

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA ELEKTROENERGETIKY A EKOLOGIE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Modelování turbogenerátorů tepelných elektráren

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2014/2015

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Kryštof BENEŠ**
Osobní číslo: **E13N0066P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektroenergetika**
Název tématu: **Modelování turbogenerátorů tepelných elektráren**
Zadávací katedra: **Katedra elektroenergetiky a ekologie**

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

1. Popište principy přeměny tepla na elektřinu v turbogenerátorech
2. Sestavte matematický model turbogenerátoru
3. Navrhněte algoritmické řešení matematického modelu
4. Naprogramujte řešení v objektově orientovaném jazyku SWING
5. Porovnejte modelové výsledky s provozem reálného zařízení

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**
Rozsah pracovní zprávy: **30 - 40 stran**
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**
Seznam odborné literatury:


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

Vedoucí diplomové práce: **Doc. Ing. Emil Dvorský, CSc.**
Katedra elektroenergetiky a ekologie

Datum zadání diplomové práce: **15. října 2014**
Termín odevzdání diplomové práce: **11. května 2015**


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




Doc. Ing. Karel Noháč, Ph.D.
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2014

Abstrakt

Předkládaná diplomová práce popisuje přechod elektrárenského bloku tepelné elektrárny o výkonu 200 MW ze jmenovitého provozu do ostrovního režimu.

V první části diplomové práce popisují funkci a rozdělení parních turbín a jejich výrobce. Dále se zaměřuji na funkci a princip synchronního turboalternátoru včetně jeho stručného matematického popisu. Ve třetí části rozebírám dva funkční stavy turbosoustrojí a to turbosoustrojí pracující do tvrdé sítě a turbosoustrojí pracující v ostrovním režimu. Předposlední část diplomové práce pojednává o popisu vlastního modelu bloku tepelné elektrárny vytvořeného v objektově orientovaném jazyku SWING. Na závěr porovnávám výstupy modelu s reálným provozem bloku tepelné elektrárny o výkonu 200 MW.

Abstract

This master theses is aimed at describing the transition from classical to island mode operation of thermal power plant.

The first section describes the function, distribution and manufacturer of condensing steam turbines. Further is described function, principle and distribution of synchronous turbogenerators. The next section deals with a brief mathematical description of these machines. In the third part is described two functional states of turbo generator - island mode and nominal rated state. The fifth part deals with the description of the model of block thermal power plant itself. In the end, Is compared model outputs with real block thermal power plant of 200 MW .

Klíčová slova

Turbogenerátor, parní turbína, regulační ventil, bypass, ostrovní režim, model, SWING

Key words

Turbogenerator, steam turbine, control valve, bypass, island operation, model, SWING

Prohlášení

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

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

.....

podpis

V Plzni dne 6.5.2015

Kryštof Beneš

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce panu Doc. Ing. Emilu Dvorskému, CSc. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce. Dále bych chtěl poděkovat panu Mgr. Pavlu Stejskalovi a kolektivu VSE v Chomutově za profesionální rady a velmi cennou výpomoc při sestavování modelu.

Obsah

OBSAH	9
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	11
ÚVOD	13
1 POPIS PROBLEMATIKY	14
2 TURBOSOUSTROJÍ	15
2.1 PARNÍ TURBÍNA	15
2.1.1 Tepelný oběh v systému s parní turbínou.....	16
2.1.2 Popis funkce parní turbíny.....	18
2.1.3 Kinematika proudění pracovní látky v turbíně.....	18
2.1.4 Transformace tepla na mechanickou energii [2], [10], [13].....	20
2.1.5 Druhy parních turbín	26
2.1.6 Tuzemská výroba parních turbín.....	26
2.2 TURBOALTERNÁTOR	27
2.2.1 Popis funkce	27
2.2.2 Princip funkce synchronního alternátoru	27
2.2.3 Transformace mechanické práce na elektrickou energii.....	28
2.2.4 Výroba turboalternátorů v České republice.....	28
3 MATEMATICKÝ POPIS TURBOSOUSTROJÍ	30
3.1 PARNÍ TURBÍNA	30
3.1.1 Průtok páry regulačním stupněm.....	31
3.1.2 Průtok páry skupinou stupňů	31
3.1.3 Izoentropický spád a účinnost [6].....	32
3.1.4 Akumulace páry v průtočných prostorách [6]	33
3.1.5 Dynamika rotoru [6].....	34
3.2 TURBOALTERNÁTOR	35
4 TURBOSOUSTROJÍ PRACUJÍCÍ DO TVRDÉ SÍTĚ A V OSTROVNÍM REŽIMU	36
4.1 TURBOSOUSTROJÍ PRACUJÍCÍ DO TVRDÉ SÍTĚ [15].....	36
4.2 TURBOSOUSTROJÍ PRACUJÍCÍ V OSTROVNÍM REŽIMU.....	38
4.2.1 Přechod výroby na vlastní spotřebu.....	41
4.3 REGULACE TURBOSOUSTROJÍ PROVOZOVANÉ V OSTROVNÍM PROVOZU	43
4.3.1 Regulace admisních parametrů páry	45
4.3.2 Přepouštěcí (bypassové) stanice	47
4.4 OPĚTOVNÉ PŘIPOJENÍ OSTROVA K SOUSTAVĚ	48
5 MODEL ELEKTRÁRENSKÉHO BLOKU	49
5.1 OBJEKTIVĚ ORIENTOVANÝ JAZYK SWING.....	49
5.2 POPIS VLASTNÍHO MODELU	51
5.2.1 Použité bloky při sestavování modelu	51
5.2.2 Schéma zapojení a parametry bloků modelu.....	55
5.2.3 Model bloku tepelné elektrárny o výkonu 200MW.....	57
5.2.4 Uživatelské rozhraní modelu.....	58
5.2.5 Popis struktury a funkce modelu	59
5.2.6 Výstupy modelu	67
6 VERIFIKACE VÝSLEDKŮ MODELU	73
6.1 VÝSTUPNÍ GRAFY	74

ZÁVĚR	76
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	78
PŘÍLOHY	80

Seznam symbolů a zkratek

c [m/s]	.....	absolutní rychlost
P [W]	.....	činný elektrický výkon
U [V]	.....	elektrické napětí
I [A]	.....	elektrický proud
E [J]	.....	energie
i [J/kg]	.....	entalpie
H [J/kg]	.....	entalpický spád
s [J · K ⁻¹ · kg ⁻¹]	.....	entropie
f [Hz]	.....	frekvence
h [m]	.....	geodetická výška
g [m/s ²]	.....	gravitační zrychlení
m [kg]	.....	hmotnost
ρ [kg/m ³]	.....	hustota
Q [VAr]	.....	jalový elektrický výkon
κ [-]	.....	koeficient kappa
J [kg · m ²]	.....	moment setrvačnosti
NT	.....	nízkotlaký
n [ot./min]	.....	otáčky za minutu
V [m ³]	.....	objem
u [m/s]	.....	obvodová rychlost
OP	.....	ostrovní provoz
r [m]	.....	poloměr
n [-]	.....	polytropický koeficient
W [J]	.....	práce
RC	.....	Rankin - Clausiův
X [Ω]	.....	reaktance
w [m/s]	.....	relativní rychlost
δ [%]	.....	statika proporcionálního regulátoru otáček

ST	.....	středotlaký
$Q [J]$	.....	tepelná energie
$T [^{\circ}C]$	.....	teplota
$p [Pa]$	.....	tlak
$\eta [-]$	.....	účinnost
$\omega [rad / s]$	.....	úhlová rychlost
$U [J]$	.....	vnitřní tepelná energie
VT	.....	vysokotlaký
$Z [W]$	.....	výkonové ztráty
$\vartheta [^{\circ}]$	.....	zátěžný úhel
$S [VA]$	.....	zdánlivý elektrický výkon

Úvod

Pro bezproblémové užívání elektrické energie je nutné mít v každém okamžiku její dostatečné množství, je tedy nutná neustálá rovnováha na straně výroby a spotřeby elektrické energie. Tato rovnováha je zajištěna regulací jednotlivých elektráren spojených do jedné elektrizační soustavy. V případě malého výpadku na straně spotřeby nebo výroby, soustava sama o sobě nerovnováhu vyrovná. Dojde-li však k většímu výpadku, např. vypadne více elektrárenských bloků najednou, soustava už nedokáže sama tento výpadek zregulovat. Jediným možným řešením této situace je vytvoření ostrovního provozu tak, aby dodávka elektrické energie byla zachována alespoň do důležitých částí elektrizační soustavy. Proto dnes standartně všechny elektrárenské bloky musejí zvládnout přechod do ostrovního režimu.[22]

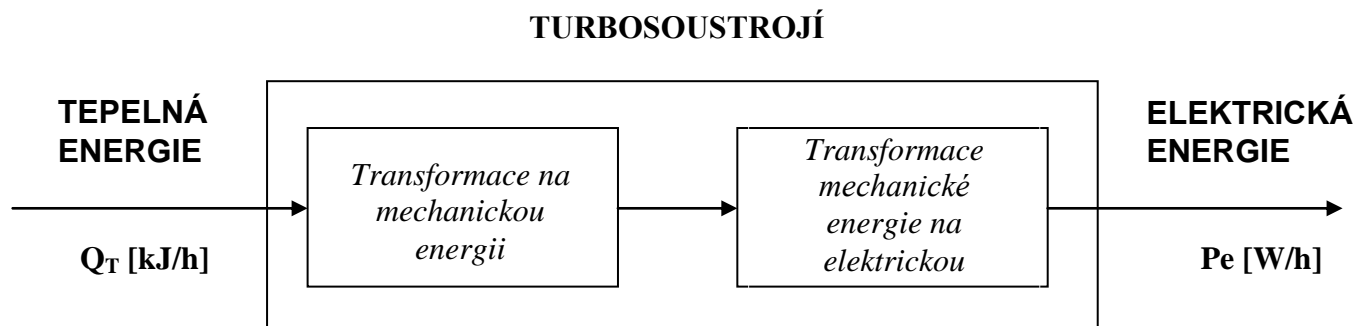
Podle evropského kodexu elektrizační sítě, je ostrovní provoz definován jako samostatné fungování celé nebo části sítě, která je izolována po jejím odpojení od propojené sítě. Izolovaná část sítě musí obsahovat nejméně jeden generátor pro regulaci frekvence a napětí. Tyto nestandardní podmínky vyžadují nestandardní strategie řízení. [20]

Problematika přechodu elektrárenského bloku do ostrovního režimu je předmětem této diplomové práce.

1 Popis problematiky

Parní elektrárna je soubor složitých zařízení, která účelně spolupracují v řazení za sebou nebo vedle sebe. Pro názorné ujasnění činnosti parní elektrárny je účelné rozkládat činnosti v ní na jednotlivé výrobní okruhy, které se buďto vyznačují zpracováváním některé ze základních provozních hmot nebo vyjadřují za sebou řazená jednotlivá energetická zařízení. V parní elektrárně se za sebou řadí postupně kotel, potrubí, turbína, alternátor, transformátor a elektrovody do příslušného pole na přípojnice v rozvodně. [4] Turbína je spojena s alternátorem společným hřídelem. Dohromady turbína a turboalternátor tvoří elektromechanické turbosoustrojí. Toto soustrojí v tepelných elektrárnách slouží k přeměně tepelné energie na energii elektrickou.

Tento proces přeměny energie stručně popsat schematicky dle Obr. 1.1

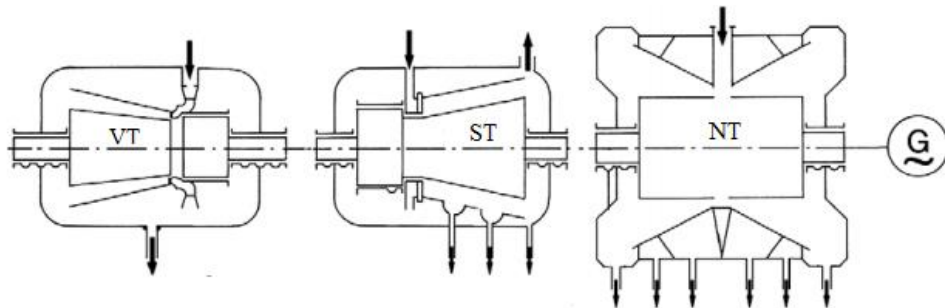


Obr. 1.1 Princip funkce turbosoustrojí, převzato z [1].

Ve světě již bylo vyvinuto mnoho matematických modelů turbosoustrojí v prostředí matlab SIMULINK, avšak v objektově orientovaném jazyku SWING ještě takovýto model vyvinut nebyl. [16]

2 Turbosoustrojí

Turbosoustrojí je jednoúčelové zařízení složené z turbíny jako pohonné jednotky a z rotačního stroje - alternátoru. Nejčastěji používaná turbosoustrojí k výrobě elektrické energie jsou tvořena kondenzační turbínou a turboalternátorem. Obr. 2.1 popisuje obvyklé uspořádání turbosoustrojí. Z obrázku 2.1 je vidět, že turbína se obvykle skládá ze tří sériově spojených dílů – z vysokotlakého, středotlakého a nízkotlakého dílu turbíny. Takto složená turbína je pak mechanicky spojena přes spojku s hřídelem alternátoru.



Obr. 2.1 Popis turbosoustrojí, převzato z [5].

2.1 Parní turbína

Každá turbína je ve své podstatě rychloběžný lopatkový motor, který přeměňuje některý druh energie na mechanickou práci. Vykonaná práce se využívá k pohonu elektrického generátoru, turbokompresoru, čerpadla, lodního šroubu apod.

Rozeznáváme turbíny:

- **vodní** – přeměňuje se mechanická energie vody,
- **parní** – přeměňuje se tepelná energie obsažená ve vodní páře,
- **plynové** – přeměňuje se tepelná energie obsažená v plynu.

Parní a plynové turbíny se souhrnně označují jako tepelné. U obou dochází k expanzi vysokotlaké přehřáté páry nebo stlačeného horkého plynu, při níž se přeměňuje tepelná a tlaková energie vzdušiny na energii mechanickou.

Turbíny jsou charakteristické svou nízkou hmotností, rozměry a cenou v porovnání s dosahovaným vysokým výkonem, účinností a možností expanze až do vakua. Dalším charakteristickým znakem je velká přizpůsobivost požadavkům, které jsou na ně kladeny.

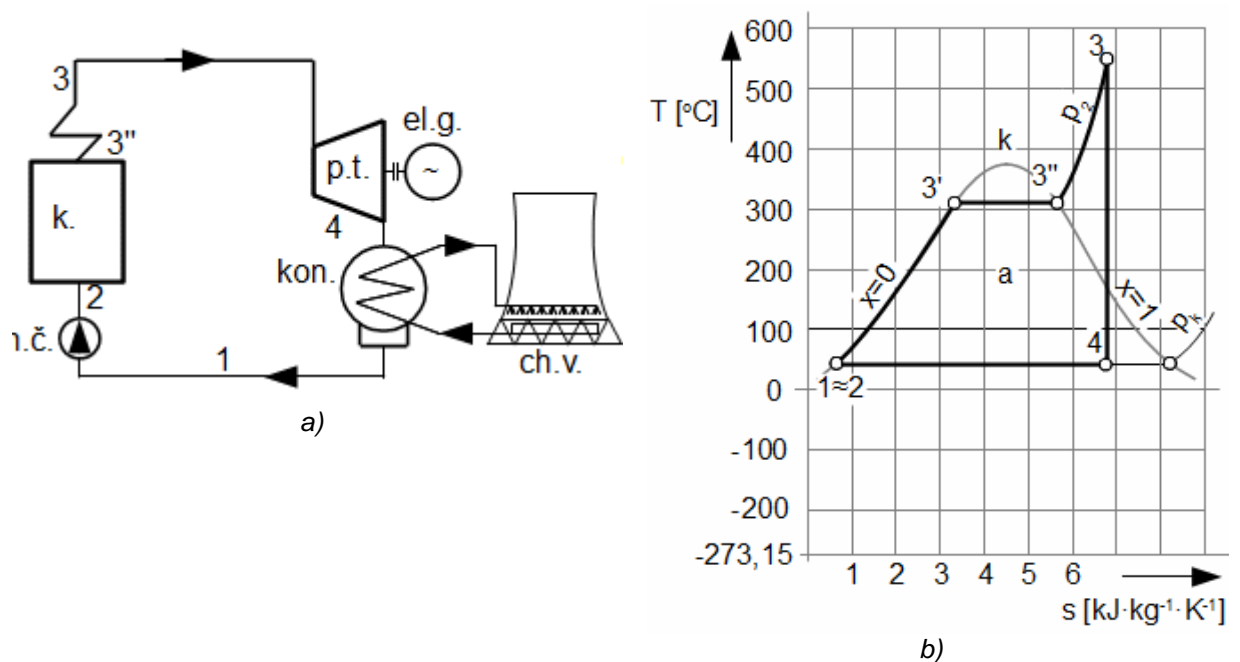
Můžeme se tak setkat s turbínami nepatrných rozměrů o výkonu několik kW, využívané například jako náhrada za redukční ventil, až s turbínami o nejvyšším výkonu přes 1000 MW parních turbín v jaderných elektrárnách. Dále bude věnována pozornost pouze parním kondenzačním turbínám velkých výkonů.

2.1.1 Tepelný oběh v systému s parní turbínou

Parní turbíny jsou využívány jako primární jednotky pro průmyslové kondenzační systémy již dlouhou dobu. Tepelný oběh využívaný v parní turbíně se nazývá *Rankinův - Clausiův* oběh. Tepelná energie se uvolňuje ve spalovací komoře parního generátoru. Tato energie se předává vodě o vysokém tlaku vytvořeném čerpadlem, čímž dochází v parním generátoru ke změně jejího skupenství na páru. [8]

Rankin – Clausiův cyklus [13]

Rankin – Clausiův cyklus je teoretickým uzavřeným oběhem, kde jsou využívány změny pracovní látky (vody), která v průběhu mění své skupenství, viz *Obr. 2.2*.



Obr. 2.2 a) Části zjednodušeného CR cyklu, b) Průběh CR cyklu v T-s diagramu, převzato z [5].

Zvýšení tlaku napájecí vody 1-2

Z bodu 1 do bodu 2 se zvyšuje tlak vody z tlaku p_1 na tlak p_2 pomocí napájecího čerpadla. Voda je téměř nestlačitelná, proto příkon čerpadla je malý při srovnání s výkonem parní turbíny.

Skupenská přeměna vody v kotli - výroba páry

V parním kotli je nejdříve voda o vysokém tlaku ohřívána až na mez sytosti kapaliny 2-3'. V jiné části kotle dochází k varu vody až do stavu syté páry 3'-3''. Ve většině případů je vzniklá pára ještě tzv. přehřívána v části kotle zvané přehřívák na stav 3.

Expanze páry v parní turbíně

V parní turbíně probíhá v ideálním případě izoentropická expanze ohraničená stavy 3 a 4. Práce turbíny bývá nejčastěji transformována na elektrickou energii pomocí elektrického generátoru.

Skupenská přeměna páry v kondenzátoru - kondenzace

Kondenzace páry po expanzi v parní turbíně probíhá v kondenzátoru a stav pracovní tekutiny se změní ze stavu 4 (pára) na 1 (voda). Tím je oběh uzavřen, protože voda se nachází opět ve stavu 1.

Kdybychom zde důkladněji Rankin-Clausiiův cyklus rozebrali, vyplynulo by, že nejnižší tepelnou účinnost má ohřev vody na bod varu a naopak nejvyšší účinnost má přehřátí páry na vysokou teplotu. Abychom snížili a nebo podpořili tyto dva jevy, provádí se tzv. „Carnotizace“ cyklu. „Carnotizaci“ cyklu lze vyvolat těmito způsoby:

- **Přihříváním páry** - po expanzi výstupní páru přehřát na vyšší teplotu aby znovu v další části turbíny expandovala.
- **Regenerativním ohřevem** - parou odebranou v turbíně se v tepelném výměníku ohřívá napájecí voda do kotle (klasicky 1-10 regenerativních ohříváků).

2.1.2 Popis funkce parní turbíny

V parní turbíně dochází k přeměně tepelné energie uložené ve vodní páře na mechanickou práci rotoru parní turbíny. Parní turbína pracuje na základních principech termodynamiky.

Transformace energie páry probíhá díky expanzi páry v rozváděcích lopatkách. Dochází k přeměně energie tlakové na energii kinetickou, která je předána oběžným lopatkám a kinetická energie se mění na mechanickou práci turbíny. Expanzi páry v turbíně uvažujeme jako izoentropický děj, u kterého je tepelná výměna s okolím rovna nule. [9]

2.1.3 Kinematika proudění pracovní látky v turbíně

Z kinematického hlediska jsou lopatkové stroje velmi jednoduché. Jde o rotační mechanismus s jedním stupněm volnosti. Kinematika lopatkových strojů je však velmi rozmanitá.

Z hlediska převažující rychlosti v osovém řezu strojem ve vztahu k ose rotace rozlišujeme stroje – axiální, radiální, axiálně radiální atd. Parní turbína je axiální lopatkový stroj, proto se dále zaměřím jen na tento typ stroje.

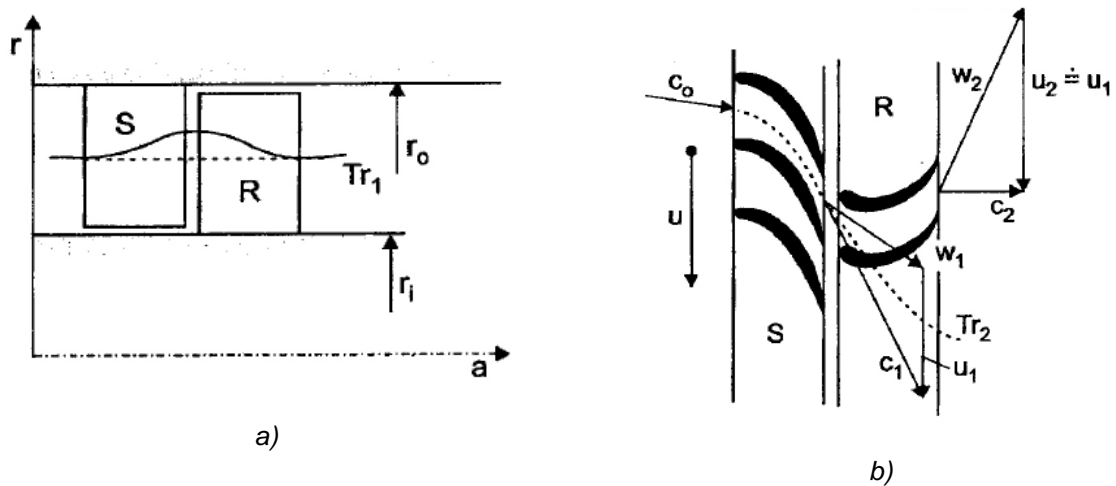
Druhy rychlostí

Rychlost tekutiny c se nazývá *absolutní* a může mít tři prostorové složky.

Složka rychlosti ve směru osy se nazývá *axiální* a označuje se indexem a . Složka rychlosti ve směru rotace se nazývá *obvodová* a označuje se indexem u . Složka rychlosti kolmá na axiální směr a směřující k ose respektive od osy rotace se nazývá *radiální* a označuje se indexem r .

