

## **Předmluva**

Současná doba je charakterizována rychlým technickým rozvojem, institucionálními a strukturálními změnami a rostoucím vlivem veřejného mínění. To se odráží i v odvětví elektroenergetiky. Narůstá komplexnost problémů, které je třeba řešit při provozu elektrizační soustavy<sup>1</sup> (ES), ať již ve stadiu plánování, řízení v reálném čase nebo při následném vyhodnocování. Komplexnost problémů vyplývá z těchto tendencí:

- jednotlivé elektrizační soustavy jsou propojovány do větších celků<sup>2</sup>
- vlivem institucionálních změn vstupují do sítě nezávislí výrobci<sup>3</sup>
- roste využívání nových technologií, což vede k diversifikaci zdrojů<sup>4</sup>
- v síti se objevují moderní silnoproudé elektronické prvky<sup>5</sup>
- rostoucí elektrifikace zvyšuje požadavky na spolehlivost a bezpečnost provozu<sup>6</sup>
- roste využití stávajících prvků, neboť výstavba nových je obtížná<sup>7</sup> a investičně náročná
- moderní informatika umožňuje zdokonalit metody řízení<sup>8</sup>, čímž vznikají složité řídicí vazby
- moderní elektronické spotřebiče zvyšují nároky na kvalitu elektrické energie<sup>9</sup>.

Uvedené tendence jsou doplněny dalšími společensko-ekonomickými jevy protikladným tlakem snižování nákladů (vliv trhu) a ekologických hledisek (vlivy veřejného mínění a legislativy).

Pokud se omezíme na řešení fyzikálně-technických problémů z hlediska sítě, zjistíme, že „klasické“ výpočetní prostředky<sup>10</sup> na tento úkol nestačí. Příčina je v tom, že většina problémů má dynamickou povahu vyplývající z toho, že elektrizační soustava tvoří složitý fyzikální celek, v kterém probíhají neustále přechodné děje zajišťující rovnováhu mezi výrobou a spotřebou.

Tyto přechodné děje mají široké spektrum od velmi rychlých rázových (vlnových) a elektromagnetických<sup>11</sup> dějů, přes rychlé děje elektromechanické<sup>12</sup> až po pomalé děje termodynamické<sup>13</sup>. Tyto fyzikální děje jsou pak doplněny regulačními ději, které mohou mít opět charakter rychlý (např. primární regulace) nebo pomalý (např. sekundární regulace).

Z praktických důvodů se provádí dekompozice, při které se řeší zvlášť děje rázové/elektromagnetické a elektromechanické/termodynamické. Pro řešení se používají počítačové programy (nazývané také síťové simulátory), které využívají schopností moderní výpočetní techniky. Pro sestavení síťového simulátoru je nutno nejprve vytvořit matematický model elektrizační soustavy.

Tento dokument se zabývá popisem matematických modelů pro druhý typ síťového simulátoru řešící elektromechanické a termodynamické přechodné děje včetně rychlých a pomalých dějů regulačních. Tyto modely jsou implementovány do počítačového programu MODES, který je využíván pro simulaci krátkodobé, střednědobé a dlouhodobé dynamiky elektrizační soustavy.

Program lze použít<sup>14</sup> pro výuku a studium, pro tvorbu studií (propojování ES, obranné a obnovovací plány), pro návrh ochrany a regulací.

<sup>1</sup> elektrizační soustavou rozumíme souhrn zdrojů, přenosovou a distribuční síť a zatížení.

<sup>2</sup> 18.října 1995 byl propojen systém CENTREL zemí střední Evropy se systémem UCPTÉ zemí západní Evropy

<sup>3</sup> od využívání netradičních zdrojů až po tzv. princip přístupu třetích stran

<sup>4</sup> jedná se např. o paroplynové cykly nebo větrné elektrárny

<sup>5</sup> jedná se např. o stejnosměrné vedení nebo spojky, statické kompenzační prvky (SVC, TCR)

<sup>6</sup> nutnost zabránit šíření poruch v síti a zajistit schopnosti provozu zdrojů v ostrovních režimech a obnově napájení

<sup>7</sup> vzhledem k tlaku veřejného mínění a ekologických iniciativ

<sup>8</sup> komunikační a počítačová technika zdokonaluje řízení jednotlivých prvků i systému jako celku

<sup>9</sup> jedná se o stálost napětí tj. hodnoty amplitudy a frekvence a obsah vyšších harmonických

<sup>10</sup> programy na výpočet ustáleného stavu, zkratových proudů a přechodové (krátkodobé) stability

<sup>11</sup> spojené s výměnou elektromagnetické energie ve vedeních a vinutích elektrických strojů

<sup>12</sup> spojené s pohybem rotorů točivých strojů

<sup>13</sup> např. přenosy tepla v kotlích a jaderných reaktorech

<sup>14</sup> použití je detailně popsáno v Uživatelské příručce a v Průvodci použitím, které tvoří dokumentaci programu

## Tisková konvence

V popisu jsou dodržována následující pravidla pro popis symbolů, veličin a parametrů:

<b>Y</b>	tučné písmo pro popis matic a sloupcových vektorů a klíčových slov
<b>X</b>	podtržené písmo pro komplexní čísla
<i>k</i>	kurzíva pro poměrné hodnoty
$\Delta, ^\circ, \cdot$	označení přírůstku a derivace podle času
$\sqrt{\quad}$	odmocnina
[ ], //	odkaz na rovnice a literaturu
Real, Imag{ <u>X</u> }	reálná a imaginární složka komplexního čísla <u>X</u>
Abs, Arg{ <u>X</u> }	modul a fáze komplexního čísla <u>X</u>
'SYMB'	symbolické jméno pro model prvku (klíčové slovo programu MODES)


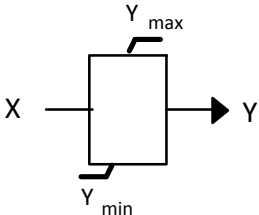
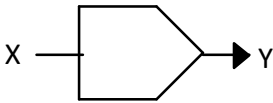





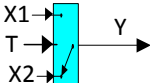
Význam některých indexů:

" "	označení rázové a přechodné hodnoty
d, q	index pro podélnou a příčnou složku Parkovy transformace
j	imaginární jednotka (pro komplexní čísla)
GEN, BUD, TUR	označení veličin generátoru, budiče a turbíny
TUR, ZAT	označení veličin trať a zátěže
n 0 k	hodnota jmenovitá, naprázdno a nakrátko.

Změny zavedené v nových verzích jsou vyznačeny čarou na vnějším okraji podle následující tabulky:

Verze	2.2/4	2.2/5	2.2/6	2.2/7	2.2/8	2.2/9	2.2/10	2.2/11	2.2/12	2.3/13	2.3/14	2.3/15	2.3/16
Tloušťka čár	1.5 bodu	2.25 bodu	3 body	4.5 bodu	2x ¾	2x 1.5	2x 2.25	2x 3	2x 3	dvojitě klikatá	Šrafovaná	Stínovaná	3x½

Pro kreslení blokových schémat jsou dodržována tyto pravidla:

	<u>Makroblok</u> - blok bez podrobné specifikace struktury význam je patrný z popisu
	<u>Přenos s omezením</u> - v bloku je zadána přenosová funkce $y/x=f(p)$ nebo nakreslena přechodová charakteristika jako odezva na vstupní jednotkový skok
	<u>Nelinearita nebo funkční závislost</u> - popis je ve formě grafu nebo analyticky $y=f(x)$
	<u>Sčítací, násobící a dělicí člen</u>
	<u>Označení symbolu modelu</u> - používá se pro identifikaci modelů prvků v programu MODES
	<u>Vstup vazební veličiny</u> - používá se pro důležité proměnné, tvořící vazbu mezi prvky
	<u>Parametry modelu</u>
	<u>Identifikační čísla algebraických a stavových veličin</u> - používá se pro vnitřní proměnné modelů prvků
	<u>Přepínač</u> $Y=X1$ pro $T>0$ a $Y=X2$ pro $T\leq 0$

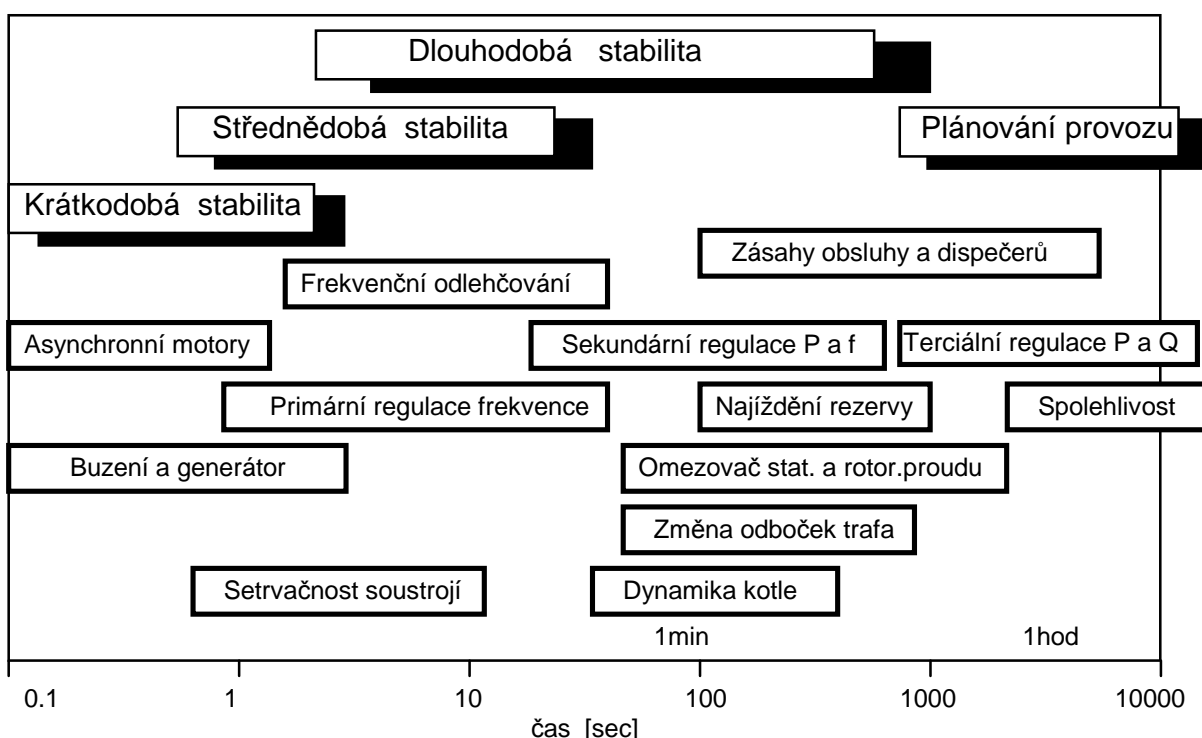
## 1. Úvod

Tento popis slouží pro základní seznámení s metodikou a principy MODELování přechodných dějů v Elektrizační Soustavě, tak jak jsou implementovány v programu MODES.

Jako metoda byl použit systémový přístup, založený na popisu modelů jednotlivých prvků (**objektů**), jejich **stavových** veličin a veličin **vazebních**, charakterizujících vzájemné působení mezi objekty. **Modely** představují abstraktní matematický popis fyzikální reality - buď ve formě algebraických a diferenciálních rovnic nebo ve formě operátorových přenosů.

Úroveň **modelů** závisí na účelu, pro který jsou použity. Nejdetailnější **modely** používají výrobci zařízení při návrhu prvku (např. turbíny). Druhou úroveň tvoří **modely** technologických celků (např. reaktor-parogenerátor-turbína). Tyto **modely** musí postihnout celou škálu provozních stavů včetně mezních nebo havarijních situací. Třetí úroveň tvoří elektrizační soustava. Modely prvků musí umožnit simulovat poruchy ze strany **sítě**. Jedná se zejména o odezvy na zkraty, výpadky prvků a změny zatížení. Právě touto úrovní modelování - z hlediska elektrizační soustavy se budeme v tomto popisu zabývat.

Na následujícím obrázku je zobrazen časový rozsah různých druhů přechodných dějů v elektrizační soustavě a objekty, které tyto děje ovlivňují.



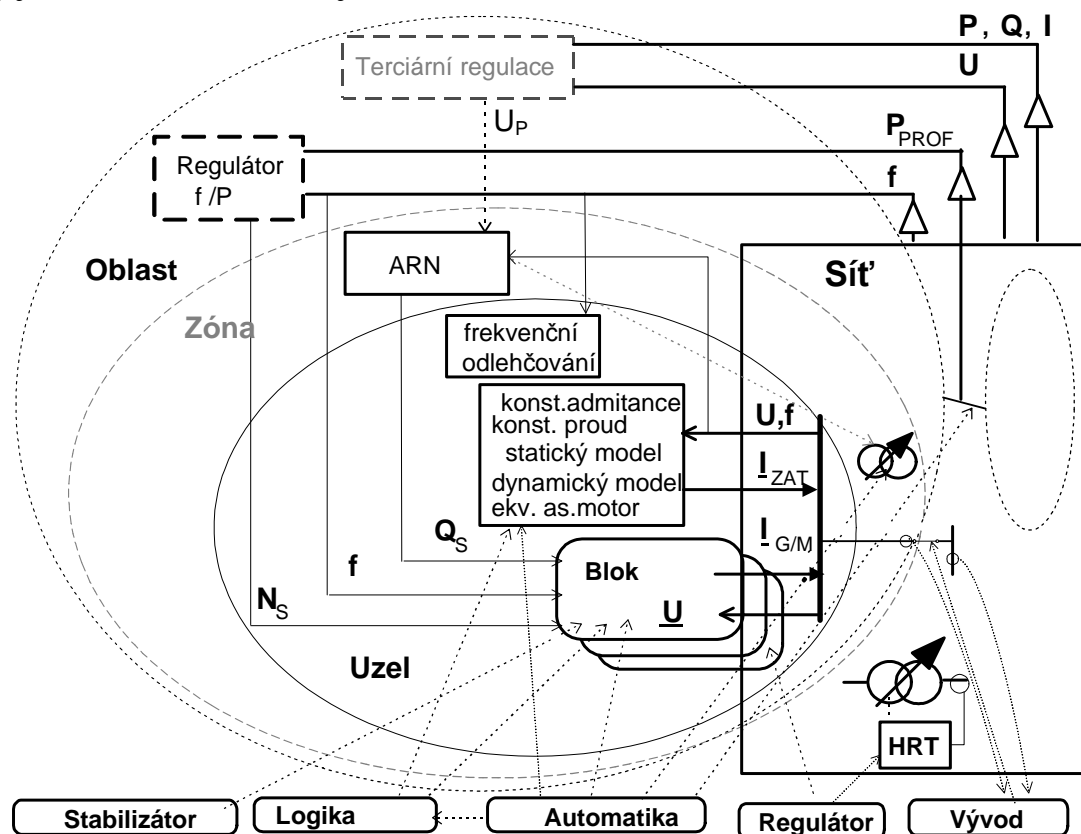
**Obr. 1 Časový rozsah přechodných dějů v elektrizační soustavě**

Program MODES umožňuje modelovat:

- **krátkodobou dynamiku** generátorů při poruchách typu zkratů (hrozba ztráty synchronismu),
- **střednědobou dynamiku** související s činností primární regulace P a f po vzniku deficitu činného výkonu výpadky bloků nebo přechodem části ES do ostrovního režimu (hrozba frekvenčního kolapsu),
- dlouhodobou dynamiku související jednak s činností sekundární regulace P a f po vzniku deficitu činného výkonu a jednak s činností automatické změny odboček trať a omezovačů proudů regulátorů buzení generátorů po vzniku deficitu jalového výkonu změnami zatížení, výpadky bloků nebo vedení (hrozba napěťového kolapsu),
- dynamiku asynchronních motorů při spouštění a samonajíždění (skupinový doběh a opětový rozběh po beznapěťové pauze),
- statickou stabilitu - jako odezvu soustavy na malé změny stavových veličin.

## 2. Model elektrizační soustavy (ES)

Jak již bylo řečeno v úvodu je možno ES považovat za systém skládající se z řady objektů. Z hlediska popisu je vhodné tento systém rozdělit na část výroby, přenosu a spotřeby. Tomu postupně odpovídají elektrárny, sestávající z jednotlivých **bloků**, **sít'**, sestávající z **větví** a **uzlů** a nakonec zatížení. Zvláštní částí ES je řízení P/f a Q/U. Zatímco řízení P/f má globální charakter s odpovídajícím centrálním sekundárním regulátorem frekvence a předávaných výkonů **oblasti**, řízení U/Q má lokální charakter s odpovídajícími regulátory napětí pilotních uzlů jednotlivých zón. Těmto regulátorům je nadřazena terciální regulace, která již může přesahovat rozsah dlouhodobé dynamiky a spadat do plánování provozu (viz Obr. 1). Struktura modelu ES se vzájemnými vztahy mezi objekty je znázorněna na následujícím obrázku.



Proměnné sítě:

$P, Q, I_{\text{VET}}$  činný a jalový tok větve, proud větve

$P_{\text{PROF}}$  ..tok činného výkonu profilem

$U, f$  ..... modul a frekvence uzlového napětí

$\underline{U}$ .....fázor komplexního napětí uzlu

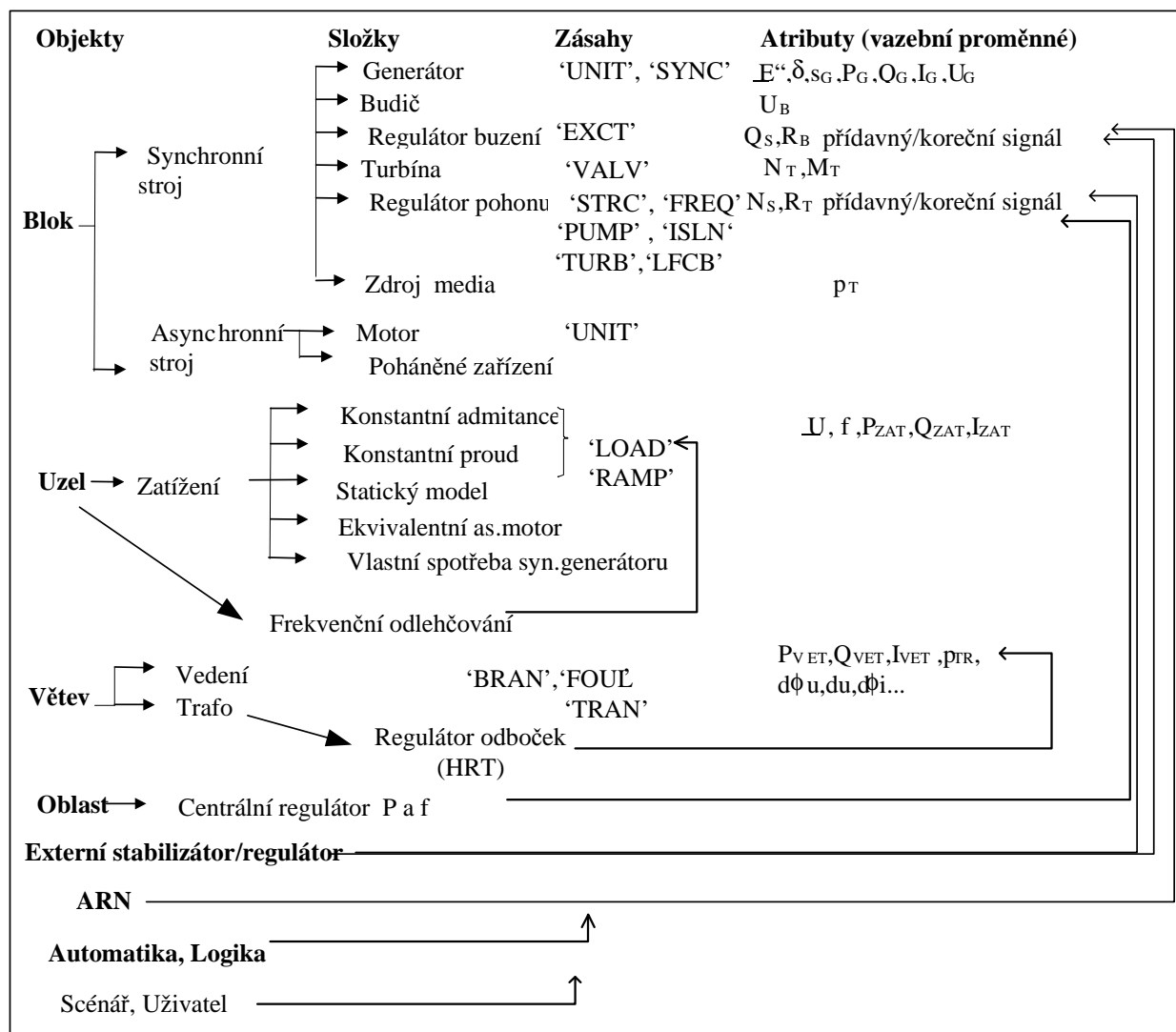
**Obr. 2 Konceptuální model ES se znázorněním objektů a vztahů mezi nimi**

Část ES, která je řízena jedním centrálním sekundárním regulátorem P a f tvoří regulační **oblast**, pro kterou můžeme definovat saldo předávaných výkonů. Větve mezi **oblastmi** tvoří **profil**. **Automatika**, **stabilizátor**, **logika**, **externí regulátor** a **vývod** jsou abstraktní prvky, které umožňují modelovat řídicí a ochranné prvky a přídatné regulační vazby.

