

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

NÁVRH MALÉ VODNÍ ELEKTRÁRNY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

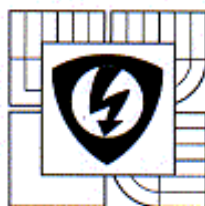
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

PETR KOKEŠ

BRNO 2012



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav elektroenergetiky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor

Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika

Student: Petr Kokeš

Ročník: 3

ID: 119306

Akademický rok: 2011/12

NÁZEV TÉMATU:

Návrh malé vodní elektrárny

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Volba vhodné lokality pro výstavbu MVE.
2. Vodohospodářské a hydroenergetické řešení MVE.
3. Návrh MVE na zvoleném toku.
4. Elektrická část MVE a její připojení do elektrizační soustavy.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

podle pokynů vedoucího práce

Termín zadání: 6.2.2012

Termín odevzdání: 25.5.2012

Vedoucí práce: doc. Ing. Antonín Matoušek, CSc.

Konzultanti bakalářské práce:

doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.

předseda oborové rady



UPOZORNĚNÍ:

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

Bibliografická citace práce:

KOKEŠ, P. Návrh malé vodní elektrárny. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2012. 44 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Antonín Matoušek, CSc..

Poděkování:

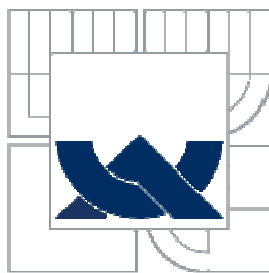
Tímto bych chtěl poděkovat doc. Ing. Antonínu Matouškovi, CSc. za pomoc a podporu při zpracování mé bakalářské práce.

Prohlášení:

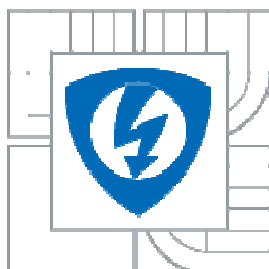
Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. Díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne 25. května 2012

Podpis autora



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

NÁVRH MALÉ VODNÍ ELEKTRÁRNY

THE SMALL HYDROELECTRIC POWER STATION DESIGN

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR
VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

PETR KOKEŠ
doc. Ing. ANTONÍN MATOUŠEK, CSc.

BRNO 2012

ABSTRAKT

Práce se zabývá komplexním návrhem malé vodní elektrárny v konkrétní lokalitě. V první části se nachází popis lokality, následuje vyhodnocení hydroenergetického potenciálu daného vodního toku, popis řešení vtokového objektu a přivaděče vody. V další části se řeší stavební a strojní část strojovny. Nejrozsáhleji je rozpracována elektrická část MVE, která obsahuje generátor, rozvaděče vč. vlastní spotřeby MVE, ochrany, jištění, kabeláž, trafostanici a přípojku vn. Dále se nachází popis systému kontroly a řízení a v závěru následuje ekonomické hodnocení investice.

Klíčová slova :

mechanická energie vody; malá vodní elektrárna; vtokový objekt; přivaděč; turbína; hydrogenerátor; elektrické ochrany; jištění; trafostanice; přípojka vn; systém kontroly a řízení; ekonomické hodnocení investice

ABSTRACT

The thesis deals with comprehensive design of the small hydroelectric power station in the particular site. There is the site description in the first part followed by evaluation of the hydro-energetic capacity of the watercourse and description of the inlet building and piping. Building and machinery part of the turbine hall is described in the next part. The electric part of the power station is worked up to wider scope and includes hydroalternator, switchgears incl. power for self-consumption, electric protections, cabling, transformer substation and high voltage inlet line. There is a description of the control system in the next part and economical evaluation of the investment is at the end.

Keywords :

mechanical power of the water; small hydroelectric power station; inlet building; piping; turbine; hydroalternator; protections of electric devices; overcurrent protection; transformer substation; high voltage line inlet; control system; evaluation of the investment

OBSAH

Soupis obrázků	8
Soupis tabulek	8
Soupis příloh	9
Soupis zkratek	9
1. Úvod	10
2. Výběr a popis lokality	11
3. Vodohospodářské a hydroenergetické řešení MVE	12
3.1. Hydroenergetický potenciál vodního toku	12
3.2. Popis technického řešení	13
3.2.1. Základní parametry, celkový popis řešení a předběžný odhad dosažitelného výkonu	13
3.2.2. Návrh odběrného objektu	14
3.2.3. Návrh přivaděče vody	18
4. Zařízení MVE	23
4.1. Strojovna MVE	23
4.1.1. Stavební část	23
4.1.2. Strojní část	24
4.1.2.1. <i>Popis</i>	24
4.1.2.2. <i>Určení výkonu na turbíně</i>	25
4.2. Elektrická část MVE	26
4.2.1. Zkratové poměry	26
4.2.2. Generátor	26
4.2.3. Kompenzace jalového výkonu	27
4.2.4. Rozvaděč vyvedení výkonu (RG)	27
4.2.4.1. <i>Jištění</i>	28
4.2.4.2. <i>Ochrany generátoru</i>	29
4.2.4.3. <i>Ovládací obvody 230 VAC</i>	29
4.2.5. Rozvaděč vlastní spotřeby (RVS)	30
4.2.6. Trafostanice	30
4.2.7. Koordinace jištění	31
4.2.8. Kabeláž nn	33
4.2.9. Přípojka vn	34
4.3. Systém kontroly a řízení	35
4.3.1. Popis ŘS	35
4.3.2. Řízení turbíny	35
4.3.3. Fázování a odstavování	35
4.3.4. Monitorování a ovládání	36
4.3.5. Další funkce	36
5. Ekonomické zhodnocení	37
5.1. Výpočet množství vyrobené el. energie	37
5.2. Výpočet investičních nákladů	38
5.3. Výpočet peněžních toků	38
5.4. Vyhodnocení investice	40
6. Závěr	42
Použitá literatura :	43

Soupis obrázků

Obr. 1	–	Bilance sluneční energie dopadající na Zemi ^[4]	10
Obr. 2	–	Koloběh vody na Zemi ^[2]	10
Obr. 3	–	Disponibilní a využívaný hydroenergetický potenciál světa ^[2]	11
Obr. 4	–	Křivky překročení průtoků.....	13
Obr. 5	–	Diagram použitelnosti turbín ^[4]	14
Obr. 6	–	Charakteristické uspořádání dnového odběru ^[1]	15
Obr. 7	–	Experimentálně získaný koeficient propadu v českých dnových odběrech ^[1]	16
Obr. 8	–	Návrhový režim dnového odběru vody ^[1]	16
Obr. 9	–	Ztráta na spádu ΔH zajišťující samočisticí schopnost dnového odběru vody ^[1]	17
Obr. 10	–	Příčný řez dnovým odběrem s hřebenovitými česlemi ze skelných laminátů ^[1]	17
Obr. 11	–	Pneumatická vyrovnávací komora ^[2]	18
Obr. 12	–	Schéma Bernoulliho rovnice tlakového přiváděče ^[1]	20
Obr. 13	–	Typy vtoků do tlakového přiváděče ^[1]	21
Obr. 14	–	Navrhované uspořádání strojovny.....	23
Obr. 15	–	Průtok vody turbínou Ossberger ^[6]	24
Obr. 16	–	Průběh účinnosti průtokové turbíny Ossberger ^[6]	24
Obr. 17	–	Schéma zapojení kompenzace jalového výkonu s regulátorem DRCK12 ^[10]	27
Obr. 18	–	Vypínací charakteristiky kompaktních jističů Modeion ^[23]	28
Obr. 19	–	Tavná ampérsekundová charakteristika pojistek PM45 ^[24]	32
Obr. 20	–	Odpínač FLES 25 - IVEP Brno ^[11]	34
Obr. 21	–	Graf návratnosti investice.....	41

Soupis tabulek

Tab. 1	-	M-denní průtoky.....	12
Tab. 2	-	N-leté průtoky.....	12
Tab. 3	-	M-denní průtoky energeticky využitelné.....	12
Tab. 4	-	Místní ztráty v první části přiváděče.....	22
Tab. 5	-	Místní ztráty ve druhé části přiváděče.....	22
Tab. 6	-	Ztráty třením v první části přiváděče.....	22
Tab. 7	-	Ztráty třením ve druhé části přiváděče.....	23
Tab. 8	-	Celkové ztráty v přiváděči.....	23
Tab. 9	-	Výkon na turbíně při různých průtocích.....	25
Tab. 10	-	Matice žádoucího působení jednotlivých jističů při zkratech.....	31
Tab. 11	-	Max. dovolená vypínací doba při zkratu v části nn.....	34
Tab. 12	-	Hodnoty vyrobené elektrické energie pro jednotlivá období.....	38
Tab. 13	-	Rozpis investičních nákladů.....	38
Tab. 14	-	Peněžní toky.....	39

Soupis příloh

Příloha 1 - Obrazová příloha

Příloha 2 - Výpočty

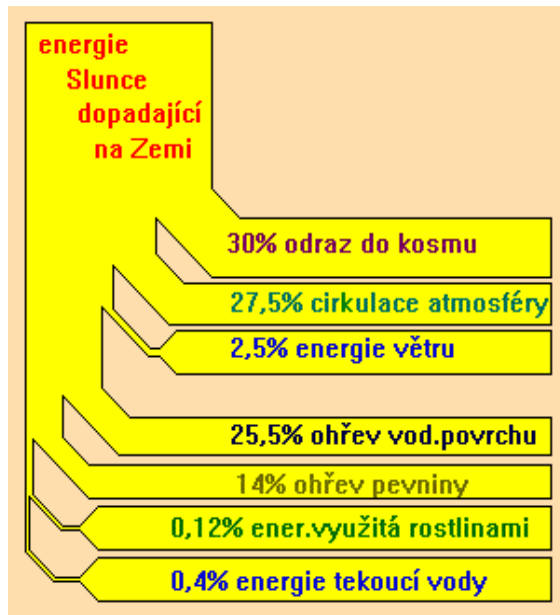
Příloha 3 - Katalogové listy Hydrohrom

Soupis zkratek

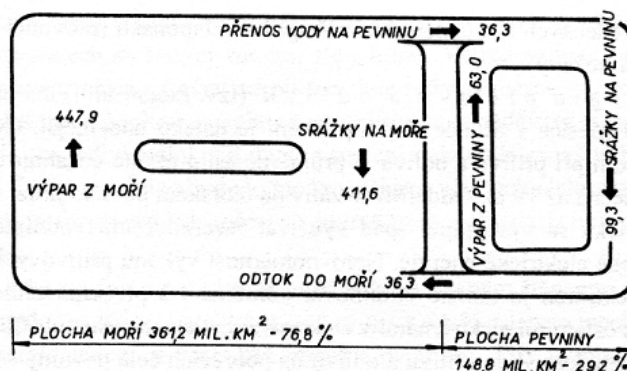
DS	- Distribuční soustava
DSP	- Dokumentace pro stavební povolení
ERÚ	- Energetický regulační úřad
CHKO	- Chráněná krajinná oblast
MVE	- Malá vodní elektrárna
MŽP	- Ministerstvo životního prostředí
OZE	- Obnovitelné zdroje energie
PDS	- Provozovatel distribuční soustavy
PPDS	- Pravidla provozování distribučních soustav
ŘS	- Řídicí systém
UPS	- Nepřerušovaný zdroj napájení

1. Úvod

Energie a celá škála jejích přeměn stála u zrodu vesmíru a provází ho po celou dobu jeho existence. Dle prvního termodynamického zákona je energie nezničitelná a může se pouze přeměňovat na jiné formy. Vývoj na zemi je též přímo ovlivňován energetickými přeměnami, přičemž klíčovou úlohu zde hraje Slunce. Slunce je stále primárním původcem všech energetických zdrojů



Obr. 1 – Balance sluneční energie dopadající na Zemi^[4]

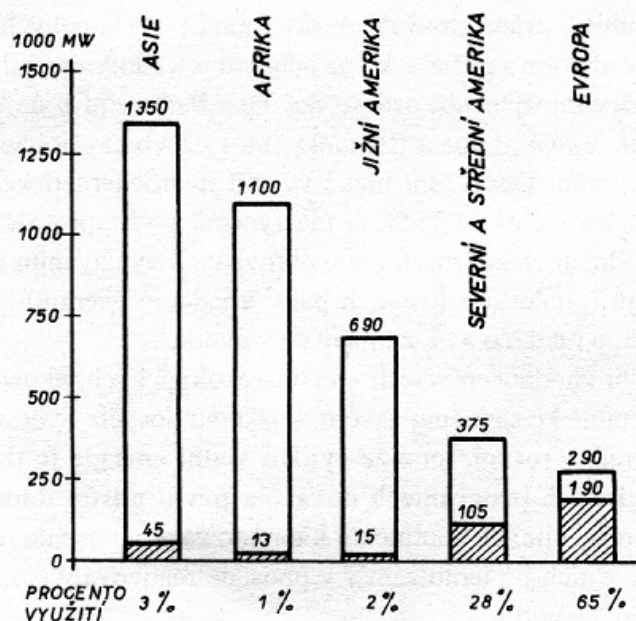


Obr. 2 – Koloběh vody na Zemi^[2]

ju na zemi, i takových jako jsou fosilní paliva. Nejedná se o nic jiného, než energetické konzer-
vy uložené před miliony let, zbytky rostlin a ži-
vočichů, které vznikly opět jen díky energii do-
dávané sluncem. Lidská civilizace mohla před
několika tisíci let vzniknout jen díky oteplení na
Zemi a ústupu ledovců. Mechanismus změn kli-

matu na Zemi není dodnes úplně objasněn, ale je známo, že aktivita Slunce zde hraje klíčovou úlohu. Existence lidí na Zemi je tedy přímo svázána s dostupností energetických zdrojů a spotřeba všech druhů a forem primární energie roste. Především od nástupu průmyslové a později vědeckotechnické revoluce je tento růst exponenciální a prognózy do budoucna nejsou optimistické. Tzv. užitková energie má čtyři formy – mechanickou, chemickou, tepelnou a elektrickou. V minulém století se do popředí dostala energie elektrická, protože je technicky velmi výhodná z hlediska výroby i přenosu a má všestranné použití. Alfou a omegou energetických koncepcí všech zemí se tedy stává způsob krytí stoupající poptávky právě po elektrické energii nejen nyní, ale hlavně v budoucnosti. K výrobě elektrické energie je ve světovém měřítku v současné době spotřebovávána asi třetina primárních energetických zdrojů, přičemž ca 60% z této třetiny tvoří fosilní paliva. Ovšem spalování fosilních paliv, včetně režijních činností, jako je jejich doprava, má velmi negativní vliv na životní prostředí a do oblasti změn klimatu, mimoto jejich zásoby jsou konečné a jejich vyčerpání je otázkou maximálně několika desítek let. Z tohoto důvodu se v několika posledních letech zvýšila intenzita snah o omezení použití fosilních paliv a jejich nahrazení tzv. alternativními zdroji energie. Primárním zdrojem těchto alternativních energií je již zmíněné Slunce, jež je motorem všeho dění na zemi. Hustota slunečního záření na Zemi je ca 1 kWm^{-2} , což odpovídá celkovému výkonu asi $1,3 \cdot 10^{14} \text{ kW}$, popř. celkové energii $5,6 \cdot 10^{17} \text{ kWh/rok}$ (za předpokladu využitelnosti po 12 hodin denně).^[2] Sluneční energie mj. dává do pohybu mnoho procesů, které lze energeticky využít (viz obr.1) a jedním z nich, je mechanická energie vody. Mechanická energie vody je dána koloběhem vody na zeměkouli a jejím celkovým objemem. Balance koloběhu vody je na obr. 2. Mechanickou energii vody v přírodě lze rozdělit na

- mechanickou energii atmosférických srážek,
- mechanickou energii ledovců,
- mechanickou energii moří,
- mechanickou energii vodních toků,



Obr. 3 – Disponibilní a využívaný hydroenergetický potenciál světa ^[2]

přičemž pro energetické využití se hodí jen poslední dvě s tím, že využívání mechanické energie moří je v současné době též velmi problematické. Hydroenergetický potenciál řek ve světě není dosud spolehlivě zmapován, nicméně v 70. letech minulého století se v některých publikacích objevil diagram znázorňující odhad dostupného a využívaného hydroenergetického potenciálu jednotlivých kontinentů (viz obr.3). Ovšem vzhledem ke geologickým a morfologickým podmínkám území se např. v Evropě odhaduje technicky využitelný hydroenergetický potenciál na úrovni 30-50% potenciálu teoretického. ^[2] V ČR, která leží na Evropském rozvodí a velké řeky zde pouze pramení, je již větší

část hydroenergetického potenciálu vyčerpána a výstavba dalších velkých vodních děl nepřipadá v úvahu. Nicméně určitý prostor pro budování malých vodních elektráren stále zůstává otevřen. Dle [7] činí celkový hydroenergetický potenciál v ČR okolo 1500 GWh a jeho využití bylo v době vydání studie (2003) ca 70%. Zbýlých 30% má již výrazně horší hydrologické podmínky než potenciál využitý, z čehož vyplývají horší ekonomické ukazatele budoucích děl a delší doba návratnosti investic. Studie dále uvádí rozdělení lokalit do tří skupin dle použitelného spádu a jejich četnosti:

- spád větší než 5 m - četnost 10 %,
- spád od 2 do 5 m - četnost 55 %
- spád menší než 2 m - četnost 35 %

Mimo stavby nových MVE na tocích existujících z hlediska energetického využití ještě další možnosti :

- využití retenčních nádrží a rybníků, případně jiných akumulčních nádrží, kde je možnost získání vhodného rozdílu hladin s málo se měnícím spádem a také průtočné množství vody vykazuje malé změny
- využití vodárenských objektů, vybudovaných pro účely zásobování pitnou nebo užitkovou vodou, kde je možno získat téměř konstantní vysoké spády s průtoky bez větších změn ^[7]
- rekonstrukce stávajících MVE se zastaralou nebo nevyhovující technologií, případně jejich rozšíření

Právě posledním jmenovaným případem se bude zabývat tato práce.

2. Výběr a popis lokality

Lokalita se nachází v obci Ludvíkov v CHKO Jeseníky, viz obr. 1 v příloze 1. V objektu č.p. 153 na p.č. 357/1 v k.ú. Ludvíkov pod Pradědem je zde v současné době provozována MVE se dvěma generátory poháněnými čerpadly v reverzním chodu, s celkovým instalovaným výkonem generátorů 51kW. Veškerá vyrobená elektrická energie je dodávána do rozvodné sítě ČEZ Distribuce, a to na napěťové hladině 0,4kV. MVE je derivační, s částečně zakrytým náhonem převádějícím vodu z nedaleké řeky Bílá Opava a odpadním kanálem, který ústí zpět do toku ca 60m pod MVE.

Provozovatel MVE zvažuje komplexní rekonstrukci MVE s cílem vyššího využití hydroenergetického potenciálu vodního toku v daném místě za účelem zvýšení výroby el. energie.

