlazení	IC01
mazání	tukové s trvalou náplní
hmotnost	1800kg
výška generátoru	cca 1600 mm

Řídicí systém a elektrovýzbroj

Součástí řídicího systému bude příprava pro dispečerské měření a řízení s dispečinkem provozovatele energetické sítě.

Dodávka 1 kompletu rozváděčů DT1 a RG1 (1x 2000+200x600x400 + 1x 2000+200x600x400) obsahující řídicí systém a elektrovýzbroj pro turbínu 4dýzovou Pelton, spojenou se synchronním generátorem 164 kVA, 400V, 50Hz, 750 ot/min., bez převodovky
vypínač generátoru: NSX400, 400A + řídicí jednotka Micrologic 2.0E (nadproudová a zkratová ochrana generátoru)
vývod ke generátoru spodem, vývod k transformátoru spodem, vývod k technologii MVE spodem
blokové uspořádání generátor-rozvaděč RG1-transformátor 0,4/20kV
napěťová soustava TN-C 3+PEN 3x400V/230V, 50Hz
krytí rozvaděče RG1: IP54/00, DT1: IP54/20
regulátor napětí je součástí synchronního generátoru (dodávka fy Strojírny Brno, a.s.)
PLC Simatic S7-1510SP + panel operátora KTP700 Basic, včetně Smart Serveru
ovládání servopohonů regulace dýz turbíny
ovládání topného tělesa pro temperování vinutí generátoru
ovládání servopohonů uzavíracích a regulačních klapek (kuželových regulačních ventilů), včetně zdroje záložního napětí
měření teploty vinutí a ložiskách generátoru (snímače jsou součástí generátoru)
1x rozvaděč + 1x strojovna (dodávka fy Alva St)
1x digitální snímač tlaku (dodávka fy Strojírny Brno, a.s.)
1x snímač otáček (součást generátoru)
sada kabelů mezi rozvaděčem DT1 a technologií MVE ve strojovně
silové kabely mezi generátorem RG1 a transformátorem budou použity stávající
technická dokumentace A20.xxx v českém jazyce
panel operátora v českém jazyce

Dodávka 1 ks zdroje záložního napájení 230VAC, 3kVA/2,4kW, 24VDC, 100Ah pro zálohování pohonů uzavíracích klapek a regulačních členů

Tabulky garantovaných hodnot

MVE Bedřichov

Nová vertikální Peltonova turbína, 4 dýz, pr. 440 mm, n = 750 ot/min, Pt = 140 kW

Nová Peltonova turbína				Synchronní generátor *	
Q (m ³ /s)	H (m)	Eta t (%)	Eta g (%)	Eta c (%)	Pg (kW) -SG
0,122 / 2 dýzy	69,2	89,0	93,0	82,77	69
0,168 / 3 dýzy	68,6	90,1	93,3	84,10	95
0,222 / 4 dýzy	68,0	90,2	93,2	84,06	124
0,252 / 4 dýzy	67,5	89,3	93,1	83,14	139
0,299 / ---	---	---	---	---	---

Q (m³/s) – průtok turbínou

H (m) – čistá spád

Eta t (%) – účinnost turbíny

Eta g (%) – účinnost generátoru

Eta c (%) – celková účinnost soustrojí (turbína + generátor)

Pg (kW) – výkon na svorkách generátoru (SG – synchronní generátor)

*- výpočet pro cos ϕ = 0,95

Průtok 0,299 m³/s je mimo rozsah zadávacích průtoků z grafu (mimo rozsah průtoků turbíny)

Generální oprava (modernizace) stávající Peltonovy turbíny, 5 dýz, pr. ?? mm, n=750 ot/min

Peltonova turbína po GO				Synchronní generátor *	
Q (m ³ /s)	H (m)			Eta c (%)	Pg(kW) -SG
0,122 / 3 dýzy	69,2			76,07	63
0,168 / 3 dýzy	68,6			81,49	92
0,222 / 4 dýzy	68,0			77,65	115
0,252 / 5 dýz	67,5			79,70	133
0,299 / 5 dýz	66,5			76,90	150

Hodnoty uvedené pro průtok 0,299 m³/s jsou pouze informativní, jedná se o průtok mimo rozsah zadávacích průtoků z grafu.

