

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

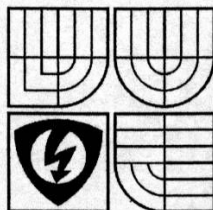
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

PETR SALÁŠEK

BRNO 2008



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav elektroenergetiky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika

Student: Salášek Petr

Ročník: 3

ID: 84900

Akademický rok: 2007/08

NÁZEV TÉMATU:

Návrh malé vodní elektrárny

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Základní typy hydroenergetických děl a klasifikace vodních elektráren
2. Vodohospodářské a hydroenergetické řešení MVE
3. Elektrická část MVE a její připojení do elektrizační soustavy
4. Návrh MVE dle zadaných parametrů
5. Ekonomika provozu MVE

DOPORUČENÁ LITERATURA:

dle pokynů vedoucího

Termín zadání: 17.12.2007

Termín odevzdání: 4.6.2008

Vedoucí projektu: Ing. Petr Mastný, Ph.D.

doc. Ing. Čestmír Ondrůšek, CSc.

předseda oborové rady



UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

LICENČNÍ SMLOUVA
POSKYTOVANÁ K VÝKONU PRÁVA UŽÍT ŠKOLNÍ DÍLO

uzavřená mezi smluvními stranami:

1. Pan/paní

Jméno a příjmení: Petr Salášek

Bytem: Mládežnická 416/2 Vysoké Mýto 566 01

Narozen/a (datum a místo): 19.4.1984, Vysoké Mýto

(dále jen „autor“)

a

2. Vysoké učení technické v Brně

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií,

se sídlem Údolní 244/53, 602 00 Brno,

jejímž jménem jedná na základě písemného pověření děkanem fakulty:

doc. Ing. Čestmír Ondrůšek, CSc.

(dále jen „nabyvatel“)

Čl. 1

Specifikace školního díla

1. Předmětem této smlouvy je vysokoškolská kvalifikační práce (VŠKP):

☐ disertační práce

☐ diplomová práce

☒ bakalářská práce

☐ jiná práce, jejíž druh je specifikován jako

(dále jen VŠKP nebo dílo)

Název VŠKP:

Návrh malé vodní elektrárny

Vedoucí/ školitel VŠKP:

Ing. Petr Mastný, Ph.D.

Ústav:

Ústav elektroenergetiky

Datum obhajoby VŠKP:

VŠKP odevzdal autor nabyvateli v*:

☒ tištěné formě

–

počet exemplářů 1

☒ elektronické formě

–

počet exemplářů 1

* hodící se zaškrtněte

2. Autor prohlašuje, že vytvořil samostatnou vlastní tvůrčí činností dílo shora popsané a specifikované. Autor dále prohlašuje, že při zpracovávání díla se sám nedostal do rozporu s autorským zákonem a předpisy souvisejícími a že je dílo dílem původním.
3. Dílo je chráněno jako dílo dle autorského zákona v platném znění.
4. Autor potvrzuje, že listinná a elektronická verze díla je identická.

Článek 2

Udělení licenčního oprávnění

1. Autor touto smlouvou poskytuje nabyvateli oprávnění (licenci) k výkonu práva uvedené dílo nevýdělečně užít, archivovat a zpřístupnit ke studijním, výukovým a výzkumným účelům včetně pořizování výpisů, opisů a rozmnoženin.
2. Licence je poskytována celosvětově, pro celou dobu trvání autorských a majetkových práv k dílu.
3. Autor souhlasí se zveřejněním díla v databázi přístupné v mezinárodní síti
 - ☐ ihned po uzavření této smlouvy
 - ☐ 1 rok po uzavření této smlouvy
 - ☐ 3 roky po uzavření této smlouvy
 - ☐ 5 let po uzavření této smlouvy
 - ☐ 10 let po uzavření této smlouvy(z důvodu utajení v něm obsažených informací)
4. Nevýdělečné zveřejňování díla nabyvatelem v souladu s ustanovením § 47b zákona č. 111/ 1998 Sb., v platném znění, nevyžaduje licenci a nabyvatel je k němu povinen a oprávněn ze zákona.

Článek 3

Závěrečná ustanovení

1. Smlouva je sepsána ve třech vyhotoveních s platností originálu, přičemž po jednom vyhotovení obdrží autor a nabyvatel, další vyhotovení je vloženo do VŠKP.
2. Vztahy mezi smluvními stranami vzniklé a neupravené touto smlouvou se řídí autorským zákonem, občanským zákoníkem, vysokoškolským zákonem, zákonem o archivnictví, v platném znění a popř. dalšími právními předpisy.
3. Licenční smlouva byla uzavřena na základě svobodné a pravé vůle smluvních stran, s plným porozuměním jejímu textu i důsledkům, nikoliv v tísní a za nápadně nevýhodných podmínek.
4. Licenční smlouva nabývá platnosti a účinnosti dnem jejího podpisu oběma smluvními stranami.

V Brně dne: 3.6.2008

.....
Nabyvatel

.....
Autor

Bibliografická citace práce:

PETR SALÁŠEK, Návrh malé vodní elektrárny. Bakalářská práce. Brno: Ústav elektroenergetiky FEKT VUT v Brně, 2008, 80 stran.

Prohlašuji, že jsem svou **bakalářskou práci** vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady (literaturu, projekty, SW atd.) uvedené v příloženém seznamu.

Zároveň bych na tomto místě chtěl poděkovat vedoucímu bakalářské práce Ing. Petru Mastnému, Ph.D. za cenné rady a připomínky k mé práci, poskytnutou literaturu a svým rodičům za podporu během celé doby mého studia.

Petr Salásek
.....



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ



**Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
Ústav elektroenergetiky**

Bakalářská práce
**NÁVRH MALÉ VODNÍ
ELEKTRÁRNY**

Petr Salášek

vedoucí: Ing. Petr Mastný Ph.D
Ústav elektroenergetiky, FEKT VUT v Brně, 2008

Brno



BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



Faculty of Electrical Engineering and Communication

Department of Electrical Power Engineering

Bachelor's Thesis

The project of the small water power station

by

Petr Salášek

Supervisor: Ing Petr Mastný, Ph.D

Brno University of Technology, 2008

Brno

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce v první části pojednává o využívání energie vodních toků v podmínkách České republiky. V druhé části se řeší konstrukce malé vodní elektrárny pro konkrétní podmínky. Na závěr je návrh zhodnocen z ekonomického pohledu.

KLÍČOVÁ SLOVA: malá vodní elektrárna; energie vody; vodní turbína; generátor;

ABSTRACT

The first part of this bachelor's work discuss the usage of watercourse power in conditions of the Czech Republic. A construction of the small water-power station on exact site is designed in the second part. At conclusion the project is assessed from economical point of view.

KEY WORDS: small water-power station; water energy; water turbine; generator

OBSAH

SEZNAM OBRÁZKŮ	11
SEZNAM TABULEK.....	12
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	13
1 ÚVOD.....	15
2 ZÁKLADNÍ TYPY HYDROENERGETICKÝCH DĚL A KLASIFIKACE VODNÍCH ELEKTRÁREN	16
2.1 ZÁKLADNÍ SCHÉMATA HYDROENERGETICKÝCH DĚL.....	16
2.2 DRUHY VODNÍCH ELEKTRÁREN A JEJICH KLASIFIKACE	18
3 VODOHOSPODÁŘSKÉ A HYDROENERGETICKÉ ŘEŠENÍ MVE	20
3.1 ROZDĚLENÍ VODNÍCH ELEKTRÁREN PODLE HOSPODAŘENÍ S VODOU.....	20
3.2 HYDROENERGETICKÝ POTENCIÁL VODNÍHO TOKU	20
3.3 ZÁKLADNÍ PARAMETRY HYDROENERGETICKÉHO DÍLA	22
3.3.1 PRŮTOK TURBÍNOU	23
3.3.2 SPÁD	23
3.3.2.1 Přetlakové turbíny s přiváděčem s volnou hladinou	24
3.3.2.2 Přetlakové turbíny s tlakovým přiváděčem	26
3.3.2.3 Rovnotlaké turbíny.....	26
3.4 VÝPOČET VÝKONU A VÝROBY ELEKTRICKÉ ENERGIE V MVE.....	27
4 ELEKTROTECHNICKÉ ZAŘÍZENÍ MVE	31
4.1 ZAČLENĚNÍ MVE DO ENERGETICKÉHO SYSTÉMU	31
4.2 ELEKTRICKÁ ZAŘÍZENÍ MVE	32
4.2.1 ELEKTRICKÉ GENERÁTORY.....	32
4.2.2 SILNOPROUDÁ ZAŘÍZENÍ MVE	36
4.2.3 POMOCNÁ ELEKTRICKÁ ZAŘÍZENÍ MVE.....	37
5 NÁVRH MALÉ VODNÍ ELEKTRÁRNY PRO DANOU LOKALITU.....	39
5.1 POPIS PODMÍNEK V MÍSTĚ NAVRHOVANÉ MVE NEDOŠÍN 1	39
5.1.1 LOKALITA	39
5.1.2 POPIS VODNÍHO DÍLA	39
5.1.2.1 Základní údaje o jezové zdrži	39
5.1.2.2 Popis vodního díla.....	39
5.1.3 HYDROLOGICKÉ ÚDAJE	39
5.2 KONCEPCE ŘEŠENÍ MVE NEDOŠÍN 1	40
5.2.1 KONCEPCE OSAZENÍ JEZU NEDOŠÍN MVE	40
5.3 NÁVRH STROJNÍ ČÁSTI.....	41
5.3.1 VÝKON MVE.....	41
5.3.2 TURBÍNA.....	41
5.3.2.1 Převody	44
5.3.2.2 Regulace	45
5.4 ELEKTRICKÁ ČÁST MVE VČETNĚ VYVEDENÍ VÝKONU	46
5.4.1 ELEKTROTECHNICKÁ ČÁST	46

5.4.2 ELEKTRICKÝ GENERÁTOR.....	46
5.4.3 PŘIPOJENÍ MVE NEDOŠÍN 1 NA DISTRIBUČNÍ SOUSTAVU.....	51
5.4.4 ŘÍZENÍ JALOVÉHO VÝKONU.....	55
5.5 NÁVRH STAVEBNÍCH ÚPRAV V MÍSTĚ MVE.....	58
5.5.1 SOUČASNÁ SITUACE	58
5.5.2 SITUACE PO INSTALACI MVE NEDOŠÍN 1	59
5.5.3 NÁVRH STAVEBNÍCH ÚPRAV V MÍSTĚ MVE NEDOŠÍN 1	59
5.5.3.1 Stavební úpravy hlediska MVE Nedošín 1.....	59
5.5.3.2 Stavební úpravy z hlediska kapacity jezu.....	64
5.5.4 POSOUZENÍ KAPACITY JEZU	65
6 EKONOMIKA PROVOZU MVE NEDOŠÍN 1	71
6.1 NÁKLADY MVE NEDOŠÍN 1	71
6.1.1 STAVEBNÍ ÚPRAVY V MÍSTĚ MVE	71
6.1.2 STROJNÍ ČÁST	72
6.1.3 ELEKTRICKÁ ČÁST.....	71
6.1.4 ROČNÍ PROVOZNÍ NÁKLADY	71
6.1.5 CELKOVÉ NÁKLADY NA VYBUDOVÁNÍ MVE NEDOŠÍN 1	71
6.2 CENY A DAŇOVÁ ZVÝHODNĚNÍ	72
6.2.1 CENY ELEKTRICKÉ ENERGIE	72
6.2.2 DAŇOVÉ PODMÍNKY PRO MVE	72
6.3 HODNOCENÍ INVESTIC	73
6.3.1 VÝNOS MVE NEDOŠÍN 1	73
6.3.2 METODY HODNOCENÍ INVESTIC.....	74
7 ZÁVĚR.....	79
POUŽITÁ LITERATURA	81
PŘÍLOHA A	80

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 2.1 Umělé soustředění spádu [4]</i>	17
<i>Obr. 2.2 Dělení vodních elektráren podle využívaného spádu [4]</i>	18
<i>Obr. 3.1 Schéma k výpočtu teoretického výkonu toku [4]</i>	21
<i>Obr. 3.2 Užitečný spád přetlakové turbíny v otevřené turbínové šachtě [4]</i>	25
<i>Obr. 3.3 Užitečný spád přetlakové turbíny s tlakovým přiváděčem [4]</i>	26
<i>Obr. 3.4 Užitečný spád rovnotlaké turbíny [4]</i>	27
<i>Obr. 4.1 Příklad hlavního schématu elektrického zařízení MVE [4]</i>	31
<i>Obr. 4.2 Průběh trojfázového proudu v závislosti na pracovních polohách generátoru [4]</i>	33
<i>Obr. 4.3 Vazba mezi výkonem generátoru a jeho pracovními oblastmi [4]</i>	34
<i>Obr. 4.4 Schéma zapojení generátoru na síť [4]</i>	36
<i>Obr. 4.5 Propojení generátorů s transformátory [4]</i>	37
<i>Obr. 5.1 Odtoková křivka na jezu v Nedošíně</i>	40
<i>Obr. 5.2 Odtoková křivka s vyznačením pokrytí turbínou</i>	43
<i>Obr. 5.3 Odtoková křivka s vyznačením pokrytí turbínou + pokrytí regulací</i>	46
<i>Obr. 5.4 Vyznačení motorické a generátorické oblasti asynchronního elektrického stroje</i>	47
<i>Obr. 5.5 Účinnost a účinník generátoru při dílčím zatížení</i>	50
<i>Obr. 5.6 Jednopolové schéma MVE Nedošín</i>	53
<i>Obr. 5.7 Kondenzátor ZEZ Silko</i>	55
<i>Obr. 5.8 Regulátor NOVAR 5</i>	56
<i>Obr. 5.9 Schéma zapojení regulátoru</i>	58
<i>Obr. 5.10 Vakové vzdouvací zařízení</i>	59
<i>Obr. 5.11 Provedení vakového vzdouvacího zařízení MVE Nedošín 1</i>	60
<i>Obr. 5.12 Osazení šterkové propusti</i>	61
<i>Obr. 5.13 Provedení soustrojí + savka</i>	61
<i>Obr. 5.14 Schéma umístění vstupního potrubí</i>	62
<i>Obr. 5.15 Vliv hloubky vody h a výšky e na tvoření vírů</i>	63
<i>Obr. 5.16 Umístění savky</i>	64
<i>Obr. 5.17 Náskres stavebních úprav z hlediska kapacity jezu</i>	65
<i>Obr. 5.18 Konsumpční křivka koryta 1</i>	67
<i>Obr. 5.19 Konsumpční křivka koryta 2</i>	68
<i>Obr. 5. 20 Výpočtové schéma</i>	69
<i>Obr. 6.1 Průběh splacení celé investice</i>	77

SEZNAM TABULEK

<i>Tabulka 2.1 Dělení MVE podle dosažitelného výkonu [4]</i>	18
<i>Tabulka 5.1 Hodnoty průměrného překročení průtoku po dobu (M-denní, Q_{md}) [5]</i>	40
<i>Tabulka 5.2 Velké vody opakující se jednou za (N-leté období) [5]</i>	40
<i>Tabulka 5.3 Porovnání turbín</i>	42
<i>Tabulka 5.4 Hodnoty průměrného překročení průtoku</i>	43
<i>Tabulka 5.5 Regulační stupně spádu</i>	45
<i>Tabulka 5.6 Parametry Asynchronního motoru Siemens typ 1LA7 133-4AA61</i>	49
<i>Tabulka 5.7 Účinnost Účinník generátoru při dílčích zatíženích</i>	50
<i>Tabulka 5.8 Přehled elektrických výkonů při různých průtocích a spádech</i>	51
<i>Tabulka 5.9 Nastavení ochran</i>	52
<i>Tabulka 5.10 Srovnání možností navýšení spádu</i>	59
<i>Tabulka 5.11 Vstupní hodnoty pro určení umístění vstupního potrubí</i>	63
<i>Tabulka 5.12 Výpočet konsumpční křivky v profilu 1</i>	66
<i>Tabulka 5.13 Výpočet konsumpční křivky v profilu 2</i>	67
<i>Tabulka 6.1 Stavební úpravy</i>	70
<i>Tabulka 6.2 Nejdůležitější položky ze stavebních nákladů</i>	70
<i>Tabulka 6.3 Strojní část</i>	71
<i>Tabulka 6.4 Elektrická část</i>	71
<i>Tabulka 6.5 Provozní náklady</i>	71
<i>Tabulka 6.6 Celkové náklady na vybudování MVE Nedošín</i>	71
<i>Tabulka 6.7 Výkupní ceny + Zelené bonusy</i>	72
<i>Tabulka 6.8 Vyrobená energie za 1 rok</i>	73
<i>Tabulka 6.9 Vstupní hodnoty</i>	74
<i>Tabulka 6.10 Přehled číselných údajů</i>	75

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

A průtočná plocha	m součinitel přepadu pro jezy
$\frac{\alpha_0 v_0^2}{2 \cdot g}$ rychlostní výška na začátku	m_1 sklon levého břehu
b_0 účinná šířka jezu	m_2 sklon pravého břehu
B šířka koryta ve dně	MVE malá vodní elektrárna
využívaného úseku toku	$n_{synchronní}$ synchronní otáčky generátoru
c_{u1} rotační složka rychlosti	$n_{generátorické}$ generátorické otáčky generátoru
c_2 průměrná rychlost vody vytékající	$n_{motorické}$ motorické otáčky generátoru
z výstupního profilu savky	n_{11} jednotkové otáčky
c vzdálenost osy potrubí od zdi	nn nízké napětí
C rychlostní součinitel	N_p roční provozní náklady
CF peněžní příjem z investice v jtém roce	O omočený obvod
$\dot{C}SHI$ čistá současná hodnota	p počet pólových dvojic
DS distribuční soustava	P výkon
d průměr vstupního potrubí	P_c činný výkon
$D_{skut.}$ skutečný průměr oběžného kola turb.	P_{ef} efektivní výkon
$D_{výpočt.}$ výpočt. průměr oběžného kola turb.	P_{el} elektrický výkon
D průměr rozšířeného vstupn. potrubí	P_{gen} výkon generátoru
$\cos \varphi$ účinník, úhel posunutí časového	P_t teoretický hydroenergetický potenciál
průběhu proudu a napětí	PI index ziskovosti
e výška vstupního profilu nade dnem	P_z zdánlivý výkon
E výroba elektrické energie	$P_{turbíny}$ výkon turbíny
E_t teoretická práce (energie),	PDS provozovatel distribuční soustavy
E_{1rok} energie vyrobená za 1 rok	$PPDS$ pravidla pro paralelní provoz zdrojů
f frekvence sítě	se sítí provozovatele distribuční soustavy
g gravitační konstanta	Q průtok
i požadovaná minimální výnosnost	Q_{gen} jalový výkon generátoru
I podelný sklon koryta	$Q_{p, roč}$ průměrný roční využitý průtok
$I_{vinutí}$ proud vinutím	Q_1 jednotkový průtok turbínou
IN investiční náklady	Q_H hltnost turbíny
k rychlostní výška	Q_j jalový průtok vodní elektrárny
KT_h kumulativní tok hotovosti	Q_{jm} jmenovitá hltnost
H spád	$Q_{kond.}$ jalový výkon kondenzátorů
h' poměrná tlaková výška	$Q_{návrh}$ návrhový průtok turbínou
h_0 energetická přepadová výška	$Q_{p max}$ největší využitelný průtok,
H_c celkový spád vodní elektrárny	$Q_{p min}$ nejmenší využitelný průtok,
H_m jmenovitý spád	$Q_{p roč}$ průměrný roční využitelný průtok
H_{max} maximální spád	Q_{pr} provozní průtok vodní elektrárny
H_n návrhový spád	$Q_{sítě}$ jalový výkon sítě
h_{z1} vtoková ztráta	Q_T průtok turbínou
h_{z2} ztráta třením po délce přivaděče	Q_v využitelný průtok turbínou
s volnou hladinou	Q_{11} jednotkový průtok
h_{z3} ztráta v jemných česlích a ve vtoku	R hydraulický poloměr
do turbínové šachty	s délka odpisového období
h_{z4} ztráta v odpadu	t čas
h_v minimální hloubka vývařiště	U_{3sdr} sdružené napětí
L_n délka úseku	VE vodní elektrárna
	VT vodní turbína
	vn vysoké napětí

vvn velmi vysoké napětí
 VVP vnitřní výnosové procento
 T_h tok hotovosti (Cash flow)
 T_r roční tržby
 η_{gen} účinnost generátoru
 η účinnost
 η_h hydraulická účinnost
 η_m mechanická účinnost
 $\eta_{př}$ účinnost převodu
 $\eta_{skuteč}$ skutečná účinnost
 η_t účinnost turbíny
 ρ hustota vody
 Y hvězda
 Z lomená hvězda
 $Z_č$ čistý zisk
 Z_h hrubý zisk
 Δ trojúhelník

1 ÚVOD

Cílem této práce je návrh realizace malé vodní elektrárny. Energie vody je využívána od nepaměti (mlýny, pily, hamry). Jedná se o 100% obnovitelný zdroj energie. Proto využívání hydroenergetického potenciálu toků má jistou i svou budoucnost. V současnosti sílí trend směřující k využití obnovitelných zdrojů energie bezzbytku.

Tato bakalářská práce si bere za úkol v části první – zmapování možnosti realizace malých vodních elektráren v podmínkách České republiky. V praktické části je cílem předvést, že i v lokalitě na první pohled ne zcela ideální lze realizovat malou vodní elektrárnu – čistý a k přírodě šetrný zdroj energie. Aby bylo možno realizovat využití i hodně malých potenciálů, bylo nutno najít vhodný vodní motor pro dané podmínky. Proto je zamýšleno využití žhavé novinky v oboru – Vírové turbíny. V závěru práce je provedeno ekonomické vyhodnocení navrhovaného řešení.

2 ZÁKLADNÍ TYPY HYDROENERGETICKÝCH DĚL A KLASIFIKACE VODNÍCH ELEKTRÁREN

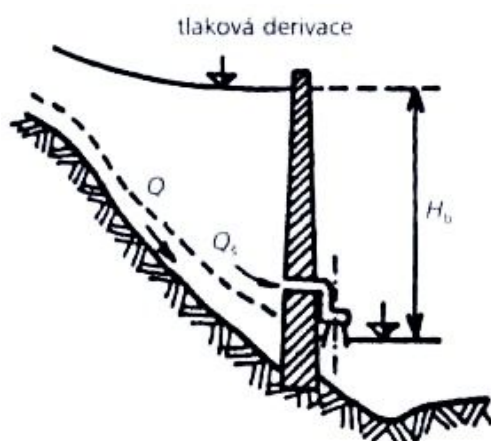
2.1 Základní schémata hydroenergetických děl

Při navrhování energetického díla využití určitého vodního toku nebo jeho úseku se studují různá schémata celkového koncepčního řešení. Hledá se optimální řešení, které při respektování všech limitujících podmínek umožní naplno využít jeho hydroenergetický potenciál. Hlavními limitujícími podmínkami jsou v současné době především urbanizace přilehlého území, existující průmysl, komunikace a v neposlední řadě ochrana životního prostředí. Efektivní využití vodní energie určitého úseku vodního toku je podmíněno soustředěním spádu a průtoku v lokalitě vodní elektrárny, což vyžaduje příslušné stavební zásahy.

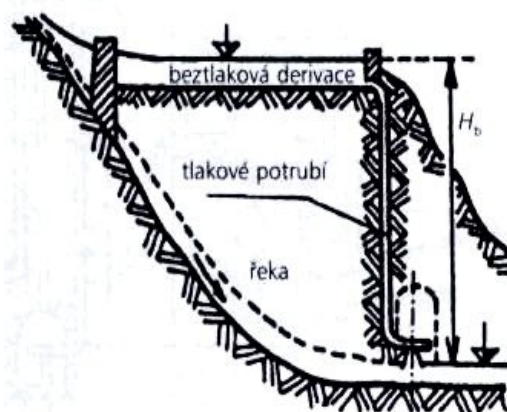
Umělého soustředění spádu lze dosáhnout:

- výstavbou přehrady (obr. 2.1a). Toto řešení přichází v úvahu zejména v úzkých údolích horních a středních řek, které nejsou hustě osídlené (např. vodní díla Orlík, Slapy na Vltavě, Oravská přehrada na Oravě aj.);
- výstavbou beztlakového nebo beztlakově-tlakového přivaděče (obr. 2.1b). Tento způsob soustředění spádu je vhodný zejména na středních a dolních úsecích řek, které mají malý podélný sklon a protékají hustě osídleným a zemědělsky využívaným územím (např. kaskáda vodních elektráren na Váhu);
- výstavbou tlakového přivaděče nebo přehrady s tlakovým přivaděčem (obr. 2.1c). Toto řešení se nejvíce používá v členitém horském terénu. Přehrada se obvykle umístí do morfologicky vhodného profilu a úsek toku s velkým sklonem pod ní se využívá pomocí derivace, nejčastěji tlakové (např. vodní díla Seč a Křižanovice na Chrudimce, kaskáda Motyčky-Dolní Jelenec-Staré hory aj.). [4]

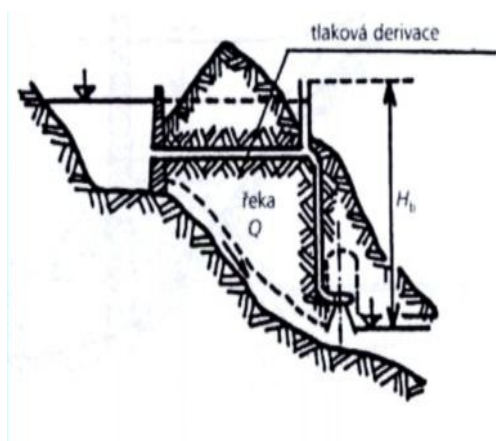
a)



b)



c)



Obr. 2.1 Umělé soustředění spádu [4]

Umělého soustředění průtoku lze dosáhnout:

- zachycením-soustředěním vody ve vlastním povodí řeky,
- převedením vody z jiného povodí,
- umělým přečerpáváním vody v době přebytku elektrické energie a její akumulací ve výše položené nádrži. Tak vznikají umělé sekundární zdroje vodní energie – přečerpávací vodní elektrárny (PVE), u nichž se uměle vytváří průtok i spád. Jsou to v podstatě hydraulické akumulátory energie.

Optimální schéma hydroenergetického využití je závislé na morfologických, hydrologických a geologických poměrech v dané oblasti. Jeho výběr představuje jeden z nejsložitějších inženýrských úkolů. Přírodní podmínky většinou umožňují rozmanitá variantní řešení, která je možno po technické stránce rozdělit přibližně do čtyř základních skupin:

- *vzdouvací* schémata, u nichž je spád a případně i průtok soustředěný vzdouvacím zařízením – jezem nebo přehradou. Spád se dá zvýšit případným prohloubením a úpravou řečiště pod vzdouvací stavbou. Tato schémata se nejvíce používají v úsecích toků s malým podélným sklonem a s velkými průtoky;
- *derivační* schémata, u nichž se spád soustřeďuje beztlakovou nebo tlakovou derivací. Sklon derivace je obvykle mnohem menší než sklon dna toku, takže se dosáhne minimálních hydraulických ztrát a maximálního soustředění využitelného spádu. Tato schémata jsou vhodná především na tocích s větším sklonem dna;
- *přehradně-derivační* schémata, u nichž se spád získává vzdouvacím zařízením (přehradou) i derivací (přivaděčem nebo odpadem). Tato schémata jsou vhodná na tocích s větším podélným sklonem dna a s menšími průtoky;
- *přečerpávací* schémata, u nichž soustředění spádu a velikost využívaného průtoku nezávisí na vodnatosti toku. Hodnoty spádu a průtoku jsou určovány potřebou špičkového výkonu v elektrizační soustavě a objemem přebytečné energie v denních a týdenních cyklech. Jsou však podmíněny reálnými možnostmi topografie daného území. [4]

2.2 Druhy vodních elektráren a jejich klasifikace

Vodní elektrárny se dají klasifikovat podle různých hledisek.