3. Vodohospodářské a hydroenergetické řešení MVE

3.1. Hydroenergetický potenciál vodního toku

Hydrologické údaje (dle ČSN 751400) vodního toku Bílá Opava na profilu v Ludvíkově byly získány z pobočky ČHMÚ v Ostravě v dubnu 2007 a jsou uvedeny níže.

1. Plocha povodí A [km²] 21,3
2. Dlouhodobá průměrná roční výška srážek na povodí P_a [mm] 1165
3. Dlouhodobý průměrný průtok Q_a [l.s⁻¹] 368
4. M-denní průtoky Q_{Md} [l.s⁻¹]

M	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	355	364
Q _{Md} [l s ⁻¹]	809	566	443	363	304	259	222	190	161	134	107	80	61

Tab. 1 - M-denní průtoky

5. N-leté průtoky Q_N [m³.s⁻¹]

N	1	2	5	10	20	50	100
Q _N [m ³ s ⁻¹]	2,61	4,87	9,48	13,7	18,8	26,6	33,7

Tab. 2 - N-leté průtoky

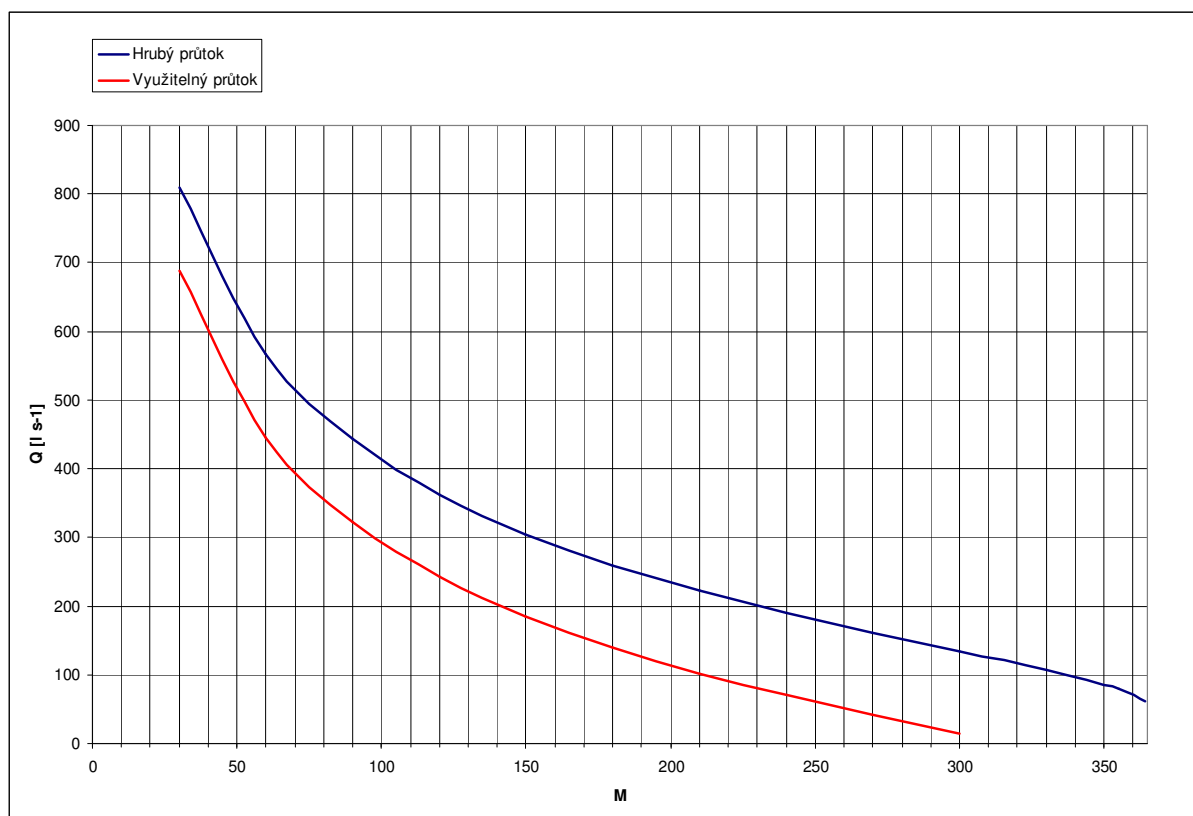
Vzhledem k tomu, že navrhovaná MVE bude též derivačního typu, nelze využít celý průtok vodního toku pro výrobu el. energie, ale je třeba ponechat určitý průtok (tzv. sanační) v původním korytě. Výši sanačního průtoku stanovuje vodoprávní úřad individuálně pro každé vodní dílo a pohybuje se obvykle mezi Q_{355d} a Q_{330d}, přičemž v posledních letech je tendence ponechávat sanační průtok spíše vyšší. Nicméně v tomto konkrétním případě se jedná o vodní tok na území CHKO a správa CHKO původně ve vyjádření k územnímu řízení požadovala ponechání sanačního průtoku na úrovni Q_{270d}, což bylo později rozkladovou komisí MŽP změněno na neurčitou formulaci že „hodnota minimálního zůstatkového průtoku má být stanovena tak, aby nedošlo k trvalému negativnímu ovlivnění struktury a ekosystému vodního toku...“ s tím, že definitivní hodnota bude stanovena ve vodoprávním řízení, jež zatím neproběhlo. Na základě tohoto neurčitého vyjádření budeme pro další návrh uvažovat sanační průtok ve výši 120 l s⁻¹.

V níže uvedené tabulce jsou uvedeny použitelné denní průtoky, tj. průtoky snižené o předepsaný sanační průtok, který musí zůstat v původním korytě řeky.

M	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	355	364
Q _v [l s ⁻¹]	689	446	323	243	184	139	102	70	41	14	0	0	0

Tab. 3 - M-denní průtoky energeticky využitelné

Údaje z tabulek 1 a 3 jsou zpracovány graficky do křivek překročení průtoků na obr. 4, což je výchozí podklad pro návrh dalších parametrů MVE a celkové technické řešení.



Obr. 4 – Křivky překročení průtoků

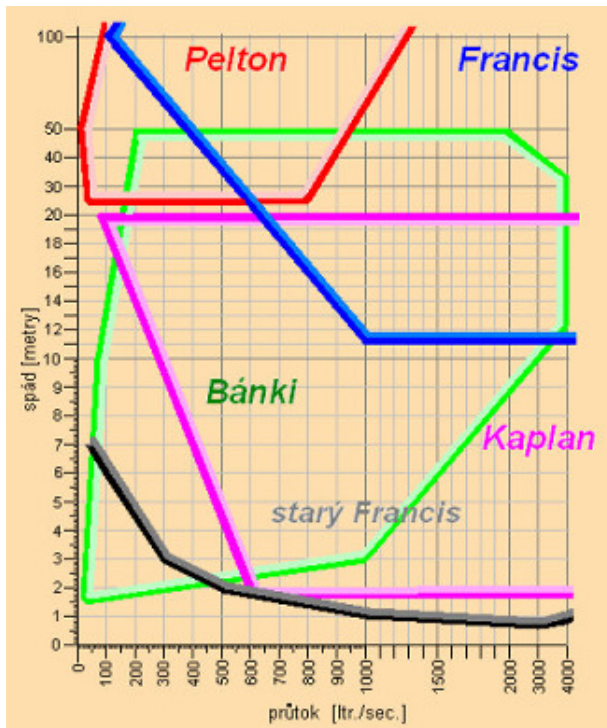
3.2. Popis technického řešení

3.2.1. Základní parametry, celkový popis řešení a předběžný odhad dosažitelného výkonu

Jedná se o lokalitu nacházející se na horním toku horské říčky, s nevelkým průtokem, kde je nicméně možno vytvořit poměrně velký spád. V úvahu připadá tedy opět pouze derivační MVE s dlouhým přivaděčem, pomocí kterého bude řešeno zvýšení spádu oproti současnému stavu. Pod soutokem Bílé Opavy s lesním potokem na ř.km 5,719 (viz obr.2 v příloze 1) bude zbudován příčný vzdouvací objekt (jez) výšky ca 1m, odkud bude odebírána voda do náhonu MVE. Historické prameny uvádí, že zde v minulosti býval odběrný objekt pro místní huť. Náhon bude uzavřený, provedený potrubím z vysoko hustotního lineárního polyetylénu PE-HD zakopaným v zemi, v hloubce ca 0,5-1,5m. Trasa náhonu povede převážně lesními pozemky po vrstevnici 693m.n.m se sklonem ca 4‰ nad budovu MVE, kde ve vyrovnávací komoře přejde do tlakového potrubí délky ca 140m ze stejného materiálu s vyšším maximálním dovoleným provozním tlakem. Tímto bude dosažen hrubý spád 80m. Délka trasy náhonu mezi vzdouvacím objektem a vyrovnávací komorou je zhruba 2400m. Celá situace je znázorněna na obr. 3 v příloze 1, kde je červeně vyznačena trasa náhonu a modře trasa tlakového potrubí.

Pro návrh odběrného objektu, hydraulický výpočet přivaděče a stanovení čistého spádu je třeba již v této fázi mít předběžnou představu o typu a počtu použitých soustrojí, především s ohledem na hltnost turbín. Vyjít lze např. z diagramu na obr. 5 a z křivky překročení průtoků na obr. 4. Cílem je využít co největší plochu pod touto křivkou, tj. využít co nejvíce průtokového spektra. Vzhledem k tomu, že většina běžných turbín má využitelný průtok do asi 40% průtoku návrhového, nebylo by při použití pouze jednoho soustrojí možno využít malých průtoků a elektrárna by byla odstavena po několik měsíců v roce; nebo by bylo nutno volit turbínu s nižší hltností, což by zase znamenalo nemožnost využití průtoků vyšších.

V našem případě se jedná o horský tok s poměrně nestálým průtokem a relativně vysokým dosažitelným spádem, kde se jako vhodné jeví použití alespoň dvou Peltonových turbín nestejně



Obr. 5 – Diagram použitelnosti turbín^[4]

hltnosti, případně některé mutace Bánkiho turbíny uzpůsobené pro vyšší spád. Vhodným kandidátem by mohla být např. průtoková turbína Ossberger, která je dvoukomořtová, dělená 1:2 a je schopna zpracovat průtoky do 16% hltnosti s účinností přes 85% a průtok do 4% Q_H ještě s účinností kolem 70%.^[6] Toto řešení by umožňovalo energetické využití průtoku mezi Q_{60d} a Q_{250d} . Hydraulický systém bude tedy navrhován na max. průtok $0,45 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$.

Pro předběžný výpočet teoretického dosažitelného výkonu použijeme empirický vztah z literatury [2], který je pro MVE následující:

$$P = (5 \text{ až } 7) \cdot Q \cdot H \quad [\text{kW}] \quad (3.1),$$

kde Q je návrhový průtok [$\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$],
 H je hrubý spád [m].

Návrhový průtok se zvolí na základě výše uvedené úvahy 450 l s^{-1} , potom :

$$P = 6 \cdot 0,45 \cdot 80 = 216 \text{ kW} \quad (3.2).$$

Z toho vyplývá, že na základě rozdělení dle tab. 1 v ČSN 75 26 01 se bude jednat o MVE II. kategorie.

3.2.2. Návrh odběrného objektu

Vtokový objekt je součástí každé MVE a jedná se o jeden z nejdůležitějších objektů stavebně hydraulické části MVE. Úkolem vtokového objektu je zajistit přívod vody pro turbíny, a to s co nejmenšími ztrátami, po celou dobu životnosti díla. Konstrukční části vtokového objektu musí být odolné proti namrzání. Další funkce vtokového objektu jsou :

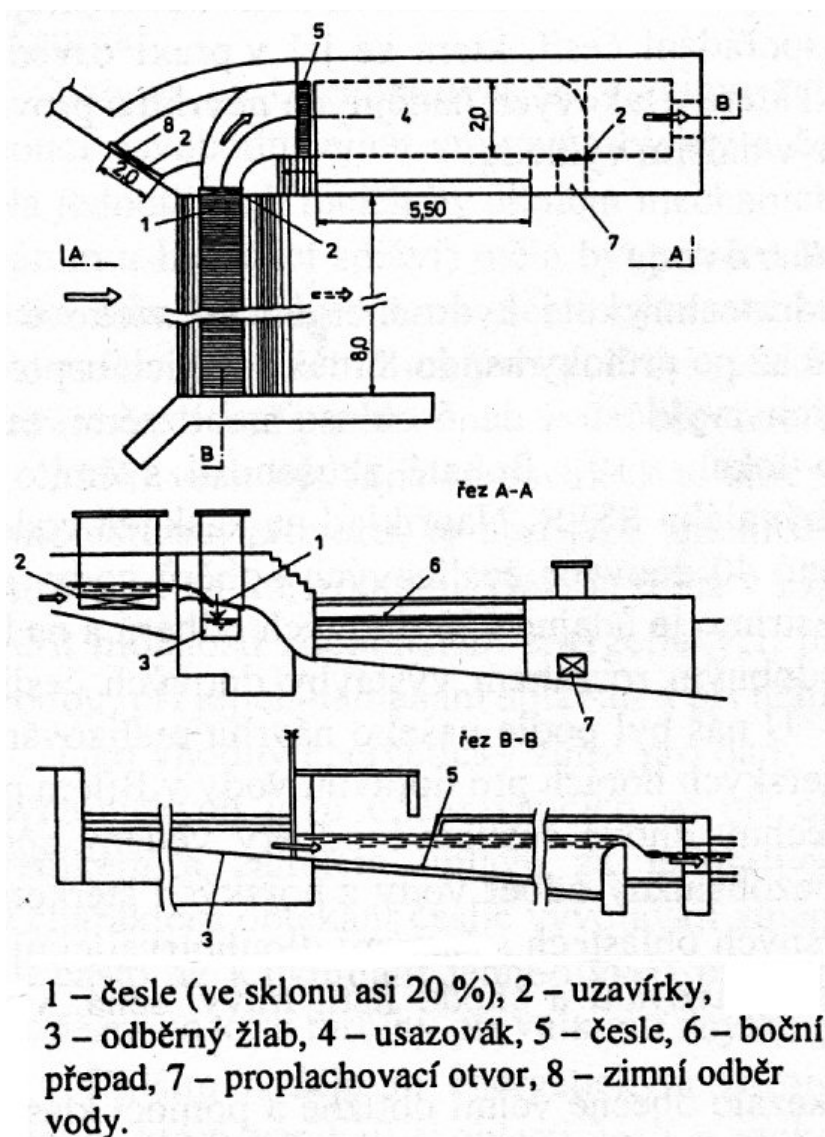
- Zajištění separace splavenin, jak hrubých, tak jemných (písek, štěrky)
- Zamezení vnikání vzduchu do hydraulického systému vodních turbín a naopak zavzdušnění tlakového přivaděče při odstavení turbín z provozu

Vtokové objekty je možno rozdělit dle několika kritérií, základní dělení je na beztlakové, tlakové a speciální.

Beztlakové – slouží pro odběr vody do beztlakových přivaděčů, proudění vody je zde beztlakové, o volné hladině. Jejich konstrukce obvykle obsahuje norné stěny, práh ve dně a hrubé česle pro zachycování splavenin.

Tlakové – používají se pro odběr vody buď přímo na turbínu nebo do tlakového přivaděče. Vstupní potrubí přivaděče musí být u těchto objektů umístěno vždy pod hladinou vody. Konstrukčně bývají vybaveny jemnými česlemi, hrazením a rychlouzávěrem pro odstavení hydraulického systému, za ním bývá ještě zavzdušňovací potrubí.

Speciální – jedná se o tzv. dnové odběry a vtokové objekty pilřových vodních elektráren. Dnové česlicové odběry jsou vyvíjeny především pro bezobslužný odběr vody z horských šterkonosných potoků, v klimaticky drsných podmínkách s častými dlouhotrvajícími mrazy, kde se mj. očekává nadměrné splavování větví, trávy, listí ap. Tyto odběry jsou použitelné pro průtoky od velmi malých až do $8 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Vzhledem k tomu, že naše lokalita splňuje uvedenou charakteristiku,



Obr. 6 – Charakteristické uspořádání dnového odběru^[1]

zajištěna samoobslužnost tohoto odběrného objektu.^[1]

Hydraulický návrh dnového česlicového odběru spočívá především v určení rozměrů česlicových polí, která zakrývají sběrný žlab a zabezpečují propad potřebného průtoku vody.

V literatuře [1] lze najít pro výpočet plochy česlí následující vztahy :

$$q_{\check{c}}^{2/3} = 1,899 \cdot \alpha \cdot \mu \cdot \varepsilon \cdot L \quad (3.3)$$

kde :

$q_{\check{c}}$ – průtok vody propadající česlemi o délce 1m [$\text{m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ m}^{-1}$],

α – součinitel provozního zanesení česlí.

jeví se použití vtokového objektu s dnovým odběrem jako nejvhodnější.

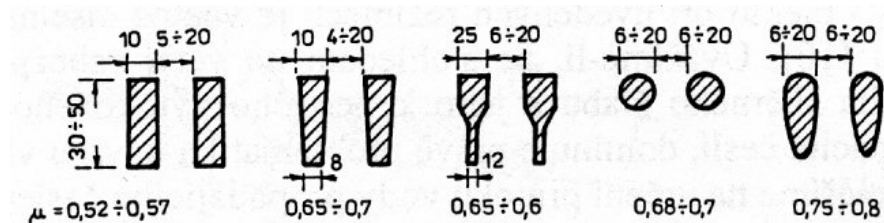
Charakteristické uspořádání dnového odběru je na obr. 6. Základem je betonový nebo zděný vzdouvací práh, který je překryt hustě osazenými jemnými česlemi s velkým sklonem po vodě (10-20%). Odebíraná voda se na česlích zbaví hrubších nečistot, propadá do sběrného žlabu, a dále se přes usazovák vede k tlakovému vtoku do trubního přivaděče. Usazovák bývá na konci opatřen proplachovacím zařízením a v boku jalovým přelivem. Tam, kde není zaručena nenamrzavost česlí, bývá objekt opatřen hrazeným zimním odběrem vody, z něhož jsou česle vynechány. Za provozu dnového odběru propadá až do velikosti návrhového průtoku všechna voda do sběrného žlabu a na konci česlí se hromadí zachycované splaveniny. Při velkých průtocích přepadá část vody přes dolní stěnu odběrného žlabu a postupně odplavuje dříve zachycené splaveniny, čímž je

$\alpha = 0,33$ – předpokládané provozní zanesení česlí na 67% (ve značně nepříznivých lokalitách, nesoucích i jemný písek, štěrk, kameny velkých rozměrů, větve, vegetace, nepříznivé klimatické poměry, v zimě tvorba kašovitého ledu),

$\alpha = 0,50$ – předpokládané provozní zanesení česlí na 50% (stejně složení splavenin a stejné klimatické poměry jako v předchozím případě, ale málo vegetace),

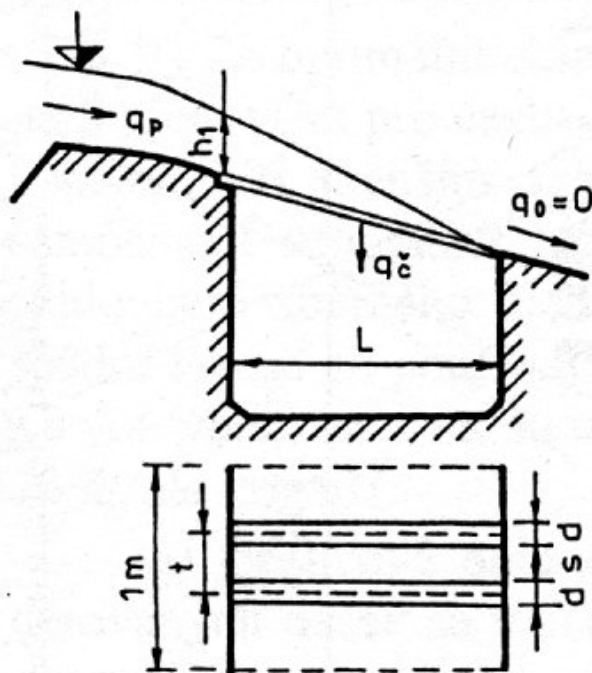
$\alpha = 0,75$ - předpokládané provozní zanesení česlí na 25% (chudá vegetace okolo vodního toku, lepší klimatické poměry než v předchozích případech, malá pravděpodobnost tvorby kašovitého ledu),

μ – koeficient propadu česlí dle obr. 7,



Obr. 7 – Experimentálně získaný koeficient propadu v česlích dnových odběrů^[1]

ε – součinitel hustoty česlí, který je definován vztahem $\varepsilon = s(s + d)^{-1}$ (3.4)
dle obr. 8,



L – vstupní šířka sběrného žlabu [m] – dle obr. 8.