Peltonova turbína

Zkoušky a měření

Zkoušky a měření před demontáží zařízení

- měření připojovacích rozměrů vtokového potrubí a rámu pro připojení skříňe
- měření parametrů stávajícího zařízení (Q, H, P)

Zkoušky a měření během výroby

Okružní potrubí

- Rozměrová kontrola
- Defektoskopická kontrola vybraných svarů
- Kontrola nátěru

Skříň turbíny

- Rozměrová a tvarová kontrola
- Defektoskopická kontrola vybraných svarů
- Kontrola nátěru

Dýzy a jehly

- Rozměrová a tvarová kontrola jehel
- Defektoskopická kontrola jehel
- Rozměrová a tvarová kontrola těles dýz

Elektrický servomotor pro ovládání regulačního kruhu

- Vizuální kontrola servomotoru
- Kontrola rozměrů
- Funkční zkouška, měření zdvihu

Oběžné kolo

- Rozměrová kontrola
- Defektoskopická kontrola na vybraných místech
- Dynamické vyvážení

Generátor

- Vizuální kontrola generátoru
- Rozměrová kontrola konce hřídele pro uložení oběžného kola
- Kusová zkouška

Zkoušky a měření během montáže

Turbína

- Kontrola vystředění oběžného kola vůči dýzám
- Kontrola zdvihu dýz po montáži servomotorů
- Celková kontrola turbíny po montáži (dotažení spojů, nátěry)

Generátor

- Kontrola svislosti soustrojí
- Celková kontrola kompletního zařízení generátoru po montáži (dotažení kabelů ve svorkovnici, nátěry)

Zkoušky individuální, předkomplexní a komplexní

A) Individuální zkoušky před napuštěním hydraulického obvodu

Turbína

- Kontrola dotažení přírubových spojů
- Kontrola spojení turbíny s generátorem

Generátor

- Kontrola množství a stavu mazacích náplní
- Kontrola směru točení elektromotorů

B) Individuální zkoušky při napuštění hydraulického obvodu

- Napuštění hydraulického obvodu vodou
- Kontrola těsnosti přírubových spojů, kontrola průsaků přes uzavřené dýzy

C) Předkomplexní zkoušky (po napuštění hydraulického obvodu)

Spouštěcí zkoušky

- Rozběh soustrojí s postupným zvyšováním otáček až na jmenovité otáčky
- Kontrola mechanického chodu stroje, vibrací, průsaků ucpávky, kontrola teplot ložisek do ustáleného stavu
- Zkouška regulace otáček pro nafázování generátoru, zkouška buzení a regulace buzení, zkouška prvního fázování

Zkoušky se zatížením

- První přifázování stroje, zatížení na cca 25 % výkonu
- Zkouška provozního odstavení z 25 % výkonu
- Nové najetí stroje, zatížení na 25 % výkonu
- Zkouška havarijního odstavení z 25 % výkonu
- Najetí a postupné zvyšování výkonu na 100 %
- Sledování chodu stroje, kontrola vibrací, průsaků, sledování průběhu teplot
- Vypínací zkoušky z 25 %, 50 %, 75 % a 100 % výkonu, kontrola přechodného zvýšení otáček, kontrola mechanického chodu soustrojí
- Nastavení snímače zvýšených otáček
- Zkouška regulace výkonu a otevření
- Zkouška provozu v režimu regulace průtoku a provoz dle daného otevření turbíny
- Zkoušky havarijního odstavení od jednotlivých poruch
- Odstranění nedostatků zjištěných během prováděných zkoušek

D) Komplexní zkoušky

Komplexní zkoušky budou probíhat jako normální provoz strojů po dobu 72 hodin se zvýšeným dohledem obsluhy. Ze strany zhotovitele bude dohled probíhat pomocí vzdáleného přístupu přes ŘS. Během provozu budou v potřebném rozsahu prováděny rozběhy a odstavení soustrojí, ustálený provoz při různých zatíženích, zkoušky provozního i havarijního odstavení od vybraných poruch, provoz v režimu regulace průtoku a regulace dle požadovaného otevření turbíny.

Během komplexních zkoušek zhotovitel prokáže provozuschopnost soustrojí, funkčnost celého díla a splnění cílů rekonstrukce. Po celou dobu zkoušek budou zodpovědní pracovníci zhotovitele k dispozici na telefonu. Obsluha elektrárny bude provádět záznamy veličin z řídicího systému a kromě toho povede vlastní záznamy v provozním deníku.