Čárkovaně vyznačenými bloky se nebudeme zabývat - nejsou v programu implementovány. Ostatní prvky jsou v programu MODES modelovány a jejich modely jsou dostupné v knihovně programu. Jedná se o:

- **blok**, který modeluje asynchronní nebo synchronní stroj včetně pohonu a buzení
- **regulační trafo** s automatickým přepínáním odboček (tzv.HRT)
- **zatížení** zastupující odběr činného a jalového výkonu z **uzlu**
- čtyřstupňové **frekvenční odlehčování**
- **centrální regulátor frekvence a předávaných výkonů**
- **ARN** – automatická regulace napětí pilotního uzlu
- **vývod** sdružující distanční, nadproudové, rozdílové a zemní směrové ochrany a synchrotakt .

Na následujícím obrázku je zobrazeny vazby mezi jednotlivými objekty modelu ES:



**Obr. 3 Schéma objektově orientovaného návrhu modelu elektrizační soustavy**

Základní objekty modelu tvoří **blok**, **uzel** a **větev**. **Uzel** může mít přiřazeno čtyřstupňové **frekvenční odlehčování**, které působí na zatížení uzlu. **Větev** může být definována jako **regulační trafo**, jehož převod je řízen regulátorem odboček.

Dalším objektem je **oblast**, která prostřednictvím centrálního **regulátoru** mění žádanou hodnotu výkonu  $N_S$  vybraných (regulačních) **bloků**.

**ARN** je přiřazen pilotnímu uzlu, v kterém reguluje napětí na zadanou hodnotu.

Mezi další objekty patří **externí stabilizátor a regulátor**, **automatika** a **logika**. **Externí stabilizátor** přidává svůj signál do součtového bodu (na výstup) regulátoru buzení (turbíny) **bloku**. **Externí regulátor** přidává korekční signál k zadané hodnotě regulátoru buzení/pohonu **bloku** a regulátoru odboček trafo (HRTu).

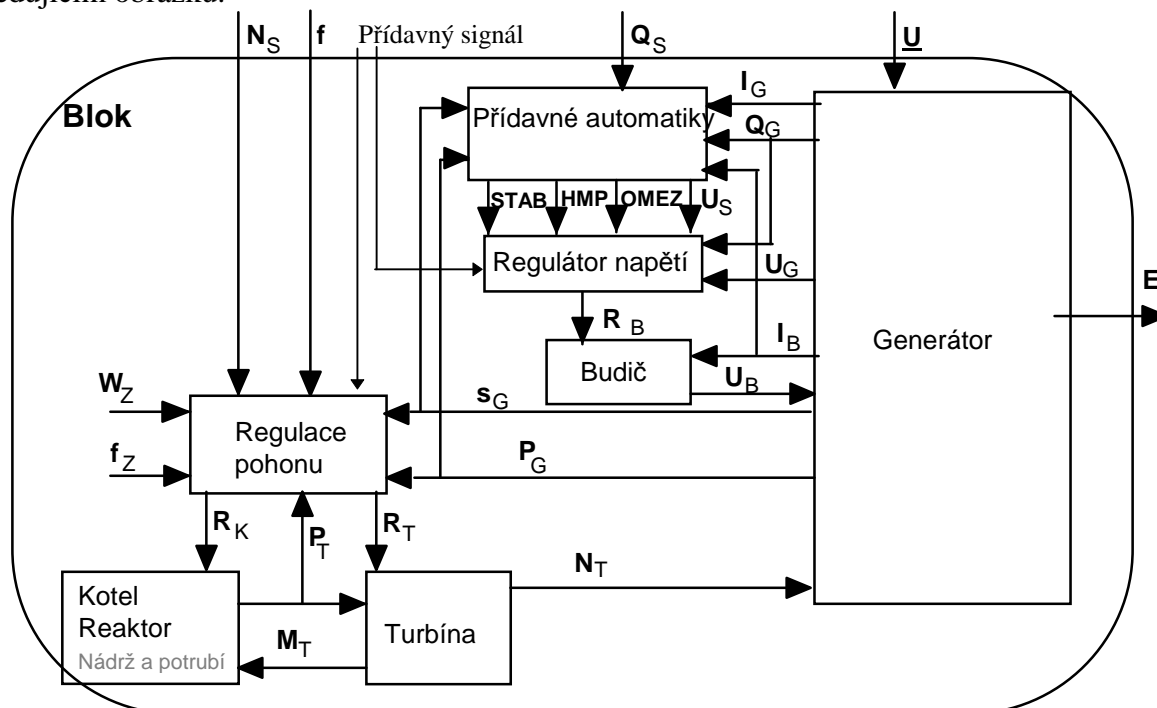
**Automatika** simuluje řídicí a ochranné prvky a provádí zásahy nad ostatními objekty modelu. **Logika** tvoří nadřazenou úroveň automatikám a také může provádět zásahy.

**Scénář** simuluje časový sled náhodných dějů nebo předem známou činnost. Program umožňuje provádět zásahy během simulace. Zásahy jsou definovány pomocí klíčových slov, jejichž význam je vysvětlen dále v textu.

## 2.1 Model bloku

**Blokem** se pro účely modelování v programu MODES rozumí zdroj elektromotorické síly. Jsou implementovány modely asynchronního a synchronního soustrojí.

V prvním případě se jedná o asynchronní motor a poháněné zařízení. V druhém případě **blok** sestává ze synchronního **generátoru**, **budiče**, pohonného mechanismu (parní, vodní, plynovou **turbínu** nebo přepínaný vznětový motor), **zdroje** pracovního média (kotel, jaderný reaktor s parogenerátorem, pro vodní a plynovou turbínu tato část odpadá - budeme tudíž zanedbávat změny hladiny vodní nádrže a dynamiku spalování). Model **bloku** je dále doplněn o řídicí systémy - regulátor buzení a regulátor pohonu (regulace turbíny a tepelného zdroje je brána jako celek, protože může mít variabilní vzájemně provázanou strukturu). Vazby mezi jednotlivými prvky jsou na následujícím obrázku.



### Vazební proměnné bloku:

Generátor (index G):  $P, Q, I, s, \dots$  činný a jalový výkon, proud satoru, skluz

Buzení (index B):  $U, I, R$  budicí napětí a proud, výstup regulátoru

STAB, HMP, OMEZ výstupy systémového stabilizátoru, hlídače podbuzení a omezovačů

$U_s$  napětí požadované sekundární regulací  $U$  a  $Q$

Pohon (index T a K):  $N, P, M, R, \dots$  výkon turbíny, tlak, průtok a výstup regulátoru

### Vstupní proměnné bloku:

$W_z, f_z$  zadané hodnoty otáček a frekvence  $N_s, Q_s$  činný a jalový výkon požadovaný sekundární regulací

### Obr. 4 Konceptuální model bloku synchronního stroje

Veličiny vyznačené v obrázku představují vazební proměnné, které tvoří vstupy a výstupy jednotlivých prvků modelu **bloku**. Vstupní veličinou bloku je fázor napětí uzlu sítě  $\underline{U}$ , kam je blok připojen. Jako řídicí veličiny bloku slouží především požadovaný činný výkon  $N_s$  a jalový výkon  $Q_s$ . Tyto hodnoty jsou zadávány nadřazeným regulátorem. V opačném případě tvoří řídicí veličiny zadaný výkon nebo zadané otáčky  $N_z/W_z$  a zadané svorkové napětí  $U_s$ . U bloků v primární regulaci frekvence slouží jako dodatečná vstupní a řídicí veličina frekvence uzlového napětí  $f$  a zadaná hodnota frekvence  $f_z$ .

Zvláštní roli v modelu hrají přídavné signály zavedené do součtového bodu vytvářejícího regulační odchylku nebo na výstup regulátoru (pro stabilizační signál u regulátoru turbíny). Slouží pro zadávání jednak skokových a harmonických signálů a jednak přídavných (externích) stabilizátorů.

### 3. Model sítě

Jelikož pro účely simulování elektromechanických a dlouhodobých přechodných dějů lze zanedbat elektromagnetické děje, můžeme síť popsat algebraickými rovnicemi v komplexním tvaru. Dalším předpokladem je, že síť, zdroje i zatížení jsou symetrické, takže se omezíme na souslednou složkovou soustavu. Pro popis použijeme metodu admitanční matice, která má v maticovém vyjádření tvar:

$$\sqrt{3} \cdot \mathbf{I} = \mathbf{Y} \cdot \mathbf{U} \quad (1)$$

$\mathbf{I}, \mathbf{U}$ ..sloupcové matice fázorů vstřikovaných proudů a uzlových napětí.

Mimodiagonální prvky admitanční matice  $\mathbf{Y}$  jsou tvořeny záporně vzatou podélnou admitancí mezi příslušnými uzly. Diagonální prvky jsou součtem všech admitancí do uzlu připojených tj. podélných, příčných a admitancí modelujících zátěž. Dále to mohou být dodatečné admitance vznikající při nejmenovitých převodech traf (při nená vazných hladinách napětí) nebo při simulování nesymetrických zkratů pomocí bočnicků. Při simulaci přechodných dějů je výhodné používat poměrné hodnoty místo pojmenovaných. Mezi poměrnou a pojmenovanou hodnotou veličiny  $X$  platí vztah:

$$X = X_v / X_v \quad (2)$$

$X, X_v$ ..poměrná a vztažná hodnota veličiny  $X$ .

Vztažná hodnota napětí je určena jmenovitým napětím příslušné napěťové hladiny. Vztažný výkon je libovolný, je vhodné jeho velikost zvolit řádově rovnu velikosti přenášených výkonů, tak aby poměrné hodnoty proudů a toků výkonu se blížily 1 (resp. byly menší než 1). Pro vztažné hodnoty pak platí vztahy:

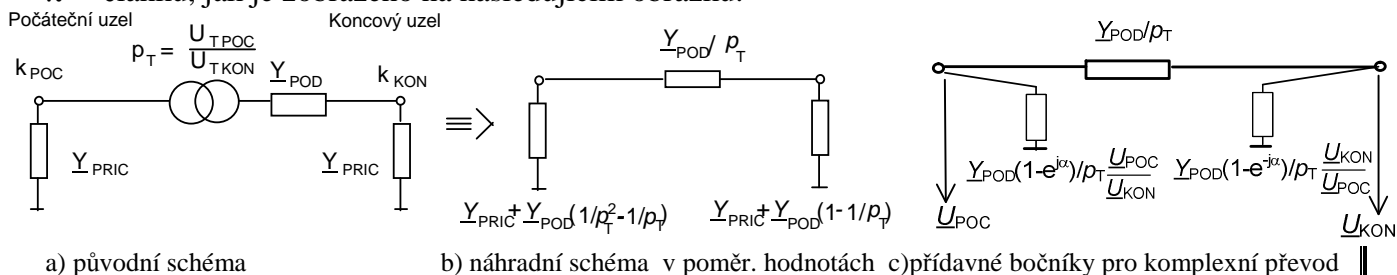
$$I_v = S_v / (\sqrt{3} \cdot U_v) \quad Z_v = U_v^2 / S_v \quad Y_v = 1 / Z_v \quad (3)$$

V rovnici pak v poměrných hodnotách (1) vymizí  $\sqrt{3}$ .

#### 3.1 Větev

Větví rozumíme vedení (vzdušné nebo kabelové), spínač nebo trafo. Je modelována pomocí

$\pi$  článku, jak je zobrazeno na následujícím obrázku:



a) původní schéma

b) náhradní schéma v poměr. hodnotách c) přídatné bočnický pro komplexní převod

**Obr. 5** Náhradní schéma modelu větve včetně možnosti komplexního převodu  $p_T e^{j\alpha}$

Schéma na Obr. 5b a c zachovávají symetrii admitanční matice  $\mathbf{Y}$ .

Pro kompatibilitu s programem GLF (program pro výpočet ustáleného stavu) program MODES umožňuje alternativní model, kdy příčná větev v počátečním uzlu je umístěna za ideální transformátor. Do počátečního a koncového uzlu lze připojit admitanci  $G + jB$ .

V případě vedení nebo spínače je pořadí uzlů (počáteční a koncový) libovolné, v případě trafo se volí uzel příslušný straně s přepínatelnými odbočkami jako počáteční. Tím je zaručeno, že při přepínání odboček není nutno přepočítávat admitanci  $\mathbf{Y}_{POD}$  (za předpokladu, že náhradní reaktance trafo je úměrná kvadrátu počtu závitů).

U vedení slouží jako vstupní hodnoty odpor  $R$ , reaktance  $X$  a kapacitní vodivost  $B$ . Převod se zadá rovný 1. Pro příslušné parametry pak platí:

$$\mathbf{Y}_{POD} = 1 / (R + jX) \quad \mathbf{Y}_{PRIC} = jB/2 \quad (4)$$

Na poměrné hodnoty se přejde vydělením pojmenovaných hodnot vztažnými.

U traf se zadávají tytéž hodnoty, vypočítané ze štítkových podle vztahů:

$$R = P_K / S_{Tn} \cdot Z_{Tn} \quad X = \sqrt{[(u_K \cdot p_{KON}^2 Z_{Tn}^2 - R^2]} \quad B = -i_0 / Z_{Tn} \quad Z_{Tn} = U_{TnKON}^2 / S_{Tn} \quad (5)$$

$P_K, u_K$ ..

$p_{KON}$

$i_0, Z_{Tn}$

$S_{Tn}, U_{TnKON}$

ztráty nakrátko a poměrné napětí nakrátko (při jmenovitém stavu)

podíl aktuálního a jmenovitého počtu závitů na straně koncového uzlu

poměrný proud naprázdno a jmenovitá impedance

jmenovitý výkon a napětí na straně koncového uzlu.

Převod  $p_T$  je definován poměrem napětí na straně počátečního uzlu k napětí na straně koncového uzlu ve stavu naprázdno - poměrem počtu závitů na straně počátečního a koncového uzlu (u trať bez přepínání odboček tomu odpovídá poměr jmenovitých napětí  $U_{TnPOC}/U_{TnKON}$ , u trať s přepínáním odboček toto platí jen pro střední – odbočku). Poměrný převod  $p_T$  je definován:

$$p_T = p_T \cdot U_{VKON} / U_{VPOC} \quad (6)$$

kde  $U_{Tn}$  a  $U_V$  jsou jmenovité napětí trať (dané štítkovými hodnotami) a vztážné napětí sítě (dané v tabulce uzlů) pro koncový a počáteční uzel.

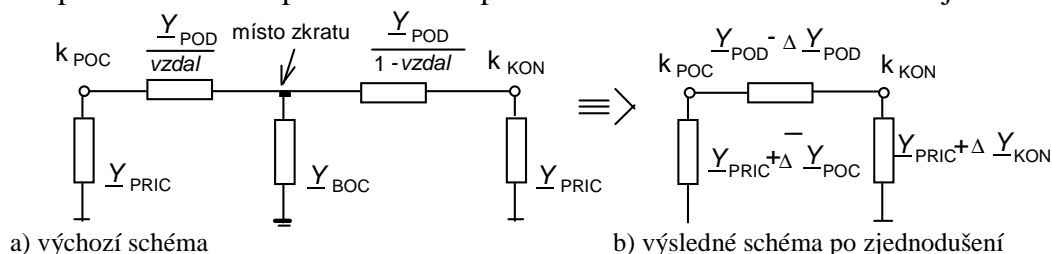
V případě komplexního převodu je  $p_T = p_T e^{j\alpha}$  (pro trať s příčným převodem nebo s posunem fáze (PST)). Pokud je změna komplexního převodu  $p_T$  dána poměrnou změnou napětí na odbočku  $\Delta u$  a počtem odboček  $n$  (obecně může mít trať jak podélné, tak i příčné přepínání odboček značené  $'$ ), platí pro převod  $p_T$  a regulační úhel  $\alpha$  vztahy 6b (pro asymetrickou regulaci s úhlem  $\Theta$ ) a 6c pro symetrickou regulaci, kdy se poměrná absolutní hodnota  $p_T$  nemění (viz [30]):

$$p_T = \sqrt{(1 + n\Delta u)^2 + 2(1 + n\Delta u)n'\Delta u' \cos \Theta + (n'\Delta u')^2} \quad \alpha = \arctan\left(\frac{n'\Delta u' \sin \Theta}{1 + n\Delta u + n'\Delta u' \cos \Theta}\right) \quad (6b)$$

$$p_T = 1 \quad \alpha = 2 \arctan \frac{n\Delta u}{2} \quad (6c)$$

### 3.2 Zkrat

Zkrat na vedení je modelován připojením fiktivního bočníku  $Y_{BOC}$  mezi místa zkratu a nulového potenciálu. Jednopolové schéma pro souslednou složkovou soustavu je na Obr. 6.



Obr. 6 Náhradní schéma modelu zkratu na vedení

Výchozí schéma Obr. 6a) se po transfiguraci a přechodu na poměrné hodnoty změní na výsledné podle Obr. 6b). Přídavné hodnoty admitancí jsou:

$$\Delta Y_{POD} = Y_{POM} \cdot (1-l) \cdot l \quad \Delta Y_{POC} = Y_{POM} \cdot (1-l) \quad \Delta Y_{KONC} = Y_{POM} \cdot l \quad Y_{POM} = \frac{Y_{BOC} \cdot Y_{POD}}{(Y_{POD} + Y_{BOC} \cdot (1-l) \cdot l)} \quad (7)$$

$l$  je poměrná vzdálenost místa zkratu od počátečního uzlu.

Program MODES spočítá velikost  $Y_{BOC}$  automaticky v závislosti na typu zkratu, přičemž umožňuje zadat i externí poruchovou impedanci pro simulaci např. nekovových zkratů.

### 3.3 Rozpojení fáze

Program umožňuje zadávat i rozpojení jedné a dvou fází tím, že připojí fiktivní impedance mezi místa rozpojení (tedy podélně na rozdíl od příčného bočníku u zkratu). Obdobně jako u zkratu program automaticky spočítá velikost fiktivní impedance.

Podobně jako u zkratů program počítá fázové hodnoty hodnot napětí a proudů sítě.

Metodika výpočtu je popsána v [16] a výpočet podélných impedancí pro souslednou, zpětnou a nulovou složku v [17]. Pro výpočet impedance nulové složky potřebuje program stejné údaje jako pro výpočet nesymetrických zkratů.

### 3.4 Složkové soustavy

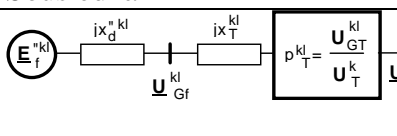
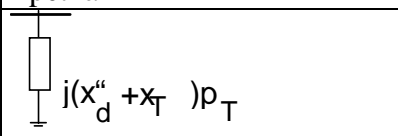
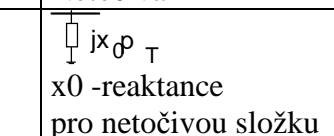
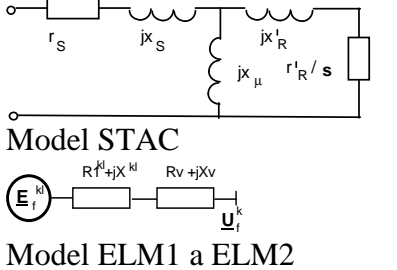
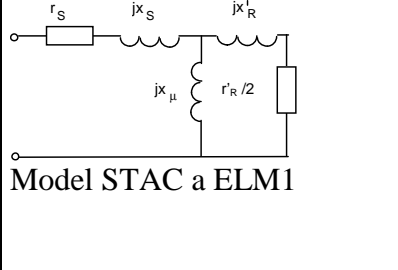
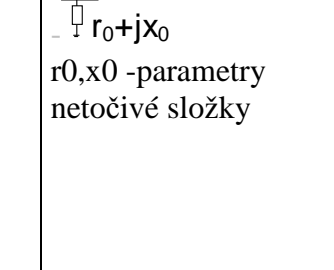
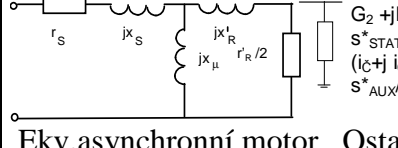
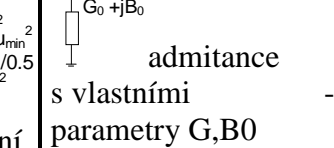
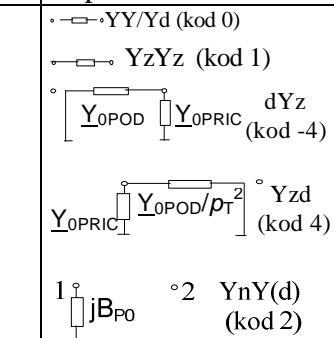
Metodika výpočtu  $Y_{BOC}$  respektive její inverzní hodnoty impedance  $Z_d$  je popsána v [16]. Nesymetrie se v sousledné složkové soustavě projeví tak, že do místa poruchy připojíme přídavnou impedanci  $Z_d$  určité velikosti podle typu poruchy. Impedance shrnuje tabulka:

Typ	Zkraty				Přerušování fází	
poruchy	jednofázový	2f.	3f.	dvoufázový zemní	jedné	dvou
$Z_d$	$Z_{C2} + Z_{C0} + 3Z_g$	$Z_{C2} + Z_f$	$Z_f$	$Z_{C2}(Z_{C0} + 3Z_g) / (Z_{C2} + Z_{C0} + 3Z_g)$	$(\zeta_{C2}\zeta_{C0}) / (\zeta_{C2} + \zeta_{C0})$	$\zeta_{C2} + \zeta_{C0}$

$Z_g$  je impedance vlastního zkratu měřená mezi místem zkratu a zemí.  $Z_f$  je impedance vlastního zkratu měřená mezi fázemi. Náhradní impedance  $\zeta_C$  a  $Z_C$  vyjadřují celkovou impedanci příslušné složkové pasivní sítě měřenou mezi místy přerušování a mezi místem poruchy a zemí pro zkraty. Indexy 2 a 0 značí zpětnou a netočivou složku.