- Podle velikosti instalovaného výkonu (jedno z nejpoužívanějších hledisek).
ČSN (STN) 75 0128 Vodní hospodářství – Názvosloví ve využití vodní energie dělí vodní elektrárny podle instalovaného výkonu na:
 - malé vodní elektrárny s instalovaným výkonem do 10MW,
 - střední vodní elektrárny s instalovaným výkonem od 10MW do 200MW,
 - velké vodní elektrárny s instalovaným výkonem nad 200MW.

Malé vodní elektrárny se podle této normy dělí na:

- domácí vodní elektrárny s instalovaným výkonem do 35kW,
- vodní mikroeletřárny s instalovaným výkonem od 35kW do 100kW,
- vodní minielektrárny s instalovaným výkonem od 100kW do 1000kW,
- průmyslové vodní elektrárny s instalovaným výkonem od 1MW do 10MW.

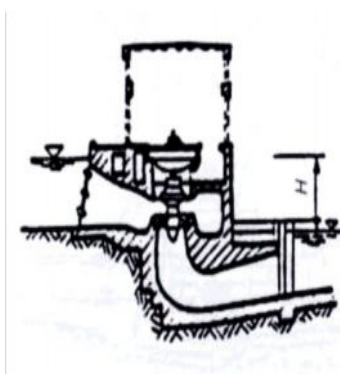
ČSN (STN) 73 6861 Malé vodní elektrárny rozděluje malé vodní elektrárny podle dosažitelného výkonu do čtyř kategorií. Dělení je uvedeno v tab. 2.1.

Kategorie MVE	Dosažitelný výkon MVE
I a	od 1 000 do 10 000
I b	od 500 do 1 000
II	od 100 do 500
III	od 35 do 100
IV	do 35

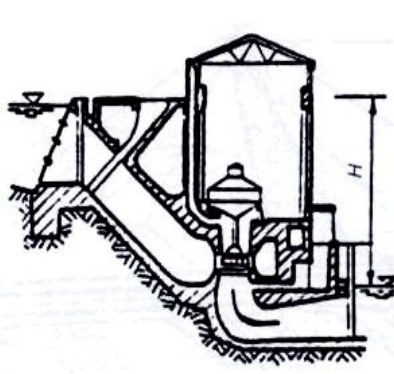
Tabulka 2.1 Dělení MVE podle dosažitelného výkonu [1]

- Podle velikosti spádu se vodní elektrárny dělí na:
 - nízkotlaké využívající spád do 20 m (obr. 2.8a),
 - středotlaké využívající spád od 20 m do 100 m (obr. 2.8b),
 - vysokotlaké využívající spád nad 100 m (obr. 2.8c).

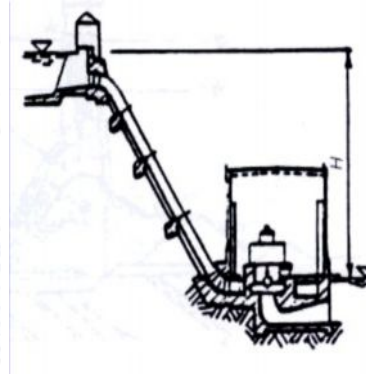
a) nízkotlaká



b) středotlaká



c) vysokotlaká



Obr. 2.2 Dělení vodních elektráren podle využívaného spádu [4]

- *Podle charakteru pracovního režimu rozeznáváme:*
 - a) *průtočné* vodní elektrárny, které pracují s přirozeným průtokem a zpravidla využívají spád vzdutý jezem nebo energii vodního proudu nehrazeného toku,
 - b) *akumulační* vodní elektrárny, které pracují s řízeným odběrem vody akumulované v nádrži,
 - c) *přečerpávací* vodní elektrárny, které využívají akumulovanou vodu, přečerpávanou z dolní nádrže do nádrže horní. Spád elektrárny je vytvářen rozdílem hladin těchto nádrží.

- *Podle účasti na pokrývání diagramu zatížení elektrizační soustavy se vodní elektrárny dělí na:*
 - a) *základní*, které pracují převážně v pásnu základního zatížení denního diagramu zatížení elektrizační soustavy;
 - b) *pološpičkové*, které pracují převážně v pásnu pološpičkového zatížení denního diagramu zatížení; jsou to vesměs vodní elektrárny s denním řízením odtoku;
 - c) *špičkové*, které pracují převážně v pásnu špičkového zatížení denního diagramu zatížení elektrizační soustavy;
 - d) *samostatné*, které nespolupracují s elektrizační soustavou. [4]

3 VODOHOSPODÁŘSKÉ A HYDROENERGETICKÉ ŘEŠENÍ MVE

3.1 Rozdělení vodních elektráren podle hospodaření s vodou

Vodní elektrárny (resp. vodní díla s hydroenergetickým využitím) podle hospodaření s vodou rozeznáváme:

- Průtočné;
- Regulační:
 - a) s přirozenou akumulací,
 - b) s umělou akumulací,
 - c) se smíšenou akumulací (přirozenou i umělou)

Z časového hlediska může mít každé hydroenergetické vodní dílo regulaci:

- krátkodobou (denní, týdenní),
- sezónní (v rámci roku),
- dlouhodobou (víceletou).

Toto rozdělení (možnost hospodaření s vodou) vyplývá především z velikosti zásobního objemu akumulační nádrže a ze způsobu akumulace vody. Možnost hospodaření s vodou má zásadní vliv i na režim provozu vodní elektrárny, a tím na její zařazení do diagramu denního zatížení v elektrizační soustavě.

Průtočné vodní elektrárny zpracovávají okamžité průtoky. Budují se:

- a) na využití přirozených průtoků u vzdouvacích hydrotechnických staveb, které neumožňují regulování průtoků (nemají zásobní objem),
- b) na využití vyrovnaných odtoků pod vyrovnávacími nádržemi,
- c) na využití rovnoměrných odběrů vody pro vodohospodářské účely z akumulačních nádrží a vodojemů,
- d) na využití biologických průtoků (při protékání přes vzdouvací objekt).

3.2 Hydroenergetický potenciál vodního toku

Každý vodní tok představuje určité množství vodní energie. Hydroenergetický potenciál vodního toku je základní údaj o toku určující, jakou energii (kWh/rok) unášejí jeho průtoky. Údaje o hydroenergetickém potenciálu povrchových vodních toků na určitém území slouží k celkovému přehledu o možnostech využití toků, resp. jejich potenciální energie. Rozlišuje se hrubý teoretický potenciál, teoretický a reálně využitelný hydroenergetický potenciál.

Hrubý hydroenergetický potenciál povrchových toků se určuje z nadmořských výšek hodnocené oblasti a příslušných průměrných průtoků. Určuje se k hladině moře, do něhož tok ústí, nebo ke kótě hladiny toku na státní hranici. Má evidenční charakter. [4]

Teoretický hydroenergetický potenciál se počítá podle vzorce:

$$P_T = 9,81 \cdot Q \cdot H \quad (\text{kW}) \quad (3.1)$$

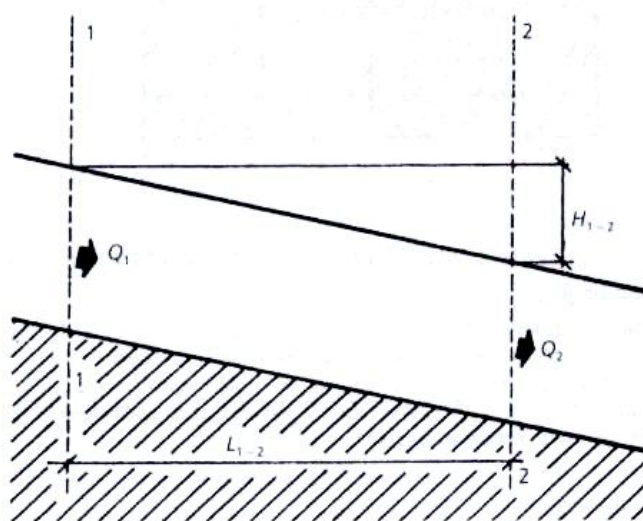
při účinnosti přeměny energie $\eta = 1$, tj. 100%.

Nejrozšířenější způsob výpočtu je metoda po jednotlivých úsecích toku podle zásad přijatých Mezinárodním energetickým výborem. Celý uvažovaný tok se rozdělí pomocí profilů na úseky, v nichž lze umístit stupně (jezy, přehrady) k soustředění spádu. Jejich výšky se reálně volí tak, aby v podélném profilu vznikla nepřerušovaná úplná kaskáda (tzv. hydraulicky vázaná) s vodorovnými hladinami v jednotlivých úsecích.

Potenciální výkon úseku toku mezi dvěma zvolenými profily 1 a 2 (obr. 3.2) a průtokem na začátku a na konci úseku Q_1 a Q_2 a spádem H_{1-2} se vypočítá ze vzorce:

$$P_{1-2} = 9,81 \cdot \frac{(Q_1 + Q_2)}{2} \cdot H_{1-2} \text{ (kW)} \quad (3.2)$$

Počítá se tedy s průměrným průtokem v daném úseku 1 - 2.



Obr. 3.1 Schéma k výpočtu teoretického výkonu toku [4]

Teoretický potenciální výkon toku se počítá pro dvě hodnoty průtoků, které se určují z hydrogeologických podkladů (tj. křivky překročení průměrných průtoků):

- Q_{50} - střední průtok s 50procentní pravděpodobností překročení,
- Q_{95} - minimální průtok s 95procentní pravděpodobností překročení.

Specifický výkon toku v úseku 1 – 2 s délkou L_{1-2} se určí podle vzorce:

$$p_{1-2} = \frac{P_{1-2}}{L_{1-2}} \text{ (kW} \cdot \text{km}^{-1}) \quad (3.3)$$

Součet výkonů $\sum_{i=1}^n P_i$ jednotlivých n úseků toku je teoretický hydroenergetický potenciál. Představuje tedy teoretické zásoby vodní energie při 100% využití celkového spádu toku a při 100% využití středních průtoků. Hodnota $\sum_{i=1}^n P_{i50\%}$ udává střední a hodnota $\sum_{i=1}^n P_{i95\%}$ minimální teoretický potenciál toku. Po vynásobení 8760 hodinami dostaneme přibližnou

hodnotu množství energie $\sum_{i=1}^n E_{i50\%}$, resp. $\sum_{i=1}^n E_{95\%i}$ unášené řekou za celý rok. Celé řešení se uskutečňuje tabelárně a graficky.

Reálně využitelný hydroenergetický potenciál vodního toku je menší než teoretický potenciál, protože 100% využití celkového spádu a středního průtoku není prakticky možné. Tomu v cestě stojí vybudovaná města, komunikace, velké objekty, chráněná krajinná území apod. Proto se teoreticky předpokládané stupně nepřerušované úplné hydraulicky vázané kaskády často nedají všechny v takovém počtu a v takové výšce zrealizovat. Reálná není ani 100% přeměna vodní energie v elektrickou. Vznikají ztráty, které můžeme rozdělit do tří skupin:

- ztráty na spádu (např. v důsledku nevhodných geologických a topografických podmínek, ztráty třením, místní ztráty, ztráty způsobené požadavky ochrany přírody apod.),
- ztráty průtočného množství (v důsledku nemožnosti plně průtok využít, pro průsak, výpar, omezenou kapacitou vodních elektráren),
- ztráty při převodech potenciální energie toku na mechanickou a elektrickou energii ve vodních strojích, ztráty v přenosových sítích apod. (např. účinnost turbíny a účinnost generátoru $\eta_t \cdot \eta_G \sim 0,75 \div 0,85$).

Shrňme-li uvedené poznatky, můžeme konstatovat, že energetický význam a reálné možnosti využití jednotlivých úseků toků určují základní podmínky:

- hydrologické,
- topografické,
- geologické,
- ekologické.

Uvedenými ztrátami se výrazně redukuje teoretické hodnoty $\sum_{i=1}^n P$, $\sum_{i=1}^n E$. Tím se přibližujeme k pravděpodobným reálným údajům energetickém bohatství toku. Technicky využitelný hydroenergetický potenciál představuje přibližně 40-50% potenciálu teoretického. V České republice je udávána hodnota 3434 GWh/rok. [4]

3.3 Základní parametry hydroenergetického díla

Základní parametry, které charakterizují každé hydroenergetické, jsou:

- průtok Q ,
- spád H ,
- účinnost η ,
- výkon P ,
- výroba elektrické energie E .

Základními veličinami pro výpočet výkonu a výroby elektrické energie z vodního zdroje jsou průtok, spád a účinnost hydroalternátoru, příp. motorgenerátor. Při definování základních parametrů hydroenergetického díla vycházíme z ČSN (STN) 75 0128 Názvosloví využití vodní energie.

3.3.1 Průtok turbínou

Průtok turbínou je definován jako celkové množství vody protékající turbínou za jednotku času včetně prosáknuté vody v oblasti turbíny (tedy ztracené pro energetickou přeměnu). Základní jednotkou je $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

Z hlediska vodohospodářského řešení vodní elektrárny jsou důležité hodnoty průtoku, které jsou k dispozici k účinnému energetickému zpracování.

Můžeme rozlišovat tyto průtoky:

- *nejmenší* ($Q_{p \min}$) *a největší* ($Q_{p \max}$) *využitelný průtok*, který byl v uvažovaném období k dispozici k využití ve vodní elektrárně;
- *nejmenší* ($Q'_{p \min}$) *a největší* ($Q'_{p \max}$) *využitý průtok*- nejmenší a největší průtok vodní elektrárnou, který byl v daném období energeticky využitý;
- *průměrný roční využitelný průtok* ($Q_{p \text{ roč}}$) – úhrnné množství vody, které by mohlo být v jednom roce celkem využitý;
- *průměrný roční využitý průtok* ($Q'_{p \text{ roč}}$) – úhrnné množství vody v jednom roce skutečně využitě ve vodní elektrárně, dělené počtem sekund v roce;
- *jalový průtok vodní elektrárny* (Q_j) – je průměrný průtok vodní elektrárny, který nebyl v daném energetickém období využitý;
- *provozní průtok vodní elektrárny* (Q_{pr}) – dosažitelný průtok, který je k dispozici vodní elektrárně při daném spádu v daném časovém okamžiku.

Poměr využitého průtoku vodní elektrárny k průměrnému průtoku ve vodním toku v profilu odběru vodní elektrárny za posuzovanou časovou jednotku nebo období nazýváme *stupeň využití odtoku* vodní elektrárnou.

Z hlediska průtoku vody vodním strojem rozeznáváme:

- *průtok turbínou* (Q_T) – průtok využitý turbínou včetně vody prosáknuté ucpávkou a obtokovými trubkami, rozumíme tím celkové množství vody potřebné na provoz turbíny při daném zatížení včetně ztrát;
- *hltnost turbíny* (Q_H) – největší možný průtok turbínou, který se často vztahuje k určitému spádu;
- *jmenovitá hltnost* (Q_{jm}) – maximální průtok turbínou při jmenovitém spádu (tj. při spádu, při němž je účinnost největší);
- *návrhový průtok turbínou* (Q_n) – průtok při návrhových hodnotách spádu, výkonu a otáček turbíny;
- *využitelný průtok turbínou* (Q_v) – průtok, který je turbína při příslušném okamžitém spádu schopna a účinně energeticky zpracovat;
- *jednotkový průtok turbínou* (Q_1) – průtok přepočítaný na spád $H = 1\text{m}$ a průměr oběžného kola $D = 1\text{m}$; [4]

Největší průtok, který lze převádět všemi vodními stroji hydroenergetického díla, je jeho *průtoková kapacita*.

3.3.2 Spád

Spád H je v obecném významu výškový rozdíl dvou bodů hladiny, nebo u vzdouvací stavby dvou hladin – nad a pod ní.

Spád vodní elektrárny je výškový rozdíl hladin před vtokem a před vyústěním do odpadu vodní elektrárny. V hydroenergetické praxi rozlišujeme dva druhy spádů.. Spád odpovídající nulovému průtoku hydraulickým systémem a spády během dynamického režimu práce vodní elektrárny. Udává se v metrech.

Celkový spád vodní elektrárny H_c je statický spád mezi dvěma posuzovanými úseky toku, který chceme energeticky využít. Je daný výškovým rozdílem horní a dolní hladiny při nulovém průtoku vodní elektrárnou, takže ho lze snadno určit na hotovém díle nivelací úrovně hladin. Představujeme potenciální energii vody, která je při dané sestavě hydroenergetických objektů k dispozici pro energetickou přeměnu ve vodní turbíně mezi jejím a vstupním a výstupním profilem.

Čistý spád (provozní spád) vodní elektrárny je celkový spád zmenšený o hydraulické ztráty kromě ztráty v hydraulickém obvodu. Po odečtení hydraulických ztrát v hydraulickém obvodu dostaneme *užitečný spád vodní elektrárny*. Užitečný spád můžeme definovat jako výškový rozdíl mezi čarami měrné energie těsně před vstupem do vodního stroje a na jeho výstupu. Je to celkový spád, od něhož jsou odečteny všechny ztráty v přiváděči a odpadu, které se nezahrnují do účinnosti turbíny. Pro turbíny se uvádějí tyto užitečné spády:

- *návrhový spád (H_n)* je spád s největší pravděpodobností výskytu při návrhových hodnotách průtoku a výkonu hydroagregátu vodní elektrárny (na tento spád je turbína dodávána),
- *maximální spád (H_{max})*, tj. největší užitečný spád, na který je turbína konstruována,
- *jmenovitý spád (H_m)*, tj. užitečný spád, při němž má turbína nejlepší hydraulické vlastnosti (největší účinnost).

U hydroenergetických děl bez akumulace vody s krátkodobým řízením provozu má význam *zabezpečený spád vodní elektrárny*, tj. spád s určitým zabezpečením výskytu nebo překročení v uvažovaném období. Jeho zabezpečení se udává procentuální hodnotou doby, během níž bylo spádu dosaženo nebo byl překročen.

Spád je určen topografickými a hydraulickými poměry, schémata a typem hydroenergetického díla, stavebním a hydraulickým řešením objektů. Vztah mezi celkovým spádem H_c a užitečným spádem H , rychlostními výškami a hydraulickými ztrátami v hydraulickém obvodu vodní elektrárny i ztrátami ve využívaném úseku toku je dán řešením Bernoulliho rovnice pro vstupní a výstupní profil turbíny za dynamického režimu (tj. za nenulového průtoku oběžným kolem turbíny). Určením užitečného spádu u hlavních typů používaných turbín a základními schémata MVE se zabýváme dále. [4]

3.3.2.1 Přetlakové turbíny s přiváděčem s volnou hladinou

K určení užitečného spádu u nízkotlakých derivačních a jezových MVE s použitím přetlakové turbíny s otevřenou turbínovou šachtou nebo spirálou platí rovnice:

$$H = \frac{\alpha \cdot v_1^2}{2 \cdot g} - \frac{p_1 - p_2}{\rho \cdot g} + (h_1 - h_2) \quad (3.5)$$

nebo při určení pomocí celkového spádu rovnice:

$$H = H_c + \frac{\alpha \cdot v_1^2}{2 \cdot g} - \frac{\alpha \cdot v_2^2}{2 \cdot g} - \sum h_{z_{1-n}} \quad (3.6)$$

kde H je užitečný spád (m),

$\frac{\alpha \cdot v_1^2}{2g}, \frac{\alpha \cdot v_2^2}{2g}$ - rychlostní výška na začátku a konci využívaného úseku toku (m),

$\sum h_{z1-n}$ - součet všech hydraulických ztrát v hydraulickém systému MVE, tj. ztrát v přívodu vody až po vtok do turbínové šachty a v odpadu za savkou turbíny.

Užitečný spád určíme tak, že k celkovému spádu H_c , který známe v uvažovaném úseku, připočítáme rozdíl rychlostních výšek na začátku a na konci využívaného úseku toku a odečteme od něho součet všech ztrát v hydraulickém přívodu a odpadu vody. Jsou to obvykle tyto ztráty:

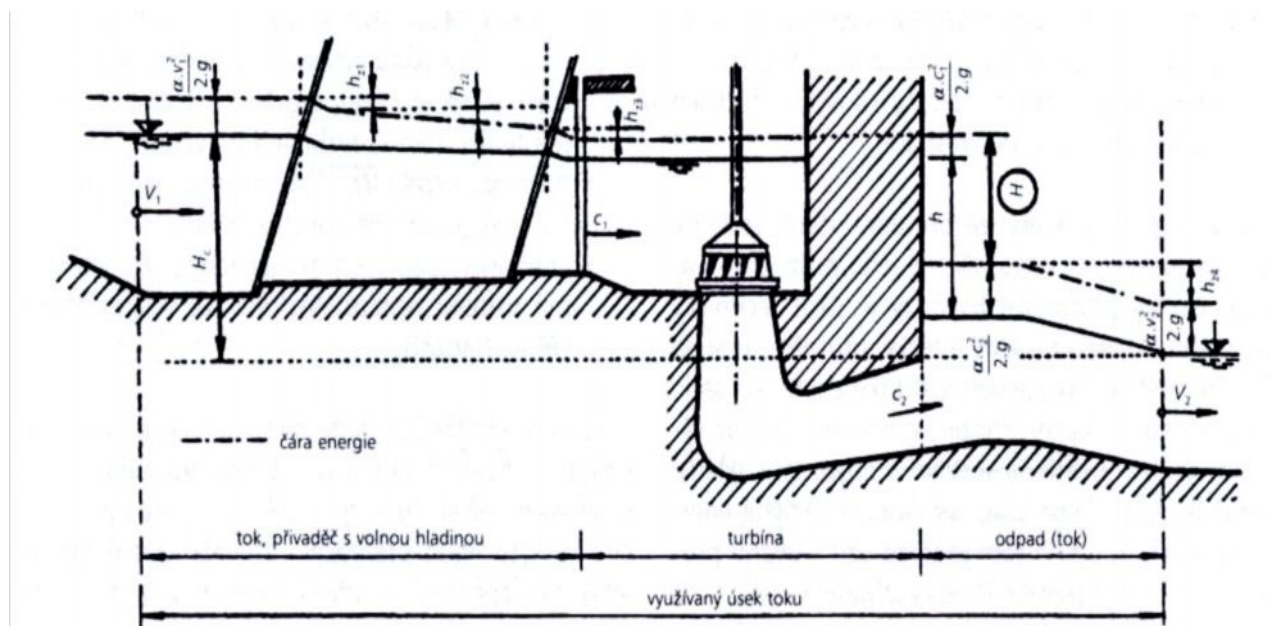
- h_{z1} - vtoková ztráta (usazovák, hrubé česle, změna proudu z toku do vtoku, zúžení průtočného profilu apod.),
- h_{z2} - ztráta třením po délce přivaděče s volnou hladinou,
- h_{z3} - ztráta v jemných česlích a ve vtoku do turbínové šachty,
- h_{z4} - ztráta v odpadu (třením, změnou směru apod.).

Ztráty ve spirále a v savce turbíny jsou zahrnuty do účinnosti turbíny.

Na hotových dílech se dá přímo zjistit výškový rozdíl hladin vody těsně při vtoku do turbínové šachty a na konci savky. Tento spád je na obr. Označen jako h . Voda přitéká šachty rychlostí c_1 (šachtu počítáme do oblasti turbíny), proto je třeba k spádu h připočítat rychlostní výšku $\frac{\alpha \cdot c_1^2}{2g}$. Z výstupního profilu savky vytéká voda průměrnou rychlostí c_2 s rychlostní výškou

$\frac{\alpha \cdot c_2^2}{2g}$. Užitečný spád se může potom vyjádřit rovnicí:

$$H = h + \frac{\alpha \cdot c_1^2}{2g} - \frac{\alpha \cdot c_2^2}{2g} \quad (3.7)$$

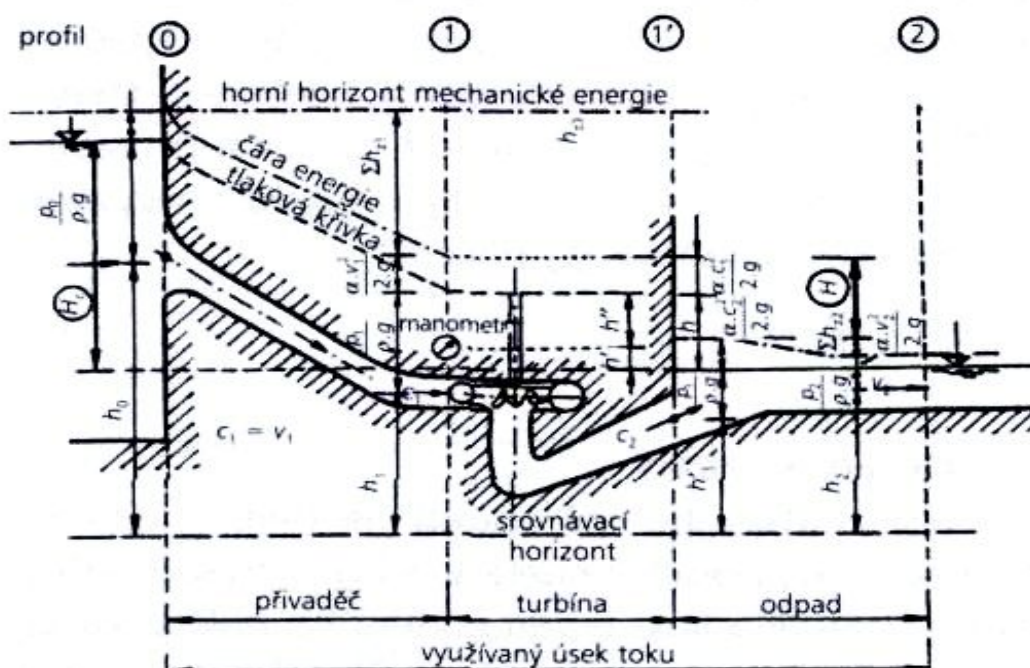


Obr. 3.2 Užitečný spád přetlakové turbíny v otevřené turbínové šachtě [4]

3.3.2.2 Přetlakové turbíny s tlakovým přiváděčem

U přetlakové turbíny středotlaké, příp. vysokotlaké MVE s tlakovým přiváděčem, se spirálou a savkou (obr. 3.4) se užitečný spád H vypočítá stejně, jak je uvedeno v předcházejícím případě pomocí rovnice (3.5). Užitečný spád je výškový rozdíl mezi čarami energie ve vstupním profilu spirály a ve výstupním profilu savky. Spirála a savka se počítají do ztrát v oblasti turbíny.