Budou sledovány především tyto záležitosti :

- Celkový chod soustrojí
- Spád , tlak vody
- Teploty ložisek a jejich průběh
- Těsnost a stav přírubových spojů
- Výkon generátoru
- Teploty vinutí generátoru
- Průběh rozběhů a odstavení soustrojí
- Bezproblémový průběh automatických pochodů

Během komplexních zkoušek bude dále provedena kontrola vibrační soustrojí na ložiskových tělesech generátoru minimálně ve třech provozních bodech soustrojí. Budou měřeny maximální absolutní vibrace a zhodnoceny ve smyslu normy ČSN ISO 10816-5.

ZKUŠEBNÍ PROVOZ

Podmínkou pro zahájení zkušebního provozu je úspěšné dokončení individuálních, předkomplexních a komplexních zkoušek celého zařízení a jeho převzetí objednatelem. V průběhu zkušebního provozu se bude se zvýšenou pozorností sledovat chod zařízení, budou se vést odečty hodnot a sledovat záznamy hodnot v řídicím systému. Sledují se funkce a veličiny obdobně jako u komplexních zkoušek – viz „Komplexní zkoušky“.

Pozoruje se a zaznamenává výskyt zvýšeného hluku, tlakových pulsací, mechanických rázů, prúsaků, apod. Podmínky zkušebního provozu budou ve smyslu příslušné ČSN.

Na konci zkušebního provozu se nastavené parametry, zejména u regulace. Případné vady a nedostatky budou odstraněny zhotovitelem.

Předpokládaná délka zkušebního provozu bude 2 měsíce.

Během zkušebního provozu se nepředpokládá trvalá přítomnost zhotovitele na elektrárně.

Rekonstrukce MVE Bedřichov

Cenová tabulka

MVE Bedřichov – Varianta 1 - Nová technologie		Dodávka celkem (Kč)
1.	Projektová dokumentace	150.000,-
2.	Vertikální Peltonova turbína, OK 440 mm	2,050.000,-
3.	Synchronní generátor 164 kVA, 750 ot/min	1,144.000,-
4.	Elektročást a řídicí systém	738.000,-
5.	Klapka DN 400 PN16, Kuželový regulační ventil DN400 PN16	590.000,-
6.	Demontážní a montážní práce, manipulace, zkoušky a dopravy	445.000,-
CENA CELKEM		5,117.000,-

MVE Bedřichov – Varianta 2 - Generální oprava		Dodávka celkem (Kč)
1.	GO - Vertikální Peltonova turbína	453.000,-
2.	Synchronní generátor 164 kVA, 750 ot/min	1,144.000,-
3.	Elektročást a řídicí systém	738.000,-
4.	Klapka DN 400 PN16, Kuželový regulační ventil DN400 PN16	590.000,-
5.	Demontážní a montážní práce, manipulace, zkoušky a dopravy	445.000,-
CENA CELKEM		3,370 .000,-

OPTION MVE Bedřichov		Dodávka celkem (Kč)
1.	Panel operátora TP900 Comfort PN	40.300,-
2.	Rozšíření ŘS o přípravu dispečerského řízení distributora	52.700,-
CELKEM		93.000,-

Uvedené ceny neobsahují DPH.

C.2 Nabídka dodavatele II

Nabídka je uvedena na následujících stranách. Tato stránka je dále úmyslně prázdná za účelem jednotného formátu.

Věc: Cenová nabídka N 021/2021 – rekonstrukce MVE BEDŘICHOV

DODAVATEL 2

1. Předmět nabídky

A. Dvoudýzová vertikální Peltonova turbína

Spád	H = 66 - 69 m
Průtok	Q = 0,08 – 0,20 m ³ / s
Průměr oběžného kola	D = cca 550 mm
Jmenovité otáčky	600 1/min
Průběžné otáčky	1 050 1/min
Maximální výkon	119 kW
Počet jednotek	1

Materiál hlavních částí turbíny:

Část	Materiál dle EN Standard
Oběžné kolo	X3CrNiMo13-4
Ochranné pouzdro ucpávky	X5CrNi18-10
Skříň	S355J0, S235JR
Dýza	X5CrNi18-10 S355J0, S235JR
Potrubí	S355J0, X5CrNi18-10

Vnitřní povrchy nového zařízení, které přicházejí do styku s pitnou vodou budou provedeny z nerezů nebo opatřeny nátěry vhodnými pro pitnou vodu. Dodané zařízení bude mít příslušné atesty.