Rychlost pracovní látky v základních částech parních turbín vlivem expanze převážně vzrůstá (u kompresorů a čerpadel – komprese – absolutní rychlost klesá). Proto i u zdánlivě čistě axiálního stroje je ve skutečnosti trajektorie částic pracovní látky prostorová, jak je patrné z *Obr. 2.3 - a* pro axiální turbínový stupeň. Při expanzi pracovní látky ve statorové

lopatkové řadě S vzrůstá především obvodová složka rychlosti c a proto účinkem odstředivých sil daných zrychlením $\frac{c^2}{r}$ se trajektorie T_{r1} vrací blíže k ose rotace. [12]



Obr. 2.3 Rychlostní trojúhelníky axiálního turbínového stupně a trajektorie pracovní látky v osovém řezu (a) a v rozvinutém válcovém řezu (b), převzato z [12].

Jak je patrné z Obr. 2.3, základem pro vyjadřování kinematiky lopatkových strojů jsou rychlostní trojúhelníky sestavované ve vhodných místech stroje. Tyto trojúhelníky se vždy skládají z:

- **absolutní rychlosti** proudu pracovní látky vzhledem ke statorovým částem stroje (S) – označované $c[m/s]$
- **unášivé – obvodové rychlosti** (rychlosti rotujících částí stroje) – označované $u[m/s]$
- **relativní rychlosti** proudu vzhledem k rotujícím částem stroje (R) – označované $w[m/s]$

Rychlostní trojúhelník

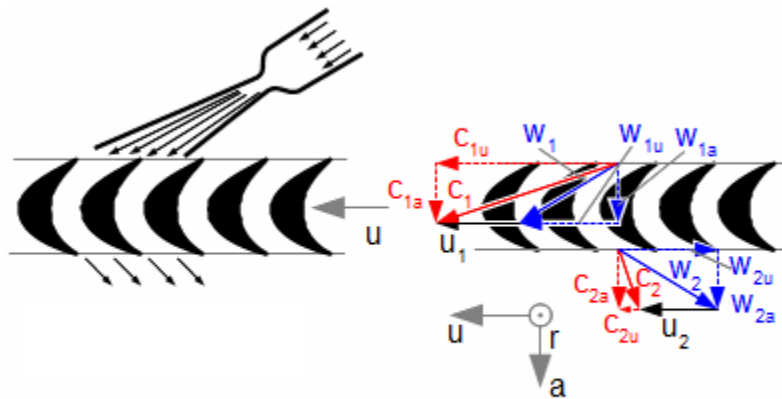
Rotor lopatkového stroje je rotační mechanismus. Rotor je tvořen rotujícími kanály, do kterých vstupuje pracovní tekutina s rychlostí c_1 a vystupuje o rychlosti c_2 . Absolutní rychlost tekutiny c je vektorovým součtem relativní rychlosti tekutiny w a obvodové rychlosti rotoru u . Relativní rychlost proudu w je rychlost proudu tekutiny vnímána pozorovatelem, který se

pohybuje s rotujícím kanálem lopatkového stroje. Relativní rychlost může mít tři prostorové složky jako rychlost absolutní. [13]

Obvodová rychlost je funkcí poloměru rotace $r[m]$ a úhlové rychlosti $\omega[rad/s]$, nemá žádné složky v axiálním a radiálním směru jako absolutní rychlost. Obvodová rychlost rotoru leží v rovině kolmé na axiální směr a je dána rovnicí:

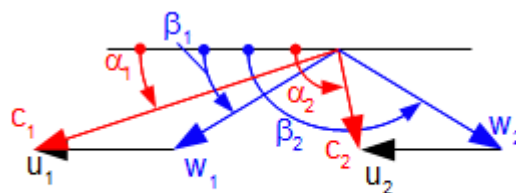
$$u = \omega \cdot R \quad (2.1)$$

Grafické znázornění absolutní, relativní rychlosti tekutiny a obvodové rychlosti rotoru se nazývá rychlostní trojúhelník:



Obr. 2.4 Znáznornění rychlostního trojúhelníku proudícího pracovního média v turbíně, převzato z [13].

Rychlostní trojúhelník se obvykle nekreslí společně s lopatkovou mříží rotoru turbíny, ale pro přehlednost a potřeby výpočtů se znázorňuje zvlášť.



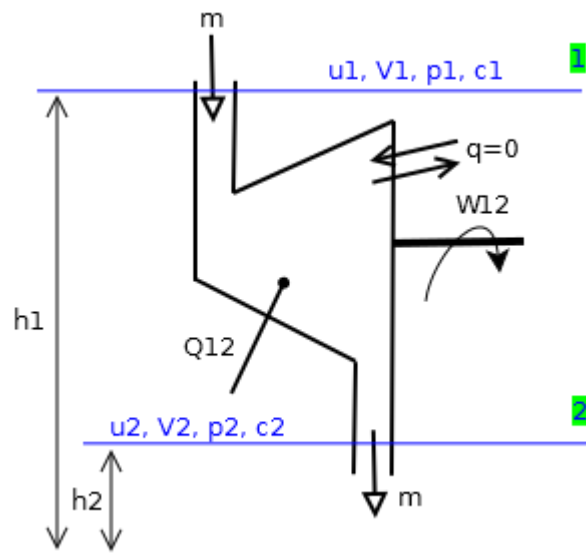
Obr. 2.5 Rychlostní trojúhelník, převzato z [13].

2.1.4 Transformace tepla na mechanickou energii [2], [10], [13]

V parní turbíně probíhá transformace tepelné energie na mechanickou energii během expanze páry z admisního tlaku, teploty a objemu na expanzní tlak, teplotu a objem. Plyn expanduje v turbíně z tlaku p_1 na tlak p_2 . Jestliže se jedná o izolovanou soustavu, musí

být entropie plynu konstantní nebo se zvyšovat. Toto zvýšení entropie je způsobena vznikem ztrátového tepla (lokální teplotní difference vznikající například při víření a tření pracovního plynu o části stroje, při proudění pracovního plynu netěsnostmi ve stupních a mísením apod.)

Pro výpočet mechanické energie na hřídeli turbíny budeme řešit zákon zachování energie. Přes parní turbínu proudí pára o konstantní hmotnosti m [kg]. Stav proudící páry je zde určen jednak stavovými hodnotami p [Pa], V [kg/m³], T [°C] a také stavovými veličinami rychlostí c [m/s] a geodetickou výškou h [m], viz Obr. 2.6.



Obr. 2.6 Otevřený termodynamický systém, převzato z [2].

Podle zákona zachování energie v uzavřené soustavě, ve které probíhá mezi stavy 1. a 2. termodynamický děj, platí:

$$Q_{12} = E_2 - E_1 + W_{t12} \quad (2.2)$$

Pro 1 kg látky platí:

$$q_{12} = e_2 - e_1 + w_{t12} \quad (2.3)$$

kde:

Q_{12} [J] - veškeré teplo přivedené pracovní látce mezi stavy 1 a 2.

E_1, E_2 [J] - celková energie soustavy ve stavu 1, 2

W_{t12} [J] - celková práce, kterou vykonala soustava mezi stavy 1 a 2

Zisk technické práce je:

$$w_{t12} = q_{12} + u_2 + p_2 \cdot v_2 + \frac{c_2^2}{2} + g \cdot h_2 - u_1 - p_1 \cdot v_1 - \frac{c_1^2}{2} - g \cdot h_1 \quad (2.4)$$

Dosadíme-li do této rovnice $u + p \cdot v = i$, dostaneme tvar:

$$w_{t12} = q_{12} + i_2 - i_1 + \frac{1}{2}(c_2^2 - c_1^2) + g \cdot (h_2 - h_1) \quad (2.5)$$

Použijeme-li zjednodušení uvedená v materiálu [1] pro rovnici (2.4), pak pro soustavy pracující se vzdušninami platí:

$$W_{t12} = m \cdot (i_1 - i_2) \quad (2.6)$$

Chceme-li znát výkon otevřené soustavy, stačí rovnice dělit časem:

$$P = \frac{W_{t12}}{t} [W] \quad (2.7)$$

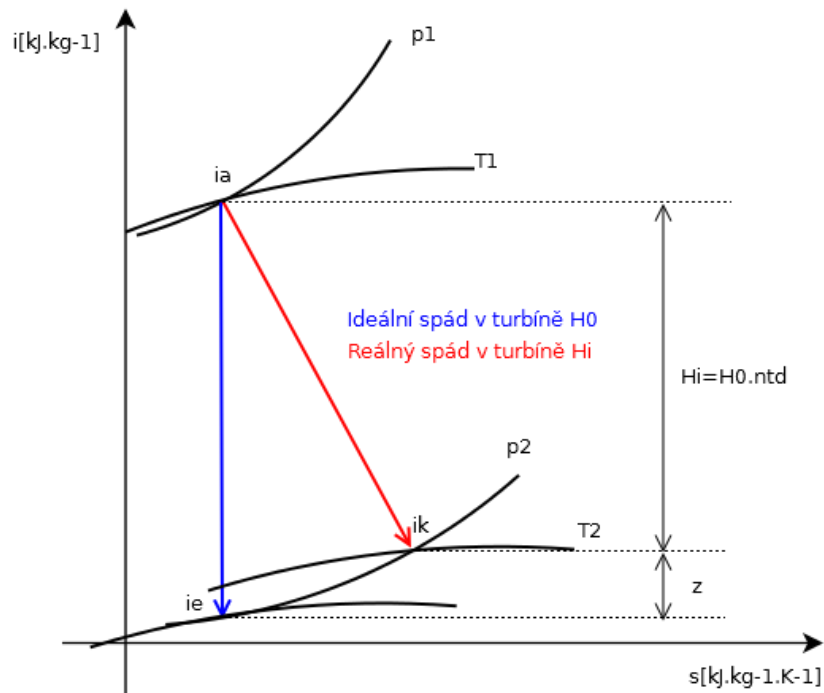
Dosud jsme předpokládali, že expanzi v turbíně odpovídá adiabatický děj, a tak byl i odpovídající tepelný spád adiabatický. Ve skutečnosti v turbíně není expanze adiabatická, ale díky tření a dalším ztrátám se expanzní křivka odklání ve směru vzrůstu entropie.

Ideální spád turbíny vypočteme jako:

$$H_0 = (i_a - i_e) \quad (2.8)$$

Skutečný spád v turbíně však v i - s diagramu nebude probíhat přímkově – při konstantní entropii, ale dle polytropy jako.

$$H_i = H_0 \cdot \eta_{td} = (i_a - i_k) \quad (2.9)$$



Obr. 2.7 *i-s* diagram expanze páry v turbíně.
 z – měrné termodynamické ztráty v turbíně [kJ.kg^{-1}]

Když porovnáme entalpii páry na výstupu z turbíny skutečné a ideální turbíny, dostaneme zvětšení entalpie o $\Delta i = i_k - i_e$ a o tuto hodnotu je větší množství tepla odvedeného chladicí vodou do okolí. Poměr využitého tepelného spádu H_i a ideálního tepelného spádu H_0 je vnitřní termodynamická účinnost turbíny.

Termodynamická účinnost

Termodynamická účinnost parní turbíny je poměr skutečně získané práce nebo výkonu k práci nebo výkonu, které by bylo možno teoreticky získat, kdyby přeměna energie ve stroji byla ideální. Tato účinnost se vztahuje nejčastěji na práci, měřenou na spojce turbíny η_{tdsp} a jsou v ní zahrnuty všechny ztráty v turbíně, anebo se vztahuje na výkon dosažený na svorkách generátoru, což je pak vlastně účinnost celého turbosoustrojí η_{tdel} . Termodynamická účinnost se může vztahovat i na vnitřní výkon, odevzdaný pracovní párou rotoru turbíny. Respektuje všechny ztráty v turbíně, jejichž teplo zvyšuje entalpii pracovní páry a její výstupní energii. Tuto účinnost nazýváme termodynamickou vnitřní účinností η_{tdi} . [10]

$$\eta_{tdi} = \frac{i_a - i_k}{i_a - i_e} = \frac{H_i}{H_0} [-] \quad (2.10)$$

Maximální termodynamická účinnost některých tepelných turbín přesahuje 90% (u parních 92%) v případě vícetělesových parních turbín může být účinnost v jednotlivých tělesech rozdílná).

Další účinnosti turbosoustrojí

Do mechanické účinnosti turbíny η_m se zahrnují třecí ztráty v ložiskách, ztráty ventilací rotoru mimo průtočný kanál a ztráty způsobené pomocnými pohony jako např. čerpadla, regulace atd.

$$\eta_m = \frac{P_{sp}}{P_i} [-] \quad (2.11)$$

Termodynamická účinnost turbíny (na spojení s generátorem)

$$\eta_{tdsp} = \eta_{tdi} \cdot \eta_m [-] \quad (2.12)$$

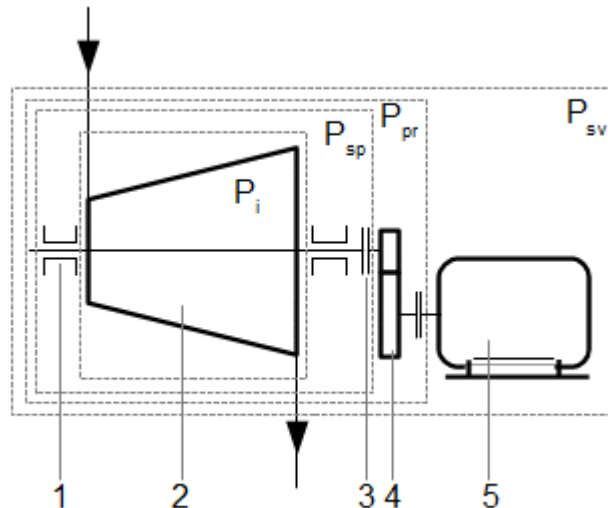
Účinnost generátoru zohledňuje vliv veškerých ztrát vznikajících v generátoru.

$$\eta_{el} = \frac{P}{P_{sp}} [-] \quad (2.13)$$

Termodynamická účinnost celého soustrojí

$$\eta_{tdel} = \frac{P}{P_0} = \eta_{tdi} \cdot \eta_m \cdot \eta_{el} [-] \quad (2.14)$$

Za pomocí výše zmíněných účinností se pak může vypočítat výkon na svorkách elektrického generátoru P_{sv} .



Obr. 2.8 – Výkony turbosoustrojí - 1 ložiskový stojan a příslušenství; 2 vnitřní prostor turbíny; 3 spojka; 4 převodovka; 5 el. generátor ,převzato z [13].

$$P_{sv} = P_{pr} \cdot \eta_{el} = m \cdot H_{iz} \cdot \eta_{tdi} \cdot \eta_m \cdot \eta_{pr} \cdot \eta_{el} [W] \quad (2.15)$$

kde:

- m [kg/s] - je hmotnostní tok páry proudící lopatkováním turbíny
- H_i [kJ/kg] - je izoentalpický spád
- η_{pr} [-] - je účinnost převodovky
- P_0 [W] - je výkon obsažený v páře spotřebovaný turbínou
- P [W] - je elektrický výkon dodávaný alternátorem
- P_{pr} [W] - je výkon za převodovkou (výkon na spojce mínus ztráty v převodovce)
- P_{sp} [W] - je výkon na spojce
- P_i [W] - je instalovaný výkon
- $m \cdot H_{iz}$ - je vnitřní izoentropický výkon turbíny

Jestliže je turbína rozdělena odběrem páry, musí se vypočítat výkon na svorkách elektrického generátoru každé části zvlášť pro jednotlivé hmotnostní průtoky. Celkový výkon na svorkách elektrického generátoru P_{sv} se pak získá součtem dílčích výkonů.

2.1.5 Druhy parních turbín

Výstupní pára vstupuje buď do kondenzátoru (kondenzační provoz) nebo do tepelného výměníku (protitlaký provoz). S ohledem na místo odběru tepelné energie pro dodávku tepla a množství páry, podílející se na výrobě elektrické energie a tepla se dají systémy s parními turbínami rozdělit na:

- **kondenzační** – po průchodu páry turbínou se pára dále nevyužívá
- **protitlaké** – po průchodu páry turbínou se pára dále využívá
- **odběrové** – pára je odebírána po částečné expanzi jinde než za posledním stupněm a je dále využívána

Kondenzační turbíny

Pro kondenzační turbíny platí, že kondenzátor je přímo zapojen za parní turbínou. Při použití chladicí vody bývají minimální teploty kondenzace, v závislosti na zeměpisné šířce a způsobu kondenzace, až 15 °C, čemuž odpovídá tlak za turbínou 0,002 MPa. Tento typ kondenzace se nazývá expanze do vakua (tlak je menší jak atmosférický). Pokud je požadováno, aby kondenzát byl využíván pro vytápění, bývá teplota kondenzace 80–90 °C, čemuž odpovídá tlak lehce vyšší než atmosférický, většinou 0,12 MPa a nazýváme takovou kondenzaci potlačenou kondenzací. [8], [9]

2.1.6 Tuzemská výroba parních turbín

Současná tuzemská výroba parních turbín pro tepelné elektrárny je velmi rozmanitá. Obor je tvořen menšími výrobními podniky, avšak nalezneme zde i velké průmyslové závody s dlouholetou tradicí výroby parních turbín. Každá společnost se převážně specializuje na úzké spektrum výroby, ať se jedná o výkonové spektrum - malé, střední, velké výkony turbín, anebo druh turbíny jako kondenzační, protitlaké a odběrové.

Mezi nejvýznamnější současné výrobce patří Doosan Škoda Power s historií sahající do poloviny 19. století. Tato společnost nabízí vedle klasických parních turbín i spalovací

turbíny pro paroplynové cykly. Novinkou v jejich portfoliu jsou parní turbíny pracující s párou ultrakritickými (USC), ale i subkritickými parametry.

2.2 Turboalternátor

Turboalternátor je točivý elektrický stroj pracující v generátorickém režimu, tedy jako elektrický generátor; přeměňuje kinetickou energii (pohybovou energii) rotačního pohybu na energii elektrickou ve formě střídavého proudu. Alternátor pracuje na principu elektrické indukce. [3]

2.2.1 Popis funkce

Čtyři základní zákony elektromagnetismu

Pro funkci turboalternátoru je využíváno čtyř základních zákonů elektromagnetismu, bez kterých bychom nebyli schopni tento stroj sestavit a uvést do provozu.

- Faradayův zákon elektromagnetické indukce
- Ampérův-Biot-Savartův zákon indukovaných elektromagnetických sil
- Lenzův zákon akce a reakce
- Princip přeměny elektromagnetické energie

Tento čtvrtý a zároveň poslední zákon zachycuje spolu s předchozími třemi zákony všechny fyzické procesy nastávající uvnitř alternátoru. [4]

2.2.2 Princip funkce synchronního alternátoru

Synchronní alternátor se skládá z dvou hlavních částí: statoru a rotoru. Princip synchronního alternátoru je popsán následovně:

Rotující magnetické pole rotoru indukuje ve vinutí cívky statoru střídavý elektrický proud. Často bývají ve statoru tři sady statorových vinutí, které jsou umístěny v odlišných polohách. Točící se magnetické pole generuje tři fáze elektrického proudu, posunuté o jednu třetinu periody.

Turboalternátory jsou nejčastěji využívány k primární výrobě elektrické energie v tepelných a jaderných elektrárnách. Zde jsou vždy poháněny parní turbínou. Obvykle bývají dvoupólové, pracující při jmenovitých otáčkách 3000 ot/min., které vyplývají ze synchronního provozu stroje při jmenovité frekvenci elektrorozvodné sítě 50 Hz, platné pro celou Evropu. Při průměru rotoru 1 metr činí obvodová rychlost rotoru alternátoru 157 m/s, na rotor stroje tak působí obrovské odstředivé síly. Z tohoto faktu vyplývá konstrukční omezení rozměrů stroje – malý průměr rotoru (přibližně do 1,1 m) a velká délka (i přes 5 m). Turboalternátory velkých výkonů (>200 MW) už nelze chladit vzduchem, proto je používáno intenzivní chlazení vodíkem nebo kombinace voda-vodík, kde médium protéká dutými vodiči elektrického vinutí stroje. Největší používané turboalternátory mohou být konstruovány na maximální výkon přes 1500 MVA. [3]

2.2.3 Transformace mechanické práce na elektrickou energii

Tato transformace probíhá uvnitř alternátoru a je založena na zákonech elektromagnetismu, popsaných výše.

Jestliže je turbína mechanicky spojena přes spojku s turboalternátorem, otáčí rotorovým vinutím alternátoru. Vlivem budícího stejnosměrného proudu, který protéká rotorovým vinutím, vzniká okolo tohoto vinutí konstantní magnetické pole. Jestliže tímto polem pohybují (rotorem otáčí turbína), tak dle Faradayova indukčního zákona se ve statorovém vinutí indukuje sinusové napětí, které dá vzniknout statorovým proudům.

Tímto je zajištěna přeměna mechanické – kinetické energie turbíny na elektrickou energii dodávanou alternátorem do elektrické sítě.

2.2.4 Výroba turboalternátorů v České republice

Turboalternátory s hladkým rotorem se v roce 1924 začaly vyrábět ve Škodových závodech v Plzni začaly, kde se již dříve vyráběly výkovky rotorů pro turboalternátory pro zahraniční zákazníky. První stroj této konstrukce měl výkon 17,5 MW. ŠKODA Plzeň postupně rozšířila svůj výrobní program na prakticky všechny druhy elektrických strojů. Se svými výrobky, především turboalternátory, se dostala mezi světovou špičku.

BRUSH SEM s.r.o.

Společnost BRUSH SEM s.r.o. je součástí skupiny Melrose plc a v rámci Melrose plc náleží do divize BRUSH Turbogenerators. Divize BRUSH Turbogenerators je největším světovým nezávislým výrobcem turbogenerátorů. Úzce spolupracuje se společnostmi BRUSH Electrical Machines Ltd., sídlící v Loughborough ve Velké Británii a BRUSH HMA n.v., sídlící v Ridderkerku v Nizozemsku. V České republice společnost sídlí v Plzni v areálu bývalých závodů ŠKODA, která ve 2. polovině 20. století byla hlavními dodavateli generátorů na východoevropský trh. Později se rozrostla a začala dodávat generátory do Asie, Jižní Ameriky, Austrálie, Afriky. K dnešnímu dni bylo vyrobeno více než 1300 turbogenerátorů a 245 hydrogenerátorů.