Pro zjištění celkových impedancí  $\underline{Z}_C$  je nutno sestavit příslušné zkratové admitanční matice  $\underline{Y}_{K2}$  a  $\underline{Y}_{K0}$ . Pro zkraty se  $\underline{Z}_C$  rovná přímo diagonálnímu prvku zkratové impedanční matice  $\underline{Z}_K = \underline{Y}_K^{-1}$ . Pro přerušení fáze mezi uzly  $i$  a  $j$  se  $\underline{Z}_C$  určí z prvků zkratové impedanční matice podle vztahu  $\underline{Z}_C = \underline{Z}_{ii} + \underline{Z}_{jj} - 2 \underline{Z}_{ij}$ . Přehled náhrad v jednotlivých soustavách dává následující tabulka:

Soustava	Sousledná	Zpětná	Netočivá
Generátor			 $jx_0 p_T$ $x_0$ -reaktance pro netočivou složku
Motor	 Model STAC Model ELM1 a ELM2	 Model STAC a ELM1	 $r_0 + jx_0$ $r_0, x_0$ -parametry netočivé složky
Zatížení	-	 Ekv.asynchronní motor Ostatní	 $G_0 + jB_0$ admitance s vlastními parametry $G, B_0$
Vedení	$\Pi$ článek	jako sousledná	$\Pi$ článek s vlastními parametry, vzájemné impedance
Trafo	jako vedení vliv hodinového úhlu u traf Yd	jako sousledná vliv hodinového úhlu u traf Yd	

Určení parametrů netočivé složky je popsáno např. v [16] a [18]. Pro výpočet impedance netočivé složky jsou potřeba dodatečné údaje, jak plyne ze čtvrtého sloupce tabulky. Tyto přídatné parametry je možno zadat v rozšířeném záznamu větve:  $R_0 \ X_0 \ B_0 \ Z_{ap} \ GP_0 \ BP_0 \ GK_0 \ BK_0 \ Hod. u_{hel}$

Výpočet dynamiky zanedbává příslušné momenty způsobené zpětnou a nulovou složkou proudů<sup>1</sup>, ale umožňuje výpočet fázových hodnot napětí a proudů sítě a správně určí měřenou hodnotu napětí (včetně kompaundace jalovým proudem) v regulátoru buzení.

Program ovšem umožňuje vypočítat skutečnou (fázovou) hodnotu počátečního rázového proudu zkratu (jelikož se jedná o zkrat na větví, rozumí se proudem zkratu příspěvek proudů z počátečního a koncového uzlu) a maximální hodnoty nárazového, vypínacího a ekvivalentního oteplovacího proudu dle ČSN 33 3020 [18]. Vychází se z předpokladu, že v postižené fázi vznikne zkrat v okamžiku průchodu proudu nulou.

Časový průběh proudu je:  $i_K(t) = \sqrt{2}[-I_k(t)\cos\omega t + I_k''e^{-t/T_a}]$ . Má dvě složky. Souměrná střídavá složka o kmitočtu sítě má proměnnou amplitudu  $I_k(t)$  danou simulačním výpočtem. Stejnoseměrná složka (s počáteční hodnotou  $I_k'' = I_k(t_0)$  danou počátečním rázovým proudem) zaniká exponenciálně s časovou konstantou  $T_a$  (viz [19]). Složka o dvojnásobném kmitočtu se zanedbává, jelikož se předpokládá rovnost rázových reaktancí generátorů v podélné a příčné ose. Časová konstanta  $T_a$  se spočítá jako podíl imaginárních a reálných složek sumární impedance  $\underline{Z}_{C1}$  a  $\underline{Z}_f$  (součet celkové impedance sousledné složky a přídatné impedance) vydělený synchronní rychlostí  $\Omega_0 = 314 \text{ rad/s}$ .

<sup>1</sup> Při odporu statorového vinutí zanedbatelném proti reaktancím jsou momenty způsobené zpětnou a netočivou složkou proudu také zanedbatelné



V tabulce je přehled parametrů HRTu zadávaný v úseku regulačních traf v tabulce větvi:

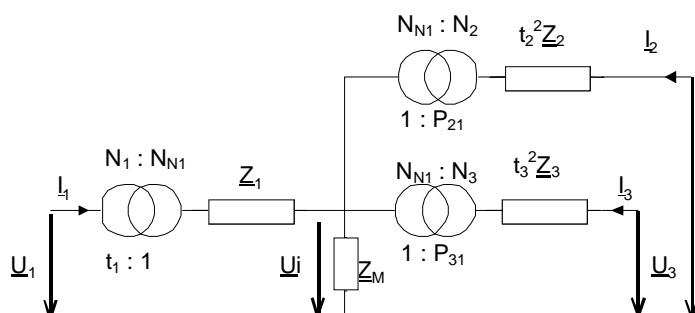
Cis Pocuzlu	Cis Konuzlu	Regul uzel	Ptmin (- / °)	Ptmax (- / °)	Krok (- / °)	U/Pzad (% / MW)	necU/P (% / MW)	StavT (0 / 1)	CKT (-)	U1min (kV)	U2max (kV)	I2max (kA)
----------------	----------------	---------------	------------------	------------------	-----------------	--------------------	--------------------	------------------	------------	---------------	---------------	---------------

Jestliže má trafo definovanu příčnou regulaci, lze alternativně zvolit jako regulovanou veličinou přenášený činný výkon  $P$ . V tom případě mají parametry v předchozí tabulce jiný význam (označený za lomítkem). Rozpoznání regulace  $P$  se provede pomocí kritéria  $P_{tmax}-P_{tmin}>2$ . V tomto režimu je časová konstanta měřícího členu  $T_M$  5 s a neprovádí se blokování od hodnoty napětí a proudu.

### 3.6 Model trojvinutového trafo

Na následujícím obrázku je náhradní schéma trojvinutového trafo odvozené za předpokladu:

- zanedbání vzájemných rozptylových magnetických toků mezi vinutími,
- zanedbání sycení,
- že, magnetická vodivost (resp. indukčnost) závisí na kvadrátu závitů.



Výhodou uvedeného schématu je, že jednotlivé impedance  $Z_L = R_L + jX_L$  mají konstantní parametry zjištěné při jmenovitém počtu závitů. Jelikož rozptylové reaktance se se změnou odbočky (počtu závitů) mění, je vhodné definovat vinutí se změnou odboček jako první.

**Obr. 8 Model trojvinutového trafo**

Ve schématu jsou použity ideální transformátory, pro něž platí vztahy pro proudy a napětí:

$$U_1/U_2 = N_1/N_2 \quad I_1/I_2 = N_2/N_1 \quad (8)$$

Jsou zavedeny převody poměrné  $t$  a absolutní  $P$ :

$$t_L = N_L/N_{NL} \quad P_{L1} = N_L/N_{N1} \quad L=1,2,3 \quad (9)$$

Případná odchylka počtu závitů  $N_2$  a  $N_3$  od střední (jmenovité hodnoty) se v modelu zanedbává, takže platí  $t_1 = t_2 = 1$ . Indexem  $N$  je označen počet závitů při nulové (střední) odbočce.

Pro zjištění parametrů náhradního schématu využijeme výsledků měření nakrátko a to poměrných napětí nakrátko  $u_K$  a ztrát nakrátko  $P_K$ . Pokud jsou účinníky měření nakrátko pro všechny tři měření (primár-sekundár, primár-terciár a sekundár-terciár) stejné, spočítáme impedance pomocí následujících vztahů:

$$Z_1 = U_{N1}^2 (u_{K12}/S_{N2} + u_{K13}/S_{N3} - u_{K23}/S_{N3})/2 \quad Z_2 = U_{N2}^2 (u_{K12}/S_{N2} + u_{K23}/S_{N3} - u_{K13}/S_{N3})/2 \quad (10)$$

$$Z_3 = U_{N3}^2 (u_{K13}/S_{N3} + u_{K23}/S_{N3} - u_{K12}/S_{N2})/2$$

Hodnoty  $U_N$  a  $S_N$  jsou jmenovité hodnoty napětí a zdánlivých výkonů jednotlivých vinutí.

Nutno upozornit, že použité hodnoty  $u_{KIJ}$  mají význam skutečných napětí zjištěných zkouškou nakrátko, kterou se rozumí napájení jednoho vinutí (s indexem  $I$ ) při druhém vinutí (s indexem  $J$ ) zkratovaném a třetím naprázdno. Hodnota  $u_{KIJ}$  znamená napětí vinutí  $I$  (vydělené jeho jmenovitou hodnotou) pokud vinutím  $J$  protéká jmenovitý proud tohoto vinutí. Je možné se setkat i s jiným významem hodnoty  $u_K$  ve smyslu impedance nakrátko. Tu výrobci nebo správci databázi přepočítávají většinou na největší hodnotu výkonu trafo (což pro  $u_{KIJ}$  ve smyslu napětí nakrátko nemá význam). Pro dvouvinutové trafo jsou obě hodnoty stejné, protože jmenovité výkony obou vinutí jsou stejné. Pokud se udává, že hodnota „ $u_{KIJ}$ “, je „vztažená“ na výkon  $S_V$ , je nutno této hodnotě před použitím v rovnicích (10) vrátit její správný význam napětí nakrátko přepočtem podle vztahu  $u_{K13/23} = „u_{K13/23}„ S_{N3}/S_V$ .

Pro výpočet odporů  $R$  lze odvodit analogické vztahy jako pro impedance, akorát místo poměrného napětí nakrátko se dosadí poměrné ztráty nakrátko  $p_K$  vypočítané následovně:

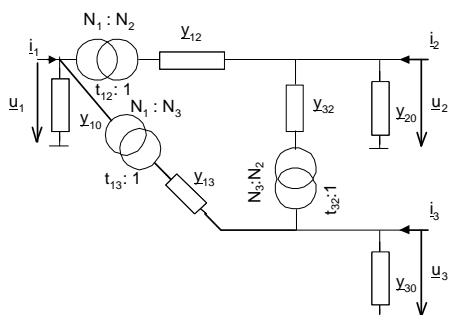
$$p_{K12} = P_{K12}/S_{N2} \quad p_{K13} = P_{K13}/S_{N3} \quad p_{K23} = P_{K23}/S_{N3} \quad (11)$$

Rozptylové reaktance se dopočítají pomocí obecného vztahu  $X = \sqrt{(Z^2 - R^2)}$ . Magnetizační impedance  $Z_M$  se skládá z magnetizační reaktance  $X_M$  a odporu  $R_0$ , který bude modelovat ztráty naprázdno  $P_0$  a magnetizační proud  $i_0$ :

$$Z_M = U_{N1}^2 / S_{N1} / i_0 \quad R_0 = U_{N1}^2 / P_0 \quad X_M = 1 / \sqrt{(1/Z_M^2 - 1/R_0^2)} \quad (12)$$

Pro autotransformátor lze použít stejné schéma s tím rozdílem, že pro přepínání odboček na nulovém potenciálu je nutno uvážit to, že se mění jak počet závitů  $N_1$ , tak  $N_2$ . Převody se pak spočítají podle čísla aktuální odbočky AktOdb, procentní změny napětí na jednu odbočku Krok a jmenovitých hodnot napětí (předpokládá se, že primární vinutí má index 2 a sekundární 1):

$$t_1 = 1 + AK/[A - (1 + K)] \quad P_{21} = A + AK/[A - (1 + K)] \quad A = U_{N2}/U_{N1} \quad K = \text{AktOdb} * \text{Krok} / 100 \quad (13)$$

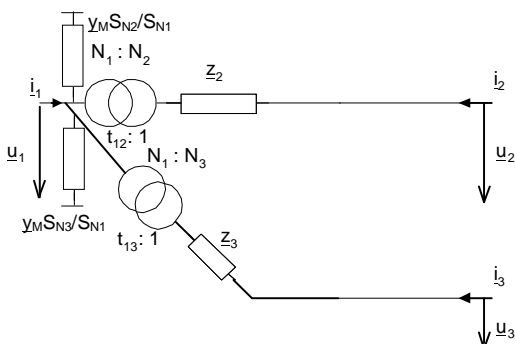


Pro výpočet chodu sítě je vhodné převést schéma podle Obr. 8 na trojúhelník, čímž jednak odpadne fiktivní uzel a jednak se vyhneme malým impedancím. Na vedlejším obrázku je schéma trojvinutového trafo po transfiguraci na trojúhelník:

**Obr. 9 Model trojvinutového trafo po transfiguraci na trojúhelník**

Pro parametry v poměrných hodnotách (vztažených na napěťové hladiny  $U_V$ ) platí:

$$\begin{aligned} Y_{1L} &= Y_K * Y_L / \Sigma Y & Y_{23} &= Y_2 * Y_3 * p_{31}^2 / \Sigma Y & Y_{10} &= Y_1 * Y_M / \Sigma Y / t_1^2 & Y_{L0} &= Y_L * Y_M / \Sigma Y \\ \Sigma Y &= Y_M + Y_1 + Y_2 * p_{21}^2 + Y_3 * p_{31}^2 & Y_1 &= 1 / Z_1 & Y_L &= 1 / Z_L / t_L^2; \quad L=2,3 \\ Y_M &= 1 / Z_M t_{KL} = (N_K / N_L) * (U_{VL} / U_{VK}) & K, L &\in 1, 2, 3 \end{aligned} \quad (14)$$



Někdy se mohou vyskytnout případy, že některá s hodnot  $z_1$ ,  $z_L$  vychází nulová (například hodnota  $z_1$  u trojvinutových odbočkových traf). Tuto singularitu je třeba ošetřit zvlášť tím způsobem, že toto trojvinutové trafo se převede na dvě dvouvinutová podle vedlejšího schématu platného pro nulovou hodnotu impedance 1. vinutí. Magnetizační impedance se rozdělí mezi obě trafo v poměru jejich výkonů.

**Obr. 10 Převod trojvinutového trafo při nulové impedanci  $z_1$**

Je nutno vzít v úvahu, že při změně odbočky tohoto trafo je nutno změnit převody obou dvouvinutových traf. Obdobně se postupuje, když se nule rovná jiná impedance

Příklad zadávání parametrů trojvinutového trafo v programu MODES je v následujícím výpisu úseku trojvinutových traf v tabulce větví:

Jmeno	Uz.	Uz.	Uz.	Sn1	Sn2	Sn3	uk12	uk13	uk23	Pk12	Pk13	Pk23	P0	i0	Un1	Un2	Un3	Krok+	Krok-	Odb+	Odb-	AktOdb	Stav	TypR
trafa	1.	2.	3.			(MVA)			(%)			(MW)	(MW)	(%)	(kV)									
N3Tx																								
'TROJVINT'	1	2	3	250	250	100	11.6	12.7	7.3	0.505	0.155	0.174	0.117	0.5	121	400	10.5	1.19	1.31	10	-10	-4	1	3

Při vzniku nesymetrie v síti se trojvinutové trafo nahradí podle následující tabulky:

Soustava	Sousledná	Zpětná	Netočivá
Trojvin. trafo	hvězda + vliv hodinového úhlu u vinutí do trojúhelníka	jako sousledná s opačným hodinovým úhlem	<div> <math>i</math> <math>\circ</math> <math>Z_{M0}</math> neuzemněná hvězda Y0 (kod 0) </div> <div> <math>i</math> <math>\circ</math> <math>Z_i</math> <math>\circ</math> <math>Z_{M0}</math> uzemněná hvězda Yz (kod 1) </div> <div> <math>i</math> <math>\circ</math> <math>Z_i</math> <math>\circ</math> <math>Z_{M0}</math> trojúhelník d (kod 2) </div>
3VT nevyvedený terciár	dtto	dtto	<div> <math>1</math> <math>\circ</math> <math>Z_{13}</math> <math>\circ</math> <math>2</math> <math>\circ</math> <math>Y_n Y(d)</math> (kod 1 0 2) </div>

Zadání parametrů netočivé složky soustavy ve vst.souboru NESYM.DAT je následující:

Por.	Jmeno	Uzel	Uzel	Uzel	P0	i0	Kod	zapojeni	(0/1/2)	Hod.uhel
Cis. trafo		1.	2.	3.		(MW)	(%)	1.	2.	3.
										N3Tx
1	'TRIVINID'	1	2	3	0	1	1	1	2	0

Model umožňuje zadat specifické parametry  $P_0$  a  $i_0$  pro netočivou složku a tím rozdílnou hodnotu magnetizační impedance  $Z_{M0}$  oproti sousledné složce. Náhradní zapojení určeno způsobem zapojení vinutí (hvězda uzemněná/neuzemněná nebo trojúhelník) a impedancí příslušného vinutí.

Parametry netočivé složky je možno zadat přímo v úseku trojvinutových traf jako tzv rozšířený záznam.

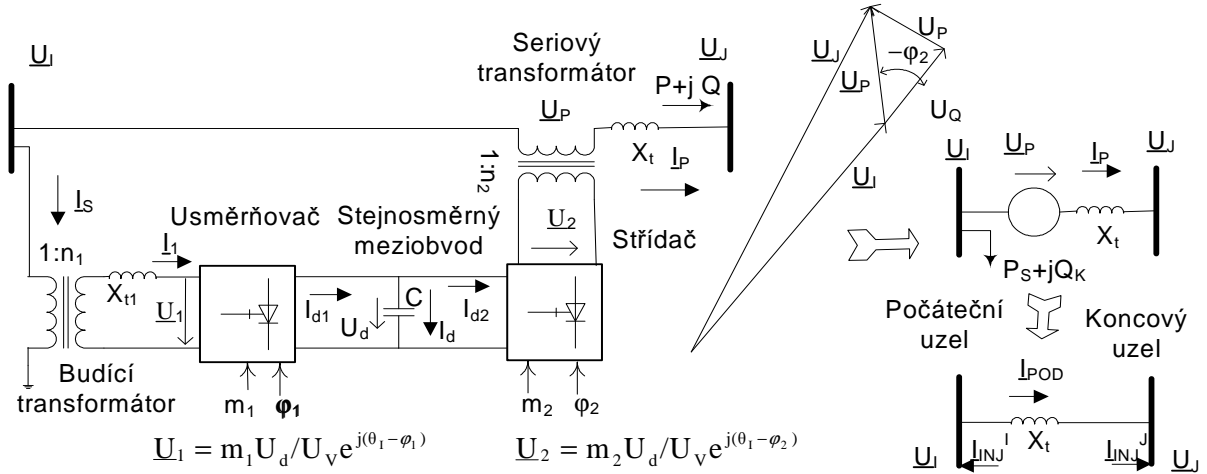
Trojvinutový transformátor může mít automatické přepínání odboček (HRT).

Rovněž je možno zadat příčnou regulaci (komplexní převod). Pro  $T_{YPR} = 4$  se přidávají další 4 parametry  $du_P$   $NP$   $aktNP$   $U_{helP}$  ( $\Theta$ ) k záznamu trať (uzly se v takovém případě zadávají jmény).

### 3.7 Model UPFC

Zařízení typu UPFC patří do rodiny tzv. FACTS (Flexible AC Transmission System) a kombinuje schopnosti zařízení typu STATCOM (což je SVC- Static Var Compensators vybavený moderními GTO tyristory) a TCSC (Thyristor controlled series compensators). UPFC umožňuje nezávislé a plynulé řízení toku činného i jalového výkonu přes vedení, doplněné o možnost tlumení systémových kyvů. Je tedy nejpokročilejším zařízením FACTS.

UPFC sestává ze dvou transformátorů – budícího napájecího usměrňovač a sériového (booster) zapojeného v sérii s vedením a napájeného ze střídače. Mezi usměrňovačem a střídačem je vložený stejnosměrný meziobvod tvořený kondenzátorem o kapacitě  $C$ .



**Obr. 11 Schéma UPFC zapojeného mezi uzly I a J a ekvivalentní matematický model**

Usměrňovač i střídač je vybaven moderními tyristory GTO (gate turn-off), takže lze pomocí pulzně šířkové modulace PWM (Pulse Width Modulation) měnit plynule amplitudu i fázi jednotlivých napětí změnou řídicích proměnných  $m$  a  $\phi$ . Výsledkem je, že ke vstupnímu napětí  $\underline{U}_I$  se přičítá napětí  $\underline{U}_S$ , jak ukazuje fázorový diagram v prostřední části obrázku. Podélnou a příčnou složku napětí  $U_Q$  a  $U_P$  lze plynule měnit a řídit tak přenosové poměry.