B. Generátor

Typ	synchronní, vertikální
Výkon	120 kW
Napětí	400 V
Jmenovité otáčky	600 1/min
Průběžné otáčky	1 050 1/min
Ložiska	valivá, mazaná tukem
Frekvence	50 Hz
Třída krytí	IP 23

C. Elektročást

Sílové prvky a spínání, rozvaděč
Centrální měření výkonu, napětí a proudů
Ochrany
Synchronizace / kompenzace
Snímače, tlaku, vibrací, otáček a polohy
Měření spotřeby
Montáž a dodávka nové kabeláže MVE
Součástí nabídky není hlavní kabeláž mezi MVE a rozvodnou

D. Řídicí systém

SW a doprogramování řízení soustrojí
Doplnění SW na dispečerské úrovni
Oživení a revize

E. Ostatní

Uzavírací klapka před turbínou elektricky ovládaná
Montážní vložka na potrubí před turbínou
Úprava připojení potrubí před turbínou

Uzavírací klapka na obtoku – elektricky ovládaná
 Regulační ventil na obtoku – elektricky ovládaný
 Montážní vložka na obtoku
 Kuželový přechod obtoku
 Úprava připojení na potrubí obtoku
 Montáž a připojení průtokoměru do řídicího systému – dodávka průtokoměru není součástí nabídky
 Demontáž stávajícího zařízení a montáž nového
 Zkoušky, uvedení do provozu, měření
 Doprava

Pozn.: Ručně ovládaná uzavírací klapka na výstupu z rozbočovacího objektu před turbínou není součástí nabídky – zjištění potřeby opravy či výměny bude řešeno po demontážních pracích

F. Projekt

2. Cena

1 ks	Peltonova turbína	1.087.000,- Kč
1 ks	Synchronní generátor	1.328.000,- Kč
1 sd	Elektročást	448.000,- Kč
1 sd	Řídicí systém	278.000,- Kč
1 sd	Jednotka RJ (RTU)	130.000,- Kč *)
1 sd	Ostatní	871.000,- Kč
1 ks	Projekt	80.000,- Kč
	celkem	4.222.000,- Kč

Cena je v paritě DDU MVE Bedřichov dle INCOTERMS 2000, bez DPH

*) Pokud je provozovatelem DS společnost ČEZ

3. Platební podmínky

Cena [%]	Doba splatnosti	Podmínka platby
30	14	Vystavení zálohové faktury
30	30	Vystavení zálohové faktury (faktura bude vystavena ve třetím měsíci)
30	30	Ukončení výroby soustrojí, přejímka, vystavení příslušných dokumentů a faktury
10	30	Uvedení soustrojí do provozu, vystavení příslušných dokumentů a faktury

4. Dodací lhůta

Předmět smlouvy bude připraven k uvedení do trvalého provozu do 9 měsíců od podpisu smlouvy o dílo a uhrazení zálohy.

5. Přejímky

Přejímky u výrobce se budou řídit programem zkoušek a atestů výrobce. Rozsah zkoušek a atestů výrobce bude v souladu s normami respektujícími normy IEC a jejich ekvivalenty.

6. Záruční doba

Záruční doba činí 24 měsíců ode dne uvedení soustrojí do provozu.

7. Platnost nabídky

Tato nabídka je platná do 31.1.2021

Vše: Rekonstrukce MVE BEDŘICHOV – specifikace dodávaného zařízení

Peltonova turbína

1 ks vertikální dvoudýzová Peltonova turbína s oběžným kolem průměru letmo uloženým na prodloužené hřídeli generátoru:

Spád	H = 66 - 69 m
Průtok	Q = 0,08 – 0,20 m ³ / s
Průměr oběžného kola	D = cca 550 mm
Jmenovité otáčky	600 1/min
Průběžné otáčky	1 050 1/min
Maximální výkon	119 kW
Počet jednotek	1

Oběžné kolo je vyrobeno z nerezové oceli X3CrNiMo13-4, skládané, dynamicky vyvážené. Axiální a radiální síly působící na oběžné kolo jsou přenášeny do ložisek generátoru. Skříň turbíny je svařovaná z uhlíkové oceli S355J0, S235JR. Tvoří nosný prvek turbosoustrojí upravený pro uložení na kotevní kus zabetonovaný v podestě a pro uložení víka turbíny. Na skříni turbíny jsou uchyceny příruby výstupů okružního potrubí s dýzami. Víko turbíny je nosným prvkem pro uložení generátoru a vnitřní vestavby turbíny s ucpávkou a zavzdušněním.