Na hotových vodních se dá užitečný spád určit přímo. Pomocí manometru zabudovaného do vstupního profilu spirálové skříně určíme poměrnou tlakovou výšku h' v jeho poloze. Přičtením hodnoty h'' (výškového rozdílu středu membrány manometru a hladiny dolní vody těsně u výtoku ze savky) k této výšce dostaneme potenciální spád h . Když k takto určenému spádu h připočítáme rozdíl rychlostních výšek ve vstupním profilu spirály (rychlost c_1) a výstupním profilu savky (rychlost c_2), dostaneme podle rovnice (3.7) opět velikost užitečného spádu H . [4]



Obr. 3.3 Užitečný spád přetlakové turbíny s tlakovým přiváděčem [4]

3.3.2.3 Rovnotlaké turbíny

Velikost užitečného spádu rovnotlaké turbíny MVE (obr 2.5) lze určit z rovnice:

$$H = H_c + \frac{\alpha_0 v_0^2}{2g} - \sum h_{z1} - h' \quad (3.8)$$

kde $\frac{\alpha_0 v_0^2}{2g}$ je rychlostní výška na začátku využívaného úseku toku (m),

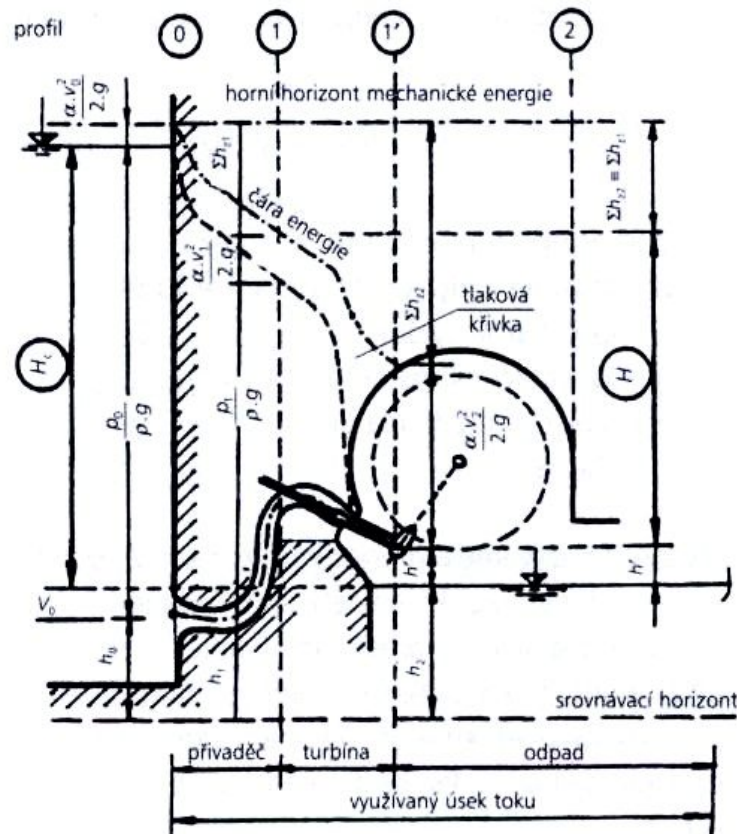
h_{z1} - součet všech hydraulických ztrát v přiváděči k turbíně (m),

h' - výška dotykového bodu výtokového paprsku z trysky s obvodovou kružnicí oběžného kola na hladinu dolní vody (převýšení středu výstupní hrany pracující oběžné lopatky turbíny nad úroveň dolní vody) (m).

V rovnici (3.8) je kinetická energie vody zastoupena pouze kinetickou energií vody přitékající k turbíně. Je zřejmé, že byla zanedbaná kinetická energie vody opouštějící výstupní

hrany pracující lopatky turbíny. Teoreticky je to nesprávné, ale ve srovnání s velkými hodnotami spádů, které se v akčních turbínách využívají, je hodnota této kinetické energie zanedbatelná a uvedené zjednodušení je přijatelné.

Oběžné kolo rovnotlakých turbín se nesmí v žádném případě, tedy ani za maximální dolní hladiny, brodit v dolní vodě. Proto je třeba výšku h' považovat za ztracený spád. Má-li rovnotlaká turbína větší počet trysek na jedno oběžné kolo, určí se užitečný spád jako aritmetický průměr užitečných spádů spočítaných pro jednotlivé trysky. [4]



Obr. 3.4 Užitečný spád rovnotlaké turbíny [4]

3.4 Výpočet výkonu a výroby elektrické energie v MVE

Pokud klesne objem D vody (m^3) o H metrů tak, že dojde do dolní polohy (dolní hladiny) s nulovou rychlostí, vykoná přitom teoretickou práci (energii):

$$E_t = D \cdot \rho \cdot g \cdot H \quad (\text{Nm}) \quad (3.9)$$

Jestliže turbínou protéká každou sekundu průtok $Q (\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$ při výškovém rozdílu hladin H metrů, vykonává každou sekundu teoretickou práci podle uvedeného vztahu.

Pro výpočet teoretického výkonu potom platí vztah:

$$P_t = \frac{E_t}{t} = \frac{Q \cdot \rho \cdot g \cdot t \cdot H}{t} = Q \cdot \rho \cdot g \cdot H \quad (\text{W}) \quad (3.10)$$

kde Q je průtok turbínou ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$),

ρ – hustota vody ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$) (obvykle $1000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ pro čistou vodu),

g – gravitační konstanta ($9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$),

H – výškový rozdíl hladin (m),

t – čas (s).

Výkon P_t nazýváme *teoretickým výkonem*. Z vodního motoru (turbíny) nezískáme celý tento výkon, protože přeměna hydraulické energie v mechanickou je spojena se ztrátami. Výkon, který dostaneme na spojce motoru, nazýváme *efektivním výkonem stroje (turbíny)* a označujeme ho P_{ef} . Ten bude menší než P_t , takže potom platí:

$$P_{ef} = \eta_t \cdot P_t \quad (3.11)$$

kde η_t je koeficient menší než 1 a nazýváme ho *účinností vodního motoru (turbíny)*.

Efektivní výkon tedy bude:

$$P_{ef} = \eta_t \cdot \rho \cdot g \cdot Q \cdot H \quad (\text{W}) \quad (3.12)$$

nebo:

$$P_{ef} = \eta_t \cdot \rho \cdot g \cdot Q \cdot H \cdot 1/1000 \quad (\text{kW}) \quad (3.12')$$

a po dosazení:

$$P_{ef} = 9,8 \cdot Q \cdot H \cdot \eta_t \quad (\text{kW}) \quad (3.12'')$$

V starší literatuře se vyjadřoval i v koňských silách (HP). Platí tu vztah $1 \text{ k} = 0,736 \text{ kW}$. Výkon vyjádřený v jednotce koňské síly používáme i při výpočtu měrných otáček podle Camererova vztahu.

Účinnost turbíny (vodního motoru) je poměr skutečného výkonu turbíny na hřídeli a jejího teoretického výkonu. Vyjadřuje ztráty při přeměně hydraulické energie v mechanickou. Účinnost η_t je celková účinnost vodního motoru. Pro vodní turbínu má hodnotu $0,75 \div 0,93$ (podle druhu a velikosti turbíny). Účinnost se mění i v závislosti na zatížení motoru. Ztráty při přeměně energie ve vodní turbíně jsou trojího druhu:

- objemové,
- hydraulické,
- mechanické.

Objemové ztráty

Celý průtok Q , který přivádíme k turbíně neprojde ve skutečnosti oběžným kolem. Část vody obteče oběžné kolo mezerami oběžným kolem a prstencem odsávací trubky, část vody unikne ucpávkou kolem hřídele turbíny a nevykoná žádnou práci. Oběžným kolem proteče menší množství, takže přiváděný průtok musíme násobit číslem menším než jedna. Nazýváme ho *volumetrickou (objemovou) účinností turbíny* η_v , přičemž platí:

$$Q_{ef} = \eta_v \cdot Q \quad (3.13)$$

Hydraulické ztráty

Ze spádu H , který je k dispozici pro turbínu (už zmenšený o ztráty na vtoku a v přivaděči), se část spotřebuje na překonání průtokových odporů v turbíně. Jsou to odpory, které vznikají vlivem tření vody o stěny turbínových kanálů, vlivem ohybu vodního proudu a vlivem víření vody. Využitelný spád bude menší o rychlostní výšku $c_2^2 / 2g$ odpovídající rychlosti c_2 , kterou voda opouští oběžné kolo. Využitelný spád na přeměnu energie bude tedy menší. Koeficient, kterým je třeba násobit spád H , abychom dostali o hydraulické ztráty zmenšený hydraulický spád H_{ef} , nazýváme hydraulickou účinností η_h , přičemž:

$$H_{ef} = \eta_h \cdot H \quad (3.14)$$

Mechanické ztráty

Další ztráty v turbíně způsobuje tření v ložiscích turbíny, v ucpávkách hřídele turbíny a tření vnějších ploch oběžného kola o vodu, která ho obklopuje při otáčení. Zavádíme proto další součinitel η_m , který nazýváme mechanickou účinností.

Potom pro efektivní výkon turbíny platí vztah:

$$P_{ef} = \rho \cdot g \cdot Q \cdot h \cdot \eta_v \cdot \eta_h \cdot \eta_m = \rho \cdot g \cdot Q \cdot H \cdot \eta_t \quad (3.15)$$

Celková účinnost turbíny je součinem uvedeným tří dílčích účinností:

$$\eta_t = \eta_v \cdot \eta_h \cdot \eta_m \quad (3.16)$$

Její hodnota u dobře navržených turbín a při optimálním průtoku a spádu je

$$\eta_t = 0,85 \text{ až } 0,93.$$

Pojem *hydroagregát* rozumíme strojní sestavu vytvořenou spojením vodní turbíny a elektrického generátoru. Spojení může být pevné nebo přes převodové ústrojí (převod do rychlosti při malých otáčkách turbíny).

Mechanický výkon odevzdává turbína generátoru, v němž se mechanický výkon odevzdává turbína generátoru, v němž se mechanický výkon mění v elektrický. Výkon generátoru měříme na jeho svorkách. Generátor má vlivem vlastních ztrát účinnost $\eta_g = 0,85$ až $0,97$. Vyšší hodnoty (nad $0,90$) platí pro synchronní generátory. Asynchronní motory ve funkci generátorů mají $\eta_g \leq 0,90$, jen zřídka do $0,92$. Není-li generátor na společné hřídeli s turbínou, vznikají ještě ztráty převodem $\eta_p = 0,94$ až $0,98$. Obvykle je však hřídel společná a potom $\eta_p = 1$.

Výkon, který vodní elektrárna dodává do elektrizační sítě (nazýváme ho výkonem na prahu elektrárny), ovlivňuje ještě transformace na vyšší napětí. Účinnost transformátoru $\eta_{tr} = 0,92$ až $0,98$.

Výkon na prahu elektrárny bude:

$$P = P_{ef} \cdot \eta_g \cdot \eta_p \cdot \eta_{tr} \quad (W) \quad (3.17)$$

resp. po dosazení:

$$P = \rho \cdot g \cdot H \cdot Q \cdot \eta_t \cdot \eta_g \cdot \eta_p \cdot \eta_{tr} \quad (W) \quad (3.17')$$

Jestliže celkovou účinnost vyjádříme:

$$\eta_c = \eta_t \cdot \eta_g \cdot \eta_p \cdot \eta_{tr} \quad (3.18)$$

potom výsledný vztah pro výkon na prahu elektrárny je:

$$P = \rho \cdot g \cdot Q \cdot H \cdot \eta_c \quad (\text{W}) \quad (3.19)$$

a po dosazení:

$$P = 9810 \cdot Q \cdot H \cdot \eta_c \quad (\text{W}) \quad (3.19')$$

nebo:

$$P = 9,81 \cdot Q \cdot H \cdot \eta_c \quad (\text{kW}) \quad (3.19'')$$

Pro předběžné výpočty uvažujeme u špičkových vodních elektráren, které pracují s turbínovým průtokem stejným nebo blízkým návrhové hltnosti turbín, $\eta_c = 0,80$ až $0,85$.

Pro orientační výpočty ti vztah pro výkon můžeme zjednodušit:

$$P = K \cdot H \cdot Q \quad (\text{kW}) \quad (3.20)$$

kde $K = 9,81 \cdot \eta_c$

Hodnoty K se používají takto:

- $K = 8$ – u malých vodních elektráren s vyššími výkony (5 až 10 MW) s Kaplanovými nebo Peltonovými turbínami a s příslušenstvím vynikající kvality a bez převodu,
- $K = 7$ – u malých vodních elektráren s Kaplanovými, Francisovými a Peltonovými turbínami a s použitým strojním zařízením dobré kvality, též s turbínami typu Bánki v optimálním vyhotovení,
- $K = 5$ až 6 u malých vodních elektráren s turbínami bez dvojité regulace, s Bánkiho turbínami s převodem, s Bánkiho turbínami na malé spády nebo vkládanými přímo do potrubí.

Celkový výkon vodní elektrárny je součet výkonů jednotlivých hydroagregátů. [4]

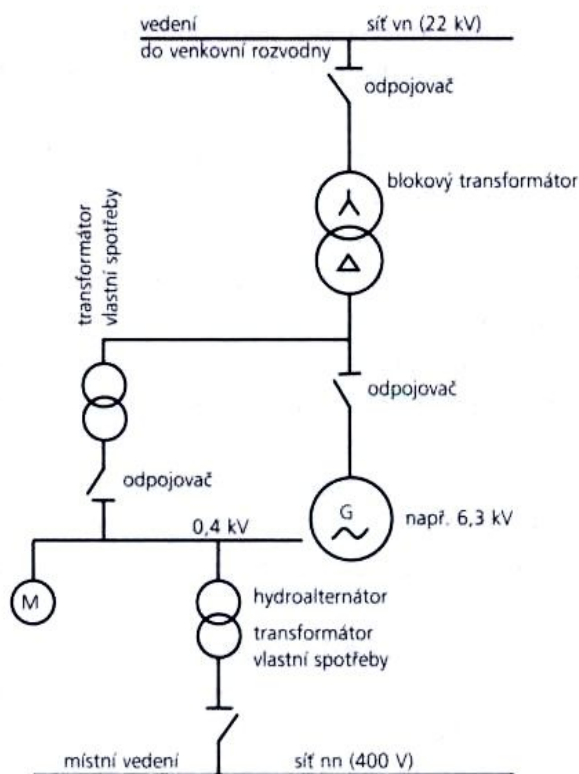
Výroba vodní elektrárny při celkovém výkonu (na prahu elektrárny) P wattů, který trvá t hodin, bude:

$$E = P \cdot t \quad (\text{Wh}) \quad (3.21)$$

4 ELEKTROTECHNICKÉ ZAŘÍZENÍ MVE

Už při návrhu stavební části MVE je třeba znát druh a rozsah elektrického zařízení, protože to má vliv na dispoziční a statické řešení strojovny elektrárny. Základními prvky elektrického systému MVE jsou:

- generátor,
- vývody z generátoru,
- rozvodna generátorových vývodů,
- blokový transformátor,
- vývody z transformátoru,
- venkovní rozvodna (může i nemusí být),
- transformátor vlastní spotřeby,
- elektrické motory různých zařízení (jeřáb, čerpadla),
- budiče generátorů a pomocná zařízení (odpojovače, vypínače, jističe, apod.).



Obr. 4.1 Příklad hlavního schématu elektrického zařízení MVE [4]

4.1 Začlenění MVE do energetického systému

Využití vodní energie pro přeměnu v energii elektrickou a zpět v mechanickou umožnilo až sestrojení a zdokonalení elektrických točivých strojů, ale zejména objev možností přenosu elektrické energie na větší vzdálenosti. Až potom mohly začít vodní elektrárny pracovat pro malé místní elektrické sítě, kde byly často jediným zdrojem elektrické energie. Později se vznikem rozsáhlejších elektrizačních sítí se VE začleňovaly do oblastních rozvodných sítí paralelně s tepelnými elektrárnami. Z těchto sítí vznikla v bývalém Československu v 50. letech postupně

jednotná elektrizační síť pokrývající celé území státu. Po rozdělení České a Slovenské federativní republiky se i elektrizační soustava rozdělila na českou a slovenskou část. Soustava pracuje se střídavým elektrickým proudem s frekvencí 50Hz.

Napětíové úrovně se dělí na:

- vvn (velmi vysoké napětí – 110 až 400 kV) – používají se pro dlouhé přenosové vedení,
- vn (vysoké napětí – 10, 22, 35 kV) pro oblastní distribuční sítě,
- nn (nízké napětí - do 1000V) – pro místní sítě, domovní a průmyslové rozvody.

Uvedenou elektrizační síť napájejí mnohé paralelně spolupracující generátory, z nichž ty, které dodávají velké výkony, udržují napětí a frekvenci proudu. Síť se považuje za výkonově pevnou a nelze ji výrazně ovlivnit generátorem malého výkonu .

Odstavec o členění přenosové a rozvodné soustavy umožňuje vytvořit si představu o začlenění MVE, které pracují paralelně se sítí. Nejmenší výkony jsou připojovány k síti nn v rámci objektu a vyrobená elektrická energie je určena k vlastní spotřebě objektu. Až případný přebytek výkonu se dodává do místní distribuční sítě. I MVE s většími výkony (od 300 do 1 000 kW – kategorie Ib až IV) lze připojit k distribuční síti nn. Vyšší výkony se zpravidla připojují k síti vn. [4]

4.2 Elektrická zařízení MVE

Vlastní přeměnu mechanické energie, dodávané ve formě točivého momentu z rotující hřídele vodního stroje, zajišťuje elektrický generátor. Tento generátor je připojen prostřednictvím přenosového a obvykle i transformačního zařízení k místu spotřeby. Vyrobenou elektrickou energii je třeba okamžitě spotřebovat, prakticky se nedá akumulovat. Přenosovou cestu tvoří elektrický obvod se spínacími a jisticími přístroji, řídicími, měřicími a zabezpečovacími obvody. Elektrické zařízení MVE úzce souvisí s uspořádáním hydroagregátu, jeho parametry a s charakterem spotřeby vyrobené elektrické energie.

4.2.1 Elektrické generátory

Elektrické generátory jsou elektrické točivé stroje, které mění mechanickou energii rotujícího hřídele, na níž je připevněno oběžné kolo vodního stroje, v energii elektrickou. Generátor vyrábí podle svého konstrukčního uspořádání energii se střídavým (zpravidla trojfázovým) nebo jednosměrným proudem. Podle toho, na jaké napětí je generátor konstruován, známe generátory:

- vysokonapětíové (nad 1000 V),
- nízkonapětíové (50 až 1000 V),
- málonapětíové (do 50 V).

Při návrhu napětíové úrovně generátoru je určující veličinou požadovaný výkon vodního stroje. Nízkonapětíové generátory se používají od nejnižších výkonů max. do 1 000 kW. Pro větší výkony jsou efektivnější vysokonapětíové.

Generátory na malé napětí (většinou jednosměrné) se používají pro nejmenší výkony do samostatných sítí, někdy ve spolupráci s akumulátorem, nebo ve funkci pomocných zdrojů napětí (budičů, náhradních zdrojů).

Stejnoseměrné generátory (dynama) vyrábějí stejnosměrný proud. Konstrukčně jsou složité, ale jejich předností je možnost použití v širokém rozsahu otáček. Dříve se používaly v kombinaci s přímým pohonem technologického zařízení vodním strojem jako zdroj osvětlení. Dnes se jejich použití omezuje zejména na funkci pomocných zdrojů nebo pro samostatný provoz při zásobování odlehlých objektů elektrickou energií malých výkonů a zároveň nízkých napětí.

Pro většinu MVE jsou vhodné generátory na střídavý proud. Dělí se na generátory synchronní a asynchronní. Volba mezi uvedenými typy generátorů je podmíněna požadavky provozovatele MVE a provozovatele distribuční sítě, k níž je MVE připojena. Na vybraném typu závisí skladba dalšího elektrického zařízení MVE.

Synchronní generátor má stator se střídavým trojfázovým vinutím a rotor s jednosměrným budícím vinutím. Konstrukční vyhotovení vychází z velikosti generátoru a počtu pólů, který musí být stejný pro rotor i stator generátoru. Tento počet společně s frekvencí sítě určuje synchronní otáčky generátoru, vyjádřené vztahem:

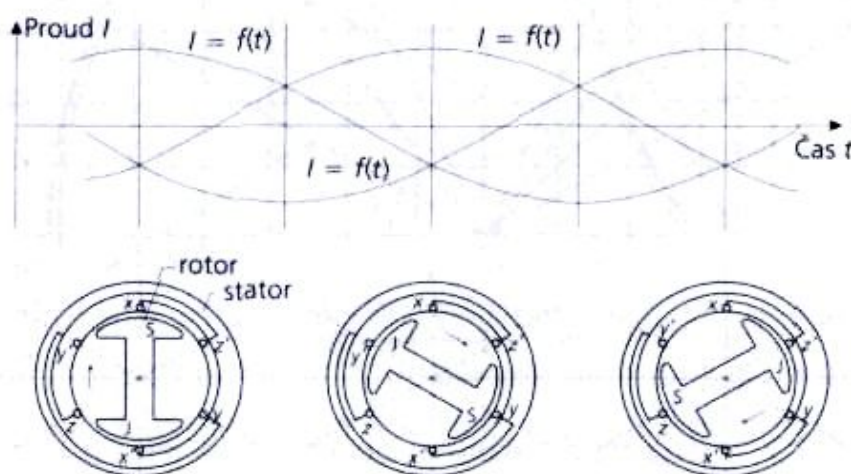
$$n = \frac{f \cdot 60}{p}, \text{ resp. } n = \frac{3000}{p} \text{ pro } f = 50 \text{ Hz} \quad (4.1)$$

kde n jsou synchronní otáčky generátoru ($\text{ot} \cdot \text{min}^{-1}$),

f – frekvence sítě (Hz) – v Čechách i na Slovensku 50 Hz,

p – počet pólových dvojic.

Rotor synchronního generátoru se otáčí synchronními otáčkami a vytváří točivé magnetické pole. Magnetické pole indukuje proud ve třech jednofázových vinutích – fázích, posunutých vzájemně o úhel 120° . Obr. 3.2 znázorňuje postupně ve třech polohách trojfázový dvou pólový generátor s rotorem.



Obr. 4.2 Průběh trojfázového proudu v závislosti na pracovních polohách generátoru [4]

Rotor synchronního stroje je ještě vybaven tlumícím vinutím, které zamezuje asymetrii a kolísání elektrických veličin generátoru. Budící jednosměrný proud se do rotoru synchronního stroje přivádí přes kroužky a kolektory nebo přímo hřideli při umístění budiče na hřideli. Synchronní generátor má možnost regulovat napětí a frekvenci, kterou vyjadřuje vztah (4.1). Pro danou frekvenci sítě 50 Hz lze použít synchronní otáčky 3 000, 1 500, 750, 600, 500 atd.

Napětí lze ovlivňovat změnami budicího proudu. Uvedené způsoby regulace platí při samostatném provozu synchronního generátoru do autonomní sítě. Volba účinku nebo jmenovitého jalového výkonu generátoru je dána charakterem zatížení, resp. rolí MVE v elektrizační soustavě. Obr 3.3 ukazuje vliv účinku na zdánlivý a jalový výkon generátoru včetně vlivu buzení a spotřebičů v síti, odebírajících magnetizační proud (točivé elektrické stroje). Vzájemný vztah uvedených veličin je vázán rovnicí:

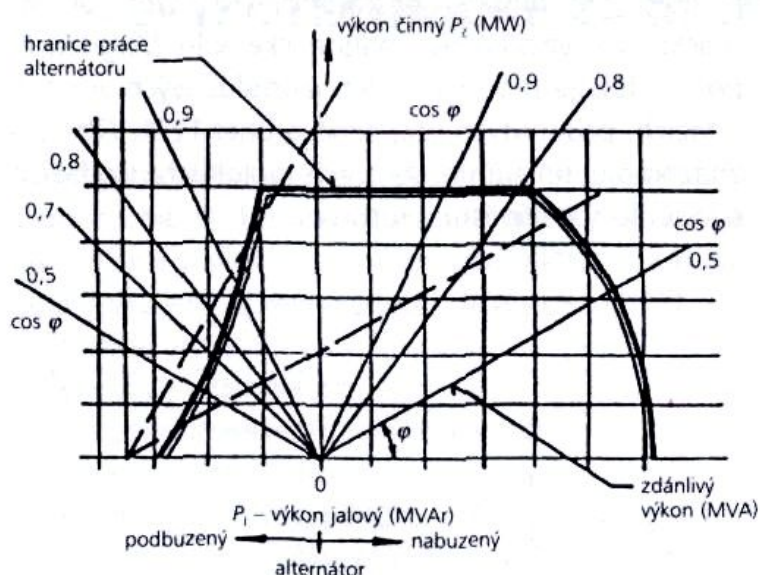
$$P_z = \frac{P_c}{\cos \varphi} \quad (4.2)$$

kde P_z je zdánlivý výkon (kVA),

P_c – činný výkon (kW),

$\cos \varphi$ – účinník, úhel posunutí časového průběhu proudu a napětí.

Činný výkon odebíraný z generátoru se musí rovnat mechanickému výkonu vodního stroje sníženému o příslušné mechanické a elektrické ztráty. Jalový výkon nezatěžuje hydroagregát mechanickým momentem, ale zatěžuje jen generátor statorovým proudem.



Obr. 4.3 Vazba mezi výkonem generátoru a jeho pracovními oblastmi [4]

Provoz MVE v samostatném chodu je spíše výjimkou. Může se požadovat v případě výpadku sítě jako náhradní zdroj nebo pro napájení objektů v odlehlé oblasti (např. MVE u Zamkovského chaty ve Vysokých Tatrách). Obvyklejší je případ chodu synchronního generátoru paralelně s elektrizační sítí. Sít' je považována za výkonově silnou, tj. s pevným napětím a frekvencí, které se nedají poměrně malým výkonem uvažovaného generátoru ovlivnit. Generátor dodává do sítě činný a jalový výkon. Činný výkon je dán mechanickým výkonem vodního stroje a souvisí se zátěžovým úhlem generátoru. Jalový výkon, dodávaný do sítě (nebo odebíraný ze sítě), je dán velikostí budicího proudu. K dodávce do sítě se používá regulace na konstantní jalový výkon nebo na konstantní účinník. Paralelní provoz se sítí při nízkém budicím proudu skrývá nebezpečí, že generátor vypadne ze synchronizmu. Tento provoz je potom velmi nebezpečný vzhledem k možnosti poškození stroje.

Připojení generátoru k síti – fázování – je možné při synchronizaci napětí, frekvence a fáze nebo samosynchronizací, tj. připojením generátoru k síti v přibližně synchronních

otáčkách v nenabuzeném stavu a následném nabuzení. Samosynchronizací vzniká proudový ráz 2,5 až 3krát větší, než je jmenovitý proud.

Asynchronní generátor se používá především v režimu výroby a dodávky elektrické energie MVE do pevné sítě. U samostatného provozu do autonomní sítě se s použitím asynchronního generátoru nepočítá. Asynchronní generátory mají stejnou konstrukci jako asynchronní motory. Stator má trojfázové střídavé vinutí, stejné jako synchronní stroje. Rotor může být vinutý s kroužky, ale používá se i rotor s klecovým vinutím, které neobsahuje žádné citlivé součásti. Při přivedení trojfázového napětí na svorky statoru vznikne točivé magnetické pole, které v rotorovém vinutí indukuje proudy, jejichž silovými účinky se rotor otáčí ve směru točení magnetického pole a stroj se chová jako motor. Když rotor dosáhne synchronních otáček s magnetickým polem, nic se neindukuje. Proto se rotor v motorovém chodu otáčí s otáčkami o něco nižšími, než jsou otáčky synchronní – pracuje se skluzem.

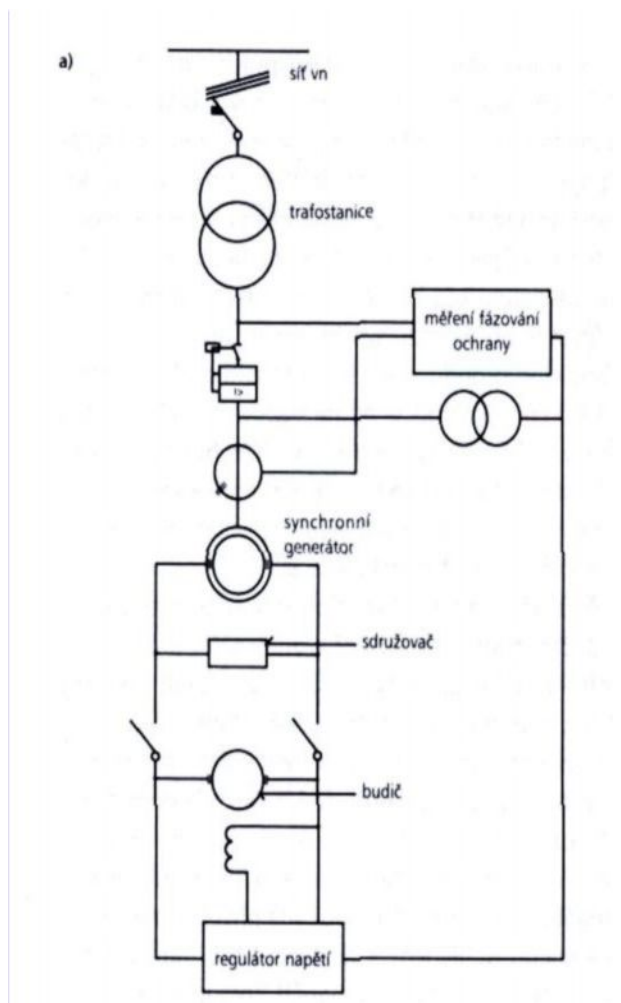
Jestliže se dodá motoru připojenému k pevné síti na hřídel mechanický moment tak, aby se otáčky rotoru zvýšily nad otáčky magnetického pole (skluz bude záporný), bude rotor brzděn a přitom bude do sítě dodávat činný výkon. Ze sítě však bude současně odebírat jalový výkon pro vlastní magnetizaci. Odběr jalového výkonu ze sítě je nevýhodný, protože ji zatěžuje zvýšeným proudem. Proto se kompenzuje kondenzátory, ale to přináší nebezpečí vzniku přepětí na svorkách paralelní kombinace kondenzátor – generátor, samobuzením při výpadku sítě a následném zvýšení otáček hydroagregátu. Lze tomu zabránit rozpojením uvedené kombinace nebo dimenzováním kompenzačního výkonu, při kterém nenastane samobuzení při chodu naprázdno.