Pro předběžný výpočet ve zvolené lokalitě budeme počítat s následujícím prostorovým uspořádáním :

$$s = 20\text{mm}$$

$$d = 10\text{mm}$$

$$\alpha = 0,33$$

$$\mu = 0,8 \text{ (kapkovitý tvar česlic)}$$

$$L = 1\text{m}$$

potom

$$\varepsilon = 0,02(0,02 + 0,01)^{-1} = 0,66667 \text{ (3.5)}$$

Obr. 8 – Návrhový režim dnového odběru vody^[1]

$$q_c^{2/3} = 1,899 \cdot 0,33 \cdot 0,8 \cdot 0,66667 \cdot 1 = 0,3342 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ m}^{-1} \text{ (3.6),}$$

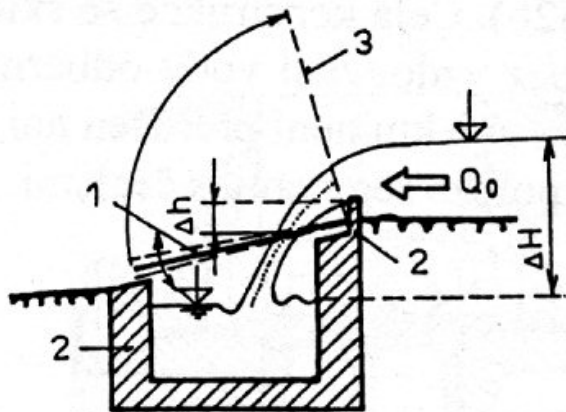
z toho plyne

$$q_c = \sqrt{0,3342^3} = 0,1932 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ m}^{-1} \text{ (3.7),}$$

$$\text{délka česlí pro max. návrhový průtok } 0,45 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} : z = \frac{0,45}{0,1932} = 2,33 \text{ m} \text{ (3.8).}$$

Detailní řešení jezu je věcí DSP a prováděcí dokumentace stavební části, zde uvedeme pouze obecná doporučení získaná na základě provozních zkušeností z obdobných již vybudovaných objektů.

Šířka betonového sběrného žlabu se navrhuje konstantní, obvykle 0,5 - 1,5m, hloubka, resp. sklon se volí tak, aby při návrhovém průtoku dosahovala střední rychlost proudění $2 - 3 \text{ m s}^{-1}$.



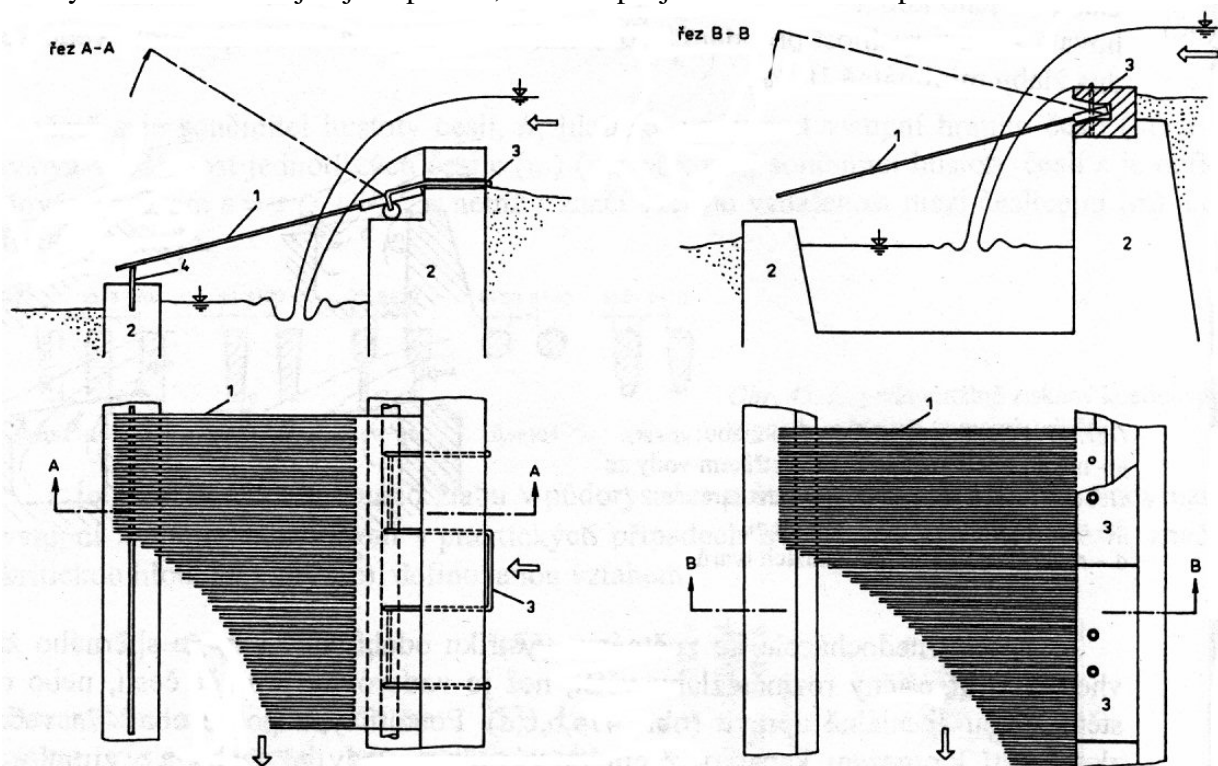
Obr. 9 – Ztráta na spádu ΔH zajišťující samočisticí schopnost dnového odběru vody^[1]

Příčný rozměr žlabu by měl být větší než je vodorovný průměr česlí, příp. by měl být tvar žlabu upraven tak, aby nedocházelo ke zpětnému výstřiku vody ze žlabu, což vede k omezení kapacity a v zimě k namrzání koruny povodňní zdi žlabu.

Sklon česlí by se měl volit mezi 20 – 10% po vodě. Vyšší hodnota platí pro česlice upevněné na obou koncích (v rámech), nižší potom pro česlice s volnými konci na povodňní straně (obr. 10-II). Česlicová pole by měla být zásadně zhotovena z jednotlivých prutů, použití děrovaných desek se neosvědčilo.

Vhodný tvar česlic je kapkovitý nebo kruhový, příp. klínovitý se skosenými hranami.

Jako materiál se osvědčily lamináty, armované plasty, příp. u menších odběrů i dřevo. Tyto materiály téměř nenamrzají a jsou pružné, čímž zlepšují samočisticí schopnost česlí.



alt. I: 1 – jednostranně kotvené česlice, 2 – zdi sběrného žlabu, 3 – úvaz rámu česlí pomocí silonového lana, 4 – pryžová opěra.

alt. II: 1 – hřebenovitá česle bez dolní opěry, 2 – zdi sběrného žlabu, 3 – speciální prefabrikát pro připojení česlic.

Obr. 10 – Příčný řez dnovým odběrem s hřebenovitými česlemi ze skelných laminátů^[1]

Při údržbě a opravách česlí a celého zařízení vtoku je třeba zajistit vstup do sběrného žlabu na suchu, proto se doporučuje zřídit před česlemi drážky na provizorní hrazení. Jednotlivá česlicová pole mají být lehce odnímatelná.

Je vhodné vybavit návodní stranu sběrného žlabu zvýšenou přelivnou hranou (alespoň 10 cm vysoká), viz obr. 9, 10. Proud vody potom dopadá na česlice z větší výšky a rozvibrovává je, čímž se splaveniny posunují dále po toku.

Příklad řešení dnového odběru tzv. Tyrolského typu je na obr. 4 v příloze 1. Dnové odběry vykazují určitou trvalou ztrátu na provozním spádu (viz obr. 9), která bývá mezi 0,2 – 0,5m, proto se jejich využití jeví jako nejvýhodnější u vodních děl s velkými a středními spády a v případech značně komplikovaných splaveninových poměrů vodoteče. Ztráta na spádu je kompenzována bezobslužností a samočisticí schopností česlí bez použití vnějších prostředků. Navíc je nutno konstatovat, že ztráty na spádu se projevují i u klasických odběrů vlivem provozního zanesení česlí, které je potom nutno čistit pomocí externích zařízení, příp. ručně.^[1]

3.2.3. Návrh přivaděče vody

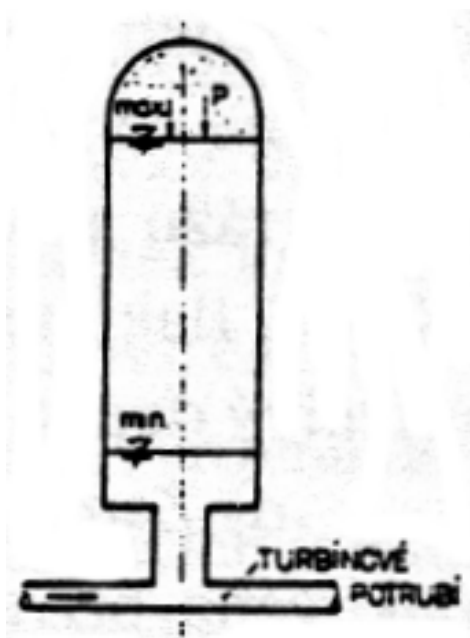
Přivaděče a odpady slouží k vedení vody na turbíny a k odvedení vody od turbíny poté, co jí předala svou energii. Základními kritérii při jejich navrhování jsou co nejmenší hydraulické ztráty a ekonomická efektivita. V případě derivačních MVE slouží přivaděče především k soustředění spádu příp. jeho zvýšení. Bývají obvykle delší a tedy i dražší a je třeba posuzovat vyšší investici

v poměru ku zvýšení výroby el. energie pomocí zvýšení spádu. Základní dělení přivaděčů z hydraulického hlediska je na beztlakové (s volnou hladinou) a tlakové.

Beztlakové přivaděče mohou mít formu kanálů, náhonů a žlabů a mohou být buď odkryté nebo zakryté. Tlakové přivaděče se staví jako potrubní systém z různých materiálů (ocel, železobeton, plasty).

V našem případě, kdy většina přivaděče bude vedena po cizích pozemcích a převážně ve svažitém lesním terénu, se jeví jako nejsnazší varianta použití potrubního tlakového přivaděče v celé trase. Jeho nevýhodou jsou mimo poměrně vysokých pořizovacích nákladů též větší ztráty na spádu než je tomu u přivaděčů s volnou hladinou. Určení těchto ztrát je součástí návrhu přivaděče a bude mít vliv na konečný výběr a stanovení parametrů technologie MVE.

Přivaděč bude rozdělen do dvou částí, jak již bylo popsáno v kap. 3.2.1, první část bude dlouhá s malým klesáním a bude zaústěna do vyrovnávací komory ve stráni nad budovou MVE, odkud bude pokračovat potrubím s velkým klesáním do suterénu budovy MVE.



Obr. 11 – Pneumatická vyrovnávací komora^[2]

První část přivaděče bude provedena potrubím z vysoko hustotního lineárního polyetylenu PE-HD, typ SDR17^[26], které bude uloženo pod zemí. Trasa tohoto potrubí bude po ca každých 100m osazena revizní šachtou. Tak jako zbytek přivaděče, i vyrovnávací komora bude v podzemní šachtě přístupné shora. Z toho vyplývá, že bude pod úrovní horní hladiny a je třeba použít komoru uzavřenou – pneumatickou (viz obr.11). Vyrovnávací komora plní několik funkcí :

- zmenšuje výkyvy tlaků, způsobené hydraulickým rázem, které vyvolávají náhlé změny odběru turbín při náhlých změnách zatížení
- zamezuje šíření tlakových vln od hydraulického rázu do horní části tlakového přivaděče, jež je potom zatěžován pouze hydrostatickým tlakem daným nejvyšší polohou hladiny v horní nádrži (u jezu) a v komoře samotné

- vyrovnává prudké rozdíly mezi přítokem vody dodávaným dlouhým přivaděčem a průtokem, který odebírají turbíny tlakovým potrubím. Při náhlém zvětšení odběru vody turbínami se vlivem setrvačnosti rychlost vody v dlouhém přivaděči nezvětší hned, ale postupně, přičemž potřebný přírůstek průtoku se dodává z vyrovnávací komory. Při náhlém zmenšení odběru turbínami se naopak přebytek vody akumuluje ve vyrovnávací komoře. [2]

Vyrovňovací komoru je třeba zásadně navrhovat jako součást celého systému, na základě charakteristik jeho jednotlivých prvků (potrubí, turbíny a jejich regulátory, generátor). Vzhledem k tomu, že se jedná o složité výpočty řešené v praxi obvykle numericky pomocí počítačových programů, nebude zde výpočet vyrovnávací komory prováděn.

Druhá část přivaděče za vyrovnávací komorou bude provedena potrubím SDR11^[26] ze stejného materiálu jako v první části přivaděče, ale s max. provozním tlakem 16 bar. Potrubí bude uloženo v zemi, s velkým klesáním a na konci bude zaústěno do strojovny MVE. Zde budou osazeny regulační a bezpečnostní prvky. Regulace bude prováděna pomocí regulačních klapky turbíny, stejně jako odstavení. Aby se zamezilo hydraulickým rázům způsobeným prudkým uzavřením přívodního potrubí, bude uzavírání regulačních prvků ve všech případech pozvolné, podrobnosti jsou v kap. 4.1.2 a 4.3.2.1. Hydraulický ráz vyvolává tlakovou vlnu, která se šíří proti směru proudění rychlostí 800 - 1100 m.s⁻¹ a způsobuje přírůstek tlaku jež je rovný zhruba stonásobku rychlosti proudění vody. Toto má za následek extrémní namáhání tlakového potrubí. [1] Odpadní kanál se využije stávající.

V první fázi musíme určit světlost (průměr) potrubí a na základě něho určit další parametry a ztráty. Volbu světlosti potrubí ovlivňuje několik faktorů

- požadovaný maximální průtok
- střední rychlost proudění
- cena potrubí

Tyto se navzájem ovlivňují a úkolem návrhu je provést jejich vzájemnou optimalizaci.

V literatuře [2] lze najít empirické vztahy pro volbu hospodárného průměru potrubí. Pro spád do 100m lze použít např. vztah

$$D_H = \sqrt[3]{0,052 \cdot Q^3} \quad (3.9),$$

kde D_H [m] je světlý průměr potrubí,
 Q [m³ s⁻¹]- největší průtok

Pro náš případ $D_H = \sqrt[3]{0,052 \cdot 0,45^3} = 0,4655m$, budeme tedy uvažovat s nejbližší vyšší jmenovitou světlostí potrubí – 500mm.

$$\text{Průřez takového potrubí je } S = \pi \cdot r^2 = \pi \cdot 0,25^2 = 0,1963m^2 \quad (3.10).$$

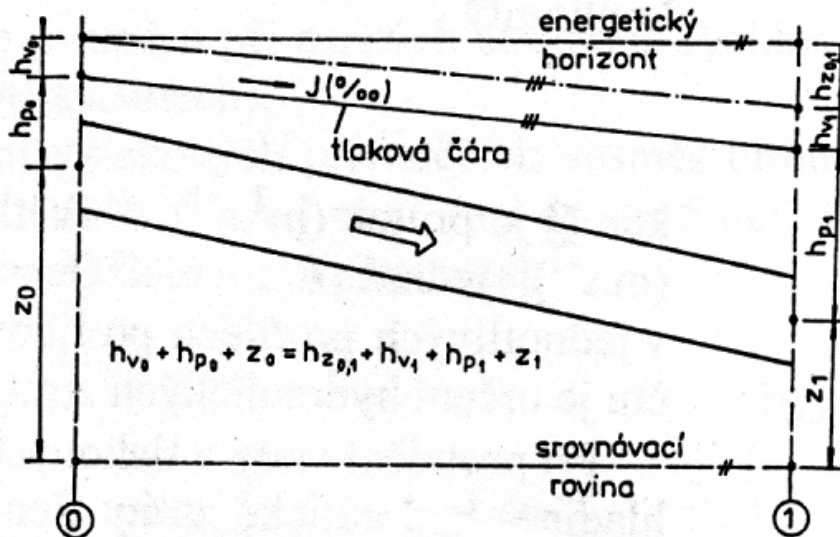
Dále prověříme pro takto spočítanou světlost rychlost proudění vody v přivaděči. Vyjdeme ze zjednodušené podoby rovnice kontinuity (pro nestlačitelné kapaliny a konstantní veličiny)

$$Q = A \cdot v \quad (3.11),$$

kde Q [m³ s⁻¹] je průtok vody v přivaděči,
 A [m²] – plocha průřezu přivaděče,
 v [m s⁻¹] – střední rychlost proudění v přivaděči.

$$\text{Pro světlost potrubí 500 mm a průtok 0,45 [m}^3 \text{ s}^{-1}] \quad v = \frac{0,45}{0,1963} = 2,29 \text{ m s}^{-1} \quad (3.12).$$

Doporučená návrhová rychlost vody pro přivaděče MVE je $1 - 3 \text{ m s}^{-1}$, tj. výše uvedená rychlost se pohybuje v horní polovině rozsahu. Hydraulické ztráty přivaděčů rostou přímo úměrně s jejich délkou, členitostí a rychlostí proudění vody v nich. S prvními dvěma veličinami nelze vzhledem k dispozici dané lokality nic udělat, bylo by tedy možno pouze snížit rychlost proudění vody. Toho lze dosáhnout zvětšením světlosti potrubí, ale vzhledem k cenovému rozdílu mezi světlostí 500 mm a nejbližší vyšší - 560 mm, který by pro daný přivaděč činil přes 2 mil. Kč, se toto jeví jako nevýhodné.



h_{v0}, h_{v1} (m) - kinetická energie, h_{p0}, h_{p1} (m) - tlaková energie, z_0, z_1 (m) - polohová energie, $h_{z0,1}$ (m) - ztrátová energie.