Okružní potrubí pro uchycení dvojice dýz je svařované z materiálů S355J0, X5CrNi18-10. Dýzy jsou ovládané přímočarými elektrickými servomotory vybavenými snímači polohy a koncovými snímači zavřené polohy a polohy maximálního otevření. Servomotory jsou uloženy na konzole dýz. Dýzy jsou vyrobeny z materiálů S355J0, S235JR a X5CrNi18-10. Koleno přívodu do okružního potrubí je opatřeno přírubami a je vyrobeno z materiálu S355J0.

Přívodní potrubí

Přívodní potrubí k turbíně DN 350 bude zachováno původní.

Uzavírací klapka

1 ks uzavírací klapka DN 400, PN 16, ovládaná elektrickým servopohonem 3 x 400 V. V přívodním potrubí vody k turbíně. Uzavírací klapka umožní nezávislé připojení a odpojení MVE řídicím systémem v součinnosti s uzavírací klapkou v hlavním potrubí.

Montážní vložka

Před okružní potrubí turbíny bude nainstalována montážní vložka DN 350, PN 16.

Synchronní generátor

1 ks synchronní generátor vertikální s prodlouženou hřídelí pro následující parametry:

Typ	synchronní, vertikální
Výkon	120 kW
Napětí	400 V
Jmenovité otáčky	600 1/min
Průběžné otáčky	1 050 1/min
Ložiska	valivá, mazaná tukem
Frekvence	50 Hz
Třída krytí	IP 23

Generátor je přírubového provedení pro uložení na víko turbíny, s prodlouženou hřídelí pro uložení oběžného kola Peltonovy turbíny. Valivá ložiska s tukovou náplní mají možnost domazávání.

Výstupy snímačů teploty vinutí, odporových snímačů teploty ložisek a snímače otáček budou zavedeny do řídicího systému MVE.

Elektro-technologická část

1 sada elektrického vybavení MVE, navržené pro plně automatický provoz, zahrnující:

- rozvaděče s řídicím systémem a elektrovýzbrojí pro dvoudýzovou Peltonovu turbínu spojenou se synchronním generátorem
- vypínač generátoru s řídicí jednotkou (nadproudová a zkratová ochrana generátoru)
- vývod ke generátoru, vývod k transformátoru, vývod k technologii MVE
- ovládání servopohonů dýz Peltonovy turbíny
- ovládání servomotorů uzavíracích armatur a regulačního ventilu včetně zdroje záložního napětí měření určených veličin.

Zkoušky a uvedení do provozu

Dílenské zkoušky

Při výrobě zařízení budou prováděny dílenské zkoušky dle podnikových norem a předpisů výrobce. Protokoly a osvědčení budou předány investorovi

Zkoušky a měření v průběhu montáže

Během montáže bude provedena:

- kontrola těsnosti spojů a dotažení
- kontrola po montáži servomotorů dýz a uzávěrů, kontrola mezních poloh
- celková kontrola kompletnosti

Zkoušky při uvedení do provozu

- suché zkoušky (zkouška ovládání uzavíracích a regulačních prvků)
- mokré zkoušky (těsnostní zkouška, první roztočení stroje, první přířazování, zkoušky se zatížením, vypínací zkoušky)
- komplexní zkoušky (provoz po dobu 72 hodin)

Garantované hodnoty

Peltonova turbína bude dosahovat v nejméně frekventované oblasti průtoků $G=0,160 \text{ m}^3/\text{s}$ účinnost 89%
Generátor bude dosahovat při účinnosti 0,95 účinnost 93,5 %

Věc: Rekonstrukce MVE Bedřichov - postup rekonstrukce

Rekonstrukční práce na stavbě (demontážní a montážní práce) se týkají manipulace s kompletními technologickými celky výměnným systémem bez zásahu do stavby a bez zásadních změn stavebních dispozic oproti stávajícímu řešení.