Fázování generátoru se uskutečňuje jednoduchým připojením generátoru k síti při dosažení přibližně synchronních otáček. Proudový náraz v síti je obdobný jako při fázování synchronního generátoru samosynchronizací. Na obr. 4.4 je zjednodušené schéma zapojení synchronního a asynchronního generátoru na síť.

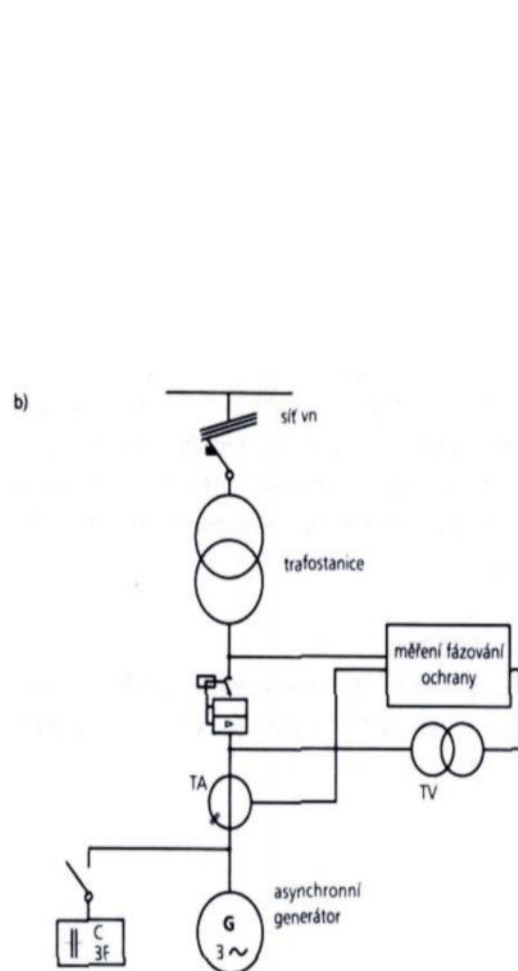
Použitím asynchronního generátoru se zjednodušují ostatní elektrická zařízení, zmenšuje se jejich hmotnost, a tím se i snižuje jejich cena. Nevýhodou je odběr jalového výkonu, neschopnost samostatného chodu a nižší účinnost při částečném výkonovém zatížení.

Asynchronní stroje se zpravidla dimenzují výkonově co nejblíže k maximálnímu výkonu turbíny. Jestliže je ve funkci asynchronního generátoru použit asynchronní motor, je možné ho zatížit elektrickým výkonem rovnajícím se jeho příkonu, tedy jmenovitým proudem. Prakticky se hodnota maximálního výkonu na svorkách generátoru získá jako podíl jmenovitého výkonu a jeho účinnosti. Dimenzování mechanických částí (ložisek, hřídele) stejně jako trvalý provoz při záporném skluzu (se zvýšenými otáčkami) a schopnost vyhovět mechanicky při průběžných otáčkách je třeba konzultovat s výrobcem. [4]

a) synchronní generátor



b) asynchronní generátor



Obr. 4.4 Schéma zapojení generátoru na síť [4]

4.2.2 Silnoproudá zařízení MVE

Silnoproudá zařízení (hlavní elektrické obvody) jsou určena k přenosu, transformaci, spínání a jištění vyrobené elektrické energie a také k zásobování pohonů a jiných elektrických spotřebičů zahrnutých do vlastní spotřeby MVE.

K přenosu výkonu z objektu MVE je určena přípojka venkovním nebo kabelovým vedením, která je na úrovni nn (3 x 400 V) nebo při vyšších výkonech a větší vzdálenosti vn (22 a 35 kV). Při dimenzování přípojky (hospodárního průměru) je třeba přihlídnout k proudové zatíženosti vodičů, k úbytku napětí při maximálním proudovém zatížení a ke ztrátám ve vedení. Vedení musí během určeného období odolat účinkům zkratových proudů. Velikost připojovaného výkonu do určitého místa sítě je třeba vždy konzultovat s provozovatelem sítě.

Elektrická přípojka končí v hlavní skřini nebo v případě přípojky vn v rozvodně vysokého napětí. Vstupní část přípojky musí být přístupná pracovníkům provozovatele sítě a je vybavena spínacími a jisticími přístroji. Jejich skladba je určena úrovní napětí přípojky a podmínkami provozovatele sítě.

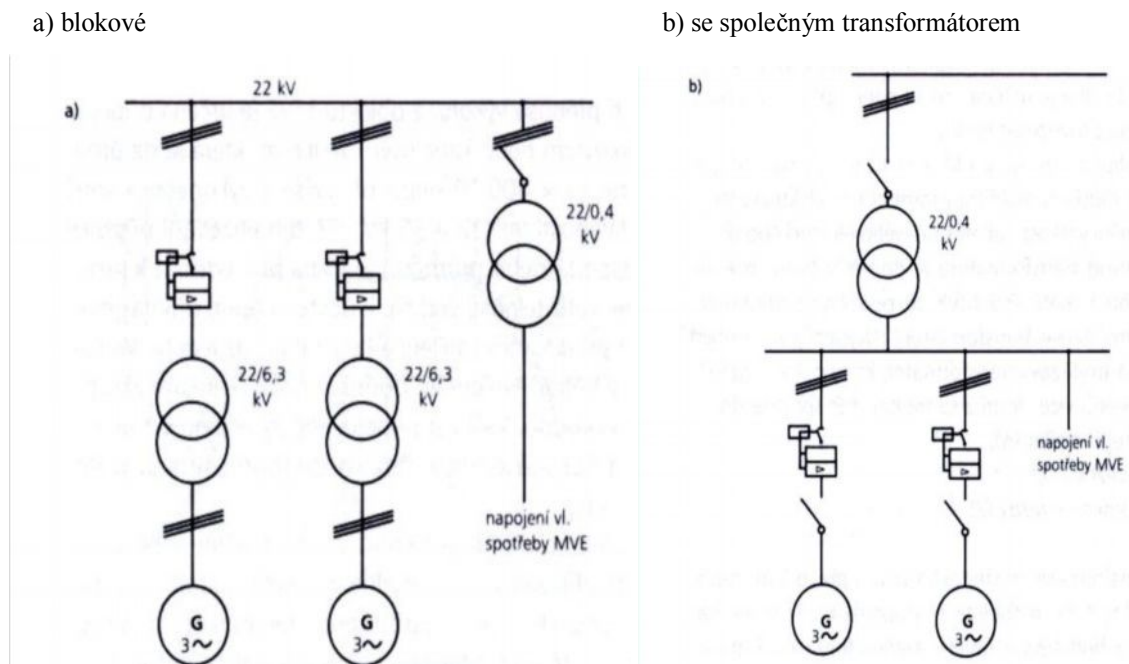
V případě, že se pro MVE použije více napěťových úrovní, musí se použít transformátor, tj. elektrický stroj, který mění velikost napětí střídavého elektrického proudu. Převod transformátoru je poměr vstupního a výstupního napětí. Pro MVE se používají jednofázové nebo

trojfázové transformátory. Nejčastěji se v sítích používá trojfázový transformátor, který má v každé fázi dvě nebo více vinutí a ta mohou být spojena do:

- trojúhelníku (Δ),
- hvězdy (Y),
- lomené hvězdy (Z).

Transformátor je charakterizován převodem, zapojením (Δ , Y, Z), jmenovitým vstupním a výstupním napětím a hodinovým úhlem. Generátory jsou k transformátoru připojeny blokově nebo je transformátor společný pro více generátorů. Uspořádání obou způsobů připojení je na obr. 4.5. Blokové zapojení se používá pro případ připojení vn generátorů 6,3 kV k síti 22 kV. Zapojení se společným transformátorem je vhodnější ke spolupráci generátorů nn s vn sítí.

Spínací a jisticí přístroje pro výkonové vývody se navrhují jako volitelná náplň rozvaděčů nn, pro vn se používají vzhledem k jejich vysoké ceně jen nezbytně nutné přístroje. [4]



Obr. 4.5 Propojení generátorů s transformátory [4]

4.2.3 Pomocná elektrická zařízení MVE

Silové obvody jsou zpravidla doplněny měřicími, jisticími a regulačními obvody. Příklad blokového schématu řídicího systému pro dva hydroagregáty s generátory nízkého napětí nn je na obr. 4.6.

Měřicí přístroje. Návrh vybavení konkrétní MVE měřicími přístroji vychází zpravidla z požadavků odběratele vyrobené elektrické energie (správce sítě, do níž je MVE zapojena), provozních podmínek lokality a instalované technologie. Měření vyrobené energie, je-li MVE připojena paralelně do sítě, je třeba vykonat pro dodané i odebrané množství činné energie a i pro odebrané množství jalové energie. Dalšími měřeními elektrickými veličinami jsou běžné proudy, napětí, účinník, výkon a případně při provozu synchronního stroje i parametry budícího proudu a veličin na fázování. Kromě elektrických charakteristik je nutné sledovat i další fyzikální

veličiny, např. polohy horní a dolní hladiny vody, otáčky hydroagregátu, teploty ložisek apod. Uvedené veličiny se měří pomocí běžných nebo speciálních snímačů a převodníků na elektrický signál.

Pojistné a zabezpečovací obvody jsou určeny k zabezpečení hydroagregátu před zničením v případě nekontrolovatelné poruchy a v rámci MVE tvoří jednotný jisticí a zabezpečovací systém. Jeho funkce je určena způsobem provozu MVE. V poslední době se tyto systémy navrhuje pro bezobslužný provoz (automatický) s občasným dohledem. Systém kontroluje měřená místa a při poruchovém stavu má za úkol odstavit hydroagregát a hlásit poruchu, případně přivolat pracovníka pověřeného dohledem. Odstavení MVE musí být zabezpečeno i při výpadku napětí spolupracující sítě. Měřených veličin je více. Elektrické ochrany jsou předepsány normou a podmíněny místními poměry v elektrické síti (provozovatelem sítě). Ostatní prvky jsou použity podle podmínek lokality a dodavatelů strojního zařízení.

Řídicí systémy

Mezi základní vlastnosti, které se vyžadují od moderních řídicích systémů, patří spolehlivost, jednoduchost technických prostředků a programového vybavení, modulární koncepce umožňující jednoduché přizpůsobení a rozšíření podle různých požadavků technologických celků, přehlednost obsluhy s možností komunikace s nadřazenými systémy přes standardní komunikační protokoly (Modbus, Profibus, Interbus, TCP/IP apod.).

Řídicí systém ve vodních elektrárnách musí navíc zabezpečovat vysokou rychlost snímání veličin z technologických procesů, což klade vysoké nároky na výkon řídicího systému (tento požadavek vystupuje do popředí hlavně u synchronních generátorů v ostrovním provozu).

Jako řídicí systémy se v praxi často používají průmyslové automaty Process Logic Control (PLC), které často v kompaktním vyhotovení splňují požadavky na rychlost a přesnost snímání s možností komunikace.

K dalším typům řídicích systémů patří tzv. PLC-soft, kde se na osobní počítač převádí i algoritmus řízení a regulování celé MVE prostřednictvím vstupně-výstupních karet.

Automatizace provozu se odehrává na několika úrovních řízení, které se liší kvalitou. Jsou to následující stupně:

- základní zabezpečovací systém, jako je soubor elektrických strojově-mechanických ochranných technologických zařízení, funkčně nezávislý na ostatních úrovních řízení;
- 1. úroveň řízení – provozní. Zpracování vstupů, výstupů a stavů technologie MVE a následující řízení a regulace;
- 2. úroveň řízení – styk s obsluhou a vizualizace. Kromě vizualizace se zde může vykovávat nadstandardní řízení, např. skupinová regulace;
- následující vyšší stupně řízení, např. skupiny VE, kaskády VE apod. [4]

5 NÁVRH MALÉ VODNÍ ELEKTRÁRNY PRO DANOU LOKALITU

5.1 Popis podmínek v místě navrhované MVE Nedošín 1

5.1.1 Lokalita

Řeka	Loučná
Říční kilometr	59,008 km
Kraj	Pardubický
Obec s rozšířenou působností	Litomyšl
Katastrální území	Nedošín

5.1.2 Popis vodního díla

5.1.2.1 Základní údaje o jezové zdrži

Celkový objem vody v jezové zdrži	650 m ³
Plocha jezové zdrže	500 m ²
Délka jezové zdrže	200 m
Kóta přelivné hrany pevné části jezu	312,02 m n. m.
Kóta přelivné hrany karetek	312,69 m n. m.
Spád	1 m

5.1.2.2 Popis vodního díla

Jezové těleso je šikmé k ose vodního toku. Při pravém břehu je pevná kamenná část s přelivnou hranou 12,5 m dlouhou na kótě 312,88 m n.m. Skluzová plocha je 5,3 m dlouhá s povrchovou betonovou úpravou, dolní hrana je v úrovni 312.34 m n. m.

Při pravém břehu je šterková propust 3,50 m široká hrazená dvěma karetkami 1,90 a 1,80 m dlouhými a 0,65 m vysokými. Přelivná hrana karetek je v úrovni 312,69 m n. m., dosedací práh má kótu 312,04 m n. m., dolní hrana skluzu je v úrovni 311,65 m n. m. ovládání karetek je z levého břehu pomocí páky.

Obě jezové části jsou odděleny betonovým pilířem 2,50 m širokým. [6]

5.1.3 Hydrologické údaje

Uvedené základní hydrologické údaje byly vypracovány pro měrný profil Loučné v Litomyšli. Podkladem byli údaje sledované za období 1930 -1980:

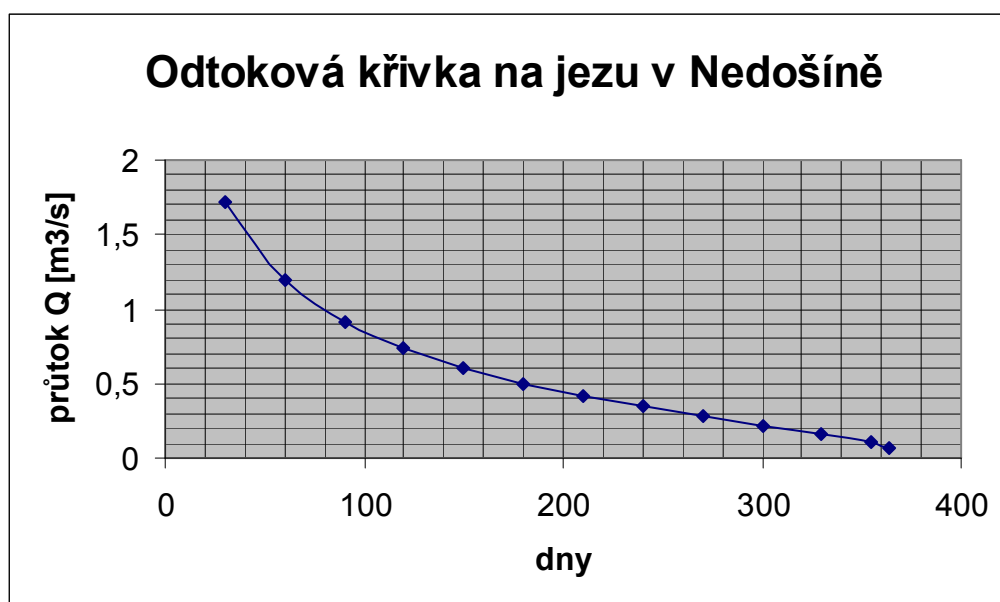
Plocha povodí	145 km ²
Průměrná nadmořská výška	494 m n. m.
Průměrná roční výška srážek	736 mm

Průměrná roční výška odtoku	160 mm
Průměrný roční specifický odtok	$5 \text{ l.s}^{-1} \cdot \text{km}^2$
Průměrný roční průtok Q_a	$0,74 \text{ m}^3/\text{s}$ [5]

roků	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	355	364
m^3/s	1,72	1,19	0,91	0,74	0,61	0,50	0,42	0,35	0,28	0,22	0,16	0,11	0,07

Tabulka 5.1 Hodnoty průměrného překročení průtoku po dobu (M -denní, Q_{md}) [5]

let	1	2	5	10	20	50	100	1000
m^3/s	3,9	6,5	11	16	22	30	39	74

Tabulka 5.2 Velké vody opakující se jednou za (N -leté období) [6]

Obr. 5.1 Odtoková křivka na jezu v Nedošíně

5.2 Koncepce řešení MVE Nedošín 1

5.2.1 Koncepce osazení jezu Nedošín MVE

Při navrhování čehokoli, co zasahuje nějakým způsobem do řečiště vodního toku, musíme dbát toho, aby v případě povodňových průtoků nedošlo k vytlčení vody mimo řečiště toku důsledkem námi navržené stavby nebo v našem případě stavební úpravou na jezové zdrži a tím ohrožení majetku i lidských životů.

Pevná kamenná část jezového tělesa při pravém břehu bude zachována v celé své šířce. Těleso jezu bude dále navýšeno pomocí vakového vzdouvacího zařízení. Vakovým jezem lze regulovat výšku jezu. Toto řešení je výhodné jednak ekonomicky ale hlavně vyhovující z

hlediska jednoduché manipulace při povodňových stavech, kdy se jednoduchým vysunutím okamžitě zvětší průtočný profil a tím se urychlí převádění vody z nadejezí do podjezí. Štěrková propust při levém břehu bude využita pro účely MVE v násoskovém provedení, kdy její vtok bude přehrazen ocelovou příčkou zabraňující průtoku vody. Nad propust budou položeny dvě traverzy, na nichž bude spočívat soustrojí, sací potrubí i odpadní potrubí.

5.3 Návrh strojní části

5.3.1 Výkon MVE

Pro možnost využívat energii vody k výrobě elektrické energie je zapotřebí soustředit průtok a spád do jednoho místa. Toto je v našem případě zajištěno pomocí jezové zdrže. Teoretický výkon vodního toku bude při přeměně na elektrickou energii snížen o ztráty na hydraulickém stroji, převodech a generátoru.

Teoretický výkon vodního toku:

$$P_t = \rho \cdot g \cdot Q \cdot H \text{ [W]} \quad (5.1)$$

ρ -hustota vody (1000kg/m³)

g -tíhové zrychlení (9,81m/s²)

Q -průtok vodním motorem (m³/s)

H -spád (m)

-spád je výškový rozdíl hladin v předjezí a podjezí

-průtok je objem vody protékající daným místem za 1s

Pro výpočet výkonu MVE si musíme určit průtok. Průměrný průtok pro naši lokalitu je 0,74 m³/s. Vzhledem k tvaru průtokové křivky volíme průtok menší a to 0,57 m³/s. S tímto průtokem budeme počítat při výpočtu turbíny. Také teoretický výkon MVE bude odvozen od tohoto průtoku.

Hodnoty pro výpočet: návrhový průtok $Q_{navrh}=0,57 \text{ m}^3/\text{s}$, spád $H_{1,2}=1,5\text{m}$

$$P_t = \rho \cdot g \cdot Q \cdot H = 1000 \cdot 9,81 \cdot 0,57 \cdot 1,5 = \underline{8387,6} \text{ (W)} \quad (5.2)$$

Výkon P_t nazýváme *teoretickým výkonem*. Při výpočtu výkonu na prahu elektrárny musíme započítat ztráty v turbíně, v převodu (turbína-generátor) a ztráty v generátoru. Tyto ztráty jsou dány jednotlivými účinnostmi $\eta_t, \eta_{př}, \eta_{gen}$. Při výkonové relaci, v jaké se pohybujeme, není zapotřebí při dodávání do DS transformace na vyšší napětí. Při tomto nebude výkon snížen o další ztráty (ztráty transformátoru).

Hodnoty pro výpočet: teoretický výkon $P_t=8387,6\text{W}$, účinnost turbíny $\eta_t=0,71$, účinnost převodu $\eta_{př}=0,95$, účinnost generátoru $\eta_{gen}=0,90$

$$P = P_t \cdot \eta_t \cdot \eta_{př} \cdot \eta_{gen} = 8387,6 \cdot 0,71 \cdot 0,95 \cdot 0,90 = \underline{5091,7} \text{ (W)} \quad (5.3)$$

5.3.2 Turbína

Možnosti další výstavby vodních elektráren pracujících se spády v řádech desítek metrů jsou prakticky vyčerpány. Proto se nyní směr hledání využitelných potenciálů vodních toků ubírá

k MVE. Využitelné spády současných řek jsou maximálně do 3 m (MVE Nedošín 1 má spád 1,5 m). Při těchto spádech je použití Kaplanových turbín již technicky nerealizovatelné. Ani využití jiných konvenčních vodních turbín není z hlediska technické realizovatelnosti možné.

Vodní motor zohledňující uvedené skutečnosti – zejména malé spády – byl vyvinut na odboru fluidního inženýrství Viktora Kaplana, Energetického ústavu FSI VUT v Brně.

Nově vyvinutá tzv. **vírová turbína** je založena právě **na opačném principu** přívodu vody na oběžné kolo než turbína Kaplanova [11]. Proud vody je na vírovou turbínu přiváděn přímo ve směru její osy.

Kaplanova turbína je charakterizována regulačním rozváděcím kruhem (velmi náročným na výrobu), kterým se usměrňuje kapalina do oběžného kola s regulovatelnými lopatkami. Kapalina tedy do oběžného kola vstupuje s rotační složkou rychlosti c_{u1} a za oběžným kolem vstupuje do savky bez rotace ($c_{u2} = 0$).

Rovnice pro měrnou energii charakterizující práci turbíny má pro Kaplanovou turbínu tvar

$$\eta_H Y = u_1 c_{u1} \quad (5.4)$$

Na základě uvedeného a zkušeností s provozem Kaplanových turbín je možno shrnout jejich nevýhody z hlediska využití pro nízké spády následovně:

- nutnost použití nákladného rozvaděče
- použití nákladné převodovky
- hustá lopatková mříž
- možnost vzniku kavitace
- odtržení mezní vrstvy v savce turbíny a tím zvýšení hydraulických ztrát.

Kaplanova turbína	Vírová turbína
1. Vstup do oběžného kola s předrotací $c_{u1} \neq 0$, nutnost použití drahého rozváděcího aparátu.	1. Vstup kapaliny bez předrotace, není nutno používat rozváděcí aparát – výrazná finanční úspora.
2. Výstup kapaliny bez rotační složky – možnost odtržení mezní vrstvy, vyšší hydraulické ztráty.	2. Výstup kapaliny s malou rotační složkou, nedochází k odtržení mezní vrstvy v savce. Turbína má pro daný výkon vyšší provozní otáčky a vyšší průběžné otáčky. Znamená to, že v mnoha případech není nutná převodovka.
3. Rovnice Kaplanovy turbíny: $\eta_H Y = u_1 c_{u1}$	3. Rovnice vírové turbíny: $\eta_H Y = -u_2 c_{u2}$ Odtud plyne, že kapalina na výstupu z vírové turbíny rotuje proti rotaci oběžného kola.

Tabulka 5.3 Porovnání turbín

Tzv. Vírová turbína byla navržena na principu průtoku vody ve směru osy turbíny. Její oběžné kolo má pouze dvě lopatky a tím umožňuje i zpracování velkých průtoků. Během zkoušek v laboratoři FSI dosáhla vírová turbína při spádu 2,5 m hydraulické účinnosti

85,5 %. To ji řadí na přední místo v celosvětové konkurenci. Stroj alespoň podobných parametrů jak z hlediska účinnosti tak výrobních nákladů není znám.

Návrh řešení Vírové turbíny pro MVE Nedošín 1

Pro MVE Nedošín 1 je nejvýhodnější koncepční řešení násoskové MVE. Důvodem jsou technická jednoduchost soustrojí včetně malých nároků na stavební úpravu jezu. Z toho plyne ekonomická výhodnost tohoto řešení.

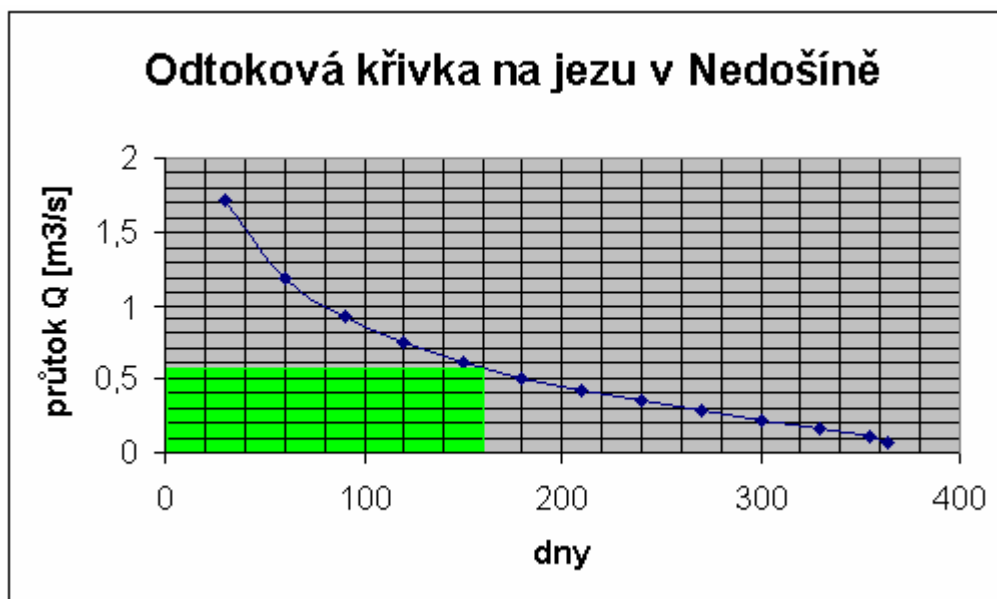
Při řešení našeho zadání vyjdeme z „pokrytí“ průtokové křivky pro daný jez. Vírová turbína nedisponuje prvky regulující průtok (při konstantním spádu pracuje s konstantním průtokem) tzn. že volbě návrhového průtoku musíme věnovat zvýšenou pozornost, aby byl potenciál lokality Nedošín 1 využit na maximum.

Námi zvolený návrhový průtok $Q_{\text{návrh}} = 0,57 \text{ m}^3/\text{s}$ odpovídá 160-denní vodě v lokalitě Nedošín 1.

Při návrhu turbíny budeme počítat s konstantním spádem $H_{1,2} = 1,5 \text{ m}$

dnů	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	355	364
m^3/s	1,72	1,19	0,91	0,74	0,61	0,50	0,42	0,35	0,28	0,22	0,16	0,11	0,07

Tabulka 5.4 Hodnoty průměrného překročení průtoku



Obr. 5.2 Odtoková křivka s vyznačením pokrytí turbínou

Dále vycházíme z modelové charakteristiky vírové turbíny v násoskovém provedení 2-VT-20 v turbínové oblasti, závislost: $[Q_{11}, \eta_h, \sigma_k = f(\eta_{11})]$ – Příloha A. Výpočet provedeme pro optimální bod vyznačený v modelové charakteristice, pro který bude pracovat turbína s největší možnou účinností.