UPFC lze v modelu síť nahradit vloženým napětím  $\underline{U}_P$  do série s napětím  $\underline{U}_I$  a výkony  $P_S$  a  $Q_K$  odebíranými v počátečním uzlu I (viz např. [24]) jak ukazuje náhradní schéma v pravé části Obr. 11

Kompenzační jalový výkon  $Q_K$  se používá pro regulaci napětí v počátečním uzlu na zadanou hodnotu. Proměnné napětí  $\underline{U}_P$  se používá pro udržování toků činného a jalového výkonu  $\underline{S}_{ZAD} = P + jQ$  na zadané hodnotě.  $P_S$  je činný výkon, který je přenášený měničem. Pro použití v počítačovém programu je vhodné nahradit sériové napětí  $\underline{U}_P$  dvojicí vstřikovaných proudů  $\underline{I}_{INJ}$  v počátečním a koncovém uzlu:

$$\underline{I}_{INJ}^I = \underline{U}_P / jX_t \quad \underline{I}_{INJ}^J = -\underline{I}_{INJ}^I - (P_S - jQ_K) / \underline{U}_I^* \quad P_S = \text{real}\{\underline{U}_P \underline{I}_{POD}^*\} \quad \underline{I}_{POD} = (\underline{U}_I - \underline{U}_J) / jX_t \quad (15)$$

$$\underline{U}_{PZ} = jX_t((P_S - jQ_K) / \underline{U}_I^* - \underline{I}_{POD}) \quad \underline{U}_P = (\underline{U}_R + j\underline{U}_I) \quad (16)$$

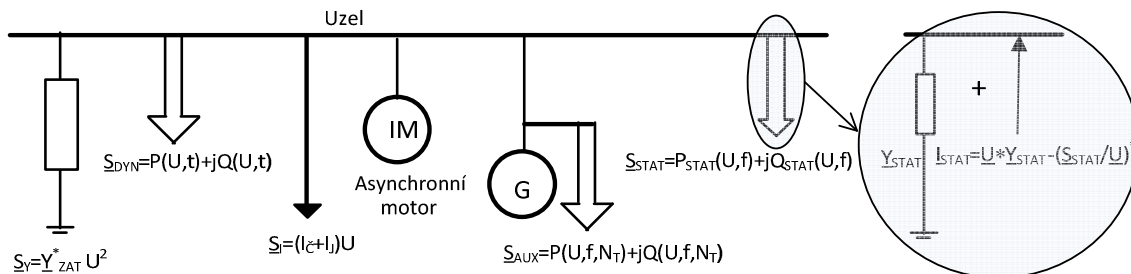
Hodnoty uzlových napětí v počátečním a koncovém uzlu jsou výsledkem výpočtu sítě, kam naopak hodnoty vstřikovaných proudů vstupují. Požadovaná hodnota napětí  $\underline{U}_P$  se vypočítá podle (16). Výpočet tedy probíhá iteračním způsobem, až je dosaženo požadované přesnosti řešení. Zbývající proměnné  $\underline{U}_P$  a  $Q_K$  jsou akční veličiny, pomocí nichž se provádí řízení UPFC.

Kompenzační výkon  $Q_K$  je akční veličinou regulátoru napětí v počátečním uzlu a  $\underline{U}_P$  je akční veličinou pro regulaci toků. Na základě řešerše literatury [24] a [25] a testování účinnost regulace



## 4. Modelování zátěže

Na Obr. 13 jsou naznačeny modely zátěže použité v programu MODES 2.3. Tento program umožňuje rozdělit celkový odběr činného a jalového výkonu v **uzlu** na část modelovanou statickou charakteristikou, na část modelovanou jako asynchronní motor, na část modelovanou konstantním činným a/nebo jalovým proudem a na část modelovanou konstantní admitancí (zahrnuje i eventuální kompenzační výkon). Speciálním případem je model vlastní spotřeby **bloku**. Tento model je možný jen pro napájecí **uzly**, tj. uzly, do kterých jsou připojeny **bloky**.



Obr. 13 Modelování zatížení

V pravé části obrázku je rozkreslen princip modelování statické zátěže. Odebíraný výkon  $\underline{S}_{STAT} = \underline{P}_{STAT} + j\underline{Q}_{STAT}$  je nahrazen konstantní admitancí  $\underline{Y}_{STAT}$  (stává se součástí admitanční matice  $\underline{Y}$  podle rovnice (1) a kompenzačním vstřikovaným proudem  $\underline{I}_{STAT}$  (je na levé straně síťové admitanční rovnice). Kompenzační princip umožňuje plynulou změnu zátěže a nevyžaduje přepočítání admitanční matice a šetří výpočetní čas. Tento princip je použit i u modelu zátěže konstantním proudem.

### 4.1 Statický model zátěže

Statický model zátěže odpovídá tzv. agregátnímu způsobu modelování, kdy nemáme informace o kvalitativním složení zatížení, ale máme naměřené závislosti odběru na napětí a frekvenci. Z nich pomocí statistických metod určíme aproximační funkce  $P, Q = f(U, f)$ . Model je použitelný pro malé změny  $U$  a  $f$  (odpovídající podmínkám, za kterých byly charakteristiky naměřeny) a platí po odeznění rychlých přechodných dějů. Jsou tedy použitelné pro krátkodobou a dlouhodobou dynamiku. Použité charakteristiky mají tvar:

$$\begin{aligned} P_{STAT} &= P_0 * (1 - A_P - B_P + A_P * U + B_P * U^2) * (1 + C_P * s_U) / (1 - A_P - B_P + A_P * U_0 + B_P * U_0^2) \\ Q_{STAT} &= Q_0 * (1 - A_Q - B_Q + A_Q * U + B_Q * U^2) * (1 + C_Q * s_U) / (1 - A_P - B_P + A_P * U_0 + B_P * U_0^2) \\ U &= \text{abs}\{\underline{U}\} / U_v \quad s_U = [\arg\{\underline{U}(t + \Delta t)\} - \arg\{\underline{U}(t)\}] / \Delta t / \Omega_0 \end{aligned} \quad (17)$$

$P_0, Q_0, U_0$  jsou hodnoty činného, jalového výkonu a napětí v počátečním ustáleném stavu a  $s_U$  je poměrná odchylka frekvence uzlového napětí od jmenovité hodnoty počítaná jako rozdíl fází uzlového napětí za integrační krok, dělený tímto integračním krokem:

$\Delta t$  je přírůstek času (integrační krok),  $\Omega_0$  jmenovitá kruhová frekvence 314 rad/s a  $\underline{U}$  fázor uzlového napětí. Parametry pro jalový odběr jsou závislé na účinku odběru podle vztahů [2]:

$$A_Q = A_0 / \tan \varphi \quad B_Q = 1 + B_0 / \tan \varphi \quad C_Q = C_0 / \tan \varphi \quad (18)$$

kde  $A_0, B_0, C_0$  jsou konstantní parametry.

Model platí za podmínky  $U > U_{\min}$ , jinak se přechází na modelování konstantní admitancí. Typové parametry modelu statické zátěže jsou uvedeny v katalogu typových parametrů modelů sítě:

Ap(-)	Bp(-)	Cp(-)	A0(-)	B0(-)	C0(-)	Umin(-)	-	-
-------	-------	-------	-------	-------	-------	---------	---	---

Pro simulaci dlouhodobé dynamiky je možno zadat časově proměnnou zátěž podle průběhu denního diagramu zatížení podle aproximačního vztahu:

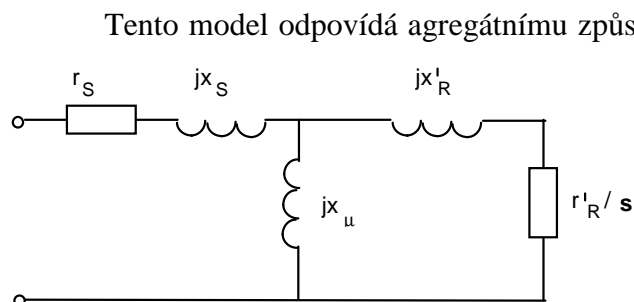
$$P = P_{str} \left( 1 + \sum_{i=1}^5 A_i \sin(iT \times \pi/12 + \varphi_i) \right) \quad (19)$$

Podmínkou je zadání přídatných deseti parametrů na řádku v katalogu typových parametrů modelů sítě (pozn.:  $F = \varphi$ ):

Ap(-)	Bp(-)	Cp(-)	A0(-)	B0(-)	C0(-)	Umin(-)	-	-	A1(-)	F1(rad-)	A2	F2	A3	F3	A4	F4	A5	F5
-------	-------	-------	-------	-------	-------	---------	---	---	-------	----------	----	----	----	----	----	----	----	----



## 4.2 Ekvivalentní asynchronní motor



Tento model odpovídá agregátnímu způsobu modelování, kdy známe podíl motorické zátěže na celkovém odběru, ale neznáme parametry jednotlivých motorů. Pro tyto účely lze motorickou zátěž modelovat jedním ekvivalentním asynchronním motorem. Použije se tzv. stacionární model, který zanedbává elektromagnetické přechodné děje v obvodech statoru a rotoru. Náhradní schéma pro toto zjednodušení je na Obr. 14.

**Obr. 14 Náhradní schéma asynchronního motoru**

Skylz  $s$  představuje poměrnou frekvenci proudů indukovaných do rotorových vinutí:

$$s = (s_R + s_U) / (1 + s_U) \quad (20)$$

Dynamiku reprezentuje pohybová rovnice pro skylz rotoru  $s_R$ :

$$T_{MECH} \dot{s}_R = M_{MECH} - P_{EL} / (1 + s_U) \quad (21)$$

Elektrický výkon procházející vzduchovou mezerou motoru  $P_{EL}$  se vypočte z náhradních schémat uvedených na Obr. 14. Mechanický výkon zátěže lze zadat ve tvaru:

$$M_{MECH} = k_{ZAT} \cdot \cos \phi_n \cdot k_A \cdot \{ 1 - A_M - B_M + A_M \cdot (1 - s_R) + B_M \cdot (1 - s_R)^2 \} \quad (22)$$

$k_{ZAT}, \cos \phi_n$	zatěžovatel (výkon v ustáleném stavu ku jmenovitému výkonu), jmenovitý účinník
$k_A$	koefficient měřítka (přizpůsobuje momentovou charakteristiku poháněného zařízení a motoru)
$A_M, B_M$	parametry závislosti zatěžovacího momentu na skylzu
$s_{R0}$	skylz rotoru v počátečním ustáleném stavu.
$T_{MECH}$	mechanická časová konstanta pohonu rovna $J \Omega_M^2 / S_n$
$S_n, J$	jmenovitý zdánlivý příkon a moment setrvačnosti ( $GD^2/4$ )
$\Omega_M, \Omega_0$	kruhová rychlost mechanická a synchronní

Parametry ekvivalentního asynchronního motoru se přednostně zadávají z katalogu sítě, kde je příslušný úsek typových parametrů s následující hlavičkou (pozn.:  $x_{mi} = x_{\mu}$ ):

Am(-)	Bm(-)	Tmech(s)	Rs(-)	Xs(-)	Xmi(-)	Rr(-)	Xr(-)
-------	-------	----------	-------	-------	--------	-------	-------

Pro kompatibilitu s předchozími verzemi je možno zadávat i parametry z katalogu bloku, pak platí  $R_s = R_1$   $X_s = X_1$   $R_r = R_{20}$   $X_r = X_{20}$ .

## 4.3 Dynamický model zátěže

Zatížení v uzlu lze modelovat pomocí dynamického modelu podle rovnic (viz např.[20]):

$$P_{DYN} = P_R + P_0 U^{\alpha_S} \quad T_P P_R^{\circ} + P_R = P_0 U^{\alpha_S} - P_0 U^{\alpha_T} \quad (23)$$

$$Q_{DYN} = Q_R + Q_0 U^{\beta_S} \quad T_Q Q_R^{\circ} + Q_R = Q_0 U^{\beta_S} - Q_0 U^{\beta_T}$$

Hodnoty  $P_0$   $Q_0$  a  $U$  mají stejný význam jako u statického modelu. Veličiny  $P_R$  a  $Q_R$  vytváří dynamické závislosti odběru na změny napětí. Část zatížení sleduje se zpožděním daným časovými konstantami  $T_P$  a  $T_Q$  změny napětí a část se mění okamžitě podle statické závislosti dané mocninami  $\alpha_S$  a  $\beta_S$ . Obdobný je i model tzv. termostatické zátěže, který se zadává pouze pro činnou část odběru a platí pro něj rovnice (23). V následující tabulce je uvedeno pořadí typových parametrů modelu dynamické zátěže v příslušném katalogu typových parametrů modelů sítě (pozn.: Alfa= $\alpha$ , Beta= $\beta$ ):

AlfaS(-)	AlfaT(-)	Tp(s)	BetaS(-)	BetaT(-)	TQ(s)
----------	----------	-------	----------	----------	-------

## 4.4 Konstantní admittance

Modelování zátěže pomocí konstantní admittance odpovídá čistě odporové zátěži (žárovky, topení, pece) a/nebo čistě jalové zátěži (kompenzace pomocí tlumivek nebo kondenzátorových baterií). V takovém případě se v modelu tato konstantní admittance  $Y_{ZAT}$  přičítá k diagonálnímu prvku síťové admitanční matice  $\underline{Y}$ . Konstantní admittance je standardní model, kterým bude odběr výkonu nahrazen, pokud není zadán jiný model.



## 4.5 Vlastní spotřeba bloku

Vlastní spotřeba je modelována statickými charakteristikami. Tyto mají tvar:

$$P_{AUX} = S_n * (P_0 + A_P * \Delta U + B_P * N_T + C_P * s_U) \quad (24)$$

$$Q_{AUX} = S_n * (Q_0 + A_Q * \Delta U + B_Q * N_T + C_Q * s_U)$$

$S_n$  je jmenovitý výkon **bloku**,  $P_0$   $A_P$   $B_P$   $C_P$   $Q_0$   $A_Q$   $B_Q$   $C_Q$  jsou parametry.

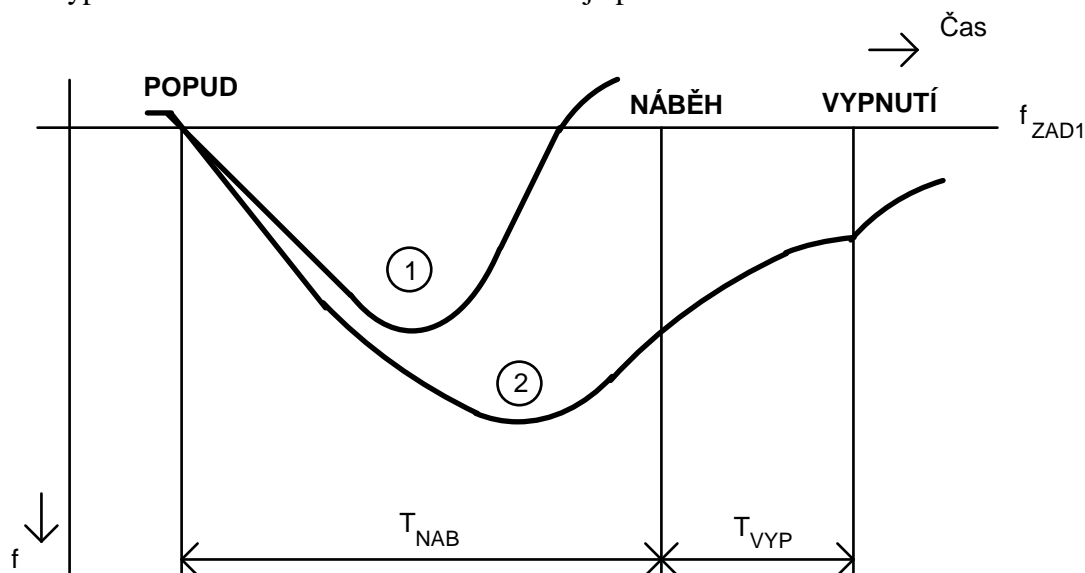
Výkon odebíraný vlastní spotřebou **bloku** tedy závisí na odchylce amplitudy  $\Delta U$  a frekvence  $s_U$  napětí od jmenovité hodnoty a výkonu turbíny  $N_T$ . Model je funkční pro **uzel**, do kterého je připojen **blok**.

V následující tabulce je uvedeno pořadí typových parametrů modelu statické zátěže v příslušném katalogu typových parametrů modelů sítě programu MODES:

Ap(-)	Bp(-)	Cp(-)	Aq(-)	Bq(-)	Cq(-)	-	P0(-)	Q0(-)
-------	-------	-------	-------	-------	-------	---	-------	-------

## 4.6 Frekvenční odlehčování

V programu MODES 2.3. je implementován model čtyřstupňového odlehčování. V případě poklesu frekvence napětí v uzlu pod hodnotu  $f_{ZAD}$ , příslušející danému stupni, dojde k popudu. Jestliže frekvence setrvá po dobu  $T_{NAB}$  pod hodnotou  $f_{ZAD}$ , dojde se zpožděním  $T_{VYP}$  příslušného vypínače k vypnutí určité části zatížení uzlu. Situace je patrná z Obr. 15.



**Obr. 15 Činnost stupně frekvenčního odlehčování**

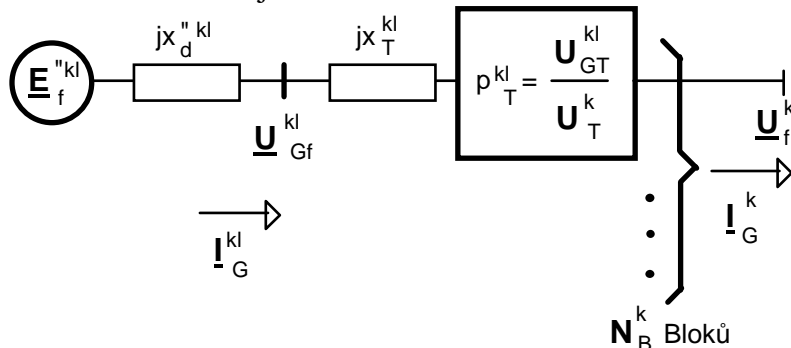
V případě 1. průběhu nedojde k náběhu a následnému odepnutí zátěže, neboť frekvence se zotaví. Jednotlivé stupně pracují nezávisle na sobě, takže k zásahu nemusí nutně dojít postupně, ale pořadí vypínání závisí na nastavených hodnotách  $f_{ZAD}$  a  $T_{NAB}$  jednotlivých stupňů.

V následující tabulce je seznam názvů typových parametrů modelu frekvenčního odlehčování, tak jak uveden v příslušném katalogu typových parametrů modelů sítě programu MODES:

Fzad1(Hz)	Fzad2(Hz)	Fzad3(Hz)	Fzad4(Hz)	Tnab1(s)	Tnab2(s)	Tnab3(s)	Tnab4(s)	Tvyp(s)
-----------	-----------	-----------	-----------	----------	----------	----------	----------	---------

## 5. Model generátoru

Jelikož program MODES se zabývá ve verzi 2.3 elektromechanickými přechodnými ději je možné při zanedbání elektromagnetických přechodných dějů ve statoru nahradit generátor elektromotorickou silou  $\underline{E}''$  za rázovou reaktancí, přičemž se předpokládá pro zjednodušení rovnost  $X''_d = X''_d$  a zanedbá se odpor statoru. Pro případ, že generátor bude modelován současně se svým blokovým trafem (toto trafo tedy nebude součástí sítě), uváží se i náhradní reaktance trafo a jeho převod. Odpovídající náhradní schéma je na Obr. 16.



Obr. 16 Náhradní schéma bloku I připojeného do uzlu k

$X_T$  je náhradní reaktance blokového trafo přepočítaná na jmenovitý výkon generátoru  $S_{Gn}$  a  $p_T$  je poměrný převod:

$$X_T = u_K (S_{Gn} / S_{Tn}) (U_{Tn} / U_{Gn})^2 \quad p_T = p_T (U_V / U_{Gn}) \quad (25)$$

$u_K$  je poměrné napětí nakrátko a  $p_T$  je poměr počtu závitů blokového trafo na straně generátoru ku počtu závitů na straně sítě.  $S_{Gn} / S_{Tn}$  a  $U_{Tn} / U_{Gn}$  jsou jmenovité hodnoty výkonu a napětí generátoru/blokového trafo (u napětí trafo se jedná o jmenovitou hodnotu na straně generátoru).  $U_V$  je vztážné napětí uzlu generátoru.

Přepočet  $U_V / U_{Gn}$  respektuje to, že jmenovité napětí generátoru  $U_{Gn}$  může být obecně odlišné od vztážného napětí uzlu  $U_V$ , kde je generátor připojen. V programu jsou veličiny zobrazovány jako proměnné a to veličiny bloku vztáženy na  $U_{Gn}$  a  $S_{Gn}$  a veličiny sítě vztáženy na  $U_V$  a  $S_V$ .