3 Matematický popis turbosoustrojí

3.1 Parní turbína

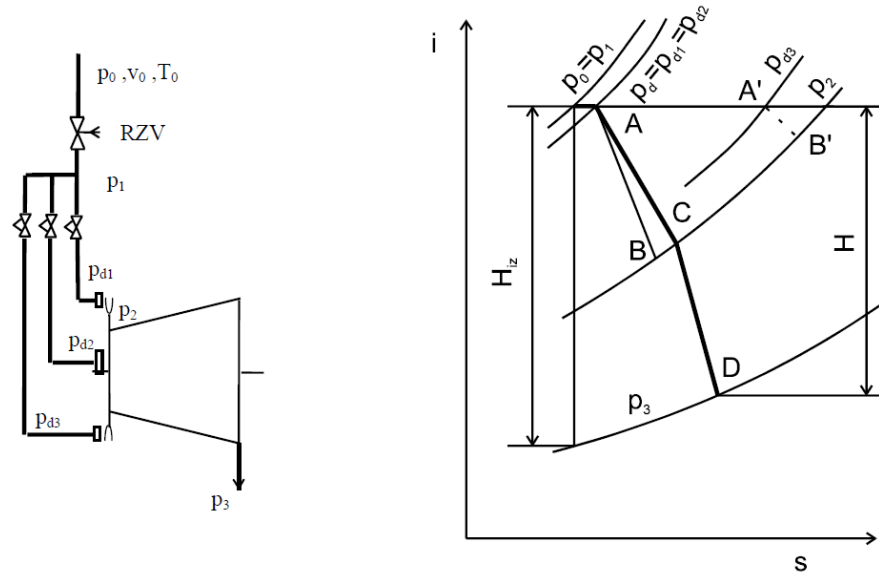
Matematický model parní turbíny je možné sestavit mnoha způsoby. Například jako nelineární matematicko - fyzikální model parní turbíny. Obdobný popis parní turbíny je použit v editoru SWING (vychází také z průběhu expanze páry kuželovitého tvaru) který je předmětem této diplomové práce.

Pro vytvoření matematického modelu parní turbíny byla použita metoda matematicko – fyzikální analýzy. Chování parní turbíny jakožto regulované soustavy určují kromě vlastností samotné turbíny také vlastnosti generátoru a připojené elektrické sítě. U průmyslových parních turbín s regulovanými odběry, protitlakových nebo s přídavnou parou je chování řízené soustavy také ovlivněno vlastnostmi odběrové sítě technologické páry respektive dynamickým chováním zdroje přídavné páry. Protože se z hlediska matematického popisu jednotlivé typy turbín skládají ze stejných základních částí, je použit obecný postup sestavení modelu: [6]

- Turbínu rozdělíme místy nespojitosti, ve kterých dochází ke změnám průtoku (vstupní část, odběry, uvažovaná akumulace), na několik částí.
- V místech dělení určíme parametry páry na základě počátečního rozdělení entalpického spádu.
- Popíšeme děje akumulace v uvažovaných parních prostorech.
- Na základě okamžitého průtoku a parametrů páry v místech dělení určíme hnací momenty jednotlivých částí turbíny.
- Na základě znalosti dílčích hnacích momentů určíme celkový hnací moment turbíny jako jejich součet.
- Na závěr definujeme podmínku momentové rovnováhy hnacích a zátěžných momentů na rotoru turbíny.

3.1.1 Průtok páry regulačním stupněm

Při popisu průtoku páry regulačním stupněm vycházíme z počátečního průtoku a hodnot stavových proměnných na expanzní čáře.



Obr. 3.1 Vlevo skupinová regulace hmotnostního průtoku páry, vpravo expanzní čára, převzato z [6].

Při popisu dynamického chování turbíny stačí vycházet z charakteristiky regulačních ventilů a korekci na jiné stavy, než výpočtové provést podle zjednodušených vztahů pro průtok páry regulačním stupněm pro podkritické proudění. [6]

$$M_{p,r} = S(y) \sqrt{\frac{T_{10}}{T_1}} \sqrt{\frac{(p_1^2 - p_2^2)}{(p_{10}^2 - p_{20}^2)}} \quad (3.1)$$

Význam indexů proměnných rovnice 3.1 je obdobný jako u rovnice 3.2. $S(y)$ je průtočná plocha dýzové skupiny.

V praxi jsou k dispozici podklady tepelných výpočtů navrhované turbíny a z nich vyplývající průtoková charakteristika regulačních ventilů.

3.1.2 Průtok páry skupinou stupňů

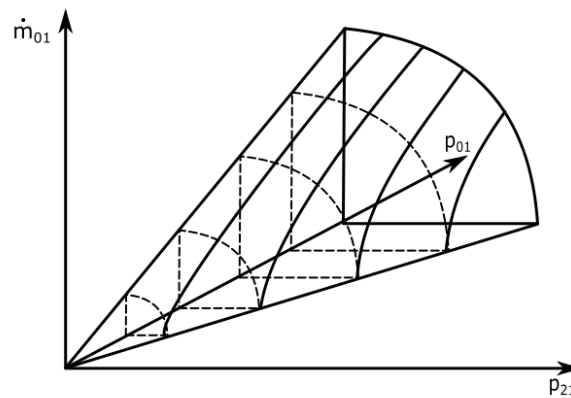
Stupně parní turbíny jsou tvořeny z několika lopatkových mříží konstantního průřezu, řazených za sebou. Lopatkové mříže můžeme považovat za řadu postupně za sebou řazených odporů, vložených do proudu páry. Pak lze předpokládat, že stavy páry příslušející expanzi

v jednotlivých stupních leží na polytropě. Průtok skupinou stupňů je možno vyjádřit vztahem, odvozeným prof. Stodolou. Jedná se o 3 dimenzionální kuželovité zobrazení závislosti vstupního tlaku, výstupního tlaku a průtoku turbínou. S dostatečnou přesností lze vystačit se zjednodušenými vztahy pro průtok stupňovou částí turbíny. Pro průtok při podkritickém proudění platí: [6]

$$M_0 = M_{01} \sqrt{\frac{T_{01}}{T_0}} \sqrt{\frac{(p_0^2 - p_2^2)}{(p_{01}^2 - p_{21}^2)}} \tag{3.2}$$

kde :

p_2 [Pa], T_2 [°C]	výstupní tlak a teplota ze stupně turbíny
p_0 [Pa], T_0 [°C]	vstupní tlak a teplota páry do stupně turbíny
p_{21} [Pa]	výstupní hodnota tlaku pro sestrojenou průtokovou charakteristiku
p_{01} [Pa], M_{01} [kg/s], T_{01} [°C]	vstupní hodnota tlaku, průtoku a teploty pro sestrojenou průtokovou charakteristiku



Obr. 3.2 Průtoková charakteristika dle prof. Stodoly.

3.1.3 Izoentropický spád a účinnost [6]

Pro vyjádření izoentropického spádu mezi j-tým a k-tým místem dělení je použit vztah

$$H_{jk} = \frac{\kappa}{\kappa - 1} \frac{p_j}{\rho_j} \left[1 - (\varepsilon_{jk})^{\frac{\kappa}{\kappa-1}} \right] \quad (3.3)$$

Koeficient κ pro páru = 1.12, kritický poměr tlaků $\varepsilon_{jk} = \frac{p_k}{p_j}$

Teplota na konci expanze ve skupině stupňů je vyjádřena z teploty na začátku expanze pomocí rovnice Polytropy.

$$T_k = T_j (\varepsilon_{jk})^{\frac{n-1}{n}} \quad (3.4)$$

kde n je polytropický exponent.

Termodynamická účinnost turbínových stupňů závisí na mnoha faktorech, zejména na tlakovém poměru a úhlové rychlosti rotoru (rychlostních poměrech v lopatkování). Změna účinnosti skupiny stupňů závisí na umístění této skupiny stupňů v turbíně. Nejvíce se mění účinnost posledních stupňů a zejména posledního stupně. Účinnost skupiny stupňů v provozních režimech rozdílných od režimu výpočtového je popsána rovnicí

$$\eta = \eta_j \left[2 - \frac{\omega}{\omega_j} \sqrt{\frac{H_j}{H}} \right] \frac{\omega}{\omega_j} \sqrt{\frac{H_j}{H}} \quad (3.5)$$

kde indexem j jsou značeny jmenovité (nominální) hodnoty. Vztah (3.5) platí pro jeden stupeň i pro skupinu stupňů.

3.1.4 Akumulace páry v průtočných prostorech [6]

Dynamické vlastnosti parních turbín mohou být značně ovlivněny akumulací páry v parních prostorech. Jedná se především o prostory regulačních stupňů, propojovacích a převáděcích potrubí a přihříváků páry. Průtočný prostor V_1 je možno považovat za soustředěnou kapacitu, ve které je vyjádřena akumulace hmotnosti páry m_p na základě hmotnostního průtoku páry vstupující $M_{p,1}$ a vystupující $M_{p,2}$ z příslušného prostoru. Podle zákona zachování hmotnosti je akumulace páry vyjádřena následující rovnicí (3.6)

$$\frac{dm_p}{dt} = V_1 \frac{d\rho(p, i)}{dt} = M_{p,1} - M_{p,2} \quad (3.6)$$

Protože změny entalpie (předpokládáme přehřátou páru) jsou malé, lze předpokládat konstantní měrnou entalpii v celém akumulacním prostoru. Z tabulek termodynamických vlastností vodní páry je vidět, že při konstantní entalpii teplota s klesajícím tlakem mírně klesá a naopak, což lépe odpovídá skutečnosti, než předpoklad konstantní teploty. Protože je možno předpokládat závislost měrné hmoty na tlaku v následujícím tvaru

$$\frac{\rho}{\rho_j} = \frac{p}{p_j} \quad (3.7)$$

je potom

$$\frac{dm_p}{dt} = V_1 \frac{d\rho}{dt} = V_1 \frac{\rho_j}{p_j} \cdot \frac{dp}{dt} = \frac{m_{p,j}}{p_j} \cdot \frac{dp}{dt} \quad (3.8)$$

Po dosazení (3.8) do rovnice (3.6) je konečná podoba diferenciální rovnice popisující dynamiku akumulace páry v průtočném prostoru

$$\frac{m_{p,j}}{p_j} \cdot \frac{dp}{dt} = M_{p,1} - M_{p,2} \quad (3.9)$$

3.1.5 Dynamika rotoru [6]

Pohybující se hmoty rotoru turbíny a hnaného stroje představují zásobník kinetické energie. Akumulování a uvolňování této energie se uplatňuje během přechodových dějů a je jedním z hlavních faktorů majících vliv na dynamiku rotoru parní turbíny. Při analýze dynamiky rotoru turbíny je nutno vyjít z energetické rovnice pro rotační pohyb

$$\frac{dE_k}{dt} = P_T - P_Z \quad (3.10)$$

kde $P_T = M_T \cdot \omega$ je vnitřní výkon turbíny, $P_Z = M_Z \cdot \omega$ je výkon spotřebovaný hnaným strojem k vykonání práce a E_k je kinetická energie všech rotujících hmot rotorové soustavy (turbína + generátor, popř. turbína + převodovka + generátor). Energetickou rovnici rotoru (3.10) je možno napsat ve tvaru

$$J_r \omega \frac{d\omega}{dt} = M_T \omega - M_Z \omega \quad (3.11)$$

kde M_T je hnací moment turbíny, M_Z je brzdny moment zátěže a J_r je redukovany moment setrvačnosti rotorové soustavy. Po vydělení rovnice (3.11) úhlovou rychlostí ω dostaneme rovnici vyjadřující podmínku mechanické rovnováhy momentů na hřídeli.

$$J_r \frac{d\omega}{dt} = M_T - M_Z \quad (3.12)$$

3.2 Turboalternátor

Popsat turboalternátor lze mnoha způsoby. Vždy však záleží na tom, pro jaký problém chceme turboalternátor matematicky popsat. Jestliže chceme sledovat pouze výkonové bilance alternátoru a sítě, to znamená pomalejší časové děje, postačí nám jednodušší matematický model.

Avšak chceme-li alternátor popsat přesněji a sledovat například přechodné děje velmi krátkých časových konstant, jako jsou zkraty, vhodným matematickým popisem turbogenerátoru je Parkova transformace do d-q souřadnic.

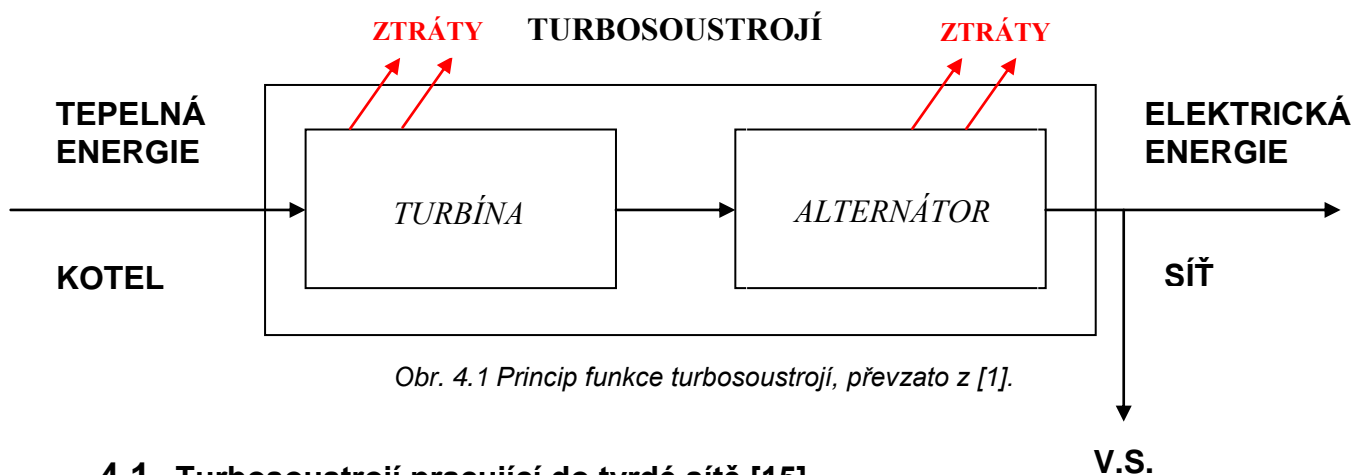
V mém případě – vyšetřování přechodu turboalternátoru ze jmenovitého chodu do ostrovního režimu (není uvažována zpětná vazba od sítě na alternátor) se více hodí matematický model, který je jednoduchý a nepracuje s transformací do d-q souřadnic. Ve skutečnosti stačí vystupující výkon z turbíny P_T vynásobit účinností alternátoru přeměny mechanické energie na energii elektrickou.

Výkon na svorkách alternátoru $P_{sv}[W]$ pak lze určit následovně (význam indexů 2.15):

$$P_{sv} = P_T \cdot \eta_{el} = m \cdot H_{iz} \cdot \eta_{tdi} \cdot \eta_m \cdot \eta_{pr} \cdot \eta_{el} \quad (3.13)$$

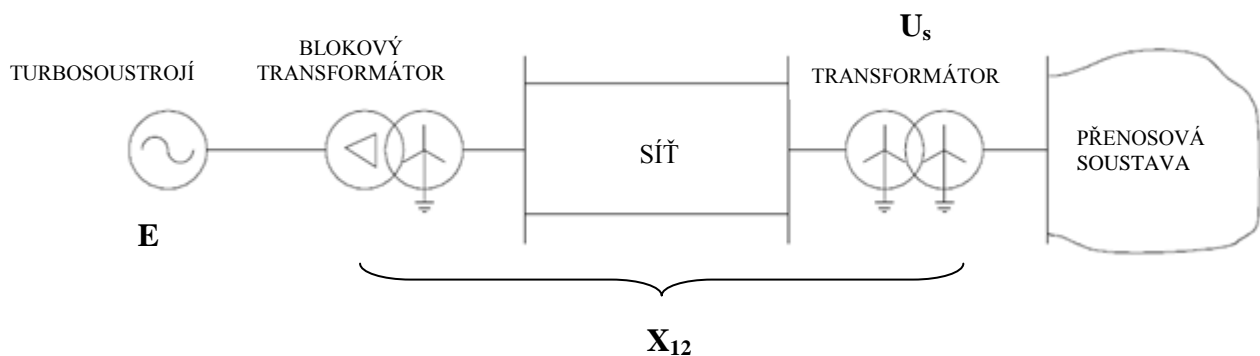
4 Turbosoustrojí pracující do tvrdé sítě a v ostrovním režimu

Činný elektrický výkon dodávaný elektrickým alternátorem do sítě je stálý a je dán momentem turbíny a jejími otáčkami. Část tohoto výkonu je spotřebována (Joulovy ztráty, ztráty v železe) a zbytek se přenáší do sítě a vlastní spotřeby (V.S.) elektrárny.



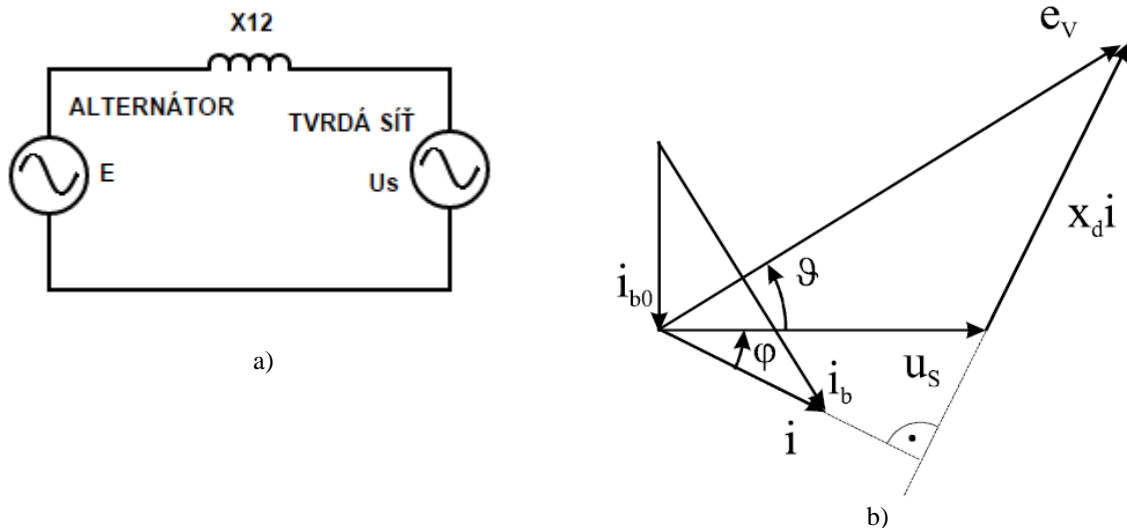
4.1 Turbosoustrojí pracující do tvrdé sítě [15]

Tvrdá síť je síť, která má konstantní napětí (velikost i fázový posun), konstantní frekvenci a alternátor do této sítě dodává konstantní výkon. Tento stav je jmenovitý z hlediska funkce turbosoustrojí.



Obr. 4.2 Schéma turbosoustrojí pracujícího do tvrdé sítě, převzato z [15].

Výkon dodávaný alternátorem do sítě je závislý na vnitřním elektromotorickém napětí alternátoru E a napětí sítě U_s . Dále je závislý na zátěžném úhlu ϑ a reaktanci X_{12} (obsahuje součet reaktance vedení, blokového transformátoru a reaktance alternátoru).



Obr. 4.3 a) Náhradní schéma pro přenášený výkon turbosoustrojí do sítě, b) Fázorový diagram turboalternátoru v přebuzeném stavu, převzato z [15].

Činný výkon

$$P = \frac{E \cdot U_S}{X_{12}} \sin \vartheta \text{ [W]} \quad (4.1)$$

Jalový výkon

$$Q = \frac{E \cdot U_S}{X_{12}} \cos \vartheta - \frac{U_S^2}{X_{12}} \text{ [VAr]} \quad (4.2)$$

Provoz alternátoru, přifázovaného na tvrdou síť, je obvyklý provoz turbosoustrojí. Pokud dojde z nespécifikovaného důvodu k poruše v síti, frekvence sítě začne kolísat. Rozsah kolísání závisí na mnoha faktorech, nejčastěji na rozloze poruchy – množství odpojení zdrojů či zátěže. Jestliže jsou poklesy frekvence značné (pod 49,8 Hz nebo nad 50,2 Hz) první opatření, které se musí provést, je přistoupit k frekvenčnímu plánu a systematicky odpojovat zátěž tak, aby byla frekvence v síti opět vyrovnána. Pokud tento způsob regulace nepomůže, přechází se k řešení přechodu elektrárenského bloku nebo části sítě do ostrovního provozu.

4.2 Turbosoustrojí pracující v ostrovním režimu

Ostrovní provoz je definován jako:

Stabilní, mimořádný provoz části elektrizační soustavy po jejím oddělení od ostatní soustavy jako důsledek poruchy, do které může pracovat několik zdrojů (bloků, elektráren) nebo jako provoz elektrárenského bloku, pracujícího do části ES, která se oddělila od propojené soustavy. [24]

Ve střídavých elektrizačních soustavách (ES) je nutností dodávat v každém okamžiku elektrickou energii v požadované kvalitě. Kritériem kvality je především udržování požadovaných hodnot frekvence, výkonu a napětí. Za stavu, kdy je elektrizační soustava v chodu bez poruch a výpadků zdrojů, je možno tuto kvalitu celkem snadno dodržet. Problémy nastávají při větších výpadcích zdrojů následkem poruch. Tehdy vznikají větší nároky na regulační vlastnosti jednotlivých elektrárenských bloků. V elektrizační soustavě je nutno v každém okamžiku držet rovnováhu mezi výrobou a spotřebou elektrické energie danou rovnicí: [22]

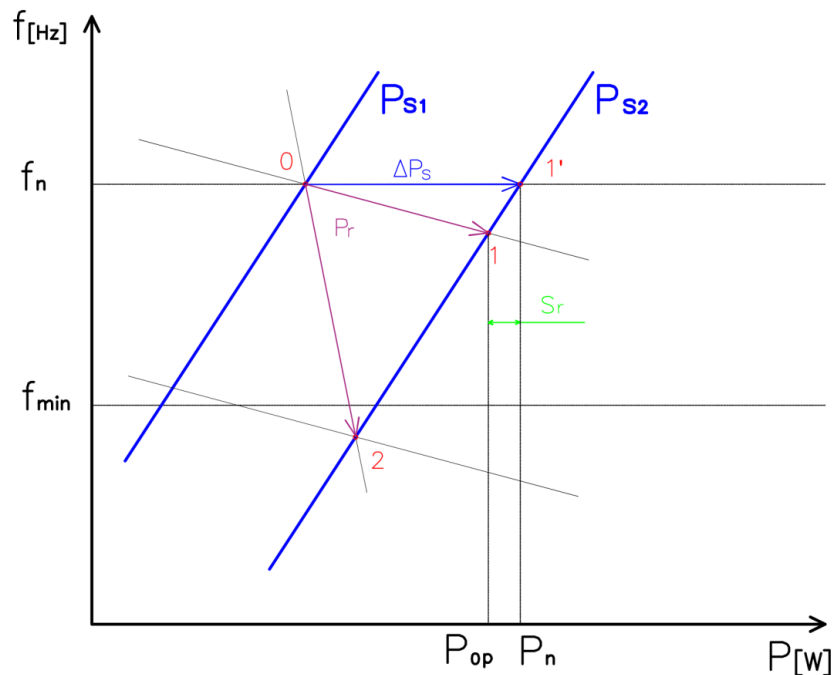
$$S_v(t) = S_s(t) + S_z(t) \pm S_a(t) \quad (4.3)$$

kde:

$S_v(t)$ -	vyrobený zdánlivý výkon [MVA]
$S_s(t)$ -	spotřebovaný zdánlivý výkon [MVA]
$S_z(t)$ -	ztráty zdánlivého výkonu [MVA]
$S_a(t)$ -	akumulace zdánlivého výkonu [MVA]

Spotřebitel požaduje dodávku s kvalitativními parametry. Parametrickým ukazatelem vyrovnanosti energetické bilance v ES je frekvence, která je regulována změnou činného výkonu. Jestliže se pracovní bod ES bude vyskytovat na hranici maximálního výkonu výrobních bloků P_{vmax} , nebude mít soustava dostatek výkonové rezervy a výkonová

rovnováha v případě navýšení požadavků spotřeby se pravděpodobně neobnoví. V propojených soustavách dochází k vybočení frekvence mimo limitní hodnoty, a aby mohlo být zajištěno napájení alespoň části spotřebičů s dostačujícími kvalitativními parametry, musí bloky přejít do režimu ostrovního provozu. V případě, že by nebylo možno přejít do ostrovního provozu, nastal by frekvenční kolaps. [22] Tento případ popisuje Obr. 4.4.



