

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Matematický simulační model malé vodní elektrárny

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Ondřej SUKOVATÝ**
Osobní číslo: **E13B0086P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektrotechnika a energetika**
Název tématu: **Matematický simulační model malé vodní elektrárny**
Zadávací katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Vypracujte rešerši simulačních nástrojů pro matematické modelování fyzikálních procesů.
2. Vytvořte matematický model fyzikálních procesů v malé vodní elektrárně - hydraulická část, elektrická část.
3. Vypracujte na základě matematických modelů a vytvořte simulační model v softwarovém nástroji Dymola.
4. Zpracujte případovou studii.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**

Rozsah kvalifikační práce: **30 - 40 stran**

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

Student si vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího práce.

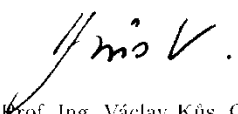
Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Martin Sirový, Ph.D.**
Regionální inovační centrum elektrotechniky

Datum zadání bakalářské práce: **14. října 2016**

Termín odevzdání bakalářské práce: **8. června 2017**


Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.
děkan




Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 14. října 2016

Anotace

Předkládaná bakalářská práce obsahuje řešení simulačního nástroje Simulink a Dymola se zaměřením na Dymolu, v které jsem měl za úkol sestavit simulační model malé vodní elektrárny. Dalším cílem je vytvoření případové studie zvolené malé vodní elektrárny a následně srovnat vypočítané výsledky se simulací.

Klíčová slova

Dymola, malá vodní elektrárna, simulační model, Francisova turbína, asynchronní motor

Abstract

This Bachelor thesis contains the research on the simulation tools Simulink and Dymola, with emphasis on Dymola, which I was tasked to compose simulation model of small water power plant. Next objective of the thesis is creation of the case study of selected small water power plant and compare the computed results with simulation.

Keywords

Dymola, small hydroelectric power plant, simulation model, Francis turbine, asynchronous motor

Prohlášení

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

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

.....
podpis

V Plzni dne 8.6.2017

Ondřej Sukovatý

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce Ing. Martinu Sirovému, Ph.D. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

Obsah

OBSAH	8
ÚVOD	10
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	11
1 REŠERŠE SIMULAČNÍCH NÁSTROJŮ	14
1.1 SIMULINK.....	14
1.1.1 Knihovny nástroje Simulink.....	14
1.1.2 Stavba a úprava modelu.....	14
1.1.3 Procházení modelové hierarchie.....	15
1.1.4 Řídící signály a parametry.....	16
1.1.5 Simulace modelu.....	16
1.1.6 Volba „Solver“.....	16
1.1.7 Spuštění simulace.....	17
1.2 DYMOLA.....	17
1.2.1 Základní manuály.....	18
1.2.2 Vytvoření vlastního modelu.....	18
1.2.3 Vytvoření vlastní knihovny.....	20
1.2.4 Spuštění a možnosti simulace.....	20
1.3 SROVNÁNÍ DYMOLY A SIMULINKU.....	21
2 TEORETICKÝ POPIS MVE	22
2.1 ÚVOD.....	22
2.2 HYDRAULICKÁ ČÁST.....	22
2.2.1 Rozdělení MVE podle využití vodního toku.....	22
2.2.2 Vtokový objekt.....	23
2.2.3 Česle.....	23
2.2.4 Stavidlo.....	23
2.2.5 Přivaděče a odpady.....	24
2.2.6 Provozní objekt.....	24
2.2.7 Francisova turbína.....	24
2.2.8 Převody.....	28
2.3 ELEKTRICKÁ ČÁST.....	28
2.3.1 Asynchronní motor jako generátor.....	28
2.3.2 Kompenzace jalového výkonu.....	34
3 MATEMATICKÝ MODEL MALÉ VODNÍ ELEKTRÁRNY	35
3.1 HYDRAULICKÁ ČÁST.....	35
3.1.1 Návrh parametrů vodního díla.....	35
3.2 ELEKTRICKÁ ČÁST.....	41
3.2.1 Asynchronní generátor.....	41
3.2.2 Kompenzace jalového výkonu.....	42
4 SIMULAČNÍ MODEL V SOFTWARE DYMOLA	43
4.1 HYDRAULICKÁ ČÁST.....	43
4.2 ELEKTRICKÁ ČÁST.....	45
5 PŘÍPADOVÁ STUDIE – MVE HUSINEC	48
5.1 SPECIFIKACE MVE.....	48
5.1.1 Hydraulická část.....	48
5.1.2 Elektrická část.....	52
5.2 ORIENTAČNÍ VÝPOČET ROČNÍ ENERGETICKÉ BILANCE.....	54
5.3 SIMULACE V SW. DYMOLA.....	56
5.3.1 Hydraulická část.....	56

5.3.2	<i>Elektrická část</i>	59
5.3.3	<i>Výsledky simulace</i>	60
6	ZÁVĚR	62
	SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	63

Úvod

Současný trend v energetické politice prosazuje tzv. vyrovnaný "energetický mix" jednotlivých druhů zdrojů energie. Já jsem si pro zpracování bakalářské práce zvolil téma týkající se malé vodní elektrárny, protože se v současné době jako jeden z obnovitelných zdrojů dostává stále více do popředí zájmů. V České republice je k 30. září 2016 v provozu 1614 malých vodních elektráren o celkovém výkonu 348 MW. Jejich vybudování nezasahuje do přírodního profilu tolik jako velká vodní díla, takže vodní potenciál, který lze v České republice ještě využít, je soustředěn právě na malé vodní toky. Jejich další výhodou je vybudování v již existujících objektech, např. v bývalých mlýnech, pilách či hamrech. Další předností vodních elektráren je rychlé najetí na plný výkon a jejich dobrá regulovatelnost, což je výhodné řešení pro regulaci elektrizační sítě.

Jednou z hlavních částí této práce bylo seznámení se simulačním nástrojem fyzikálních procesů Dymola, který není zatím příliš rozšířený i přes jeho značné možnosti a aplikaci. V tomto programu vytvořit simulační model hlavních částí vodního díla na základě zvolené lokality. Dále má obsahovat sestavení matematického modelu těchto částí malé vodní elektrárny, který má být následně aplikován v podobě případové studie na zvolenou lokalitu. Závěrem práce by mělo být srovnání výsledků dosažených z případové studie s výsledky získanými ze simulace.

Předkládaná bakalářská práce je rozdělena do čtyř částí. První obsahuje rešerši simulačních nástrojů Dymoly a Simulinku se zaměřením na Dymolu, v které jsem měl za úkol sestavit simulační model malé vodní elektrárny a popsat její prostředí. Dalším cílem práce je vytvořit a srovnat výsledky případové studie a simulačního modelu zvolené malé vodní elektrárny Šebelova mlýna v obci Husinec u Prachatic. Druhá kapitola obsahuje teoretický popis hlavních částí malé vodní elektrárny. Ve třetí kapitole je matematický model, který všechny tyto části definuje. Ve čtvrté kapitole je popsáno sestavení simulačních modelů turbíny a asynchronního motoru, který je použitý jako generátor. Obě tyto části jsou následně v případové studii otestovány nejdříve samostatně a následně spojeny do celkového modelu.

Seznam symbolů a zkratk

α	Úhel roviny česlí od vodorovné roviny [°]
α_0	Udává Coriolisovo číslo v profilu 0 [-]
α_2	Udává Coriolisovo číslo v profilu 2 [-]
β	Ztrátový činitel obtékání česlic [-]
γ	Maximální úhel lopatek rozvaděče [°]
δ	Vstupní úhel oběžných lopatek [°]
η	Účinnost [-]
η_c	Celková účinnost [-]
η_t	Účinnost turbíny [-]
η_g	Účinnost generátoru [-]
$\eta_{př}$	Účinnost převodu [-]
ρ_v	Hustota vody [kg/m ³]
ω	Jmenovitá úhlová rychlost [rad/s]
$\omega_{corrected}$	Korekční úhlová rychlost [rad/s]
ω_1	Úhlová rychlost statoru [rad/s]
ω_2	Úhlová rychlost rotoru [rad/s]
b_ζ	Světlá vzdálenost mezi česlicemi [m]
C	Kapacita kondenzátoru [μF]
$\cos\varphi$	Účinník [-]
$\cos\varphi_k$	Kompenzační účinník [-]
D	Průměr oběžného kola [m]
F_1	Průtoková plocha řeky uvažované oblasti [m ²]
F_M	Průtoková plocha řeky v místě měření [m ²]
f	Frekvence [Hz]
g	Tíhové zrychlení [m/s ²]
H	Čistý spád [m]
H_b	Hrubý spád [m]
h_{v0}	Kinetická energie vstupující do přivaděče [m]
h_{v2}	Kinetická energie vystupující z turbíny [m]
$h_{z0,1}$	Hydraulické ztráty v přivaděči mezi profily 0 a 1 [m]
h_{zc}	Hydraulické ztráty v hrubých česlech [m]
I_n	Jmenovité proud [A]

I_1	Proud primárního vinutí [A]
I_2	Proud sekundárního vinutí [A]
I'_2	Převodní proud sekundárního vinutí [A]
I_{FE}	Proud vlivem vířivých proudů a hysterezí [A]
I_μ	Magnetizační proud [A]
I_0	Celkový proud paralelní větví [A]
I_m	Proud vinutí motoru [A]
k_δ	Koeficient zahrnující šikmost obtékání česlí [-]
k_p	Koeficient vyjadřující vliv podpěr česlí [-]
M_N	Jmenovitý moment [N.m]
m_1	Počet fází statorového vinutí [-]
n	Jmenovité otáčky [ot/min]
n_s	Specifické otáčky (měrné otáčky) [min^{-1}]
n_g	Jmenovité otáčky generátoru [ot/min]
n_t	Jmenovité otáčky turbíny [ot/min]
P_n	Jmenovitý výkon [W]
P_p	Činný příkon [W]
P_{hod}	Činný výkon za hodinu [kWh]
P_{den}	Činný výkon za den [kWh]
$P_{prosinec}$	Činný výkon za měsíc prosinec [kWh]
$P_{leden,srpen}$	Činný výkon za měsíce leden a srpen [kWh]
$P_{září}$	Činný výkon za měsíc září [kWh]
$P_{8mēs.}$	Činný výkon za 8 měsíců, kdy je dostatečný průtok [kWh]
P_{rok}	Činný výkon za rok [kWh]
P_δ	Celkové ztráty [W]
P_μ	Magnetizační ztráty [W]
$P_{\check{r}}$	Poměrný převod [-]
ΔP_{j2}	Joulové ztráty v rotoru [W]
p	Počet pólových dvojic [-]
p_H	Hydrostatický tlak [Pa]
Q	Průtok [m^3/s]
Q_c	Jalový výkon pro kompenzaci [VAr]

$Q_{corrected}$	Korekční průtok [$\text{kg/s} \cdot \sqrt{K/\text{Pa}}$]
Q_{dov}	Jalový výkon, který můžeme odebírat ze sítě [VAr]
Q_{gen}	Jalový výkon generátoru [VAr]
Q_l	Průtok uvažovanou lokalitou [m^3/s]
Q_m	Jalový výkon motoru [VAr]
Q_n	Návrhový průtok [m^3/s]
Q_{90d}	Dosažený průtok 90 dnů v roce [m^3/s]
Q_{120d}	Dosažený průtok 120 dnů v roce [m^3/s]
R_1	Činný odpor primárního vinutí [Ω]
R_2	Činný odpor sekundárního vinutí [Ω]
R_{FE}	Ztráty vlivem vířivých proudů a hysterezí [Ω]
R'_2	Převodní činný odpor rotoru [Ω]
$R_{21} \cdot \frac{1-s}{s}$	Proměnný činný odpor rotoru v závislost na skluzu [Ω]
S	Vnější průměr česlic [m]
S_m	Zdánlivý výkon motoru [VA]
s	Skluz [-]
U_1	Vstupní napětí [V]
U_2	Výstupní napětí [V]
U_n	Jmenovité napětí [V]
U_{i1}	Indukované napětí primárního vinutí [V]
U_{i2}	Indukované napětí sekundárního vinutí [V]
U_{i20}	Indukované napětí do stojícího a rozpojeného rotoru [V]
U	Jmenovité napětí [V]
U_s	Sdružené napětí [V]
U_{i1}	Indukované napětí primárního vinutí [V]
U_{i2}	Indukované napětí sekundárního vinutí [V]
U_{20}	Indukované napětí do stojícího a rozpojeného rotoru [V]
v_0	Střední rychlost proudění v profilu hrubých česlí [m/s]
$jX_{1\sigma}$	Rozptylová reaktance primárního vinutí [Ω]
$jX_{2\sigma}$	Rozptylová reaktance sekundárního vinutí [Ω]
jX_{1h}	Reaktance primárního vinutí [Ω]
jX_{2h}	Reaktance sekundárního vinutí [Ω]
X_μ	Magnetizační reaktance [Ω]

1 Rešerše simulačních nástrojů

1.1 Simulink

Simulink poskytuje sadu předdefinovaných bloků, které se mohou vzájemně kombinovat a vytvořit tak detailní blokové schéma vašeho systému. Dále poskytuje nástroje pro hierarchické modelování, správu dat a subsystémy přizpůsobení, které vám umožní reprezentovat i ten nejsložitější systém stručně a přesně. [1]

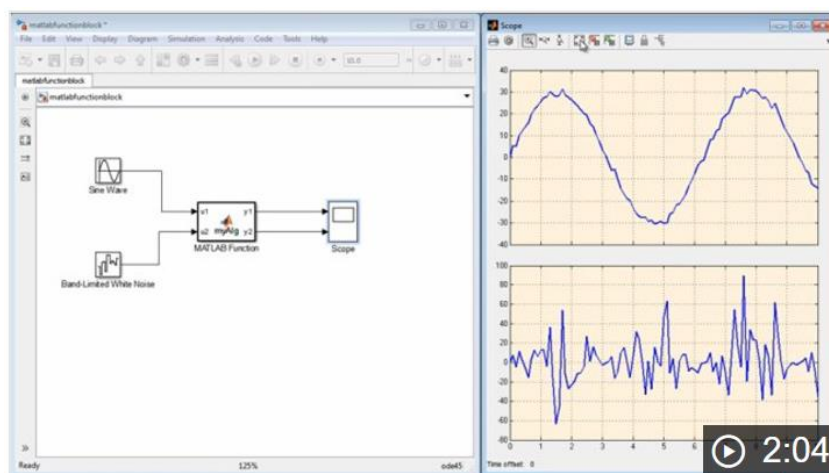
1.1.1 Knihovny nástroje Simulink

- Spojité a diskrétní dynamické bloky, jako jsou integrační a zpožďovací bloky
- Algoritmické bloky jako je součet, součin, a vyhledávací tabulku
- Strukturální bloky, jako jsou hradla, přepínače a sběrníkové selektory [1]

Lze si vytvořit vlastní model pomocí těchto bloků nebo si ručně napsat vlastní model pomocí MATLAB, C, Fortran nebo Ada kódu. [1]

Vlastní bloky mohou být uloženy do vámi vytvořených knihoven v prohlížeči „Simulink Library“. [1]

Doplňkové produkty Simulinku umožňují zahrnout specializované komponenty pro vzdušný prostor, komunikaci, řízení PID regulátorů, řídicí logiky, zpracování signálů, obrazu a další aplikace. Doplnkové produkty jsou k dispozici také pro modelování fyzikálních systémů s mechanickými, elektrickými a hydraulickými komponenty. [1]



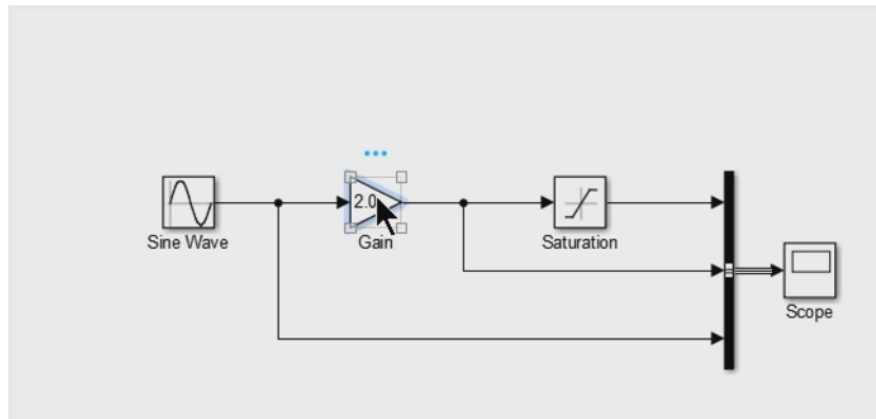
Obr. 1 Náhled simulace a zobrazení v osciloskopu[1]

1.1.2 Stavba a úprava modelu

Model se se tvoří přetažením bloků z okna „Simulink library“ do editoru Simulinku. Potom lze spojit tyto bloky pomocí signálních čar a navázat matematické vztahy mezi systémovými komponenty. Jsou k dispozici grafické nástroje pro formátování,

jako je inteligentní průvodce a inteligentní směrování signálů, které pomohou řídit vzhled modelu a postup sestavení. Může být přidána hierarchii zapouzdřené skupiny bloků a signálů jako subsystém v jediném bloku. [1]

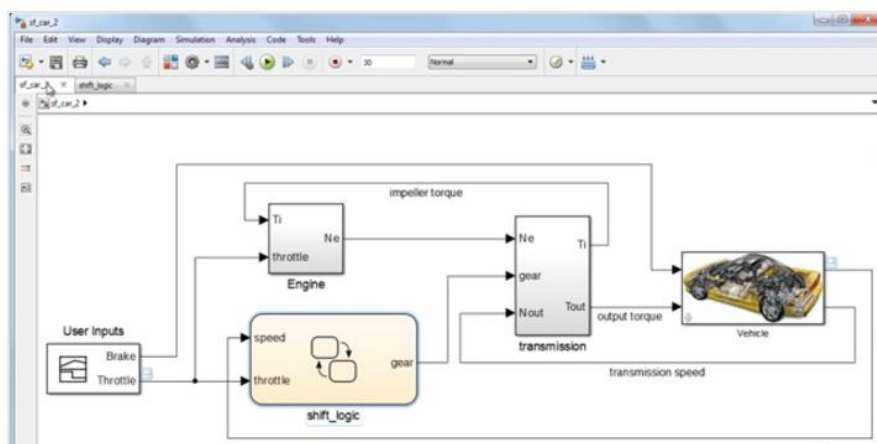
Editor Simulinku vám dává naprostou kontrolu nad tím, co vidíte a používáte v rámci modelu. Například můžete přidat příkazy a podnabídky do editoru a kontextových nabídek. Můžete přidat i vlastní rozhraní k subsystému nebo modelu pomocí masky, která skryje obsah subsystému a poskytne subsystém s vlastní dialogovou ikonou parametrů. [1]



Obr.2 Možnosti úpravy a otevření bloků[1]

1.1.3 Procházení modelové hierarchie

Okno prohlížeče a model „Browser“ v Simulinku pomáhá k orientaci v modelu. V okně prohlížeče se udává úroveň hierarchie, která jsou v současné době prohlížena a umožňuje pohybovat se nahoru a dolů v hierarchii. Model „Browser“ poskytuje kompletní zobrazení hierarchického stromu modelu a stejně jako v okně prohlížeče mohou být použity úrovně hierarchie pro procházení. [1]



Obr.3 Zobrazení celé hierarchie[1]

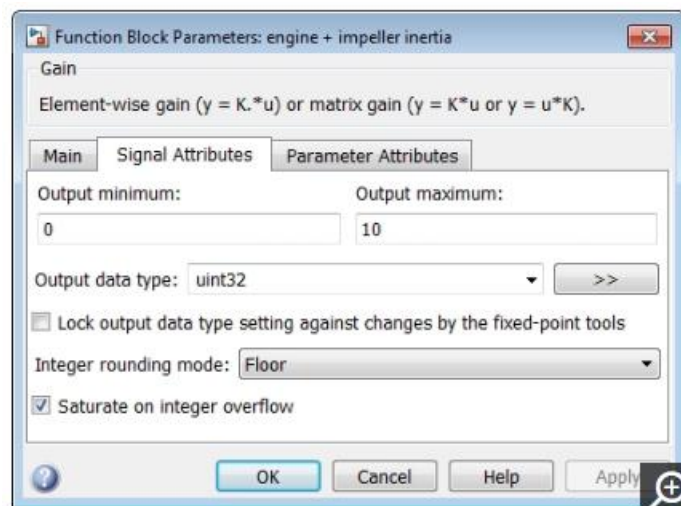
1.1.4 Řídící signály a parametry

Modely Simulinku obsahují signály a parametry. Signály jsou časově proměnné údaje představované linií spojovacích bloků. Parametry jsou koeficienty, které definují dynamiku a chování systému. [1]