Pokud blokové trafo není součástí modelu bloku (je součástí modelu sítě), zadává se za absolutní převod  $p_T$  1.

### 5.1 Rovnice synchronního stroje

Při odvozování rovnic jsou přijaty tyto předpoklady:

- platí pro malé odchylky otáček od synchronních
- jsou zanedbány transformační napětí (derivate statorových proudů podle času)
- reaktance nejsou funkcí proudu (zanedbání sycení)
- uvažuje se pouze 1. harmonická elektromotorické síly statoru
- rozložené vinutí rotoru se zjednodušeně uvažuje jako koncentrické
- tlumící vinutí (nebo účinek masivního rotoru) je nahrazeno po jednom ekvivalentním koncentrickém vinutí v podélné a dvou ekvivalentních koncentrických vinutí v příčné ose
- tlumící vinutí (nebo účinek masivního rotoru) je nahrazeno po jednom ekvivalentním koncentrickém vinutí v podélné a příčné ose
- tlumící vinutí jsou magneticky symetrická ( $X_q'' = X_d''$ )
- odpory statoru a kapacity mezi vinutími jsou zanedbány
- ztráty naprázdno a ztráty Jouleovy jsou hrazeny z mechanického výkonu.

Za těchto předpokladů platí v Parkově transformaci (v souřadném systému dq pevně spojeném s osou rotoru) a v poměrných hodnotách pro rotorové obvody:

$$\begin{aligned} T_{d0}' * E_q'' &= U_B + (X_d' - X_d'') * I_d' - E_q' \\ T_{q0}' * E_d'' &= - (X_q' - X_q'') * I_q' - E_d' \\ T_{d0}'' * E_q''' &= E_q' + (X_d' - X_d'') * I_d' - E_q'' \\ T_{q0}'' * E_d''' &= E_d' - (X_q' - X_q'') * I_q' - E_d'' \end{aligned} \quad (26)$$

$E_q', E_d', E_q'', E_d''$ . průměty elektromotorických sil do os d a q  
 $I_d, I_q$  průměty proudu statoru  
 $U_B, \dots$  budící napětí  
 $T_{d0}', T_{d0}'', T_{q0}' \dots$  časové konstanty naprázdno  
 $X_d, X_d', X_d'' \dots$  synchronní, přechodná a rázová reaktance v podélné ose  
 $X_q, X_q', \dots$  synchronní a přechodná reaktance v příčné ose

Uvedené rovnice jsou publikovány např. v [1]. Za vztahné hodnoty byly vzaty jmenovité hodnoty statorového proudu a napětí a budící napětí naprázdno. Za těchto předpokladů je elektromotorická síla za synchronní reaktancí  $E_q$  rovna budícímu proudu  $I_B$  a platí:

$$E_q = I_B = E_q' - (X_d' - X_d'') * I_d \quad (27)$$

Mechanickou pohybovou rovnici lze napsat obecně ve tvaru:

$$T_M * s_G^\circ = N_T / [(1 + s_G) k_N] - (P_G + \Delta P_G) / (1 + s_U) - M_{AS} \quad \delta^\circ = \Omega_0 \quad s_G \quad (28)$$

$s_G, \delta \dots$  skluz rotoru a absolutní zátěžný úhel  
 $N_T \dots$  mechanický výkon turbíny vztažený na jmenovitý výkon turbíny  
 $P_G \dots$  elektrický výkon generátoru vztažený na jmenovitý zdánlivý výkon generátoru  
 $T_M = J \Omega_M^2 / S_n \dots$  mechanická časová konstanta vztažena na jmenovitý zdánlivý výkon ( $T_M = 2H$ )  
 $J \dots$  moment setrvačnosti ( $GD^2/4$ )  
 $\Omega_M, \Omega_0 \dots$  mechanická kruhová rychlost, synchronní kruhová rychlost 314 rad/s  
 $k_N \dots$  převodní koeficient mezi výkonem generátoru a turbíny  $= S_{Gn} / N_{Tn}$

$M_{AS}$  je asynchronní tlumící moment generátoru, který se vyčíslí dle vztahu [2]:

$$M_{AS} = U^2 / 2 \left[ \left( \frac{1}{X_d'} - \frac{1}{X_d} \right) \frac{s T_d'}{1 + (s T_d')^2} + \left( \frac{1}{X_d''} - \frac{1}{X_d'} \right) \frac{s T_d''}{1 + (s T_d'')^2} + \left( \frac{1}{X_q''} - \frac{1}{X_q'} \right) \frac{s T_q''}{1 + (s T_q'')^2} + \left( \frac{1}{X_q'} - \frac{1}{X_q} \right) \frac{s T_q'}{1 + (s T_q')^2} \right] \quad (29)$$

$U$  je modul uzlového napětí a  $s$  odpovídá poměrné frekvenci proudů indukovaných do rotorových obvodů  $s = s_G - s_U$ .

$\Delta P_G$  jsou ztráty generátoru dané součtem ztrát naprázdno  $\Delta P_0$  a Jouleových ztrát ve statorovém a rotorovém vinutí: jsou ztráty generátoru definované jako:

$$\Delta P_G = \Delta P_0 + R_{ROT} * I_B^2 + R_{STAT} * I_G^2 \quad (30)$$

$R_{ROT} R_{STAT} \dots$  odpor budícího a statorového vinutí.

Na následujícím řádku je seznam názvů typových parametrů modelu generátoru, tak jak je uveden v katalogu typových parametrů modelů bloku:

Xd(-)	Xq(-)	Xd1(-)	Xd2(-)	Xt(-)	Td01(s)	Td02(s)	Tq02(s)	Tm(s)	Xq1(-)	Tq01(s)	Rstat(-)	Rrot(-)	dP0(-)
-------	-------	--------	--------	-------	---------	---------	---------	-------	--------	---------	----------	---------	--------

Pozn. index 1 v tabulce znamená přechodné hodnoty (v textu značené ') a 2 rázové hodnoty (v textu značené '').

Kompletní sada rovnic (26) - (28) představuje tzv. Parkův model generátoru a označíme ho symbolem 'PARK'. V tomto modelu je  $M_{AS} = 0$ , neboť tlumení je zahrnuto v diferenciálních rovnicích pro elektrické obvody rotoru. Tento model je vhodný pro řešení krátkodobé dynamiky, kdy je nutné respektovat buzení.

Jestliže zanedbáme přechodné děje v rotorových obvodech a položíme elektromotorické síly  $E_q'', E_d''$  rovny konstantní hodnotě vznikne tzv. klasický model generátoru. V tomto případě je třeba řešit pouze pohybové rovnice (28), včetně  $M_{AS}$  podle (29), který respektuje tlumení. Tento model označíme jako 'CLAS', je vhodný pro řešení střednědobé dynamiky a pro modelování generátorů elektricky vzdálených od místa vzruchu, takže se u nich napěťové změny neprojeví.

Jestliže položíme i skluz rotoru  $s_G$  a zátěžný úhel  $\delta$  rovný konstantní hodnotě, dostaneme model generátoru jako zdroje nekonečného výkonu. Tento model označíme jako 'CONS', je vhodný při modelování přechodných dějů v soustavě, která je propojena s jinou soustavou, jejíž výkon je mnohonásobně větší. Vliv větší soustavy můžeme zjednodušeně postihnout připojením modelu 'CONS' do hraničních uzlů. V takto modelovaných soustavách je udržována střední hodnota frekvence (tzv. systémová) na konstantní hodnotě, jelikož deficit činného výkonu je plně hrazen ze zdrojů nekonečného výkonu.

Nevýhodou modelu 'CONS' je to, že netlumí kyvy. Tuto nevýhodu můžeme odstranit zavedením tlumení do pohybové rovnice ve tvaru:

$$T_M \cdot \Omega_0 s_G^\circ = \Delta N_T / [(1+s_G)k_N] - M_{AS} \quad \delta^\circ = \Omega_0 s_G \quad (31)$$

Druhý člen na pravé straně představuje vliv přechodných dějů v rotorových obvodech generátoru a první člen představuje tlumení kyvů činností proporcionálního regulátoru otáček:

$$\Delta N_T = -k_{SP} \cdot s_F \cdot 0.1 s_F^\circ + s_F = s_U \quad (32)$$

$k_{SP}$  obrácená hodnota statiky regulátoru (tento parametr přísluší modelu regulace pohonu, který bude popsán dále),  $s_F$  je filtrovaná odchylka frekvence sítě  $s_U$  podle **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů..**

Takto definovaný model označíme 'DAMP' - udržuje nulovou střední hodnota odchylky frekvence, ale tlumí kyvy.

Speciální případ nastane za předpokladu, že všechna uzlová napětí v propojené soustavě budou mít jednotnou - tzv. systémovou frekvenci  $f_{SYS}$ . Pro odchylku systémové frekvence v poměrných hodnotách platí:

$$T_{MSYS} \cdot \Omega_0 s_{SYS}^\circ = \Delta M_{SYS} \quad (33)$$

$$T_{MSYS} = \sum \{ T_{Mi} \cdot S_{Gni} / S_V \} \quad \Delta M_{SYS} = \sum \{ [(N_{Ti} / k_N - P_{Gi}) / (1 + s_{SYS}) - M_{ASi}] \cdot S_{Gni} / S_V \}$$

Odchylka systémové frekvence  $s_{SYS}$  se tedy získá řešením pohybové rovnice pro celou propojenou soustavu, kam se za akcelerační moment  $\Delta M_{SYS}$  dosadí součet akceleračních momentů všech generátorů přepočítaný na vztažný výkon  $S_V$ . Pohybová rovnice jednotlivého stroje se změní:

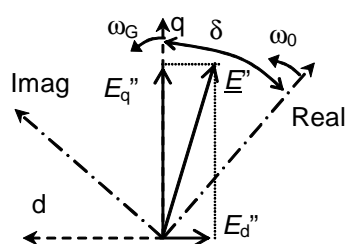
$$T_M \cdot \Omega_0 s^\circ = (N_T / k_N - P_G) / (1 + s_{SYS}) - M_{AS} - T_M \cdot \Delta M_{SYS} / T_{MSYS} \quad \delta_{REL}^\circ = \Omega_0 s \quad (34)$$

$s$ ,  $\delta_{REL}$  poměrná skluzová frekvence a relativní zátěžný úhel.

Tento model označíme jako 'EXTN' a je vhodný pro dlouhodobou dynamiku.

Všechny bloky jsou vypnuty, jestliže skluz generátoru vybočí z mezí  $-0.08 > s_G > 0.1$ .

## 5.2 Vazba generátoru a sítě a řídicí veličiny



Rovnice ( 26) pro elektrické veličiny generátoru platí pro souřadnou soustavu stroje, která je pevně spojena s rotorem, přičemž osa q je totožná s příčnou osou rotoru a osa d ji předbíhá ve směru otáčení. Naproti tomu v rovnici sítě ( 1) je použita souřadná soustava synchronně se otáčející osy, která v čase  $t=0$  splývá s fázorem napětí referenčního uzlu. Od této osy se odečítají absolutní zátěžné úhly generátorů  $\delta$ . Vztah mezi oběma soustavami je patrný z Obr. 17.

**Obr. 17 Vztah souřadných soustav generátoru a sítě**

Pro transformaci z jedné soustavy do druhé platí vztahy:

$$E_q'' + jE_d'' = \underline{E}'' \cdot \exp(-j\delta) \quad \underline{E}'' = (E_q'' + jE_d'') \cdot \exp(j\delta) \quad (35)$$

Z Obr. 16 se odvodí vztahy pro elektrické veličiny generátoru:

$$\underline{I}_G = \frac{\underline{E}'' - P_T \underline{U}}{jX_G} \quad \underline{U}_G = \frac{X_T \underline{E}'' + X_d'' P_T \underline{U}}{X_G} \quad X_G = X_d'' + X_T \quad (36)$$

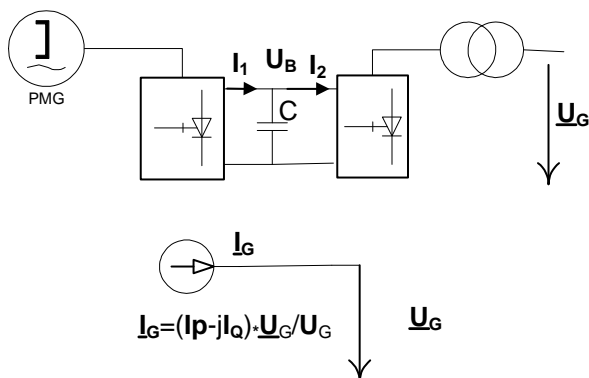
$$P_G = \text{Real}\{\underline{U}_G \underline{I}_G^*\} \quad Q_G = \text{Imag}\{\underline{U}_G \underline{I}_G^*\} \quad U_G = \text{abs}\{\underline{U}_G\} \quad I_G = \text{abs}\{\underline{I}_G\}$$

Pro získání řešitelné soustavy rovnic zbývá popsat budící napětí  $U_B$  z rovnice ( 26) a mechanický výkon turbíny  $N_T$  vstupující do pohybové rovnice ( 28). Tyto veličiny hrají důležitou roli, neboť slouží k řízení **bloku**. Z fyzikální podstaty budící napětí ovlivňuje napěťové poměry a přenos jalového výkonu. Mechanický výkon **turbíny** ovlivňuje přenos činného výkonu a udržování frekvence sítě. Jejich regulací a akčními členy v dalších kapitolách.

### 5.3 Synchronní stroj s permanentními magnety a plnovýkonovým měničem

Model je označen PMGC (z ang. „Permanent Magnet Generator with Converter“). Principiální schéma a odpovídající model je na následujícím obrázku:

Synchronní stroj poháněný obvykle větrnou turbínou napájí plnovýkonový frekvenční měnič (obdobné zařízení je i u modelu DFIG – viz dále). Výstupní (síťová) část měniče napájí přes transformátor síť. Vektorové řízení prvků IGBT pomocí pulzně šířková modulace umožňuje rychlou (z hlediska elektromechanických přechodných dějů prakticky okamžitou) regulaci přenášených výkonů.



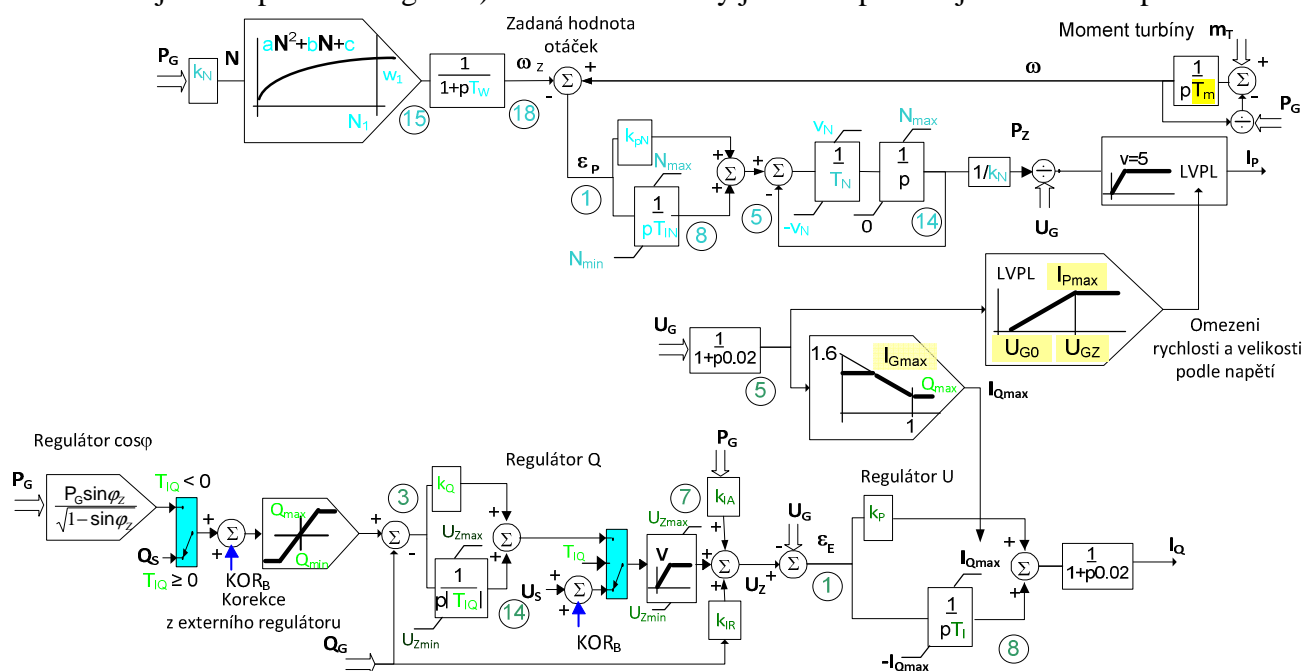
Vlastní implementace modelu je znázorněna na obrázku dole. V souladu s [28] je generátor s měničem modelován pomocí vstřikovaného proudu (Nortonův ekvivalent bez náhradní admitance) jak ukazuje dolní část obrázku.

Tento model musí mít zadány nulovou reaktanci  $x_t$  v tabulce generátorů.

**Obr. 18 Schéma zapojení PMGC a odpovídající model**

Regulace spočívá ve dvou oddělených a nezávislých částech pro činný a jalový požadovaný výkon  $P_Z$  a  $Q$  (viz Obr. 19). Cílem regulace  $P_Z$  je přizpůsobovat činný výkon dodávaný do sítě tak, aby odpovídal výkonové rovnováze soustrojí, tedy především výkonu vyráběnému větrnou turbínou v závislosti na rychlosti větru. V modelu se předpokládá spolupráce s větrnou turbínou s proměnnými otáčkami, takže zadaná hodnota otáček se určuje v závislosti na skutečné dodávce výkonu do sítě  $P_G$ . V případě výkonové nerovnováhy (rozdílu mezi výkonem turbíny  $N_T$  a výkonem generátoru  $P_G$ ) a vzniku regulační odchylky  $\varepsilon_P$  je požadovaný výkon  $P_Z$  měněn trendem  $v_N$ , aby se dostal do souladu s výkonem turbíny. Naopak při poklesu dodávky do sítě  $P_G$  (např. vlivem zkratu) se zmenšují zadané otáčky  $\omega_z$  (vstupující i do modelu turbíny), čímž se zmenšuje akcelerace soustrojí. Zároveň se při poklesu napětí omezuje dodávka činného výkonu tak, aby bylo možné dodat více jalového výkonu – viz blok označený LVPL (Low Voltage Power Logic dle [28]).

Jalový výkon je řízen buď pro regulaci napětí  $U_G$  (primární regulace) nebo dodávaného jalového výkonu  $Q_G$  (sekundární regulace) v závislosti na hodnotě parametru  $T_{IQ}$  (pro nulovou hodnotu se jedná o primární regulaci). Velikost dodávky jalového proudu je omezena napětím.



**Obr. 19 Schéma modelu generátoru PMGC**

Při zadání  $T_{IQ} < 0$  může regulátor jalové složky proudu  $I_Q$  pracovat v regulaci účinníku  $\cos\phi$ .

## 6. Modelování buzení

Buzení synchronního stroje se skládá ze dvou relativně samostatných prvků - regulátoru a budiče.

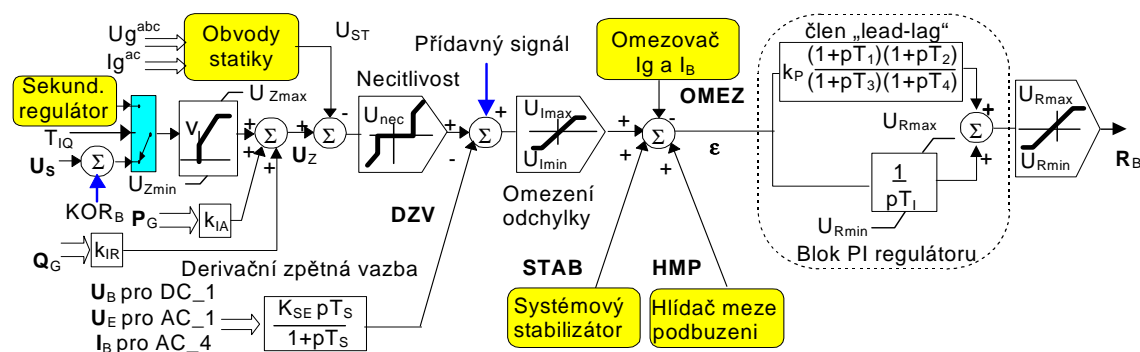
### 6.1 Regulátor buzení

Základní funkcí regulátoru buzení je udržovat zadané napětí na svorkách (eventuálně v jiném místě ES) - jedná se o tzv. primární regulaci. Obvykle je primární regulátor doplněn o tzv. kompaundaci jalovým proudem, která určuje statiku primární regulace, tj. sklon statické charakteristiky  $U_G = \text{funkce}(Q_G)$ . Z toho plyne, že svorkové napětí není konstantní, ale mění se v závislosti na jalovém zatížení.