Před zahájením realizace rekonstrukce bude objednatelem zajištěna revize příslušného zdvihacího zařízení včetně zátěžové zkoušky. Při odstavené MVE bude provedeno ověření funkčnosti a těsnosti uzavírací klapky na výstupu do potrubí před turbínou z rozbočovacího objektu

Rekonstrukce obtokového potrubí

V průběhu vymezené odstávky provozu úpravní vody bude odstavena MVE a provedena demontáž stávající potrubní trasy obtoku od potrubí DN 600 (uzávěr DN 600, přechodový kus, montážní vložka DN 400, kuželový ventil DN 400 s příslušenstvím) a namontován nový přechodový kus, uzavírací klapka DN 400, montážní vložka DN 400, regulační ventil DN 400.

V případě těsnosti uzavírací klapky na výstupu do potrubí před turbínou z rozbočovacího objektu může být zprovozněno obtokové potrubí a tím i provoz úpravní vody a provoz MVE.

V případě nedostatečné těsnosti uzavírací klapky může být rozhodnuto o namontování zaslepovací příruby DN 600 na uzavírací klapku na výstupu do potrubí před turbínou z rozbočovacího objektu. To sice znemožní provoz MVE, ale umožní zahájení její rekonstrukce.

Objednatel může preventivně rozhodnout o preventivní výměně uzavírací klapky DN 600 v průběhu rekonstrukce obtokového potrubí

Rekonstrukce MVE

Po ukončení rekonstrukce obtokového potrubí může být zahájena rekonstrukce MVE. V odstavce MVE bude provedena:

- demontáž připojovacího potrubí a uzavírací klapky DN 400
- montáž zaslepovací příruby DN 600
- demontáž stávajícího turbosoustrojí (Peltonova turbína, generátor) včetně příslušenství
- úprava kotevního kusu soustrojí
- montáž nového turbosoustrojí (Peltonova turbína s okružním potrubím, synchronní generátor)
- demontáž zaslepovací příruby DN 600
- montáž připojovacího potrubí a uzavírací klapky DN 400
- montáž montážní vložky DN 400
- montáž elektro-technologického zařízení pro plně automatický provoz MVE včetně přepojení dříve nainstalovaných prvků hlavního potrubí (pohony, ovládání a měření).
- zkoušky a uvedení do provozu.

Demontážní a montážní práce budou provedeny v průběhu dvou pracovních týdnů. Průběh prací může být ovlivněn stavem uzavírací klapky DN 600 a rozhodnutím o způsobu řešení. Dalším problémem může být úprava kotevního kusu turbíny od kterého není k dispozici žádná dokumentace.

PŘÍLOHA D: SOUBORY VÝPOČTŮ A ZPRACOVÁNÍ

V této části jsou uvedeny přílohy výpočtů, které byly provedeny mimo text této práce. Dále je zde uvedené zpracování souboru dat (příloha B.2) a také poskytnutý přehled hodinových cen zelených bonusů za rok 2019.

D.1 Zpracování funkcí účinnosti

Funkce závislosti účinnosti na průtoku pro dané varianty a původní stav byly zpracovány v MS Excel. Soubor vypracování je přiložen v souboru komprimovaných příloh *soubor_priloh.zip* pod názvem *D1_funkce_ucinnosti.xlsx*.

D.2 Výpočet ekonomických kritérií

Ekonomická kritéria byla pro větší množství dat vypočtena pomocí MS Excel. Celkové zpracování dat je uvedeno v souboru, který je přiložen v souboru komprimovaných příloh *soubor_priloh.zip* pod názvem *D2_ekonomicka_kriteria.xlsx*.

D.3 Hodinové ceny zelených bonusů za rok 2019

Pro doplnění byl pro vypracování poskytnut souhrn hodinových cen zelených bonusů za rok 2019, který je přiložen v souboru komprimovaných příloh pod názvem *D3_ZB_2019.xlsx*.

D.4 Zpracování dat z dispečinku MVE

Data z dispečinku MVE Bedřichov byla zpracována za účelem zhodnocení provozu a získání podkladů pro posouzení jednotlivých variant. Toto zpracování je uvedeno v přiloženém souboru (soubor obsahuje také legendu, která je uvedena nad tabulkou čáry trvání průtoků), který je k dispozici v souboru komprimovaných příloh *soubor_priloh.zip* pod názvem *D4_data_zpracovani.xlsx*.