Simulink pomáhá určit následující signály a atributy parametrů:

- Jednoduchá data, dvojitá data, spojitá nebo nespojitá 8-, 16- nebo 32-bitová celá čísla
- Veličiny-skalární, vektorové, matice, N-D, nebo pole proměnlivé velikosti
- Skutečné nebo komplexní hodnoty
- Minimální a maximální rozsah, počáteční hodnota a fyzikální jednotky [1]

Tyto signály a parametry atributů mohou být specifikovány v rámci modelu nebo v samostatném datovém slovníku. Potom můžete použít funkci „Organize“, s kterou lze zobrazovat, upravovat a přidávat data bez procházení celého modelu. [1]



Obr.4 Funkce „Organize“ [1]

1.1.5 Simulace modelu

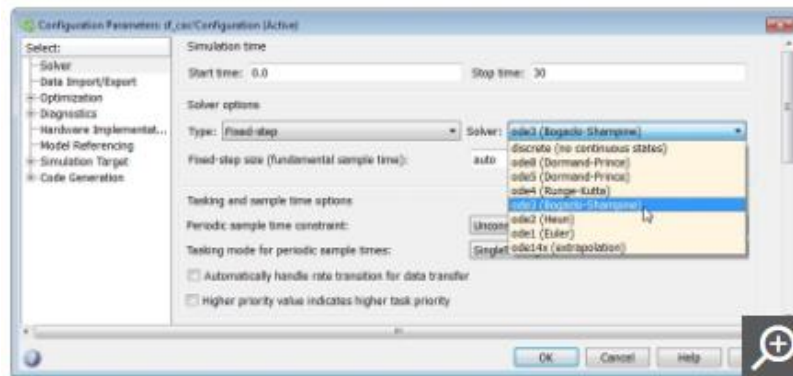
Můžete simulovat dynamické chování systému a zobrazit výsledky průběhu simulace. Aby byla zajištěna rychlost simulace a přesnost, poskytuje Simulink pevně daný krok, variabilní krok pomocí řešitelů, grafických debugger a funkce „Profiler“. [1]

1.1.6 Volba „Solver“

„Solver“ jsou numerické integrační algoritmy, které počítají dynamiku systému v průběhu času pomocí informace obsažené v modelu. Simulink poskytuje „Solver“ podporující simulace široké škály systémů včetně spojitých (analogových), dále s

diskrétním časem (digitální), hybridní (smíšené-signály) a vícerychlostních systémů libovolné velikosti. [1]

Mohou simulovat i pozastavené systémy. Můžete určit možnosti simulace včetně druhu a vlastností integračního algoritmu, simulační časy start a stop, a zda se má vložit nebo uložit simulace dat. Můžete také nastavit optimalizaci a diagnostické informace. Různé kombinace možností mohou být uloženy s modelem. [1]



Obr.5 Náhled výběru pro algoritmy „Solver“ [1]

1.1.7 Spuštění simulace

Můžete spustit simulaci interaktivně ze Simulink editoru nebo systematicky z příkazové řádky MATLABu. Jsou k dispozici následující režimy simulace:

- „Normal“ (výchozí), který interpretačně simulujete svůj model
- „Accelerator“, který zvyšuje výkon simulace provedením kompilace na výsledný kód a dále poskytuje flexibilitu při změně parametrů modelu v průběhu simulace
- „Rapid Accelerator“, které mohou simulovat modely rychleji režimem „Accelerator“ který vytvoří spustitelný soubor, který lze spustit mimo Simulink na druhém operačním jádře [1]

Chcete-li snížit čas potřebný pro spuštění více simulací najednou, můžete spustit tyto simulace na počítači s více jádry souběžně.[1]

1.2 Dymola

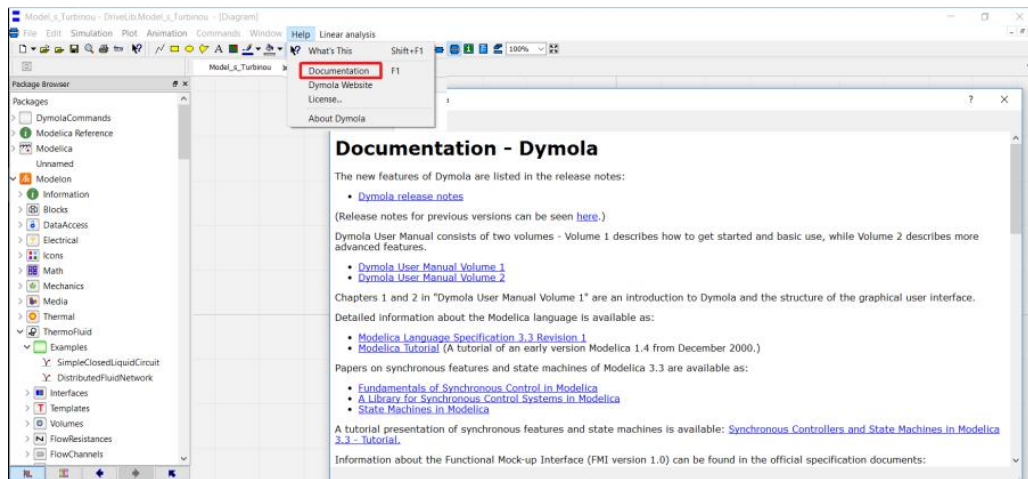
Prostředí Dymola používá otevřený modelovací jazyk Modelica, což znamená, že uživatelé si mohou vytvořit svůj vlastní model knihovny nebo upravit hotové vzorové knihovny podle každého uživatele na podobu, kterou potřebuje a rychleji se v ní orientuje. Představuje univerzální flexibilní nástroj, který je ideální pro modelování a simulaci nových alternativních konstrukcí a technologií.

Tvoří základní technologie pro dynamické modelování „Catia 3D experience.“ [2]

Dále umožňuje vytvoření vlastních knihoven a zároveň obsahuje základní knihovnu, kde lze najít komponenty pro prvky mechanické, elektrické, pneumatické, hydraulické, logické, ale také příklady základních funkčních simulací, které je možné, po duplikování do vlastní knihovny, následně upravovat díky struktuře modelů. [2]

1.2.1 Základní manuály

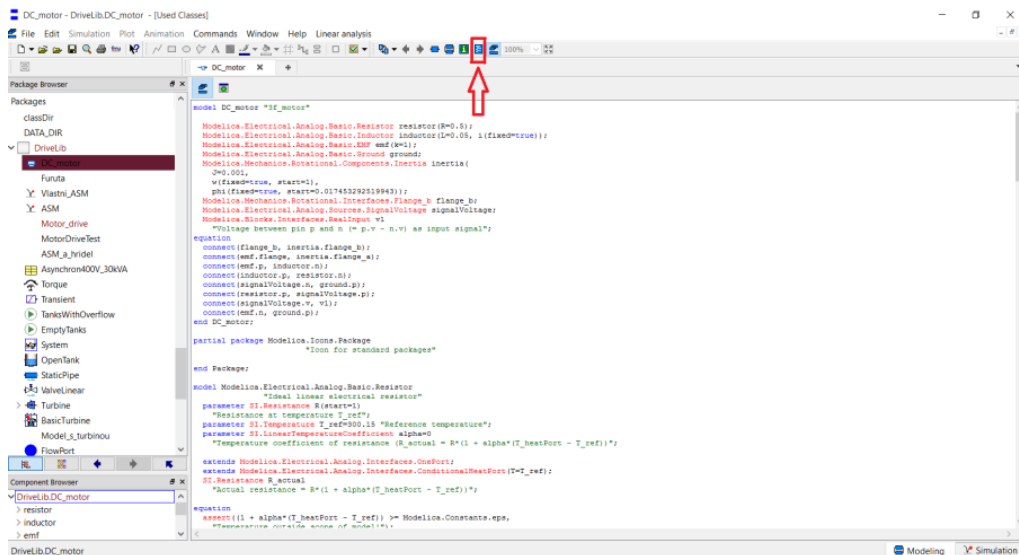
Dymola obsahuje dokumentaci, kde najdete dvě kapitoly uživatelské příručky. První kapitolu tvoří například popis: jak začít, základní funkce a dále popis: vytvoření modelu motoru. Druhou kapitolu tvoří popis pro pokročilou práci. Dále jsou součástí této dokumentace detailní informace o programovacím jazyce Modelica, a také popis funkce integrovaného osciloskopu.



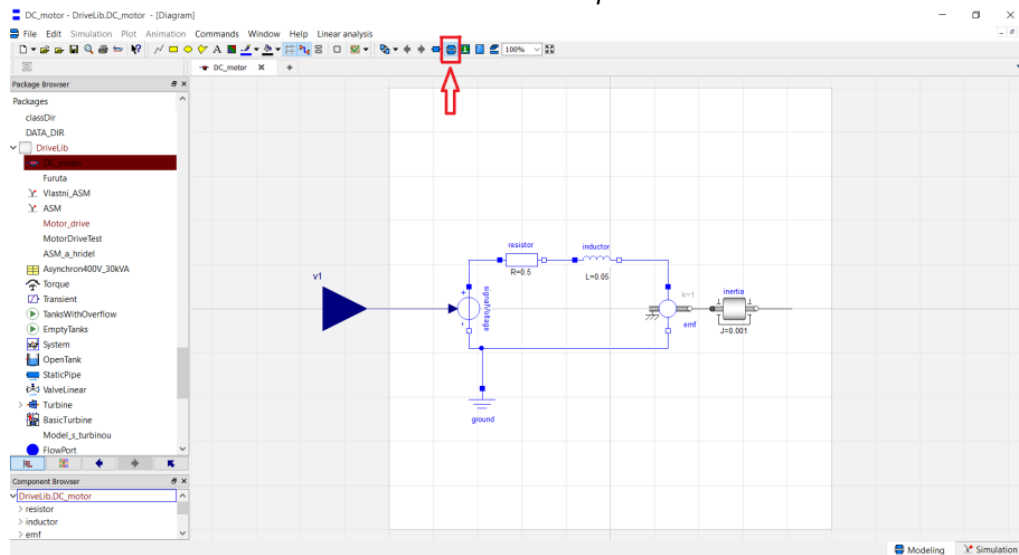
Obr. 6 Dokumentace programu Dymola

1.2.2 Vytvoření vlastního modelu

Dymola umožňuje sestavení modelu v grafickém nebo matematickém prostředí. V grafickém prostředí je možné spojovat komponenty z knihoven a vytvářet tak i složitější modely velmi rychle. Matematické prostředí je výhodné hlavně pro prvotní jednoduché modely, kde pomocí rovnic nadefinujeme potřebné parametry. [2]

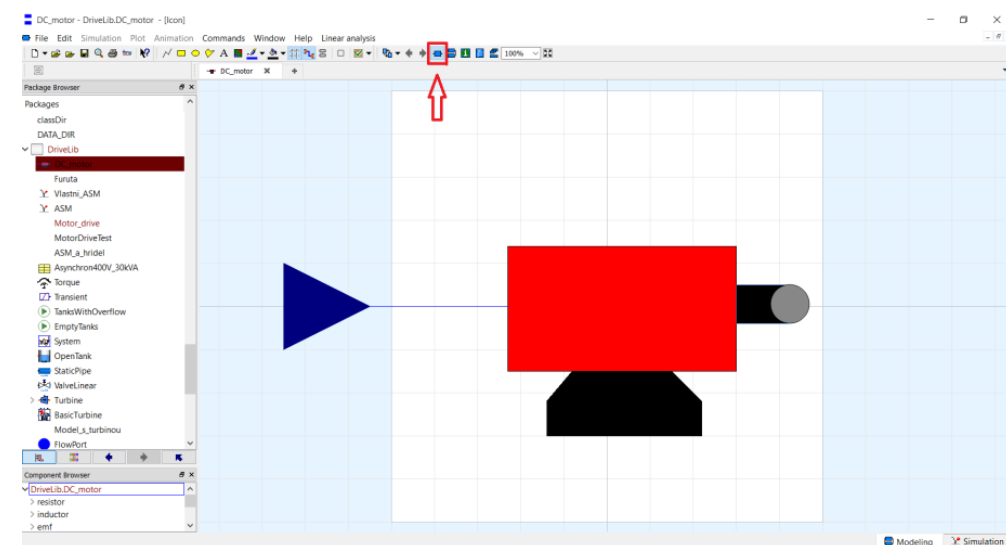


Obr. 7 – Matematické prostředí



Obr. 8 – Grafické prostředí

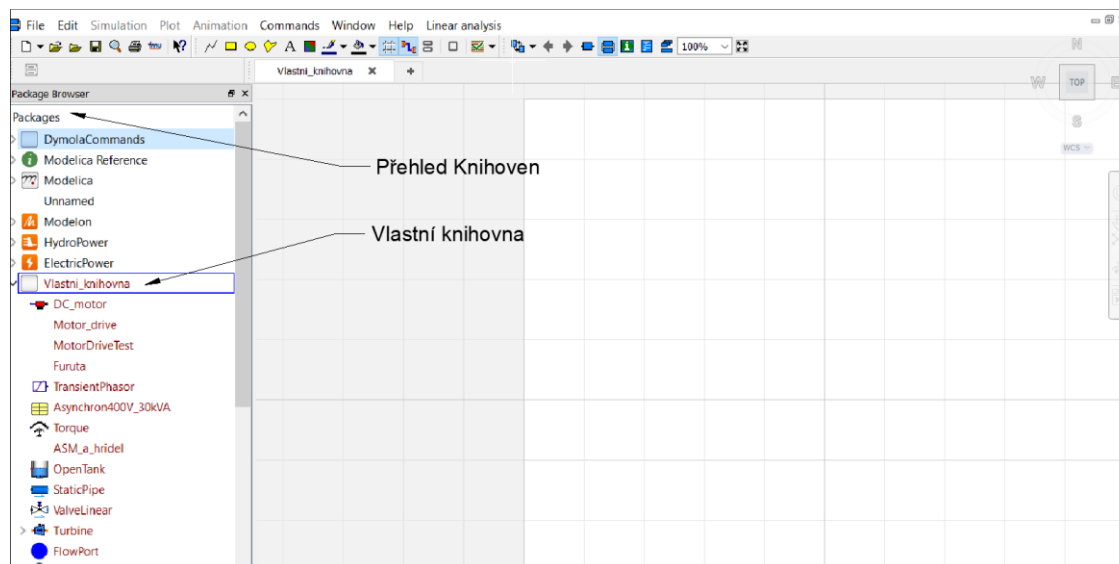
Dále se lze opět jednoduše přepnout například do prostředí vytvoření vlastní ikony modelu.



Obr. 9 – Prostor pro vytvoření vlastní ikony

1.2.3 Vytvoření vlastní knihovny

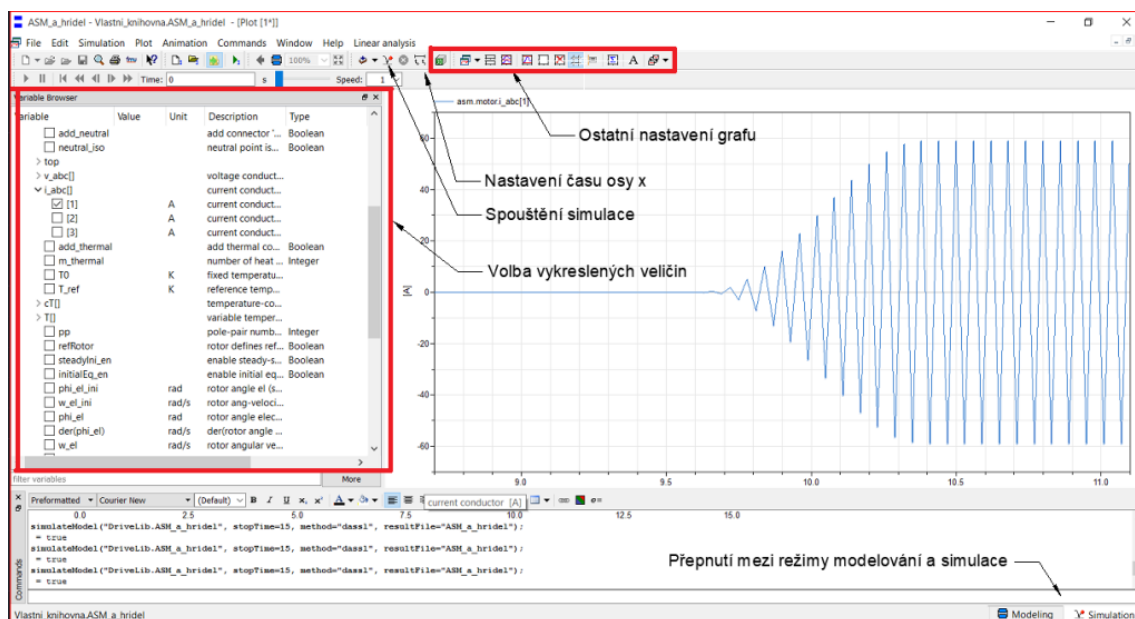
Založení vlastní knihovny je velmi jednoduché. Vkládání modelů do knihovny je možné při založení nového modelu nebo při duplikování hotových modelů. Do Dymoly poskytuje doplňkové knihovny společnost Modelon, která se zabývá vývojem a rozšiřováním modelů v širokém spektru průmyslu.



Obr. 10 – Panel knihoven

1.2.4 Spuštění a možnosti simulace

Pro spuštění simulace je nutné se nejdříve přepnout do simulačního prostředí. Po spuštění simulace a dokončení automatické validace, se zobrazí zpráva, v které jsou vypsaná upozornění a případně chyby, které brání v dokončení průběhu. [2]



Obr. 11 – Náhled režimu simulace

1.3 Srovnání Dymoly a Simulinku

Výhodou simulační nástroje Simulink je jeho současná rozšířenost a díky nižší ceně oproti nástroji Dymola i dostupnost. Nevýhoda Simulinku je nutnost použití měřících modelů pro zobrazení sledovaných veličin na rozdíl od Dymoly, kde je k dispozici integrovaný osciloskop, který výrazně urychluje a zjednodušuje obvody a tvorbu následných grafů. Dymola představuje vhodný nástroj pro rozšířené a náročnější simulace. Pomocí integrovaného osciloskopu je možné vykreslovat všechny veličiny prakticky ihned. Další velkou výhodou je dostupnost široké škály knihoven i s příklady náročných simulací od společnosti Modelon a také přehlednost vytvořených modelů. Nevýhodou nástroje Dymola je přepínání mezi simulačním a modelovacím režimem, které zpomaluje práci se simulací a dalším záporem je větší výpočetní náročnost než je tomu u Simulinku.