Hodnoty pro optimální bod:

$\eta_h = 70,17\%$ $n_{11} = 149,38 \text{ min}^{-1}$ $Q_{11} = 2,88 \text{ m}^3/\text{s}$ $n_q = 253,53 \text{ min}^{-1}$

Nejprve vypočteme průměr oběžného kola pro návrhový průtok a spád:

$$Q_{\text{návrh}} = 0,57 \text{ m}^3/\text{s}, H_{1,2} = 1,5 \text{ m}$$

$$D_{\text{výpočt}} = \sqrt{\frac{Q_{\text{návrh}}}{Q_{11n} \cdot \sqrt{H_{1,2}}}} = \sqrt{\frac{0,57}{2,88 \cdot \sqrt{1,5}}} = 0,402 \text{ m} \quad (5.5)$$

Z důvodu výrobní technologie se musí zaokrouhlit na nejbližší vyšší násobek 0,05m. Průměr navrhované turbíny tedy je:

$$D_{\text{skut}} = 0,405 \text{ m}$$

Tomuto průměru odpovídá průtok návrhový průtok:

$$Q_{\text{návrh}} = D^2 \cdot Q_{11} \cdot \sqrt{H_{1,2}} = 0,405^2 \cdot 2,88 \cdot \sqrt{1,5} \text{ m}^3/\text{s} = 0,58 \text{ m}^3/\text{s} \quad (5.6)$$

Tuto hodnotu použijeme pro další výpočty.

Otáčky na hřídeli turbíny popisuje následující vztah:

$$n_{11} = \frac{n \cdot D}{\sqrt{H}} \quad (5.7)$$

$$n = \frac{n_{11} \cdot \sqrt{H_{1,2}}}{D} = \frac{149,36 \cdot \sqrt{1,5}}{0,405} \text{ min}^{-1} = 451,67 \text{ min}^{-1} \quad (5.8)$$

Účinnosti turbíny vypočteme podle vztahu:

$$\eta_{\text{skuteč}} = 1 - (1 - \eta_{h \max}) \left[0,3 + 0,7 \cdot \left(\frac{D_M}{D} \right)^{0,2} \cdot \left(\frac{H_M}{H} \right)^{0,1} \right] = 0,72 \quad (5.9)$$

Výpočet mechanického výkonu na hřídeli turbíny:

$$P_{\text{turbíny}} = \rho \cdot g \cdot Q \cdot H \cdot \eta_{\text{turb}} = 1000 \cdot 9,81 \cdot 0,58 \cdot 1,5 \cdot 0,72 \text{ W} = 6144,98 \text{ W} \quad (5.10)$$

5.3.2.1 Převody

Převod turbína generátor bude realizován pomocí klínového řemenu do rychla. jsou konstruovány pomocí klínových řemenu pro horizontální turbíny. Převod je proveden v poměru 1:3,4. Účinnost převodu je uvažována.

$$\eta_{\text{př}} = 95\%$$

5.3.2.2 Regulace

Regulace obecně spočívá v regulaci průtoku turbínou (hltnost turbíny). Sama vírová turbína nemá prvky umožňující regulaci průtoku. Změnu průtoku vírovou turbínou lze vyvolat změnou vnějších parametrů. Je možno regulovat dvěma způsoby:

- změnou otáček
- změnou užitého spádu

Regulovat MVE Nedošín 1 změnou otáček není vhodné, poněvadž z modelové charakteristiky vírové turbíny - násoskové provedení 2-VT-20 v turbínové oblasti - plyne, že se změnou otáček klesá hydraulická účinnost.

Druhý způsob regulace využívá vztahu pro průtok turbínou:

$$Q_{turbínou} = D^2 \cdot Q_{11} \cdot \sqrt{H_{1,2}} \quad (5.11)$$

Z tohoto vztahu plyne, že s měnícím se spádem H_{12} se mění také průtok turbínou $Q_{turbínou}$. Touto skutečností vzniká prostor pro regulaci MVE. Regulace se uskuteční osazením jezu vzdouvacím zařízením umožňujícím změnu výšky jezu a tím i spádu H_{12} . Manipulací vzdouvacím zařízením v závislosti na aktuálním průtoku docílíme většího „pokrytí“ odtokové křivky. Zvětšení „pokrytí“ odtokové křivky znamená více vyrobené elektrické energie.

Návrh řešení Regulace pro MVE Nedošín 1

Regulace MVE Nedošín 1 bude řešena na principu změny spádu. Jez bude osazen vzdouvacím zařízením umožňujícím změnu spádu v rozsahu 1,2m-1,7m. Regulace se bude řídit podle následující tabulky udávající průtoky odpovídající jednotlivým dílčím spádům.

Spád $H_{1,2}$ [m]	Průtok turbínou $Q_{turbínou}$ [m ³ /s]
1,2	0,53
1,3	0,55
1,4	0,57
1,5	0,58
1,6	0,60
1,7	0,62

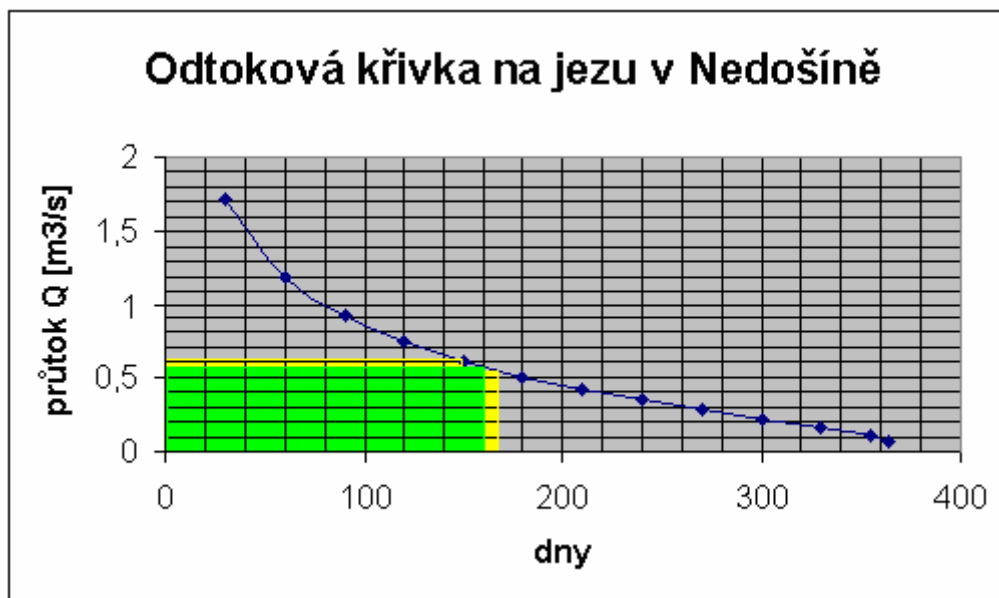
Tabulka 5.5 Regulační stupně spádu

příklad výpočtu $Q_{turbínou}$:

Q_{11} bylo odečteno z modelové charakteristiky vírové turbíny v násoskovém provedení 2-VT-20 v turbínové oblasti, závislost: $[Q_{11}, \eta_h, \sigma_k = f(n_{11})]$ viz příloha č. 1

$$Q_{turbínou} = D^2 \cdot Q_{11} \cdot \sqrt{H_{1,2}} = 0,405^2 \cdot 2,94 \cdot \sqrt{1,2} \text{ m}^3 / \text{s} = 0,53 \text{ m}^3 / \text{s} \quad (5.12)$$

Přínos zregulování MVE Nedošín 1 je znázorněn na následujícím „pokrytí“ odtokové křivky vykreslené v grafu níže. Zelené pole znázorňuje „pokrytí“ odtokové křivky bez užití regulace. Žluté plochy ukazují „pokrytí“, vyzískané zregulováním MVE Nedošín 1.



Obr. 5.3 Odtoková křivka s vyznačením pokrytí turbínou + pokrytí regulací

5.4 Elektrická část MVE včetně vyvedení výkonu

5.4.1 Elektrotechnická část

Elektrotechnická část malé vodní elektrárny zahrnuje generátor (generátory) jako zdroje v MVE, silové obvody pro vyvedení výkonu, pomocná zařízení vlastní spotřeby a řízení elektrárny.

5.4.2 Elektrický generátor

Elektrické generátory jsou elektrické točivé stroje. Elektrický generátor slouží k přeměně mechanické energie rotujícího hřídele na energii elektrickou. V případě MVE je točivý moment přiveden na hřídel generátoru z hřídele oběžného kola vodního motoru.

Pro výběr nejvhodnějšího elektrického generátoru jsou rozhodující následující parametry:

- Výkon vodního stroje
- Režim práce malé vodní elektrárny (samostatný provoz do autonomní sítě, chod pracující paralelně s distribuční sítí)

Výkon vodního stroje je určující veličinou při volbě napětové úrovně generátoru. Generátory pracující s malým napětím (do 50V) se realizují ve stejnosměrném provedení pro nízké výkony do samostatných sítí. Nízkonapětové generátory (50-1000V) se používají od nejnižších výkonů do 1000kW. U vyšších výkonů je efektivnější využití vysokonapětových generátorů.

Generátory používané ve vodních elektrárnách lze rozdělit do tří skupin:

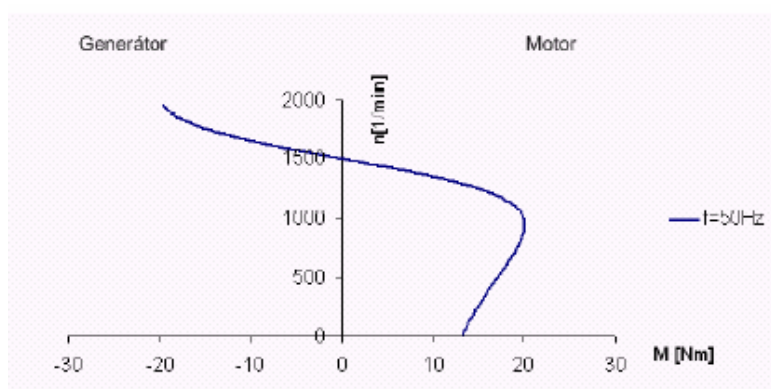
- stejnosměrné generátory (dynama)
- synchronní generátory (alternátory)
- asynchronní generátory

Asynchronní generátor

Asynchronní stroj je trojfázový indukční stroj s prostorově rozloženým satorovým vinutím jednotlivých fází. Při připojení na třífázovou síť ve stroji vzniká točivé magnetické pole. Ve vinutí rotoru stojícího stroje se indukuje budící proud, jehož magnetické pole se snaží sledovat točivé pole satoru-stroj se roztáčí. V případě, že by došlo k synchronnímu otáčení rotoru s točivým polem satoru, nebude v rotoru indukován potřebný budící proud. Z tohoto důvodu je pro funkci stroje potřebné asynchronní otáčení rotoru vůči točivému poli satoru. V případě, že otáčející se rotor je mechanicky zatěžován, mluvíme o asynchronním motoru. V případě, že naopak rotor je poháněn, mluvíme o asynchronním generátoru.

Princip činnosti asynchronního generátoru

Princip asynchronního generátoru je případem, který je v odborné terminologii nazýván jako „generátorické brždění asynchronního motoru“. Při tomto způsobu brždění zůstává indukční stroj připojený na síť tak, jako kdyby pracoval v motorickém režimu. Nemění se ani směr otáčení rotoru, ale mění se jeho rychlost. Točivý moment způsobený zátěží (kterou představuje oběžné kolo vodní turbíny), působí ve stejném smyslu jako točivý moment motoru. Jestliže se otáčky rotoru zvětší nad otáčky točivého pole (synchronní otáčky), změní se smysl relativní rychlosti vinutí rotoru k točivému poli satoru. Tím se změní smysl indukovaného napětí ve vinutí rotoru k točivému poli a současně i směr proudu rotoru. Vlivem toho, že se změní směr proudu rotoru, změní se i směr činné složky satorového proudu. Motor neodebírá činný proud, ale dodává ho do sítě a pracuje jako generátor. Jalová složka proudu satoru (magnetizační proud) zůstává stejná, jako kdyby stroj pracoval v motorickém režimu. Stroj odebírá ze sítě jalový proud, aby mohl dodávat do sítě činný proud. Otáčky rotoru jsou větší než otáčky točivého pole $n_s > n$. Vlivem toho bude skluz záporný a záporný bude i elektrický výkon rotoru. Rotoru tedy musí být přiveden mechanický výkon, aby stroj mohl běžet jako generátor. Uvedená problematika je zřejmá z obr. 5.4



Obr. 5.4 Vyznačení motorické a generátorické oblasti asynchronního elektrického stroje

Synchronní generátor

Synchronní generátor má stator se střídavým trojfázovým vinutím a rotor s jednosměrným budícím vinutím. Rotor synchronního generátoru se otáčí synchronními otáčkami a vytváří točivé magnetické pole. Magnetické pole indukuje proud ve třech jednofázových vinutích – fázích, posunutých vzájemně o úhel 120° .

Rotor synchronního stroje je ještě vybaven tlumícím vinutím, které zamezuje asymetrii a kolísání elektrických veličin generátoru. Budicí stejnosměrný proud se do rotoru synchronního stroje přivádí přes kroužky a kolektory nebo přímo hřídelí při umístění budiče na hřídeli. Synchronní generátor má možnost regulovat napětí a frekvenci. Pro danou frekvenci sítě 50 Hz lze použít synchronní otáčky 3 000, 1 500, 750, 600, 500. Napětí lze ovlivňovat změnami budícího proudu. Uvedené způsoby regulace platí při samostatném provozu synchronního generátoru do autonomní sítě. Volba účinníku nebo jmenovitého jalového výkonu generátoru je dána charakterem zatížení, resp. rolí MVE v elektrizační soustavě. Činný výkon odebíraný z generátoru se musí rovnat mechanickému výkonu vodního stroje sníženému o příslušné mechanické a elektrické ztráty. Jalový výkon nezatěžuje vodní motor mechanickým momentem, ale zatěžuje jen generátor statorovým proudem.

Při chodu synchronního generátoru paralelně s elektrizační sítí je síť považována za výkonově silnou, tj. s pevným napětím a frekvencí, které se nedají poměrně malým výkonem uvažovaného generátoru ovlivnit. Generátor dodává do sítě činný a jalový výkon. Činný výkon je dán mechanickým výkonem vodního stroje a souvisí se zatěžovým úhlem generátoru. Jalový výkon, dodávaný do sítě (nebo odebíraný ze sítě), je dán velikostí budícího proudu. K dodávce do sítě se používá regulace na konstantní jalový výkon nebo na konstantní účinník. Paralelní provoz se sítí při nízkém budícím proudu skrývá nebezpečí, že generátor vypadne ze synchronizmu. Tento provoz je potom velmi nebezpečný vzhledem k možnosti poškození stroje.

Připojení generátoru k síti (fázování) je možné při synchronizaci napětí, frekvence a fáze nebo samosynchronizací, tj. připojením generátoru k síti v přibližně synchronních otáčkách v nenabuzeném stavu a následném nabuzení. Samosynchronizací vzniká proudový ráz 2,5 až 3krát větší, než je jmenovitý proud.

Stejnoseměrné dynamo

Stejnoseměrný stroj je v podstatě střídavý stroj, obdobný jako stroj synchronní, avšak s mechanickým usměrňovačem, komutátorem. U stejnosměrných strojů je uspořádání vždy takové, že stroj má na statoru budící magnety a na rotoru kotvu. V kotvě indukovaný proud se usměrňuje na točícím se komutátoru.

Při použití dynamu jako zdroje pro MVE se nejčastěji setkáváme s kompaundním dynamem, kde je potřebná regulace výstupního napětí realizována změnou odporu zařazeného u derivačního vinutí. Sériové vinutí u těchto strojů kompenzuje vnitřní úbytky, vznikající v dynamu jak odpory tak deformací magnetického pole reakcí kotvy.

Každý stejnosměrný stroj může pracovat jako generátor stejně jako motor. To v jakém režimu stejnosměrný stroj pracuje, závisí pouze na způsobu zapojení jak mechanického, tak elektrického. V případě že stejnosměrný stroj je mechanicky připojen na hnací zařízení, pracuje jako dynamo; v případě, že je připojen na stejnosměrné napájecí napětí a mechanicky na zátěž, pracuje jako motor.

Dynamy jsou také využívány jako zdroj pro dobíjení baterií. V tomto případě je třeba zabránit stavu, kdy dynamo přechází nepozorovaně do motorického chodu a místo nabíjení baterie vybíjí. K tomuto dojde v případě uzavření přítoku vody, např. v důsledku zanesení česlí,

Pozn. Kompaundní dynamo- dynamo buzené kombinací sériového a derivačního budícího vinutí

Použití jednotlivých elektrických generátorů

Každý ze třech uvedených druhů elektrických generátorů se hodí pro určité elektrické zapojení:

Asynchronní generátor – použití v malých vodních elektrárnách pracujících paralelně s distribuční sítí do výkonu 1000kW

Synchronní generátor-použití v MVE pracujících do autonomních sítí všech výkonů a ve vodních elektrárnách pracujících paralelně s distribuční sítí o výkonech nad 1000kW

Stejnoseměrné dynamo-použití v MVE mimo dosah distribuční soustavy bez nutnosti použití střídavého proudu (např. napájení osvětlení objektu v odlehlé oblasti)

Návrh řešení Asynchronního generátoru pro MVE Nedošín 1 (konkrétně)

Pro malou vodní elektrárnu Nedošín 1 bude jako generátor použit asynchronní motor Siemens typ 1LA7 133-4AA61. Tento motor je přírubového provedení a to z důvodu vertikálního umístění ve strojovně.

Asynchronní generátor byl pro MVE Nedošín 1 vybrán z několika důvodů:

- chod MVE Nedošín 1 paralelně s distribuční sítí
- možnost využití generátoru jako motoru při načerpávání násosky turbíny
- jednoduchost zapojení do distribuční sítě
- příznivá cena
- široký sortiment typizovaných generátorů

Parametry Asynchronního motoru Siemens typ 1LA7 133-4AA61:

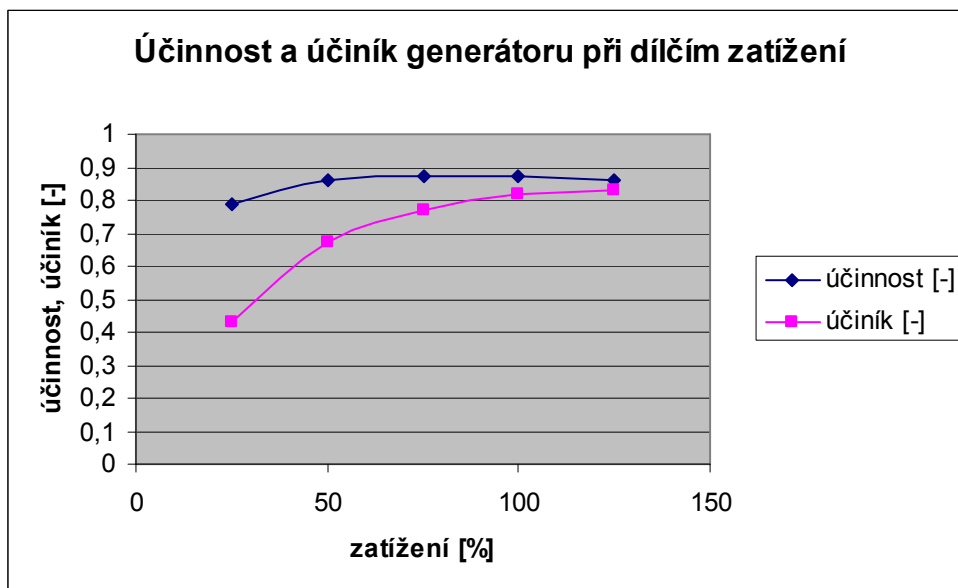
Typová řada	1LA7
Velikost (osová výška)	132 mm
Výkon	7,50 kW
Otáčky	1 455 min ⁻¹
Počet pólů	Čtyřpólový
Napětí	400 / 690V 50Hz
Krytí	IP 55
Kostra	hliníková
Pro teplotu okolí	od -30°C do + 40°C
Třída izolace	F
Pro nadmořskou výšku	do 1 000 m
Pro trvalé zatížení	S1
Standardní nátěr	Odstín RAL 7030

Tabulka 5.6 Parametry Asynchronního motoru Siemens typ 1LA7 133-4AA61

Účinnost Účíník generátoru při dílčích zatíženích:

Zatížení [%]	Účinnost[-]	Účíník [-]
125	0,86	0,83
100	0,87	0,82
75	0,87	0,77
50	0,86	0,67
25	0,79	0,43

Tabulka 5.7 Účinnost Účíník generátoru při dílčích zatíženích



Obr. 5.5 Účinnost a účíník generátoru při dílčím zatížení

Pracuje-li asynchronní motor nakrátko jako generátor, parametry generátorického chodu se spočítají takto:

Výkon generátoru

$$P_{gen} = U_{sdr} \cdot I_{vin} \cdot \cos \varphi \cdot \eta_{gen} = \sqrt{3} \cdot 400 \cdot 15,2 \cdot 0,82 \cdot 0,87 = 7,482 \text{ kW} \quad (5.13)$$

Při použití elektromotoru jako generátoru musíme dosáhnout nadsynchronních otáček, aby motor přešel do generátorického chodu. Pro zachování jmenovitých hodnot je nutné zachování rozdílu počtu otáček vůči synchronním otáčkám.

$$n_{synchronní} - n_{motorické} = n_{generátorické} - n_{synchronní}$$

$$n_{generátorické} = n_{synchronní} + (n_{synchronní} - n_{motorické}) = 1500 + (1500 - 1455) = 1545 \text{ min}^{-1} \quad (5.14)$$

Pro docílení generátorického chodu asynchronního motoru musí dosáhnout výstup z převodu turbína-generátor 1545 min^{-1} .

Nakonec spočteme dodávaný výkon pro významné stavy na MVE Nedošín 1. Důležitý pro další výpočty je zejména stav při 160 denním průtoku a hraniční stavy regulace. Elektrický výkon generátoru je roven výstupnímu výkonu z elektrárny předávaném do DS.

$$P_{el} = \rho \cdot g \cdot Q \cdot H \cdot \eta_{turb} \cdot \eta_{převo} \cdot \eta_{gen} \quad (5.15)$$

Počet dnů	Průtok Q [m ³ /s]	Spád H [m]	Elektrický výkon P _{el} [kW]
172	0,53	1,2	3,787
160	0,58	1,5	5,254
148	0,62	1,7	6,630

Tabulka 5.8 Přehled elektrických výkonů při různých průtocích a spádech

5.4.3 Připojení MVE Nedošín 1 na distribuční soustavu

MVE Nedošín 1 je projektována jako zdroj elektrické energie pracující paralelně se sítí provozovatele distribuční soustavy. Provozovatelem distribuční soustavy v místě uvažované MVE je společnost ČEZ Distribuce. Proto se musíme při připojování řídit pravidly pro paralelní provoz zdrojů se sítí provozovatele distribuční soustavy[7].

Nejdůležitější části Pravidel pro paralelní provoz zdrojů se sítí provozovatele distribuční soustavy:

Rozsah platnosti

Tato pravidla platí pro plánování, zřizování, provoz a úpravy výroben elektřiny, připojených k síti nn, vn nebo 110 kV **provozovatele distribuční sítě(PDS).**

Takovýmito výrobny jsou např.: vodní elektrárny, větrné elektrárny, generátory poháněné tepelnými stroji, např. blokové teplárny, fotočlávková zařízení.

Elektroměry, měřicí a řídicí zařízení

Druh a počet potřebných měřicích zařízení (elektroměrů PDS) a řídicích přístrojů (přepínačů tarifů) se řídí podle smluvních podmínek pro odběr a dodávku elektřiny příslušného PDS. Proto je nutné projednat jejich umístění s PDS již ve stadiu projektu.

Elektroměry pro účtování a jim přiřazené řídicí přístroje jsou uspořádány na vhodných místech udaných PDS. Měření se volí podle napěťové hladiny, do které výroba pracuje a podle jejího výkonu typicky

- nízké napětí: podle výkonu výroby buď přímé (do 80 A) nebo polopřímé
- Elektroměry pro polopřímé a nepřímé měření se volí elektronické, čtyřkvadrantové. Přístrojové měřicí transformátory napětí či proudu jsou součástí zařízení výroby. Přístrojové měřicí transformátory musí být schváleného typu, požadovaných technických parametrů a úředně ověřeny.

Spínací zařízení

Pro spojení vlastní výroby se sítí PDS musí být použito spínací zařízení (vazební spínač) minimálně se schopností vypínání zátěže (např. vypínač, odpínač s pojistkami, úsekový odpínač), kterému je předražena zkratová ochrana. Tento vazební spínač může být jak na straně nn, tak i na straně vn nebo 110 kV. Pokud se nepředpokládá ostrovní provoz, lze k tomuto účelu použít spínací zařízení generátoru. Spínací zařízení musí zajišťovat galvanické oddělení ve všech fázích.

Výrobce musí prokázat zkratovou odolnost celého zařízení.

Ochrany

Opatření na ochranu vlastní výroby (např. zkratovou ochranu, ochranu proti přetížení, ochranu před nebezpečným dotykem) je zapotřebí provést podle zásad navrhování zařízení v DS

PPDS. U zařízení schopných ostrovního provozu je třeba zajistit chránění i při ostrovním provozu.

K ochraně vlastního zařízení a zařízení jiných odběratelů jsou potřebná další opatření využívající ochran, které při odchylkách napětí a frekvence vybaví příslušná spínací zařízení podle části 7.

Je zapotřebí zajistit ochrany s následujícími funkcemi:

Funkce	Rozsah nastav.	Příklad nastav.	Časové zpod.	Příklad nastav.
Podpětí 1.stupeň $U_{<}$	$0.70 U_n$ až $1.0 U_n$	$90 \% U_n$	$t_{U_{<}}$	0,5 s
Podpětí 2.stupeň $U_{<<}$	$0.70 U_n$ až $1.0 U_n$	$80 \% U_n$	$t_{U_{<<}}$	0,1 s
Přepětí 1.stupeň $U_{>}$	$1.0 U_n$ až $1.2 U_n$	$110 \% U_n$	$t_{U_{>}}$	0,5 s
Přepětí 2.stupeň $U_{>>}$	$1.0 U_n$ až $1.2 U_n$	$120 \% U_n$	$t_{U_{>>}}$	0,1 s
Podfrekv. 1.stupeň $f_{<}$	48 Hz až 50 Hz	49,8 Hz	$t_{f_{<}}$	0,5 s
Podfrekv 2.stupeň $f_{<<}$	48 Hz až 50 Hz	49,5 Hz	$t_{f_{<<}}$	0,1 s
Nadfrekvence $f_{>}$	50 Hz až 52 Hz.	50,2 Hz	$t_{f_{>}}$	0,5 s

Tabulka 5.9 Nastavení ochran

Po dohodě s PDS lze upustit od 2. stupně uvedených ochran.

V některých případech může být s ohledem na síťové poměry třeba jiné nastavení ochran. Proto je jejich nastavení vždy nutné odsouhlasit s PDS. Vhodným podkladem pro tato nastavení jsou studie dynamického chování zdrojů v dané síti.

Podpět'ová a přepět'ová ochrana musí být trojfázová.

Podfrekvenční a nadfrekvenční ochrana může být jednofázová.

Na rozpoznání stavu odpojení zdroje od sítě PDS může být použita též ochrana na skokovou změnu vektoru napětí nebo relé na výkonový skok.

K provádění funkčních zkoušek ochran je zapotřebí zřídit rozhraní (např. svorkovnici s podélným dělením a zkušebními svorkami).