Kromě toho plní regulátor buzení zpravidla i doplňkové funkce, k tomu slouží:

- omezovač satorového a rotorového proudu - chrání generátor před přetížením satorového a rotorového obvodu;
- hlídač meze podbuzení, který nedovolí odbudit stroj tak, aby byla ohrožena statická stabilita, překročeno dovolené oteplení čelních spojek vinutí satoru a aby napětí vlastní spotřeby kleslo pod dovolenou mez;
- systémový stabilizátor - slouží k tlumení přechodných dějů, zvláště elektromechanických kyvů;
- sekundární regulátor jalového výkonu, který udržuje jalový výkon na zadané hodnotě, pak je potlačena funkce primárního regulátoru; používá se, jestliže **blok** plní funkci regulaci napětí v uzlu; jestliže má tento regulátor jinou strukturu (např. impulsní regulátor) je nutné ho zahrnout do skupinové regulace - vstupní veličinou **bloku** pak bude  $U_s$ .

Na základě rozboru struktury regulátorů používaných v naší ES byl sestaven univerzální model zobecněného regulátoru buzení, který umožňuje modelovat reálné regulátory typu MRNG, RNG a RBA firmy ŠKODA, Unitrol firmy ABB. Jeho schéma je na následujícím obrázku:



Vazební proměnné:

$I_B$  a  $U_B, U_E, \dots$  buzení proud a napětí, napětí pomocného generátoru

$R_B, \dots$  výstup regulátoru buzení

$U_G, P_G, Q_G, U_G$  svorkové napětí, činný a jalový výkon generátoru

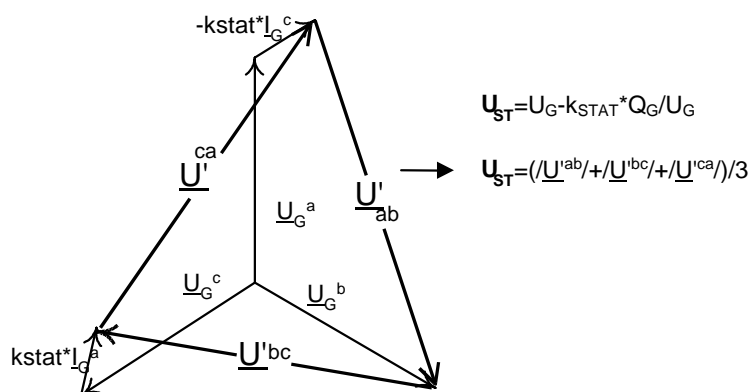
STAB, HMP, OMEZ výstupy systémového stabilizátoru, hlídače meze podbuzení a omezovače satorového a rotorového proudu

Obr. 20 Schéma modelu zobecněného regulátoru buzení

Regulační odchylka  $\varepsilon$  se vytváří následujícím způsobem:

1. požadovaná hodnota napětí je dána buď výstupem ze sekundárního regulátoru (režim sekundární regulace  $Q$  pro  $T_{IQ}>0$ ) nebo hodnotou  $U_S$  případně korigovanou výstupem **externího** (nadráženého) **regulátoru KOR<sub>B</sub>** (režim primární regulace  $U$  pro  $T_{IQ}=0$ )
2. omezovač rychlosti zatěžování mění svou výstupní hodnotu zadanou rychlostí v tak dlouho, dokud se vstupní a výstupní hodnota nesrovná a omezí na velikost  $U_{Zmin}-U_{Zmax}$
3. zadaná hodnota  $U_Z$  se získá přičtením kompaundace činným nebo jalovým výkonem
4. od zadané hodnoty  $U_Z$  se odečte výstup obvodů statiky  $U_{ST}$ , který je závislý na svorkových napětích a jalových proudech ve fázích (bere v úvahu nesymetrické zatížení)
5. je možné zadat pásmo necitlivosti  $U_{nec}$
6. přičtou stabilizační signály derivačních (technické derivace -tzv. "washout") zpětných vazeb (typ stabilizačního signálu závisí na druhu použitého budiče), případně i přídavný signál sloužící pro testování vlastností regulátoru
7. velikost regulační odchylky je možno omezit velikostí  $U_{lmin}-U_{lmax}$
8. přičtou se hodnoty přídavných automatik.

Měřená hodnota napětí  $U_{ST}$  se vytváří v závislosti na vzniku nesymetrie v síti. V případě, že síť je symetrická, je měřená hodnota rozdílem svorkového napětí a jalového proudu násobeného statikou. V případě vzniku nesymetrie se hodnota  $U_{ST}$  vytváří v tzv. obvodech statiky vektorovým sčítáním sdružených napětí a fázových proudů a jejich usměrněním a filtrováním - viz [3]. Příslušný fázorový diagram je na následujícím obrázku:



**Obr. 21 Fázorový diagram a získání měřené hodnoty napětí**

Vliv usměrnění se respektuje zprůměrováním absolutních hodnot sdružených napětí modifikovaných statikou  $k_{STAT}$ . Vliv filtrace (s časovou konstantou kolem 20ms) se zanedbává.

Výstup systémového stabilizátoru lze volbou znaménka parametru  $T_S$  zapojit alternativně do součtového bodu regulátoru (pro  $T_S>0$ ) nebo na výstup regulátoru (pro  $T_S<0$ ).

Vlastní primární regulátor je proporcionálně integračního typu. Volbou  $T_I=0$  je možné vyřadit integrační část a regulátor se stává čistě proporcionálním (odpovídá typu MRNG nebo Unitrol). Proporcionální část může být při volbě  $T_1, T_3>0$  a  $T_2, T_4>0$  doplněna o tzv. dvojitý "lead-lag" člen, sloužící k zlepšení dynamických vlastností proporcionálních regulátorů.

Přídavný signál v modelu umožňuje zadávání:

- skokových nebo harmonických signálů
- propojení na výstup přídavných **externích stabilizátorů**, které budou popsány dále.

Na následujícím řádku je seznam názvů typových parametrů modelu regulátoru buzení, tak jak je uveden v katalogu typových parametrů modelů bloku:

Uzmin	Uzmax	Unec	Kstat	Kp(-)	Kse(-)	TI(s)	Ts(s)	T1(s)	T3(s)	v(%/s)	Urmx	Urmin	Ulmin	Uimax	T2	T4	KIA	KIRR
-------	-------	------	-------	-------	--------	-------	-------	-------	-------	--------	------	-------	-------	-------	----	----	-----	------

Jestliže se na řádku zadá o jeden parametr více, použije se jiná struktura regulátoru buzení odpovídající ruským regulátorům tzv. silnogo dejstvija, jejichž struktura je na Obr. 22. Předposlední čtyři parametry mají odlišný význam od zobecněného regulátoru.

Uzmin	Uzmax	Unec	Kstat	Kp(-)	Kse(-)	TI(s)	Ts(s)	T1(s)	T3(s)	v(%/s)	Urmx	Urmin	Ulmin	Uimax	T1f	T1u	K1f	K1u	K_f
-------	-------	------	-------	-------	--------	-------	-------	-------	-------	--------	------	-------	-------	-------	-----	-----	-----	-----	-----

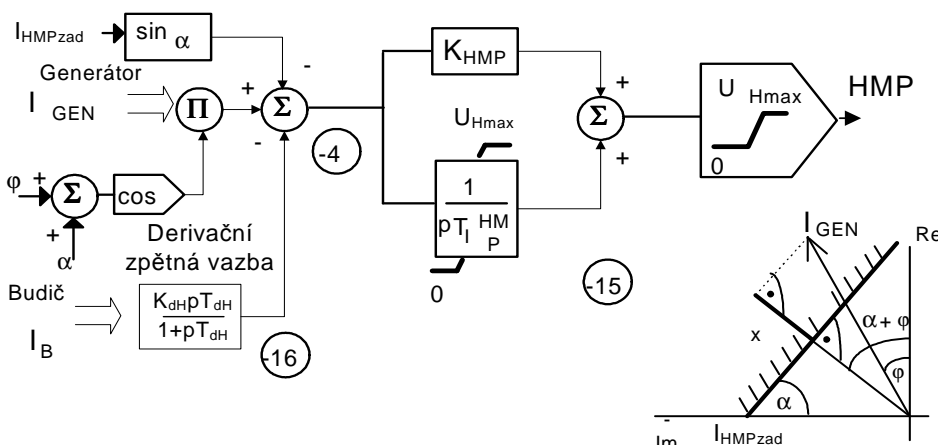






### 6.1.2 Hlídač meze podbuzení

Hlídač meze podbuzení (HMP) plní ochrannou funkci- nedovolí podbuzení stroje, které by ohrozilo jeho stabilitu a životnost. Na rozdíl od omezovače působí prakticky okamžitě. Schéma modelu s jeho charakteristikou je na následujícím obrázku:



**Obr. 24 Schéma modelu hlídače meze podbuzení (HMP)**

Jestliže se fázor statorového proudu dostane do zakázané oblasti, která je na Obr. 24 vyšrafována (je určena úsekem  $I_{HMPzad}$  a úhlem  $\alpha$ ), dojde k nárazovému přibuzení úměrnému úseku  $x$ . Jelikož má HMP i integrační charakter, zajistí, že snížením jalové složky se fázor statorového proudu dostane do dovolené oblasti. Pro zajištění stability je HMP opatřen derivační zpětnou vazbou od budícího proudu. Jestliže je fázor statorového proudu v dovolené oblasti, je na výstupu HMP nula.

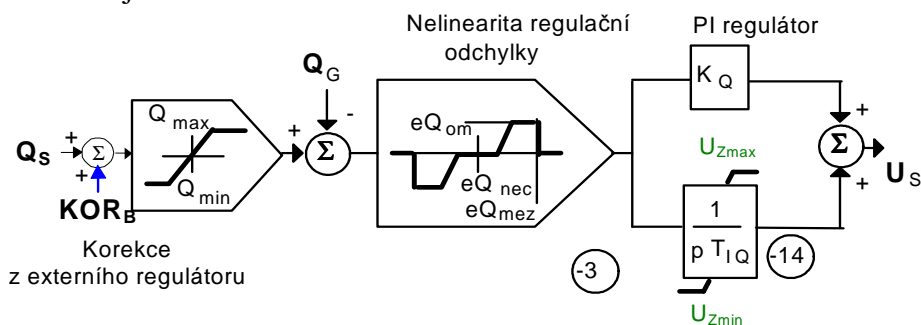
Na následujícím řádku je seznam názvů typových parametrů modelu hlídače, tak jak je uveden v úseku přídatných automatik regulátoru buzení katalogu typových parametrů bloku:

$K_{dH}(-)$	$K_{HMP}(-)$	$I_{HMPzad}(-)$	$\text{Alfa}(\text{rad})$	$T_{IHMP}(s)$	$U_{Hmax}(s)$	$T_{dHMP}(s)$
-------------	--------------	-----------------	---------------------------	---------------	---------------	---------------

Konstrukční uspořádání omezovače i HMP je blíže popsáno v [3] .

### 6.1.3 Regulátor jalového výkonu

Sekundární regulátor jalového výkonu tvoří nadřazenou úroveň primárnímu regulátoru. Schéma modelu je na Obr. 25.



**Obr. 25 Schéma modelu sekundárního regulátoru jalového výkonu**

Jedná se o PI regulátor, který se dá volbou  $T_{IQ}=0$  vyřadit. Žádaná hodnota  $U_s$  je pak určena počátečním ustáleným stavem a regulátor buzení pracuje v režimu primární regulace, tzn. udržuje zadanou hodnotu napětí. V opačném případě je regulátor buzení v režimu sekundární regulace a udržuje žádanou hodnotu  $Q_s$ .

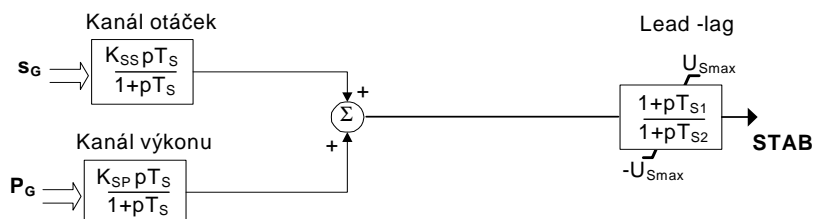
Nelinearita určuje jednak necitlivost regulátoru pro regulační odchylky menší než  $eQ_{nec}$ , jednak omezuje rychlost změn hodnotou  $eQ_{om}$ . Zároveň blokuje regulátor pro regulační odchylky větší než  $eQ_{mez}$ , ke kterým dochází při blízkých zkratech. V těchto případech by sekundární regulátor působil proti činnosti primárního regulátoru. Dával by povel na odbuzení (vlivem zvýšení jalového výkonu), zatímco primární regulátor naopak přibuzuje (svorkové napětí klesá).

Na následujícím řádku je seznam názvů parametrů modelu sekundárního regulátoru, jak je uveden v úseku přídatných automatik regulátoru buzení katalogu typových parametrů bloku:

$k_Q(-)$	$T_{IQ}(s)$	$Q_{min}(-)$	$Q_{max}(-)$	$eQ_{nec}(-)$	$eQ_{om}(-)$	$eQ_{mez}(-)$
----------	-------------	--------------	--------------	---------------	--------------	---------------

### 6.1.4 Systémový stabilizátor

Systémový stabilizátor mají moderní regulátory typu RBA, spolupracující s rychlými tyristorovými budícími soupravami. Slouží k tlumení kývání elektrických veličin. Jedná se jednak o elektromechanické kyvy, ke kterým dochází při nerovnováze činných a jalových výkonů, a jednak o tzv. systémové kyvy, ke kterým může docházet v rozsáhlých propojených soustavách. Schéma je na Obr. 26.



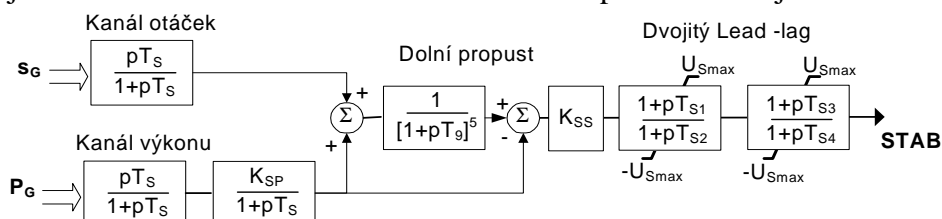
**Obr. 26 Schéma modelu systémového stabilizátoru**

Jednotlivé signály jsou zpracovány ve členu zvaném "washout", který slouží k odfiltrování stejnosměrné složky. Na výstupu pak je složka úměrná zmíněným elektromechanickým kyvům, která se po zpracování ve členu zvaném "lead - lag" (při volbě  $T_{S1}$  a  $T_{S2}=0$  se dá vyřadit) zavádí jako přídatný signál do primárního regulátoru.

Na následujícím řádku je seznam názvů typových parametrů modelu stabilizátoru, tak jak je uveden v úseku přídatných automatik regulátoru buzení katalogu typových parametrů bloku:

$K_{SS}(-)$	$K_{SP}(-)$	$T_S(s)$	$T_{S1}(s)$	$T_{S2}(s)$	$U_{Smax}(-)$
-------------	-------------	----------	-------------	-------------	---------------

Pro modelování systémových stabilizátorů PSS2A (implementovaný v budících soupravách Unitrol 5000) je od verze 2.2.11 zaveden alternativní model podle následujícího obrázku



**Obr. 27 Schéma alternativního modelu systémového stabilizátoru**

Model má oproti výchozímu modelu PSS2A zjednodušenou strukturu (vynechání dvojitých členů „washout“ na vstupech), ale zachovává hlavní vlastnosti PSS2A, kterými jsou:

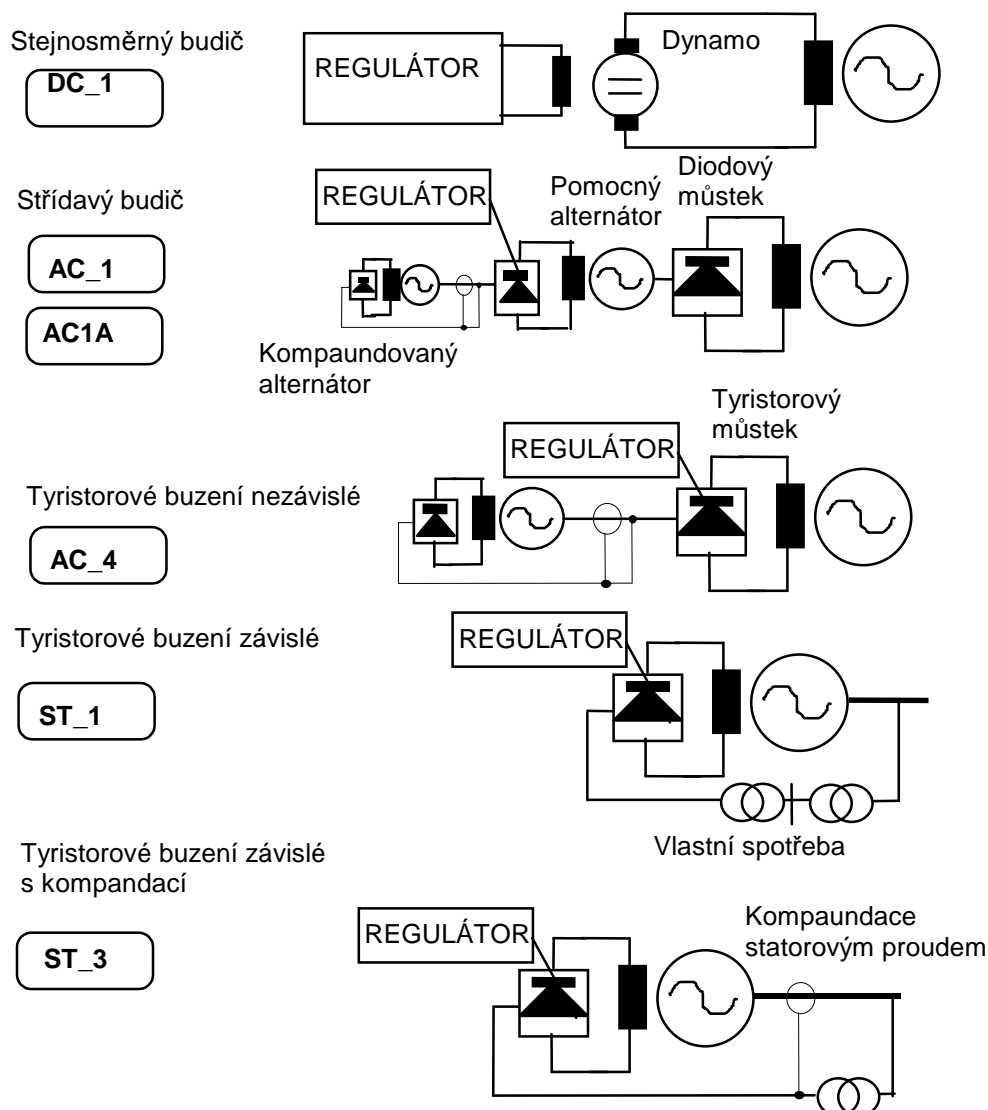
1. tlumení zesílení kanálu výkonu pro frekvence vyšší jak  $f_Z = 1/(2\pi T_S)$  způsobené členem zpoždění 1. řádu
2. odfiltrování frekvencí vyšších jak  $f_{Z9} = 1/(2\pi T_9)$  dolní propustí, čímž se pro vyšší frekvence (odpovídající elektromechanickým kyvům 1-2 Hz) eliminuje vliv kanálu otáček
3. naopak pro nižší frekvence jak  $f_{Z9} = 1/(2\pi T_9)$  (odpovídající systémovým kyvům 0.1 -1 Hz) se eliminuje vliv kanálu výkonu.

Příznakem použití alternativního modelu jsou dva přídatné parametry  $T_{S3}$ ,  $T_{S4}$  a  $T_9$  v úseku přídatných automatik regulátoru buzení katalogu typových parametrů bloku:

$K_{SS}$	$K_{SP}$	$T_S$	$T_{S1}$	$T_{S2}$	$U_{Smax}$	$U_{OMmax}$	$U_{OMzad}$	$T_{IOM}$	$T_{OM}$	$K_{dH}$	$K_{HIMP}$	$I_{HIMPzad}$	Alfa	$T_{IHMP}$	$U_{IHmax}$	$T_{dHMP}$	$K_Q$	$T_{IQ}$	$Q_{min}$	$Q_{max}$	$eQ_{rec}$	$eQ_{om}$	$eQ_{mez}$	$I_{Bmax}$	$I_{Gmax}$	$T_{S3}$	$T_{S4}$	$T_9$
----------	----------	-------	----------	----------	------------	-------------	-------------	-----------	----------	----------	------------	---------------	------	------------	-------------	------------	-------	----------	-----------	-----------	------------	-----------	------------	------------	------------	----------	----------	-------

## 6.2 Budiče

Výstup regulátoru buzení  $R_B$  ovládá akční člen budiče. Technickým pokrokem, tak jak se zvětšovaly výkony synchronních generátorů, byly vyvinuty pro výkony nad 50MW tři základní typy budičů - stejnosměrný budič, střídavý budič, tyristorové buzení nezávislé a závislé. Schematické uspořádání je patrné z Obr. 28.