Obr. 4.4 Pracovní bod ES, převzato z [22].

Je vidět, že po vzniku deficitní soustavy se zátěž zvětší o ΔP_s , a tím přejde statická charakteristika zátěže z P_{S1} na P_{S2} . V tomto stavu mohou nastat dva případy. V prvním případě, kdy je dostatek výkonové rezervy, přejde pracovní bod 0 do bodu 1. Vzhledem k tomu, že se bod 1 nachází mezi f_n a f_{min} , ustálí se frekvence soustavy ještě na této nižší frekvenci a je schopna provozu. V druhém případě, kdy je nový pracovní bod (v Obr. 4.4 jde o bod 2) umístěn už pod f_{min} , nemůže dojít k ustálenému stavu a elektrárny se odpojí od sítě, nastává blackout. Toto je nejhorší případ, který může nastat, protože hlavním záměrem je držet všechny potřebné bloky stále v provozu, ať už v ostrovu, kde je zapojeno několik bloků do jedné sítě, nebo se vytvoří ten nejmenší ostrov a to je napájení vlastní spotřeby. Za předpokladu, že bloky stále pracují, mohou se bez větších časových prodlev přifázovat zpět do sítě. [22]

V běžném provozu je ES udržována na hodnotě f_n pomocí primární a sekundární regulace frekvence a činného výkonu. Tuto regulaci je možno provádět pouze ve frekvenčním rozsahu 49,8 - 50,2 Hz ($\Delta f = \pm 0,2$ Hz). Při překročení tohoto frekvenčního rozsahu určuje následné opatření frekvenční plán, což je provozní instrukce české přenosové soustavy (ČEPS), která vychází z vyhlášky Ministerstva průmyslu a obchodu (MPO) č. 80/2010 Sb. ze dne 18. března 2010 o stavu nouze v elektroenergetice a o obsahových náležitostech havarijního plánu. [22]

Cílem použití frekvenčního plánu je včasnými automatickými zásahy do provozu elektrizační soustavy omezit vznik velkých systémových poruch, vrátit a udržet kmitočet ES po vzniku poruchy v hodnotách, při nichž není ohroženo technické zařízení výrobců elektřiny a zákazníků a vytvořit podmínky pro rychlý návrat kmitočtu ES do rozmezí hodnot 49,8 - 50,2 Hz.

V případech, kdy po vyčerpání opatření na straně výrobců elektřiny a omezování spotřeby na straně zákazníků pro udržení kmitočtu elektrizační soustavy, se jeho hodnota dále odchyluje, je cílem frekvenčního plánu zachovat rozhodující bloky výroben elektřiny v provozu pro vlastní spotřebu, a tím vytvořit podmínky pro urychlení obnovy napětí a normálního provozu ES.

Při překročení zmíněného frekvenčního rozsahu se odstavují bloky přečerpávacích vodních elektráren v čerpadlovém provozu a jsou připraveny na zahájení turbínového provozu. Jakmile se frekvence dostane pod 49,8 Hz začnou najíždět bloky přečerpávacích vodních elektráren. Může již dojít k vytváření OP částí ES. Při nárůstu frekvence nad 50,2 Hz se automaticky odpojují vybrané bloky vodních a přečerpávacích vodních elektráren. Při dosažení hodnoty 51,5 Hz se vypínají zbývající bloky přečerpávacích vodních elektráren v turbínovém režimu a bloky vodních elektráren. Bloky napájejí pouze vlastní spotřebu. Při poklesu frekvence do pásma 49 – 47,5 Hz začíná automatické přepínání autovýrobců elektřiny do OP, frekvence je stanovena dohodou s ČEPS. Tab. 4.1 vymezuje limitní hodnoty frekvencí ES přípustných pro provoz elektrických zdrojů dle pravidel pro provozování přenosové soustavy ČEPS. Zde jsou vidět hodnoty a stavy, které je nutno respektovat. [22]

Tab. 4.1 Vymezovací frekvence v Hz pro pásma v provozu.

Typ elektrárny Provoz	Uhelné	JE		VE	PVE		Paro- Plynové
		EDU	ETE		Turbína	Čerpání	
Normální bez omezení	48,5 50,5	48,5 – 50,5	48,5 – 50,5	48,5 – 50,5	48,5 – 50,5	49,5 – 50,5	48,5 – 51,5
Časové omezení	46,0 48,5	47,5 – 48,5	47,9 – 48,5	46,0 – 48,5	46,0 – 48,5	49,0 – 49,5	48,0 – 48,5
	50,5 53,0	50,5 – 52,5	50,5 – 51,5	50,5 – 53,0	50,5 – 53,0	50,5 – 52(53)	50,5 – 53,0
Nepřípustný	f > 53	f > 52,5	f > 51,5	f > 53	f > 53	f > 52 (53)	f > 52
	f < 46	f < 47,5	f < 47,9	f < 46	f < 46	f < 49	f < 48
Automatické odpojení od ES	f > 53	f > 52,5	f > 51,5	f > 50,2(51,5)	f > 50,2(51,5)	f > 52(53)	f > 52
	f < 47,5	f < 47,9	f < 47,9	f < 47,5	f < 47,5	f < 49,8 – 49,2	f < 48

V ostrovním režimu je využíván synchronní alternátor k napájení určitého komplexu, či rozsáhlého zařízení bez připojení k tvrdé síti. K tomuto stavu synchronního generátoru dojde při rozpadu přenosové soustavy na jednotlivé oblasti (ostrovy) při kolísání frekvence pod nebo nad přípustné meze, jak je popsáno výše. Nejkrainější případ ostrovního provozu je stav, kdy alternátor napájí jen vlastní spotřebu elektrárenského komplexu.

4.2.1 Přejchod výroby na vlastní spotřebu

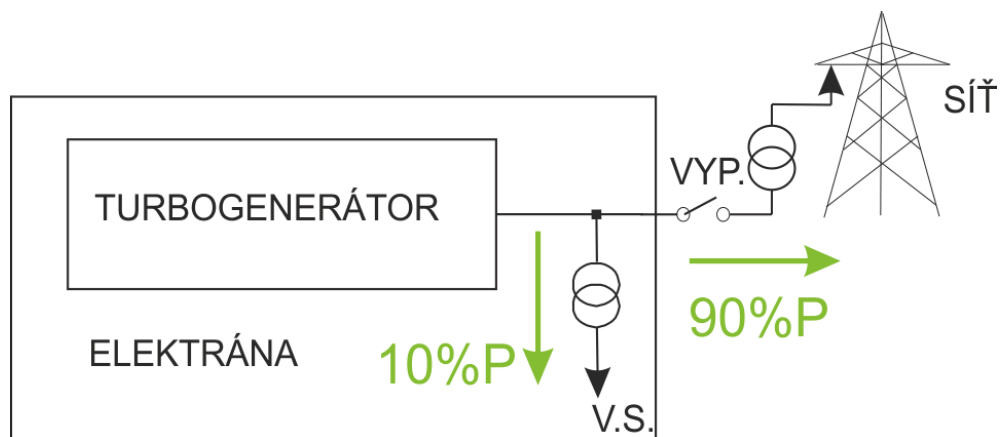
Ostrovní provoz výroby se vyznačuje značnými změnami systémových veličin – frekvence a napětí, což souvisí s tím, že zdroj pracuje do izolované části soustavy. Výrobní přechází automaticky do regulačního režimu ostrovního provozu při poklesu frekvence pod 49,8 Hz a při vzrůstu frekvence nad 50,2 Hz. Změny zatížení ostrova představují velké nároky na regulaci činného výkonu výroby. Zatížení je proměnné a tím vyvolané změny napětí a frekvence musí být blok schopen řešit svou autonomní regulací (na rozdíl od paralelního provozu, kdy jsou změny napětí a frekvence řešeny prostřednictvím systémových služeb).

Regulátor ostrovního provozu automaticky přebírá regulaci elektrárenského bloku v případě překročení mezí kmitočtu 49,8 - 50,2 Hz (v souladu s frekvenčním plánem), má charakter proporcionální otáčkové regulace (s definovanou statikou a necitlivostí) a zajišťuje některé další specifické funkce, potřebné při ostrovním provozu. [24]

Při přechodu do ostrovního provozu (jehož vznik je indikován vhodným frekvenčním relé, které je nastaveno na hodnotu danou frekvenčním plánem) je nutné okamžitě zajistit:

1. změnu režimu regulace výroby na proporcionální regulaci otáček
2. odpojení dálkové regulace výkonu (vypojení zdroje ze sekundární regulace f a P)
3. odpojení automatické sekundární regulace napětí ze systému terciární regulace napětí
4. aperiodický a stabilní přechod otáček na novou hodnotu, která je dána frekvencí v ostrovu a nastavenými parametry regulace otáček. Výkon výroby se v mezním případě může změnit z hodnoty jmenovitého výkonu až k hodnotám vlastní spotřeby
5. odepnutí výroby od vnější sítě do provozu na vlastní spotřebu (i z jmenovitého zatížení) nebo na provoz do vyčleněné části distribuční soustavy. Přechod na otáčkovou regulaci musí být stabilní.
6. přepnutí potřebných regulací zdroje do režimu vhodného pro ostrovní provoz
7. další provoz podle pokynů provozovatele distribuční soustavy [23]

Přechod elektrárenského bloku ze jmenovitého zatížení na vlastní spotřebu je situace, kde jmenovitý výkon bloku P_g , který je dodáván do sítě se musí skokově změnit na výkon ostrova v krajním případě na výkon vlastní spotřeby ($10\%P$).



Obr. 4.5 Přibližné toky výkonů z turbogenerátoru.

Procesy, které probíhají v elektrárně při přechodu na ostrovní režim jsou velmi složité. Tato práce popisuje jen základní principy regulace.

Kroky při změně výkonu elektrárenského bloku na vlastní spotřebu:

První krok je změna režimu regulace výroby na proporcionální regulaci otáček, odepnutí od dálkové regulace. Dále v prvním okamžiku pára, která pohání turbínu, musí být regulována tak, aby byl výkon turbíny a tedy i generátoru omezen na výkon vlastní spotřeby.

Kotel je nahřátý a parametry stovek tun páry nelze v krátkém časovém horizontu měnit. Proto tedy první, rychlá regulace páry nemůže být zajištěna kotlem, ale škrcení páry na vstupu do turbíny pomocí regulačních ventilů případně zapůsobením přepouštěcích ventilů.

Proces škrcení páry je v prvním okamžiku zajištěn systémem bypassů a regulačních ventilů. Nejprve, jestliže dojde k uzavření regulačních ventilů, vznikne přetlak páry, která nemůže proudit do turbíny. Pára je přebrána bypassem a průtok do turbíny je dále řízen regulačním ventilem tak, aby výkon klesl na již zmiňovanou hodnotu 10% jmenovitého výkonu, což odpovídá vlastní spotřebě elektrárny.

Průchod páry bypassem a v krajním případě pojistným ventilem do vzduchu na střechu elektrárny je velmi ztrátová regulace a chtěli bychom se tomuto stavu vyvarovat.

4.3 Regulace turbosoustrojí provozované v ostrovním provozu

Každý regulovatelný elektrárenský blok je vybaven nastavitelným frekvenčním relé, které při náhlé změně frekvence o více než 0,2 Hz tento stav signalizuje ostatním regulačním systémům bloku. Regulace výkonu bloku je změněna na proporcionální regulaci a je odpojena sekundární regulace výkonu a terciální regulace napětí. Blok může následně pracovat do vydělené izolované soustavy, což znamená do ostrova. V ostrově je zapojeno více bloků do jedné sítě, nebo po dosažení mezní přípustné hodnoty frekvence dle frekvenčního plánu a při stabilních otáčkách do napájení vlastní spotřeby. Při napájení vlastní spotřeby pracuje do elektrické sítě pouze jeden blok, a proto je možno také použít proporcionálně integrační regulaci. Při OP musí být zajištěna stabilní spolupráce bloku s bloky, které jsou zapojeny do ostrova, a adekvátní odezva dodávaného činného a jalového výkonu na změny frekvence a napětí, která je dána vztahem: [22],[23]

$$P_{id} = P_0 - \frac{100 \cdot P_n}{\delta \cdot f_n} [W] \quad (4.4)$$

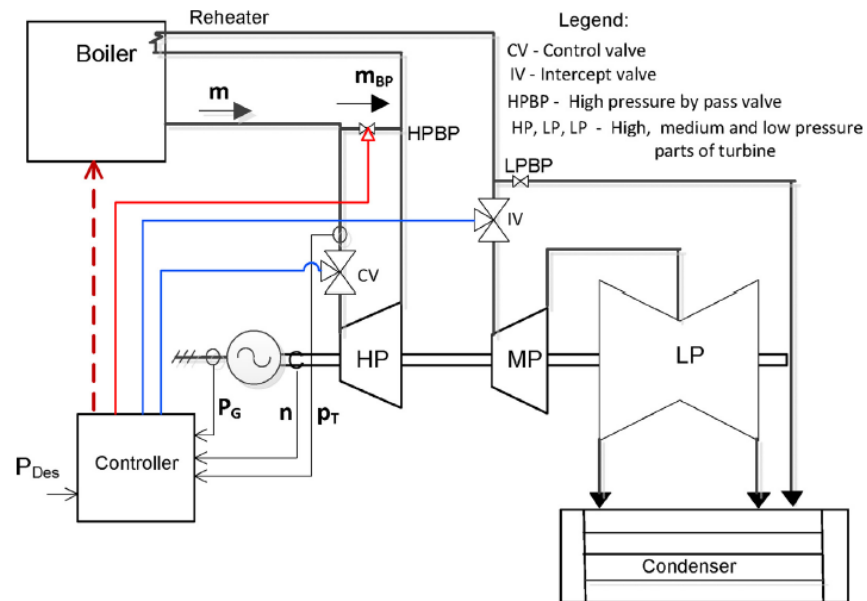
kde:

P_{id} -	idealizovaná závislost výkonu turbíny	[W]
P_0 -	výkon bloku před přechodem do OP	[W]
P_n -	jmenovitý výkon	[W]
f_n -	jmenovitá frekvence	[Hz]
Δf -	odchylka frekvence	[Hz]
δ -	statika proporcionálního regulátoru otáček	[%]

Blok musí rovněž zajistit plynulou změnu otáček soustrojí dle pokynů dispečera přenosové soustavy. Dle provozní instrukce ČEPS musí blok pro opětovné připojení ostrova k soustavě splňovat následující podmínky:

- Schopnost pracovat v režimu OP nejméně 2 hodiny.
- Schopnost jemně regulovat frekvenci ostrova pro možnost opětovného přifázování ostrova k přenosové soustavě. Blok musí být schopen připojení k vnější síti při požadovaném kmitočtu a svorkovém napětí $(92 < u < 108) \% U_n$.

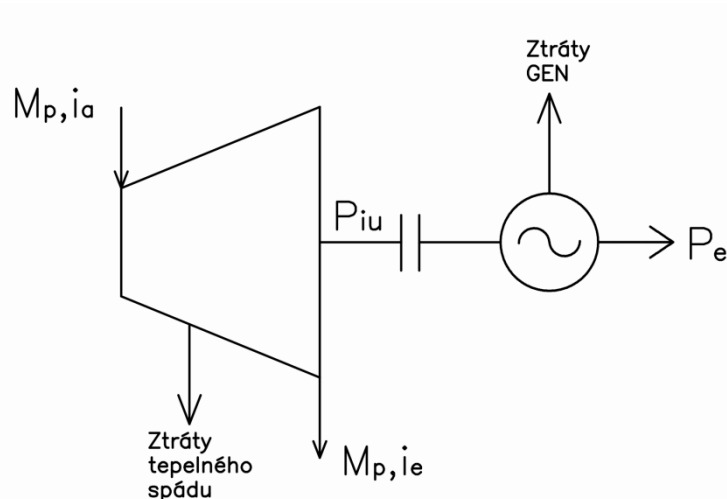
Pro kontrolu schopnosti OP se provádějí periodické certifikační testy dle metodiky popsané v části II. Kodexu přenosové soustavy. ČEPS může požadovat inspekci pro ověření způsobilosti plnit tuto službu, ovšem způsobem, který neovlivní chod bloku. [22]



Obr. 4.6 Princip otáčkové regulace elektrárenského bloku, převzato z [20].

Na obrázku 4.6 vidíme princip otáčkové regulace, kde ovládací prvek (Controller) vysílá požadavky na regulaci ventilů a regulaci kotle. Těmito dvěma regulacemi lze ovlivnit průtok páry přes turbínu a tím moment, který dodává synchronnímu generátoru a tím výkon, který generátor dodává do sítě. Jestliže se nerovnájí výkony P_{des} – chtěný výkon bloku a P_g skutečný výkon bloku, dojde k regulaci bloku nejdříve otevíráním bypassů (HPBP, LPBP) a následně k regulaci kotle.

4.3.1 Regulace admisních parametrů páry



Obr. 4.7 Schéma turbosoustrojí se vstupními a výstupními parametry páry, převzato z [25].

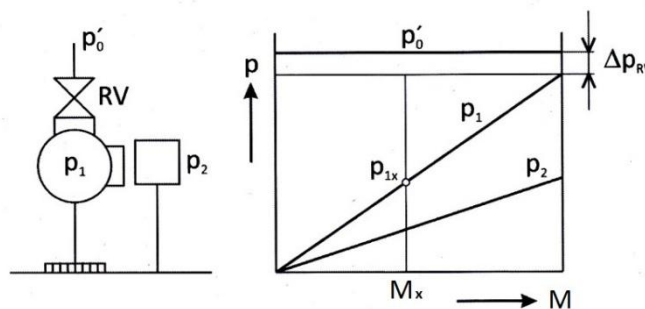
Parní turbosoustrojí můžeme regulovat třemi základními regulačními způsoby:

1) Regulace škrcením [25]

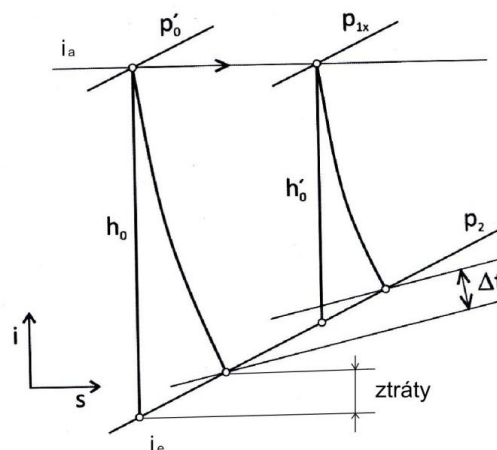
Tato regulace vychází z následující rovnice, kde výkon je rovný součinu hmotnostního průtoku = množství M_p páry, teplotního spádu turbíny h_0 a termodynamické účinnosti η_{td} .

$$P = M_p \cdot h_0 \cdot \eta_{td} \quad (4.5)$$

Regulace škrcením je znázorněna na Obr. 4.8. Během této regulace měníme hmotnostní průtok M dle velikosti otevření regulačního ventilu a podle tlaku p_{1x} před dýzami regulačního stupně. I při plně otevřeném ventilu vzniká na tomto ventilu tlaková ztráta Δp_{RV} . Jestliže seškrtíme vstupní tlak z p_0' na p_{1x} , ovlivní se tím i teplotný spád turbíny, který se změní z h_0 na h_0' .



Obr. 4.8 Regulace škrcením, převzato z [25].



Obr. 4.9 Regulace škrcením i - s diagram, převzato z [25]

Rozdíl tlaků mezi p_1 a p_2 je tlakový spád na lopatky regulačního stupně. Tlak za regulačním stupněm se mění lineárně s množstvím. Rozváděcí kolo regulačního stupně má v tomto případě totální ostřík. Výhodou této regulace je, že se při změně výkonu

teplota Δt za regulačním stupněm změní pouze minimálně. Proto je tento způsob regulace vhodné použít tam, kde je zapotřebí regulovat časté krátkodobé změny výkonu. Nevýhodou této regulace je, že se díky škrcení celého hmotnostního průtoku zmenšuje i tepelný spád v turbíně.

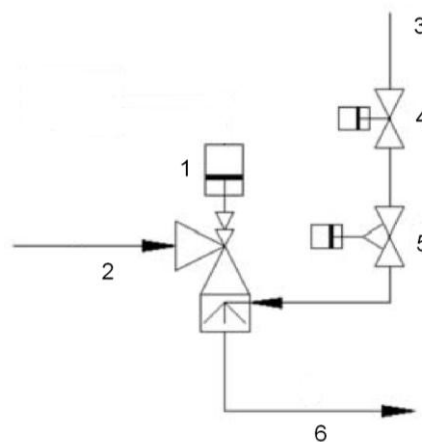
2) Regulace skupinová

3) Regulace klouzavým tlakem

O těchto dalších možnostech regulace si lze přečíst v materiálu [25].

4.3.2 Přepouštěcí (bypassové) stanice

Dalším důležitým zařízením pro přechod do ostrovního provozu jsou přepouštěcí stanice nebo-li bypass. Tyto stanice přepouštějí přebytečné množství páry, vzniklé přivřením regulačních ventilů nebo rychlouzávěrných ventilů. Přepouštěcí stanice jsou tvořeny z bypassových parních ventilů, regulujících tlak a zároveň z chladičů páry, které pomocí vstříkované vody regulují teplotu páry. Regulace se provádí přímo ve ventilu nebo ihned za ním. Pomocí těchto chladičů se teplota páry snižuje na požadovanou výstupní teplotu. Přepouštěcí stanice, kterými prochází přehřátá pára před VT ventily, a přepouštěcí stanice před středotlakými ventily, přepouštějí páru, která se ochladí sestříkem na parametry vratné páry, jdoucí zpět do kotle. Na Obr. 4.10 je vidět schéma VT bypassu, kde je za pomoci regulačního přepouštěcího ventilu 1 redukován příliš vysoký tlak na vstupu do VT části turbíny. Přes uzavírací a regulační ventil 4, 5 je přivedena chladící voda a za pomoci sestříku snížen tlak a teplota výstupní páry 6, která je vedena zpět do kotle. [25]



Obr. 4.10 Schéma VT bypassu, převzato z [22].

kde:

- 1 - přepouštěcí hydraulický regulační ventil
- 2 - vstup přehřáté páry
- 3 - přívod chladicí vody
- 4 - uzavírací ventil chladicí vody
- 5 - regulační ventil chladicí vody
- 6 - výstup páry

4.4 Opětovné připojení ostrova k soustavě

Výrobna musí být schopna:

1. pracovat v režimu ostrovního provozu po dobu minimálně 2 hodin,
2. dle pokynů dispečera DS regulovat frekvenci ostrova dostatečně plynule a jemně tak, aby mohlo dojít v daném místě k opětovnému přiřazování ostrova k propojené soustavě,
3. výrobna musí být schopna připojení k vnější síti při kmitočtu dle frekvenčního plánu a svorkovém napětí $(92 < u < 108)\% U_n$,
4. v případě, že se výrobna fází v rozvodně DS, musí být blok schopen přivést napětí po blokovém vedení do této rozvodny. [23]

5 Model elektrárenského bloku

5.1 Objektově orientovaný jazyk SWING

SWING editor je vývojové prostředí, ve kterém lze pomocí bloků sestavit funkční schéma.