Obr. 12 – Schéma Bernoulliho rovnice tlakového přivaděče^[1]

čísla, jež lze vyjádřit vztahem :

$$Re = \frac{v \cdot D}{\nu} \quad (3.13),$$

kde D [m] je průměr potrubí
 ν [$\text{m}^2 \text{ s}^{-1}$] - kinematická viskozita. Pro vodu o teplotě 10°C $\nu = 1,317 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$.

Kritická hodnota Reynoldsova čísla, při které v tlakových přivaděčích kruhového profilu přechází proudění laminární do turbulentního, je teoreticky $Re_k = 2320$. Ve skutečnosti je však tento přechod plynulý v oblasti od $Re = 500$ pro velmi drsná potrubí až po $Re = 6000$ pro potrubí velmi hladká.

V přivaděčích MVE je ve většině případů proudění turbulentní.

Ztrátovou výšku příslušného úseku přivaděče lze spočítat pomocí vztahu pro sklon čáry využitelné energie :

$$J = \frac{h_z}{l} = \lambda \cdot \frac{1}{D} \cdot \frac{v^2}{2g} \quad (3.14),$$

Dalším krokem je určení hydraulických ztrát, tzv. ztrát spádu. Ty jsou dvojího druhu – ztráty třením, uplatňující se v celé délce přivaděče a ztráty místní – vtokové, v kolenech, obloucích, odbočkách, rozšíření, zúžení, uzávěrech ap. Při výpočtech se vychází z rovnice kontinuity zmíněné výše a z rovnice Bernoulliho (viz obr. 12).

Ztráty třením závisí především na charakteru proudění, tj. zdali se jedná o proudění laminární nebo turbulentní. Určujícím faktorem pro rozlišení obou druhů proudění je hodnota Reynoldsova

$$\text{z toho plyne } h_z = \frac{l \cdot \lambda \cdot v^2}{2 \cdot g \cdot D} \quad (3.15),$$

kde l [m] je délka přivaděče,
 v [m s⁻¹] - střední rychlost proudění vody,
 g [m s⁻²] - tíhové zrychlení,
 D [m] - průměr potrubí,
 λ - součinitel tření při turbulentním proudění.

Pro součinitel tření existuje několik empirických vzorců dle druhu materiálu a stavu používaného potrubí [1]. Pro potrubí z plastů lze použít vzorec Rusinův a Lobačevův :

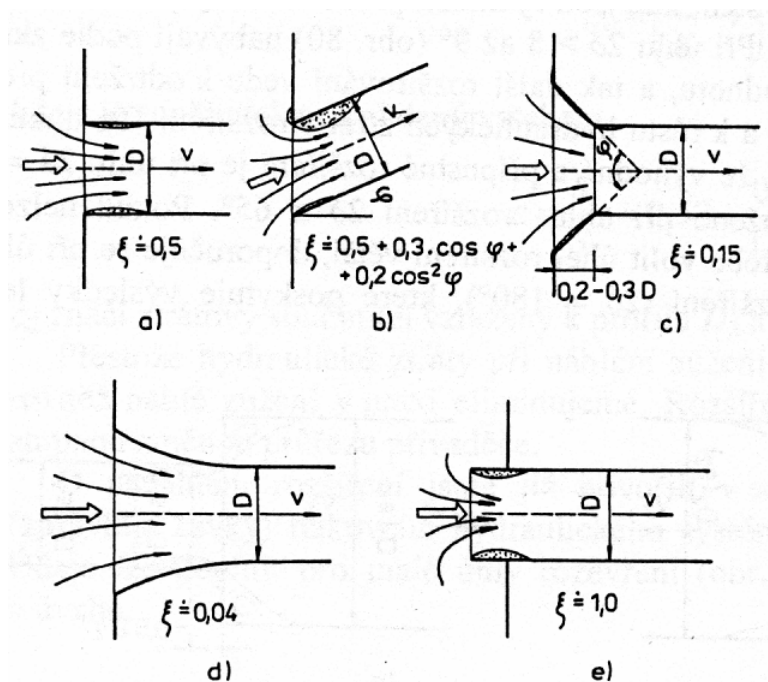
$$\lambda = \frac{0,246}{\text{Re}^{0,22}} \quad (3.16).$$

Popsaným způsobem lze prostřednictvím sklonu využitelné mechanické energie stanovit hodnotu hydraulických ztrát třením po celé délce přivaděče. Tyto ztráty tvoří obvykle největší část celkových hydraulických ztrát, zejména u dlouhých přivaděčů. Pro zpřesnění hodnoty celkových hydraulických ztrát je nicméně třeba stanovit i místní hydraulické ztráty. Tyto ztráty při turbulentním proudění jsou úměrné kvadrátu střední profilové rychlosti (za podnětovým prvkem) a lze je vyjádřit Weisbachovým vztahem :

$$h_z = \xi \frac{v^2}{2g} \quad (3.17),$$

kde v [m s⁻¹] je střední profilová rychlost za prvkem,
 ξ - ztrátový číselník závislý na druhu hydraulického odporu.

Vzhledem k tomu, že neznáme konstrukční detaily přivaděče, jež budou předmětem prováděcího projektu stavební části, určíme odhadem množství a typy podnětových prvků u jednotlivých částí přivaděče, pro ně vybereme z tabulek a grafů v literatuře [1] příslušné součinitele a na základě nich potom uděláme příslušné výpočty za použití vztahu (3.17) v MS-Excel. Výsledky jsou shrnuty v tabulkách níže.



Obr. 13 – Typy vtoků do tlakového přivaděče^[1]

1. část přivaděče :

1. Ztráta ve vtoku – předpokládána varianta c) dle obr. 18 , tj. $\xi = 0,15$
2. Ztráty v obloucích - uvažován 2x oblouk 90° s $R/D = 5$ $\xi = 0,118$
3. - 2x oblouk 60° s $R/D = 3$ $\xi = 0,131$
4. - 5x oblouk 45° s $R/D = 3$ $\xi = 0,109$
5. Zúžení - 600/500mm s úhlem přechodu $\delta=20^\circ$ $\xi = 0,2$

Rychlost proudění [m s ⁻¹]	Pořadí	ξ	Jednotlivá h_z [m]	Počet	Celková h_z [m]
2,29	1	0,15	0,04009251	1	0,0400925
2,29	2	0,118	0,03153944	2	0,0630789
2,29	3	0,131	0,03501412	2	0,0700282
2,29	4	0,109	0,02913389	5	0,1456694
2,29	5	0,2	0,05345668	1	0,0534567
h_z celkem [m]					0,3723258

Tab. 4 - Místní ztráty v první části přivaděče

2. část přivaděče :

1. Odbočení v přechodové komoře - $\xi = 0,3$ (odhad)
2. Ztráty v obloucích - 2x oblouk 60° s $R/D = 3$ $\xi = 0,131$
3. - 2x oblouk 30° s $R/D = 3$ $\xi = 0,072$
4. - 1x šoupátko $\xi = 0,02$
5. - 1x rozbočení na 2 turbíny s poměrem $Q_b/Q = 0,3$; $\delta=45^\circ$ a zaoblením hran $\xi = 0,43$

Rychlost proudění [m s ⁻¹]	Pořadí	ξ	Jednotlivá h_z [m]	Počet	Celková h_z [m]
2,29	1	0,3	0,08018502	1	0,080185
2,29	2	0,131	0,03501412	2	0,0700282
2,29	3	0,072	0,0192444	2	0,0384888
2,29	4	0,02	0,00534567	1	0,0053457
2,29	5	0,35	0,09354918	1	0,0935492
h_z celkem [m]					0,2875969

Tab. 5 - Místní ztráty ve druhé části přivaděče

Celkové místní ztráty v obou přivaděčích dohromady tedy tvoří ca 0,66 m při maximálním průtoku, přičemž se snižujícím se průtokem klesají. V dalších výpočtech tedy nebude při nižších průtocích než je maximální, z důvodu zjednodušení, s těmito ztrátami uvažováno.

V níže uvedených tabulkách jsou vypočtené ztráty třením na základě vztahů (3.11)-(3.16) pro jednotlivé průtoky a to pro každou část přivaděče zvlášť a zároveň celkové ztráty spádu v celém přivaděči.

M [dní]	59	90	120	150	180	210	240	250
Q [m ³ s ⁻¹]	0,45	0,323	0,243	0,184	0,139	0,102	0,07	0,055
v [m s ⁻¹]	2,29241	1,645441	1,237901	0,937341	0,7081	0,519613	0,356597	0,280183
Re	870314,9	624692,7	469970,1	355862,1	268830,6	197271,4	135382,3	106371,8
λ	0,01214	0,013058	0,013902	0,014779	0,01572	0,016828	0,018281	0,019277
h_{z1} [m]	15,60749	8,649583	5,211873	3,176804	1,928329	1,111535	0,568708	0,37022

Tab. 6 - Ztráty třením v první části přivaděče

M [dní]	59	90	120	150	180	210	240	250
Q [m ³ s ⁻¹]	0,45	0,323	0,243	0,184	0,139	0,102	0,07	0,055
v [m s ⁻¹]	2,2924096	1,645441	1,237901	0,937341	0,7081	0,519613	0,356597	0,280183
Re	870314,95	624692,7	469970,1	355862,1	268830,6	197271,4	135382,3	106371,8
λ	0,0121397	0,013058	0,013902	0,014779	0,01572	0,016828	0,018281	0,019277
h _{z2} [m]	0,9104367	0,504559	0,304026	0,185314	0,112486	0,06484	0,033175	0,021596

Tab. 7 - Ztráty třením ve druhé části přivaděče

M [dní]	59	90	120	150	180	210	240	250
Q [m ³ s ⁻¹]	0,45	0,323	0,243	0,184	0,139	0,102	0,07	0,055
h _{zc} [m]	17,177923	9,504142	5,515899	3,362117	2,040814	1,176374	0,601882	0,391817

Tab. 8 - Celkové ztráty v přivaděči

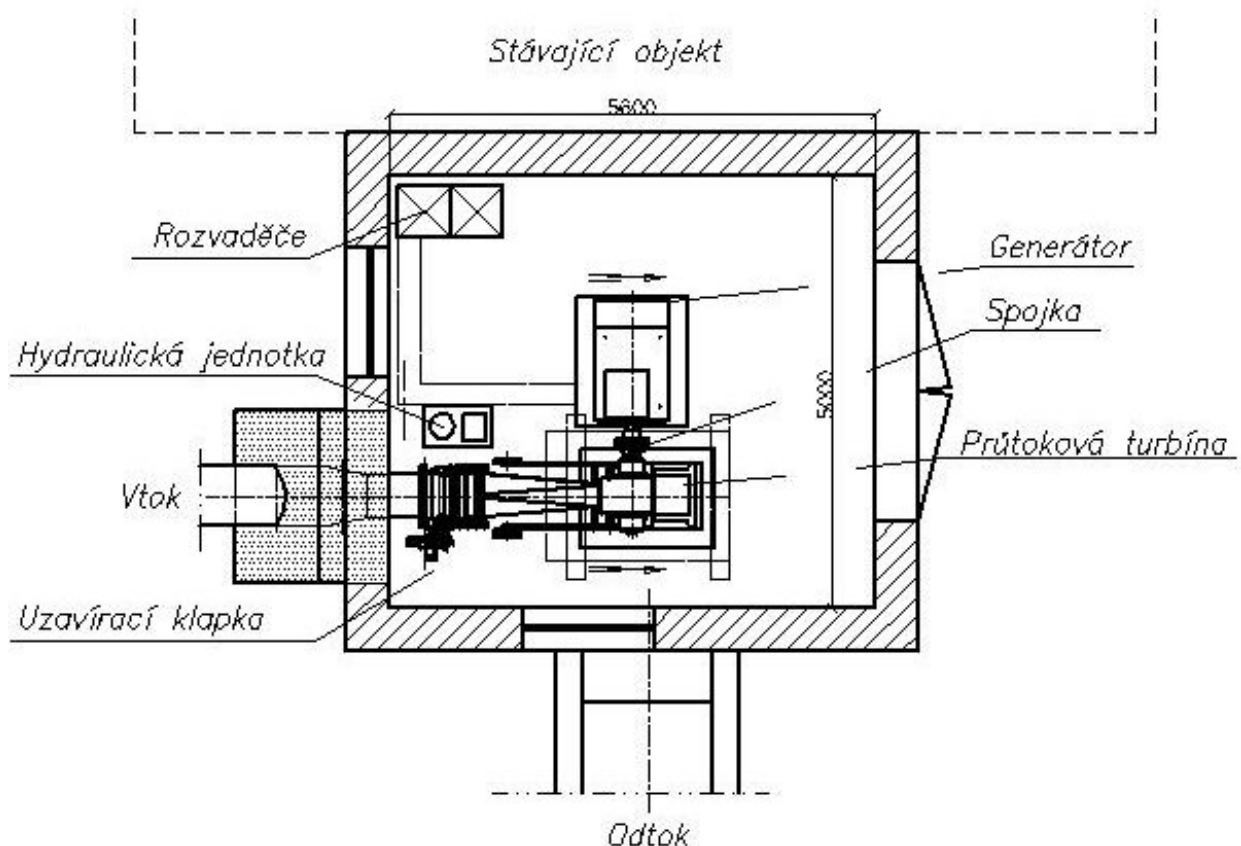
Pro nejvyšší průtok Q_{59d} byly započteny i místní ztráty, pro ostatní průtoky je počítáno pouze se ztrátami třením v obou částech přivaděče, místní ztráty zde zanedbáváme.

4. Zařízení MVE

4.1. Strojovna MVE

4.1.1. Stavební část

Za severovýchodní stěnou stávajícího objektu (obr. 5 v příloze 1) bude třeba dostavět novou budovu strojovny. V tomto místě je vyveden částečně zakrytý odpadní kanál stávající elektrárny,

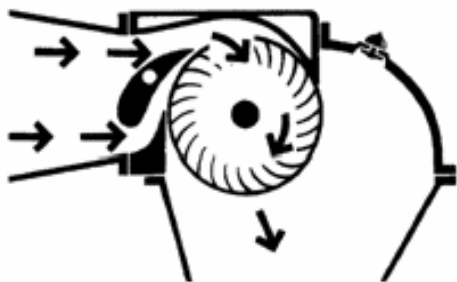


Obr. 14 – Navrhované uspořádání strojovny

který se využije i pro novou technologii. Přivaděč vody bude při pohledu na obr. 5 v příloze 1 ústít do strojovny z levé strany. Předpokládané uspořádání technologie ve strojovně je na obr. 14. Detailní umístění a provedení strojovny bude řešeno v DSP, mj. s přihlédnutím k posudku statika.

4.1.2. Strojní část

4.1.2.1. Popis



Obr. 15 – Průtok vody turbinou Ossberger^[6]

Strojní část tvoří vodní turbína a její příslušenství. Základní dělení vodních turbín je na rovnotlaké (akční), např. Peltonovy nebo Bánkiho a přetlakové (reakční), např. Kaplanovy nebo Francisovy. Jak již bylo zmíněno v kap 3.2.1, pro náš případ bude použita průtoková turbína systému Ossberger dodávaná v ČR firmou CINK k.s.

Průtoková turbína je radiální, mírně přetlaková turbína, s tangenciálním ostřikem lopatek oběžného kola, s horizontální hřídelí. Podle specifických otáček patří k pomaloběžným turbínám. Proud vody usměrňuje rozváděcí ústrojí tak že vstupuje lopatkovým věncem do

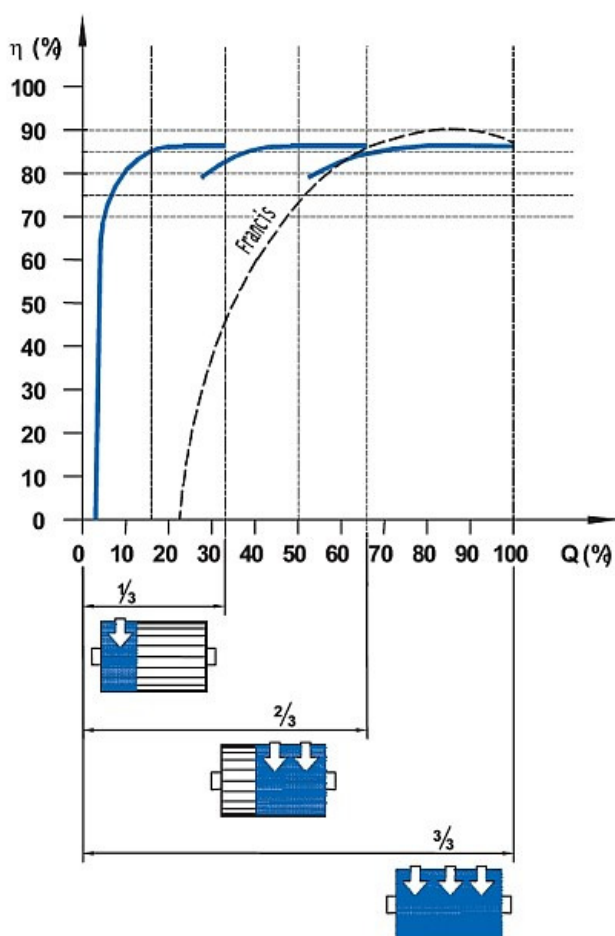
vnitřního prostoru oběžného kola, pokračuje dále druhým průtokem lopatkovým věncem z vnitřku kola ven, do prostoru skříně turbíny. Ze skříně turbíny voda odtéká buď volně, nebo savkou do vývaru pod turbinou (obr. 15).

Pokud je množství vody ve vodním toku proměnlivé, je průtoková turbína stavěna jako dvoukomorová. Standardní rozdělení nátokových komor je v poměru 1:2. Užší komora zpracovává malý a širší komora střední průtok vody. Obě komory dohromady zpracují plný průtok.

Tímto rozdělením je množství vody využito v rozmezí plného průtoku až do jeho 1/6 s optimální účinností. Celková účinnost průtokových turbín u malých spádů a výkonů v celé oblasti průtoku dosahuje 84%. Pro střední a větší turbíny je na vyšších spádech dosahováno účinnosti až 87% (obr. 16).

Skříň průtokové turbíny je vyrobena z konstrukční oceli, je velmi robustní, odolná proti nárazu a mrazu (obr. 6 v příloze 1).