2 Teoretický popis MVE

2.1 Úvod

Vodní elektrárny jsou jedním z hlavních zástupců obnovitelných zdrojů. Velkou výhodou je, že neprodukují při přeměně energie žádné emise a vzhledem k velmi dlouhé životnosti a nízkým provozním nákladům vodních děl, je dobrá návratnost počátečních investic. Vodní elektrárny jsou také jednou z možností poměrně rychlého zdroje výkonu při případném blackoutu. Vytvoření vodních elektráren je omezeno počtem vhodných přírodních lokalit. Cílem této práce je vytvoření simulačního a matematického modelu malé vodní elektrárny v Šebelově mlýně v obci Husinec. [18]

2.2 Hydraulická část

2.2.1 Rozdělení MVE podle využití vodního toku

2.2.1.1 Průtočné

Průtočné vodní elektrárny jsou většinou nízkotlaké. Využívají přirozený průtok řeky, takže nelze ovlivňovat průtok. Přebytečné množství vody není využito a naopak při jejím nedostatku je elektrárna mimo provoz. Využívají se hlavně pro pokrytí základního zatížení. Lze je dále rozdělit na derivační a jezové. Při využití jezu dosáhneme vyšší hladiny a soustředěného spádu. Derivační přivaděč se vytvoří zkrácením toku řeky, kdy je voda odvedena z hlavního koryta k turbíně a následně vrácena zpět, čímž dojde k docílení většího spádu. [6]

2.2.1.2 Akumulační

Voda je akumulována pomocí hrází, takže se k akumulaci využívají přehrady, rybníky a podobně, které mají i mnoho jiných využití. Následně je možné snadné řízení toku k turbíně, a tak pokrývat špičkové zatížení elektrické sítě. [6]

2.2.1.3 Přečerpávací

Přečerpávací vodní elektrárna se skládá ze dvou vodních nádrží s výškovým rozdílem. Je jedním z nejlepších řešení pro regulaci elektrické sítě. Při nedostatku elektrické energie proudí voda z horní nádrže přes turbínu a tímto je dodáván výkon do sítě. Naopak při přebytku elektrické energie, který nastává především hlavně v noci, se přečerpává voda z dolní nádrže do horní, čímž regulujeme síť a máme možnost znovu využít kinetickou energii vody. [6]

2.2.1.4 Přílivové

Přílivové vodní elektrárny využívají slapové energie, které způsobují příliv a odliv. Hlavním parametrem pro tato vodní díla je tvar pobřeží. Nejsou příliš využívány z důvodu jejich náročného vybudování a vzhledem k dennímu diagramu zatížení, protože jejich provoz je možný pouze mimo největší vytížení sítě. [6]

2.2.2 Vtokový objekt

Cílem vtokového objektu je přivedení toku k turbíně tak, aby byly co možná nejlépe vyfiltrovány splaveniny, jako jsou spadané větve, listí, písek, tráva a podobně, které by mohly poškodit turbínu nebo snížit její účinnost. Dále musí vtokový objekt zajišťovat minimální vodní hladinu a znemožnit vznik vodních vírů, aby nedošlo k zavzdušnění turbíny. Snažíme se ho vytvořit ideálně tak, aby nebyla nutná obsluha. Vtokové objekty mohou být beztlakové a tlakové. U beztlakových vtokových objektů dochází k proudění vody při volné hladině, využívá se hrubé česlo a často se používá norná stěna a práh na dně vtoku pro usazení nečistot. Při velkých průtocích je možné použít tzv. usazováky, které se umísťují bezprostředně za vtokový objekt. Maximální rychlost vtokového objektu se uvažuje většinou od 0,7 až 1,0 m/s. Tlakových vtoků se docílí úpravou předsazené spodní stavby strojovny. Rychlost proudění by neměla přesahovat 0,8 až 1,2 m/s. Součástí vtoků jsou česle a vtokové uzávěry. [18]

2.2.3 Česle

Česle slouží k zabránění vstupu nečistot, které jsou unášeny ve vodě nebo na hladině do turbíny. Jde hlavně o to, aby úlomky větví a spadané listí neznemožnilo průtok nebo nepoškodilo turbínu. Česle se dělí na hrubé a jemné, Hrubé česle slouží k zachycení velkých předmětů, jako jsou trámy, kmeny stromů, ledových ker a podobně. Je nutné dodržovat pravidelné čištění, protože jinak dochází ke zvětšování hydraulických ztrát elektrárny. [13]

2.2.4 Stavidlo

Stavidlo reguluje nebo úplně zastavuje průtok a podle umístění může nahradit i jez nebo přepad. Často ho nalezneme u otevřených přivaděčů. Ovládání stavidla může být jen mechanické nebo řízené elektromotorem. Nejvýhodnější umístění stavidla je do betonového koryta a zapuštění do stěny, protože se tak vyhneme nežádoucí kavitaci. [18]

2.2.5 Přivaděče a odpady

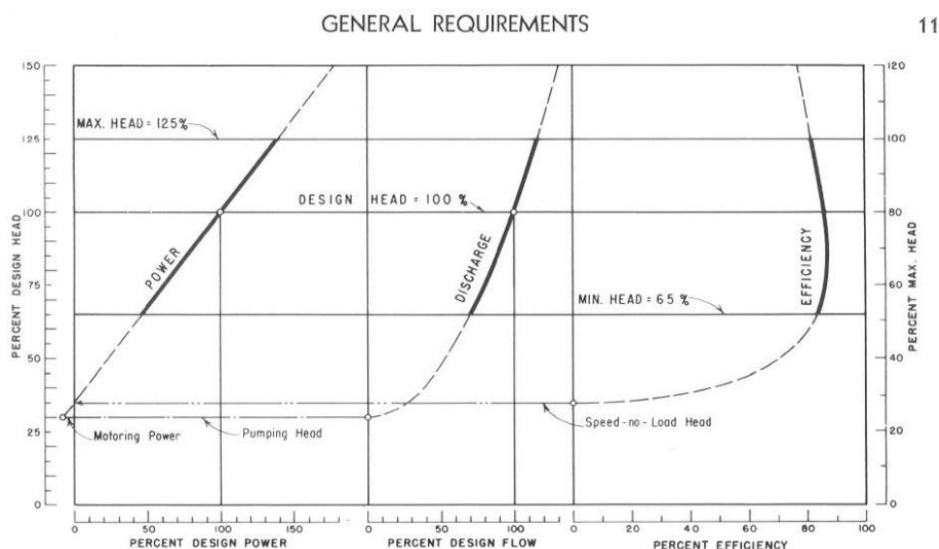
Pro co možná nejlepší využití energie vodního toku je nutné zvolit správný návrh přivaděče a odpadu. Lze za jejich pomoci také lépe využít spád konkrétně derivačním přivaděčem. U řešení přivaděče derivací je náhon téměř vodorovný na rozdíl od řečiště, z kterého je náhon získaný a jeho spád je mnohem zratelnější. Z důvodu nízkých nákladů se většinou tvoří co nejkratší. Přivaděče a odpady se dělí na kanály, žlaby, potrubí, šachty a náhony. Tlakové přivaděče jsou velmi nákladné, a proto se využívají méně. [18]

2.2.6 Provozní objekt

Hlavní částí provozního objektu je strojovna, která je tvořena generátorem, turbínou, případně transformátorem a z dalších zařízení potřebných pro jejich provoz. Spodní část objektu je z pravidla betonová, aby odolala vodním tlakům a poskytla dostatečnou oporu pro všechna zařízení. Do horní části provozního objektu se umísťuje hydroalternátor s regulátory, transformátor a kontrolní panely. [18]

2.2.7 Francisova turbína

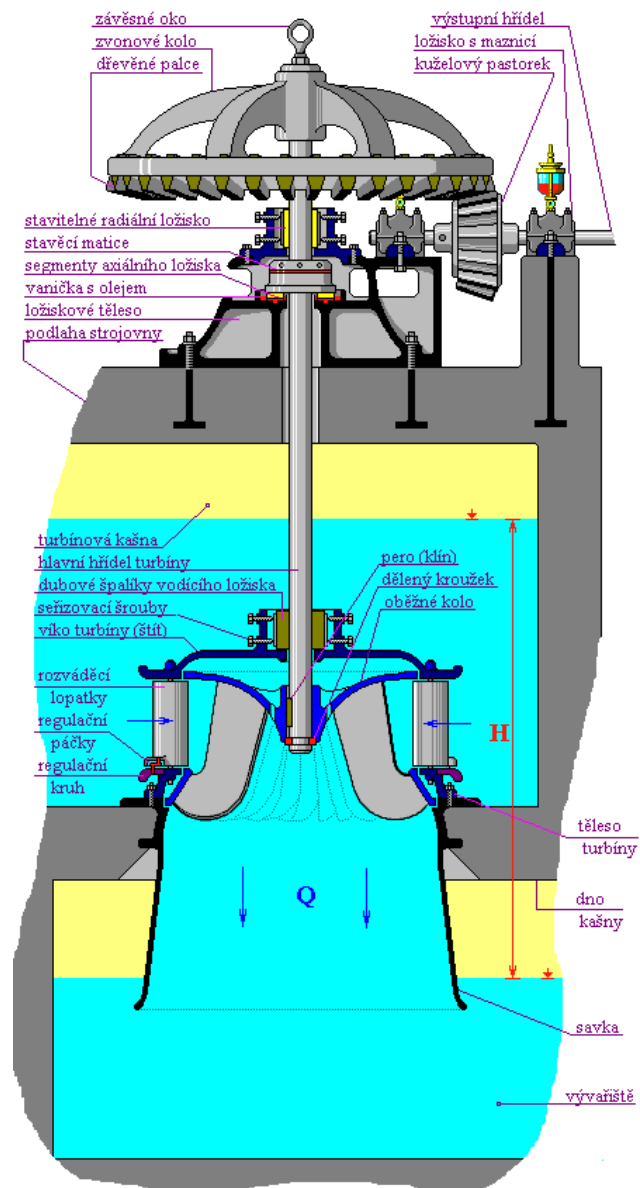
Francisova turbína byla navržena Jamesem B. Francisem a dle typu uložení hřídele rozlišujeme vertikální a horizontální provedení. Využívá se pro spády od 10 do 700 metrů, do průtoku $8 \text{ m}^3/\text{s}$ při otáčkách okolo 650 ot/min a do výkonů 1000 MW. U tohoto typu turbíny je možné dosáhnout účinnosti až 90%. Francisovy turbíny patří v dnešní době mezi nejpoužívanější. [13]



Obr. 12 – Univerzální charakteristiky Francisovy turbíny [21]

2.2.7.1 Francisova vertikální turbína

Vertikální kašnová Francisova turbína se dnes již tolik nevyužívá. Je výhodnější na velkých řekách pro vodní díla derivační s otevřeným přivaděčem a vodní díla jezová. Používá se pro spády od 1,5 do 5 metrů a pro velké a střední průtoky od 0,6 do 8 m³/s. Výhoda vertikálního provedení oproti horizontálnímu je v lepší účinnosti, ale většinou je doprovázena převodem a tím dojde ke srovnatelné účinnosti. Na vodních dílech s menším spádem se za ozubeným převodem používá ještě převod pomocí řemenu. U novějších konstrukcí s pomaloběžnými generátory se někdy vystačí pouze s řemenovým převodem, ale většina těchto turbín je rychloběžná s až 400 ot./min. [13]



Obr.13 – Provedení vertikální Francisovy turbíny [13]

Lopatky turbíny jsou ponořené na dně turbínové kašny. Na těleso turbíny navazuje savka, která tvoří přechod do vývařiště. Okraj savky musí být neustále pod hladinou vývařiště. Na obvodu turbíny je regulační kruh a rozváděcí lopatky. Turbína je uzavřena víkem. Přenos síly z turbíny zajišťuje hřídel, která je svislá a končí ve strojovně. Na hřídeli je centrovací ložisko a oběžné kolo. Ložisko je uloženo do stojanu na betonové základně. Na samotném konci hřídele je zvonové kolo s výměnnými palci. Síla je dále přenášena pomocí ocelového pastorku, který je osazen na výstupní hřídeli a dále případně přes řemenici na generátor. Strojovna je v bezpečné výšce od vodní hladiny, aby se předešlo snadnému zaplavení. Regulace je zajištěna otáčením regulačního kruhu, a tím jsou řízeny rozváděcí lopatky.[13]

2.2.7.2 Francisova horizontální turbína

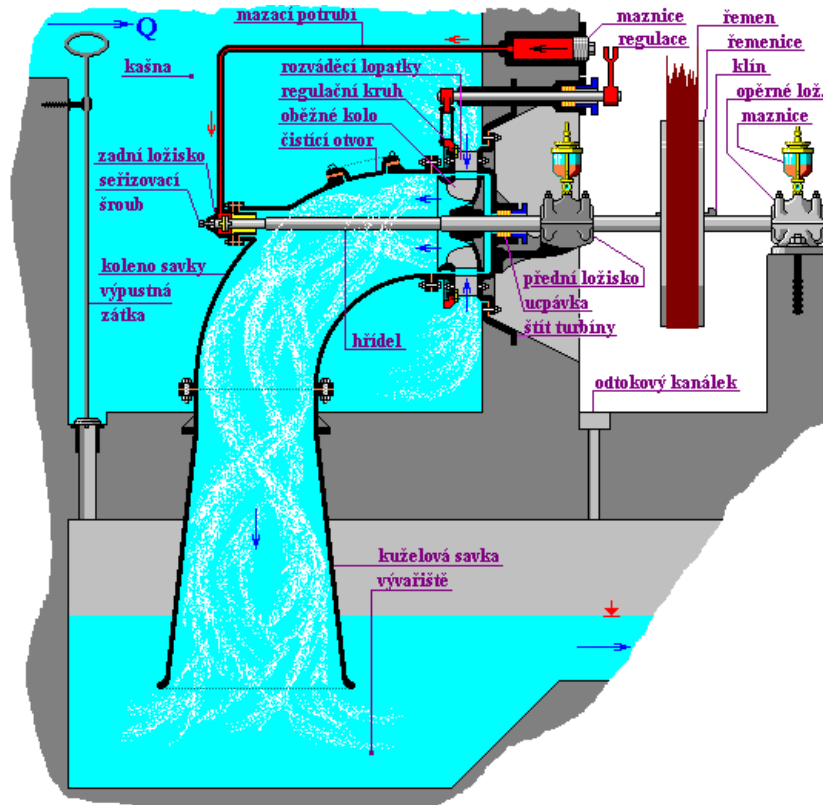
Horizontální kašnová Francisova turbína se používala pro derivační vodní díla s otevřeným přivaděčem a tlakovým přivaděčem s otevřenou kašnou. Výrobní řady byly odstupňovány podle průměru oběžného kola. Volba výrobních řad se určovala podle spádu a průtoku. Hlavním využitím těchto turbín byl dříve doplňkový mechanický pohon mlýnu a pil. Poměrně velké množství těchto turbín je v dnešní době stále v provozu, protože se vyplatí tyto turbíny zrenovovat a využít jako malé vodní elektrárny. [13]

Tento typ turbíny je vhodný pro průtoky přibližně od 0,1 do 2 m³/s a spády od 2 do 8 metrů. Horizontální turbína má o něco menší účinnost než vertikální, ale k jejím výhodám patří přenos mechanické síly pomocí vodorovné hřídele a zjednodušený převod, čímž se její účinnost opět vyrovná. Toto provedení je tzv. „normáloběžné“. [13]

Voda proudí přes rozváděcí lopatky z kašny rovnoměrně po celém obvodu do turbíny, a tím získává potřebnou rychlost a směr. Po předání energie lopatkám turbíny voda odtéká do odpadního kanálu. Z důvodu umístění turbíny vysoko nad spodní hladinu a do stěny kašny je výpust z turbíny řešená pomocí kolenové savky. Při menším průtoku než je jmenovitý, dochází v kolenové savce k víření vodního sloupu podle obr. 14, což může způsobovat velké ztráty, a proto je nezbytný velký poloměr zaoblení kolenové vsadky, aby koleno savky nevytvářelo tomuto vířivému sloupu velký odpor a voda mohla plynule rotovat. Podle toho, jestli vede koleno přes kašnu nebo ze strojovny přímo do vývařiště rozlišujeme horizontální turbínu s „mokrou savkou“ nebo se „suchou savkou“. [13]

2.2.7.2.1 Horizontální turbína s „mokrou savkou“

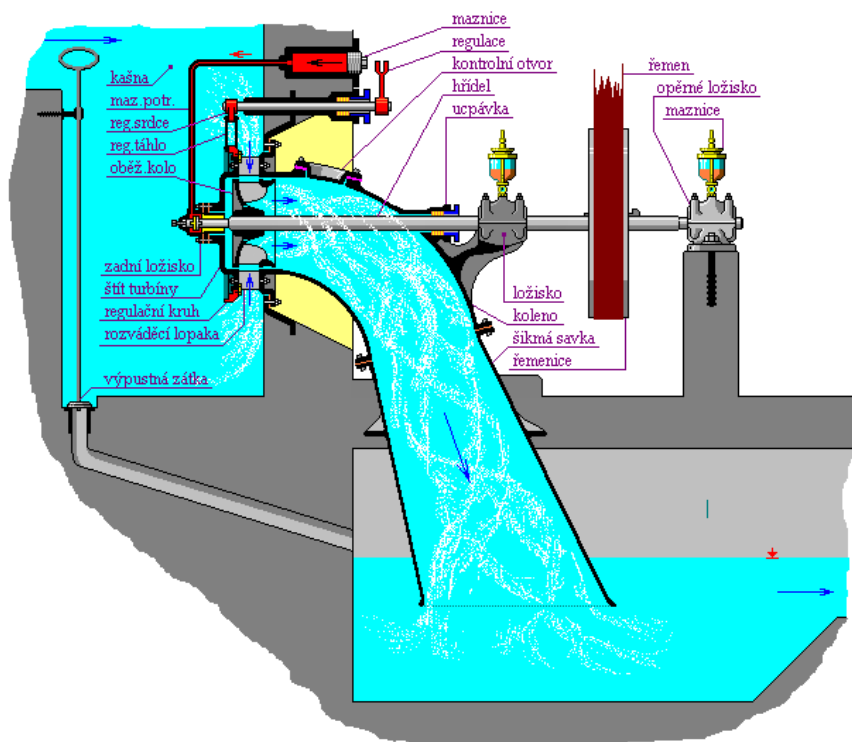
Pro zhotovení této savky je potřeba velké vývařiště, které je přímo pod kašnou a strojovna je vedle kašny. V případě, že je kašna příliš hluboká, tak se nepoužívá. K tomuto uspořádání stačí menší strojovna a můžeme docílit mnohem menšího průsaku. [13]



Obr. 14 Provedení horizontální Francisovy turbíny s mokrou savkou [13]

2.2.7.2.2 Horizontální turbína se „suchou savkou“

V případě, že není možné vytvořit pod kašnou vývařiště, využijeme řešení pomocí „suché savky“. Toto uspořádání je náročnější na prostor strojovny, protože odtokový kanál vede pod ní, ale o to menší je potřebná velikost kašny. Další výhodou je dobrá stabilita i na navážkách, a proto se tento druh turbíny tak často vyskytuje v blízkosti rybníků. Nevýhodné je pouze umístění jednoho ložiska pod vodou a průchod hřídele savkou, což snižuje účinnost soustrojí. [13]



Obr. 15 – Provedení horizontální Francisovy turbíny se suchou savkou [13]

2.2.8 Převody

Převody jsou nejvíce využívány u malých vodních elektráren, kdy je potřeba spojit nízké otáčky turbíny s vyššími jmenovitými otáčkami generátoru. U velkých vodních děl je zpravidla turbína přímo spojena s generátorem. U převodů je nejdůležitější jejich vysoká účinnost při dlouhé životnosti a spolehlivosti. Převody mohou být pomocí ozubených kol, řemenu, lana nebo řetězu. Řetězové převody musí být mazány a jsou použitelné jen pro malé rychlosti. Nejpoužívanější jsou ozubená kola a řemeny. U ozubených kol se účinnost pohybuje od 94% do 97% a u řemenových kol od 96% do 98%. Ještě vyšší účinnost je možné dosáhnout pomocí ozubených řemenů, které se používají pro výkony až 300 kW a dosahují účinnosti až 99%. [18]

2.3 Elektrická část

2.3.1 Asynchronní motor jako generátor

Asynchronní motor patří mezi nejpoužívanější elektrické točivé stroje. Můžeme ho využít jako motor nebo generátor. Asynchronní stroje patří mezi nejpoužívanější stroje k přeměně elektrické energie na mechanickou a naopak. Jejich hlavní výhodou především v provedení s klecí nakrátko je jednoduchá konstrukce a tím i minimální nároky na údržbu. Jejich otáčky jsou snadno říditelné pomocí frekvenčního měniče. Stator je složený z trojfázového vinutí umístěného v drážkách. Rotor může být vinutý nebo s klecí nakrátko.