Program SWING je produkt společnosti CORYS T.E.S.S, která byla založena roku 1989. Společnost Corys má k dnešnímu dni přes 230 zaměstnanců s 80% technických inženýrů a roční obrat činí přes 30 milionů eur.

CORYS je světově velmi uznávanou společností v odvětví simulátorů tepelných elektráren, používaných ke školení. V České republice je v provozu trenážer pro školení nejen elektrárenských dispečerů, pracující na bázi jazyku SWING, v Chomutově ve výcvikovém středisku.



Obr. 5.1 Logo programu SWING.

Princip programování v objektově orientovaném jazyku SWING je podobný jako programování v Matlab Simulink. Ovšem SWING lze použít spíše pro statické modelování například výkonových bilancí, oproti tomu Matlab Simulink se dá používat i na dynamickou analýzu.

Největší výhodou oproti jiným obdobným programům je skutečnost, že po sestavení modelu a vytvoření grafického rozhraní lze vytvořit aplikaci .exe, kterou může uživatel posléze spustit na PC i bez nainstalovaného programu SWING.

SWING editor - struktura

SWING editor obsahuje 4 knihovny, ve kterých jsou obsaženy bloky, používané k sestavení modelu:

- ELECTRIX

V této knihovně můžeme nalézt objekty elektrického charakteru, jako jsou generátory, transformátory, náhradní schéma pro síť, zátěž a tak podobně.

- HYDRAULIX

V knihovně HYDRAULIX nalezneme objekty, které pracují na bázi tekutin a plynů, například parní turbína, parní kondenzátor, parní potrubí atd.

- CONTROLIX

CONTROLIX je knihovna ve které jsou logické funkce, časovače, algebraické funkce a tak podobně. V této knihovně lze vzájemně propojit funkce knihoven ELECTRIX a HYDRAULIX.

- GRAFCET – SEQUENCE MANAGER

Je knihovna ve které se graficky řeší automatické logické obvody.

SWING - způsob programování

V objektově orientovaném jazyku SWING se pracuje odlišně, než je tomu v jiných programech. Uživatel si může vytvořit více stránek nebo-li pages, které posléze lze mezi sebou propojit. Například na jedné stránce mohou řešit modelování hydraulického schématu tepelné elektrárny a na další stránce si vytvořím podklad pro průběhy veličin z hydraulického schématu. Tyto dvě stránky poté propojím a veličiny z hydraulického schématu načtu do druhé stránky, kde je zobrazím v čase.

Na každé stránce se o synchronizaci běhu grafů a bloků stará spouštěč (nebo-li trigger). Do spouštěče si nastavíme objekty, které mají být na začátku spuštění aplikace uvedeny do provozu a také je nutné zadat interval, po kterém probíhá výpočet celého schématu nanovo. Čím kratší interval zvolíme, tím přesnější budou výstupní průběhy. Nevýhodou však je, že tím náročnější bude výpočet pro PC (obzvláště pak u složitějších schémat).

5.2 Popis vlastního modelu

Úkolem mé diplomové práce bylo vytvořit model bloku tepelné elektrárny o výkonu 200MW, který po najetí turbosoustrojí na jmenovitý výkon v libovolném čase přejde na ostrovní provoz, kde napájí vlastní spotřebu.


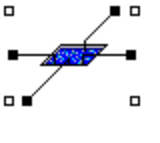



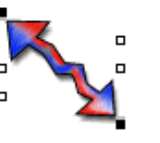
Nejprve popíši základní bloky editoru SWING, které jsem použil při sestavování modelu. Celé zapojení modelu z jednotlivých knihoven lze vidět v příloze A, B a C.

5.2.1 Použité bloky při sestavování modelu

Bloky vkládáme libovolně na plochu uvnitř vložené knihovny na plochu stránky a propojujeme jednotlivé vstupy čarou, znázorňující bezeztrátové a ideálně vedoucí parní potrubí nebo elektrické bezeztrátové vedení a nebo jen vodiče, které vedou různé signály a data. Bloky použité při sestavování modelu bloku tepelné elektrárny lze rozdělit podle knihoven editoru SWING, které tyto bloky obsahují.

Knihovna HYDRAULIX

Tab. 5.1 Použité bloky z knihovny HYDRAULIX.

Steam turbine	Boundary conditions	Nodes	Steam pipe	Solid mass	Heat exchange
					

Nevýhodou editoru SWING je skutečnost, že nelze kombinovat provozní média různého skupenství. Například obvody pro páru a pro vodu musí být řešeny separátně od sebe v jiných knihovnách.

Popis prvků

- 1) Steam turbine

Steam turbine je prvek, který umožňuje modelovat jeden stupeň turbíny. Obvykle se například pro VT díl použije více těchto prvků v sérii za sebou. Použijeme-li více prvků za sebou, pára expanduje postupně v každém prvku a ne jen v jednom stupni najednou. Takto lze dosáhnout větší účinnosti parní turbíny. Parametry, které se nastavují u tohoto bloku, jsou například: *průřez turbíny* [m^2], *maximální účinnost* [-], *úhlová rychlost* [rad/s], *obvodová rychlost stroje* [m/s] atd.

2) Boundary conditions

Blok Boundary conditions nebo-li Počáteční podmínka je blok, do kterého se zadávají veličiny provozního média. Zadáme-li například hodnotu tlaku a teploty páry, blok si sám dopočte podle i-s diagramu páry entalpii. Parametry, které se mohou nastavit, jsou *tlak* [Pa], *teplota* [$^{\circ}C$], *entalpie* [J/kg], *hustota* [kg/m^3] a další.

3) Two-phased homogenous nodes

Tento blok je používán jako spojovací uzel mezi jednotlivými bloky, jako například mezi dvěma sekcemi parní turbíny. V tomto bloku SWING vypočítává průběžné parametry páry jako: *tlak* [Pa], *teplotu* [$^{\circ}C$], *průtok* [kg/s] atd.

4) Pipe with valve

Pipe with valve je blok, který slouží pro simulaci parovodu s regulačním ventilem. Parametry které se nastavují jsou: *vodivost páry* [-], *otevření ventilu* [%].

5) Solid mass

Solid mass (pevná hmota) je blok, který znázorňuje při spojení spolu s blokem Heat exchange tepelnou akumulaci hmoty turbíny.

Pomocí těchto šesti prvků lze pohodlně sestavit model parní turbíny.

V knihovně CONTROLIX

Tab. 5.2 Použité bloky v knihovně CONTROLIX.

Input Output	Logic functions	Segment function generator	Ramp generator	Real input selector	PID controller

Bloky, které mají zelené vstupy, pracují s reálnými proměnnými, vstupy červené znamenají vstupy pro binární proměnné a modré vstupy jsou typu double.

Popis prvků

1) Input, Output

Jsou bloky využívané pro načítání hodnot proměnných. Vstupy a výstupy jsou různého typu: *double*, *real*, *binar*.

2) Logic functions

Logické funkce jsou využívané k používání jednoduchých logických funkcí jako *AND*, *OR*, *NOT* atd. Dále jsou to funkce větší než, menší než, atd.

3) Segment function generator

Blok využívaný ke generování námi nastavené charakteristiky, která se skládá až z pěti bodů (dané souřadnicemi X,Y), které jsou proloženy lineární funkcí.

4) Ramp generator

Tento blok na popud binárního vstupu generuje časově závislou rampu v nastavených mezích např od 0-100%.




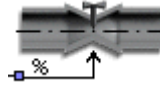
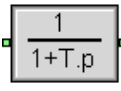

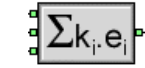

5) Real input selector

Real input selector je využíván pro selekci dvou reálných vstupů. Spouštěcím činitelem je binární vstup.

6) PID controller

PID controller nebo-li PID regulátor, který reaguje na vstupní diferenci.

Tab. 5.3 Použité bloky v knihovně CONTROLIX.

Konstanty	Diferenční blok	Position controller of valve opening	Filter	Real/double converter	Sum, Multiplication
 					 

7) Diferenční blok

Je blok, který odečítá dvě vstupní reálné hodnoty v čase a na výstupu bloku je rozdíl těchto dvou vstupů. Diferenční blok se využívá jako vstupní člen pro PID regulátor reagující na vstupní diferenci.

8) Position controller of valve opening

Position controller of valve opening je blok, který ovládá ventil umístěný v knihovně HYDRAULIX.

9) Filter

Pomocí bloku Filter lze odfiltrvat nežádoucí překmitý signálu. Zařazením filtru dosáhneme vyhlazení výstupního signálu.

10) Real/double converter

Tento blok převádí reálnou hodnotu proměnné na hodnotu double.

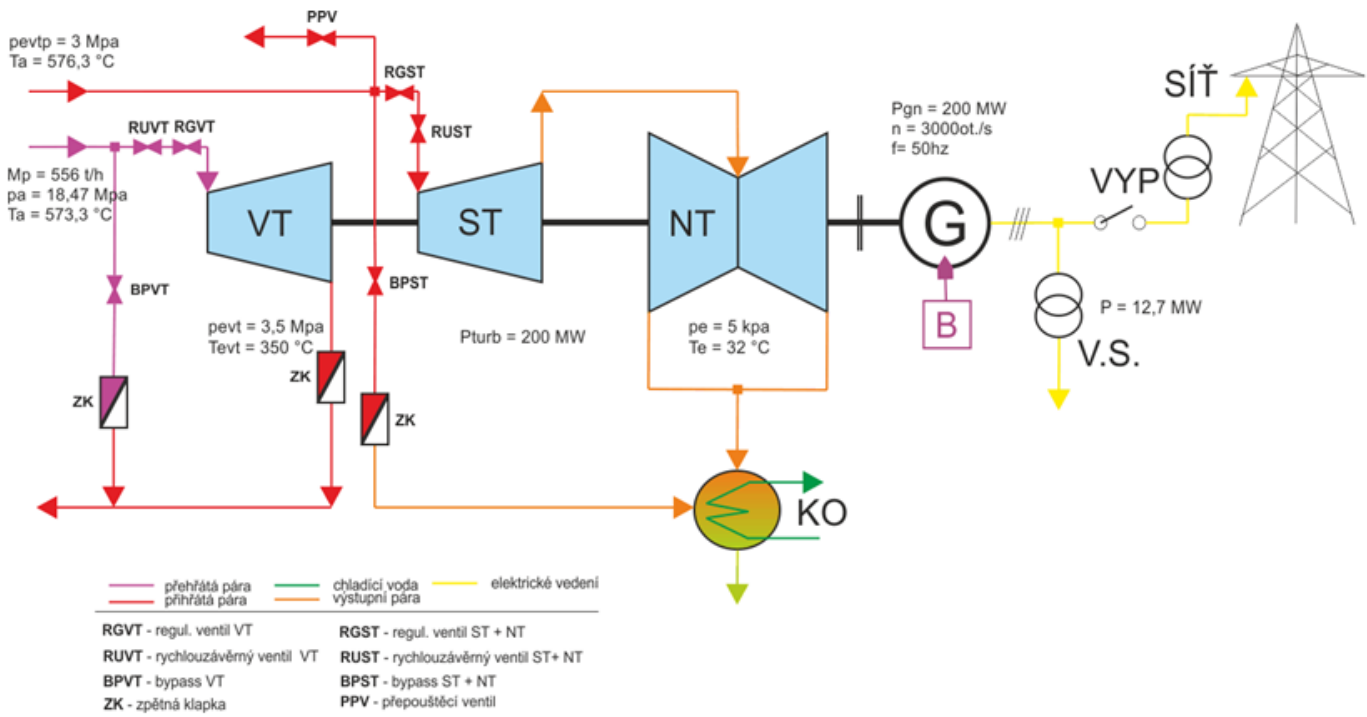
5.2.2 Schéma zapojení a parametry bloků modelu

Pro sestavení a odladění modelu bylo použito zjednodušené schéma zapojení elektrárenského bloku Tušimice II. Pro nastavení regulačních ventilů, bypassů a přepouštěcích stanic byly použity charakteristiky obsažené v literatuře [22].

Parametry bloku tepelné elektrárny Tušimice II

Tab. 5.4 Jmenovité hodnoty bloku elektrárny Tušimice II, převzato z [21].

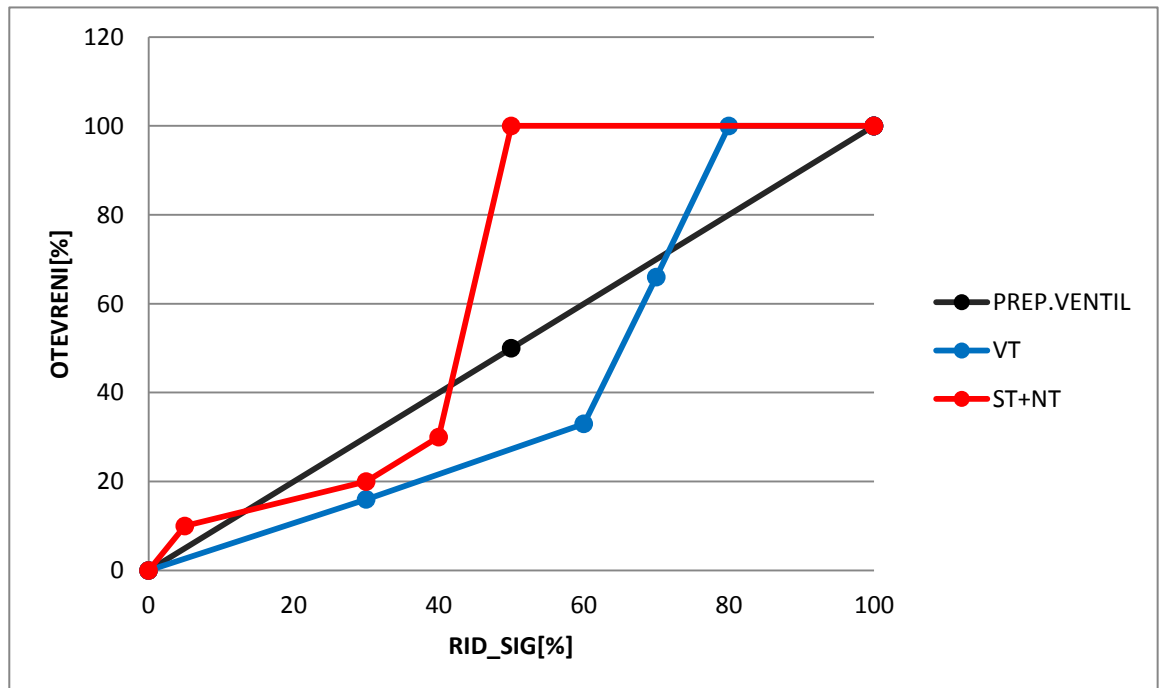
Jmenovitý parní výkon kotle	M_p [t/h]	553
Jmenovitý tlak přehřáté páry	p_a [MPa]	18,47
Jmenovitý tlak na výstupu VT	p_{evt} [MPa]	3,5
Jmenovitý tlak páry na výst. NT	p_e [Mpa]	5e-3
Jmenovitá teplota pře. páry	T_a [°C]	573,3
Jmenovitá teplota na výstupu VT	T_{evt} [°C]	350
Jmenovitá teplota při. Páry	T_k [°C]	576,3
Jmenovitá teplota na výst. NT	T_e [°C]	32
Výkon bloku	P [MW]	203,85
Účinnost bloku	η [%]	39
Vlastní spotřeba bloku	P_{vl} [MW]	12,7
Jmenovitý výkon turbíny	P_T [MWe]	200
Jmenovitý výkon generátoru	P_g [MW]	200
Otáčky generátoru	n [ot./min]	3000
Jmenovitá frekvence generátoru	f [Hz]	50



Obr. 5.2 Pohled na zapojení a parametry zjednodušeného bloku tepelné elektrárny Tušimice II.

Charakteristiky regulačních ventilů

Charakteristiky otevření ventilů generované pomocí softwaru EXCEL vypadají následovně:



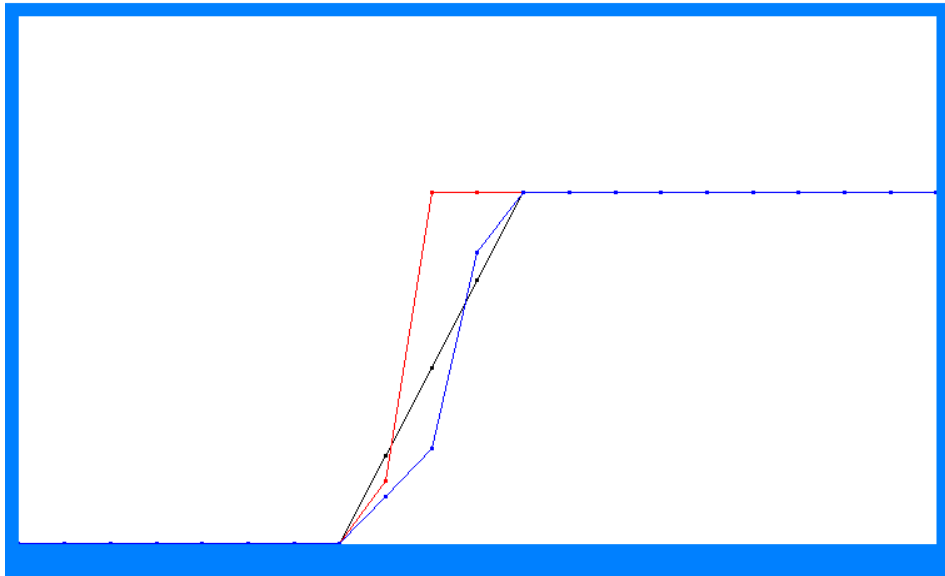
Obr. 5.3 Průběh otevření ventilu v závislosti na řídicím signálu/čase.

Černá – přepouštěcí ventily

Modrá – VT regulační ventil a bypass

Červená – ST+NT regulační ventil a bypass

Charakteristiky otevření ventilů se v editoru SWING realizují pomocí bloku rampy, který generuje řídicí signál od 0 – 100 % a dává popud dalšímu bloku, který se nazývá lomená funkce. Tento blok reaguje na řídicí signál a dle nastavených bodů X a Y generuje požadovanou funkci. Průběhy v editoru SWING vypadají následovně:



Obr. 5.4 Průběh otevření ventilů. Závislost otevření [%] na řídicím signálu [%]. Barevné označení odpovídá obrázku 5.3.

5.2.3 Model bloku tepelné elektrárny o výkonu 200MW

Model, který by odpovídal přesně reálnému provozu, by byl velmi složitý soubor na sebe navazujících zařízení. Takový model se ve skutečnosti tvoří až několik let a jeho cena se pohybuje v milionech korun.

Zjednodušující a upřesňující předpoklady pro model bloku elektrárny 200 MW:

- 1) Kotel dodává konstantní jmenovité certifikované hodnoty páry,
- 2) Regulace kotle při přechodu do OP není dále uvažována,
- 3) Není uvažováno regeneračního ohřevu – regulovaných odběrů z parní turbíny,
- 4) Hodnoty některých parametrů prvků jsou odhadnuty s pomocí odborníků z praxe nebo jsou převzaty z jiných odborných prací. Přesné hodnoty nejsou k dispozici, jelikož podléhají výrobnímu tajemství společností.

- 5) Do obvodu je zařazen přepouštěcí ventil pro přepouštění páry pryč z obvodu – z důvodu regulace průtoku páry při reálné hltnosti bypassů.

Ad 1) Kotel dodává ihned požadované parametry páry. Neuvažuji spouštění a nahřívání kotle. Předpokládám, že na vstupu do VT dílu ihned působí pára o požadovaných parametrech.

Ad 2) V reálném provozu se při přechodu do ostrovního režimu spolu se škrcením regulačního ventilu a poté okamžitým přejmutím páry bypasssem spolu s tímto procesem začne odtápět kotel, aby nedodával stále páru o vysoké teplotě a tlaku. Kdyby se tak nestalo, tak energie obsažená v natlakované páře by byla zbytečně mařena v bypassu nebo v horším případě v přepouštěcích ventilech.

Ad 3) Obvykle se v provozu využívá regenerativního ohřevu napájecí vody do kotle pomocí odběrové páry z ST dílu parní turbíny.

Já ovšem tyto odběry neuvažuji.

Ad 4) Například parametru „*Section*[m^2]“, u sekce parní turbíny, který znamená průřez turbíny, lze jen velmi těžko získat od výrobce nebo výpočtem. Tento parametr je charakteristický pro každý typ turbíny. Výpočet přesné hodnoty je velmi obtížný.

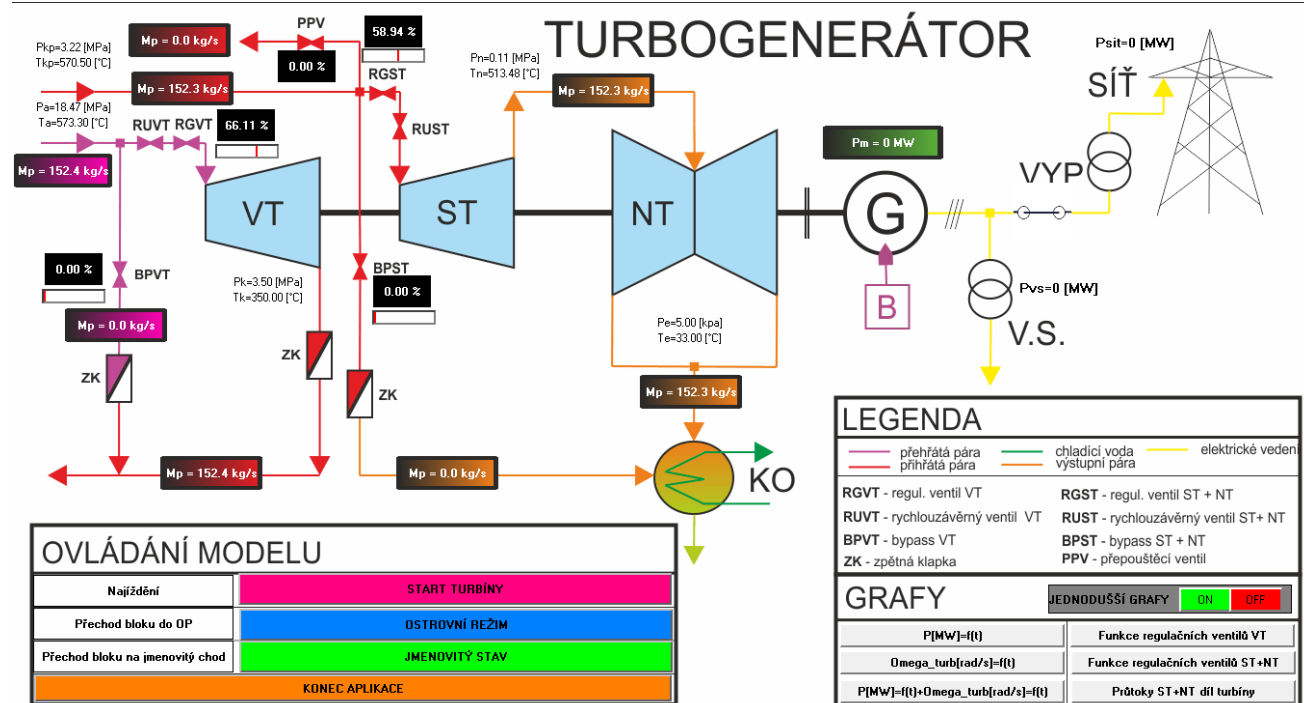
Je zřejmé, že odhadnutí parametrů vnáší do modelu chyby a nepřesnosti.