V dělené průtokové turbíně je pracovní voda směřována dvěma silově vyváženými profilovými regulačními klapkami. Ty rozdělují vodní paprsek, vyrovnávají ho a nechají ho bezrázově vstoupit do oběžného kola – nezávisle na šířce komor. Obě otočné regulační klapky jsou přesně vsazeny do skříně turbíny a při menších spádech mohou sloužit i jako uzavírací orgán turbíny. Pak není nutné použít uzavírací armaturu mezi tlakovým potrubím a turbinou. Obě regulační klapky jsou nezávisle na sobě osazeny prodlouženými rameny,



Obr. 16 – Průběh účinnosti průtokové turbíny Ossberger^[6]

ke kterým je připojena automatická nebo ruční regulace. Regulační klapky jsou uloženy v samomazných pouzdrech a nevyžadují žádnou údržbu. Připojením závaží na konce ramen se dosáhne schopnosti gravitačního, nouzového uzavření turbíny v případě jejího odstavení. Nejdůležitější částí turbíny je oběžné kolo. To je osazeno lopatkami, které jsou vyrobeny z hlazené, tažené, profilové oceli. Oboustranně jsou vsazeny do koncových disků a svařeny dle speciálního postupu s vnitřními disky oběžného kola. Podle velikosti má oběžné kolo až 37 lopatek. Lineárně sešikmené lopatky vytváří jen nepatrnou osovou sílu, takže nejsou nutná zesílená axiální ložiska s jejich složitým upevněním a mazáním. U oběžných kol větší šířky jsou lopatky mnohonásobně podepřeny vloženými disky. Průběžné otáčky průtokových turbín činí většinou 2,3 násobek jmenovitých otáček. To umožňuje použití sériově vyráběných generátorů.

U průtokových turbín této konstrukce nedochází ke kavitaci, tudíž odpadá nutnost umístění oběžného kola pod hladinou spodní vody a s tímto spojené nákladné stavby a provozní nevýhody. Pro spády do 90m je při výrobě použita normální, konstrukční ocel. Pro spády 90 – 120 m je již oběžné kolo dodáváno z pevnostní nerezové oceli. U spádů nad 120m je nerezová celá turbína, včetně skříně a potrubních dílů.

Průtokové turbíny vynikají dlouholetou, bezúdržbovou životností. V průběhu provozu nepotřebují žádné drahé a složité náhradní díly, jejich případná oprava je většinou možná přímo v místě instalace. Specifickou výhodou průtokových turbín je možnost jejich využití v gravitačních systémech pitné vody, a to i na velice dlouhých trubních přivaděčích, kde při provozu nezpůsobují nežádoucí hydraulické rázy. ^[6]

Parametry použité turbíny :

- 2 – komorová průtoková turbína, G5.015/9g
- průměr oběžného kola: 500 mm
- šířka oběžného kola: 150 mm
- průměr hřídele: 90 mm
- jmenovité otáčky: 759/min,
- průběžné otáčky max. 1.520/min

4.1.2.2. Určení výkonu na turbíně

Pro výpočet dosažitelného čistého výkonu použijeme vztah :

$$P_t = 9,81 \cdot H \cdot Q \cdot \eta_t \quad (4.1),$$

kde P [kW] je čistý výkon,

H [m] - čistý spád,

Q [m³ s⁻¹] - průtok,

η_t – účinnost turbíny (hodnoty pro jednotlivé průtoky získány u výrobce).

Výsledky výpočtu jsou v následující tabulce :

M [dní]	59	90	120	150	180	210	240	250
Q [m ³ s ⁻¹]	0,45	0,323	0,243	0,184	0,139	0,102	0,07	0,055
H [m]	62,82	70,50	74,48	76,64	77,96	78,82	79,40	79,61
η_t	0,86	0,86	0,86	0,86	0,86	0,84	0,84	0,84
P [kW]	238,5	192,1	152,7	118,97	91,422	66,253	45,799	32,214

Tab. 9 - Výkon na turbíně při různých průtocích

4.2. Elektrická část MVE

Dle nezávazného vyjádření PDS bude třeba zdroj této velikosti připojit do DS na napěťové hladině 22kV. Výrobná bude vybavena pouze na paralelní chod s DS, ostrovní provoz nebude možný. Jednopolové schéma zapojení výrobní do DS je v příloze 1 na obr. 7. Ve strojovně budou instalovány následující 3 rozvaděče :

RG - hlavní rozvaděč pro vyvedení výkonu a připojení k trafostanici

RVS - rozvaděč pro vlastní spotřebu výrobní

RK - rozvaděč kompenzace vč. regulátoru, který bude připojen na přípojnice rozvaděče RG

Jednopolová schémata rozvaděčů (mimo RK) se nachází na obr. 8 v příloze 1.

Trafostanice bude kiosková, umístěná vedle strojovny, propojení mezi RG a nn rozvaděčem trafostanice se zrealizuje kabelem umístěným v zemi. Délka propojení ca 10m. Podrobnější popis jednotlivých částí schématu následuje.

4.2.1. Zkratové poměry

Vzhledem k tomu, že nejsou k dispozici přesné údaje o zkratovém výkonu sítě v připojovacím bodě, a celkový výpočet zkratových poměrů v celé síti přesahuje rámec této práce, byl proveden orientační výpočet pomocí sw nástroje pro modelování sítí NEPLAN. Jedná se pouze o zjednodušený model, protože ve skutečnosti jde o zauzlenou síť 22kV, do které pracují 3 transformovny 110/22kV a několik drobných výroben, v našem modelu se počítá pouze s transformovnou nejbližší k přípojnému místu a paprskovou sítí. Vychází se z následujících údajů, jež se podařilo opatřit od PDS :

Zkratový výkon nadřazené transformovny 110/22 kV Vrbno p. Pradědem :

$$S_{k''\max} = 174,8 \text{ MVA}$$

$$S_{k''\min} = 115,2 \text{ MVA}$$

Linka VN102 22kV : 970 m - lano AlFe6 120mm², 2890 m - lano AlFe6 70mm².

Pro analýzu zkratových poměrů ve střídavých sítích používá NEPLAN pravidla z publikace IEC 60909, která je identická s [25].

Asynchronní generátor byl emulován zadáním asynchronního motoru s opačným tokem výkonu, obdobně jako kompenzátor (spotřebič s čistě jalovou složkou, s opačným tokem výkonu).

Výsledky analýzy pro maximální (3f souměrný) a minimální (1f) zkrat jsou na straně 30 a 31 v příloze 2.

4.2.2. Generátor

Generátor bude asynchronní, mechanické připojení k turbíně bude přes spojku 1:1. Konkrétní typ bude upřesněn dodavatelem v rámci prováděcího projektu technologie. Pro účely této práce bude uvažováno s generátorem GAK355S8 dodavatele TES Vsetín s následujícími parametry :

Jmenovité napětí : $U_n = 400\text{V}$

Počet pólů / synchronní otáčky : 8 / 750 ot.s⁻¹

Max. příkon (na hřídeli) : $P_p = 268\text{kW}$ (dle výsledků v tab. x bude max. výkon na hřídeli 238,5kW)

Max. výkon (na svorkách) : $P_n = 255\text{kW}$

Účinník : $\cos \varphi_g = 0,86$

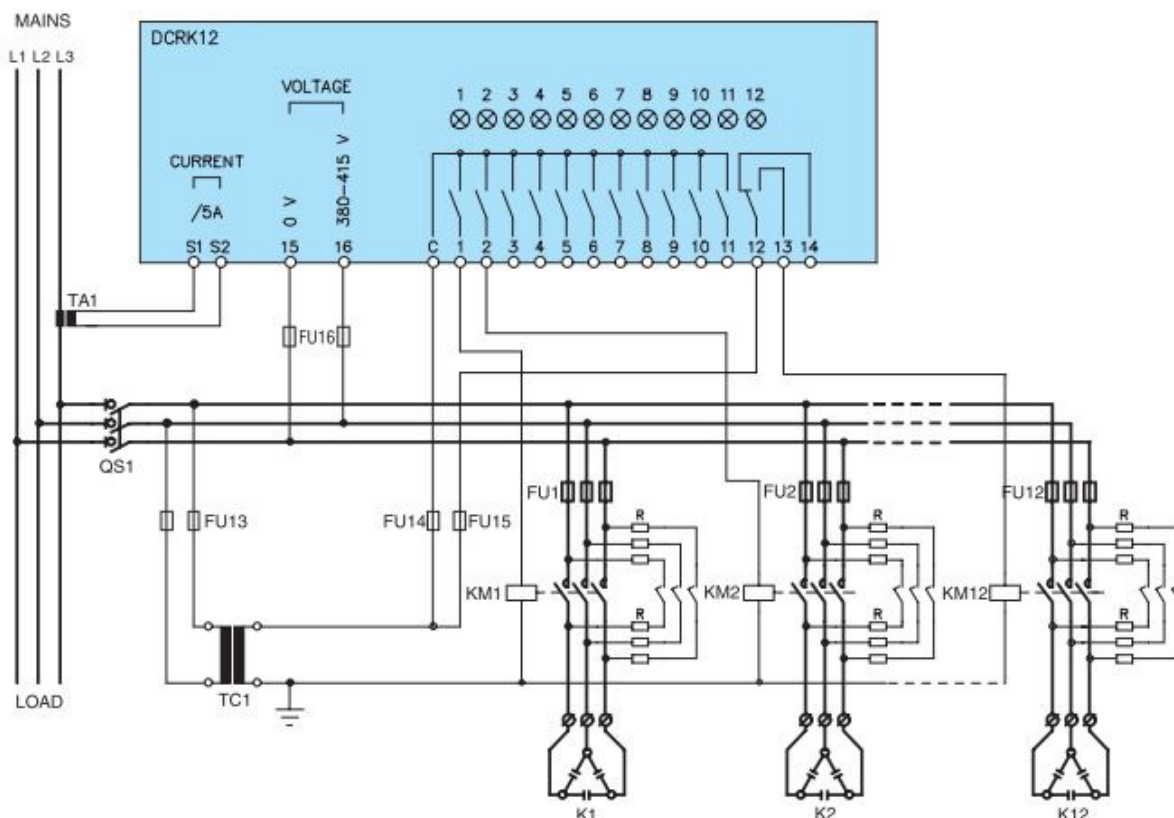
Účinnost : $\eta_g = 0,95$

Výkon na svorkách pro $P_p = 238,5\text{kW}$: $P_1 = P_p \cdot \eta_g = 238,5 \cdot 0,95 = 226,6 \text{ kW}$

Generátor bude připojen kabelem do rozvaděče RG (viz obr 8 v příloze 1).

4.2.3. Kompenzace jalového výkonu

Bližší podmínky pro způsob kompenzace jalového vč. konkrétních hodnot určí PDS v podmínkách připojení výroby. Dle kap. 9.3.2 [14] se obecně vyžaduje rozsah účinníku zdroje mezi 0,95 induktivní a 0,95 kapacitní, s tím, že jalový výkon výroby nad 100kVA má být říditelný. Použije se statický nehrazený pětistupňový kompenzátor s automatickým regulátorem. Předpokládá se prefabrikovaný nástěnný rozvaděč. Kompenzátor bude v případě odstavení výroby kompenzovat též chod transformátoru naprázdno. Příklad zapojení regulátoru od firmy Lovato je na obr. 17.



Obr. 17 – Schéma zapojení kompenzace jalového výkonu s regulátorem DRCK12^[10]

Určení potřebného výkonu kompenzační baterie pro max. použitelný výkon generátoru :

Jalový výkon nekompensovaného stroje :

$$\cos \varphi_g = 0,86 \Rightarrow \operatorname{tg} \varphi_g = 0,59,$$

$$Q = \operatorname{tg} \varphi_g \cdot P = 0,59 \cdot 226,6 = 133,7 \text{ kVAr} \quad (4.2).$$

Max. povolený jalový výkon (pro $\cos \varphi = 0,95$) :

$$\cos \varphi_k = 0,95 \Rightarrow \operatorname{tg} \varphi_k = 0,33$$

$$Q_k = \operatorname{tg} \varphi_k \cdot P = 0,33 \cdot 226,6 = 74,8 \text{ kVAr} \quad (4.3).$$

Potřebný minimální výkon kompenzační baterie :

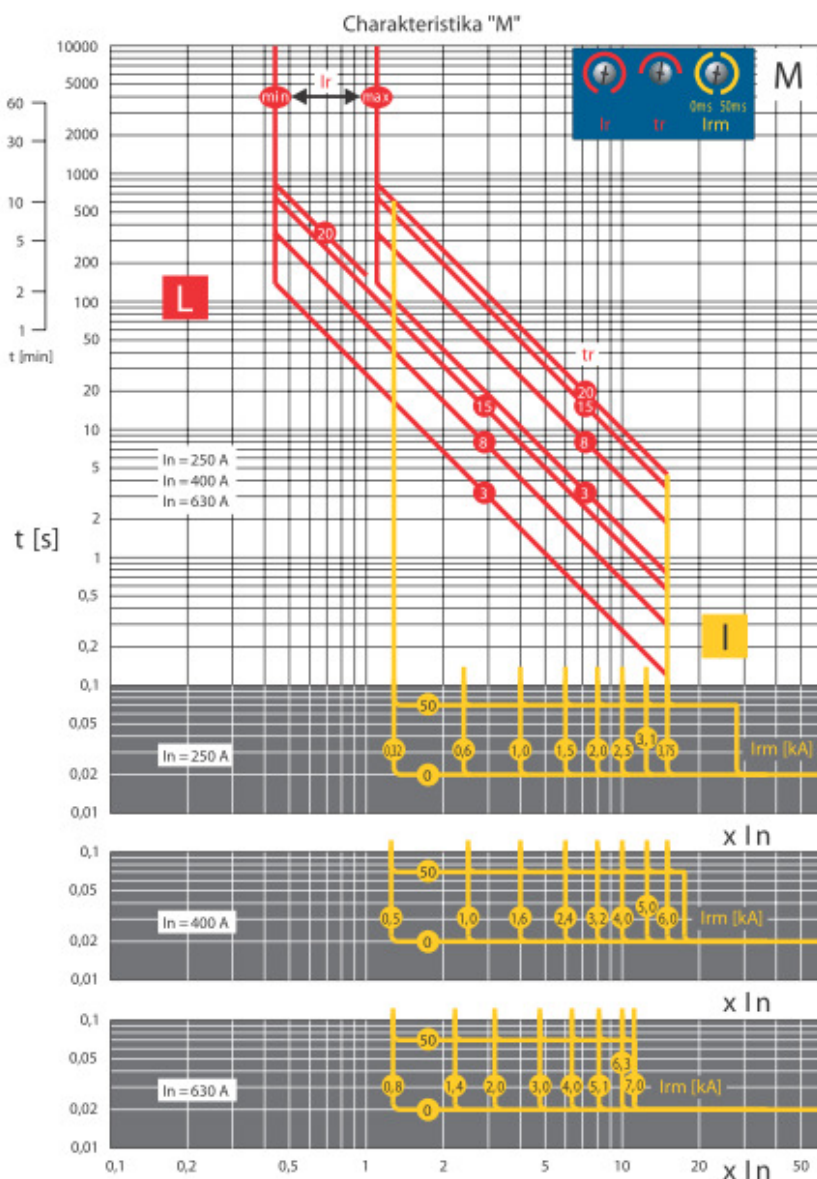
$$Q_c = Q - Q_k = 133,7 - 74,8 = 58,9 \text{ kVAr} \quad (4.4).$$

4.2.4. Rozvaděč vyvedení výkonu (RG)

Rozvaděč bude skříňový, samostatně stojící, vstup kabelů se předpokládá zespodu. Budou sem zaústěny přívody od generátoru, kompenzátoru a trafostanice a bude z něj napájen rozvaděč

vlastní spotřeby (RVS). V rozvaděči bude umístěno jištění hlavních obvodů, ovládací a signaliizační obvody pro generátor s ovl. napětím 230VAC a ochrany generátoru. Dále zde bude osazena kombinovaná přepět'ová ochrana, stupeň T1+T2 dle ČSN EN 61643-11.

4.2.4.1. Jištění



Obr. 18 – Vypínací charakteristiky kompaktních jističů Modeion^[23]

výkonu je řešena jako centrální a bude zapojena na přípojnice rozvaděče, nikoli přímo ke generátoru, je třeba počítat v tomto případě s účinnkem stroje bez kompenzace. Obdobně to bude platit při navrhování kabelu mezi generátorem a rozvaděčem.

$$I_{g \max} = \frac{226,6 \cdot 10^3}{\sqrt{3 \cdot 400 \cdot 0,86}} = 380 \text{ A} \quad (4.6).$$

I_r bude tedy nastaveno na 400A, což je nejbližší vyšší hodnota.

Pro jištění kompenzátoru se použije jistič (QF2) BD250SE305 se spouští SE-BD-0160-MTV8. Pro nastavení použijeme empirický vztah z literatury [16], kdy $I_n = 2,06 \cdot Q$ [A,-,kVAr]. Nastavení tedy bude $I_r = 125$ A.

Pro jištění generátoru se použije vhodný kompaktní jistič vybavený elektronickou spouští s ochrannou funkcí proti nadproudu (časově závislá charakteristika) a proti zkratu (okamžitá). Pro účely této práce se uvažuje s jističi Modeion od OEZ Letohrad.

QF1 - jistič BH630NE305 se spouští SE-BH-0630-MTV8 a motorovým pohonem. Jedná se o spoušť s charakteristikou vhodnou pro jištění motorů a generátorů (viz obr. 18) a nastavitelností I_n (v charakteristice označený jako I_r) v mezích od 250 do 630A.

Předpokládaný max. proud generátoru můžeme spočítat dle vzta-hu :

$$I_g = \frac{P_g}{\sqrt{3 \cdot U_s \cdot \cos \varphi}} \quad (4.5).$$

Vzhledem k tomu, že kompenzace jalovéhoho

K jištění vývodu pro RVS bude použit jistič BC160NT305-40-L, jedná se o jistič s pevným nastavením (40A) a charakteristikou vedení.

Jištění ovládacích obvodů a ochran se provede modulovými jističi.

4.2.4.2. Ochrany generátoru

Dle [8] mají být asynchronní hydroalternátory vybaveny následujícími ochranami :

- a) Nadproudová a zkratová, časově nezávislá - při $P < 500 \text{ kW}$ lze použít jistič
- b) Přetížení statoru
- c) Nadpět'ová a podpět'ová
- d) Zpětná wattová
- e) Nesouměrné zatížení (doporučuje se)
- f) Nadkmitočtová
- g) Nadproudová kompenzační baterie

V [14], kap. 8, se požadují obecně ochrany dvojstupňové a to podpět'ová/nadpět'ová, podkmitočtová/nadkmitočtová. Nicméně je zde též uvedeno, že po dohodě s PDS lze od druhého stupně upustit, s čímž se bude pro účely této práce počítat.

Ochrana ad a) bude provedena jističem QF1 popsáným v kap. 4.2.4.1.