Vinutý rotor musí mít stejný počet pólů jako stator a je vždy zapojen do hvězdy. Klec je z měděných nebo hliníkových tyčí bez izolace. [6,7]

2.3.1.1 Princip činnosti

Průchodem proudu ve statoru vznikne točivé pole s magnetickým napětím F_{m1} , které indukuje do rotorového vinutí indukované napětí a začne protékat proud rotorem. Proud rotorem indukuje vlastní magnetické pole F_{m2} , které vzájemným působením s magnetickým polem statoru vytvoří elektromagnetický moment M . [6,7]

$$M = F_{m1} \cdot F_{m2} \quad (1.1)$$

2.3.1.2 Parametry generátoru

Základním parametrem, který nás bude u generátoru zajímat je jeho výkon, který je daný momentem na hřídeli a rychlostí otáčení motoru, takže dostaneme tvar rov. (1.2).

$$P = M \cdot \omega \quad (1.2)$$

Pro evropské země je dána frekvence sítě 50 Hz, a proto jsou na tuto frekvenci stavěny i generátory. Synchronní otáčky motoru jsou dány počtem pólových dvojic p . Jmenovité otáčky generátoru lze tedy určit z rov. (1.3). [6,7]

$$n = \frac{60 \cdot f}{p} \quad (1.3)$$

Tab. 1.1 Závislost jmenovitých otáček na počtu pólů

Počet pól pářů	1	2	3	4	5
Počet pólů	2	4	6	8	12
n [ot/min]	3000	1500	1000	750	500

Otáčky rotoru jsou dány úhlovou rychlostí ω , které dány z rov. (1.4). [6]

$$\omega = \frac{\pi n}{30} \quad (1.4)$$

Otáčky rotoru jsou zpožděny vždy za magnetickým polem statoru vlivem zátěžného momentu hřídele, jehož příčinami jsou ztráty vlivem tření, odpor vzduchu ventilátoru a zátěže. Pro napětí a proudy rotoru je daná relativní úhlová rychlost z rov. (1.5). [7]

$$\omega_2 = \omega_1 - \omega \quad (1.5)$$

Vztažením této relativní úhlové rychlosti k rychlosti synchronní získáme skluz. [7]

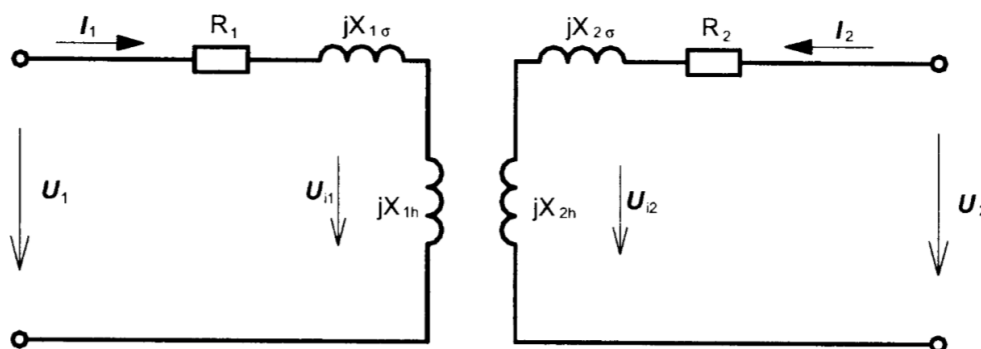
$$\omega_2 = \omega_1 - \omega \quad (1.6)$$

Pro dvojpólový stroj platí $n_1=n_s$ a pro více pólové stroje je skluz vyjádřen pomocí vztahu z rov. (1.7). [7]

$$\omega_2 = \omega_1 - \omega = s\omega_1 \quad (1.7)$$

2.3.1.3 Náhradní schéma

Náhradní schéma asynchronního stroje vychází z náhradního schématu transformátoru s pouze malými rozdíly. Asynchronní stroje na rozdíl od transformátorů mají mezi magnetickými obvody vzduchovkou mezeru, což způsobuje větší magnetizační proud. Dále mají rotor a stator odlišnou frekvenci vlivem skluzu. Pro stroj s vinutou kotvou platí, že počet fází rotoru je shodný se státorem. Náhradní schéma platí pro jednu fázi. [7]



Obr. 16 – Výchozí náhradní schéma transformátoru [7]

Pro náhradní schéma transformátoru na obr. 16 platí rovnice: [7]

$$U_1 = (R_1 + jX_{1\sigma})I_1 + U_{i1} \quad (1.8)$$

$$U_2 = (R_2 + jX_{2\sigma})I_2 + U_{i2} \quad (1.9)$$

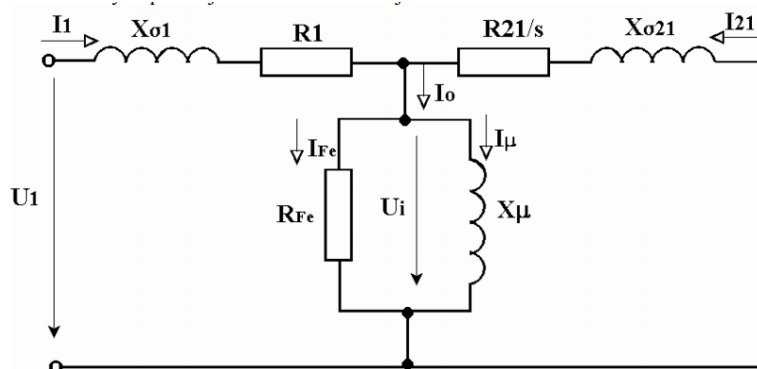
Dále využijeme vztahu, kde U_{i20} je indukované napětí do stojícího a rozpojeného rotoru: [7]

$$U_{i2} = sU_{i20} \quad (2.1)$$

Výpočet shodného kmitočtu statoru a rotoru získáme, když vydělíme skluzem druhou rovnici. [7]

$$\frac{U_2}{s} = \left(\frac{R_2}{s} + jX_{2\sigma} \right) I_2 + U_{i20} \quad (2.2)$$

Spojení rotoru nakrátko má za následek, že napětí na výstupních svorkách U_2 je rovno nule. Po přepočtu veličin pomocí převodu a doplnění odporu R_{Fe} do příčné větve, dostaneme náhradní schéma ve tvaru T-článek. [7]



Obr. 17 – Náhradní schéma asynchronního motoru T-článek [9]

Pro toto schéma platí rovnice: [7]

$$U_1 = (R_1 + jX_1)I_1 + U_i \quad (2.3)$$

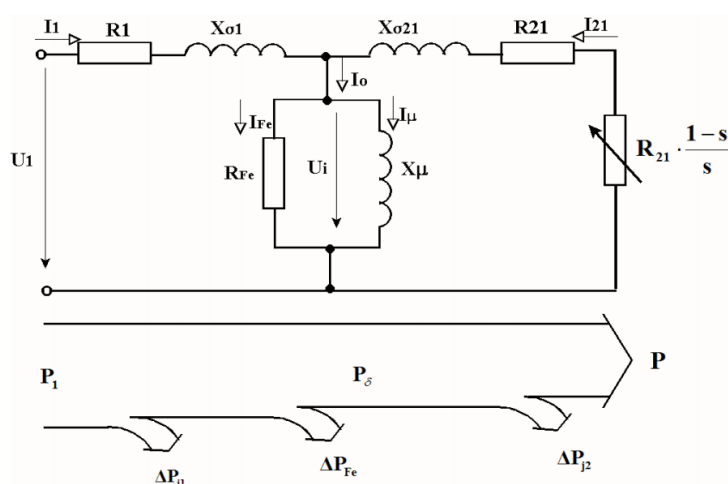
$$0 = \left(\frac{R'_2}{s} + jX'_{2\sigma} \right) I'_2 + U_i \quad (2.4)$$

Mechanický výkon na hřídeli je úměrný činnému proudu, takže pokud vypočteme Joulovy ztráty v rotoru z rov. (2.5) a odečteme je od celkového výkonu v rotoru rov.(2.6), tak dostaneme výkon na hřídeli. [7]

$$\Delta P_{j2} = m_2 R_2 I_2^2 = m_1 R'_2 I_2^2 \quad (1.2.5)$$

$$P = m_1 \frac{R'_2}{s} I_2^2 - m_1 R'_2 I_2^2 = m_1 \left(\frac{R'_2}{s} - R'_2 \right) I_2^2 = m_1 R'_2 \left(\frac{1-s}{s} \right) I_2^2 \quad (1.2.6)$$

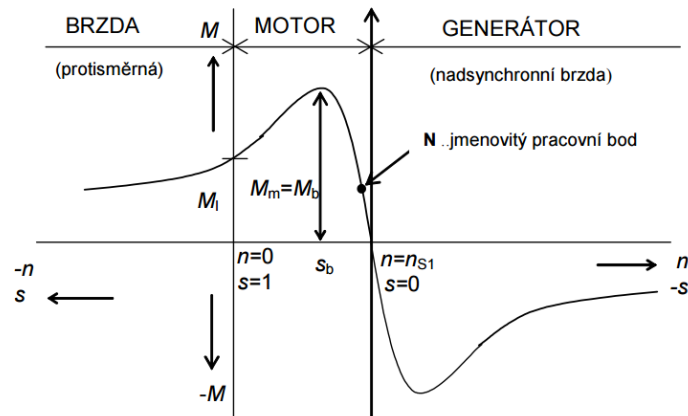
V motorickém režimu je skluz menší nebo roven jedné, a proto odpor $R_{21} \cdot \frac{1-s}{s}$ není vždy roven nule a musíme tedy tento výkon přičíst k Joulovým ztrátám. Z toho důvodu je nutné mechanický výkon a ztráty uvažovat zvlášť. [7]



Obr. 18 - Rozdělení ztrát a mechanického výkonu [9]

2.3.1.4 Točivý moment asynchronního stroje

Momentová charakteristika udává závislost momentu motoru na otáčkách a skluzu. Mimo ostatní parametry motoru je moment úměrný napájecímu napětí a klesá s napájecím napětím kvadraticky. V případě, že regulujeme motor pomocí změny frekvence, mění se moment nepřímo úměrně ke změně. Pro vyjádření jmenovitého momentu asynchronního motoru z rov. (2.7), vycházíme z náhradního schématu a z činného příkonu motoru z rov. (2.8). [7,10]



Obr. 19 – Momentová charakteristika asynchronního stroje [10]

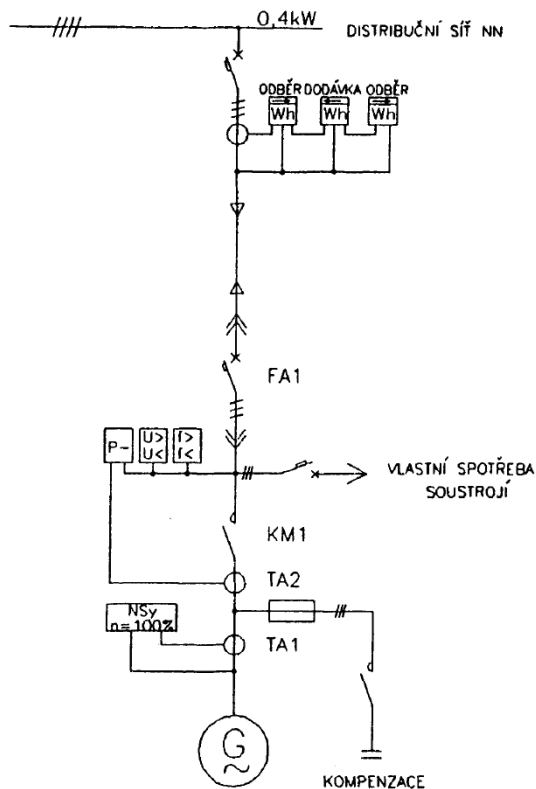
$$P_p = m_1 U_1 I_1 \cos \varphi \quad (2.7)$$

$$M_n = \frac{P_n}{\omega} = \frac{P_n}{\frac{2\pi \cdot n_N}{60}} \quad (2.8)$$

2.3.1.5 Elektrické schéma připojení generátoru k síti

U malých vodních elektráren je připojení k síti poměrně snadné. Při spouštění vodní elektrárny se soustrojí s generátorem roztočí na téměř synchronní otáčky a následně se generátor připojí k síti, čímž vznikne proudový ráz, u kterého se snažíme snížit nebo úplně odstranit činnou složku. Připojení generátoru k síti musí zajistit spolehlivé dodávání energie do sítě, ale zároveň i energie pro vlastní spotřebu. Vlastní spotřeba zahrnuje ovládací a měřicí zařízení. Schéma se skládá z větví pro generátor, vlastní spotřebu, kompenzaci a větve pro vyvedení výkonu do sítě. [18]

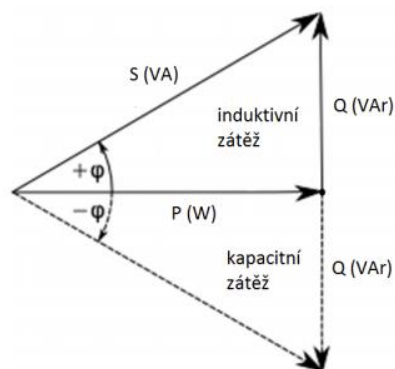
Obvod je rozdělený na generátorovou větev, kde je připojený generátor prostřednictvím stykače. Dále je součástí této větve napěťová ochrana, frekvenční ochrana, ochrana proudové přetížitelnosti FR1 a jistič FA1. Druhou větví je kompenzační, která zahrnuje připojení kompenzačních kondenzátorů s proudovou ochranou. Třetí větev slouží pro připojení vlastní spotřeby soustrojí. Poslední větev zajišťuje připojení k síti a sledování spotřebovaného nebo dodaného výkonu.



Obr. 20 – Schéma zapojení asynchronního generátoru k distribuční síti [18]

2.3.2 Kompenzace jalového výkonu

Asynchronní motor disponuje velkou indukčností, takže při připojení ke zdroji dochází k odběru mimo činného výkonu P i výkonu jalového Q . Vektorovým součtem těchto dvou výkonů dostaneme výkon zdánlivý S . Příčinou je fázový posun napětí před proudem o úhel φ . Při vypočtení kosinusu tohoto úhlu dostaneme účinník. Při větší indukčnosti dochází k většímu posunu napětí před proudem a účinník se tím sníží. To by vedlo k odběru pouze jalového výkonu a nulového činného výkonu. Provozovatelem distribuční sítě jsou dané rozmezí účinníku 0,95-1 a pro kapacitní zátěž 1-0,95, v kterých je nutné spotřebiče, které chceme k síti připojit udržet, protože by v síti vznikaly velké ztráty a hrozí od provozovatele postih. [20]



Obr. 21 - Trojúhelník výkonů [20]

3 Matematický model malé vodní elektrárny

3.1 Hydraulická část

3.1.1 Návrh parametrů vodního díla

Tato podkapitola obsahuje základní podklady, z kterých získáme představu o navrhovaném vodním díle a dále postupy vypracování dokumentace vlastní studie. Výkon hydroenergetického zdroje spočítáme z průtoku Q (m^3/s), čistého spádu (m), celkové účinnosti η (%) a gravitačního zrychlení g , takže výsledný tvar rovnice bude: [12]

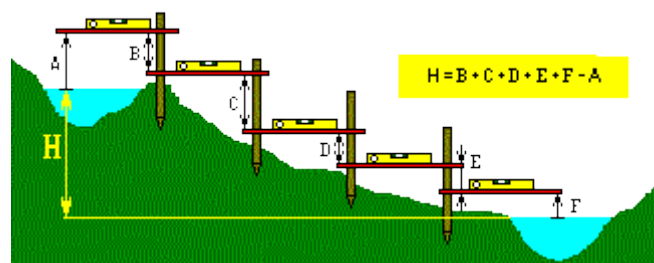
$$P = 9,81 \cdot Q \cdot H \cdot \eta \cdot \rho_v \quad (2.9)$$

Pro výpočet tedy potřebujeme určit celkovou účinnost, čistý spád a návrhový průtok. Tento vztah také obsahuje základní princip využití vodního zdroje a usměrnění průtoku a spádu pro vhodné vodní soustrojí s přijatelnou účinností. Základem je tedy přehrada, jez nebo rybník, dále v případě beztlakových přivaděčů kanál, štola s volnou hladinou nebo pro tlakové přivaděče výstavba tlakových potrubí, šachet, štol. Další parametry pro charakteristiku turbíny jsou určovány často jako násobky průměru oběžného kola. [11]

3.1.1.1 Spád

Při měření spádu je potřeba určit nejdříve hrubý spád a z něj následně získat spád čistý, který je důležitý pro volbu turbíny.

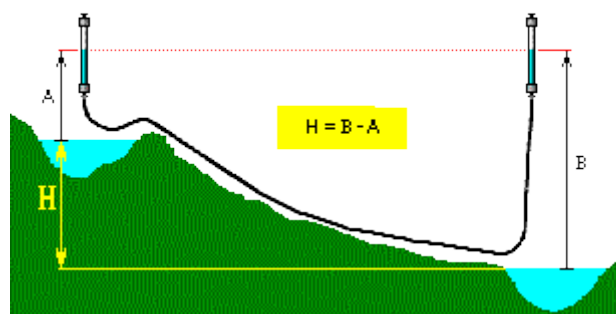
Hrubý spád lze změřit poměrně jednoduše například přenášením latě a vodováhy nebo při kratších vzdálenostech použitím tzv. hadicové vodováhy. Při měření pomocí latě se sečtou naměřené rozdíly výšky a vzdálenosti v místech, kde umístíme měřicí kolík podle obr. 22. [13]



Obr. 22 - Určení hrubého spádu pomocí latě a vodováhy [13]

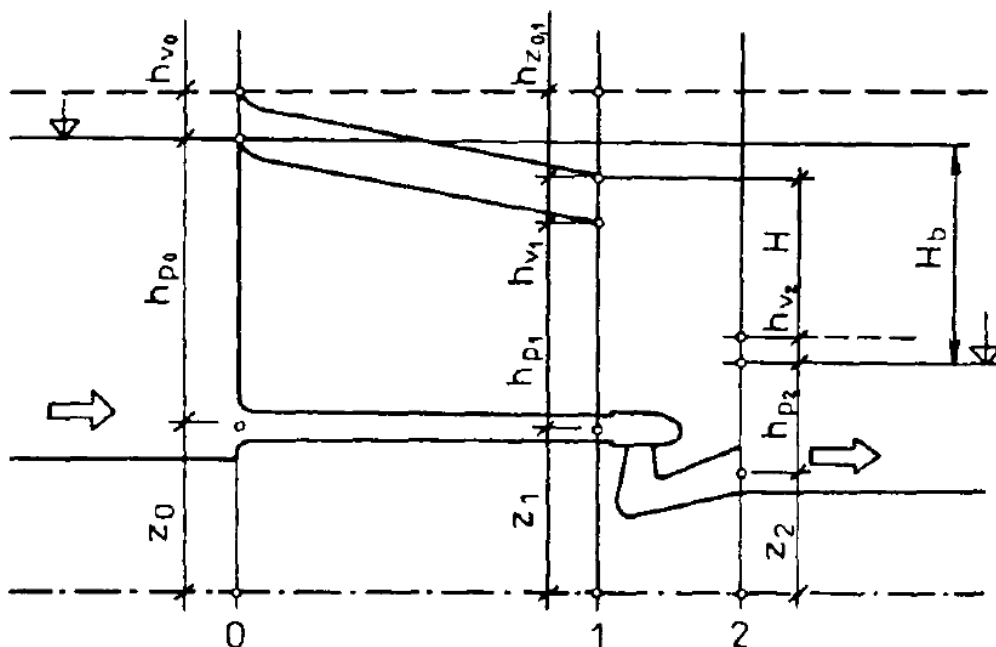
Pokud je to možné z hlediska vzdálenosti, tak jednodušší způsob představuje měření hrubého spádu tzv. hadicovou vodováhou podle obr. 23. V místě A zvolíme výšku jednoho

měřicího konce hadice a v bodě B se změří výška, při které dojde k vyrovnání hladiny mezi konci hadice. [13]



Obr. 23 – Určení hrubého spádu pomocí hadicové vodováhy [13]

Čistý spád se určuje mnohem složitěji. Je možné ho vypočítat podle obr. 24, z kterého vyplývá rov. (3.1).