5.2.4 Uživatelské rozhraní modelu

Po spuštění aplikace *model_turbosoustrojí.exe* se uživateli zobrazí úvodní stránka s grafickým rozhraním modelu. V horní části uživatelského rozhraní je schéma turbosoustrojí bloku tepelné elektrárny o výkonu 200MW.

Po spuštění aplikace čeká parní turbína na pokyn uživatele ke spuštění najíždění parní turbíny tlačítkem START TURBÍNY. Po najetí turbíny na jmenovité otáčky se stroj za 10s sám nafázuje na síť.

V dolní polovině uživatelského rozhraní lze vidět pole s ovládnáním modelu, kde si uživatel může zvolit mezi dvěma provozními stavy turbogenerátoru - jmenovitým stavem chodu turbogenerátoru (JMENOVITÝ STAV) a chodem v ostrovním provozu (OSTROVNÍ REŽIM). Případně lze aplikaci ukončit (KONEC APLIKACE).



Obr. 5.5 Uživatelské rozhraní modelu turbogenerátoru

Výstupy modelu má uživatel možnost sledovat jak číselné, tak i grafické. Grafické průběhy hodnot v čase lze zobrazit buď jednoduchými grafy tlačítkem ON/OFF a nebo v tabulce GRAFY lze přeskočit na stránku s podrobným grafem příslušným tlačítkem grafu, který uživatel chce zobrazit.

V poli LEGENDA je nápověda pro orientaci v modelu. V tomto poli je vysvětlen smysl zkratk ventílů a význam barevného označení propojení.

5.2.5 Popis struktury a funkce modelu

HYDRAULIX

V knihovně HYDRAULIX se zabývám sestavením parního okruhu tří dílné kondenzační parní turbíny.

Parovody a ventily jsou rozmístěny podle skutečnosti. Vodivost parovodů byla odhadnuta dle požadovaného hmotnostního průtoku turbínou. Ventily jsou ovládnány logikou, která je vytvořena v knihovně CONTROLIX.

Parní turbína

Parní turbína se skládá ze tří dílů a to z vysokotlakého (VT) , středotlakého (ST) a nízkotlakého (NT).

1) VT díl

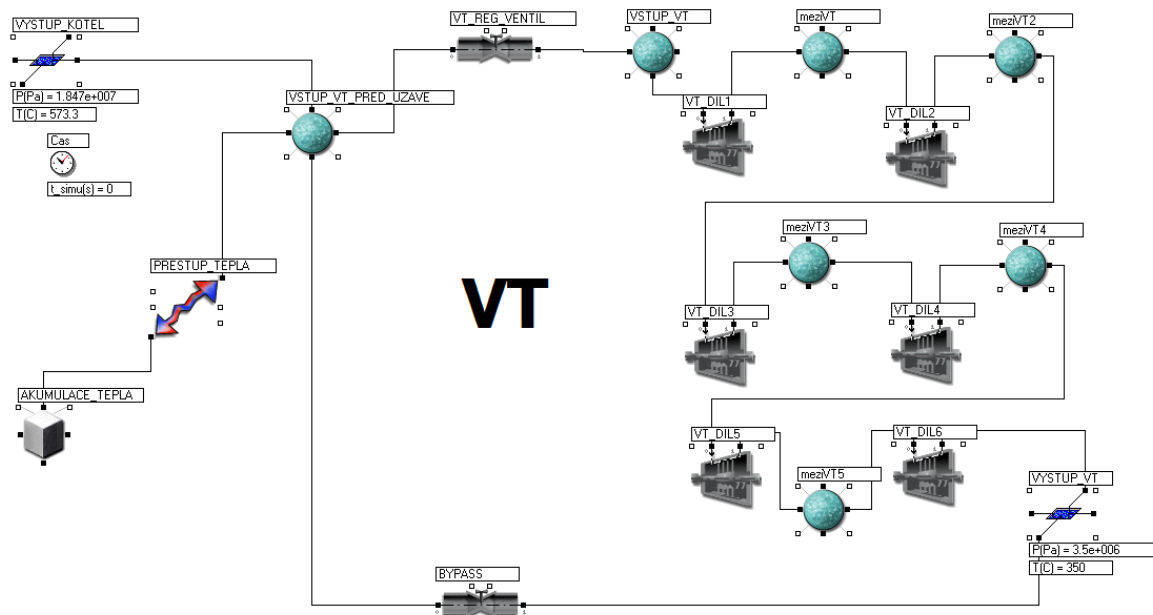
Prvek, který znázorňuje parní turbínu, není od vývojářů jazyka SWING konstruován na tak velké tlakové spády (z 18 MPa na 3,5 MPa). Blok by pracoval se špatnou účinností. Proto jsem VT díl rozdělil na 6 sekcí. Momenty od takto rozdělených sekcí pak jen sečtu, abych dostal výsledný moment VT dílu.

2) ST+NT díl parní turbíny

ST díl turbíny je rozdělen do dvou sekcí. NT díl postačí modelovat jen jako jednu sekci.

Konfigurace parního schématu turbosoustrojí

Vstupní hodnoty z kotle do parní turbíny jsou modelovány pomocí bloku počátečních podmínek. Tyto vstupní hodnoty jsou drženy po celou dobu konstantní. Přihřívání výstupní páry z VT dílu na parametry vstupní páry do ST dílu jsou řešeny násobením konstantou hodnoty výstupní páry z VT dílu.



Obr. 5.6 Zapojení VT dílu parní turbíny.

Z Obr. 5.6 je vidět princip zapojení VT dílu parní turbíny. Je patrné rozdělení VT dílu turbíny do šesti sekcí. V bloku počáteční podmínky VYSTUP_KOTEL jsou nastaveny parametry páry, kterou dodává parní generátor VT dílu parní turbíny. Parametry páry jsou konstantní po celou dobu simulace. Z počáteční podmínky VYSTUP_KOTEL dále pára putuje do prvku nazvaného VSTUP_VT_PRED_UZAVE, kde je průtok páry ovlivňován přestupem a akumulací tepla hmotou parní turbíny (myšlena ocel z které je turbína konstruována). Na výstupu z tohoto bloku se pára rozděluje do parovodů nazvaných BYPASS a VT_REG_VENTIL a to podle toho zda elektrárenský blok zrovna pracuje v ostrovním režimu a nebo ve jmenovitém provozu.

1) Pokud se jedná o jmenovitý stav

Pára proudí přes šest sekcí turbíny, kde předá svojí energii turbíně a expanduje na hodnotu 3.5 MPa a 350°C. Tyto hodnoty výstupní páry z VT dílu parní turbíny jsou přenásobeny konstantami tak, aby pára na vstupu do ST dílu parní turbíny měla parametry takové, jako po přehřátí z přehříváku páry (tlak přibližně 3 MPa a teplota 576,3 °C). Pára s takto upravenými parametry putuje dál do počáteční podmínky s názvem VSTUP_ST_NT.

2) Pokud se jedná o ostrovní režim

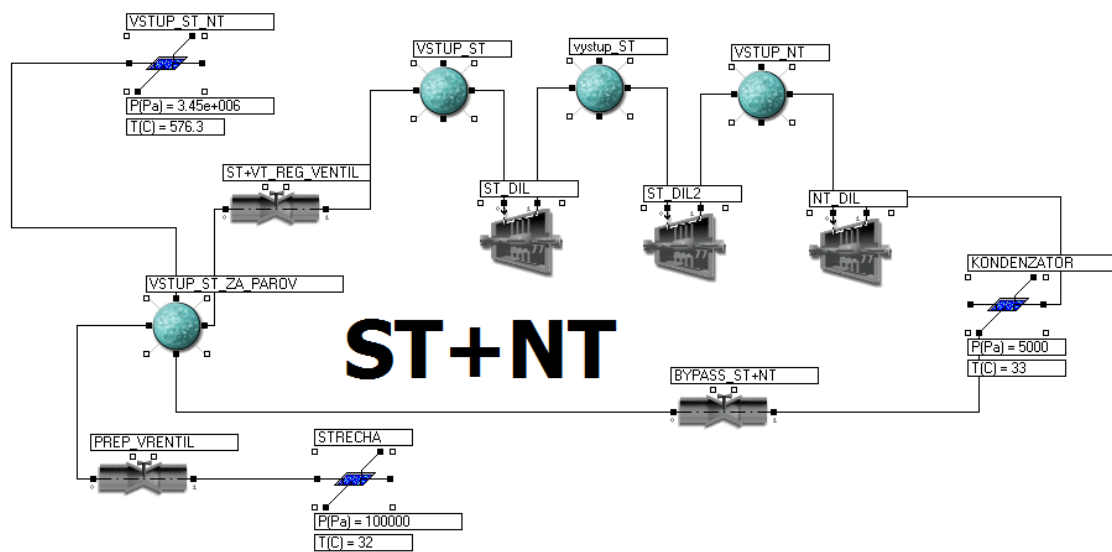
Pára putuje bypassem a překlene turbínu rovnou do výstupu VT dílu parní turbíny, dále do přehříváku páry a nakonec do bloku VSTUP_ST_NT jako při jmenovitém stavu.

Tab. 5.5 Příklad nastavení parametrů sekce turbíny VT DIL2

Gamma[-]	r_max[-]	Section[m ²]	Omega[rad/s]	Omega_n[rad/s]	Cfnom[m/s]	Kapa[-]	Epscrit[-]
1,12	0,9	0,012	314	314	300	0,64	0,56

Z Tab. 5.5 je vidět, jak lze nastavit jeden blok, reprezentující jednu sekci parní turbíny. *Gamma*, *Kapa*, *Epscrit* jsou koeficienty související s párou. *r_max* je maximální účinnost turbíny. *Section* je průřez turbíny v m². *Omega* je aktuální úhlová rychlost turbíny a *Omega_n* je nominální úhlová rychlost turbíny. *Cfnom* je obvodová rychlost parní turbíny.

Obdobně jsou nastaveny i další sekce turbíny.



Obr. 5.7 Zapojení ST+NT dílu parní turbíny.

Zapojení ST a NT dílu parní turbíny je podobné jako u VT dílu parní turbíny s tím rozdílem, že nebylo použito tolik sekcí k rozdělení dílů turbíny z důvodu menšího rozdílu tlaku na vstupu a výstupu dílu parní turbíny.

Samotné zapojení parního obvodu se liší tím, že v zapojení je navíc oproti VT obvodu přepouštěcí ventil k regulaci přetlaku páry při přechodu na ostrovní režim. Pokud je tlak páry

na prvku s názvem BYPASS_ST+NT větší než požadujeme, zapůsobí blok reprezentující přepouštěcí ventil s názvem PREP_VENTIL a pustí páru pryč z obvodu.

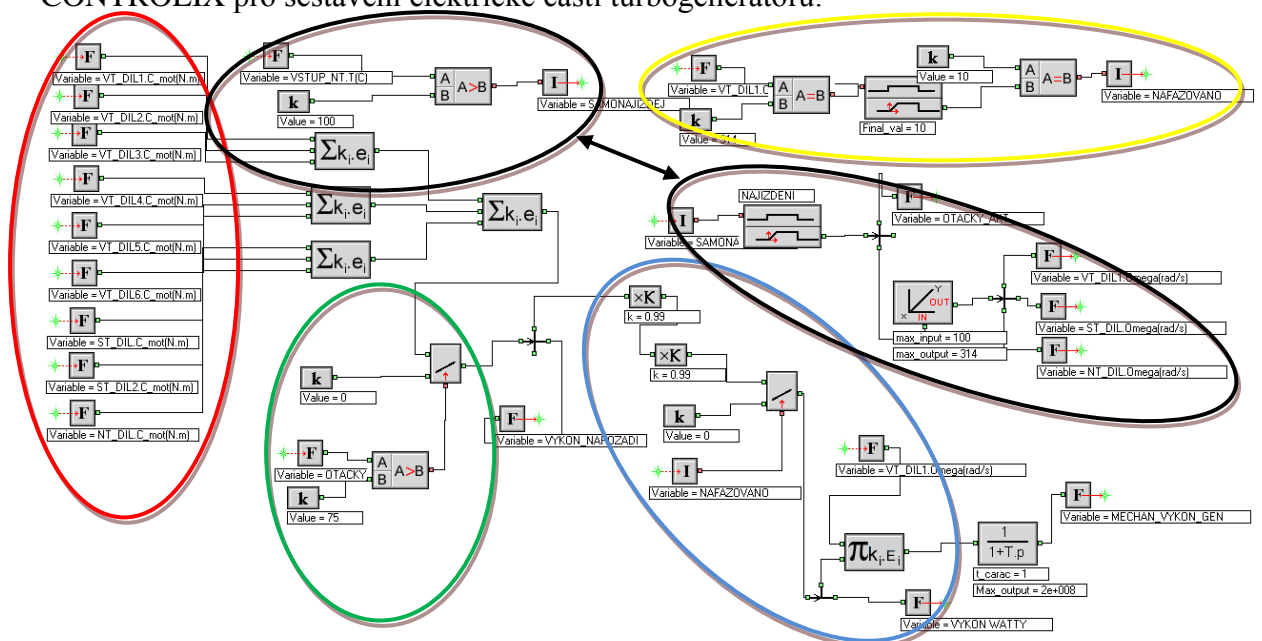
Na vstupu v počáteční podmínce s názvem VSTUP_ST_NT jsou dány parametry páry přehřívákem páry v kotli a tato pára buď ve jmenoovitém provozu expanduje přes ST a NT díl turbíny a nebo při ostrovním režimu je většina páry vedena přes prvek reprezentující bypass s názvem BYPASS_ST+NT do kondenzátoru. Podle potřeby část páry může proudit ven přes přepouštěcí ventil s názvem PREP_VENTIL.

Výstupní momenty ze všech dílů parní turbíny jsou sčítány v knihovně CONTROLIX.

CONTROLIX

Elektrická část turbosoustrojí

Pro problematiku, kterou v modelu řeším, je výhodnější použít knihovnu CONTROLIX pro sestavení elektrické části turbogenerátoru.



Obr. 5.8 Ukázka řešení převodu momentu turbíny na výkon generátoru

V oblasti označené červenou elipsou je řešeno sčítání momentů z jednotlivých sekcí dílů turbíny. Po sečtení, hodnota celkového momentu putuje do bloku, který při splnění podmínce najetých otáček alespoň na 75% pustí hodnotu dále (zeleně označeno). Pokud

otáčky nejsou alespoň 75% jmenovitých otáček, na výstupu generátoru bude výkon roven nule.

Jestliže je tedy splněna tato podmínka, moment putuje dále. V dalších blocích je hodnota celkového momentu přenásobna všemi účinnostmi generátoru (modře označeno). Dále hodnota momentu putuje do bloku, který propouští vstupní hodnotu na výstup jen v případě, že binární proměnná NAFAZOVANO je = 1. Binární proměnná NAFAZOVANO je řešena ve žluté elipse. Výkon, který je po nafázování přenášen do sítě, je uložen do reálné proměnné MECHAN_VYKON_GEN. Tato proměnná je poté zobrazena v uživatelském rozhraní nad schématickou značkou synchronního generátoru.

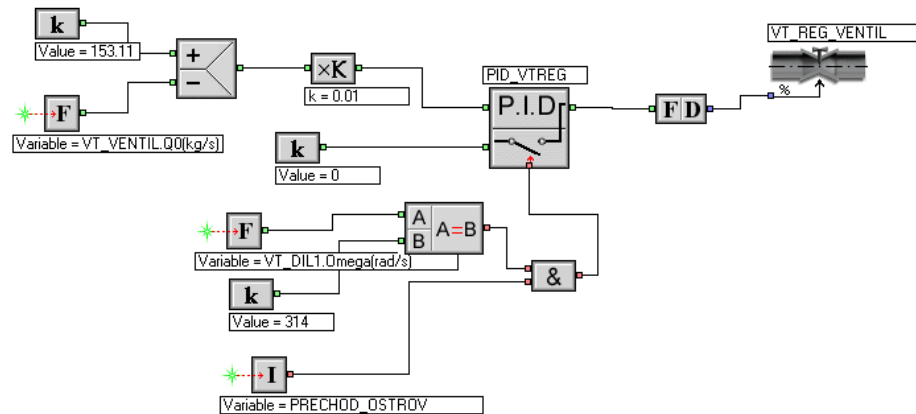
Obsah černých elips spolu souvisí a je řešeno najíždění turbíny při dosažení teploty 100°C mezi ST a NT dílem turbíny.

PID regulace hmotnostního průtoku páry

Jelikož hmotnostní průtok páry je v editoru SWING počítán na principu rozdílu tlaků nebo entalpií na začátku a na konci modelovaného obvodu, tak průtok v mém případě nemůže být stejný v obvodu s VT dílem turbíny kde je spád tlaku z 18,67 MPa na 3,5 MPa v obvodu s ST a NT dílem parní turbíny kde je tlakový spád jen 2,5 MPa.

Tento problém s hmotnostním průtokem páry se musí řešit PID regulací. PID regulátor (Obr. 5.9) počítá diferenci hmotnostních průtoků páry. Vstupní hmotnostní průtoky páry do diferenčního bloku pro vstup do PID regulátoru jsou konstanta s nastavenou hodnotou požadovaného průtoku a proměnná hmotnostního průtoku páry, který ve skutečnosti ve VT obvodu je. V diferenčním bloku se odečtou tyto dvě proměnné a putují přes zjemňovací blok krokudo vstupu PID regulátoru. PID regulátor začne ovládat regulační ventil s názvem VT_REG_VENTIL doté doby, než bude na jeho vstupu nulová diference. Tedy hmotnostní průtok se bude rovnat konstantě 153,11 kg/s (Obr. 5.9).

V obvodu s ST a NT dílem parní turbíny je hmotnostní průtok páry řešen tak, že hmotnostní průtok páry se porovnává s již regulovaným hmotnostním průtokem ve VT části obvodu. Princip PID regulace je opět stejný (viz příloha C).



Obr. 5.9 PID regulace průtoku ve VT obvodu parní turbíny.

Logika ovládání pozice regulačních ventilů

1) Najíždění turbosoustrojí na jmenovitý stav

První situace, která při spuštění modelu nastává, je najíždění turbosoustrojí na jmenovitý stav a následné nafázování generátoru na síť.

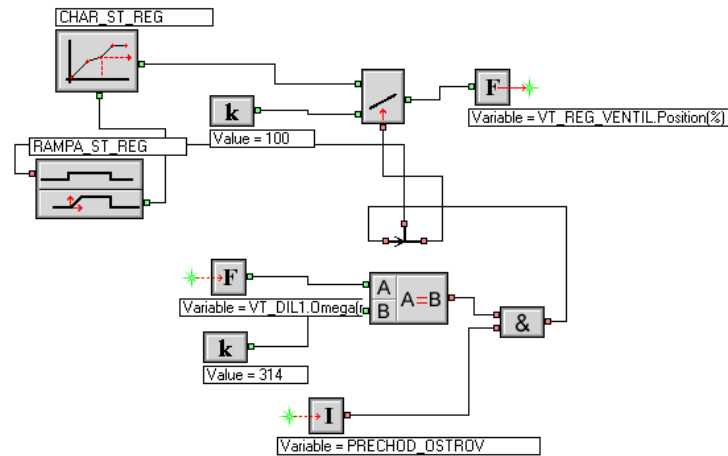
Při najíždění parní turbíny na jmenovitý stav, jsou bypassy a přepouštěcí ventily zavřeny a pracují pouze regulační ventily tak, aby obvodem tekla jmenovitý průtok (viz. PID regulace výše).

2) Přejíždění turbosoustrojí do ostrovního režimu

VT část

Zapojení bloků pro ovládání VT regulačního ventilu při přechodu do ostrovního režimu je vidět na obrázku 5.10.

Jestliže je stisknuto tlačítko od uživatele s názvem OSTROVNÍ REŽIM a turbína je najeta již na jmenovitých otáčkách, regulační ventil z regulované pozice dané PID regulátorem omezí podle své charakteristiky otevření, která je dána bloky CHAR_ST_REG a RAMPA_ST_REG postupně na 0% otevření. Ve stejnou chvíli je nutné spolu s regulací regulačního ventilu také regulovat procenta otevření VT bypassu. Celý hmotnostní průtok páry je na konec přebrán VT bypassem. Zapojení regulace VT bypassu je možné vidět v příloze C, kde je zobrazené úplné zapojení logiky ovládání modelu.



Obr. 5.10 Regulace VT regulačního ventilu při stisku tlačítka ostrovní provoz.

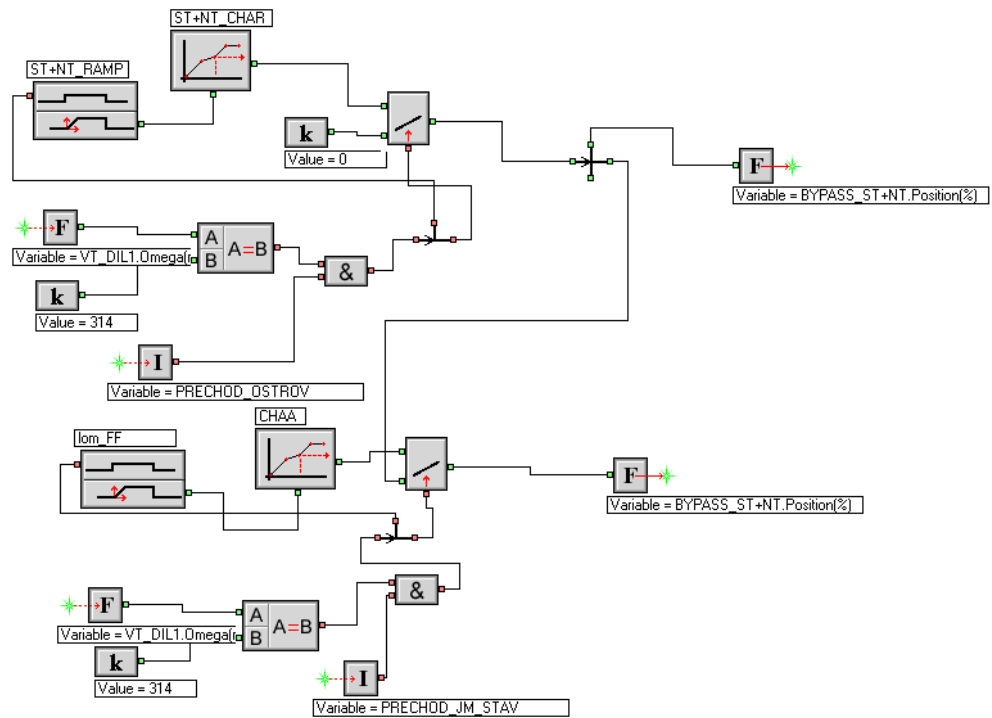
ST+NT část

Princip regulace bypassu ST a NT dílu turbíny je popsán na obrázku 5.11. Zbylé regulace přepouštěcího ventilu a regulačního ventilu lze vidět v celkovém zapojení regulace v příloze C.