Ochrana ad b) se zajistí pomocí teplotního spínače integrovaného ve vinutí generátoru, který bude rozpojovat obvod podpět'ové cívky jističe QF1 (viz. obr 9 v příloze 1).

Ochrana ad c), f) a podkmitočtová se realizuje ochranným relé HUF02b firmy O. Hromádka - Hydrohrom (ve schématech označeno A02).

Ochrana d), e) bude zajištěna kombinovaným přístrojem HZN01 od stejné firmy (ve schématech označeno A01). Ochrannou funkci proti nesymetrii obsahuje též spoušť jističe QF1.

Ochrana ad g) je realizována jističem QF2.

Popis, parametry a způsob zapojení použitých ochran Hydrohrom se nachází v příloze 3. Jedná se o zjednodušená kompaktní a cenově dostupná ochranná relé, vyvinutá speciálně pro účely chránění generátorů MVE.

4.2.4.3. Ovládací obvody 230 VAC

Liniové schéma ovládacích obvodů na napět'ové úrovni 230VAC je v příloze 1 na obr. 9. Tyto obvody se fyzicky nachází v rozvaděči RG, ale jsou napájeny přes jistič FA5 ze zdroje záložního napájení (UPS) umístěného v RVS. Toto řešení bylo zvoleno z důvodu zvýšení spolehlivosti, především s ohledem na použití podpět'ové cívky vypínače QF1 pro vypínání generátoru z popudu ochran. Signály a povelů mezi těmito obvody a ŘS jsou předávány pomocí vazebních relé (KAx), které musí splňovat požadavky na bezpečné oddělení ovládacích obvodů 230VAC a SELV (obvody ŘS) ve smyslu čl. 414.4 [20].

Obvod působení ochran je v linii 1, signalizace v liniích 2-4. Obvod je řešen jako pasivní, tj. při jeho přerušení nebo ztrátě ovl. napětí dojde k deenergizaci podpět'ové cívky a vypnutí generátorového vypínače. Výstupy ochran jsou zapojeny v sérii a kterýkoli z nich může přerušit obvod. Signalizace je zjednodušená, rozlišení působení jednotlivých ochran provede logika ŘS.

Obvody připojení generátoru (fázování) se nachází na linii 8,16,5,10 v tomto pořadí dochází k jejich působení. Popis fázovací sekvence se nachází v kap. 4.3.3.

Odpojení generátoru operátorem (povelem z ŘS) zajišťuje linie 6, linie 7 je napětí pro motor střadače gen. vypínače.

Ostatní linie jsou signalizace stavů a poruch, jejich význam je patrný z popisu ve schématu. Sumární porucha se tvoří paralelním zapojením poruchových kontaktů (nikoli signalizačních), tj. kterýkoli z nich aktivuje přísl. vazební relé.

4.2.5. Rozvaděč vlastní spotřeby (RVS)

Rozvaděč vlastní spotřeby bude samostatně stojící skříň obsahující záložní zdroj vč. přídavných akumulátorů a vývody pro technologická i netechnologická zařízení. Jednopolové přehledové schéma je na obr. 8 v příloze 1.

Záložní zdroj bude kategorie VI, v provedení do standardního rámu 19" o výkonu 1kW a bude doplněn přídavnými akumulátory (mimo vlastní jednotku UPS) se zálohovací dobou 12-ti hodin. Vzhledem ke ztrátovému teplu zdroje a akumulátorů se předpokládá ve skříni nucená ventilace. Jištění jednotlivých obvodů se provede modulovými jističi nebo motorovými spouštěči. Podrobnější řešení rozvaděče vč. případných ovládacích obvodů je věcí prováděcího projektu.

4.2.6. Trafostanice

Trafostanice bude kompaktní kiosková, umístěná vedle objektu MVE. Zjednodušené schéma je na obr. 7 v příloze 1. Pro účely této práce se uvažuje s typem CTSbb1x630/1-24 dodávaným firmou Eltraf, a.s. Transformátor bude hermetický olejový, se sníženými ztrátami a hlídáním teploty oleje: SGB DOTEL 250H 22/0,4kV, $S_n = 250\text{kVA}$, $P_o = 425\text{W}$, $P_k = 3250\text{W}$, $u_k = 4\%$, zapojení Dyn1.

Trafostanice je vybavená jímkou zabraňující případnému úniku oleje do životního prostředí. Rozvaděč vn bude osazen odpínačem a pojistkami PM45 20A OEZ Letohrad. Přiřazení pojistky je provedeno dle tab. 3 v [9].

Rozvaděč nn bude osazen jističem BH630NE305 se spouští SE-BH-0630-MTV8, základní nastavení se provede na jmenovitý proud transformátoru na straně nn, který získáme ze vztahu :

$$I_{2f} = \frac{S_n}{3 \cdot U_{2nf}} = \frac{250 \cdot 10^3}{3 \cdot 231} = 360,75\text{A} \quad (4.7).$$

Nejbližší nižší nastavení Ir je 360A.

Pro primární (síťový) proud platí :

$$I_{1n} = \frac{S_n}{\sqrt{3} \cdot U_{1n}} = \frac{250 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 22 \cdot 10^3} = 6,56\text{A} \quad (4.8).$$

Obchodní měření bude dle kap. 6 [14] polopřímé, na straně nn. Dle [19] se bude jednat o měření typu A, tj. průběhové měření elektřiny s dálkovým denním přenosem údajů. Elektroměr bude čtyřkvadrantový, umožňující měřit činnou i jalovou energii v obou směrech. Měřicí transformátory proudu (MTP), stejně jako pojistkový odpínač pro napěťovou část, budou osazeny v rozvaděči nn (R2). Vlastní elektroměr a komunikační zařízení PDS je v samostatné skříni RM, která je dodávkou a vlastnictvím PDS. Konkrétní podmínky pro připojení měřící soupravy jsou uvedeny v [17,18], požadovaná třída přesnosti MTP je v [19]. MTP budou mít následující parametry : 400/5A, 5VA, TP 0,5S. Napěťová část bude jištěna válcovými pojistkami s $I_n = 2\text{A}$. Část rozvaděče, ve které jsou osazeny přístroje pro obchodní měření musí být plombovatelná, zkušební svorkovnice bude součástí rozvaděče RM. Proudové okruhy budou připojeny třemi kabely CYKY 3x2,5 a napěťové kabelem CYKY 5x1,5, délka nemá přesáhnout 5m, jinak by bylo třeba zvýšit průřez kabelu a použít MTP o vyšší jmenovité zátěži.

V rozvaděči R2 se budou též nacházet ovládací a signalizační obvody pro ovládání úsečníku na začátku přípojky a signalizaci stavu všech pojistek a odpínačů na straně vn, teploty oleje transformátoru a stavu jističe na straně nn, případně další signalizace. Zároveň bude zajištěno působení kontaktu teplotního čidla v nádobě transformátoru na vypínací cívkou jističe QF (strana nn). Napájení těchto obvodů se předpokládá z nepřerušovaného zdroje (UPS).

Okolo trafostanice bude nutno vybudovat společné uzemnění pro vn a nn část v souladu s ČSN 332000-5-54 a ČSN EN 50522. Detaily ovládacích obvodů a uzemnění bude řešit prováděcí projekt.

4.2.7. Koordinace jištění

Při popisu v dalším textu budeme vycházet z přehledového schématu obr. č. 7 v příloze 1. Je uvažováno se dvěma základními provozními režimy :

1. Generátor přířazován, tok výkonu směrem do DS, snížen o vlastní spotřebu.
2. Generátor odpojen, výrobná ve stavu pohotovosti - tj. transformátor připojen do DS, napájí vlastní spotřebu.

Následující tabulka ukazuje žádané působení jisticích prvků při zkratech v různých místech schématu v obou výše jmenovaných režimech.

Režim 1						
Prvek Místo	QF1	QF2	QF3	QF	FU1	FU2
1	X ¹⁾	- ²⁾	-	- ¹⁾	X	-
2	X ³⁾	X ²⁾	-	X	-	-
3	X ⁴⁾	- ²⁾	-	- ⁴⁾	-	-
4	- ⁵⁾	X	-	-	-	-
5	-	-	X	-	-	-
Režim 2						
Prvek Místo	QF1	QF2	QF3	QF	FU1	FU2
1	-	-	-	-	X	-
2	-	X ²⁾	-	X	-	-
3	Vypnut	-	-	-	-	-
4	-	X	-	-	-	-
5	-	-	X	-	-	-

Tab. 10 - Matice žádoucího působení jednotlivých jističů při zkratech

Jištění jednotlivých prvků schématu je v našem případě poněkud komplikováno situací, že max. výkon použitého transformátoru je na hranici max. předpokládaného výkonu generátoru, resp. mírně pod ní. Nicméně použití výkonnějšího transformátoru je v tomto případě nevýhodné jak z hlediska investičního, tak z hlediska vyšších trvalých ztrát způsobených případným provozováním transformátoru 400kVA na max. 70% jmenovitého výkonu.

Jistič QF na sekundární straně transformátoru má I_r nastaven na 360A, jak bylo uvedeno v kap. 4.2.6, ale vypočtený proud generátoru na max. výpočtovém výkonu a při $\cos \varphi_g = 0,86$ je dle vztahu (4.6) 380A. Tento rozdíl bude vyrovnán kompenzací jalového výkonu generátoru v rozvaděči RG, tj. magnetizační proud generátoru nebude odebírán z transformátoru, ale z kompenzační baterie RK.

Proud generátoru při kompenzaci na $\cos \varphi = 0,95$ bude :

$$I_{g,0,95} = \frac{226,6 \cdot 10^3}{\sqrt{3 \cdot 400 \cdot 0,95}} = 344A \quad (4.9).$$

Tento proud bude ještě snížen o odběr vlastní spotřeby, takže max. předpokládaný proud mezi rozvaděčem RG a trafostanicí v režimu 1 je 340A. Předpokládá se, že případné proudové špičky, které mohou vznikat při náfázování generátoru nebo přepínání kompenzačních stupňů budou krátkodobé a lze je ošetřit vhodným nastavením zkratové spouště, tj. posunutím na vyšší hodnotu.

Prověření impedance ochranné smyčky dle [20], přiřazení jisticího prvku kabelům dle [21] a selektivity jištění bylo provedeno sw nástrojem "Sichr" výrobce jističů OEZ Letohrad. Tento nástroj ale neumí zahrnout zkratový příspěvek asynchronního stroje a počítá s tokem energie pouze v jednom směru, proto je třeba upravit dle této skutečnosti vstupy a některé výsledky interpretovat jiným způsobem nebo je ověřit ještě jinou metodou. To se týká především zkratových

poměrů ve schématu, kdy budeme brát v úvahu též výsledky výpočtů dle kap. 4.2.1. Výsledky výpočtů jsou v příloze 2.

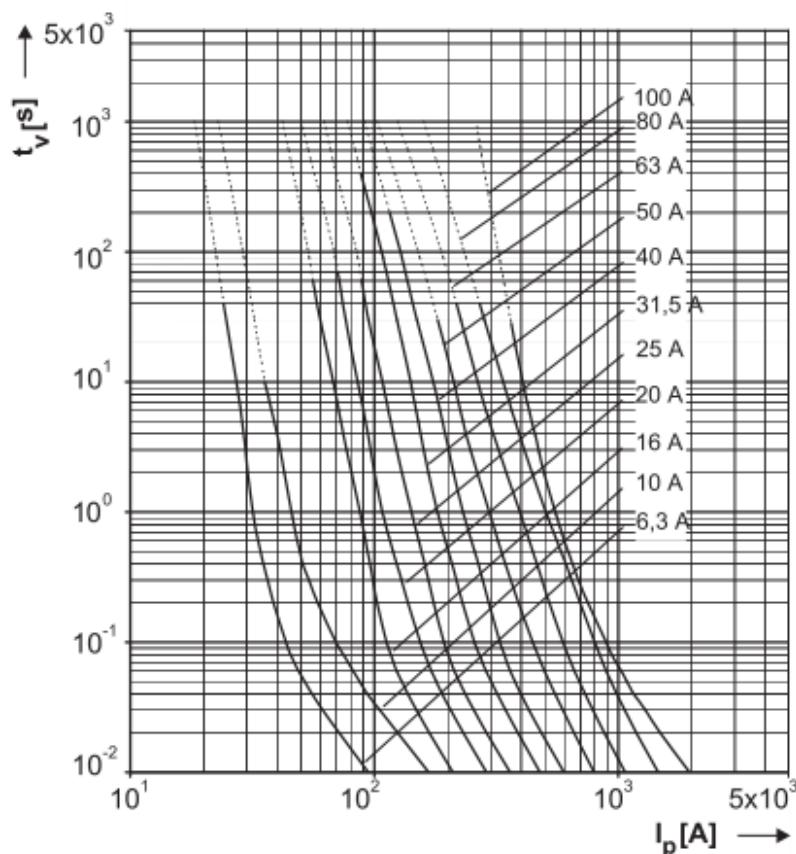
Poznámky k tabulce 10 :

1) Z důvodů výše popsaných nebylo možné mezi jističem generátoru (QF1) a transformátorem (QF) dodržet plnou selektivitu, což je patrné z charakteristiky na str. 16 v příloze 2 a sw Sichr to bere jako nepřijatelnou kombinaci. Při zkratech v bodě 1 (obr. 7 v příloze 1) lze očekávat nežádoucí působení buď obou prvků nebo, při nižších výkonech na turbíně, působení pouze jističe QF. Vzhledem k tomu, že generátor je asynchronní, není zcela vyloučena ani možnost, že zkratový proud jím dodaný nebude dostatečný k vybavení žádného z jističů a dojde k jeho odpojení až jednou z ochran popsaných v kap. 4.2.4.2, popř. z řídicího systému. V tomto případě totiž stroj přejde do ostrovního provozu a jeho buzení bude možné pouze z kompenzační baterie, která ale nestačí dodávat potřebný magnetizační proud k práci do zkratu za transformátorem, dojde k výraznému poklesu svorkového napětí a vybavení podpěťové ochrany.

2) U jističe kompenzátoru QF2 bude v rámci prováděcího projektu, po upřesnění parametrů a chování regulátoru a vlastní baterie, nutno prověřit a upravit nastavení spouště tak, aby pokud možno působila pouze v situacích označených v tab. 10 a naopak nevypínala od nabíjecího proudu a přechodných proudových špiček při přepínání jednotlivých stupňů. V režimu 1, při zkratech v bodech 1 a 3 je žádoucí, aby jako první působilo jištění blíže k místu zkratu, tj. pojistky na straně vn, resp. generátorový vypínač.

3) Obdobná situace, jako v pozn. 1), ačkoli je místo zkratu blíže, může se v určitých provozních stavech (při malém průtoku) stát, že napětí a proud generátoru klesnou rychleji než vybaví jistič generátoru. Pro tento případ je v ovládacích obvodech (příloha 1, obr. 9, linie 1) provedeno strhávání jističe QF1 při vypnutí jističe QF v transformovně.

4) Kabel mezi generátorem a rozvaděčem RG je nutno uložit tak, aby riziko vzniku zkratu zde bylo zcela minimální (viz čl. 434.3 [21]). V případě zkratu v bodě 3 platí to, co bylo popsáno v



Obr. 19 – Tavná ampérsekundová charakteristika pojistek PM45 [24]

pozn. 1 - tj. není plná selektivita jističích prvků QF1 a QF a při max. předpokládaném zkratovém proudu dojde k vybavení obou.

5) Při zkratu v bodě 4 a vybavení jističe kompenzátoru může sice generátor dále pracovat, ale nebude dodržena požadovaná hodnota účinníku, z čehož vyplývá pokuta od PDS za porušení smluvních podmínek. Při max. výkonu by též mohlo dojít k přetížení transformátoru. Je tedy žádoucí v případě této či jiných poruch kompenzátoru provést odpojení výroby od DS pomocí řídicího systému.

Pojistka FU2 slouží k ochraně transformátoru při zkratu na svorkách nn, tj. před jističem QF a je selektivní vůči pojistce FU1, která v tomto případě nevypne. Selektivita je v tomto případě ověřena z

ampérsekundových charakteristik v katalogu výrobce [24] (obr. 19). Zároveň je selektivní vůči jističi QF na straně nn transformátoru, jak je patrné z charakteristik na str. 16 v příloze 2 a nevyne při zkratu v místech pod ním. Hodnotu nadproudu na primární straně při zkratu na sekundárních svorkách můžeme zjistit ze vztahu :

$$I_{k2} = 100 \cdot \frac{I_{n1}}{u_k} = 100 \cdot \frac{6,56}{4} = 164 \text{ A} \quad (4.10).$$

Tento proud je přiřazenou pojistkou vypnut v čase menším než 1s, což je hluboce pod požadovaným maximem 2s.

4.2.8. Kabeláž nn

Výpis hlavních použitých kabelů je v příloze 2 (str. 2, 3, 28, 29), řešení ostatní kabeláže ve vlastní spotřebě bude upřesněno prováděcím projektem. U kabelu mezi transformovnou a rozvaděčem RG se předpokládá umístění v přímo v zemi (v pískovém loži), u kabelů uvnitř objektu uložení na drátěných kabelových lávkách s volným seskupením a roztečí alespoň ve velikosti průměru kabelu.

Výběr páteřní kabeláže byl proveden dle předpokládaných proudů v jednotlivých segmentech. Vycházelo se z maximální zatížitelnosti udané výrobcem kabelu v katalogu, snížené příslušnými přepočítacími součiniteli dle způsobu uložení z tabulek 52-D* a 52-E* v [22]. Hodnoty zatížitelnosti udávané výrobcem kabelů jsou získané měřením a jsou obvykle vyšší než hodnoty dovolených proudů uváděné v tab. 52-C* [22]. Hodnoty výsledných maximálních proudů I_z pro jednotlivé kabely dle příslušného způsobu uložení se nachází v příloze 2, v přehledu parametrů a výpočtů na str. 28-29.

Koordinace mezi vodiči a jistíci prvky (kontrola přiřazení) z hlediska ochrany vodičů proti přetížení se kontroluje dle čl. 433.1 v [21]. Tyto kontroly byly provedeny pomocí sw nástroje Sichr a výsledky jsou pro jednotlivé segmenty patrné z charakteristik v příloze 2 str. 18, 21, 24, 27. Zatěžovací charakteristiky použitých kabelů zpracované na základě přílohy NA [21] jsou v grafech vyznačeny tenkou křivkou, vypínací charakteristiky tučně. Kabel vyhovuje tehdy, pokud je celá jeho zatěžovací charakteristika napravo od vypínací charakteristiky příslušného jistícího prvku.

Sichr provádí i další kontroly - kontrolu vypínací smyčky dle čl. 411.4.4 [20] a kontrolu oteplení vodičů při zkratu dle čl. 434.5.2 v [21]. Jak již bylo řečeno v kap. 4.2.7, hodnoty zkratových proudů vypočtených sw Sichr jsou menší než hodnoty výpočtů uvedených v kap. 4.2.1. Proto je vhodné ještě ověřit nepřekročení dovoleného oteplení páteřních kabelů při zkratu dle čl. 434.5.2 [21].