Obr. 24 – Určení hodnot celkového spádu H_b a čistého spádu [11]

V místě 0 na obrázku je vstup do přivaděče, dále vstup do turbíny je značen místem 1 a místo 2 určuje výstup z turbíny.

$$H = H_b + H_{v0} - h_{v2} - h_{z0,1} \quad (3.1)$$

$$h_{v0} = \frac{\alpha_0 v_0^2}{2g} \quad (3.2)$$

$$h_{v2} = \frac{\alpha_2 v_0^2}{2g} \quad (3.3)$$

Pro výpočet rov. (3.1) je nutné znát kromě hydraulických ztrát i střední rychlost proudění vody a průtok turbínou. Samozřejmě se snažíme docílit co možná největšího čistého spádu a to lze pomocí jezů, přehrad nebo derivací. Hodnoty těchto spádů se v průběhu roku mění podle průtoku, což se dá omezit akumulací vody v nádržích. [11,13]

3.1.1.2 Česle

Výpočet hydraulických ztrát vlivem hrubých česlí se vypočítá z rov. (3.4), kde β je pro hrubé česlice rovno 1,79 a rychlost v_0 je v rozmezí 0,5 až 0,7 m/s. [18]

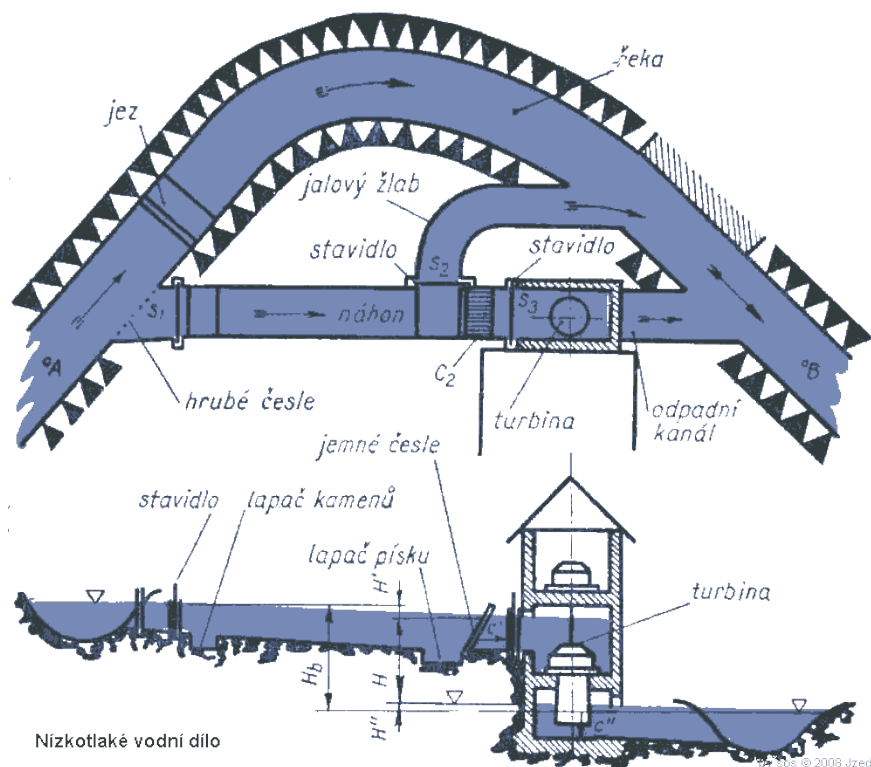
$$h_{zc} = \beta \cdot \left(\frac{S}{b_c}\right)^{\frac{4}{3}} \cdot \frac{v_0^2}{2 \cdot g} \quad (3.4)$$

Další hydraulické ztráty vznikají vlivem jemných česlí. Profil česlí se navrhuje tak, aby vyšla rychlost toku v rozmezí 0,8 až 1,2 m/s. [18]

$$h_{zc} = \beta \cdot \left(\frac{S}{b_c}\right)^{\frac{4}{3}} \cdot \frac{v_0^2}{2 \cdot g} \cdot \sin(\alpha) \cdot k_\delta k_p \quad (3.5)$$

3.1.1.3 Derivační vodní dílo

Derivační vodní dílo viz obr. 25 je z většiny vystavěno mimo hlavní tok řeky. Na řece je pouze jez, kterým docílíme stabilnějšího hladiny rybníku. Z hlavního toku je vytvořen vtokový kanál, který vede do rybníka a je tak zajištěna akumulace. Z rybníku vede přepadový kanál zpět do hlavního toku, který udává maximální výšku hladiny, aby nedošlo k zaplavení strojovny. Z vodní elektrárny je odtokový kanál přiveden opět zpátky do hlavního toku v místě, kde je už hladina řeky nízká. [11]



Obr. 25 – Provedení derivačního přivaděče [19]

3.1.1.4 Průtok

Průtok vodní elektrárnou se určuje u větších řek za pomoci dat z hydrometeorologického ústavu a výpočtu návrhového průtoku, který se počítá z 90-ti denního až 120-ti denního průtoku. U derivační elektrárny ze 120-ti dnů a u elektrárny bez derivačního kanálu 90-ti dnů. [11]

$$Q_n = Q_{90d} - Q_{120d} \text{ [m}^3\text{/s]} \quad (3.6)$$

Pro malé toky je určení správného průtoku složitější, protože menší toky už Český hydrometeorologický ústav podrobně nemonitoruje a je potřeba bohatých zkušeností při určení přirozeného průtoku. Především je důležité ho určit z dlouhodobého měření. Pokud je poblíž uvažované lokality jiné vodní dílo nebo měřící místo, které sleduje hydrometeorologický ústav je možné vypočítat přibližný průtok přepočtem z tohoto místa na uvažovanou lokalitu. Data z měřícího místa obsahují mimo jiné plochu povodí v km², průměrný roční průtok Q_a a střední specifický odtok q_a . Následně je možné tyto údaje přepočítat pomocí rov. (3.7). Platí pouze podmínka, že rozdíl profilů nesmí být větší než v poměru 1:3. [11]

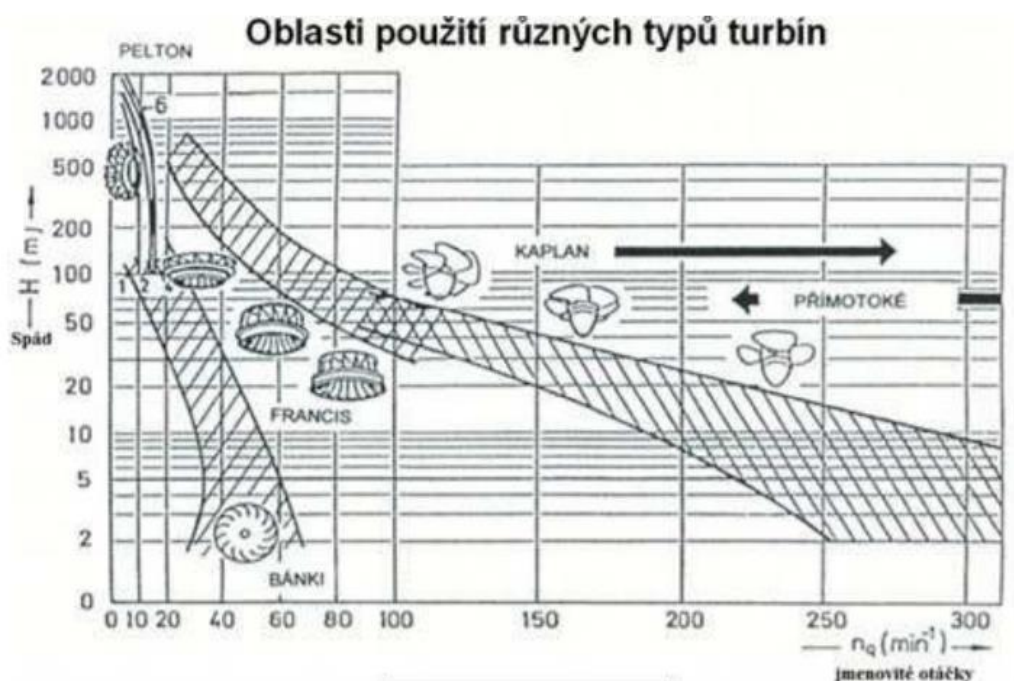
$$Q_l = \frac{F_1}{F_M} \cdot Q_a \text{ [m}^3/\text{s]} \quad (3.7)$$

3.1.1.5 Otáčky turbíny

Pro zajištění vysoké účinnosti je nutné správně zvolit provozní otáčky turbíny. Pro zvolení otáček musíme brát v úvahu, že při malých otáčkách je potřeba náročných převodů na vyšší otáčky, z důvodu daných jmenovitých otáček generátoru. Na druhou stranu při příliš vysokých otáčkách hrozí poškození a to zejména v případě, že dojde k elektrickému výpadku a nezatížený generátor se následně nekontrolovaně roztočí. Předběžně lze jmenovité otáčky turbíny vypočítat z rov. (3.8) za předpokladu, že n_s jsou otáčky geometricky podobné turbíny s definovaný průměrem oběžného kola, která při spádu 1 m vyvine výkon jednoho koně tedy 0,736kW. [11]

$$n = \frac{n_s \cdot H^4 \sqrt{H}}{\sqrt{P_t}} \cdot 1,166 \text{ [ot/min]} \quad (3.8)$$

Po výpočtu rov. (3.8) potřebujeme znát ke výběru správné turbíny specifické rozmezí otáček jednotlivých typů turbín podle tab. 1.2 případně podle obr. 26 a dále vzít v úvahu provozní otáčky generátoru a náročnost převodu. [11]



Obr. 26 – Oblasti použití různých typů turbín [17]

Tab. 1.2 Specifické otáčky turbín

Typ turbíny	Obvyklé rozmezí n_s (min^{-1})
Peltonova	4-32
Bánkiho	70-150
Francisova pomaloběžná	50-150
Francisova normální	150-250
Francisova rychloběžná	250-450
Kaplanova a vrtulová	300-1000

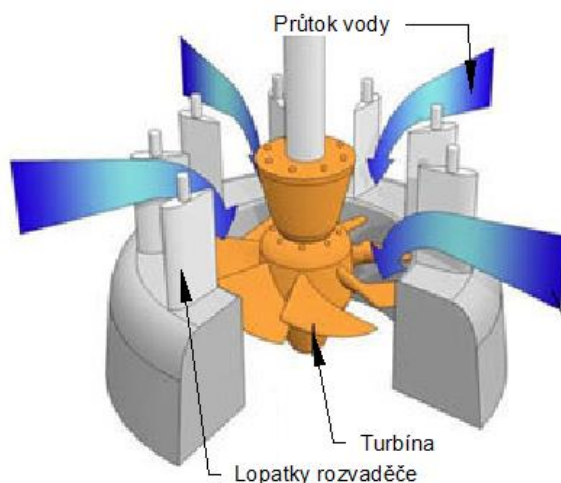
Z provozních důvodů se pro ochranu před kavitací nedoporučuje pro jednotlivé otáčky turbín volit vyšší spády než v tab. 1.3. [11]

Tab. 1.3 Mezní spád pro turbíny daných specifických otáček

n_s [ot/min]	70	110	150	200	300	400	500	600	700	800
H_{max} [m]	260	181	111	75	41	26	17	13	10	8

Pokud bychom chtěli vypočítat přibližné otáčky Francisovy turbíny a neměli bychom k dispozici údaje od výrobce turbíny, je možné je vypočítat z rov. (3.9) za předpokladu, že máme k dispozici průměr oběžného kola, maximální úhel lopatek rozvaděče a vstupní úhel oběžných lopatek. [11]

$$n = 53,5 \cdot \frac{\sqrt{H}}{D} \cdot \sqrt{\frac{\sin(\delta - \gamma)}{\cos \gamma \sin \delta}} \quad (3.9)$$

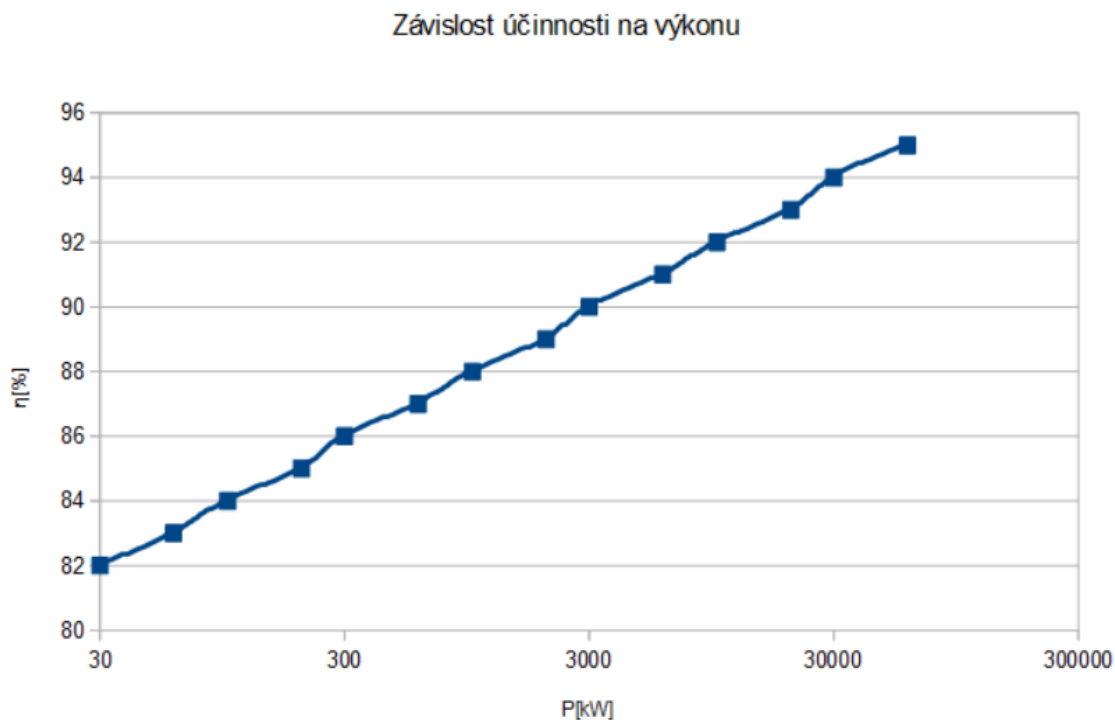


Obr. 27 Náhled lopatek rozvaděče [14]

3.1.1.6 Účinnost turbíny

Účinnost turbíny je daná jako poměr výkonu změřeného na výstupní hřídeli a teoretického výkonu vodního potenciálu, který je přiveden k turbíně. Vodní turbína přeměňuje mechanickou energii vody na mechanickou energii na hřídeli. Vodní turbíny vykazují z principu velké účinnosti, které jsou v rozmezí 0,7 až 0,9. Účinnost mimo jiné ovlivňuje i velikost vodního díla. Zpravidla, čím je turbína konstruována na větší výkon,

tím je účinnost vyšší. [11]



Obr. 28 - Závislost výkonu na účinnosti

3.2 Elektrická část

3.2.1 Asynchronní generátor

Při použití asynchronního stroje s kotvou nakrátko jako generátoru, je nutné vzít v úvahu vztahy mezi účinností, účínkem, skluzem, momentem zvratu atd., které vychází ze štítkové hodnoty činného jmenovitého výkonu. Hodnoty účinnosti a účínku jsou závislé na konstrukci stroje a udává je výrobce motoru. Zdánlivý výkon odebíraný motorem ze sítě lze pak vypočítat z rov. (4.1) a jalový výkon z rov. (4.2). [18]

$$S_m = \frac{P}{\eta \cdot \cos\varphi} \quad (4.1)$$

$$Q_m = S_m \cdot \sin\varphi = \frac{P}{\eta \cdot \operatorname{tg}\varphi} \quad (4.2)$$

Asynchronní motor lze v generátorovém režimu zatížit přibližně stejným jmenovitým výkonem, který je schopný motor dodávat v motorickém režimu. V generátorovém režimu stroj pracuje pouze s nepatrně větším statorovým a rotorovým proudem a s o něco horším účínkem. Maximální moment je hlavní mechanický parametr asynchronního stroje, který je závislý na skluzu. Dále už stačí jen určit úhlovou rychlost a dostaneme rov. (4.3) pro výpočet mechanického výkonu. [18]

$$P = M \cdot \omega \quad (4.3)$$

3.2.2 Kompenzace jalového výkonu

Vlivem indukčnosti dochází u asynchronního motoru k jalovému výkonu odebíraného ze sítě, který je pro jeho princip nezbytný, ale pro distribuční a přenosové sítě velmi nepříznivý, proto je nutné ho kompenzovat. Kompenzace se většinou řeší pomocí připojené kapacity, která by se v ideálním případě měla měnit v závislosti na velikosti skluzu, aby udržela napětí a proud stále ve stejné fázi. Provozovatel distribuční sítě vyžaduje dodržení účinníku induktivního charakteru od 0,95 až 1 a kapacitního charakteru od 1 do 0,95. Pro malé vodní elektrárny se používá individuální druh kompenzace, takže jsou kondenzátory připojovány přímo s generátorem. Pro návrh kompenzace vycházíme z následujících rovnic: [18,20]

$$Q_{gen} = P \cdot tg\varphi \quad (4.4)$$

$$Q_{dov} = U_s \cdot I_{vin} \cdot \sin\varphi_k \quad (4.5)$$

Výsledný jalový výkon pro kompenzaci:

$$Q_c = Q_{gen} - Q_{dov} \quad (4.6)$$

Podle velikosti vypočítaného jalového výkonu zvolíme počet jednotlivých stupňů kompenzace, které budou postupně připojovány v závislosti na skluzu motoru. Jalový výkon kondenzátoru vychází z napětí, ke kterému je připojený hodnota kapacity kondenzátoru, pak lze vypočítat: [20]

$$Q_c = \omega \cdot C \cdot U^2 \rightarrow C = \frac{Q_c}{\omega \cdot U^2} \quad (4.7)$$

4 Simulační model v softwaru Dymola

4.1 Hydraulická část

Model vodní turbíny lze použít z knihovny Modelon, kde je vytvořený i příklad pro plynovou turbínu. Zvolený model turbíny je univerzální pro všechny typy turbín. Skládá se ze tří hlavních modelů „PartialRotationalMachine“, „PartialTurbine“ a „SignalDefinedTurbine“. Model „PartialRotationalMachine“ definuje základní veličiny a parametry pro vstupní a výstupní port.

Model „PartialTurbine“ je základním modelem turbíny, který je postaven na předchozím modelu a definuje obecný průtok a vztahy mezi porty.

```
equation
  der(flange.phi) = omega;
  shaftTorque = flange.tau;
  speed = omega/2/Modelica.Constants.pi;
  shaftPower = P_ext*eta_mech;
  shaftTorque = shaftPower/max(1, omega);

  if Medium.analyticInverseTfromh then
    state_outflow = Medium.setState_phX(portB.p, h_out, portB.X_outflow);
    T_out = Medium.temperature(state_outflow);
  else
    state_outflow = Medium.setState_pTX(portB.p, T_out, portB.X_outflow);
    Medium.specificEnthalpy(state_outflow) = h_out;
  end if;

  h_in = Medium.specificEnthalpy(stateA_inflow);

  h_out = (h_is - Medium.specificEnthalpy(stateA_inflow))*eta_is +
    Medium.specificEnthalpy(stateA_inflow);

  dp = portA.p - portB.p;
  pressureRatio = portA.p/portB.p;

  □
end PartialTurbine;
```

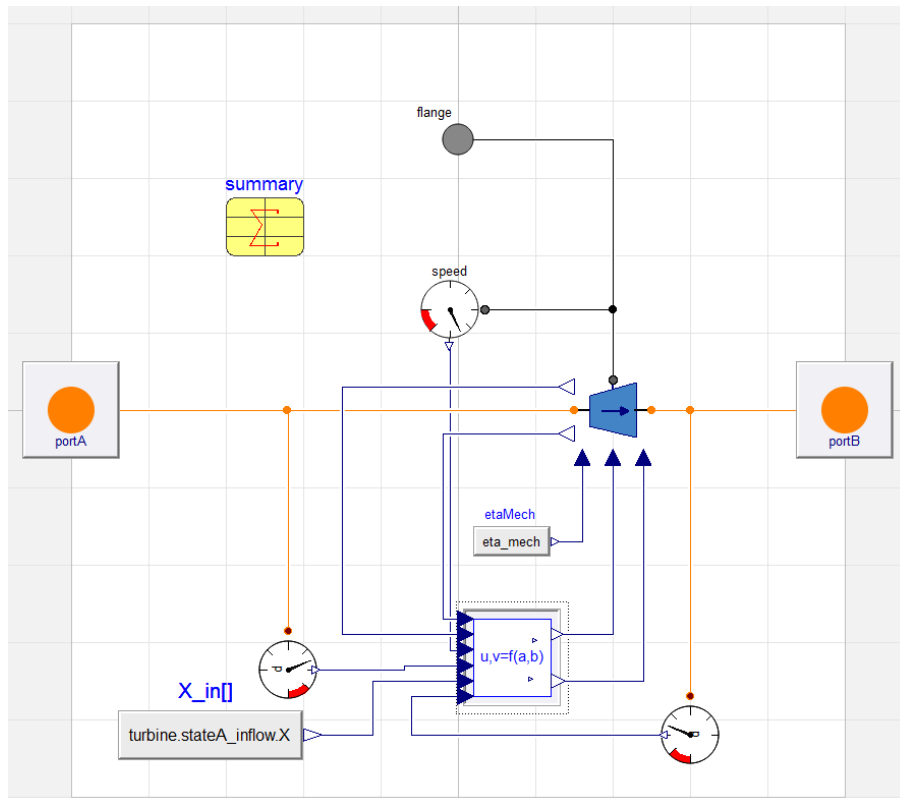
Obr. 29 – Hlavní rovnice modelu „PartialTurbine“

V modelu „SignalDefinedTurbine“ jsou k modelu „PartialTurbine“ přidány vstupní a výstupní porty pro možnost spojení s dalšími řídicími prvky, a dále rovnice, které je definují.

```
equation
  m_flow = mFlow;
  eta_is = etaIs;
  eta_mech = etaMech;
  T_inlet=T_in;
  h_inlet = h_in;
  □
end SignalDefinedTurbine;
```

Obr. 30 – Rovnice popisující model „SignalDefinedTurbine“

Výsledný model turbíny je dále složený z připojené tabulky, do které se zadají požadované charakteristiky podle zvolené turbíny, senzorů rychlosti a vstupních a výstupních tlaků a dvou tabulek pro zadání účinnosti a průtoku.