Regulace obvodu ST + NT části turbíny je složitější než regulace VT část a jeho funkce je popsána následovně:

Pokud je uživatelem stisknuto tlačítko s názvem OSTROVNÍ REŽIM a turbína je najeta na jmenovité otáčky, regulační ventil s bypassem a přepouštěcím ventilem si rozdělí hmotnostní průtok páry v takovém poměru, aby na výstupu generátoru byla velikost elektrického výkonu rovna vlastní spotřebě bloku (případně ostrova, který je generátorem napájen). Hltnost ST+NT bypassu při 100% otevření je maximálně 60% celkového hmotnostního průtoku. Zbytek (40 %) hmotnostního průtoku proudící přes parní turbínu je však stále moc velký. Tento hmotnostní průtok by vytvářel moc velký točivý moment na hřídeli. Generátor by tedy nemohl snížit elektrický výkon ze 190 MW na 13MW. Do obvodu musí být zařazen přepouštěcí ventil, který přebytek páry ze zbytku 40% hmotnostního průtoku, který nepobere bypass svede z obvodu pryč.

Regulace VT a ST+NT parních oběhů musí být prováděna současně.



Obr. 5.11 Příklad regulace bypassu ST a NT dílu turbíny.

3) Přejchod turbosoustrojí zpět na jmenovitý stav

Princip přechodu turbosoustrojí zpět na jmenovitý stav je podobný jako u přechodu bloku na ostrovní režim, akorát regulace probíhá v opačném smyslu a je vidět v dolní části obrázku 5.11. Bypass se dle charakteristiky otevření, která je dána bloky LOM_FF a CHAA úplně uzavře a průtok je opět regulován pouze regulačním ventilem, tak aby na výstupu z generátoru byl elektrický výkon roven 190 MW.

Zbylé části regulace lze vidět v příloze C, kde je vidět úplné zapojení logiky regulace.

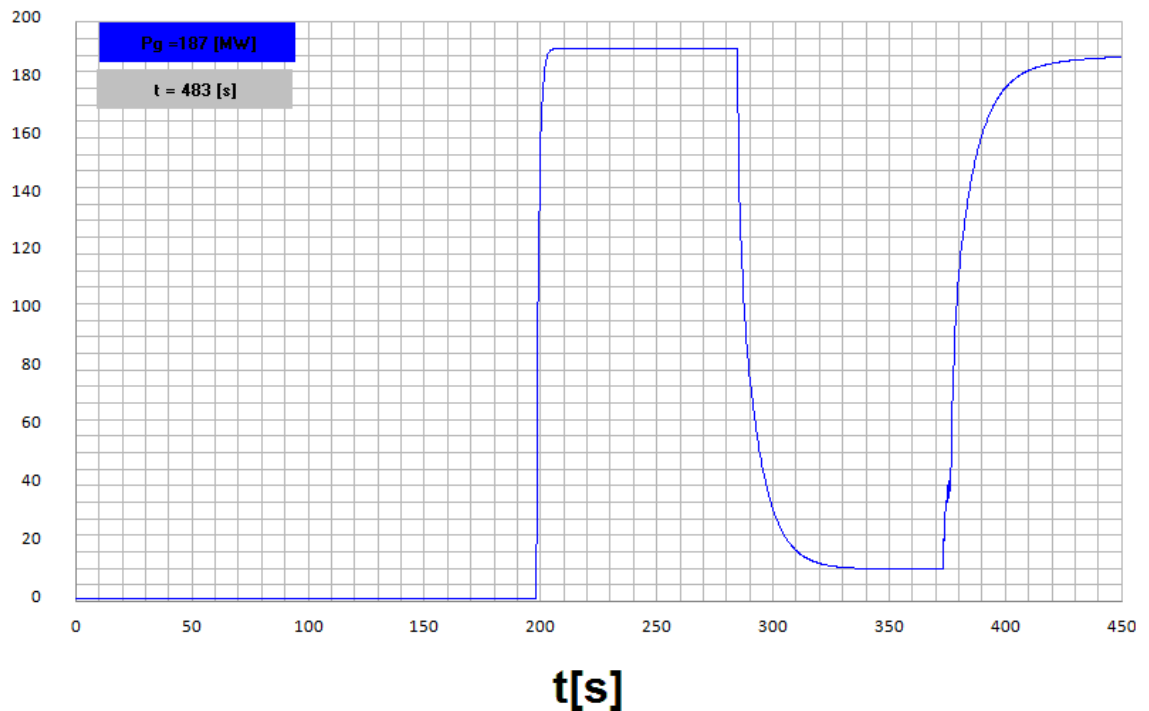
5.2.6 Výstupy modelu

Za hlavní výstupy modelu považují průběhy veličin takové, které vypovídají o funkčnosti modelu a lze je porovnat s reálnými průběhy z měření při uvádění tepelné elektrárny do provozu.

Grafy jsem cíleně vytvořil tak, aby elektrárenský blok ve 300 sekundách přešel ze jmenovitého stavu do ostrovního režimu a v čase cca 370 sekund najel zpět na jmenovitý výkon.

a) Průběh elektrického výkonu generátoru v čase

P_g[MW]



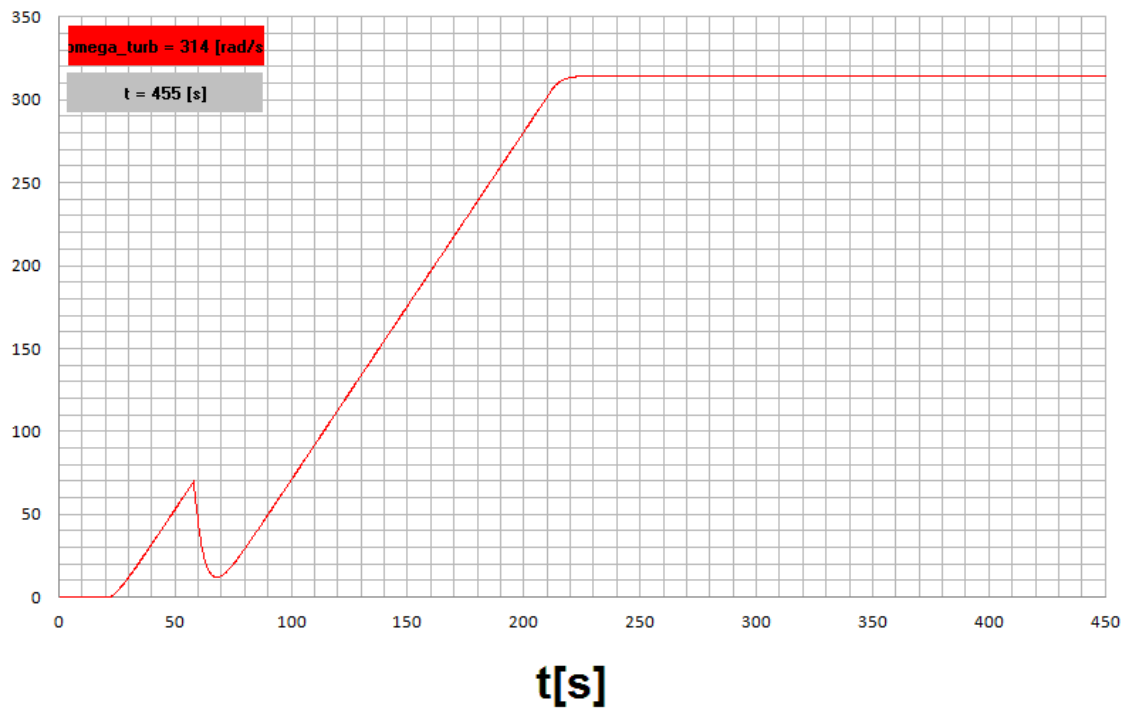
Obr. 5.12 Průběh elektrického výkonu elektrárenského bloku v čase.

Po automatickém nafázování generátoru na síť v čase 200 sek. lze vidět, jak výkon, dodávaný do sítě, vzroste na jmenovitou hodnotu. V čase 300 s přechází blok do ostrovního režimu a jeho výkon je zregulován na 10 MW. Regulace na ostrovní režim trvá několik sekund. Následně opět blok v čase 400 s přejde na jmenovitý provoz.

Průběh výkonu generátoru je v mém případě vlastně stejný, jako výkon turbíny přenásoben účinnostmi generátoru.

b) Otáčky turbosoustrojí v čase

omega [rad/s]

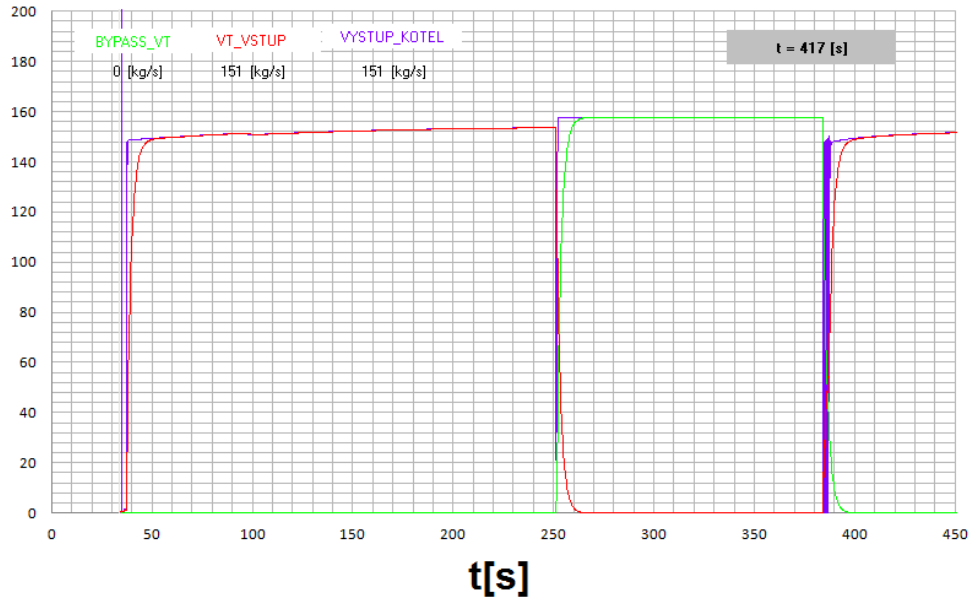


Obr. 5.13 Otáčky turbosoustrojí v závislosti na čase.

Zakmitání otáček na počátku průběhu je pravděpodobně způsobeno rázem páry ihned po otevření regulačního ventilu. Tento ráz by ve skutečnosti být neměl, regulační ventil by se měl otevírat postupně dle potřeby turbíny.

c) Průběh průtoku VT a ST+NT dílu turbíny

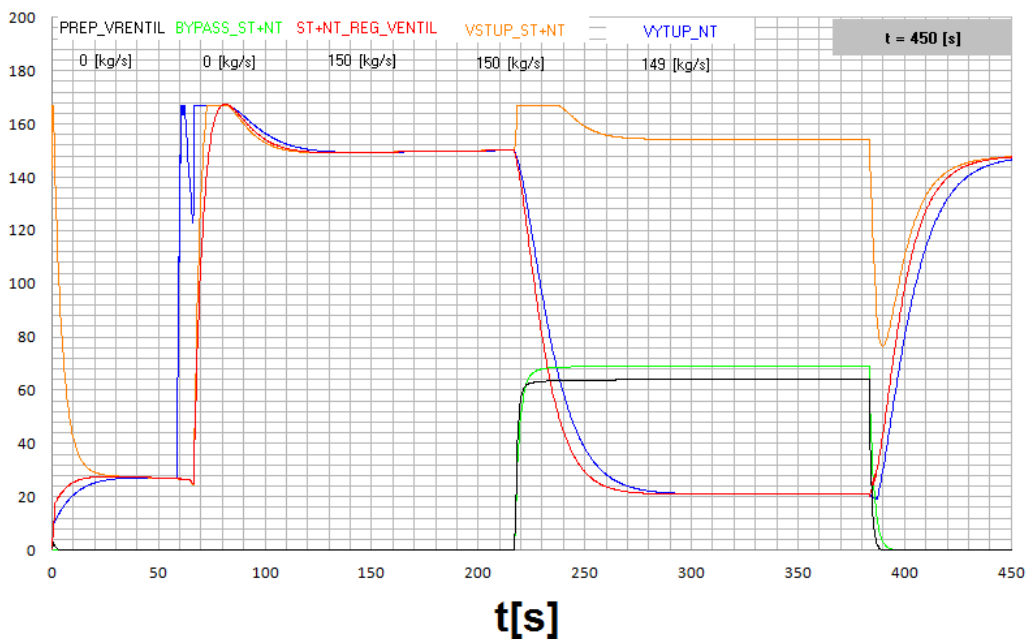
Mp[kg/s]



Obr. 5.14 Průtoky VT dílem parní turbíny v závislosti na čase.

Z průběhů hmotnostních průtoků v čase (5.14 a 5.15) lze vidět, jak v modelu pracuje PID regulace hmotnostního průtoku a jak při přechodu do ostrovního provozu si páru přebírá bypass a přepouštěcí ventil.

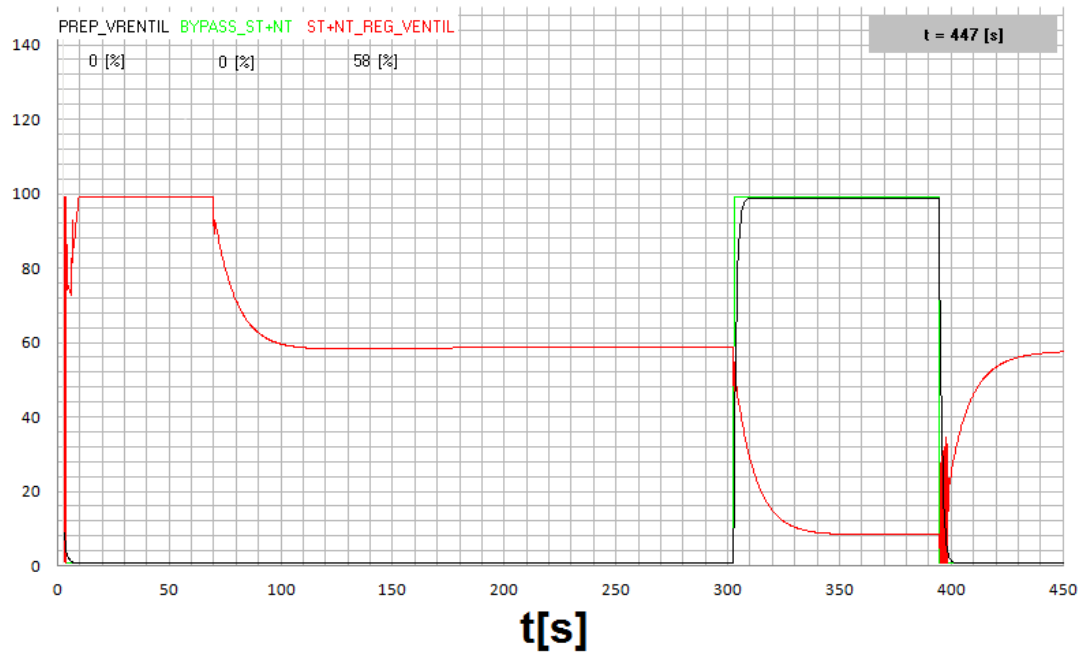
Mp[kg/s]



Obr. 5.15 Průtoky páry v ST + NT dílu parní turbíny

d) Procentní otevření a zavření všech ventilů v závislosti na čase

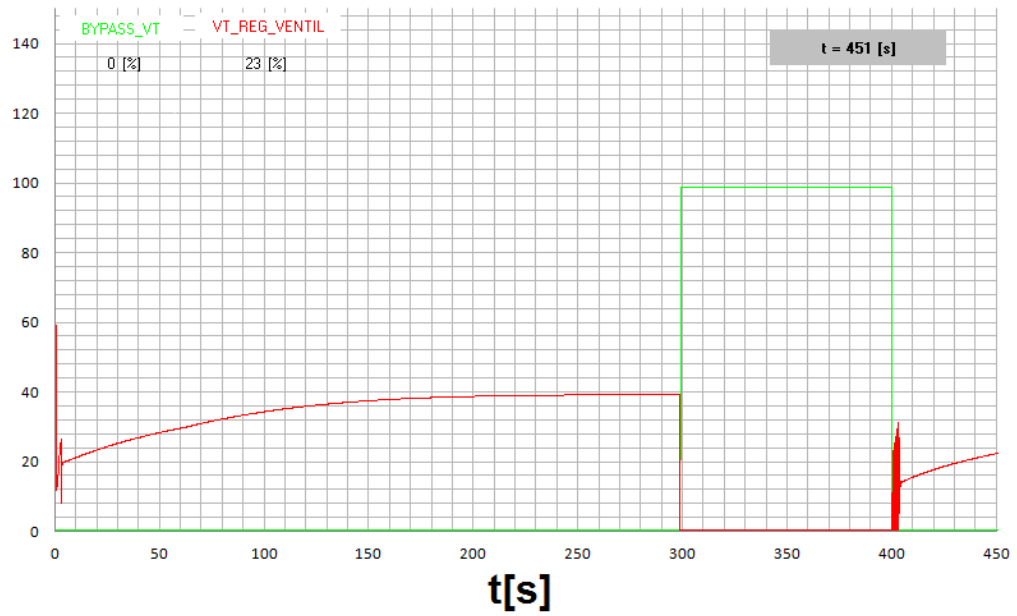
Otevření [%]



Obr. 5.16 Závislost otevření ST+NT regulačních ventilů na čase

Průběhy otevření ventilů v závislosti na čase jsou obdobné s průběhy závislosti hmotnostního průtoku na čase. Čas, než se otevře či zavře regulační ventil, je však o mnoho rychlejší, než přebrání páry bypassem a přepouštěcím ventilem. Tato skutečnost lze dobře vidět při porovnání průběhů 5.14 a 5.16.

Otevření [%]



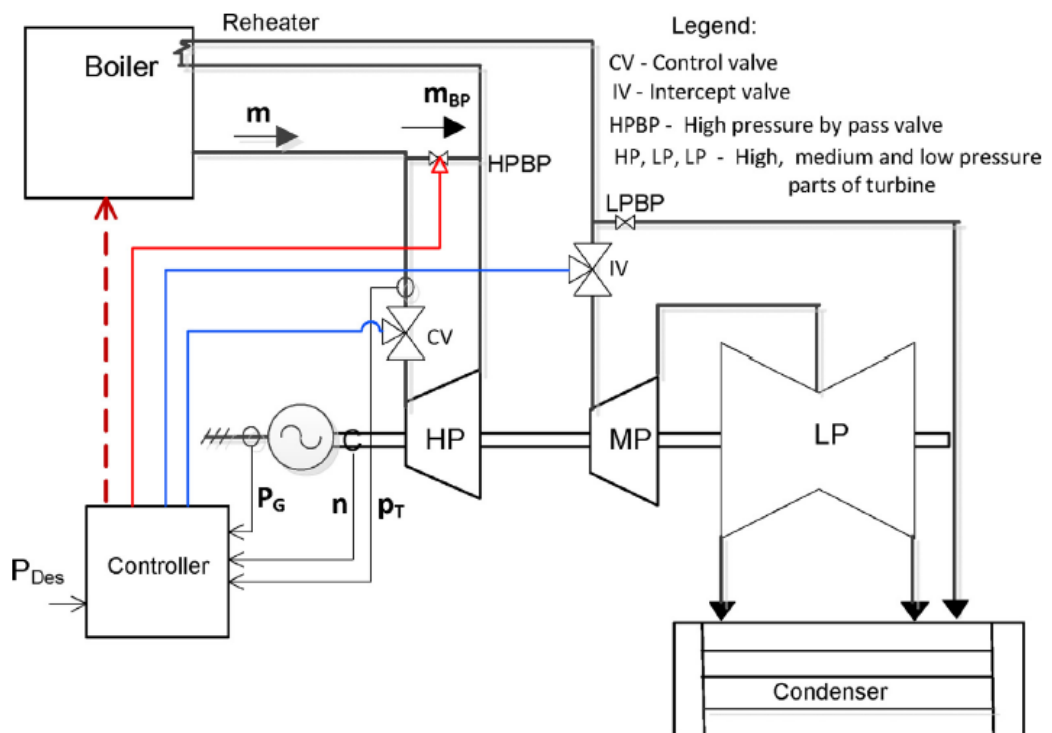
Obr. 5.17 Závislost otevření VT regulačních ventilů na čase.

6 Verifikace výsledků modelu

Výsledky provedené simulace je nutno porovnat s reálnými naměřenými hodnotami nebo s již vytvořeným modelem, který byl porovnán s naměřenými hodnotami. Výzkum bez takovéto verifikace by prakticky neměl význam. Pro ověření výsledků modelu jsem použil průběhy z materiálu [20 *Load–frequency control management in island operation.*]. V tomto materiálu se Ing. Máslo zabývá regulací části elektrizační sítě, která je oddělena od zbytku ES. Předpokládám, že jelikož tento materiál popisuje skutečnou událost, která se stala roku 2006, mohu jej považovat za správný.

Díky průběhům výkonu turbíny a hmotnostního průtoku v čase jsem schopen verifikovat správnost tohoto modelu.

Schéma použité pro simulaci v materiálu [20] je:

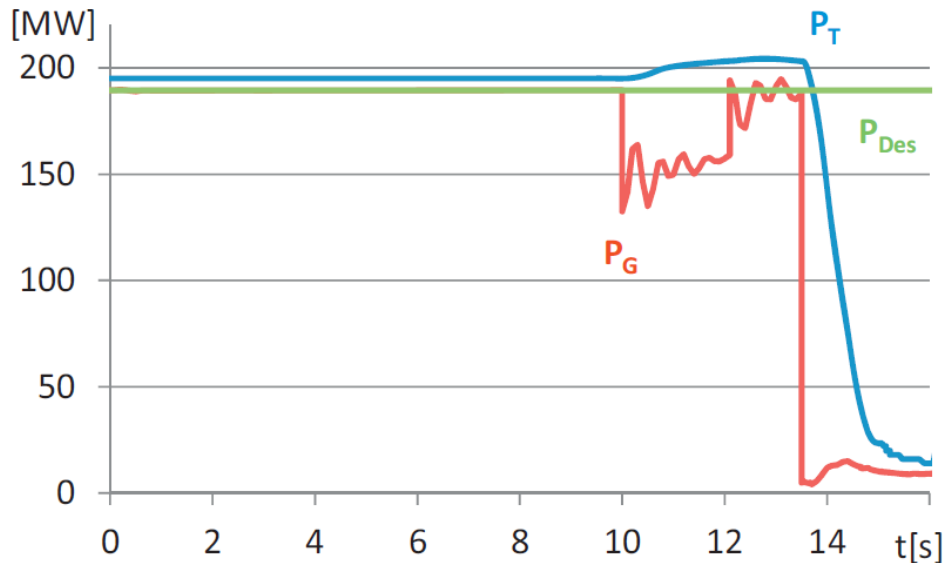


Obr. 6.1 Schéma Princip otáčkové regulace elektrárenského bloku, převzato z [20].