Zde je uveden vztah pro zjištění max. doby trvání zkratu, kdy teplota vodiče nepřesáhne povolenou hodnotu:

$$t = \left(k \cdot \frac{S}{I} \right)^2 \quad [\text{s}; -, \text{mm}^2, \text{A}] \quad (4.11),$$

kde k je součinitel dle tab. 43A [21],

S je průřez vodiče,

I je účinný zkratový proud (jedná se o ekvivalentní oteplovací proud I_{th} dle čl. 4.8 [25]).

Výsledky pro kabel mezi trafostanicí a RG (KAB1) a kabel mezi generátorem a RG (KAB2) jsou uvedeny v tabulce. Vzhledem k tomu, že KAB1 je tvořen dvěma paralelními kabely jistěnými jedním společným jističem, bylo počítáno i s případem zkratu pouze na jednom z kabelů.

	KAB1-oba	KAB1-jeden	KAB2
I_{th} [A]	12000	12000	11000
k	76	76	115
S [mm ²]	300	150	240
t [s]	3,61	0,90	6,30

Tab. 11 - Max. dovolená vypínací doba při zkratu v části nn

Nyní je třeba na charakteristikách jisticích prvků v příloze 2 odečíst doby vypnutí pro příslušný zkratový proud. Hodnoty uvedené v charakteristikách jsou hodnoty i_p , tj. nárazového zkratového proudu, zatímco v našich výpočtech je zobrazen I_k'' , což je počáteční souměrný rázový zkratový proud, který je menší než i_p . Hodnota pro RG je se zaokrouhlením 12kA a pro R2 v transformovně 12,3kA (příl. 2 - str. 30). Hodnota i_p je orientačně 1,8x vyšší. Z charakteristik jističů v příloze 2 vidíme, že k vypnutí uvedených proudů dochází s velkou rezervou okamžitou zkratovou spouští, tj. v čase ca 25ms, tedy za mnohem kratší dobu než je maximální doba vypnutí z tab. 11.

4.2.9. Přípojka vn



Obr. 20 – Odpínač FLES 25 - IVEP Brno^[11]

Zhruba 70m nad objektem MVE prochází linka DS 22kV VN102, do níž se výrobní připojí. Přípojka bude provedena kabelem uloženým v zemi, který povede paralelně s tlakovým přivaděčem vody. Zemní práce tedy mohou být provedeny současně. Určení konkrétního sloupu k vyvedení přípojky a detailní požadavky na vybavení předávacího místa budou ve vyjádření PDS k žádosti o připojení. Pro účely této práce počítáme s použitím 3 kabelů NA2XS2Y 18/30 1x50/16 (NKT Cables) svazkovaných v trojúhelníku a s osazením dálkově ovládaného odpínače s pojistkami na sloupu. Lze použít např. typ FLES 25 od IVEP Brno (obr. 20). Do výkopu pro kabel se na dno položí uzemňovací FeZn pásek příslušného rozměru a potřebné délky ke kterému budou připojeny konstrukční části odpínače a případná bleskojistka, pokud na základě upřesnění údajů o síti od PDS bude její použití vhodné. Ověření kabelu z hlediska přetížení není v tomto případě nutné, protože jmenovitý proud na primární straně transformátoru je pouze 6,56 A a eventuelní proudové přetížení vypíná jistič na sekundární straně. Proudová zatížitelnost kabelu v zemi v uspořádání těsný trojúhelník je

dle katalogu výrobce 174A a pokryje tedy i případ zkratu na svorkách nn vypínaný pojistkou FU2.

Kontrola kabelů vn pro případ zkratu u transformátoru (před pojistkou FU2) se provede dle čl. 434.5.2 [21]. Zde se pro přístroje omezující proud, což pojistka je, uvádí, že kabel vyhoví pokud je splněna podmínka :

$$k^2 \cdot S^2 > I^2 \cdot t \quad (4.12),$$

kde : k - koeficient dle tab. 43A [21],
 S - průřez vodiče v mm²,
 I² . t - hodnota propuštěné energie udaná výrobcem jistícího prvku [A².s].

Katalogová hodnota (I² . t) pro pojistku PM45/40A je 25000 A².s, hodnota **k** pro vodič s EPR/XLPE izolací a Al jádrem je 94.

$$94^2 \cdot 50^2 = 22,09 \cdot 10^6$$

Podmínka je tedy splněna a kabel vyhovuje všem kritériím.

4.3. *Systém kontroly a řízení*

4.3.1. Popis ŘS

Výrobce turbíny nabízí zároveň s technologií dodávku řídicího systému na bázi PLC Simatic od firmy Siemens, využije se tedy toto řešení. Jedná se o modulární systém umožňující sestavení optimální konfigurace pro danou aplikaci. Podrobnosti jsou mimo rozsah této práce a budou součástí prováděcího projektu technologické části.

ŘS bude osazen v samostatné skříni ve strojovně, vzhledem k malému rozsahu se předpokládá nástěnná skříň. Ideové blokové schéma ŘS je na obr. 10 v příloze 1., systém bude obsahovat jednu procesorovou jednotku, lokální zobrazovač na dveřích skříně a potřebný počet I/O modulů. Případné osazení komunikačního modulu pro dálkovou správu se rozhodne na základě požadavků PDS a způsobu dohledu nad výrobnou, který určí provozovatel. V takovém případě je třeba mít v lokalitě k dispozici konektivitu, optimálně pronajatý okruh, ADSL nebo radioreléový spoj, nouzově lze za určitých podmínek použít i GSM síť. Zajištění konektivity pro obchodní měření je součástí přípojovacích podmínek. Lokální zobrazovací jednotka bude mít plnou vizualizaci a bude z ní možno provádět plnohodnotné řízení z místa.

Předpokládá se bezobslužný provoz s občasným dohledem.

4.3.2. Řízení turbíny

Řízení výkonu a otáček turbíny se provádí otevíráním a zavíráním regulačních klapek popsaných v kap. 4.1.2. pomocí hydrauliky. Řízení průtoku turbínou je prováděno na konstantní hladinu v přivaděči, při stoupání hladiny se klapky otevírají a vpouští na oběžné kolo turbíny více vody, což znamená vyšší výkon a naopak. Při dosažení minimální přípustné hladiny se výroba odstaví. Zároveň se snímají otáčky turbíny a pohybem klapky se udržují na konstantní hodnotě nad synchronními otáčkami generátoru. Hladinová tlaková sonda bude umístěna před uzavírací klapkou na vstupu tlakového přivaděče do strojovny. Nouzové odstavení turbíny probíhá mechanicky, pomocí závaží na koncích ramen uzavíracích klapky, uzavírání je plynulé a doba do úplného uzavření je nastavitelná. Na vtoku je zároveň osazena uzavírací klapka s elektropohonem, který je ovládán z ŘS a doba jeho chodu je synchronizována s dobou uzavírání regulačních klapky turbíny.

4.3.3. Fázování a odstavování

Přípojování výroby k DS bude probíhat ve dvou krocích.

1. Dojde ke vpuštění vody a roztočení turbíny s nenabuzeným generátorem mírně pod synchronní otáčky.

2. Současně s dalším pomalým zvyšováním otáček dá ŘS povel k fázování na fázovač asynchronního stroje A03 (obr. 8, 9 v příl. 2, technické detaily v příloze 3), jež je schopen pracovat na vstupu s napětím od 2V, tj. stačí mu napětí vybuzené remanentním magnetismem stroje. Ve schématu ovládacích obvodů (obr. 9 v příloze 1) se jedná o linie 8 a 16. Fázovač porovnává frekvenci a fázový úhel v síti a na nabíhající generátoru a v okamžiku, kdy se tyto hodnoty dostanou do tolerance pro bezpečné přifázování, sepne výstupní relé, které je zapojeno na zapínavací vstup generátorového vypínače (linie 5 na obr. 9 v příloze 1) a dojde k připojení do DS.

Použití fázovače zajišťuje omezení proudového nárazu v okamžiku připojení. Takto spínaný stroj je připnut do sítě pouze s krátkým magnetizačním nárazovým proudem bez činné složky, samozřejmě za podmínky, že všechny prvky v sekvenci jsou vhodně synchronizovány. Důležitá je především schopnost fázovače vzít v potaz prodlení mezi vysláním povelu k sepnutí a vlastním spojením kontaktů generátorového vypínače. V našem případě činí tato doba ca 60ms.

3. Po vlastním připojení a zatížení stroje řídicí systém pomocí regulačních klapek upraví průtok a tím i výkon na optimální hodnotu vzhledem k poměrům na toku a tuto bude dále udržovat na základě podmínek popsaných v kap. 4.3.2. Zároveň zareaguje regulátor kompenzace a připojením dalších stupňů upraví účinník na požadovanou hodnotu.

Plánované odstavení stroje bude probíhat na základě povelu z ŘS (linie 6, obr. 9 - příloha 1). Zároveň dojde k plynulému odstavení turbíny postupným uzavřením regulačních klapek. V případě korektního plánovaného odstavení zůstane celý systém v pohotovostním režimu se schopností automatického znovuspuštění během několika minut. V případě odstavení působením ochrany se předpokládá nutnost zásahu obsluhy, ačkoli ovládací obvody jsou koncipovány tak, že umožňují automatické znovuspuštění i v některých z těchto případů. Popis konkrétních situací bude dán provozním předpisem

4.3.4. Monitorování a ovládání

Předpokládá se, že řídicí systém bude monitorovat nejen technologickou část MVE, ale i část elektrickou, vč. přípojky vn. Rozsah sledovaných údajů je v hrubých rysech naznačen v blokovém schématu ŘS (obr. 10 - příloha 1).

Monitorovány budou stavy všech hlavních spínacích prvků ve schématu, působení elektrických ochrany a vybavení jističů poruchou, teplota oleje transformátoru, stav nepřerušeno zdroje napájení a též údaje z elektroměru PDS. Tyto jsou předávány ve formě pulsů přes optopřevodník, který je v dodávce provozovatele MVE. V případě, že ŘS nebude umět pulsy dané frekvence zpracovat přímo, bude nutno použít ještě převodník pulsů na standardní analogový signál 4-20mA. Komunikačním protokolem PROFIBUS budou do ŘS předávány údaje z analyzátoru sítě A04 (obr. 8 v příloze 1) umístěného v rozvaděči RG. Zde jsou k dispozici hodnoty napětí, proudů (generátorový vývod), činných a jalových výkonů, činné a jalové energie a analýza harmonických složek.

Ovládán z ŘS bude v elektrické části pouze generátorový vypínač, resp. fázovač, možné je též ovládání odpojovače Q1 (obr. 7 v příloze 1), což záleží na podmínkách PDS.

4.3.5. Další funkce

Z důvodů požadavků jednoho z majitelů pozemků, přes něž bude procházet potrubní přivaděč, je nutno hlídat případné poškození potrubí a v případě úniku vody automaticky uzavřít vstup vody do potrubí ve vtokovém objektu. Toto opatření se zrealizuje osazením solenoidového ventilu s magnetickou přídrží v otevřeném stavu a mechanickým uzavřením (závažím nebo pružinou) na výstup potrubí z vtokového objektu. Do potrubí v místě první revizní šachty se umístí druhý hladinový snímač, jehož signál se zavede do ŘS. Kabel k ventilu i snímači se položí při budování přivaděče do stejného výkopu. V normálním stavu budou hodnoty naměřené oběma snímači korespondovat, v okamžiku přerušení potrubí a úniku vody dojde v dolní části přivaděče ke sní-

žení tlaku zatímco v horní nikoli. Toto bude vyhodnoceno jako porucha, bude odpojen solenoid klapky na vtoku a dojde k jeho uzavření. V případě poruchy nebo ztráty napájení dojde k uzavření též. Uzavírání této klapky může být i součástí odstavení turbíny

5. Ekonomické zhodnocení

5.1. Výpočet množství vyrobené el. energie

Jako první se provede výpočet čistého výkonu na svorkách generátoru dle vztahu :

$$P_g = P_t \cdot \eta_g \quad (5.1),$$

kde P_t [kW] je mechanický příkon na hřídeli turbíny z tab.9 (účinnost převodu zanedbáváme),

η_t – účinnost generátoru (pro naše účely vycházíme ze zjednodušení, že tato účinnost je pro celý průběh výkonu stejná).

Dále se vypočte výkon na výstupních svorkách transformátoru na straně 22kV. Zde již bude uvažováno s proměnnou účinností transformátoru pro různá zatížení na základě vztahu :

$$\eta_{tr} = \frac{n \cdot S_n \cdot \cos \varphi}{n \cdot S_n \cdot \cos \varphi + P_0 + n^2 \cdot P_k} \quad (5.2),$$

kde $S_n \cdot \cos \varphi = P_n$. Při uvažování stálého účinníku $\cos \varphi = 0,95$ lze počítat s $P_n = 250 \cdot 0,95 = 237,5$ kW. Vztah tedy můžeme dále upravit :

$$\eta_{tr} = \frac{n \cdot P_n}{n \cdot P_n + P_0 + n^2 \cdot P_k} \quad (5.3),$$

kde P_0 [kW] jsou ztráty transformátoru naprázdno,

P_k [kW] jsou ztráty transformátoru nakrátko (obojí ztráty uvedeny v kap. 4.2.6),

$n \left[\frac{\%}{100} \right]$ je koeficient využití transformátoru, jež pro jednotlivé výkony generátoru v různých obdobích vypočteme ze vztahu :

$$n = \frac{P_g}{P_n} \quad (5.4),$$

kde P_g [kW] je výkon generátoru na svorkách,

P_n [kW] jmenovitý činný výkon transformátoru při $\cos \varphi = 0,95$.

Výstupní čistý výkon transformátoru na výstupních svorkách se potom pro jednotlivá období určí dle vztahu :

$$P_{tr} = P_g \cdot \eta_{tr} \quad (5.5),$$

a vztah pro výpočet vyrobené elektrické energie je :

$$E = P \cdot t \quad [\text{kWh}; \text{kW}, \text{h}] \quad (5.6),$$

Příčemž čas t [h] se určí jako $M \cdot 24$, kde M je počet dní po které pracuje MVE s daným výkonem. Ztráty v kabeláži nn se vzhledem k její malé délce zanedbají.

Výsledky výpočtů jsou v tabulce 12.

M [dní]	59	90	120	150	180	210	240	250
P _g [kW]	226,58	182,50	145,07	113,02	86,85	62,94	43,51	30,60
n	0,95	0,77	0,61	0,48	0,37	0,27	0,18	0,13
η _{tr}	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,98
P _{tr} [kW]	223,24	180,18	143,45	111,87	86,00	62,29	42,98	30,13
E	316111	134055	103281	80548,1	61919,8	44851,5	30946,6	7231,61

Tab. 12 - Hodnoty vyrobené elektrické energie pro jednotlivá období

Celková vyrobená elektrická energie za rok činí tedy v ideálním případě ca **778 945 kWh**, což je součet hodnot ve spodním řádku tab. 12.

5.2. Výpočet investičních nákladů

Výpočet investičních nákladů je v tabulce níže, v některých případech se vychází z nabídek výrobců (technologie, elektročást, ŘS) nebo ceníkových údajů (potrubí), v ostatních případech se jedná o odhad.

Položka	Jedn. cena Kč	Množství	Částka Kč
Vtokový objekt	200 000 Kč	1	200 000 Kč
Potrubí nízkotlakové	3 504 Kč	2400	8 409 600 Kč
Revizní šachty	5 000 Kč	23	115 000 Kč
Vyrovňovací komora	30 000 Kč	1	30 000 Kč
Potrubí vysokotlakové	5 160 Kč	140	722 400 Kč
Zemní práce (přivaděč) a uložení potrubí	600 Kč	2550	1 530 000 Kč
Strojovna (stavební část)	500 000 Kč	1	500 000 Kč
Technologie a ŘS, vč. elektročásti a ochran*	3 500 000 Kč	1	3 500 000 Kč
Trafostanice	850 000 Kč	1	850 000 Kč
Přípojka vn vč. Odpojovače	100 000 Kč	1	100 000 Kč
Projekt DSP - stavební	50 000 Kč	1	50 000 Kč
Poplatky	5 000 Kč	1	5 000 Kč
Mezisoučet			16 012 000 Kč
Rizika (10%)			1 601 200 Kč
Celkem (zaokrouhleno) :			17 613 000 Kč

Tab. 13 - Rozpis investičních nákladů

* Započítána i cena prováděcího projektu těchto částí.

5.3. Výpočet peněžních toků

Při výpočtu peněžních toků se vychází z následujících předpokladů :

Celá investice bude financována z cizího kapitálu - úvěrem s úrokovou sazbou 6% p.a.

Doba splácení úvěru : 15 let.

Zařazení do 4. odpisové skupiny (20 let) a rovnoměrné odpisování dle [27].

Minimální životnost investice : 30 let.