Řízení jalového výkonu

Zdroje s výkonem 5 MW a vyšším (ve zdůvodněných případech 1 MW a vyšším) musí být vybaveny pro některý z následujících režimů řízení jalového výkonu:

- udržování zadaného účinníku
- udržování zadané hodnoty jalového výkonu (odběr/dodávka) v rámci provozního diagramu stroje (PQ diagramu)
- udržování napětí v předávacím místě (na výstupu generátoru, za blokovým transformátorem nebo v pilotním uzlu DS) v rámci omezení daných PQ diagramem stroje.

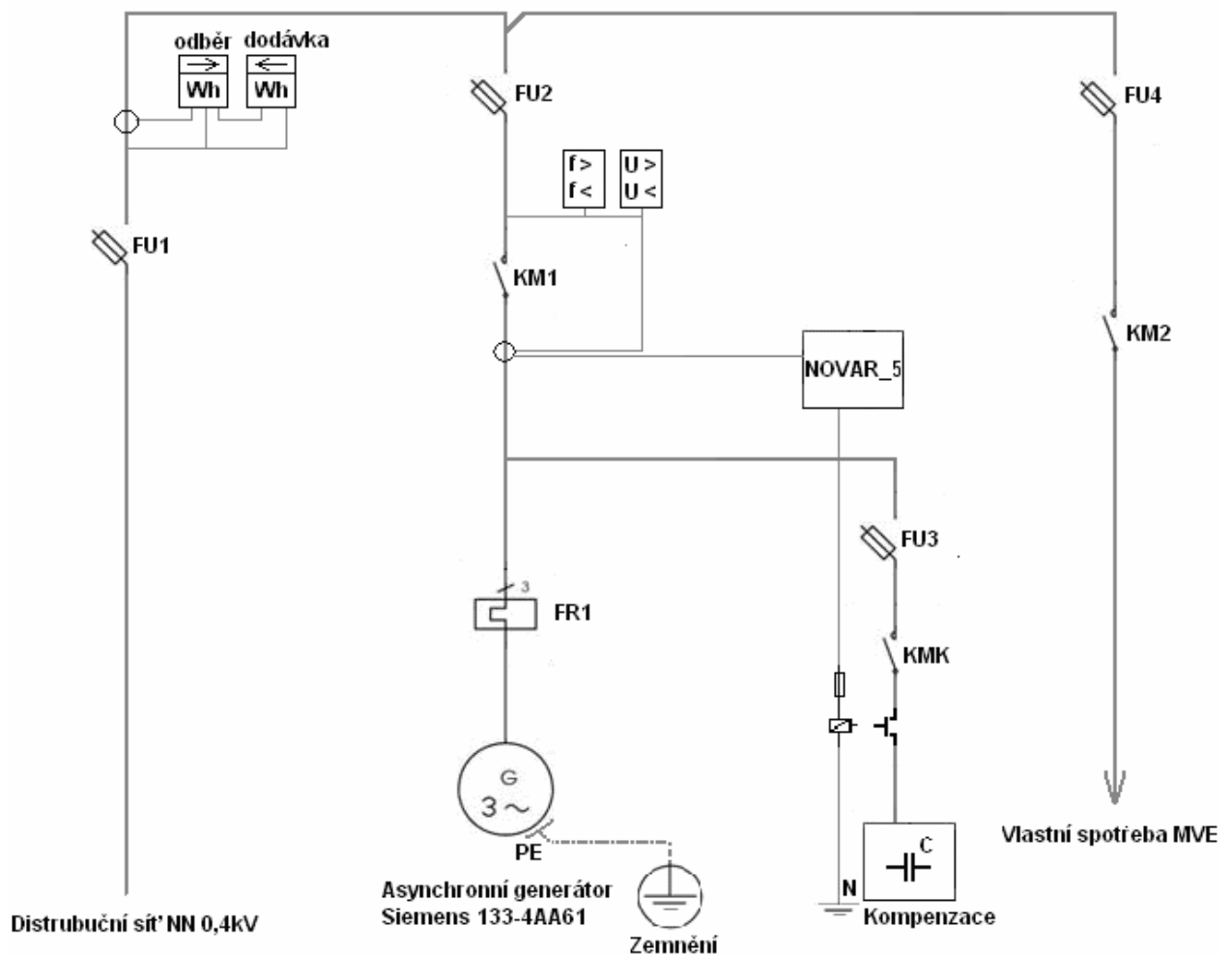
Způsob řízení jalového výkonu závisí vždy na konkrétním místě distribuční soustavy a určuje ho PDS po konzultaci s výrobcem. Obdobně potřeba jalového výkonu závisí na poměrech v konkrétním místě DS. Účinník zdroje, dodávaný jalový výkon či výše regulovaného napětí se proto řídí podle pokynů nebo povelů PDS. Automatické řízení jalového výkonu výrobní podle napětí v pilotním uzlu DS je podpůrnou službou pro provozovatele DS. O její potřebě rozhoduje podle místních podmínek PDS.

Generátor musí být schopen dodávat jmenovitý činný výkon v rozmezí induktivního účinníku $\cos \varphi = 0,85$ až 1 (dodávka jal.výkonu induktivního charakteru) a kapacitního účinníku až $\cos \varphi = 1$ až 0,95 (chod generátoru v podbuzeném stavu) při dovoleném rozsahu napětí na svorkách generátoru $\pm 5 \% U_n$ a při kmitočtu v rozmezí 48,5 až 50,5 Hz. Při nižších hodnotách činného výkonu se dovolené hodnoty jalového výkonu zjistí podle tzv. „Provozních diagramů alternátoru“, které musí být součástí provozně-technické dokumentace bloku. Pokud technologie vlastní spotřeby elektrárny a zajištění napájení vlastní spotřeby neumožňuje využití výše uvedeného dovoleného rozsahu (napětí vlastní spotřeby by se dostalo mimo dovolené meze), lze zvýšit regulační rozsah generátoru např. použitím odbočkového transformátoru napájení vlastní spotřeby s regulací pod zatížením.

Uvedený základní požadovaný regulační rozsah jalového výkonu může být modifikován, tedy zúžen nebo rozšířen. Důvodem případné modifikace může být např. odlišná (nižší/vyšší) potřeba regulačního jalového výkonu v dané lokalitě DS nebo zvláštní technologické důvody (např. u výroby s asynchronními generátory). Taková modifikace předpokládá uzavření zvláštní dohody mezi provozovatelem výroby a PDS.

Návrh řešení schématu MVE Nedošín 1 při dodržení Pravidel pro paralelní provoz zdrojů se sítí provozovatele distribuční soustavy

Jednopolové schéma MVE Nedošín 1



Obr. 5.6 Jednopolové schéma MVE Nedošín

Popis a funkce jednopólového schéma MVE Nedošín 1

Jednopólové schéma lze obsahují následující větve:

- Generátorová větev
- Kompenzační větev
- Větev vyvedení výkonu do sítě
- Větev vlastní spotřeby

Každá jednotlivá větev je chráněna vlastním jističem **FU1, FU2, FU3, FU4**. **FU1**-jistič větve vyvedení výkonu do sítě je hlavním jističem MVE Nedošín 1. Jističe chrání zařízení před přetížením (proudové jističí relé proti přetížení- tepelná spoušť) a před zkratem (zkratová ochrana-magnetická spoušť). Generátorická větev, kompenzační větev a větev vlastní spotřeby jsou spínány každá vlastním stykačem **KM1, KMK, KM2**.

Generátorová větev:

asynchronní generátor, ochrana proudové přetížitelnosti **FR1**, stykač **KM1**, napěťová ochrana, frekvenční ochrana, jistič **FU2**.

Proudová ochrana přetížitelnosti **FR1** chrání generátor před přetížením. Jedná se o nadproudové relé s časovým zpožděním. Stykač **KM1** je určen k uvádění do provozu a odstavování z provozu generátoru. Napěťová ochrana $U > U <$ indikuje jednak snížení napětí pod provozní hodnotu a také vznik přepětí na svorkách MVE. Jako napěťová ochrana je použito relé zahrnující obě funkce. Relé je frekvenčně nezávislé. Frekvenční ochrana $f > f <$ chrání před nadfrekvencí a podfrekvencí. Je realizována frekvenčním relé zahrnujícím obě funkce. Frekvenční relé zprostředkovaně indikují vybočení otáček soustrojí z provozních mezí. U stroje MVE vybočení kmitočtu většinou znamená, že došlo k odpojení od rozvodné sítě-soustrojí je nutno okamžitě odstavit. Nastavení mezí frekvenčního relé je dáno provozovatelem distribuční sítě. Generátor je popsán v kapitole 5.4.2.

Kompenzační větev:

Kompenzační kondenzátory, regulátor jalového výkonu **NOVAR5**, stykač **KMK**, jistič **FU3**.

Ochranný pojistkový jistič kompenzace **FU3** je několika stупňový s celkovou proudovou ochranou.. Potřebná ochrana se odvíjí od aktuálního výkonu MVE a tím i požadavků na kompenzaci jalového výkonu. Kompenzační kondenzátory a regulátor jalového výkonu **NOVAR5** jsou popsány v kapitole (5.4.4).

Větev vyvedení výkonu do sítě:

Jistič **FU1**, měření energie vyrobené + spotřebované.

Větev vlastní spotřeby:

zařízení vlastní spotřeby, stykač **KM2**, jistič **FU4**

5.4.4 Řízení jalového výkonu

Vzhledem k požadavkům provozovatele distribuční soustavy[] je nutné aby generátor dodával do sítě jmenovitý činný výkon v rozmezí induktivního účinníku $\cos \varphi = 0,85$ až 1 (dodávka jal.výkonu induktivního charakteru) a kapacitního účinníku až $\cos \varphi = 1$ až 0,95 (chod

generátoru v podbuzeném stavu) při dovoleném rozsahu napětí na svorkách generátoru $\pm 5\%$ U_n a při kmitočtu v rozmezí 48,5 až 50,5 Hz.

Při použití asynchronních generátorů je k dosažení požadovaného rozmezí účinníku $\cos \varphi$ nutná kompenzace odběru jalového výkonu ze sítě. Potřebný jalový výkon asynchronního generátoru je cca 60 % dodávaného zdánlivého výkonu. Nemá-li být tento jalový výkon dodáván ze sítě, je třeba pro kompenzaci připojit paralelně ke generátoru odpovídající kondenzátory.

Návrh řešení kompenzace MVE Nedošín 1

Při návrhu řízení jalového výkonu pro konkrétní podmínky MVE Nedošín 1 použijeme jako výchozí následující parametry:

$$I_{\text{vinutí}} = 15,2 \text{ A}$$

$$U_{3\text{sdr}} = \sqrt{3} \cdot 400$$

$$\eta_{\text{gen}} = 0,87$$

$$\cos \varphi_{\text{gen}} = 0,82$$

Jalový výkon generátoru:

$$Q_{\text{gen}} = P \cdot \tan \varphi = 7482,0,698 = 5,22 \text{ kVar} \quad (5.16)$$

Výkon kompenzačních kondenzátorů je volen podle zde vypočteného výkonu. Při velikosti $Q_{\text{gen}} = Q_{\text{kond}}$ by byl $\cos \varphi$ kompenzován na hodnotu $\cos \varphi = 1$. Při této hodnotě však hrozí překompenzování čím by jsme se dostali do nezažadující oblasti kapacitního účinníku. Proto se kompenzuje na hodnotu odpovídající $\cos \varphi = 0,95-0,98$.

Kompenzace pro připojení MVE Nedošín 1 bude prováděna na $\cos \varphi = 0,98$. Proto je zapotřebí od celkového jalového výkonu generátoru odečíst jalový výkon, který je podle pravidel připojování daných provozovatelem distribuční sítě (ČEZ Distribuce) možno dodávat ze sítě.

$$Q_{\text{sítě}} = U_{3\text{sdr}} \cdot I_{\text{vinutí}} \cdot \sin \varphi_{\text{sítě}} = \sqrt{3} \cdot 400 \cdot 15,2 \cdot 0,20 = 2,11 \text{ kVar} \quad (5.17)$$

Poté je již možno vypočíst výsledný jalový výkon pro kompenzaci kompenzační kapacitou.

$$Q_{\text{komp.}} = Q_{\text{gen.}} - Q_{\text{sítě}} = 5,22 - 2,11 = 3,11 \text{ kVar} \quad (5.18)$$

Pro kompenzaci MVE Nedošín 1 je použita soustava kondenzátorové baterie zapojená s kondenzátorů ZEZ Silko sestavená na kompenzovaný výkon 3kVar ve spojení s Regulátorem účinníku Novar 5 od KMB Systems.



Kondenzátory ZEZ Silko nn pro kompenzaci MVE Nedošín 1:

Kondenzátory jsou určeny pro individuální, skupinovou nebo centrální kompenzaci jalového induktivního výkonu v sítích nízkého napětí. Nádoba kondenzátoru je chráněna proti roztržení přetlakovým odpojovačem, který zajistí bezpečné odpojení kondenzátoru ze sítě při zkratu a na konci vlastní životnosti. Kondenzátory jsou vybaveny třemi vybíjecími odpory. Mají vysokou spolehlivost a životnost.

Obr. 5.7 Kondenzátor ZEZ Silko

Kondenzátorová kompenzační baterie:

-sestavena ze 3 kondenzátorů ZEZ Silko nn o kompenzovaných výkonech: $Q_1=1,0 \text{ kVAr}$, $Q_2=1,0 \text{ kVAr}$, $Q_3=1,0 \text{ kVAr}$ dohromady tvořící $Q_{\text{komp.}}=3,0 \text{ kVAr}$

- v daném složení bude využito k regulaci jalového výkonu MVE Nedošín 1 3 jednotlivých velikostí kompenzačního výkonu: $Q_A=1,0 \text{ kVAr}$, $Q_B=2,0 \text{ kVAr}$, $Q_C=3,0 \text{ kVAr}$.

-pro vytvoření 3 kompenzačních výkonů v závislosti na aktuálním výkonu generátoru (regulace jalového výkonu) je použit regulátor účinníku NOVAR 5 od KMB Systems

Regulátor účinníku NOVAR 5 KMB Systems:

- 5 + 1 reléových stupňů
- šesté relé programovatelné jako regulační nebo alarmové
- společné napájecí a měřicí napětí 230 V AC (nebo 115 V AC), 50/60 Hz
- citlivost proudového vstupu 0,05 A
 - čelní panel 96 x 96 mm



Popis přístroje: Regulátor jalového výkonu typu NOVAR 5 je plně automatický přístroj, umožňující optimální řízení kompenzace jalového výkonu.

Obr. 5.8
Regulátor
NOVAR 5

Vstup měřicího napětí je společný s napájecími svorkami 230 V stř. Proudový měřicí vstup předpokládá připojení měřicího transformátoru proudu MTP s nominální hodnotou sekundárního proudu 5A. K regulátoru lze připojit libovolné fázové napětí a proud libovolné fáze trojfázové sítě 3x230/400 V stř.

Instalace přístroje je plně automatizována. Regulátor automaticky zjistí jak způsob připojení, tak velikost jednotlivých připojených kompenzačních stupňů. Ruční zadání těchto parametrů je rovněž možné. Libovolný výstup lze nastavit jako pevný.

Regulace probíhá ve všech čtyřech kvadrantech a její rychlost je závislá jak na velikosti regulační odchylky, tak na její polaritě (překompenzování / nedokompenzování). Připínání a odpínání kompenzačních kondenzátorů je prováděno tak, aby optimální stav kompenzace byl dosažen jediným regulačním zásahem a minimálním počtem přepínaných stupňů. Přitom přístroj volí jednotlivé stupně s ohledem na jejich rovnoměrné zatěžování a přednostně připíná stupně, které byly odepnuty nejdéle a jejichž zbytkový náboj je tedy minimální.

Během regulace provádí přístroj průběžnou kontrolu kompenzačních stupňů. Při zjištění výpadku nebo změny hodnoty stupně je při odpovídajícím nastavení tento stupeň dočasně vyřazen z regulace. Dočasně vyřazený stupeň je periodicky testován a případně zařazen zpět do regulačního procesu.

Regulátor je vybaven šesti výstupními relé. Funkci šestého relé lze nakonfigurovat jako regulační nebo jako alarmovou pro signalizaci nestandardních stavů.

Charakteristické vlastnosti

Princip regulace:

- rychlost odezvy regulátoru samostatně programovatelná pro případ nedokompenzování i překompenzování
- nastavená rychlost odezvy se zkracuje úměrně okamžité regulační odchylce, a to s druhou mocninou poměru regulační odchylky k hodnotě nejmenšího kapacitního stupně (C/k); narůstající regulační odchylka může snížit tuto hodnotu až na minimální hodnotu doby regulace 5 sekund
- pokud je regulační odchylka menší než proud nejmenšího kapacitního stupně (C/k), prodlužuje se nastavená odezva regulace na dvojnásobek; při dále klesající regulační odchylce pod 1/2 hodnoty proudu nejmenšího kapacitního stupně (C/k) se regulační zásah se neprovádí

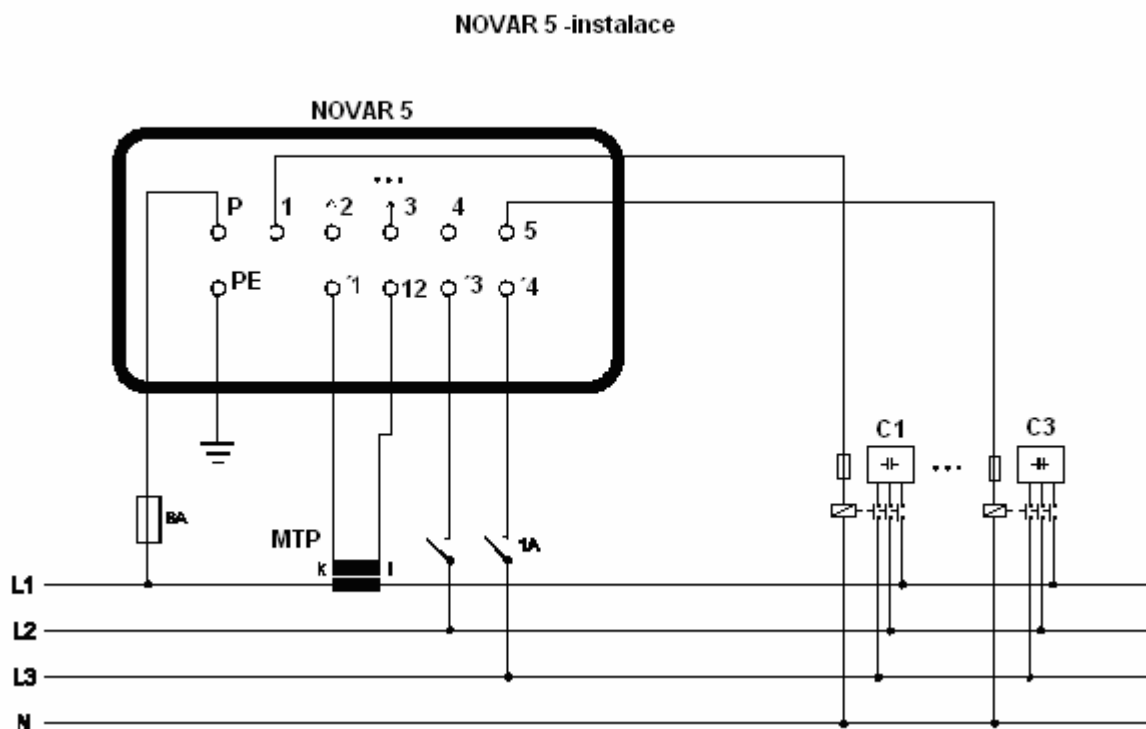
Automatická funkce:

- automatické rozpoznání připojení při instalaci regulátoru a rozpoznání regulačních stupňů
- možnost připojení zcela libovolné kombinace regulačních stupňů
- možnost ručního zadání hodnot stupňů
- průběžné zpřesňování rozpoznávaných hodnot stupňů v průběhu regulačního procesu
- průběžná kontrola regulačních stupňů v průběhu regulačního procesu a v případě opakovaného zjištění závady dočasné vyřazení vadného stupně z regulace a případně současná aktivace alarmu
- periodické přezkušování dočasně odstavených stupňů po pěti dnech a při úspěšném výsledku testu (např. po výměně spálené pojistky stupně) znovuzařazení zpět do regulačního procesu
- libovolný regulační stupeň lze nastavit jako pevný, a to jako trvale odepnutý, nebo trvale zapnutý

Volně programovatelný alarm:

- samostatně nastavitelná signalizační a akční funkce alarmu
- funkce šestého relé nastavitelná pro dálkovou signalizaci alarmu

Kompenzace MVE Nedošín 1 bude zapojena dle následujícího schématu:



Obr. 5.9 Schéma zapojení regulátoru

5.5 Návrh stavebních úprav v místě MVE

5.5.1 Současná situace

V současné situaci je na vodním díle Nedošín 1 rozdíl hladin v předjezí a podjezí nebo-li spád pouhý 1m, což je pro hydroenergetické využití jezu spád nedostačující. Protékající voda je převáděna přes jez pomocí šterkové propusti popřípadě za zvýšených vodních stavů přes pevnou kamennou část při pravém břehu.

5.5.2 Situace po instalaci MVE Nedošín 1

Koncepce instalace MVE Nedošín 1 předpokládá plné využití šterkové propusti pro účely MVE Nedošín 1. V rámci instalace MVE Nedošín 1 se taktéž počítá s navýšením spádu na tomto vodním díle v rozmezí 1,2-1,7m (v závislosti na nastavení vakového hradícího zařízení).

5.5.3 Návrh stavebních úprav v místě MVE Nedošín 1

5.5.3.1 Stavební úpravy hlediska MVE Nedošín 1

Zvýšení spádu s možností regulace spádu

Pro instalaci MVE Nedošín 1 se uvažuje se zvýšením spádu na jezu. Zvýšení spádu je možno provést více způsoby. Pro dané podmínky v lokalitě Nedošín 1 je možno uvažovat tři způsoby zvýšení spádu: -dřevené hrazení, -hradící vak, -klapkové hradící zařízení.

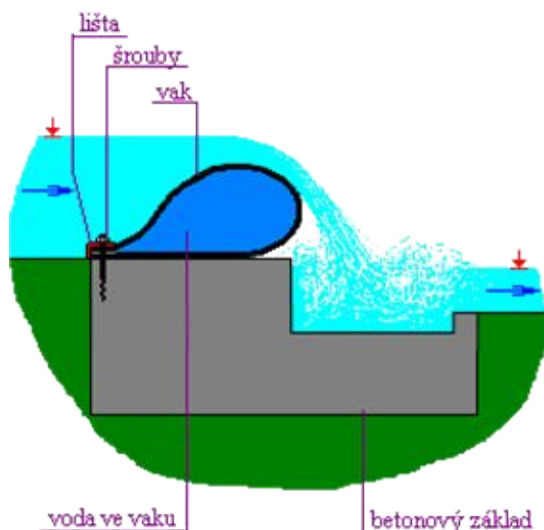
	Automatický provoz	Stavební úpravy
Dřevené hrazení	Není proveditelný z důvodu nerealizovatelnosti automatizace ovládání dřevěných trámů	I profily na koruně jezu pro zasunování hradicích dřevěných trámů
Vakové hradicí zařízení	Prováděn pomocí ovládání šoupátek-napouštění a vypouštění vaku	Ukotvení vaku v koruně jezu + vybudování plnicího a vypouštěcího potrubí vaku
Klapkové hradicí zařízení	Prováděn pomocí hydraulického ovládání jezu.	Vybudování šachty pro uschování klapky ve vyhrazeném stavu

Tabulka 5.10 Srovnání možností navýšení spádu

V tabulce je porovnáno: možnost automatizace regulace spádu a nutné stavební úpravy na tělese jezu pro jednotlivá variantní řešení. Poněvadž jediná možnost regulace vírové turbíny použité v MVE Nedošín 1 je regulace změnou spádu přichází v úvahu pouze vakový jez a klapkové hradicí zařízení. Při volbě zařízení zvyšujícího spád na vodním díle MVE Nedošín 1 bylo zejména přihlédnuto k rozsahu stavebních úprav a v neposlední řadě k ekonomice daného řešení. Proto bylo vybráno pro MVE Nedošín 1 řešení s použitím vakového hradicího zařízení.

Popis vakového jezu

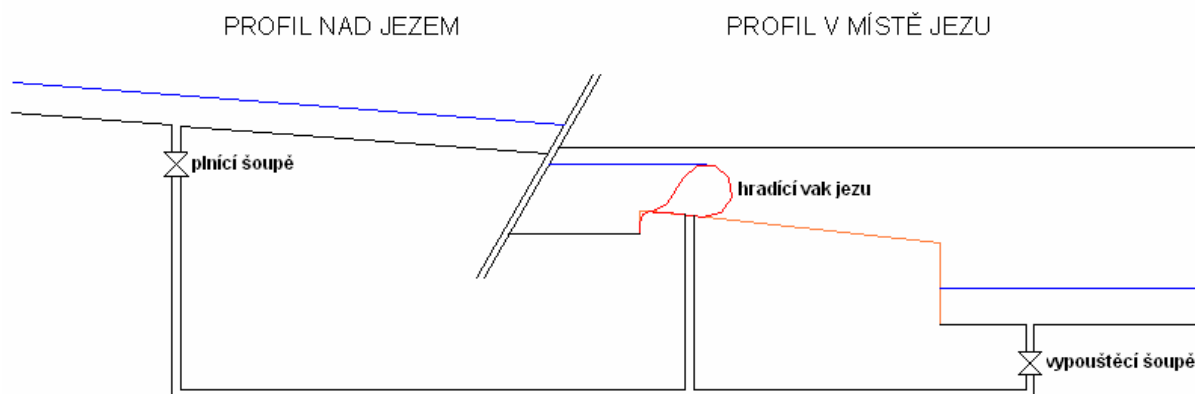
Na koruně betonového stupně je kovovou lištou upevněn přes celou šířku toku vak ze silné gumy vyztužené textilní tkaninou tak, že tvoří kapkovitý profil, který svou spodní stranou leží na betonové ploše. Okraje vaku jsou šikmými lištami upevněny i k bočním stěnám. Tak je vak uzavřen. Vnitřní prostor vaku je vyplněn vodou a je ho možno potrubím podle potřeby spojit s vodou v nadeji nebo ve vývěřišti. Tím způsobem se vak podle potřeby naplní nebo vyprázdní. Jeho naplněním na určitý objem lze velmi přesně regulovat jak výšku hladiny v nadeji, tak i přepadající množství vody přes jez. Za povodně lze snadno a rychle vak vypustit. Vyhrazení v případě povodně lze pojistit funkcí samovolného vypustění v případě výskytu velké vody. Tato funkce jezu se realizuje váhou rychle proudící (povodňové) vody tlačící na korunu. Splasklý vak klade velké vodě minimální odpor a tak se rozlité řeky nad jezem i zachycení nečistot na jezu ve srovnání s jezy pevnými minimalizuje.



Obr. 5.10 Vakové vzdušovací zařízení [10]

Návrh řešení hradícího vaku jezu pro MVE Nedošín 1

Na obrázku je znázorněno provedení vakového jezu v koruně v konkrétních MVE Nedošín 1. Oranžovou barvou je vyznačeno původní jezové těleso a červenou je vyobrazen vak včetně zaoblení hrany jezu z důvodu zvětšení kapacity jezu. Regulace spádu a tím potažmo i turbíny je realizována regulací objemu vaku pomocí šoupat, jejichž provoz je možno výhledově automatizovat dosazením ovládacích servomotorů



Obr. 5.11 Provedení vakového vzdouvacího zařízení MVE Nedošín 1

Úpravy ve šterkové propusti-místě instalace soustrojí

Celý prostor šterkové propusti bude využit pro potřeby soustrojí v násoskovém provedení MVE Nedošín 1.