Je tedy vidět, že schéma je velmi podobné schématu které je použito v této práci.

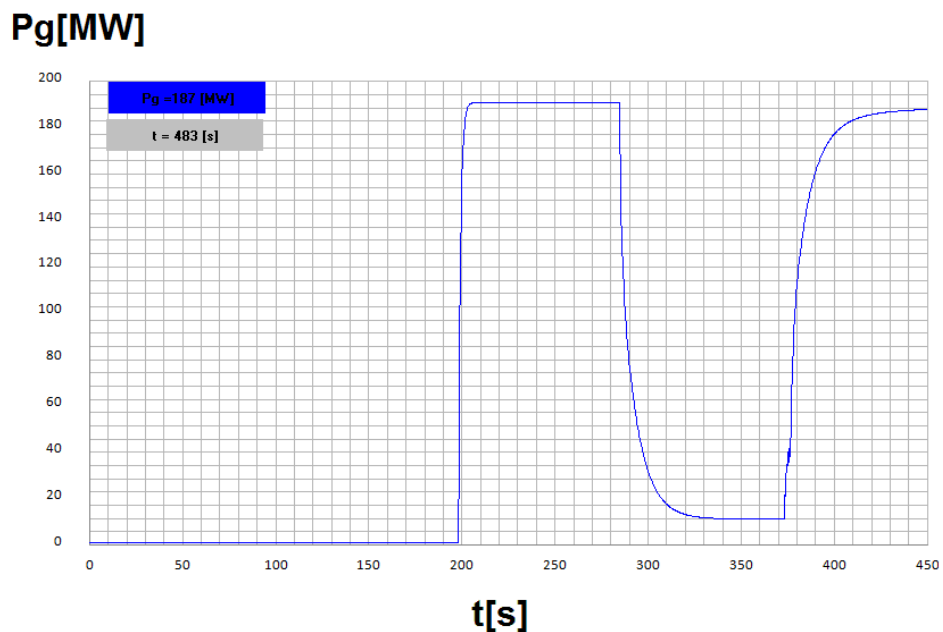
6.1 Výstupní grafy

Závislost činného výkonu na čase z materiálu [20]:



Obr. 6.2 Průběh výkonu turbíny a generátoru při přechodu na ostrovní režim, převzato z [20].

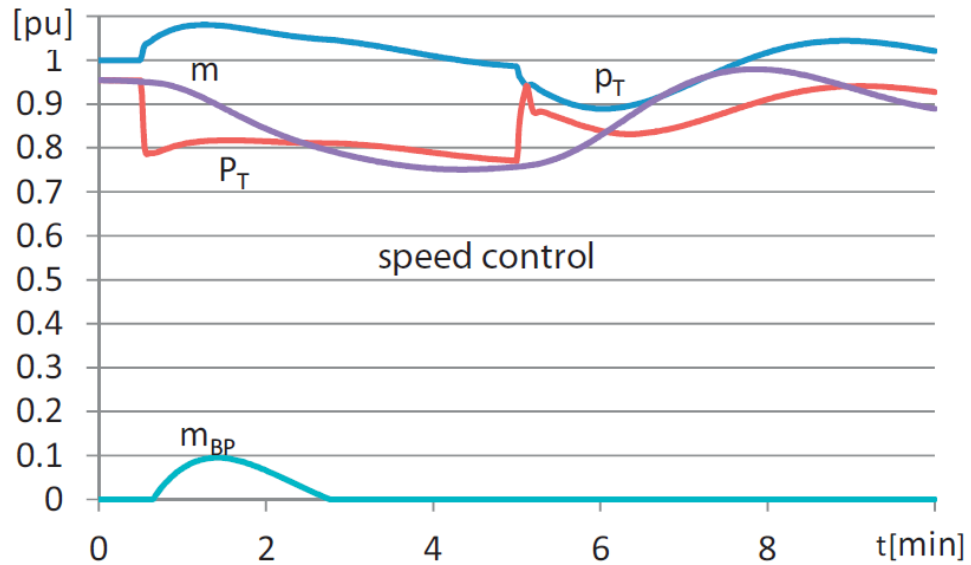
Pro porovnání výstupní graf z mého modelu:



Obr. 6.3 Průběh výkonu generátoru (turbíny) na čase.

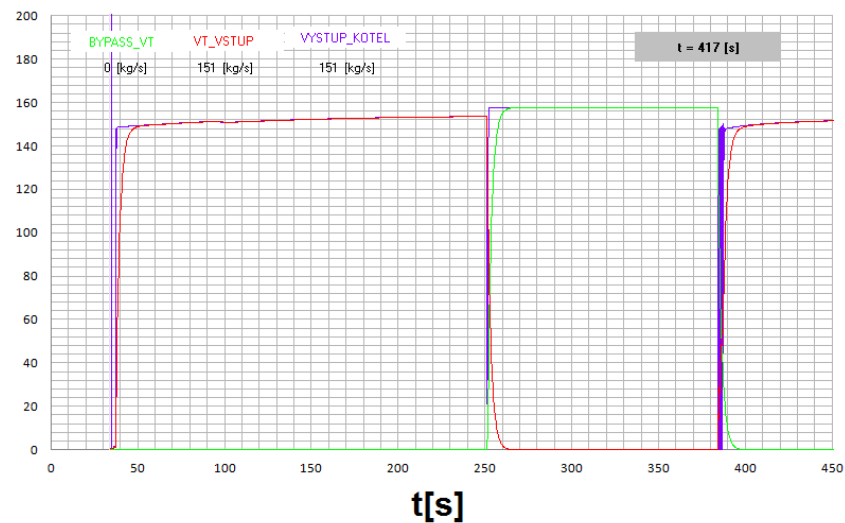
Lze si tedy všimnout, že průběh regulace výkonu turbíny obrázku 6.2 a 6.3 je velmi podobný. Výkon na Obr. 6.3 je brán jako výkon generátoru, avšak je to vlastně výkon turbíny přenásobený účinnostmi – lze ho tedy brát jako výkon turbíny.

Dále z grafu 6.4 lze vidět průtok páry přes bypass je stejný a nastává při regulaci páry při přechodu do ostrovního režimu jako u obrázku 6.5.



Obr. 6.4 Regule páry bypassem při změně výkonu turbíny, převzato z [20].

Mp[kg/s]



Obr. 6.5 Průtoky páry VT dílu parní turbíny při přechodu do ostrovního režimu a zpět.

Je tedy patrné, že při přechodu bloku do ostrovního režimu bypass zareaguje jako v obrázku 6.4 a 6.5. V obrázku 6.5 však průtok páry na výstupu z kotle - vstupu do VT dílu a bypassu pára poklesne více než u obrázku 6.4.

Závěr

Diplomová práce je založena na prozkoumání principů transformace tepelné energie na energii mechanickou v parní turbíně, která pohání elektrický alternátor. Podrobněji jsem tyto dva stroje rozebral, vylíčil funkci těchto strojů a dále oba stroje popsal pomocí matematického modelu. Dále jsem uvažoval dva možné druhy provozu elektrárenského bloku z hlediska jeho zatížení. V poslední části jsem vytvořil model v objektově orientovaném jazyku SWING a výsledky modelace porovnal s obdobnou technickou prací vytvořenou odborníky v oboru.

Model elektrárenského bloku o výkonu 200MW byl sestaven a vyřešen. Avšak při řešení modelu nastaly dva hlavní problémy. První – parametry, které byly zadávány do bloků v editoru SWING, bylo velmi těžké získat nebo vypočítat. Většina jich podléhá výrobnímu tajemství a proto musely být buď odhadnuty jednoduchým výpočtem a nebo musely být získány z jiných technických prací. Další - druhý problém, který musel být vyřešen, je skutečnost, že porovnání výsledných charakteristik z modelu, mělo být původně s charakteristikami přechodu bloku elektrárny Tušimice II do ostrovního provozu. Avšak ukázalo se, že data které jsem potřeboval, podléhá výrobnímu tajemství a nemohou být poskytnuta třetí osobě. Problém byl vyřešen porovnáním výsledků s obdobným modelem, který se zabývá situací z roku 2006, kdy musela být elektrizační síť rozdělena na ostrovy. Tento model byl vytvořen odborníkem ze společnosti ČEPS a správnost výsledků by tedy měla být zaručena.

Výsledky, kterých bylo dosaženo, přibližně odpovídají výsledkům z porovnávaného dokumentu a lze model pokládat za správný. Výsledky obou modelů se však liší skutečností, že model řešený v diplomové práci nebyl zaměřen na vzájemné ovlivňování turbosoustrojí se sítí, ale pouze na výkonový přechod turbosoustrojí na vlastní spotřebu. Model z dokumentu bral i tuto skutečnost v potaz. Z toho plynou odlišnosti v průběhu výkonu generátoru v čase.

Model elektrárenského bloku může být dále například využit pro simulaci funkce turbosoustrojí a nebo pro monitoring požadovaných stavů, například v závislosti na zatížení generátoru. V přílohách A, B a C jsem uvedl detailní zapojení knihoven modelu vytvořeného v jazyku SWING. Toto zapojení může být dále využito k dalšímu zdokonalení.

Pro další řešení této problematiky bych velmi doporučoval získat přesné parametry pro nastavení jednotlivých bloků. Pokud parametry budou k dispozici, řešení v editoru SWING bude vcelku jednoduché.

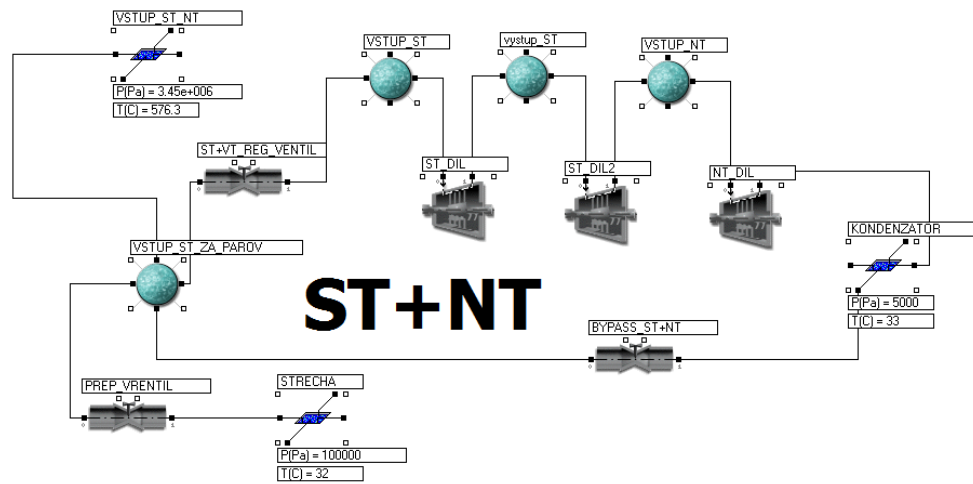
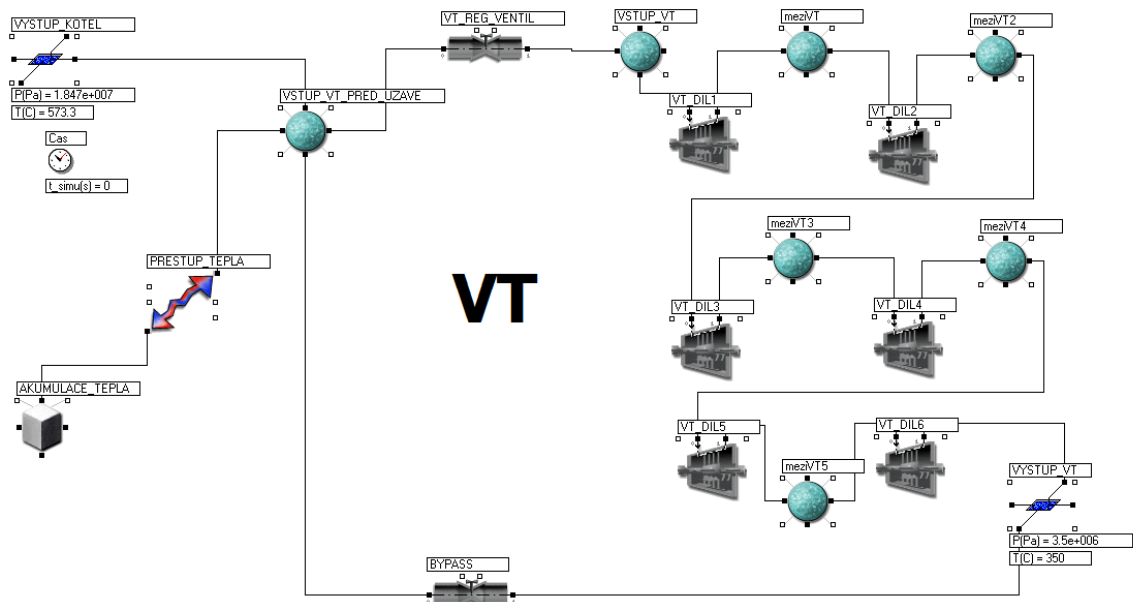
Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] DVORSKÝ, Emil. *Elektrárny 1* [online]. 2014 [cit. 2014-10-13]. Základní elektrárenské pojmy.
Dostupné z:
[HTTP://HOME.ZCU.CZ/~DVORSKY/E1/PREDNASKY/PRED1/E1PR1-ZAKLADNIPOJMY2014.PPT](http://home.zcu.cz/~dvorsky/E1/PREDNASKY/PRED1/E1PR1-ZAKLADNIPOJMY2014.PPT).
- [2] DVORSKÝ, HEJTMÁNKOVÁ, KOČMICH. *Elektrárny*. Plzeň: ZČU, 1994. 160 s.
- [3] MATĚNA, BRAUNER, TŮMA. *Výroba a rozvod elektrické energie I*. Praha: SNTL, 1978. 599s.
- [4] CÍDL, Jiří. *Matematický model parní turbíny s potlačeným vakuem*. Disertační práce, Brno: 2004. 32 s.
- [5] CHAIBAKHSH, Ghaffari. *Steam turbine model*. Tehran: Department of Mechanical Engineering, 2007. 18 s.
- [6] CÍDL, Jiří. *Simulátor parní turbíny*. Brno: VUT. 9s.
- [7] MÁŠLO, Karel. *Dynamické modely pro vyšetřování přechodných dějů v ES*. Praha: ČEPS, 2001. 12 s.
- [8] DVORSKÝ, HEJTMÁNKOVÁ. *Kombinovaná výroba elektrické a tepelné energie*. Praha: BEN, 2005. 288 s.
- [9] KLÍMA, Petr. *Parní turbíny*. BP, Brno: 2013. 42 s.
- [10] BEČVÁŘ, Josef. *Tepelné turbín*. Praha: 1968. 543 s.
- [11] TECHMANIE. [online]. 2014 [cit. 2014-10-27]. Historie parních turbín.
Dostupné z:
[HTTP://WWW.TECHMANIA.CZ/EDUTORIUM/](http://www.techmania.cz/edutorium/)
- [12] KADRNOŽKA, Jaroslav. *Lopatkové stroje*. Akademické nakladatelství CERM. Brno: 2003. 177 s.
- [13] ŠKORPÍK, Jiří. *Transformační technologie*. [online]. 2014 [cit. 2014-10-27].
Dostupné z:
[HTTP://WWW.TRANSFORMACNI-TECHNOLOGIE.CZ/](http://www.transformacni-technologie.cz/)
- [14] WILEY, John. *Theory, Construction and Operation*. 2004. 31 s.
Dostupné z:
[HTTP://WWW.IEEEXPLORE.IEEE.ORG](http://www.ieeexplore.ieee.org)
- [15] NOHÁČ, Karel. *Stabilita synchronního stroje pracujícího do tvrdé sítě*. In: [online]. Plzeň: ZČU, 2008 [cit. 2015-02-15].
Dostupné z:
[HTTP://HOME.ZCU.CZ/~NOHAC/PJS/PREDNASKY/PREDNASKA_STABILITA_PJS.PDF](http://home.zcu.cz/~nohac/PJS/PREDNASKY/PREDNASKA_STABILITA_PJS.PDF)

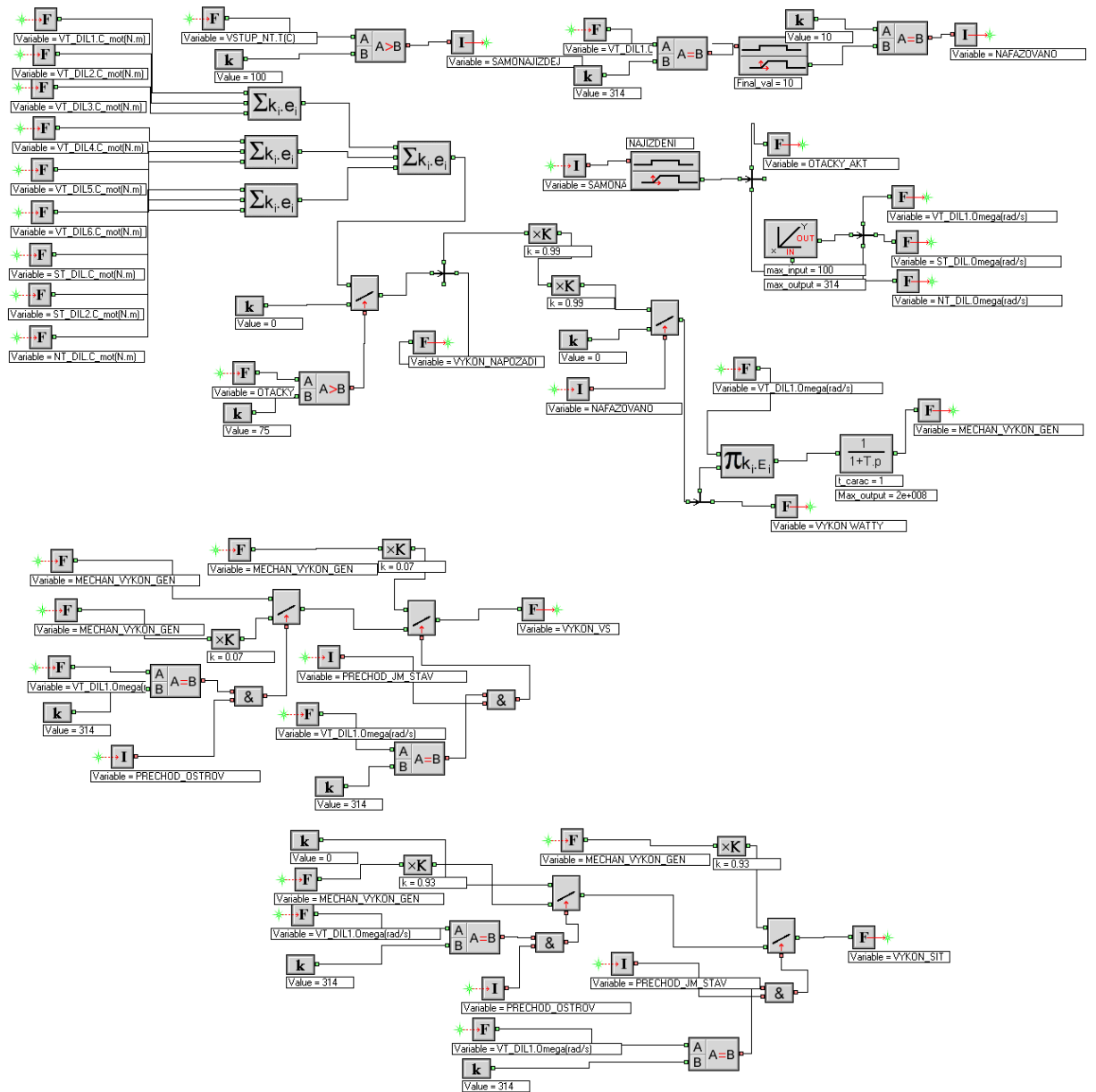
- [16] CÍDL, Jiří a Ondřej HANČICA. *Simulátor parní turbíny* [online]. Brno: FEKT. VUT Brno. [cit. 2015-02-22].
- Dostupné z: [HTTP://DSP.VSCH.TZ/KONFERENCE_MATLAB/MATLAB06/PRISPEVKY/CIDL_HYNCICA/CIDL_HYNCICA.PDF](http://dsp.vsch.tz/konference_matlab/matlab06/prispevky/cidl_hyncica/cidl_hyncica.pdf).
- [17] ČECH, Michal. *MODEL Y A PŘÍSTUPY V OBLASTI POČÍTAČOVÉ SIMULACE PROCESŮ* [online]. Brno, 2011 [cit. 2015-02-22].
- Dostupné z: [HTTPS://WWW.VUTBR.CZ/WWW_BASE/ZAV_PRACE_SOUBOR_VEREJNE.PHP?FILE_ID=40588.FSI.VUT BRNO](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=40588.fsi.vut.brno)
- [18] SCHUH, R. a H. ASCHEMANN. Nonlinear control of a condensation turbine with steam extraction. [online]. [cit. 2015-02-23].
- Dostupné z: [HTTP://IEEEXPLORE.IEEE.ORG](http://ieeexplore.ieee.org)
- [19] NOHÁČ, Karel. Elektrárny 2: Synchronní generátory. In: [online]. Plzeň: ZČU, 2013 [cit. 2015-02-25].
- Dostupné z: [HTTP://HOME.ZCU.CZ/~NOHAC/E2/ELEKTRARNY2-CAST05-V4.PDF](http://home.zcu.cz/~nohac/E2/ELEKTRARNY2-CAST05-V4.PDF)
- [20] MÁŠLO, Karel a Michal KOLCUN. Load–frequency control management in island operation. [online]. 2014 [cit. 2015-04-18].
- Dostupné z: [HTTP://BOOKS.GENEMS.COM/JOURNALS/EEE/4-1/](http://books.genems.com/journals/eee/4-1/)
- [21] Elektrárny Tušimice. SKUPINA ČEZ. [online]. [cit. 2015-04-18].
- Dostupné z: [HTTP://WWW.CEZ.CZ/CS/VYROBA-ELEKTRINY/UHELNE-ELEKTRARNY/CR/TUSIMICE.HTML](http://www.cez.cz/cs/vyroba-elektriny/uhelne-elektrarny/cr/tusimice.html)
- [22] LAŠTOVKA, Ladislav. *Možnost využití turbogenerátoru při přechodu do Ostrovního provozu*. Plzeň, 2013. Disertační práce. ZČU, FEL.
- [23] Kodex PS. ČEPS. A.S. [online]. [cit. 2015-04-23]. Dostupné z: <https://www.ceps.cz/>
- [24] KODEX PŘENOSOVÉ SOUSTAVY: Část I. Základní podmínky pro užívání přenosové soustavy. In: [online]. [cit. 2015-04-24].
- Dostupné z: [HTTP://WWW.ERU.CZ/](http://www.eru.cz/)
- [25] ŠKOPEK J. - Tepelné turbíny a turbokompresory, Plzeň 2010.

Přílohy

Příloha A – POHLED NA ZAPOJENÍ MODELU V KNIHOVNĚ HYDRAULIX



Příloha B – POHLED NA ZAPOJENÍ MODELU V KNIHOVNĚ CONTROLIX – ELEKTICKÁ ČÁST



Příloha C – POHLED NA ZAPOJENÍ MODELU V KNIHOVNĚ CONTROLIX - LOGIKA