Obr. 31 – Grafický náhled celkového modelu turbíny

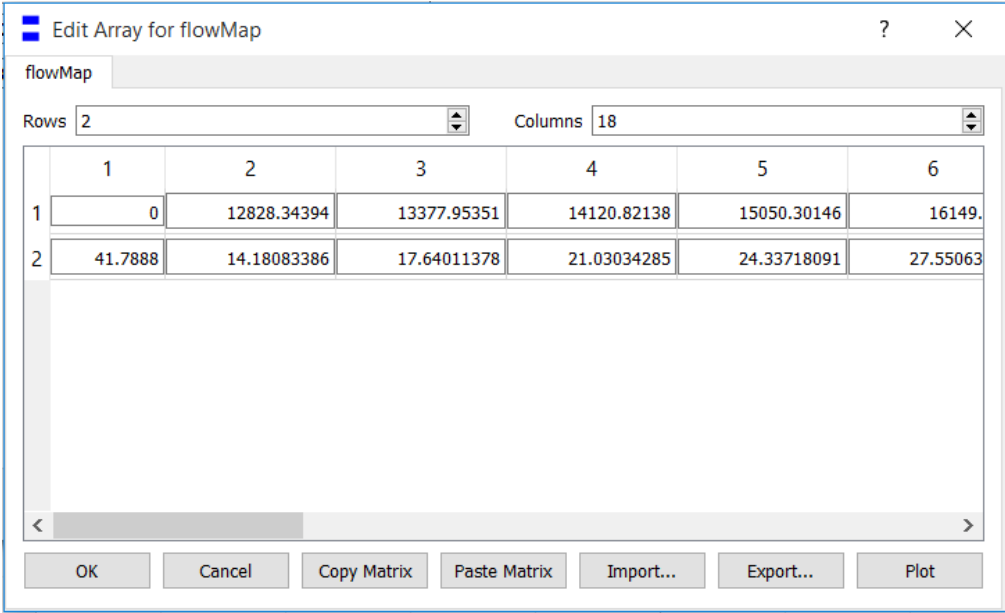
Hotový model turbíny je možné otestovat podle příkladu v knihovně „Modelon“, kdy je na vstupu a výstupu turbíny model definující tlak a teplotu. Dále výstup z turbíny na hřídel, která je řízená hodnotou otáček. Nastaví se referenční tlak a teplota ve všech třech modelech, kdy na vstupu se připočte pomocí připojeného řídicího bloku ještě tlak vypočítaný z čistého spádu z rov. (4.8). Otáčky turbíny jsou definovány přímo z řídicího bloku na hřídel a jsou v rad/s. V turbíně lze nastavit počáteční otáčky. Dále je potřeba v turbíně nastavit použití charakteristik turbíny pro výpočet z tabulek průtoku a účinnosti a zadat jmenovitou účinnost turbíny.

$$p_H = H \cdot \rho \cdot g \quad (4.8)$$

Charakteristiky se vkládají do tabulky průtokové a tabulky účinnosti. U průtokové tabulky je první buňka ignorovaná, první řádek definuje tlak v Pa, první sloupec přepočtené otáčky v rad/s a zbylé buňky přepočtený průtok podle následujících rovnic:

$$Q_{corrected} = \frac{m_{flow} \sqrt{\frac{T}{T_{ref}}}}{\frac{p_H}{p_{ref}}} [kg/s * \sqrt{K}/Pa] \quad (4.9)$$

$$\omega_{corrected} = \frac{\omega}{\sqrt{\frac{T}{T_{ref}}}} [rad/s] \quad (5.1)$$



flowMap

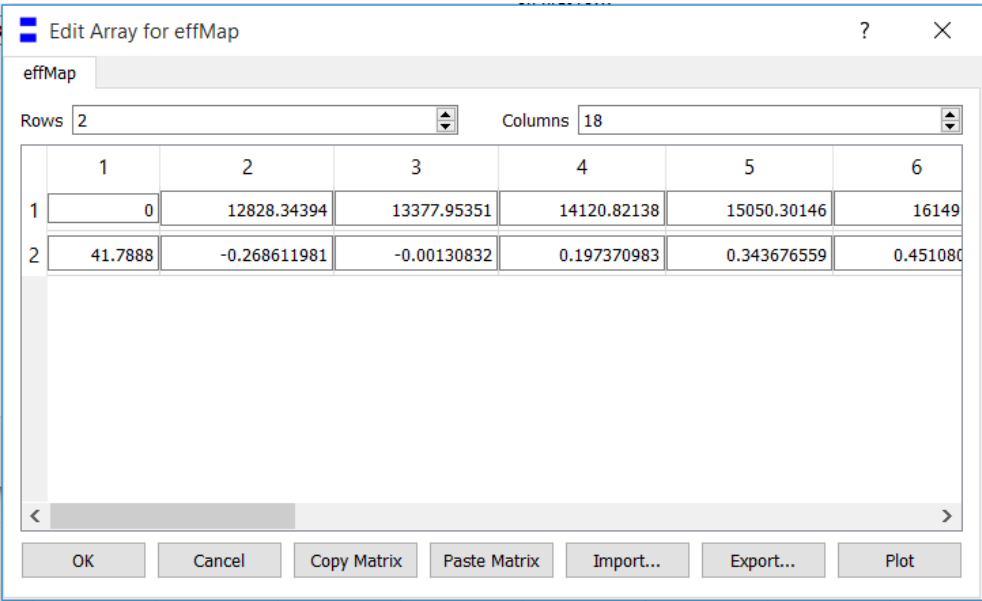
Rows: 2 Columns: 18

	1	2	3	4	5	6
1	0	12828.34394	13377.95351	14120.82138	15050.30146	16149.
2	41.7888	14.18083386	17.64011378	21.03034285	24.33718091	27.55063

Buttons: OK, Cancel, Copy Matrix, Paste Matrix, Import..., Export..., Plot

Obr. 32 – Průtoková tabulka

Tabulka účinnost je definovaná stejně jen s rozdílem, že místo průtoku se dosazuje účinnost. Vkládání hodnot je nejlepší pomocí vytvořených souborů s příponou „.csv“.



effMap

Rows: 2 Columns: 18

	1	2	3	4	5	6
1	0	12828.34394	13377.95351	14120.82138	15050.30146	16149
2	41.7888	-0.268611981	-0.00130832	0.197370983	0.343676559	0.451080

Buttons: OK, Cancel, Copy Matrix, Paste Matrix, Import..., Export..., Plot

Obr. 33 – Tabulka účinnosti

4.2 Elektrická část

Asynchronní motor s klecí nakrátko lze použít z knihovny „Electricpower“. Je složený jednak z modelu rotoru, kde je definované tření a vzájemná reakce s kotvou motoru, a dále kotevní část motoru, která se skládá z několika modelů, které na sebe navazují. Kotva

motoru je složená z modelů a „Asynchron“, „AsynchronElectrical“, „AsynTransform“, „ACmachine“ a ze základních vstupních a výstupních portů.

V modelu „ACmachine“ jsou definovány základní veličiny jako je například počet pól párů, úhlová rychlost elektrického pole, moment hřídele.

```
equation
  if refRotor then
    Connections.root(term.theta);
  end if;

  pp*airgap.phi = phi_el;
  airgap.tau = -pp*tau_el;
  w_el = der(phi_el);

  □
end ACmachine;
```

Obr. 34 – Hlavní rovnice popisující model „ACmachine“

Model „AsynTransform“ obsahuje vztahy pro Parkovu transformaci.

```
initial equation
  if initialEq_en then
    if system.stIni then
      phi_el = phi_el_ini;
      der(w_el) = 0;
    else
      phi_el = phi_el_ini;
      w_el = w_el_ini;
    end if;
  end if;

equation
  v_sdqo = Park0*v_abc;
  i_abc = transpose(Park0)*i_sdqo;
  □
end AsynTransform;
```

Obr. 35 – Hlavní rovnice popisující model „AsynTransform“

V modelu „AsynchronElectrical“ jsou definovány parametry podle motoru dle náhradního schématu.

```

initial equation
  if system.steadyIni and steadyIni_en then
    der(psi_sdq) = omega[1]*{-psi_sdq[2], psi_sdq[1]};
    der(i_sdqo[3]) = 0;
    der(psi_rd) = omega[1]*(-psi_rq);
    der(psi_rq) = omega[1]*psi_rd;
  elseif system.steadyIni then
    der(psi_rd) = omega[1]*(-psi_rq);
    der(psi_rq) = omega[1]*psi_rd;
  end if;

equation
  psi_sdq = diagonal(c.L_s[1:2])*i_sdqo[1:2] + {L_m*i_rd, L_m*i_rq};
  psi_rd = L_m*i_sdqo[1] + L_r*i_rd;
  psi_rq = L_m*i_sdqo[2] + L_r*i_rq;

  if system.transientSim then
    der(psi_sdq) + R_s*i_sdqo[1:2] = v_sdqo[1:2];
    c.L_s[3]*der(i_sdqo[3]) + R_s*i_sdqo[3] = v_sdqo[3];
    der(psi_rd) - w_el*(-psi_rq) + diagonal(R_r)*i_rd = v_rd;
    der(psi_rq) - w_el*psi_rd + diagonal(R_r)*i_rq = v_rq;
  else
    R_s*i_sdqo[1:2] = v_sdqo[1:2];
    R_s*i_sdqo[3] = v_sdqo[3];
    -w_el*(-psi_rq) + diagonal(R_r)*i_rd = v_rd;
    -w_el*psi_rd + diagonal(R_r)*i_rq = v_rq;
  end if;

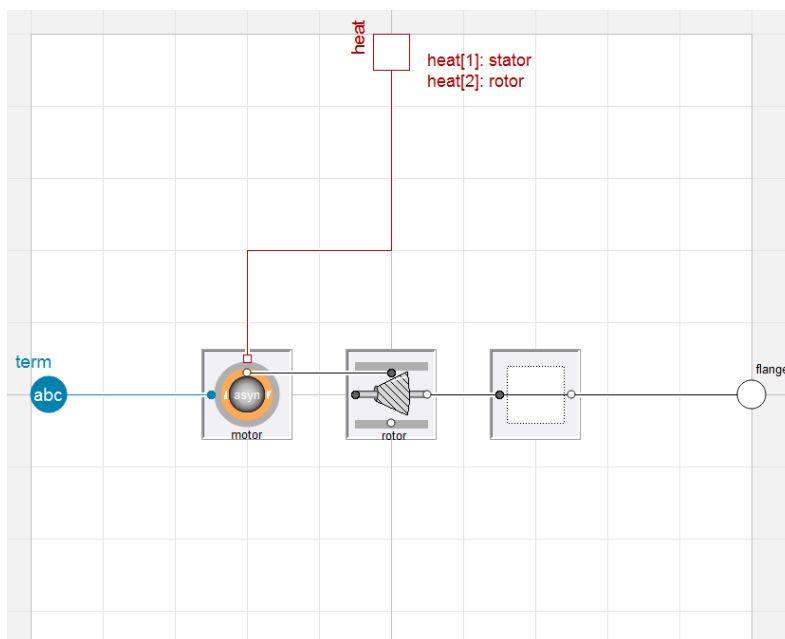
  slip = (w_el/sum(omega) - 1);
  tau_el = i_sdqo[1:2]*{-psi_sdq[2], psi_sdq[1]};
  pThermal = if add_thermal then {R_s*i_sdqo*i_sdqo, diagonal(R_r)*i_rd*i_rd + diagonal(R_r)*i_rq*i_rq} else {0, 0}
    "thermal power {stator, rotor}";
a
end AsynchronElectrical;

```

Obr. 36 – Hlavní rovnice popisující model „AsynchronElectrical“

V modelu „Asynchron“ je pouze přidána tabulka pro zadání parametrů a ikona klece.

Pak už následuje model „ASM“ kde je kotva motoru spojená s modelem rotoru.



Obr. 37 – Grafický náhled celkového modelu asynchronního motoru.

5 Případová studie – MVE Husinec

Pro vytvoření simulačního modelu jsem si zvolil malou vodní elektrárnu, která se nachází v obci Husinec pod Šebelovým rybníkem na vodním toku Blanice. Elektrárna je vybudována na místo bývalého mlýna a uvedena do provozu byla v roce 1998. Jedná se o derivační typ vodního díla na řece Blanice a využití rybníku k akumulaci vody. [4,5]



Obr. 38 – Aktuální soustrojí Šebelova mlýna[5]

5.1 Specifikace MVE

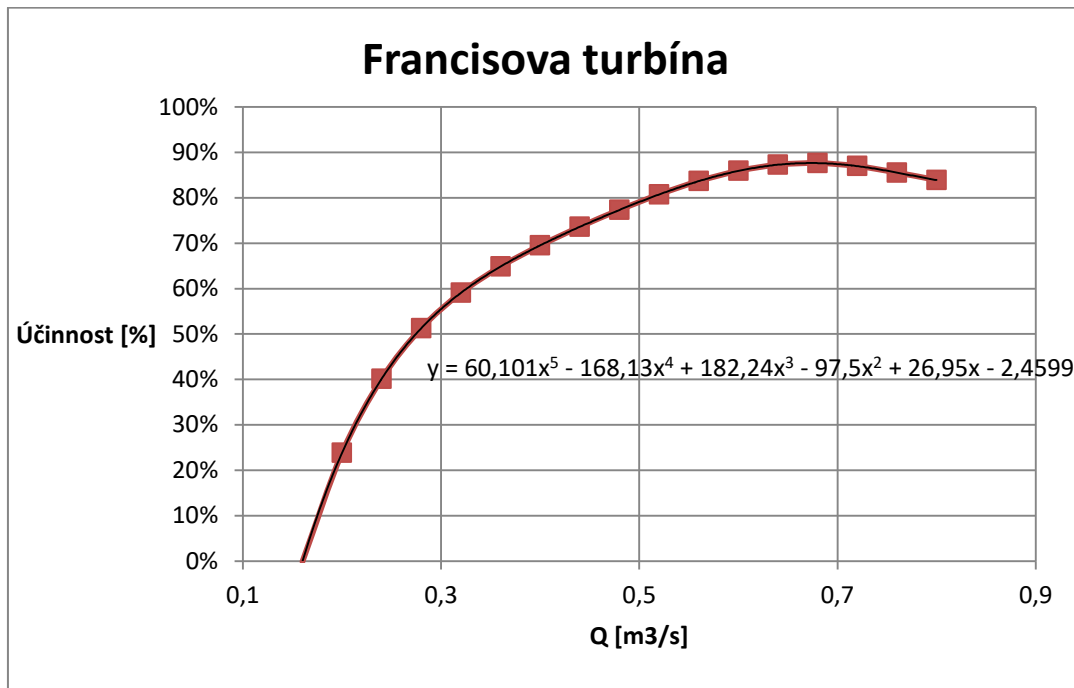
5.1.1 Hydraulická část

Hydraulická část je sestavena podle poskytnutých materiálů s následujícími parametry a je vytvořena pomocí přetlakové Francisovi turbíny s horizontální osou v kašnovém provedení a se suchým kolenem. Elektrárna disponuje spádem 4 m. [5]

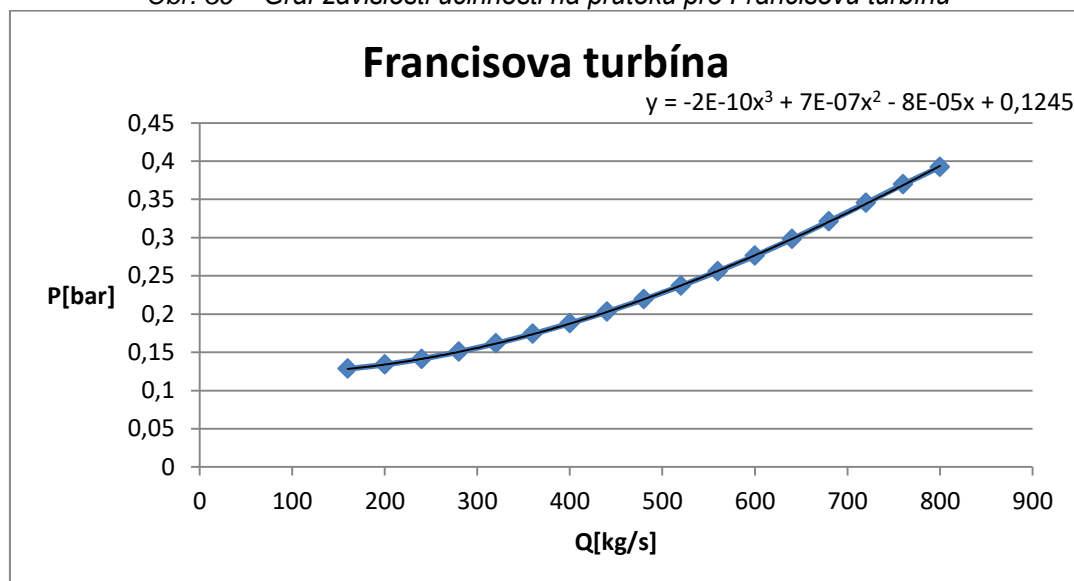
Tab. 1.4 Parametry turbíny

Parametr	Značení	Hodnota
Výkon turbíny	P_t	35kW spád 5,4 m průtok 0,8m ³ /s
Účinnost	η_t	83% spád 5,4 m průtok 0,8m ³ /s
		70% spád 4 m průtok 0,8 m ³ /s
Hltnost	Q_{max}	1 m ³ /s spád 5,4 m
Jmenovité otáčky	n_t	400 ot / min

Charakteristiku účinnosti jsem převzal z přechozí práce podle uvedeného zdroje a pro spádovou charakteristiku jsem použil průběh z obecné charakteristiky, která je uvedená v teoretické části a vytvořil podle parametrů elektrárny.



Obr. 39 – Graf závislosti účinnosti na průtoku pro Francisovu turbínu



Obr. 40 – Graf závislosti tlaku na průtoku pro Francisovu turbínu

Přivaděč je vytvořený pomocí derivace podle obr. 41, kde je vidět vtokový kanál z řeky Blanice do rybníka, jehož plocha začíná před vybudovaným jezem. U rybníku je zřízený přepadový kanál a přivaděč k turbíně. Z elektrárny se pak odtokovým kanálem opět vrací tok do řeky.