**Obr. 28 Principiální schémata jednotlivých typů budičů**

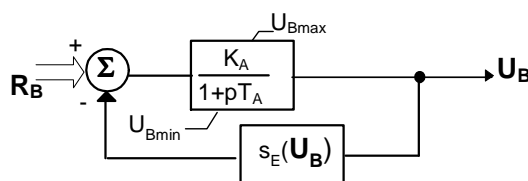
V obrázku jsou v obdélnících napsána i symbolická jména jednotlivých typů budičů, tak jak jsou zadávány v programu MODES 2.3.

Při modelování budičů byla přijata metodika IEEE (viz [4]), s tím rozdílem, že modely regulátoru a vlastního budiče byly odděleny (struktura modelu regulátoru IEEE totiž neodpovídá evropským podmínkám, neboť uvažuje pouze proporcionální regulátor).

Modely jednotlivých budičů jsou popsány v následujících kapitolách.

### 6.2.1 Stejnoseměrný budič

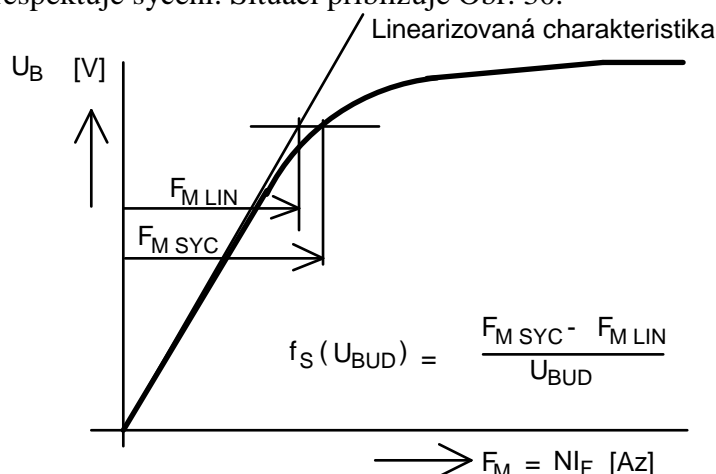
První model - stejnosměrný budič, označený jako DC\_1, se používá u generátorů do výkonu 110MW. Jedná se o model cizí buzení dynamu s jedním budícím vinutím a jeho blokové schéma je na následujícím obrázku.



**Obr. 29 Blokové schéma modelu stejnosměrného budiče**

Budící vinutí je napájeno přímo výstupním napětím (proudem) regulátoru buzení. Výpočet parametrů je popsán v dokumentu Výpočet parametrů dynamických modelů, který je součástí dodávky programu MODES.

Koeficient  $s_E$  respektuje syčení. Situaci přibližuje Obr. 30.



**Obr. 30 Charakteristika stejnosměrného budiče**

Syčení je aproximováno exponenciální funkcí:

$$s_E = f_s \cdot R_F \cdot U_{B0} / U_{REGV} = A_{SS} / U_B \cdot e^{B_S U_B / U_{Bn}} - B_S A_{SS} / U_{Bn} e \quad \text{pro } U_B > U_{Bn} / B_S \quad (37)$$

$$s_E = 0 \quad \text{pro } U_B < U_{Bn} / B_S$$

$A_{SS}$ ,  $B_S$  jsou parametry aproximace,  $R_F$  je odpor budícího vinutí,  $U_{B0}$  budící napětí,  $U_{REGV}$  vztažené napětí regulátoru a  $e$  je základ přirozených logaritmů (2.718).

V exponentu figuruje poměrné napětí budiče vztažené tentokrát na jmenovité nabuzení. Člen  $B_S A_{SS} / U_{Bn} e$ , který se odčítá od exponenciální funkce, zajišťuje, aby funkce  $s_E$  byla spojitá. Tato funkce totiž není monotónně rostoucí, ale má minimum o uvedené hodnotě pro budící napětí  $U_B = U_{Bn} / B_S$  a pro menší hodnoty roste. Proto se použije funkce syčení jen pro větší hodnoty než je  $U_{Bn} / B_S$  a pro menší je  $s_E = 0$ .

V praxi se vyskytují složitější uspořádání stejnosměrných budičů, např. s více budícími vinutími (přibuzovací, odbuzovací, derivační a seriové), které mohou mít odlišné parametry. Podle doporučení z [3] se časové konstanty sčítají. Pro zbylé výpočty postačí nahradit tyto vinutí jedním ekvivalentním se střední hodnotou parametrů.

Pro převod parametrů modelů MODESu a modelů IEEE platí následující převodní vztahy:

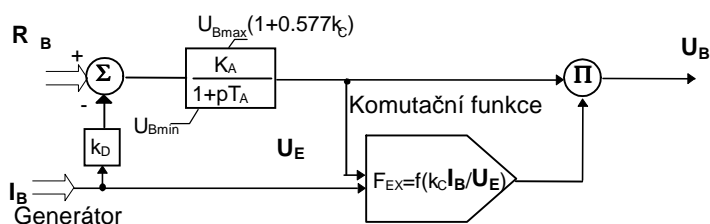
$$k_A = 1/k_E \text{ a } T_A = T_E / k_E. \quad (38)$$

Na následujícím řádku je seznam typových parametrů modelů budičů, tak jak je uveden v katalogu typových parametrů modelů bloku:

$T_A(s)$	$U_{Bmin}(-)$	$U_{Bmax}(-)$	$K_A(-)$	$K_C(-)$	$K_D(-)$	$A_{SS}(-)$	$B_S(-)$
----------	---------------	---------------	----------	----------	----------	-------------	----------

### 6.2.2 Střídavý budič

Druhý model - střídavý budič, označený jako AC\_1, se používá u strojů 200 - 220MW. Budič tvoří pomocný synchronní generátor, napájející neřízený (diodový) usměrňovač. Regulátor buzení pak ovládá tyristorový můstek, který napájí budící vinutí pomocného generátoru. Přenos tohoto můstku se modeluje bez zpoždění a zesílení je zahrnuto v zesílení regulátoru buzení. Blokové schéma je na následujícím obrázku.



**Obr. 31 Blokové schéma modelu střídavého budiče**

Přenos pomocného generátoru lze za určitých předpokladů modelovat zpožděním 1. řádu (zahrnuje vliv přechodných dějů v budícím vinutí) s proudovou zpětnou vazbou  $k_D$  (zahrnuje vliv reakce kotvy případně i vliv sériového přibuzování - kompaundace statorovým proudem).

Hodnota  $U_{B\max}$  je stropní (maximální) hodnota budícího napětí měřená na můstku zatíženém odporem o stejné velikosti jako má budící vinutí hlavního generátoru při provozní teplotě. Zahrnuje tedy v sobě i úbytek napětí vlivem zatížení můstku budícím proudem. Jelikož je v modelu omezeno již napětí pomocného generátoru  $U_E$ , je toto kompenzováno vynásobením činitelem  $(1 + 0.577k_C)$ , aby se komutační úbytek neprojevil dvakrát.

Jednotlivé parametry modelu lze přibližně vyčíslit ze vztahů (odvozených v [5] ). Výpočet parametrů je popsán v dokumentu Výpočet parametrů dynamických modelů, který je součástí dodávky programu MODES.

Funkce  $F_{EX}$  respektuje úbytky napětí na diodovém můstku. Podle počtu komutujících diod se rozdělí do tří oblastí [4]

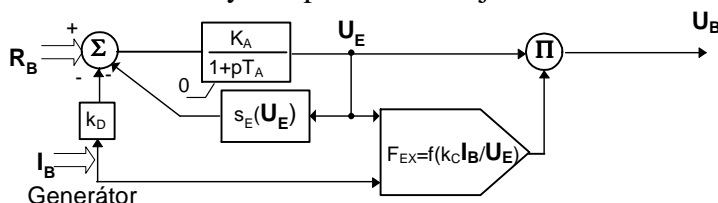
$$F_{EX} = \begin{cases} 1-0.577x & x < 0.433 \\ \sqrt{(0.75-x^2)} & 0.433 < x < 0.75 \\ 1-0.577x & x < 0.433 \\ 1.732(1-x) & 0.75 < x < 1.0 \end{cases} \quad ; \text{pro } x = k_C * \mathbf{I}_B / \mathbf{U}_E \quad (39)$$

Vstupní hodnota  $\mathbf{R}_B$  musí být vztažena na budící napětí pomocného generátoru naprázdno a výstupní hodnota  $\mathbf{U}_B$  je vztažena na budící napětí naprázdno hlavního generátoru.

Pro převod parametrů modelů MODESu a modelů IEEE platí následující vztahy:

$$k_A = 1/k_E \text{ a } T_A = T_E / k_E \quad (40)$$

Pro zlepšení kompatibility s modely IEEE byla knihovna modelů MODES doplněna modelem střídavého budiče s uvažováním syčení podle následujícího obrázku:

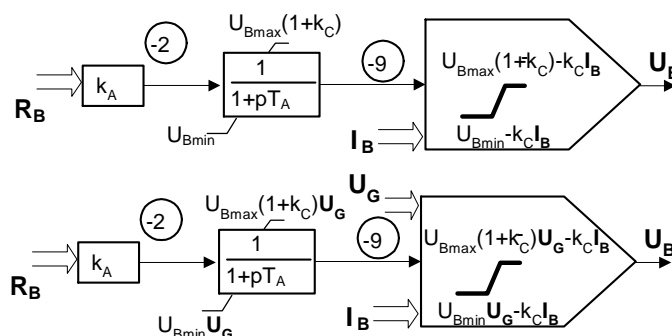


**Obr. 32 Blokové schéma modelu střídavého budiče s uvažováním sycení**

Omezení napětí budiče, které bylo v modelu AC\_1 realizováno parametrem  $U_{Bmax}$  je v modelu AC1A zajištěno funkcí sycení  $s_E$  ve zpětné vazbě. Tato funkce má obdobný tvar jako u modelu DC\_1 (37) s tím rozdílem, že na vstupu je napětí pomocného generátoru  $U_E$  místo napětí budiče  $U_B$ .

### 6.2.3 Tyristorové buzení

Dalším vývojovým stupněm je tyristorové buzení. Můžeme rozlišit dvě varianty nezávislé (model AC\_4) a závislé (model ST\_1). V první variantě slouží jako zdroj kompaudovaný pomocný synchronní generátor, který napájí řízený (tyristorový) usměrňovač. V druhém případě je můstek napájen z vlastní spotřeby bloku a je tedy závislý na napětí generátoru. Tyristorové buzení se používá pro stroje vyšších výkonů se zvýšenými požadavky na kvalitu a spolehlivost. Blokové schémata tyristorového buzení jsou na následujícím obrázku:



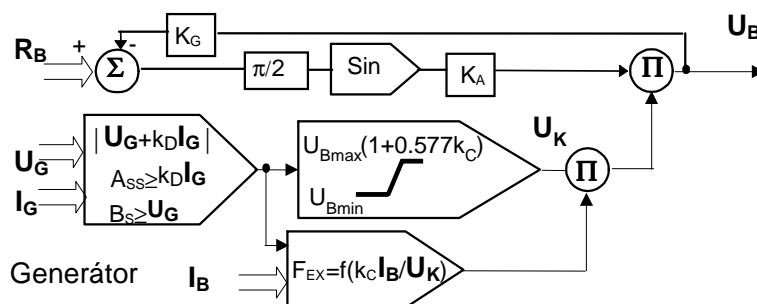
**Obr. 33 Modely tyristorového budiče nezávislého AC\_4 a závislého ST\_1 (nahore /dole)**

Tyristorový můstek má kompenzovanou kosinusovou závislost napětí na řídicím úhlu. Úbytky napětí generátorů i usměrňovače jsou kompenzovány regulátorem, který nyní ovládá řídicí obvody můstku. Proto se projeví pouze při buzení na stropní hodnoty. Pro model ST\_1 se projeví závislost na svorkovém napětí  $U_G$  u modelu AC\_4 tato závislost chybí. Pokud regulátor nemá kompenzaci kosinusové závislosti, je možné použít následující model kompaudovaného buzení.

Obdobně jako u modelu AC\_1 je horní omezení v členu zpoždění 1. řádu dané součinem  $U_{Bmax}(1+k_C)$ , protože hodnota  $U_{Bmax}$  se získává měřením na zatíženém můstku.

### 6.2.4 Kompaudované buzení

Tyristorové buzení závislé kompaudované (ST\_3) tvoří řízený (tyristorový) usměrňovač napájený z hlavního synchronního generátoru s využitím kompaundace statorovým proudem. Blokové schéma modelu je na následujícím obrázku:



**Obr. 34 Blokové schéma modelu závislého kompaudovaného buzení**

Usměrňovač je modelován sinusovou přenosovou funkcí. Úbytek napětí při komutaci se modeluje komutační funkcí podle (39). Napájecí napětí  $U_K$  se získá vektorovým součtem fázorů napětí a proudu generátoru násobeného parametrem  $k_D$ . Sycení transformátorů se respektuje parametry  $B_S$  a  $A_{SS}$ . Volbou nenulového parametru  $k_G$  se zavádí zpětná vazba mezi napětím budiče a řídicím napětím regulátoru. Dá se dokázat, že při splnění podmínky:

$$k_A * k_G * U_K \gg 1 \quad (41)$$

je přenos mezi napětím regulátoru a napětím budiče lineární ve tvaru  $U_B = R_B / k_G$ . Takové uspořádání tedy kompenzuje nelinearitu přenosu řízeného usměrňovače, úbytky napětí i změny napájecího napětí. Pro model budiče lze pak použít předchozí model buzení označený ST\_1.

Obdobně jako u modelu ST\_1 je horní omezení napájecího napětí  $U_K$  dané součinem  $U_{Bmax}(1+k_C)$ , protože hodnota  $U_{Bmax}$  se získává měřením na zatíženém můstku.

Na následujícím řádku je pořadí typových parametrů modelů budičů v katalogu typových parametrů modelů bloku:

$K_G(-)$	$U_{Bmin}(-)$	$U_{Bmax}(-)$	$K_A(-)$	$K_C(-)$	$K_D(-)$	$A_{SS}(-)$	$B_S(-)$
----------	---------------	---------------	----------	----------	----------	-------------	----------

### 6.3 Standardní model buzení

V některých případech není nutné uvažovat všechny funkce regulátoru buzení ani používat podrobné výše uvedené modely budičů. Pro tyto případy jsou v programu MODES implementovány zjednodušené modely zobrazené na Obr. 35.

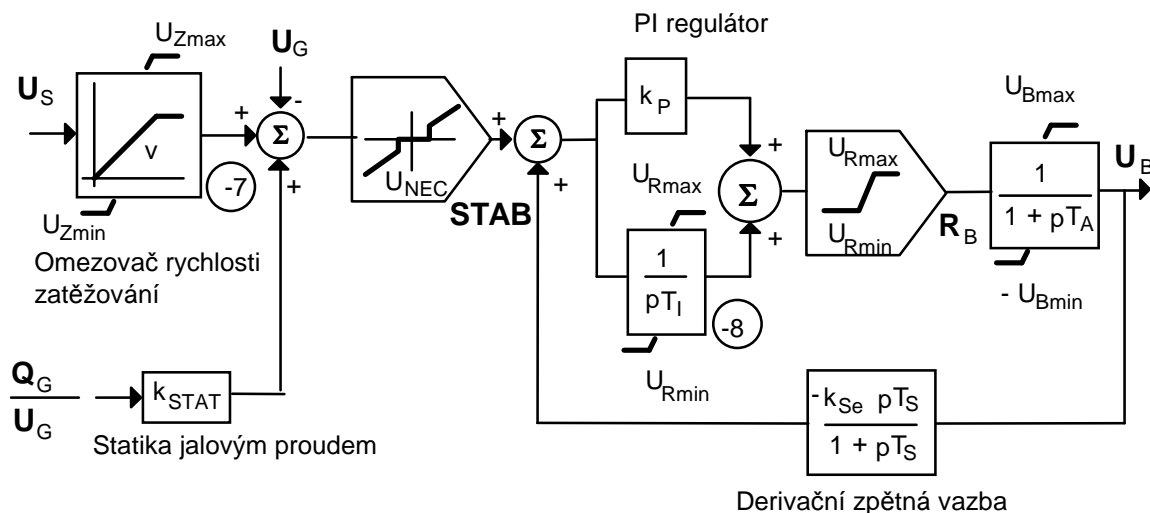
Konstantní model buzení

**CONS**

$$U_B = \text{konst.}$$

Standardní model buzení

**STAN**



**Obr. 35 Zjednodušené modely buzení**

Model '**CONS**' uvažuje konstantní budící napětí, tedy stejnosměrný budič bez regulátoru. Model '**STAN**' představuje tzv. standardní model budiče společně s primárním regulátorem napětí. Je vhodný pro bloky vzdálené od místa poruchy nebo pro bloky, o kterých nám chybí znalost parametrů pro podrobnější modelování. Oba zjednodušené modely samozřejmě šetří výpočetní čas.

### 6.4 Zjištění parametrů modelů

Prvním způsobem zjištění parametrů jsou výše uvedené analytické vztahy, pro něž musíme znát primární (štítkové) parametry.

V praxi častější bude druhý způsob pomocí naměřených průběhů. Z nich se pak parametry odvodí buď přímo nebo pomocí statistických metod (identifikací). Při používání takto získaných parametrů je nutná opatrnost, neboť např. hodnoty zesílení  $k$  jsou v uvedených modelech zásadně bezrozměrné. Z naměřených pojmenovaných hodnot  $K$  se získají pomocí vztahů  $k = K \cdot X_V / Y_V$ , kde  $X_V$  a  $Y_V$  jsou vztažné hodnoty vstupní a výstupní veličiny. Podobně všechny parametry nelinearity jsou v poměrných hodnotách.

Výpočet parametrů je popsán v dokumentu Výpočet parametrů dynamických modelů, který je součástí dodávky programu MODES.

## 7. Parní turbína

Model pohonu synchronního stroje se skládá ze tří relativně samostatných prvků - pohonného mechanismu (turbíny nebo motoru), zdroje pohonného média a regulátoru. V této kapitole se zaměříme na parní turbínu, samostatné kapitoly budou věnovány vodní a plynové turbíně a vznětovému motoru

Výklad bude velmi stručný, podrobnější popis najde zájemce např. v [11] .

### 7.1 Regulátor parní turbíny

Původní funkcí regulátoru turbíny bylo udržovat zadané otáčky turbíny. Tuto funkci plnil mechanický, později hydraulický regulátor otáček. Jednalo se o původní primární regulaci. S postupným propojováním elektrizačních soustav však tato původní funkce byla potlačena, neboť při synchronní spolupráci generátoru do rozsáhlé ES jsou otáčky turbíny dány frekvencí sítě resp. frekvencí napětí v **uzlu**. Regulátor turbíny začal plnit funkci udržování činného výkonu generátoru na zadané hodnotě a další funkce, které budou popsány dále a byl modernizován na elektronickou úroveň.

Technickým vývojem vznikly dvě zásadní uspořádání elektronického regulátoru turbíny a hydraulického regulátoru otáček - sériové a paralelní. Starší mechanickohydraulické a hydrodynamické systémy mají tzv. sériové uspořádání, kdy hydraulický regulátor otáček je funkční a jeho zadaná hodnota je řízena elektronickým regulátorem turbíny. Moderní elektrohydraulické systémy mají tzv. paralelní uspořádání. V tomto případě hydraulický regulátor otáček tvoří pouze zálohu elektronickému regulátoru turbíny. Režim regulace otáček je pak implementován na elektronické úrovni. Je možný i trvalý paralelní provoz regulátoru výkonu a elektronického regulátoru otáček, který ovšem musí mít proporcionální (případně proporcionálně derivační) charakter. Jelikož regulátor výkonu má obvykle proporcionálně integrační charakter, je v ustáleném stavu činnost proporcionálního regulátoru otáček eliminována. Původní primární regulace byla u paralelního i sériového uspořádání zcela nebo zčásti potlačena. Proto musí být elektronický regulátor výkonu doplněn o zařízení, které původní primární regulaci nahrazuje. Tímto zařízením je tzv. korektor frekvence (kmitočtový korektor výkonu), který určuje statiku primární regulace tj. sklon statické charakteristiky  $N_T = f(k)$ .

Moderní elektronické regulátory turbíny mohou plnit tyto základní funkce:

- regulaci otáček - používá se při najíždění a po zapůsobení regulátoru přeběhu a elektrického urychlovače (viz dále), nebo jako zvláštní režim;
- regulaci výkonu - v tomto režimu je výkon turbíny regulován pomocí ventilů turbíny a zdroj páry (kotel pro klasický blok a reaktor pro jaderný blok) udržuje zadaný tlak pár, používá se také název klasická regulace;
- předtlakovou regulaci - výkon turbíny je určen vývinem tepla (dodávkou paliva u klasického bloku a externí reaktivitou u jaderného bloku) a tlak páry je udržován ventily.

Doplňkové funkce jsou:

- regulátor přeběhu - zapůsobí v případě, jestliže je derivace otáček (zrychlení) je větší než zadaný trend a otáčky jsou větší než zadané, v tomto případě se pak mění struktura regulátoru
- elektrický urychlovač - zapůsobí při odpojení bloku od sítě a povel od strojních ochranných odstavujících turbínu na volnoběh nebo na vlastní spotřebu, v tomto případě dochází vlivem dočasné ztráty tlaku oleje k zavírání regulačních a záchytných ventilů maximální rychlostí.