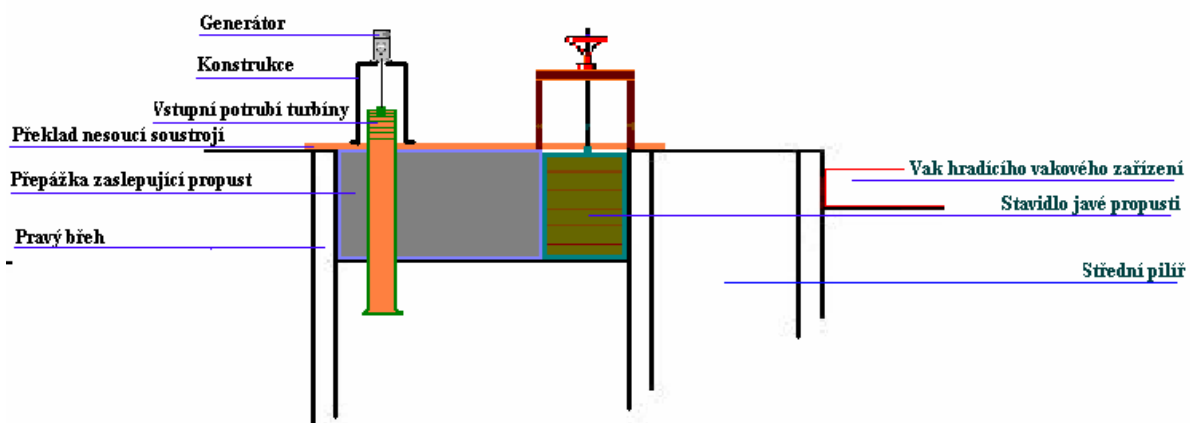
Šterková propust bude osazena vyjmenovanými komponentami:

- **Soustrojí turbína+generátor** je umístěno na straně břehu pomocí ocelového překladu položeného přes střední pilíř a břehovou navigaci.

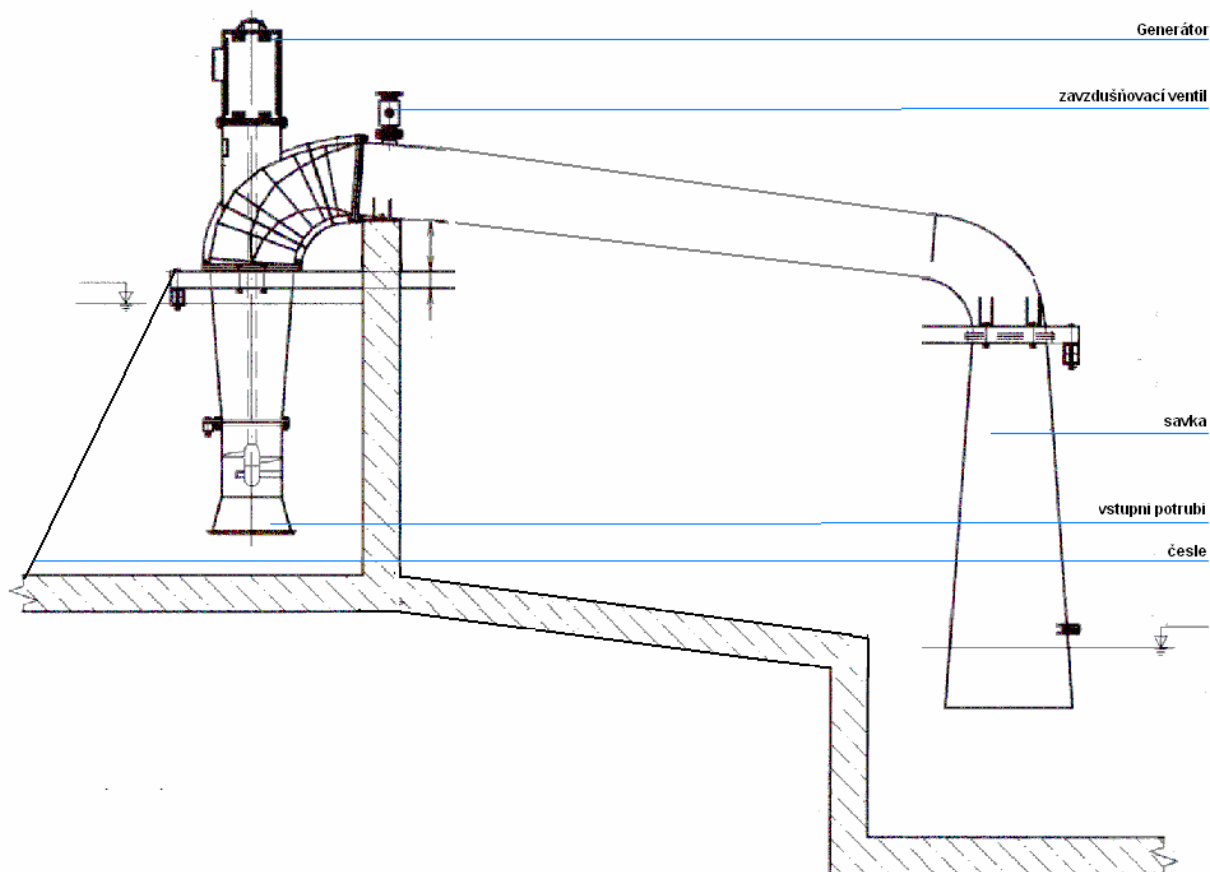
- **Stavidlo jalové** je umístěno na straně středového pilíře o šíři 1m. Slouží k vyplachování nashromážděných nečistot, úplnému vyprázdnění objemu zdrže a má i funkci jalového přepadu.

- **Přepážka přepažující propust** přepažuje zbylý prostor mezi stavidlem a břehovou navigací a tím zabraňuje průtoku jalové vody.

- **Přívodní potrubí turbíny + savka** zajišťují přívod a odvod vody do turbíny a z turbíny



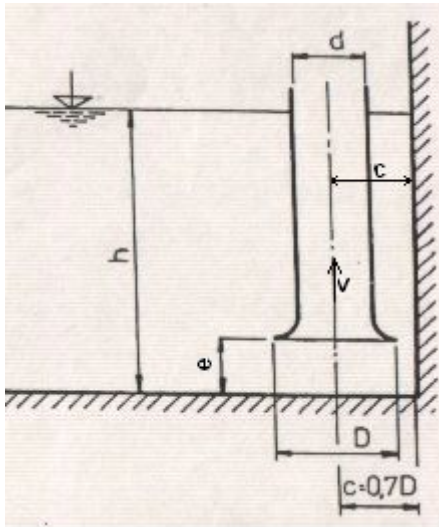
Obr. 5.12 Osazení štěrkové propusti



Obr. 5.13 Provedení soustrojí + sávka

Úprava profilu dna v místě vstupního profilu turbíny

V místě vtoku vody do vstupního potrubí turbíny (u štěrkové propusti) je silně nežádoucí, aby turbína přisávala společně s vodou také vzduch (klesající účinnost). Proto je nutné vstupní profil umístit do dostatečné hloubky a také současně do dostačující vzdálenosti od pevné části tělesa jezu.



Obr. 5.14 Schéma umístění vstupního potrubí [5]

d- Průměr vstupního potrubí (turbíny)

D- Průměr rozšířeného konce vstupního potrubí (vstupní profil- tvar zvon)

e- Výška vstupního profilu nade dnem

c- Vzdálenost osy potrubí od zdi

H- Hloubka vody

Při návrhu je pevně dán průměr zvonu na okraji vstupního potrubí D a průměr vstupního potrubí d

Minimální hodnoty rozměrů e a c byly určeny podle podmínek vzniku vírů ve vtokových objektech.

Rozměry e a c nesmějí klesnout pod hodnoty dané vzorci[12]:

$$e \geq 0,5 \cdot D$$

$$c \geq 0,7 \cdot D$$

Dále má vliv na vznik vírů hloubka vody h v místě sání. Tato hloubka se určí tak, aby návrhový bod ležel v oblasti vírů hladinových a výše. Určí se tak podle poměrů $\frac{h}{d}$ a $\frac{e}{D}$, které jsou rozměry os diagramu vlivu hloubky na tvoření vírů.

Hloubka vody se volí tak aby byl návrhový bod v oblasti víru hladinových a výše.

Návrh hloubky vody v místě vstupního potrubí MVE Nedošín 1

Průměr vstupního potrubí (turbíny)	$d=0,405\text{m}$
Průměr rozšířeného konce vstupního potrubí (sací zvon)	$D=0,530\text{m (+30\%)}$
Výška okraje vstupního profilu nad dnem	$e \geq 0,5 \cdot D=0,265\text{m}$
Vzdálenost osy potrubí od zdi	$c \geq 0,7 \cdot D=0,371\text{m}$

Tabulka 5.11 Vstupní hodnoty pro určení umístění vstupního potrubí

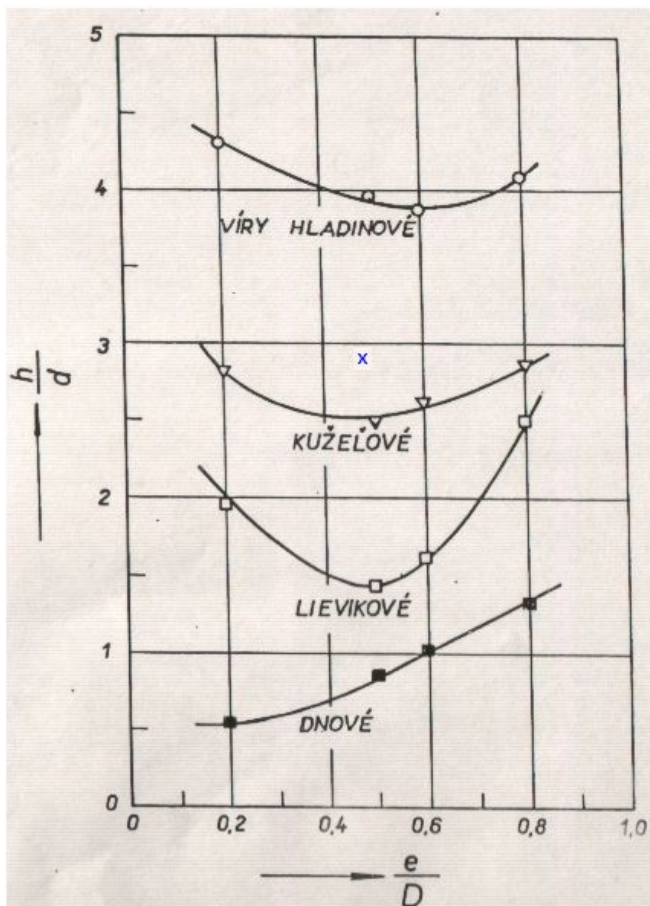
Pro MVE Nedošín 1 byla s ohledem na místní podmínky a možnosti stavebních úprav dna v místě vtoku MVE navrhnutá hloubka vody v místě sacího potrubí $H=1,5\text{m}$.

Této hloubce odpovídají hodnoty poměrů $\frac{h}{d}$ a $\frac{e}{D}$:

$$\frac{h}{d} = \frac{1,5}{0,405} = 2,83 \quad (5.19)$$

$$\frac{e}{D} = \frac{0,265}{0,530} = 0,5 \quad (5.20)$$

Těmto hodnotám náleží vyznačený bod **x**

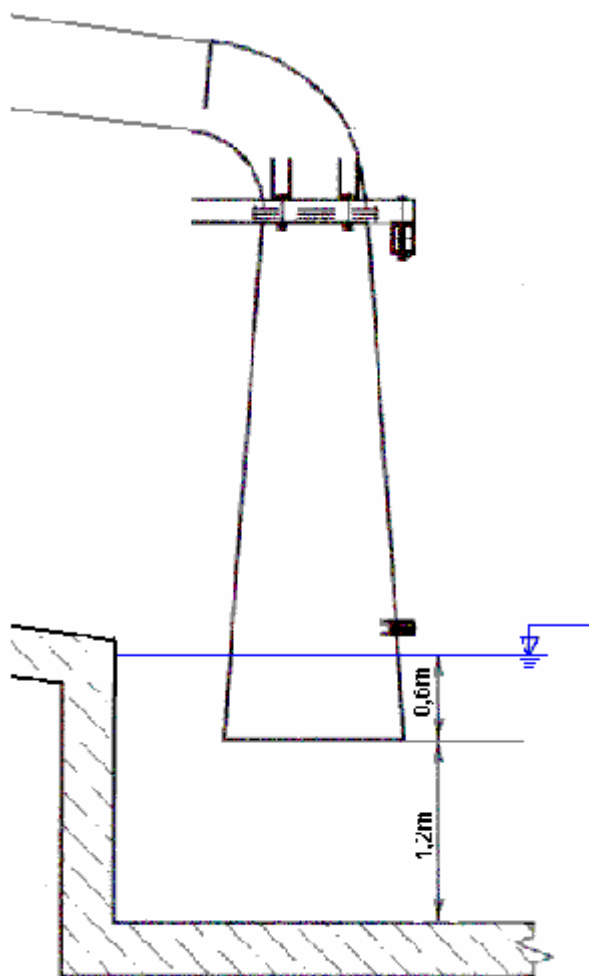


Obr. 5.15 Vliv hloubky vody h a výšky e (výška okraje nasávacího zvonu nad dnem) na tvoření vírů[5]

Návrh hloubky vody v místě savky MVE Nedošín 1

V místě zaústění savky do podjezí je nutné zpevnění dna, aby nedocházelo k odnosu materiálu dna. Dále je nutné dodržení zaústění pod hladinu při zachování dostatečné vzdálenosti ode dna.

Pro MVE Nedošín jedna bylo zaústění savky do podjezí navrhnuo dle obrázku následujícího nákresu:



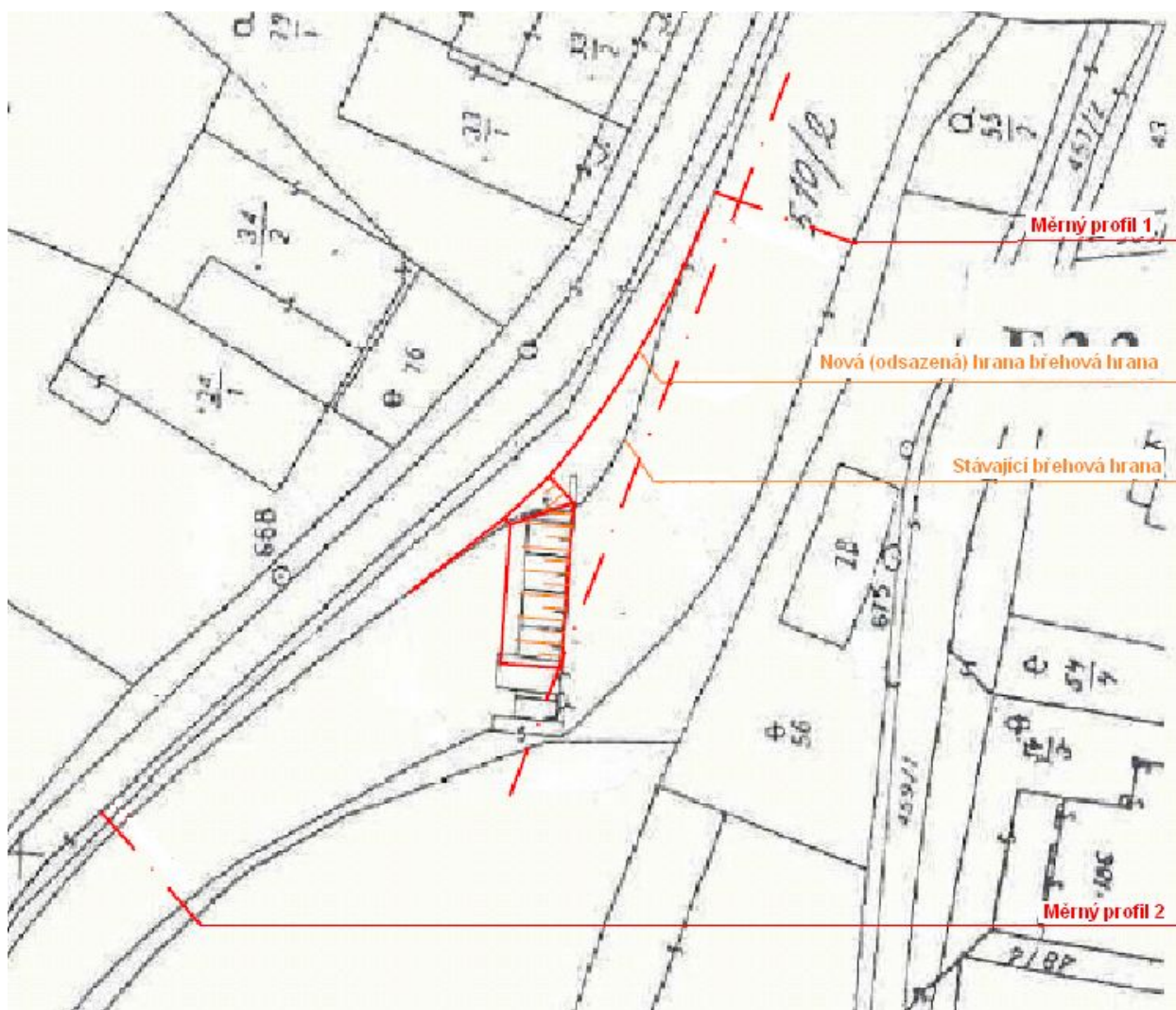
Obr. 5.16 Umístění savky

5.5.3.2 Stavební úpravy z hlediska kapacity jezu

Při výstavbě MVE v dané lokalitě je nutné zachování propustnosti jezu. Koncepce výstavby MVE Nedošín počítá s plným využitím šterkové propusti pro potřeby MVE. Tím se pochopitelně zmenší kapacita jezu. Pro zachování původní kapacity jezu je nutné provést následující stavební úpravy:

- Rozšíření toku v nadjezí
- Rozšíření skluzové plochy jezu
- Zaoblení vrchní hrany jezu

Stavební úpravy jsou vyznačeny na následujícím nákresu.



Obr. 5.17 Náskres stavebních úprav z hlediska kapacity jezu

5.5.4 Posouzení kapacity jezu

Z důvodu využití levého jezového pole pro malou vodní elektrárnu bylo nutné provést posouzení kapacity zbývající účinné části jezu. Pro účely posouzení bylo provedeno zjednodušené zaměření jak vlastního jezového pole, tak profilu toku nad a pod jezem (viz grafické přílohy).

Pro určení maximálního průtoku byla uvažována hladina odpovídající nižšímu z obou břehů – tedy situace, kdy dochází při dalším navýšení průtoku k zatopení okolního terénu. Vzhledem ke charakteru toku bylo uvažováno s drsností dle Manninga $n = 0,45$. Výpočet kapacity a sestavení konsumpční křivky koryta bylo provedeno taktéž dle Manninga.

$$v = C\sqrt{Ri} \quad (5.21)$$

$$C = \frac{1}{n} R^{1/6} \quad (5.22)$$

$$R = \frac{S}{O} \quad (5.23)$$

kde

C – rychlostní součinitel

R – hydraulický poloměr

A – průtočná plocha

O – omočený obvod

Profil 1:

I = 0,0025		podélný sklon koryta
m ₁ =	1,67	sklon levého břehu 1:m
m ₂ =	3,33	sklon pravého břehu 1:m
n =	0,045	Manningův drsnostní součinitel
B =	9,5 m ²	šířka koryta ve dně
H =	0,9 m	hloubka koryta

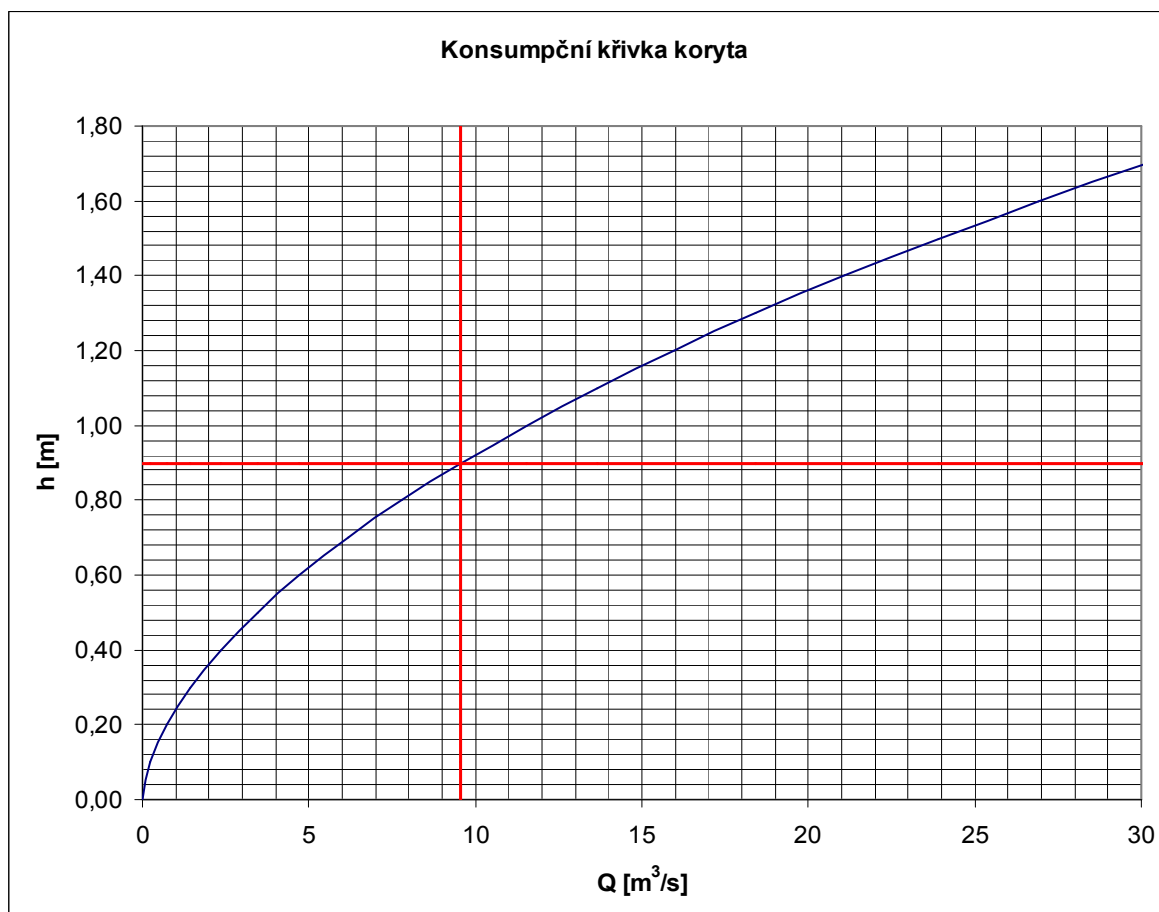
Profil 2:

I = 0,0011		podélný sklon koryta
m ₁ =	0,33	sklon levého břehu 1:m
m ₂ =	1	sklon pravého břehu 1:m
n =	0,045	Manningův drsnostní součinitel
B =	6 m ²	šířka koryta ve dně
H =	1,5 m	hloubka koryta

Výpočet konsumpční křivky v profilu 1

h	S	O	R	C	v	Q
[m]	[m ²]	[m]	[m]	[-]	[m/s]	[m ³ /s]
0	0	0	0	0	0	0
0,10	0,975	10,042	0,097	15,065	0,235	0,229
0,20	2,000	10,585	0,189	16,834	0,366	0,732
0,30	3,075	11,127	0,276	17,935	0,471	1,450
0,40	4,200	11,669	0,360	18,742	0,562	2,361
0,50	5,375	12,212	0,440	19,382	0,643	3,456
0,60	6,600	12,754	0,517	19,911	0,716	4,727
0,70	7,875	13,296	0,592	20,364	0,784	6,171
0,80	9,200	13,839	0,665	20,760	0,846	7,786
0,90	10,575	14,381	0,735	21,112	0,905	9,573
1,00	12,000	14,923	0,804	21,429	0,961	11,530
1,10	13,475	15,466	0,871	21,718	1,014	13,658
1,20	15,000	16,008	0,937	21,983	1,064	15,959
1,30	16,575	16,550	1,001	22,228	1,112	18,435
1,40	18,200	17,093	1,065	22,456	1,159	21,086
1,50	19,875	17,635	1,127	22,670	1,203	23,916
1,60	21,600	18,177	1,188	22,870	1,247	26,925
1,70	23,375	18,720	1,249	23,060	1,288	30,117
1,80	25,200	19,262	1,308	23,240	1,329	33,493
1,90	27,075	19,804	1,367	23,411	1,369	37,056

Tabulka 5.12 Výpočet konsumpční křivky v profilu 1



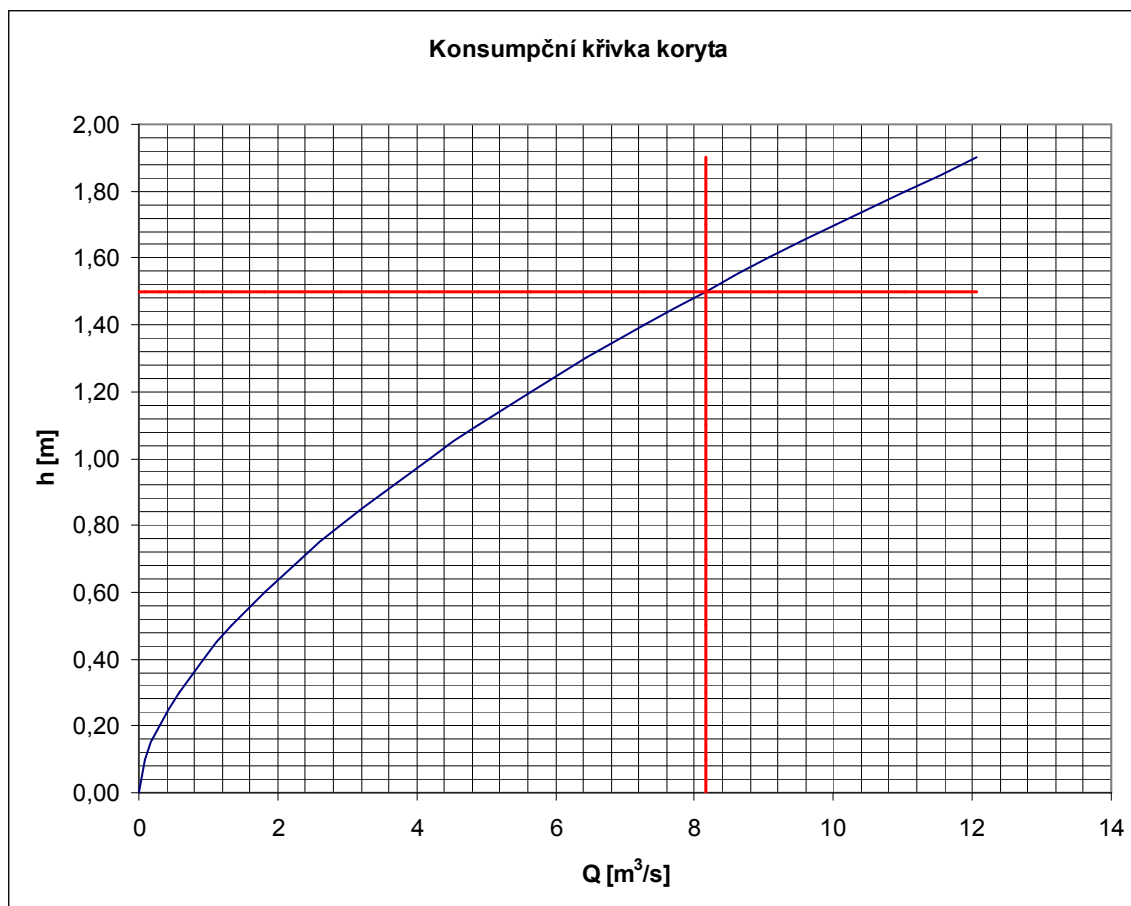
Obr. 5.18 Konsumpční křivka

Při hloubce koryta $h = 0,9$ m rychlosti $v = 0,91$ m/s převede průtok $Q_1 = 9,57$ m³/s

Výpočet konsumpční křivky v profilu 2

h	S	O	R	C	v	Q
[m]	[m ²]	[m]	[m]	[-]	[m/s]	[m ³ /s]
0	0	0	0	0	0	0
0,10	0,607	6,247	0,097	15,066	0,156	0,094
0,20	1,227	6,493	0,189	16,833	0,243	0,298
0,30	1,860	6,740	0,276	17,930	0,312	0,581
0,40	2,506	6,987	0,359	18,732	0,372	0,933
0,50	3,166	7,234	0,438	19,364	0,425	1,345
0,60	3,839	7,480	0,513	19,884	0,472	1,814
0,70	4,526	7,727	0,586	20,327	0,516	2,335
0,80	5,226	7,974	0,655	20,711	0,556	2,906
0,90	5,939	8,221	0,722	21,050	0,593	3,524
1,00	6,665	8,467	0,787	21,353	0,628	4,188
1,10	7,405	8,714	0,850	21,627	0,661	4,896
1,20	8,158	8,961	0,910	21,877	0,692	5,648
1,30	8,924	9,207	0,969	22,107	0,722	6,441
1,40	9,703	9,454	1,026	22,319	0,750	7,277
1,50	10,496	9,701	1,082	22,516	0,777	8,153
1,60	11,302	9,948	1,136	22,700	0,803	9,070
1,70	12,122	10,194	1,189	22,873	0,827	10,028
1,80	12,955	10,441	1,241	23,036	0,851	11,025
1,90	13,801	10,688	1,291	23,189	0,874	12,061

Tabulka 5.13 Výpočet konsumpční křivky v profilu 2



Obr. 5.19 Konsumpční křivka2

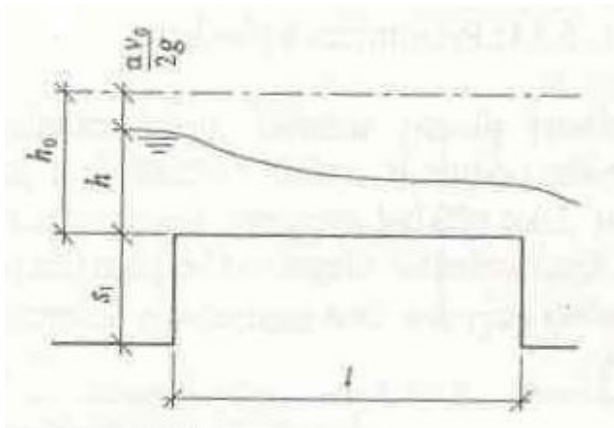
Při hloubce koryta $h = 1,5$ m rychlosti $v = 0,78$ m/s převede průtok $Q_2 = 8,15$ m³/s

Výpočet prokázal nižší kapacitu koryta v profilu 2, které bude bráno jako směrodatné pro posouzení kapacity jezu (při průtocích vyhovujících profilu 1 by pod jezem již docházelo k vylití ze břehů).