Obr. 41 - Mapa vodního toku Husinec[16]

5.1.1.1 Hydrologické údaje

Z informací ČHMÚ je průměrný roční průtok vodní elektrárnou Husinec $2,1 \text{ m}^3/\text{s}$, plocha povodí $212,28 \text{ km}^2$, nula vodočtu $502,3 \text{ m.n.m}$ (m n. m.) a průměrný roční stav 26 cm .

Tab. 1.5 - N-leté průtoky

N-leté průtoky	Q_1	Q_5	Q_{10}	Q_{50}	Q_{100}
$[\text{m}^3/\text{s}]$	26	60	80	139	171



Obr. 42 - Mapa rozmištění elektrárny Husinec a Šebelova mlýna [16]

Průtok pro uvažovanou lokalitu je možné zjistit přepočtem z průměrného průtoku elektrárny Husinec z rov. (5.2), pokud známe průtokové profily pro obě lokality. Poměr průtokových profilů jsem odhadl na 0,8.

$$Q_l = \frac{F_1}{F_M} \cdot Q_a = 0,8 \cdot 2,1 = 1,68 [m^3/s] \quad (5.2)$$

Přivaděčem je z tohoto výsledného průměrného průtoku odebírána přibližně polovina, takže zvolený průměrný průtok je pro námi uvažovanou lokalitu přibližně $0,8 \text{ m}^3/\text{s}$.

Za předpokladu, že známe průtok $0,8 \text{ m}^3$, účinnost 0,7 a hrubý spád 4 m, lze předpokládaný výkon turbíny vypočítat ze vztahu:

$$P = 9,81 \cdot Q \cdot H \cdot \rho_v \cdot \eta_t = 9,81 \cdot 0,8 \cdot 4 \cdot 1000 \cdot 0,7 = 21,974 \text{ kW} \quad (5.3)$$

Pro skutečný výkon elektrárny je potřeba ještě vypočítat celkovou účinnost. Celková účinnost se skládá z účinnosti turbíny, elektrického generátoru, převodu a transformátoru. Účinnost turbíny je daná výrobcem. Účinnost elektrického generátoru jsem stanovil vzhledem k zatížení na 0,85. Účinnost řemenového převodu jsem zvolil 0,97, protože se

běžně pohybují v rozmezí 0,96 až 0,98. Výpočet celkové účinnosti pak dostaneme z následujícího výpočtu:

$$\eta_c = \eta_t \cdot \eta_g \cdot \eta_{př} = 0,7 \cdot 0,87 \cdot 0,97 = 0,59 [-] \quad (5.4)$$

5.1.1.2 Převody

Převod je řešený pomocí klínového řemene, u kterého je účinnost 0,97. Pro turbínu je dáno 400 ot/min. U motoru jsou jmenovité otáčky 730 ot/min a synchronní otáčky podle rov. (5.5) 750 ot/min. Převod na vyšší otáčky se následně vypočítá podle rov. (5.6). „Nadsynchronní“ otáčky jsem tedy určil na 770 ot/min.

$$n = \frac{f \cdot 60}{p} = \frac{50 \cdot 60}{4} = 750 \text{ ot/min} \quad (5.5)$$

$$P_{ř} = \frac{n_g}{n_t} = \frac{770}{400} = 1,925 [-] \quad (5.6)$$

5.1.1.3 Regulace

Regulace u Francisovy turbíny je zajištěna pomocí regulačních kruhů, které ovládají lopatky na vstupu do turbíny. Dále se řídí stavidlo pomocí servomotoru se záložním zdrojem pro případ, kdyby došlo k výpadku sítě a bylo nutné zastavit průtok. Stav hladiny je zajištěn pomocí dvou čidel. Jedním čidlem určíme minimální výšku hladiny a druhým výšku hladiny, při kterém dojde k opětovnému rozběhu. Ovládání čidel je tvořeno pomocí spínacích relé.

5.1.2 Elektrická část

Elektrárna je osazena soustrojím o výkonu 22kW. Soustrojí o výkonu 6kW již nebylo po povodni v roce 2002 již obnoveno. Elektrickou část tvoří osmipólový třífázový asynchronní motor, na který je síla přenášena z turbíny pomocí řemenice. Přípojka je zřízena pomocí kabelu o délce 10 m a vzdálenost od distribučního transformátoru je 150m.[4, 5]

5.1.2.1 Asynchronní motor

Tab. 1.6 Parametry motoru

Parametr	Veličina	Hodnota
Jmenovité napětí	U_n	3 x 400 V, 50 Hz
Jmenovitý výkon	P_n	30 kW
Jmenovitý proud	I_n	63 A
Jmenovité otáčky	n	730 ot / min

Asynchronní motor s klecí nakrátko nelze použít bez připojení k síti, protože pro jeho funkci je nutná jalová složka proudu. Tento typ generátoru tedy nemůže pracovat jako nouzový zdroj při případném „blackoutu“. Pro připojení k síti v generátorovém režimu stačí motor připojit k síti a rozběhnout na jmenovité otáčky v motorickém režimu. Následně se spustí voda na turbínu a po dosažení „nadsynchronních“ otáček začne generátor dodávat energii do sítě. Zastavení generátoru probíhá opačně. Při zatížení motoru přibližně ze 70% jsem našel přibližnou hodnotu účinnosti generátoru 0,87 a účiníku 0,73. Výkon generátoru vypočteme následovně:

$$P = 9,81 \cdot Q \cdot H \cdot \rho_v \cdot \eta_c = 9,81 \cdot 0,8 \cdot 4 \cdot 1000 \cdot 0,59 = 18,52 \text{ kW} \quad (5.7)$$

5.1.2.2 Kompenzace

Pro připojení generátoru k distribuční síti je nutné dodržet pravidlo pro udržení účiníku v rozmezí, které udává distributor sítě. Nedodržení vede mimo jiné ke kolísání napětí sítě a provozovateli hrozí pokuta. Účiník je nutné dodržet v rozmezí 0,95 až 1 při induktivním i kapacitním charakteru. Kompenzace se provádí připojováním kondenzátorů zároveň při připojení generátoru. Vzhledem k provozu pouze při maximálním výkonu, kterého je docíleno akumulací vody, je potřeba pouze jednoduchá kompenzace bez stupňovitého připojování kondenzátorů v závislosti na výkonu, jako je tomu u jiných elektráren. Pro výpočet kompenzace potřebujeme stanovit jalový výkon generátoru a od něj odečíst vypočítaný dovolený jalový výkon, který lze ze sítě odebírat, přičemž kompenzujeme na zvolený $\cos\varphi_k=0,98$. Nutné je také dodržet frekvenci, která musí být v rozmezí -6% až +4% od nominální frekvence distribuční sítě.

Tab. 1.7 – Parametry pro výpočet kompenzace generátoru

U_s	$\sqrt{3} \cdot 400 \text{ V}$
η_{gen}	0,92
$\cos\varphi$	0,73
$\text{tg}\varphi$	0,936
$\sin\varphi_k$	0,2
I_{vin}	63 A
P	30 kW

Jalový výkon generátoru a výkon dovolený odebírat ze sítě vypočítáme:

$$Q_{gen} = P \cdot \operatorname{tg} \varphi = 30 \cdot 10^3 \cdot 0,936 = 28,08 \text{ kVAr} \quad (5.8)$$

$$Q_{dov} = U_s \cdot I_{vin} \cdot \sin \varphi_k = \sqrt{3} \cdot 400 \cdot 63 \cdot 0,2 = 8,73 \text{ kVAr} \quad (5.9)$$

Z jejich rozdílu dostaneme výkon, který je nutný pro kompenzaci:

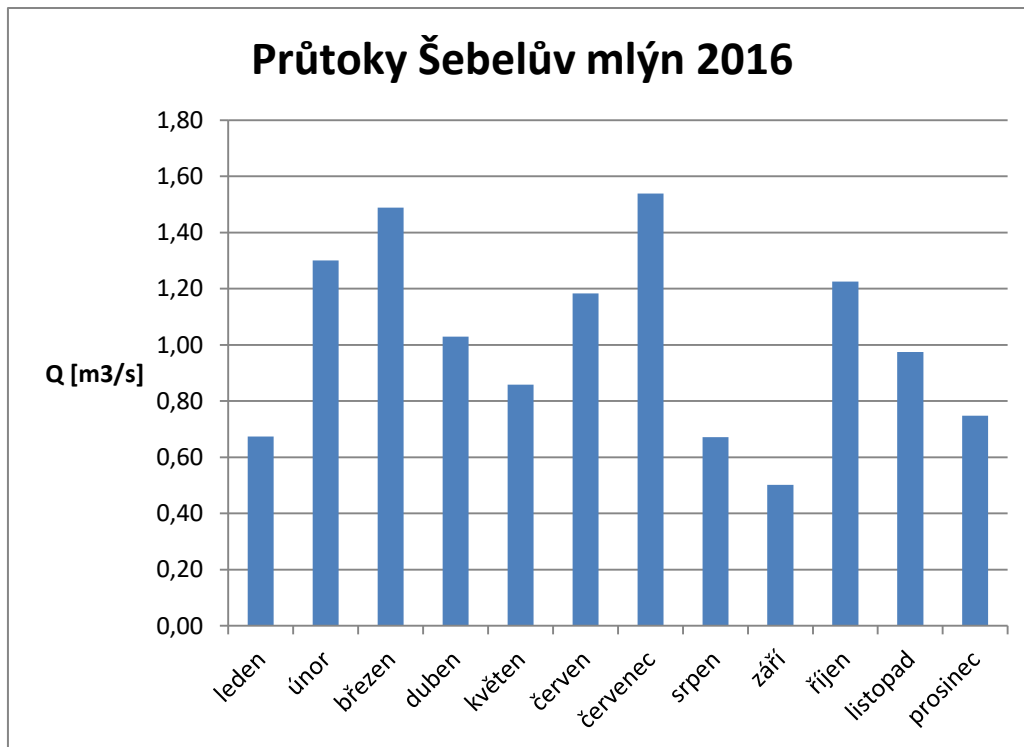
$$Q_c = Q_{gen} - Q_{dov} = (28,08 - 8,73)10^3 = 19,35 \text{ kVAr} \quad (6.1)$$

Výpočet potřebné kapacity kondenzátorů se vypočítá úpravou rovnice:

$$Q_c = \omega \cdot C \cdot U^2 \rightarrow C = \frac{Q_c}{\omega \cdot U^2} = \frac{19,35 \cdot 10^3}{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 400^2} = 384,96 \mu\text{F} \quad (6.2)$$

5.2 Orientační výpočet roční energetické bilance

Pro výpočet orientační roční energetické bilance uvažuji konstantní účinnost v celém výkonovém rozsahu. Výsledný dodávaný výkon do sítě za rok je tedy možné po poskytnutí měřených odtoků z limnigrafu u vodní elektrárny Husinec, které jsem získal od správy Povodí Vltavy, vypočítat zjednodušeně. Měření odtoků se provádělo po 24 hodinách vždy v 7:00 hod. Pro zjednodušení jsem vypočítal průměrné odtoky každý měsíc a přepočtl na průtoky pro uvažovanou lokalitu. Následně jsem z nich vytvořil diagram na obr. 43.



Obr. 43 – Graf průměrných měsíčních průtoků pro uvažovanou lokalitu

Z diagramu vyplývá, že vodní elektrárna je schopná plného provozu 8 měsíců v roce. Dále je v prosinci vyrobeno 90% měsíční výroby, v lednu a srpnu 70% a v září 50%. Do sítě soustrojí dodává 18,52 kW. Tento výkon přepočítáme na kWh:

$$P_{hod} = 18,52 \cdot 10^3 \cdot 1 = 18,52 \text{ kWh} \quad (6.3)$$

Vypočítáme přibližnou vyrobenou energii za 8 měsíců:

$$P_{den} = 18,52 \cdot 24 = 444,48 \text{ kWh} \quad (6.4)$$

$$P_{8m\acute{e}s.} = 444,48 \cdot 30,8 = 106\,675,2 \text{ kWh} \quad (6.5)$$

Potom vypočítáme vyrobenou energii za prosinec:

$$P_{prosinec} = 444,48 \cdot 0,9 \cdot 30,1 = 12\,108,96 \text{ kWh} \quad (6.6)$$

Dále vypočítáme výrobu za leden a srpen:

$$P_{leden,srpen} = 444,48 \cdot 0,7 \cdot 30 \cdot 2 = 18\,836,16 \text{ kWh} \quad (6.7)$$

Obdobně vypočítáme výrobu v září:

$$P_{září} = 444,48 \cdot 0,5 \cdot 30 \cdot 1 = 6\,727,2 \text{ kWh} \quad (6.8)$$

Po sečtení nám vyjde celková vyrobená energie za rok:

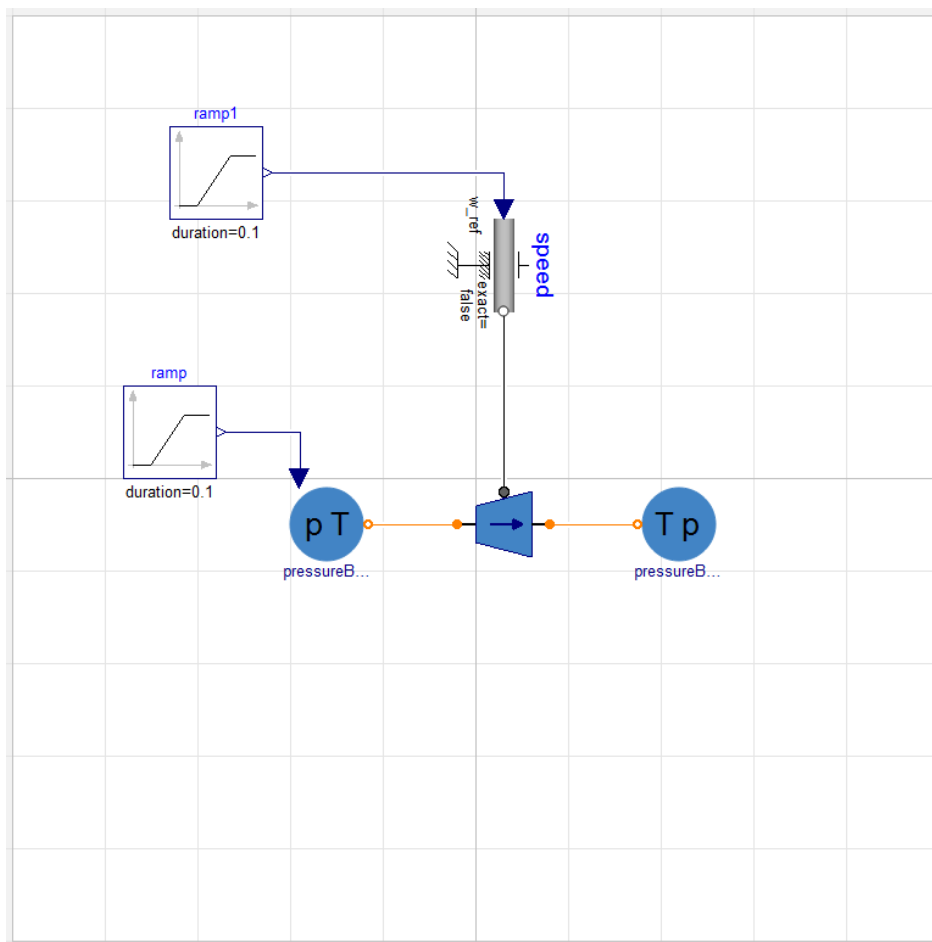
$$\begin{aligned} P_{rok} &= P_{8m\acute{e}s.} + P_{prosinec} + P_{leden,srpen} + P_{září} = \\ &= 106\,675,2 + 12\,108,96 + 18\,836,16 + 6\,727,2 = 144\,347,52 \text{ kWh} \end{aligned} \quad (6.9)$$

5.3 Simulace v sw. Dymola

5.3.1 Hydraulická část

Hotový model turbíny je možné otestovat podle příkladu v knihovně „Modelon“, kdy je na vstupu a výstupu turbíny model definující tlak a teplotu. Dále výstup z turbíny na hřídel, slouží u tohoto modelu také pro definování otáček turbíny pomocí modelu „speed“. Jmenovité otáčky turbíny, které jsou 400ot/min, jsou definovány z řídicího bloku a jsou v rad/s. Nastavil jsem referenční tlak na 1 Bar a teplotu 15°C ve všech třech modelech, kdy na vstupu se připočte pomocí připojeného řídicího bloku ještě tlak vypočítaný z čistého spádu z rov. (7.1). V turbíně lze nastavit počáteční otáčky. Dále je potřeba v turbíně nastavit použití charakteristik turbíny pro výpočet z tabulek průtoku a účinnosti a zadat jmenovitou účinnost turbíny na 0,7.

$$p_H = H \cdot \rho \cdot g = 4 \cdot 1000 \cdot 9,81 = 39\,240 \text{ Pa} \quad (7.1)$$



Obr. 44 – Schéma pro testování vodní turbíny

Charakteristiky turbíny se vkládají do tabulky průtokové a tabulky účinnosti. U průtokové tabulky je první buňka ignorovaná, první řádek definuje tlak v Pa, první sloupec přepočtené otáčky v rad/s a zbylé buňky přepočtený průtok podle následujících rovnic s dosazením pro příklad výpočtu:

$$Q_{corrected} = \frac{m_{flow} \sqrt{\frac{T}{T_{ref}}}}{\frac{p_H}{p_{ref}}} = \frac{400 \cdot \sqrt{\frac{15}{15}}}{\frac{112828,3439}{1.10^5}} = 14,180834 [kg/s * \sqrt{K}/Pa] \tag{7.2}$$

$$\omega_{corrected} = \frac{\omega}{\sqrt{\frac{T}{T_{ref}}}} = \frac{41,7888}{\sqrt{\frac{15}{15}}} = 41,7888[rad/s] \tag{7.3}$$

0	12828,34	13377,95	14120,82	15050,3	16149,77	17400,07	18784,9	20294,26	21925,79
41,7888	14,18083	17,64011	21,03034	24,33718	27,55064	30,66438	33,67431	36,57697	39,36821

23684,13	25578,3	27616,98	29801,85	32118,81	34527,34	36947,68	39246,05
42,04258	44,59369	47,01569	49,30592	51,46882	53,52072	55,49565	57,45226

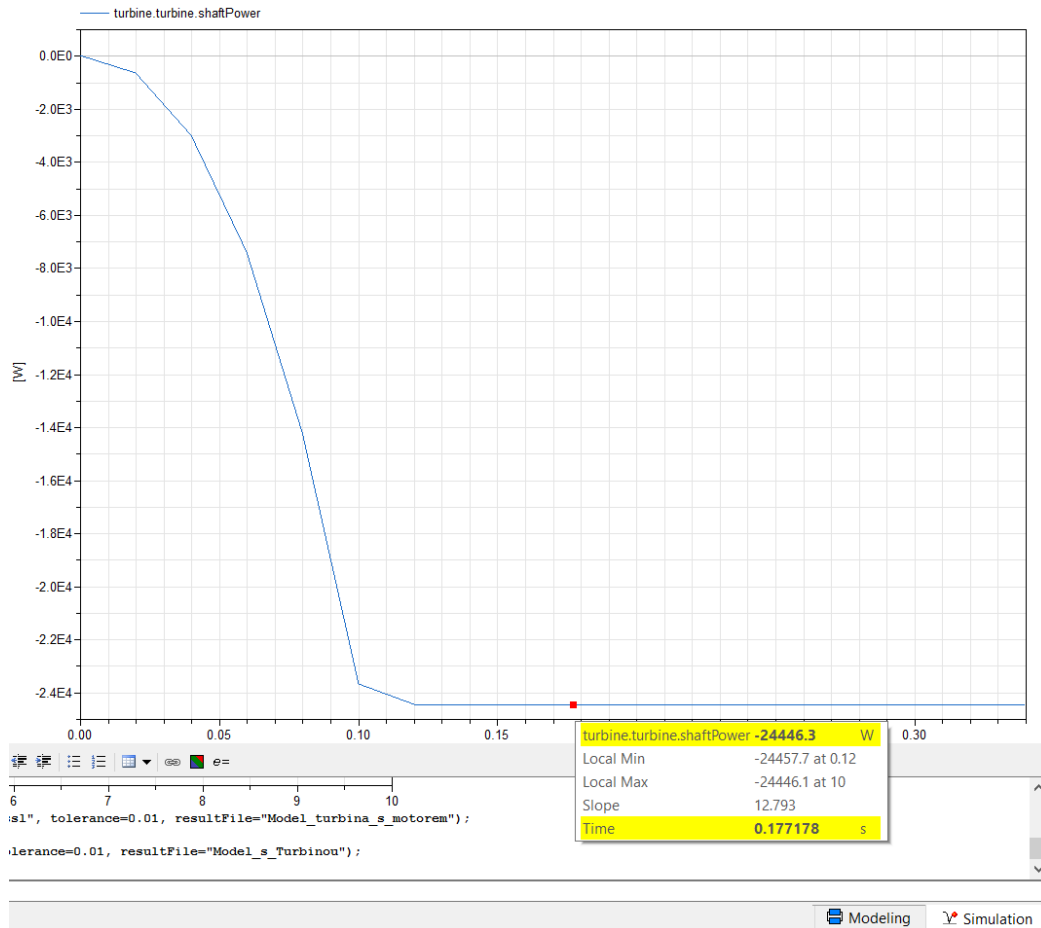
Tab.1.8 – Průtoková tabulka

0	12828,34	13377,95	14120,82	15050,3	16149,77	17400,07	18784,9	20294,26	21925,79
41,7888	-0,26861	-0,00131	0,197371	0,343677	0,45108	0,530516	0,590624	0,637991	0,677392