Výsledky výpočtů jsou zpracovány v následující tabulce :

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Rok	Tržby	Provozní náklady	Odpisy	Hrubý zisk	Daň z příjmů	Čistý zisk	Čistý CF	CFt	Splátka	Zůstatek
1	2 485 000	30 000	378 680	2 076 321	394 501	1 681 820	2 060 499	1 943 867	1 783 542	276 957
2	2 485 000	30 600	907 070	1 547 331	293 993	1 253 338	2 160 407	1 922 755	1 783 542	376 865
3	2 485 000	31 212	907 070	1 546 719	293 877	1 252 842	2 159 911	1 813 503	1 783 542	376 369
4	2 485 000	31 836	907 070	1 546 094	293 758	1 252 336	2 159 406	1 710 452	1 783 542	375 864
5	2 485 000	32 473	907 070	1 545 458	293 637	1 251 821	2 158 890	1 613 248	1 783 542	375 348
6	2 485 000	33 122	907 070	1 544 808	293 514	1 251 294	2 158 364	1 521 561	1 783 542	374 822
7	2 485 000	33 785	907 070	1 544 146	293 388	1 250 758	2 157 827	1 435 078	1 783 542	374 285
8	2 485 000	34 461	907 070	1 543 470	293 259	1 250 211	2 157 280	1 353 504	1 783 542	373 738
9	2 485 000	35 150	907 070	1 542 781	293 128	1 249 653	2 156 722	1 276 561	1 783 542	373 180
10	2 485 000	35 853	907 070	1 542 078	292 995	1 249 083	2 156 152	1 203 984	1 783 542	372 610
11	2 485 000	36 570	907 070	1 541 361	292 859	1 248 502	2 155 571	1 135 528	1 783 542	372 029
12	2 485 000	37 301	907 070	1 540 629	292 720	1 247 909	2 154 979	1 070 958	1 783 542	371 437
13	2 485 000	38 047	907 070	1 539 883	292 578	1 247 305	2 154 375	1 010 055	1 783 542	370 833
14	2 485 000	38 808	907 070	1 539 122	292 433	1 246 689	2 153 759	952 610	1 783 542	370 217
15	2 485 000	39 584	907 070	1 538 346	292 286	1 246 060	2 153 130	898 426	1 783 542	369 588
16	2 485 000	40 376	907 070	1 537 554	292 135	1 245 419	2 152 489	847 319		2 152 489
17	2 485 000	41 184	907 070	1 536 747	291 982	1 244 765	2 151 834	799 115		2 151 834
18	2 485 000	42 007	907 070	1 535 923	291 825	1 244 098	2 151 168	753 648		2 151 168
19	2 485 000	42 847	907 070	1 535 083	291 666	1 243 417	2 150 487	710 764		2 150 487
20	2 485 000	43 704	907 070	1 534 226	291 503	1 242 723	2 149 793	670 316		2 149 793
21	2 485 000	44 578		2 440 422	463 680	1 976 742	1 976 742	581 469		1 976 742
22	2 485 000	45 470		2 439 530	463 511	1 976 019	1 976 019	548 355		1 976 019
23	2 485 000	46 379		2 438 621	463 338	1 975 283	1 975 283	517 124		1 975 283
24	2 485 000	47 307		2 437 693	463 162	1 974 531	1 974 531	487 667		1 974 531
25	2 485 000	48 253		2 436 747	462 982	1 973 765	1 973 765	459 885		1 973 765
26	2 485 000	49 218		2 435 782	462 799	1 972 983	1 972 983	433 681		1 972 983
27	2 485 000	50 203		2 434 797	462 612	1 972 185	1 972 185	408 968		1 972 185
28	2 485 000	51 207		2 433 793	462 421	1 971 372	1 971 372	385 660		1 971 372
29	2 485 000	52 231		2 432 769	462 226	1 970 543	1 970 543	363 677		1 970 543
30	2 485 000	53 275		2 431 725	462 028	1 969 697	1 969 697	342 944		1 969 697
Součty :								29 172 681		35 993 031

Tab. 14 - Peněžní toky

Vysvětlivky k jednotlivým sloupcům tabulky :

0 - pořadí roku od uvedení do provozu.

1 - tržby za vyrobenou elektrickou energii. Vypočteno jako součin roční výroby zaokrouhlené na celé MWh a sazby za MWh dle čl. 1.4. [28], jež činí 3190 Kč/MWh. Výsledek zaokrouhlen na celé tisíce. S automatickým navyšováním sazby o inflaci se nepočítá.

2 - odhad ročních nákladů na provoz a údržbu navýšených každoročně o inflaci 2%.

3 - roční odpisy v rovnoměrném odpisování dle § 31 [27].

4 - hrubý zisk vypočtený jako : sloupec1 -sloupec2 - sloupec3.

5 - daň z příjmů právnických osob (19%) vypočtená jako : sloupec4 x 0,19.

6 - čistý zisk : sloupec4 - sloupec5.

7 - čistý peněžní tok : sloupec5 + sloupec3. Odpisy jsou nákladem, ale nikoli výdajem (nevydáváme z pokladny).

8 - očekávaná hodnota peněžního toku (CF) v období t , vypočtená ze vztahu :

$$\frac{CF_t}{(1+k)^t} \quad (5.7),$$

kde CF_t - hodnota ze sloupce 7,

t - rok (hodnota ve sloupci 0),

k - v tomto případě je to úroková míra vyjádřená jako desetinné číslo.

V případě smíšeného nebo vlastního financování se jedná o podnikovou diskontní míru (WACC).

9 - roční splátka úvěru při měsíčním cyklu splácení zjištěná dle vztahu :

$$s = \frac{D \cdot q^n \cdot (q - 1)}{q^n - 1} \quad (5.8),$$

kde D - počáteční výše dluhu (v našem případě je to částka vypočtená v kap. 5.2),

n - počet úrokových období neboli počet splátek (v našem případě 180),

q - úročitel vypočtený dle vztahu :

$$q = 1 + \frac{t}{360} \cdot i \quad (5.9),$$

kde t - počet dní tvořících úrokových období (v našem případě 30),

i - úroková míra vyjádřená desetinným číslem.

10 - zůstatek ročních příjmů po odečtení všech výdajů, vč. splátky úvěru (sloupec7 – sloupec9).

5.4. Vyhodnocení investice

Pro hodnocení investice existuje mnoho různých metod, zde použijeme metodu čisté současné hodnoty (NPV). Tato metoda bere v úvahu faktor času, tzn. hodnota dnešních peněz je vyšší než hodnota stejné částky v budoucnu. Proto zde dochází k přepočtu budoucích příjmů z investice na jejich současnou hodnotu.

Čistá současná hodnota investice představuje rozdíl mezi současnou hodnotou očekávaných výnosů (cash flow) a náklady na investici a vypočte se dle vztahu:

$$\text{ČSHI (NPV)} = \text{SHCF} - \text{IN} = \sum_{t=1}^n \frac{CF_t}{(1+k)^t} - \text{IN} \quad (5.10),$$

kde SHCF je současná hodnota cash flow - výnosů z investice (vypočteno ve sloupci 8 tab. 14. vč. sumy),

IN jsou náklady na investici (vypočteno v kap. 5.2).

$$\text{ČSHI} = 29\,172\,681 - 17\,613\,000 = 11\,559\,681$$

Aby investice měla smysl, musí být hodnota ČSHI kladná, což je v našem případě splněno.

Pro ověření můžeme použít ještě metodu vnitřního výnosového procenta. Tato metoda je rovněž založena na principu současné hodnoty. Na rozdíl od ní však spočívá v tom, že diskontní míra (WACC) není daná, ale hledáme takovou její hodnotu, při které se současné očekávané výnosy z investice rovnají současné hodnotě výdajů na investici : $\text{SHCF} = \text{IN}$, což lze zapsat takto :

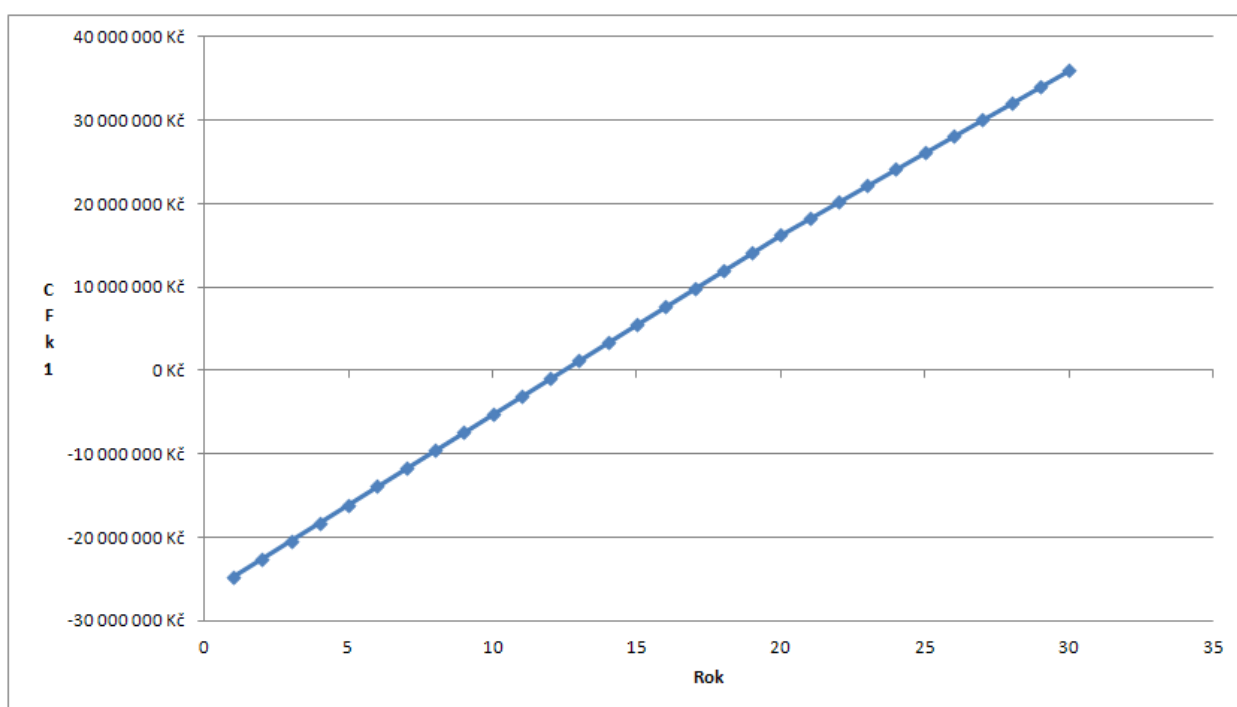
$$\sum_{t=1}^n \frac{CF_t}{(1+k)^t} = \text{IN} \quad (5.11),$$

$$\text{nebo jinak zapsáno } \text{SHCF} - \text{IN} = 0 \quad (5.12).$$

Protože k (diskontní míra) je číslo, které hledáme, musíme postupovat iterativně a rozdíl levé a pravé strany rovnice změnou diskontní míry postupně snižovat tak dlouho, až se rovnají, neboli až je jejich rozdíl nulový. Metoda je v praxi velmi oblíbená, protože udává předpokládanou výnosnost investice, kterou můžeme porovnávat s požadovanou výnosností. Rozdíl je mírou jistoty a rizika: je-li příliš velký, je jistota malá a riziko velké.^[29]

Dle iterace provedené pro náš případ v MS-Excel vychází $k = 11,67\%$. Pokud je investice na úvěr, mělo by být vnitřní výnosové procento vyšší, než je úroková míra, což je v našem případě splněno.

Na následujícím obrázku je graficky znázorněna návratnost investice. Údaj CF_{k1} na svislé ose jsou kumulované výnosy (CF) od kterých jsou odečteny náklady na pořízení investice vč. nákladů kapitálu (úroků). V místě, kde křivka protíná vodorovnou osu se dosavadní kumulované CF (součet CF ze sloupce 7), tj. dosažené příjmy po zdanění (aktiva), rovná nákladům na investici, tj. součtu všech splátek úvěru zaplacených financující bance (pasiva).



Obr. 21 – Graf návratnosti investice

6. Závěr

Tato práce byla koncipována jako studie proveditelnosti záměru rozšíření MVE Ludvíkov, s tím, že některé části byly zpracovány podrobněji. Vycházelo se částečně z podkladů dodaných investorem, částečně z podkladů dohledaných jiným způsobem a zbytek tvořily odhady. Toto je třeba mít na paměti při hodnocení výsledků této studie.

Obecně lze říci, že projekt je technicky realizovatelný. Ačkoli není k dispozici oficiální stanovisko PDS, problém s připojením do DS by neměl nastat. V [30] lze nalézt, že v této lokalitě je připojování nových výroben možné a z informace v [31] o volné transformační kapacitě 10MVA v nadřazené rozvodně Vrbno p. Pradědem lze usuzovat, že síť není v této oblasti plně zatížena. Potíže lze tedy očekávat spíše v rovině legislativně-správní, protože se jedná o stavbu na území CHKO a mimoto je potřeba vyjednat věcná břemena pro realizaci přivaděče přes mnoho cizích pozemků. Dle zkušeností provozovatelů MVE nelze očekávat přílišnou vstřícnost ani od správy povodí.

Z ekonomického hlediska, při návratnosti investice ca 12,5 roku, se jedná o projekt dlouhodobý, ale vzhledem k životnosti MVE, která běžně přesahuje zde uvažovaných 30 let, lze říci, že tato investice svého investora nejspíše přežije a do té doby mu bude přinášet velmi slušný důchod. V případě obnovitelných zdrojů energie jsou doby návratnosti investovaných prostředků v rozsahu do dvaceti let běžné. Nicméně ekonomické zhodnocení provedené v kap. 5 je třeba brát s určitou rezervou, protože nebylo prováděno hodnocení rizik, což je záležitost, která přesahuje rozsah této práce, ale kterou není dobré, obzvláště v prostředí ČR, opomíjet. Dále je třeba brát v úvahu celosvětovou zkušenost z investičních projektů, že velmi často bývají podhodnoceny investiční náklady. I v této práci (kap 5.2) se v mnoha položkách pracovalo s odhady, takže, ačkoli bylo zahrnuto 10% navýšení investičních nákladů, před vlastní realizací, a po upřesnění, bude nutno ekonomická kritéria přepočítat. Nezanedbatelná rizika se skrývají též na příjmové straně. Jedná se o dlouhodobý trend klimatických změn snižujících ve středoevropském regionu množství srážek a naopak nárazově vyvolávající srážky povodňové, což je pro energetické využití vodních toků nepříznivé. V legislativní oblasti je třeba mít na paměti politickou nestabilitu regionu a závislost na garantovaných výkupních cenách. V této souvislosti je nutno zmínit tiskovou zprávu ERÚ [32] o přípravě úplného ukončení podpory nových OZE od roku 2014.

Vzhledem k tomu, že investor je právnická osoba s omezeným ručením a hodlá celou investici pokrýt cizím kapitálem, doporučuje mu autor této práce investici za podmínek zde popsaných realizovat, pokud bude schopen ji uvést do provozu k 31.12.2013. V opačném případě bude třeba celou věc zvážit na základě nových skutečností po roce 2013.

Použitá literatura :

- [1] Holata M.: Malé vodní elektrárny – projektování a provoz. Academia, Praha, 2002.
- [2] Gabriel P., Čihák F., Kalandra P.: Malé vodní elektrárny. Vydavatelství ČVUT, 1998.
- [3] Dušička P., Gabriel P., Hodák T., Čihák F., Šulek P.: Malé vodní elektrárny. Jaga group, Bratislava, 2003.
- [4] Laika V.: Abeceda malých vodních pohonů [online]. <http://mve.energetika.cz/>
- [5] ČSN 752601 Malé vodní elektrárny – Základní požadavky.
- [6] CINK Hydro - Energy k. s., výrobce zařízení pro MVE [online].
<http://cink-hydro-energy.com/cz>
- [7] Kolektiv autorů : Obnovitelné zdroje energie a možnosti jejich uplatnění v České republice, ČEZ a.s., Praha, 2003 [online].
http://www2.zf.jcu.cz/~moudry/databaze/pdf/Obnovitelne_zdroje_v_CR.pdf
- [8] ČSN 333051 Ochrany elektrických strojů a rozvodných zařízení.
- [9] OEZ Letohrad : Přiřazování pojistek vn k distribučním transformátorům. Elektro 03/2002 [online].
http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=24951
- [10] Lovato Electric : Automatické regulátory účinníku [online].
<http://knihovna.lovato.cz/katalog.php?rmid=2&mid=20&tid=1#20>
- [11] IVEP, a.s. : Venkovní odpínače a úsečníky VN [online]
<http://www.ivep.cz/vyrobni-program/venkovni-odpinace-a-usecniky-vn>
- [12] O. Hromádko - Hydrohrom : Ochrany pro MVE. [online].
<http://www.hromadko-hydrohrom.cz/vyrobky.html>
- [13] Molnár M. : ZLEPŠENÍ ÚČINNÍKU V ENERGETICE A NÁVRH VHODNÝCH KOMPENZAČNÍCH PROSTŘEDKŮ [online]
<http://www.volny.cz/molnarm/pdf/kompensace.pdf>
- [14] Pravidla provozování distribučních soustav. Příloha 4 - Pravidla pro paralelní provoz zdrojů se sítí provozovatele distribuční soustavy, 2011.
- [15] Myšák S. : Chránění generátorů elektráren malých výkonů. [online].
http://www.stanislav-nisak.com/index.php?option=com_phocadownload&view=category&download=24ms&id=4&model=site&Itemid=128
- [16] Kamm O. : Často kladené otázky - kompenzace [online].
http://www.ceskaenergetika.cz/kompensace_jaloveho_vykonu/faq_kompensace.html
- [17] PŘIPOJOVACÍ PODMÍNKY PRO VÝROBNY ELEKTRĚNY - PŘIPOJENÍ NA SÍŤ ČEZ DISTRIBUCE, a.s. [online].
http://www.cezdistribuce.cz/eede/content/file-other/distribuce/technicke-informace/001_kpp-ve-v2.0.pdf
- [18] ČEZ Distribuce, a. s. - PŘIPOJOVACÍ PODMÍNKY NN pro osazení měřicích zařízení v odběrných místech napojených z distribuční sítě nízkého napětí [online].
http://www.cezdistribuce.cz/eede/content/file-other/distribuce/technicke-informace/cezdistribuce_pripojovacipodminky_20110401_web.pdf
- [19] Vyhláška MPO č. 82/2011 Sb. ze dne 17. 3. 2011 o měření elektřiny a o způsobu stanovení náhrady škody při neoprávněném odběru, neoprávněné dodávce, neoprávněném přenosu nebo neoprávněné distribuci elektřiny.

- [20] ČSN 332000-4-41 ed. 2 Elektrické instalace nízkého napětí - Část 4-41: Ochranná opatření pro zajištění bezpečnosti - Ochrana před úrazem elektrickým proudem.
- [21] ČSN 332000-4-43 ed. 2 Elektrické instalace nízkého napětí - Část 4-43: Bezpečnost - Ochrana před nadproudy.
- [22] ČSN 332000-5-523 ed. 2 Elektrické instalace budov - Část 5: Výběr a stavba elektrických zařízení - Oddíl 523: Dovolené proudy v elektrických rozvodech.
- [23] OEZ Letohrad : Katalog kompaktních jističů Modeion.
- [24] OEZ Letohrad : Katalog Varius - vn pojistkové vložky.
- [25] ČSN EN 60909-0 Zkratové proudy v trojfázových střídavých soustavách – část 0 : Výpočet proudů.
- [26] GASCONTROL PLAST, a. s. : PE potrubí kanalizační tlakové [online].
<http://www.gascontrolplast.cz/potrubi-kanalizacni.html>
- [27] Zákon č. 586/1992 Sb., o daních z příjmů ve znění platném k 20.5.2012.
- [28] Cenové rozhodnutí Energetického regulačního úřadu č. 7/2011 ze dne 23. listopadu 2011, kterým se stanovuje podpora pro výrobu elektřiny z obnovitelných zdrojů energie, kombinované výroby elektřiny a tepla a druhotných energetických zdrojů.
- [29] Synek M. a kol.: Podniková ekonomika. C. H. Beck, Praha, 1999.
- [30] ČEZ Distribuce, a. s. : Možnosti připojování nových výroben [online].
<http://www.cezdistribuce.cz/cs/technicke-informace/moznosti-prip-novych-vyroben.html>
- [31] ČEZ Distribuce, a. s. : Volná transformační kapacita na distribučních transformátorech 110 kV/vn [online].
<http://www.cezdistribuce.cz/edee/content/file-other/distribuce/technicke-informace/distribucni-kapacita/trafo-morava.pdf>
- [32] ERÚ - Tisková zpráva o připravovaném zastavení podpory pro OZE, 25.4.2012 [online].
http://www.eru.cz/user_data/files/tiskove%20zpravy/2012/TZ_OZ_finall_konec.pdf