Nicméně hodnoty změřené a vypočtené pro profil 1 budou vstupními hodnotami pro výpočet kapacity jezu. Při průtoku $Q_2 = 8,15$ m³/s bude v profilu 1 hladina na 0,82 m (odečteno z konsumpční křivky) a rychlost $v = 0,86$ m/s.

Příčný profil jezu jednoznačně odpovídá jezu se širokou korunou (délka jezu je několikanásobkem výšky jezu – viz. příčný profil jezovým tělesem)

Výpočtové schéma



Obr. 5. 20 Výpočtové schéma

Vztahy a tabulky pro posouzení kapacity jezu :

$$Q = \sigma_z \cdot \sigma_s \cdot m \cdot b_0 \cdot \sqrt{2g} \cdot h_0^{3/2} \quad (5.24)$$

$$b_0 = b - 0,1n \cdot \xi \cdot h_0 \quad (5.25)$$

Posouzení kapacity

Samotný výpočet byl proveden v několika krocích, přičemž uvedený je poslední z nich.

$\sigma_z = 1$	součinitel vlivu zatopení
$\sigma_s = 0,85$	součinitel vlivu půdorysné šikmosti jezu
$b_0 = 13,945$	účinná šířka jezu (po odečtení boční kontrakce)
$h = 0,55$	přepadová výška
$m = 0,35$	součinitel přepadu pro jezy s širokou korunou (zaoblený nátok)
$k = 0,038$	rychlostní výška
$h_0 = 0,588$	energetická přepadová výška ($h + k$)
$Q_1 = 8,28 \text{ m}^3/\text{s}$	$Q_2 = 8,15 \text{ m}^3/\text{s}$

Navržený jez bezpečně převede návrhový průtok. Kapacita jezového tělesa je vyšší (nebyla využita celá konstrukční výška jezu), ale při vyšších průtocích by pod jezem docházelo k vylití toku z koryta.

6 EKONOMIKA PROVOZU MVE NEDOŠÍN 1

6.1 Náklady MVE Nedošín 1

Tato kapitola uvádí náklady na vybudování MVE Nedošín 1. Ceny byly získány na základě poptávky u výrobců s výjimkou položek označených “*”. Ty jsou kvalifikovaným odhadem.

6.1.1 Stavební úpravy v místě MVE

Položka	Cena (Kč)
Úpravy dna (podjezí+nadjezí)	193 800
Opevnění břehů (podjezí+nadjezí)	105 750
Zemní práce na úpravě břehu (nadjezí)	45 200
Konstrukce uložení soustrojí*	15 000
Zastřešení soustrojí*	10 000
Vybudování jímek pro savku	78 000
Vakové vzdouvací zařízení*	120 000
Česle *	10 000
Celkem:	469 750

Tabulka 6.1 Stavební úpravy

V následující tabulce jsou rozepsány nejdůležitější položky z předchozí tabulky stavebních úprav MVE Nedošín 1.

Položka	Jednotková cena práce	Rozsah u MVE Nedošín 1	Cena celkem (Kč)
Úpravy dna (podjezí+nadjezí)- podkladní beton + dlažba	300+875 Kč/m ²	75+90 m ²	193 800
Opevnění břehů (podjezí+nadjezí)- podkladní beton + dlažba	300+875 Kč/m ²	40+50 m ²	105 750
Zemní práce na úpravě břehu (nadjezí)- odtěžení zeminy třídy 3+ odvoz zeminy do vzd. 10 km+ uložení na skládku	143+260+cca100 (dle lokality) Kč/m ³	90 m ³	45 200
Vybudování jímek pro savku-betonové konstrukce z vodostavebního betonu tř. B30	13 000 Kč/m ³	6 m ³	78 000

Tabulka 6.2 Nejdůležitější položky ze stavebních nákladů

6.1.2 Strojní část

Položka	Cena (Kč)
Vírová turbína*	200 000
Vstupní potrubí turbíny + savka turbíny*	30 000
Řemeny převodu *	4 000
Celkem:	234 000

Tabulka 6.3 Strojní část

6.1.3 Elektrická část

Položka	Cena (Kč)
Elektrický generátor	8 000
Regulátor jaloviny	3 200
Kompenzační kondenzátory	3 000
Ochrany + měření*	15 000
Rozvaděče*	15 000
Kabeláž *	7 000
Celkem:	51 200

Tabulka 6.4 Elektrická část

6.1.4 Roční provozní náklady

Položka	Cena (Kč)
Maziva	1 900
Náhradní díly	3 000
Mzdy	7 200
Celkem:	12 100

Tabulka 6.5 Provozní náklady

6.1.5 Celkové náklady na vybudování MVE Nedošín 1

Položka	Cena (Kč)
Stavební úpravy v místě MVE	469 750
Strojní část	234 000
Elektrická část	51 200
Celkem:	754 950

Tabulka 6.6 Celkové náklady na vybudování MVE Nedošín

6.2 Ceny a daňová zvýhodnění

6.2.1 Ceny elektrické energie

Výkupní ceny se uplatňují za elektřinu dodanou a naměřenou v předávacím místě výroby elektřiny a sítě provozovatele příslušné distribuční soustavy nebo provozovatele přenosové soustavy.

Zelené bonusy se uplatňují taktéž za elektřinu dodanou a naměřenou v předávacím místě výroby elektřiny a sítě provozovatele regionální distribuční soustavy nebo přenosové soustavy.

Datum uvedení do provozu	Výkupní ceny elektřiny dodané do sítě v Kč/MWh	Zelené bonusy v Kčd/MWh
Malá vodní elektrárna uvedená do provozu v nových lokalitách po 1. lednu 2008 včetně	2600	1400
Malá vodní elektrárna uvedená do provozu v nových lokalitách od 1. ledna 2006 do 31. prosince 2007	2450	1250
Malá vodní elektrárna uvedená do provozu po 1. lednu 2005 včetně a rekonstruovaná malá vodní elektrárna	2220	1020
Malá vodní elektrárna uvedená do provozu před 1. lednem 2005	1730	530

Tabulka 6.7 Výkupní ceny + Zelené bonusy

Malou vodní elektrárnou se rozumí vodní elektrárna s instalovaným výkonem do 10 MW_e včetně.

Ceny za energii dodanou MVE Nedošín 1 ČEZ Distribuci:

MVE Nedošín 1 bude uvedena do provozu po 1. lednu 2008. Jelikož je energie z vody obnovitelným zdrojem, připočte se k základní ceně zelený bonus. Z toho plyne výkupní cena za elektrickou energii vyrobenou v MVE Nedošín 1: 4000Kč/MWh.

6.2.2 Daňové podmínky pro MVE

Při stavbě MVE nebo rekonstrukci MVE, na kterou je stavebním úřadem vydáno stavební povolení, je dnem kolaudace majitel MVE oproštěn od odvádění daně z příjmu na dobu 5-ti let. V dalších letech podléhá zisk 15% dani.

6.3 Hodnocení investic

6.3.1 Výnos MVE Nedošín 1

Vyrobená energie bez regulace průtoku:

Výnos MVE Nedošín 1 je dán pokrytí odtokové křivky. Uvažujeme využití 160 denního průtoku $Q_{160}=0,58\text{m}^3/\text{s}$.

Při výpočtu výnosu se vychází z vyrobené energie během 1 roku. Počet provozních hodin při uvažování 160 provozních dnů je $160 \cdot 24 = 3840$ hod. Vyrobená energie se vypočítá dle následujícího vztahu:

$$E_{160} = P_{el:0,58} \cdot t = 5,254 \cdot 160 \cdot 24 = \underline{20175,0\text{kWh}} \quad (6.1)$$

Vyrobená energie s regulací průtoku:

Oproti předchozímu odstavci při regulaci počítáme i s průtoky v rozsahu $Q_{reg.}=0,53-0,62\text{m}^3/\text{s}$. Tím dosáhneme většího výnosu (na straně druhé zvýšení nákladů). Pokrytím nižších průtoků oproti 160 dennímu docílíme běh elektrárny během 172dnů roku.

Vyrobenou energii během 1 roku při provedení regulace na MVE Nedošín 1 spočítáme obdobně jako v předchozím případě. Pouze přidáme výpočet energie získané regulací. Výsledná energie se poté spočte jako součet jednotlivých dílčích výkonů (obdélníků z pokrytí odtokové křivky):

$$E_{172} = E_{0,53-0,62} = E_{0,53-0,57} + E_{0,58} + E_{0,59-0,62} \quad (6.2)$$

$$E_{0,53-0,57} = P_{el:0,53-0,57} \cdot t = 3,787 \cdot (12 \cdot 24) = \underline{1090,0\text{kWh}} \quad (6.3)$$

$$E_{0,58} = P_{el:0,58} \cdot t = 5,254 \cdot (160 \cdot 24) = \underline{20175,0\text{kWh}}$$

$$E_{0,59-0,62} = (P_{el:0,62} \cdot t) - (P_{el:0,58}^{148} \cdot t) = (6,630 \cdot 148 \cdot 24) - (5,254 \cdot 148 \cdot 24) = \underline{4887,0\text{kWh}} \quad (6.4)$$

Vyrobená energie během 1 roku – výnosy

	Vyrobená energie [kWh]	Jednotková cena [Kč/kWh]	Výnos [Kč]
MVE bez regulace průtoku	20 175	4	80 700
MVE s regulací průtoku	26 152	4	104 608

Tabulka 6.8 Vyrobená energie za 1 rok

6.3.2 Metody hodnocení investic

Vstupní hodnoty	
Investiční náklady	754 950Kč
Provozní náklady	12 100Kč
Životnost	25 let
Požadovaná výnosnost	7 %/rok
Daň z příjmu	15 %
Vyrobená energie za 1 rok	26 152 kWh
Výkupní cena	4 Kč/kWh
Průměrná roční inflace i_{inf}	2,5 %

Tabulka 6.9 Vstupní hodnoty

Zpracování číselných údajů

- **Odpisy O**

$$O = N / s = 754950 / 25 = 30198 \text{ Kč / rok} \quad (6.5)$$

N – celkové investiční náklady (Kč)

s – délka odpisovaného období (roky)

- **Hrubý zisk Z_h** je částka, z které se odečítají daně. Takto vypočítaný hrubý zisk je základem pro výpočet daní.

$$Z_h = T_r - N_p \cdot i_{inf} \quad \text{pro prvních 5 let} \quad (6.6)$$

$$Z_h = T_r - N_p \cdot i_{inf} - O \quad \text{pro 6. – 20. rok}$$

- **Čistý zisk Z_c** je hrubý zisk po odečtení daní

$$Z_c = Z_h - (Z_h \cdot d) \quad (6.7)$$

- **Tok hotovosti (Cash flow) T_h (Kč)**

$$T_h = T_r - N_p \cdot i_{inf} - D \quad (6.8)$$

- **Kumulativní tok hotovosti KT_h (Kč)** = CF. kum. = kumulované cash flow. Kumulovaný výsledek toku hotovosti k posuzovanému roku - je to tedy průběžný součet všech toků hotovosti od nultého roku do daného roku.

$$KT_{h1} = -N_v + T_{h1} = -754950 + 92508 = -662442 \text{ Kč pro 1. rok} \quad (6.8)$$

$$KT_{h2} = -N_v + T_{h2} = -662442 + 92205 = -570237 \text{ Kč}$$

Rok hospodaření	Roční tržby T_r (Kč/rok)	Roční provozní náklady N_p (Kč/rok)	Odpisy (Kč/rok)	Hrubý zisk (Kč/rok)	Daň z příjmu (15 %); (Kč)	Čistý zisk ($Z_č$); (Kč/rok)	Tok hotovosti T_h – Cash flow (Kč)	Kumulovaný tok hotovosti KT_h	Čistý Cash flow	Kumulovaný čistý Cash flow
1.	104 608	12 100	0	92 508	0	92 508	92 508	- 662 442	86 456	-668 494
2.	104 608	12 403	0	92 205	0	92 205	92 205	- 570 237	80 535	-587 959
3.	104 608	12 713	0	91 895	0	91 895	91 895	- 478 342	75 014	-512 945
4.	104 608	13 030	0	91 578	0	91 578	91 578	-386 764	69 864	-443 081
5.	104 608	13 356	0	91 252	0	91 252	91 252	-295 512	65 061	-378 020
6.	104 608	13 690	50 330	40 588	6 088	34 500	84 830	-211 182	56 526	-321 494
7.	104 608	14 032	50 330	40 246	6 037	34 209	84 539	-126 643	52 647	-268 847
8.	104 608	14 383	50 330	39 895	5 984	34 061	84 241	-42 402	49 029	-219 818
9.	104 608	14 743	50 330	39 535	5 930	33 605	83 935	41 533	45 655	-174 163
10.	104 608	15 111	50 330	39 167	5 875	33 292	83 622	125 155	42 509	- 131 654
11.	104 608	15 488	50 330	38 790	5 818	32 972	83 302	208 457	39 576	- 92 078
12.	104 608	15 876	50 330	38 402	5 760	32 642	82 972	291429	36 841	-55 237
13.	104 608	16 273	50 330	38 005	5 701	32 304	82 634	374 063	34 290	-20 947
14.	104 608	16 679	50 330	37 599	5 640	31 959	82 289	456 352	31 913	10 966
15.	104 608	17 099	50 330	37 181	5 577	31 604	81 934	538 286	29 697	40 663
16.	104 608	17 524	50 330	36 754	5 513	31 241	81 571	619 857	27 631	68 294
17.	104 608	17 962	50 330	36 316	5 492	30 824	81 154	701 011	25 691	93 985
18.	104 608	18 411	50 330	35 867	5 380	30 487	80 817	781 828	23 910	117 895
19.	104 608	18 872	50 330	35 406	5 310	30 096	80 426	862 074	22 238	140 133
20.	104 608	19 343	50 330	34 935	5 240	29 695	80 025	942 099	20 679	160 812
21.	104 608	19 827	0	84 781	12 717	72 064	72 064	1 014 163	17 404	178 216
22.	104 608	20 323	0	84 285	12 642	71 643	71 643	1 085 806	16 170	194 386
23.	104 608	20 831	0	83 777	12 566	71 211	71 211	1 157 017	15 021	209 407
24.	104 608	21 351	0	83 257	12 488	70 769	70 769	1 227 786	13 951	223 358
25.	104 608	21 885	0	82 723	12 408	70 315	70 315	1 298 101	12 955	236 313

Tabulka 6.10 Přehled číselných údajů

Metoda čisté současné hodnoty

Čistá hodnota investice $\check{C}SHI$ představuje rozdíl mezi současnou hodnotou očekávaných výnosů (Cash flow) a nákladů na investici. Aby se investice vyplatila, $\check{C}SHI$ musí být kladná.

$$\check{C}SHI = \sum_{j=1}^n \frac{CF_j}{(1+i)^j} - IN \quad (6.9)$$

$\check{C}SHI$ čistá současná hodnota

n doba životnosti

CF peněžní příjem z investice v j tém roce její životnosti

i požadovaná minimální výnosnost, kterou investice musí zajistit (diskontní sazba)

IN pořizovací náklady

$$\check{C}SHI = 991\,263 - 754\,950 = 236\,313 \text{ Kč}$$

Metoda indexu ziskovosti

$$PI = \frac{\sum_{j=1}^n \frac{CF_j}{(1+i)^j}}{IN} = \frac{991\,263}{754\,950} = 1,3 \quad (6.10)$$

Posuzování efektivnosti projektu

$PI > 1$ projekt je považován za efektivní

$PI < 1$ projekt je považován za neefektivní

$1,3 > 1 \longrightarrow$ projekt je považován za efektivní

Metoda vnitřního výnosového procenta

Je rovněž založena na koncepci současné hodnoty. Aby se investice vyplatila, VVP musí být větší než diskontní sazba. Pro stanovení vnitřního výnosového procenta byly zvoleny dvě sazby 10% a 11%, pro které byly spočítány čisté současné hodnoty.

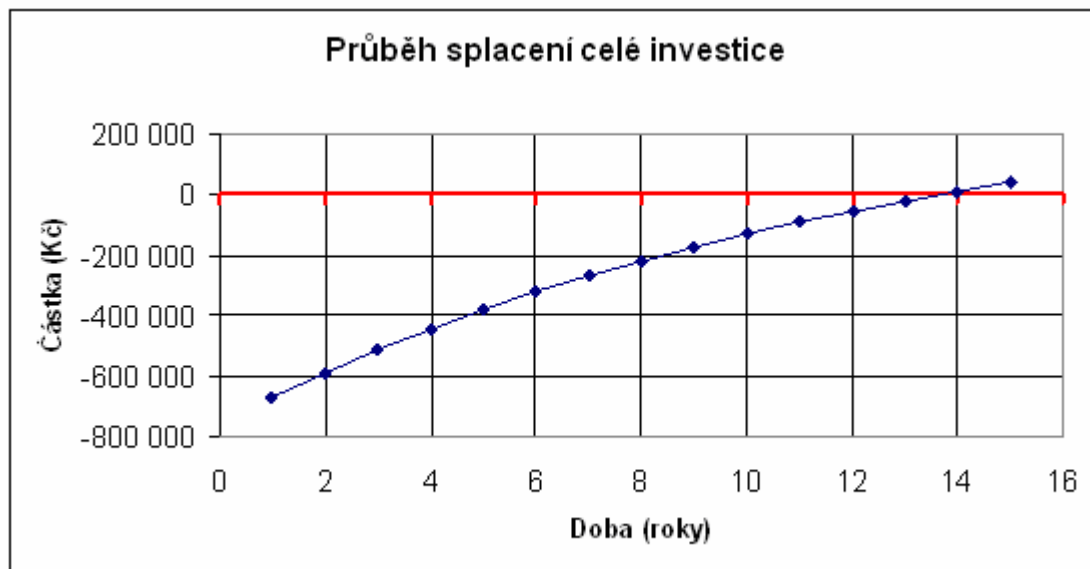
Pro přesnější výpočet byla použita interpolace:

$$VVP = p_1 + \frac{\sum \check{C}SHI_1}{\sum \check{C}SHI_1 - \sum \check{C}SHI_2} \cdot (p_2 - p_1) = 10 + \frac{26412}{26412 - (-27415)} \cdot (11 - 10) = 10,49 \% \quad (6.11)$$

Doba splacení investice

Metoda pracující s diskontovanými hodnotami. Výnosy jsou diskontovány procentem nákladů na projekt nebo požadovanou výnosností investic.

Z předcházející tabulky je zřejmé, že ke splacení investice dojde ve 14. roce.



Obr. 6.1 Průběh splacení celé investice

7 ZÁVĚR

Hlavním výsledkem této bakalářské práce je nalezení možného řešení pro využití hydroenergetického potenciálu řeky Loučné v místě jezu v obci Nedošín. Jez je tvořen jezovým tělesem a štěrkovou propustí. Místo zamýšlené MVE nikdy v minulosti nebylo využíváno k zisku energie (mlýn, pila, hamry). Pro umožnění instalace MVE na tomto jezu bylo nutno vyřešit několik problémů týkajících se zejména navýšení spádu a zachování propustnosti jezu.

Lokalita svými podmínkami není místem přímo vyzývajícím k vybudování malé vodní elektrárny. Nevelký průtok ($0,2-1,4\text{m}^3/\text{s}$) ve spojení s malým spádem (původní stav- $H=1\text{m}$) vypovídají o málo výhodném potenciálu pro získávání energie na tomto místě. O to větší výzvu pro nás bylo pokusit se najít funkční řešení. Jelikož se lokalita nachází v centru obce Nedošín nebylo možné uvažovat extrémní navyšování spádu.

Před započítáním hledání vhodného vodního motoru byla uvážena možnost navýšení energetického potenciálu lokality. Vzhledem k podmínkám v místě byla od začátku uvažována říční elektrárna bez akumulace vody. Průtok je dán meteorologickými podmínkami (odtoková křivka jezu). Jediné, čím jako projektanti můžeme zlepšit potenciál lokality, je navýšení spádu. Navýšení spádu bylo navrženo pomocí vakového vzdouvacího zařízení.

Při takto malém potenciálu bylo zřejmé, že je zapotřebí, aby se vynaložená investice pohybovala v rozumných mezích. Při pominutí možnosti použití vodního kola (malá účinnost) bylo rozhodnuto o instalaci MVE v násoskovém provedení, které vyžaduje minimální stavební změny. Z možných turbín byla zvolena jako nejvýhodnější řešení turbína vírová. Vírová turbína je konstrukčně koncipována na využívání malých potenciálů. Je velice vhodná nejen technickým řešením ale díky jednoduchosti také ekonomicky. Jediná možnost regulace vírové turbíny v našem koncepčním řešení (násoskové provedení) je změnou spádu. Regulace je realizována pohybem vakové části jezu.

Jako vhodný elektrický generátor pro naši MVE byl zvolen asynchronní generátor z několika pádných důvodů: -příznivá cena, -jednoduchost zapojení při práci do distribuční sítě, -možnost generatorického i motorického chodu.

Po vyřešení všech komplikací vyskytnutých se během návrhu jsme došli k výslednému technickému řešení: Jezové těleso navýšeno pomocí vakového vzdouvacího zařízení. Štěrková propust plně využita pro instalaci soustrojí v násoskovém provedení. Jako vodní motor použita vírová turbína ($D=0,405\text{m}$). Generátor použit asynchronní.

V poslední části práce – ekonomickém vyhodnocení – jsme ověřili výhodnost a přínos navrženého díla. Při hodnocení jsme vyšli z ročního výnosu $T_r=104\,608\text{Kč}$, provozních nákladů během 1 roku $N_p=12\,100\text{Kč}$ a nákladů vynaložených na výstavbu MVE Nedošín 1 $IN=754\,950\text{Kč}$. Ke zjištění efektivnosti projektu MVE Nedošín 1 byly použity následující metody: metoda pracující s diskontovanými hodnotami, metoda čisté současné hodnoty, metoda indexu ziskovosti, metoda vnitřního výnosového procenta. Pomocí uvedených metod jsme došli k výsledkům: doba splácení celé investice je rovna 14 letům, čistá současná hodnota $\check{C}SHI = 236\,313\text{ Kč}$, index ziskovosti $PI = 1,3$, vnitřní výnosové procento $VVP = 10,49\%$. Všechny vyzískané hodnoty vypovídají o ekonomické výhodnosti projektu.

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] MATOUŠEK, Antonín. *Výroba elektrické energie*. 1. vyd. Brno : Vysoké učení technické, 2007. 138 s. ISBN 978-80-214-3317-5.
- [2] BEDNÁŘ, Josef. *Malé vodní elektrárny 2 : Turbíny*. 1. vyd. Praha : Polygrafia, n. p., 1989. 240 s. ISBN 621.311.21-181.4.
- [3] GABRIEL, Pavel, ČIHÁK, František, KALANDRA, Petr. *Malé vodní elektrárny*. 1. vyd. Praha : Vydavatelství ČVUT, 1998. 321 s. ISBN 80-01-01812-1.
- [4] DUŠIČKA, Peter, et al. *Malé vodní elektrárny*. 1. vyd. Bratislava : Jaga group, v. o. s. , 2003. 175 s. ISBN 80-88905-45-1.
- [5] ZAJDLÍK, Miroslav. *Podmienky vzniku výrobových objektov .Zborník práce študie 102*. 1. vyd. Bratislava : [s.n.], 1981. 40 s.
- [6] NOVÁK, Zdeněk. *Manipulační řád pro vodní dílo na Loučné v Nedošíně*. 1. vyd. Hradec Králové : Povodí Labe státní podnik, 2005. 20 s.
- [7] PROVOZOVATELÉ DISTRIBUČNÍCH SOUSTAV . *Pravidla provozování: Pravidla pro paralelní provoz zdrojů se sítí provozovatele distribuční soustavy*. 1. PŘÍLOHA 4 vyd. Praha : [s.n.], 2006. 48 s.
- [8] *Alternativní zdroje energie* [online]. Actum s. r. o., [2003] [cit. 2008-03-15]. Dostupný z WWW: <<http://www.alternativni-zdroje.cz/obnovitelne-zdroje.htm>>.
- [9] *Centrum pro obnovitelné zdroje a úspory energie* [online]. c2007 [cit. 2008-02-05]. Dostupný z WWW: <<http://www.ekowatt.cz/>>.
- [10] *Abeceda malých vodních pohonů* [online]. c2007 , 02/19/2007 [cit. 2008-03-06]. Dostupný z WWW: <<http://mve.energetika.cz/>>.
- [11] *Hydrohrom : Vodní turbíny* [online]. [2003] [cit. 2008-02-04]. Dostupný z WWW: <<http://www.hydrohrom.cz/>>.
- [12] *Elektromotory SIEMENS* [online]. 2007 [cit. 2007-02-14]. Dostupný z WWW: <<http://www.elektromotory.com/>>.
- [13] *Vynálezy a inovace na Jižní Moravě* [online]. 2006 [cit. 2008-03-20]. Dostupný z WWW: <http://documents.jic.cz/vut2_virova_turbina.pdf>.

PŘÍLOHA A

VUT Brno-FSI, EÚ-OHS V.K.

VUT-EU-QR-15-04