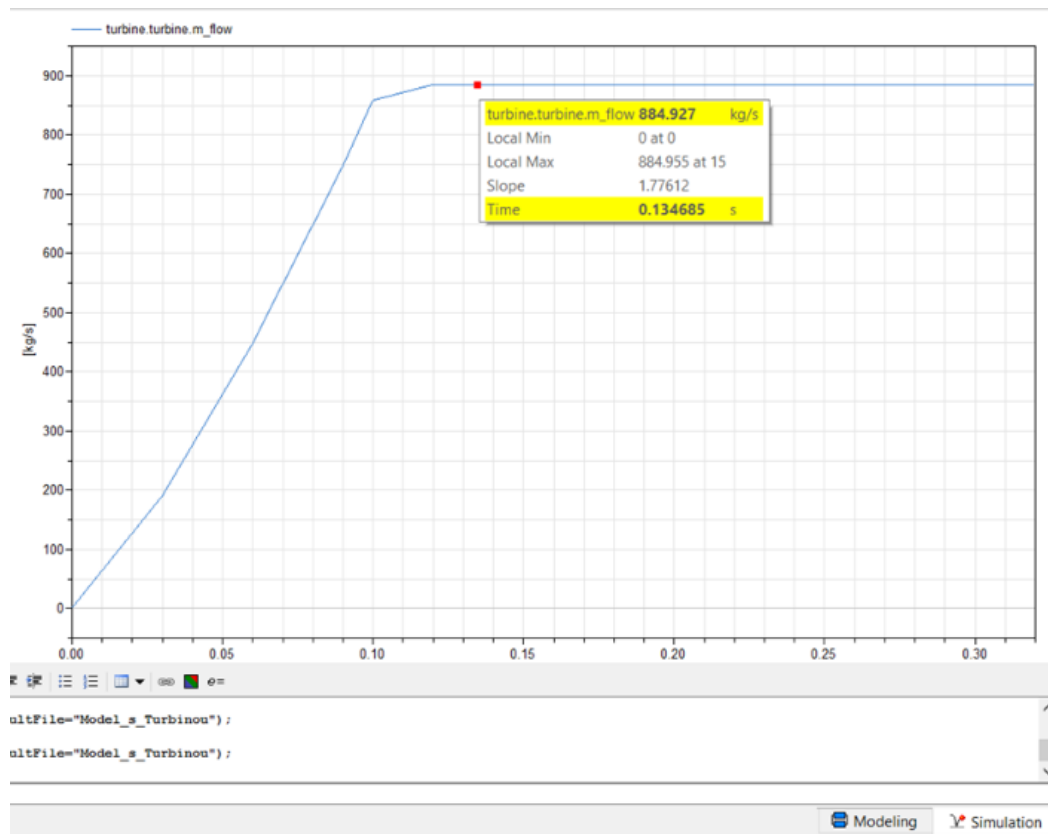
23684,13	25578,3	27616,98	29801,85	32118,81	34527,34	36947,68	39246,05
0,712034	0,743797	0,773475	0,80102	0,825781	0,846752	0,862806	0,872944

Tab. 1.9 – Tabulka účinnosti

Po spuštění simulace vyšel a při zadané účinnosti 0,7 výsledný výkon 24 446,1 W a průtok turbínou je po měření z grafu 884,927 kg/s.



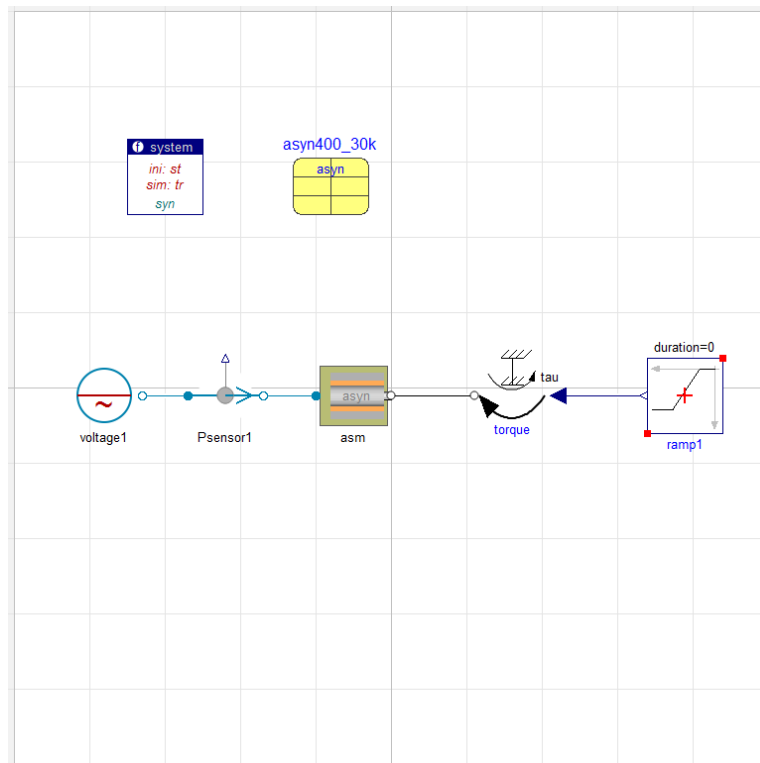
Obr. 45 – Graf výkonu turbíny



Obr. 46 – Graf průtoku turbínou

5.3.2 Elektrická část

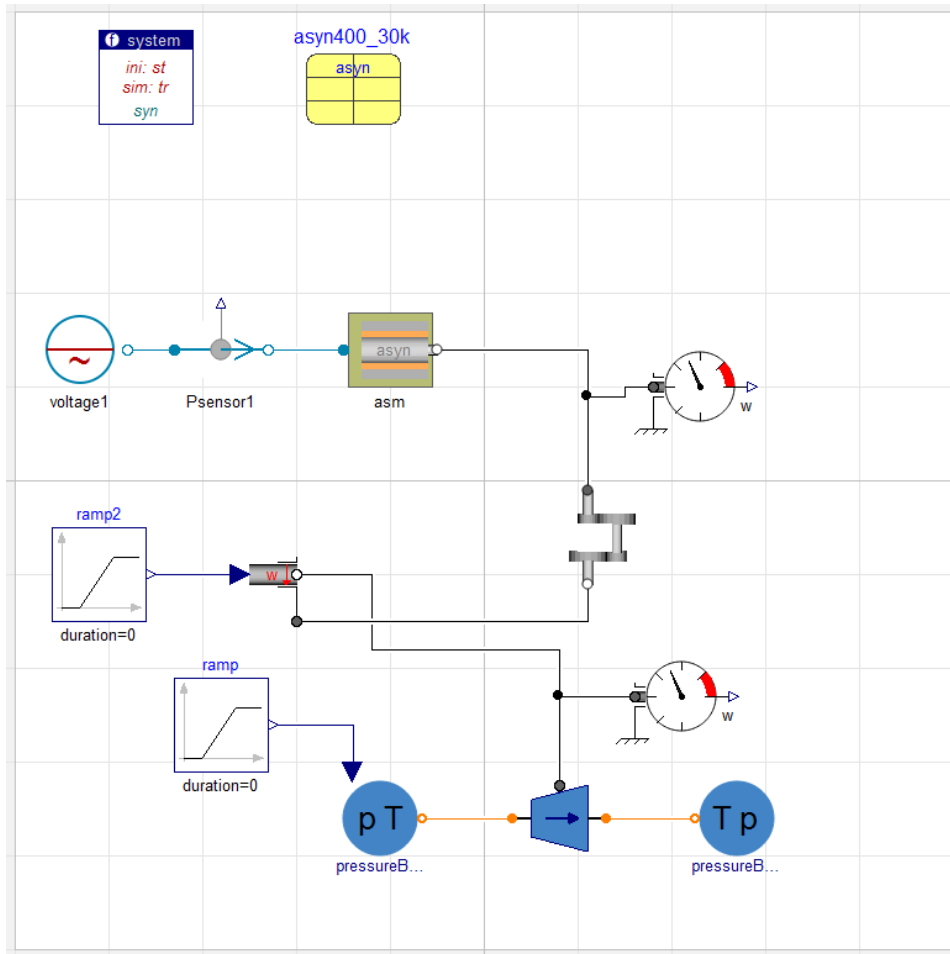
Pro testování funkce motoru jsem sestavil následující simulaci, kdy je motor připojený ke střídavému zdroji a na hřídel je řídicím signálem zadaný zátěžný moment. Základní parametry, jako je například frekvence, jsou definovány pomocí systémové tabulky pro jednodušší spojení s navazujícími modely. Parametry motoru jsou zadány přes tabulku „asyn400_30k“, která už je s parametry odpovídajícího motoru a bylo už jen nutné zadat 4 pólové dvojice, nominální napětí sítě 400V, zdánlivý jmenovitý výkon 30 kVA a frekvenci 50Hz přepočtenou na radiány. Pro měření bylo nutné připojit i sensor výkonu.



Obr. 47 – Schéma pro testování asynchronního motoru

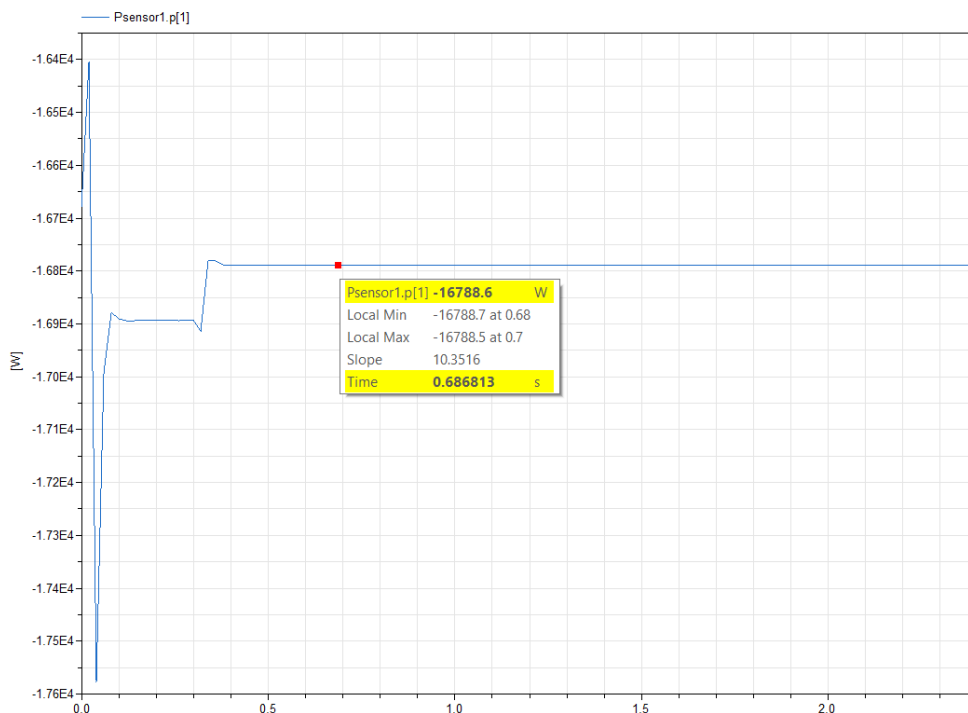
5.3.3 Výsledky simulace

Po odzkoušení turbíny a motoru v „generátorickém“ režimu jsem k propojení použil model „Velocity“ z knihovny „Modelon“, který představuje hřídel turbíny a udává její referenční otáčky a zároveň i výstupní otáčky na převodovku, která roztáčí generátor. Převodovku zajišťuje model „Gear“, do kterého stačí zadat otáčky z turbíny a potřebné výstupní „nadsynchronní“ otáčky. Dále jsem pro kontrolu otáček vložil senzory připojené k hřídelím.



Obr. 48 – Schéma spojení turbíny s motorem

Výsledný výkon při zadání předpokládané účinnosti 0,7 je podle odečtení z grafu simulace 16,789 kW.



Obr. 49 – Výsledný výkon generátoru

6 Závěr

Po srovnání simulačních nástrojů Simulink a Dymola je asi hlavním poznatkem, že použití nástroje Simulink je vhodné pro jednodušší modely a především pro simulace elektrických obvodů. Zatímco nástroj Dymola je díky dostupnosti značně rozšířených knihoven z různých oblastí fyzikálních procesů vhodný pro rozšířenější modely.

Jedním z hlavních cílů bylo vytvořit simulační model malé vodní elektrárny, kdy jsem využil modely ze tří knihoven a pomohly mně již hotové příklady spojení modelů. Zvolená lokalita disponuje Francisovou turbínou, pro kterou neobsahují knihovny konkrétní model, a proto jsem použil univerzální model, do kterého jsem vložil vytvořenou spádovou charakteristiku podle parametrů vodního díla a získanou charakteristiku účinnosti z již jiné vypracované práce pro tuto lokalitu. Pro nastavení turbíny jsem použil modely tlaku a teploty, které jsou připojeny na vstupu a výstupu turbíny a nahrazují modely horní a spodní nádrže. Zadání otáček turbíny je u tohoto modelu řešeno přes konektor, který je zároveň výstupem výkonu a momentu. Testování funkce motoru je řešeno podle příkladu z knihoven, kdy jsem na hřídel motoru zadával zátěžný a následně urychlovací moment, čímž jsem ověřil jeho parametry včetně schopnosti dodávání výkonu do sítě.

Z případové studie u turbíny při 400 ot/min a účinnosti 0,7 vyšel výkon 21,974 kW při jmenovitém průtoku 0,8 m³/s. Celkové soustrojí má podle výpočtů při celkové účinnosti 0,59 výkon 18,52 kW. Ze simulace při započítání dané účinnosti turbíny 0,7 je výkon 24,446 kW, při průtoku 0,885 m³/s a 400 ot/min, což je vyšší hodnota než z matematického výpočtu. Odchylna vznikla nejspíše při přepočtu průtoku a účinnosti, které jsou vypočítávány ze zadaných charakteristik turbíny. To platí následně i u celkového výkonu soustrojí kdy vyšel dle simulace výkon 16,789 kW. Konkrétnější výsledek by bylo možné získat nejspíše po ještě přesnějších výpočtech a většího proložení charakteristik nebo sestrojení závislosti průtoku na otáčkách a aplikace do obou charakteristických tabulek.

Jedním z výsledků této práce mělo být nejen srovnání výkonů získaných pomocí matematických výpočtů s výsledky ze simulace, ale i srovnání roční energetické bilance, pro kterou už se mi nepodařilo sestavit odpovídající model. Domnívám se, že tento zcela nesplněný cíl tolik neovlivnil podstatu práce.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] MATHWORKS. Product Documentation [online]. [cit. 2017-04.25]. Dostupné z: <https://www.mathworks.com/products/simulink/features.html>
- [2] DASSAULT SYSTEMES. Product Documentation [online]. [cit. 2017-04.27]. Dostupné z: <https://www.3ds.com/products-services/catia/products/dymola>
- [4] ATLAS ZAŘÍZENÍ VYUŽÍVAJÍCÍCH OBNOVITELNÉ ZDROJE ENERGIE. Zařízení [online]. [cit. 2017-04.30]. Dostupné z: <http://calla.ecn.cz/atlas/detail.php?kat=1&id=487>
- [5] Sirový M.: *Řízení a monitorování MVE pomocí PLC*, bakalářská práce, ZČU, Plzeň, 2006
- [6] O ENERGETICE. Asynchronní stroje [online]. [cit. 2017-05.02]. Dostupné z: <http://oenergetice.cz/technologie/elektroenergetika/asynchronni-stroje-konstrukce-princip-funkce-a-rizeni/>
- [7] BARTOŠ, Václav, ČERVENÝ, Jan, HRUŠKA, Josef, KOTLANOVÁ, Anna, SKALA, Bohumil. *Elektrické stroje*. 1. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2006. 139 s. ISBN 80-7043-444-9.
- [8] VAVŘIŇÁK, Petr. *Elektrické stroje a přístroje*. Střední škola Elektrotechnická, Ostrava, 2006 [online]. [cit. 2017-05.02]. Dostupné z: http://www.sse-najizdarne.cz/dokumenty/studijni_materialy/elektricke_stroje_a_pristroje.pdf
- [9] SOKOL, Zdeněk. *Asynchronní stroje*. Střední průmyslová škola elektrotechniky a informačních technologií, Dobruška, [online]. [cit. 2017-05.03]. Dostupné z: <http://www.spse.dobruska.cz/download/sokol/AM.pdf>
- [10] VRÁNA, Václav. *Asynchronní stroje*. 2005 [online]. [cit. 2017-05.03]. Dostupné z: http://fei1.vsb.cz/kat420/vyuka/hgf/elektrotechnika/sylab_asynchronni_stroje_bc.pdf
- [11] HOLATA, Miroslav. *Malé vodní elektrárny, projektování a provoz*. 1. vyd. Praha 2: Akademie věd České Republiky, 2002. 271 s. ISBN 80-200-0828-4.
- [12] MALÁ VODA, *Stránky o využití vodních toků k výrobě elektrické energie* [online]. [cit. 2017-05.03]. Dostupné z: <http://malavoda.cz/>
- [13] LAIKA, Viktor. *Abeceda malých vodních pohonů*, [online]. [cit. 2017-05.03]. Dostupné z: <http://mve.energetika.cz/index.htm>
- [14] ELEKTRONICKÁ UČEBNICE. *Energie vody*, [online]. [cit. 2017-05.03]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/2069>
- [15] Český hydrometeorologický ústav. *Hlásná a předpovědní povodňová služba*, [online]. [cit. 2017-05.04]. http://hydro.chmi.cz/hpps/popup_hpps_prfdyn.php?seq=307259
- [16] Mapy.cz. *Mapový portál*, [online]. [cit. 2017-05.04]. www.mapy.cz
- [17] GABRIEL, Pavel, KUČEROVÁ, Jitka. *Navrhování vodních elektráren*. 1. vyd. Praha 6: ČVUT, 2000. 195 s. ISBN 80-01-02214-5.
- [18] GABRIEL, Pavel, ČIHÁK, František, KALANDRA, Petr. *Malé vodní elektrárny*. 1. vyd. Praha 6: ČVUT, 1998. 321 s. ISBN 80-01-01812-1.
- [19] Jzed, *Energie vody*, [online]. [cit. 2017-05.21]. Dostupné z: http://ok1zed.sweb.cz/s/el_vodniel.htm
- [20] Bešta, Martin, *Kompenzace účinníku*, [online]. [cit. 2017-05.22]. Dostupné z: <http://www.mbest.cz/wp-content/uploads/2013/01/T2.2-Kompenzace-%C3%BA%C4%8Din%C3%ADku.pdf>
- [21] Ministerstvo vnitra Spojených států amerických předsednictva rekultivace, *Selecting hydraulic reaction turbines*, [online]. [cit. 2017-05.23]. Dostupné z: https://www.usbr.gov/tsc/techreferences/hydraulics_lab/pubs/EM/EM20.pdf