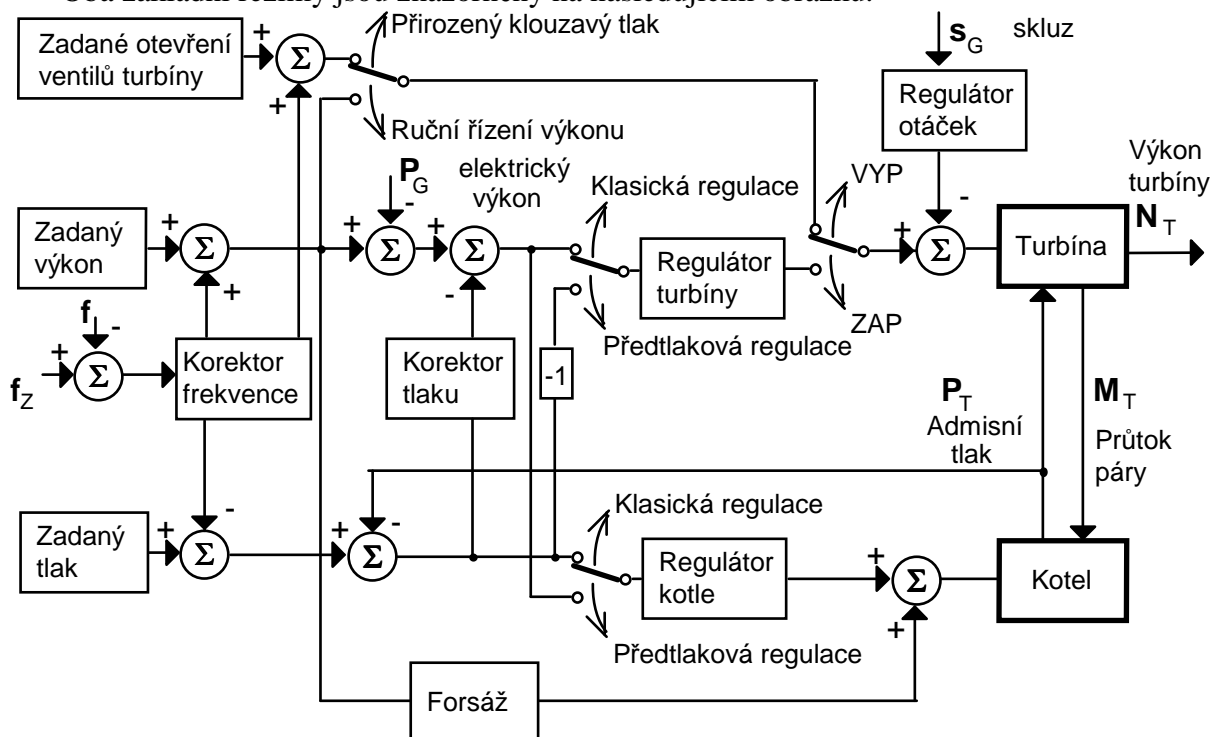
Tyto dvě funkce mají ochrannou roli, neboť brání nebezpečnému zvýšení otáček. Po zapůsobení obou zůstává turbína v režimu regulace otáček.

Kromě těchto obsahují moderní regulátory turbíny i další funkce, např. teplotně omezovací regulátory, jelikož tyto přídatné funkce nejsou v modelech programu MODES implementovány, nebudou náplní tohoto popisu.



Jestliže se ve výkladu omezíme na klasické **bloky** (jaderným bude věnován samostatný odstavec), je tedy možno říci, že v běžném provozu tvoří základní režim klasická nebo předtlaková regulace a režim regulace otáček je speciální.

Oba základní režimy jsou znázorněny na následujícím obrázku.



**Obr. 36 Principiální schéma regulace pohonu klasického bloku**

Schéma naznačuje do jisté míry variabilní strukturu regulátoru pohonu. Podle druhu regulační odchylky (buď výkonová nebo tlaková), která se dostane na vstup regulátoru turbíny se jedná buď o klasickou nebo předtlakovou regulaci.

Ze schématu plyne, že turbína může pracovat ve čtyřech základních režimech. V klasické nebo předtlakové regulaci při zapnutém regulátoru (poloha vypínače ZAP) a v režimu přirozeného klouzavého tlaku nebo v ručním řízení výkonu při vypnutém regulátoru (poloha vypínače VYP).

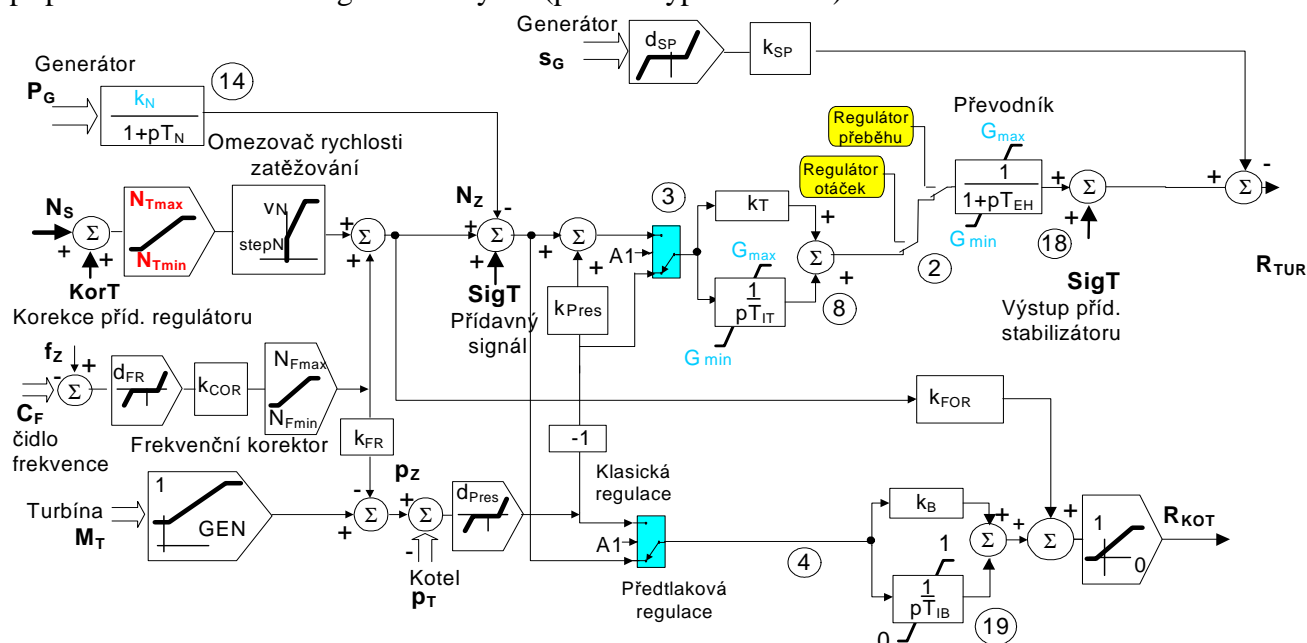
Jsou zde naznačeny i vzájemné vazby mezi regulátory turbíny a kotle. Jedná se o korekci tlaku a forsáž. V prvním případě se stírá rozdíl mezi klasickou a předtlakovou regulací, neboť na vstup regulátoru turbíny se dostávají odchylky výkonu i tlaku, takže se hovoří o koordinované regulaci. V případě forsáže se kotelní regulace dovídá o změně zadaného výkonu (uskutečněnou např. sekundární regulací  $P/f$ ) v předstihu, dříve než se projeví zprostředkovaně přes změnu tlaku, která je pochopitelně zpožděna. Korektor tlaku a forsáž tak slouží ke zlepšení dynamiky a stability regulace a zmenšení kolísání tlaku při výkonových změnách.

Zvláštní případy nastávají při vypnutém regulátoru turbíny. V případě, že kotel je v režimu regulace tlaku, jedná se o ruční řízení (řízení v rozpojené smyčce), kdy otevření ventilů odpovídá zadané hodnotě výkonu a kotel udržuje jmenovitý tlak. Primární regulace je možná jak hydraulickým regulátorem otáček. V případě, že kotel je v režimu regulace výkonu, jedná se o přirozený klouzavý tlak, kdy při stálém otevření regulačních ventilů je tlak určován vývinem páry v kotli. V tomto režimu mohou být regulační ventily využity pro primární regulaci pomocí korektoru frekvence.

Na základě analýzy struktury a rozboru funkcí našich reálných regulátorů HYGO, TRV a EHS byl vytvořen zobecněný model regulátoru pohonu, platný pro základní režimy klasického bloku. Kromě toho byl vytvořen model regulátoru turbíny pro zvláštní režimy, který respektuje doplňkové funkce popsané v předchozím odstavci.

### 7.1.1 Zavřená regulační smyčka

Na následujícím obrázku je blokové schéma zobecněného modelu regulátoru pohonu pro případ řízení v zavřené regulační smyčce (poloha vypínače ZAP):



#### Vazební proměnné:

$M_T, P_T, N_T, \dots$  průtok páry, admisní tlak a mechanický výkon turbíny

$R_T, R_K, \dots$  výstup regulace turbíny a kotle  $P_Z, N_Z, \dots$  zadané hodnoty tlaku a výkonu turbíny

#### Obr. 37 Blokové schéma modelu regulátoru pohonu v zavřené regulační smyčce

Model je vhodný i pro výpočty dlouhodobé dynamiky, kdy dochází ke změnám tlaku a musíme brát v úvahu vliv kotle a jeho regulace. Uvedený model kotelní regulace je omezen na hlavní regulační smyčku (výkon/tlak  $\rightarrow$  palivo). Další regulace (teploty páry, průtoku napájecí vody) nejsou uvažovány<sup>1</sup>. Toto omezuje použití pro účely uvedené již v úvodu tohoto Popisu.

Model je univerzální pro oba základní režimy a o volbě režimu rozhoduje parametr  $A1$  rovný  $A1=1$  pro klasickou regulaci a  $A1=0$  pro předtlakovou regulaci.

Model respektuje i paralelní a sériové uspořádání regulátoru turbíny. Pro paralelní uspořádání bez funkčního elektronického regulátoru otáček se regulátor otáček vyřadí volbou parametru  $k_{SP}=0$ . V případě paralelní spolupráce elektronického regulátoru otáček a regulátoru výkonu je  $k_{SP}>0$  se časová konstanta elektrohydraulického převodníku  $T_{EH}$  volí malá.

Volbou parametru  $k_{Cor}=0$  (obrácená hodnota tzv. trvalé statiky primární regulace), případně volbou nulových mezí  $N_{Fmax}$  a  $N_{Fmin}$ , se dá vyřadit kmitočtový korektor výkonu.

Zadaná hodnota admisního tlaku  $p_z$  se získá dvojím způsobem:

1. při volbě typového parametru  $GEN=1$  se bude rovnat 1, což odpovídá jmenovité hodnotě
2. při volbě typového parametru  $GEN \neq 0$ , se bude zadaná hodnota vytvářet v závislosti na průtoku páry, což odpovídá řízení s proměnným (variabilním) tlakem.

V modelu lze zadat dva přídatné signály. První do součtového bodu regulátoru pohonu<sup>2</sup> a druhý paralelně k výstupu regulátoru turbíny<sup>3</sup>. Stejně uspořádání platí pro vodní a jaderné bloky.

Obdobně jako u regulace buzení lze korigovat hodnotou  $N_s$  výstupem **externího regulátoru**  $KOR_T$  (viz kap. Externí regulátory).

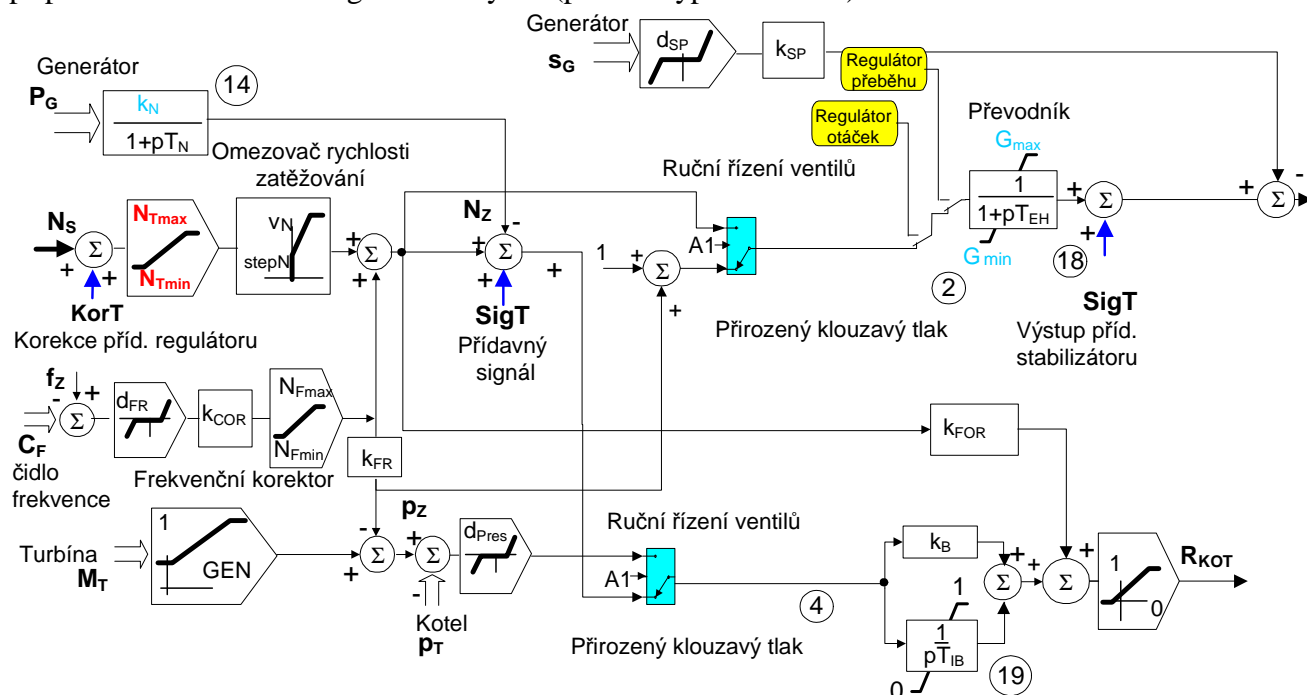
<sup>1</sup> vychází se z předpokladu, že tyto regulace jsou do jisté míry nezávislé a rychlejší než hlavní regulační smyčka.

<sup>2</sup> Tento signál se generuje zásahem podle scénáře (viz Příručka uživatele)

<sup>3</sup> Signál je generován přídatným stabilizátorem (viz kap. Externí stabilizátory)

### 7.1.2 Otevřená regulační smyčka

Na následujícím obrázku je blokové schéma zobecněného modelu regulátoru pohonu pro případ řízení v otevřené regulační smyčce (poloha vypínače VYP):



**Obr. 38 Blokové schéma modelu regulátoru pohonu v otevřené regulační smyčce**

Indexem  $z$  se značí zadávané hodnoty regulátorů. Zadaná hodnota výkonu  $Nz$  se získá tak, že zadaná hodnota  $Ns$  (zadávaná buď zásahem 'TURB' nebo z **centrálního regulátoru**) se omezí na regulační rozsah. Hodnota omezená amplitudově dále prochází omezovačem rychlosti zatěžování (ORZ). ORZ propustí na výstup skokovou změnu danou parametrem  $stepN$ , zbytek skokové změny se provede rychlostí  $vN$ . Nakonec se k výstupu ORZ přičte korekce od frekvenčního korektoru.

Korekce je přímo úměrná odchylce frekvence  $f$  (měřené v **uzlu**, kde je **blok** připojen) od zadané hodnoty  $fz$ . Lze zadat necitlivost  $dFr$ . Po zesílení statikou  $kCOR$  se provede omezení na hodnoty  $NFmax$  (v kladném směru - odpovídá velikosti primární regulační rezervy) a  $Nfmin$  (v záporném směru - zmenšování zadané hodnoty).

V následující tabulce jsou shrnuty možné varianty režimu regulace turbíny.

Regulace turbíny	A1=1 regulace výkonu	A1=0 regulace tlaku
ZAP - řízení v uzavřené smyčce	klasická regulace	předtlaková regulace
VYP - řízení v otevřené smyčce	ruční řízení ventilů	přirozený klouzavý tlak

V modelu lze měnit stav vypínače ZAP/VYP během výpočtu pomocí zásahu 'STRC' a tak měnit režim regulace. Způsob regulace je určen parametrem A1.

Na následujících řádcích je seznam typových parametrů modelu regulátoru parní turbíny v úseku regulátoru turbín katalogu typových parametrů modelů bloku:

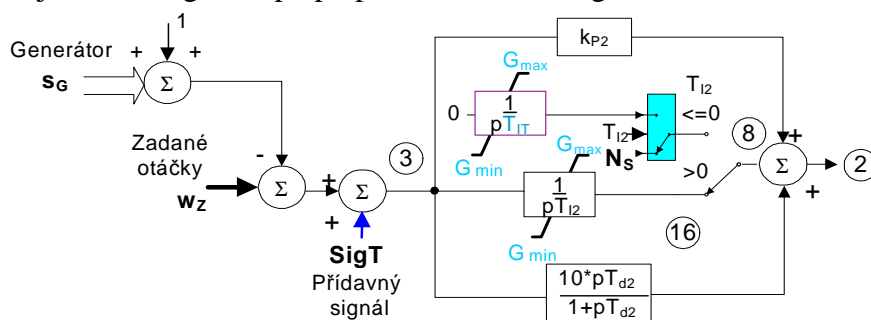
A1	A2	TIT(s)	TIB(s)	TN(s)	TEHP(s)	kT(-)	kB(-)	kSp(-)	kFr(-)	KCOR(-)	kPres(-)	kFor(-)	GEN	vN(%/min)	stepN(%)
dFr(%)	dSp(%)	dPres(%)	dP(%)	NFmax(%)	NFmin(%)										

Pozn.: Parametry  $N_{Tmin}$  a  $N_{Tmax}$  jsou atributem bloku a zadávají se v tabulce bloků.

### 7.1.3 Otáčková regulace

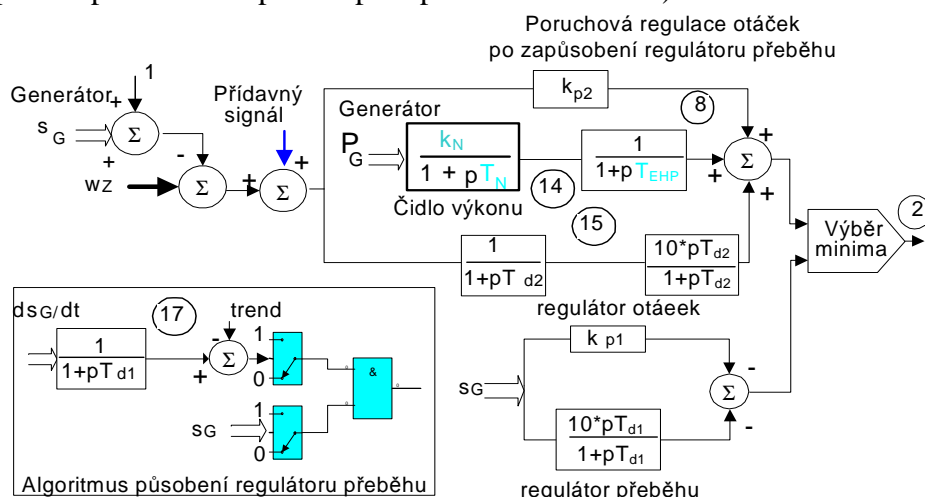
Jedná se o režimy regulace otáček a přeběhu:

Na Obr. 39 je model regulace po přepnutí do režimu regulace otáček zásahem STRC:



Obr. 39 Blokové schéma modelu pracovní regulace otáček

Volbou integrační časové konstanty  $T_{i2}$  se určuje charakter regulace. Při nulové hodnotě se jedná o proporcionální regulaci. V tomto případě je statika určena parametrem  $k_{p2}$  (resp. jeho obrácenou hodnotou) a pracovní bod při jmenovitých otáčkách (tzv. základní otevření) buď žádanou hodnotou výkonu  $N_s$  (pro  $T_{i2} < 0$ ) nebo výstupem integračního členu regulátoru turbíny (označení číslem 8) v okamžiku přepnutí (beznárazové přepnutí  $T_{i2} = 0$ ). Při nenulové hodnotě  $T_{i2}$  se jedná o proporcionálně-integrační charakter a tato regulace je použitelná pouze pro ostrovní provoz jednoho bloku (tzv. separátní provoz nebo provoz před přifázováním k síti).



Obr. 40 Blokové schéma modelu regulátoru přeběhu

Regulátoru přeběhu zapůsobí stejně jako u reálného regulátoru automaticky při zrychlení větším než zadaný *trend* (tzv. akcelerační relé) a nadsynchronních otáčkách. Regulátor pak zůstává v režimu proporcionální regulace otáček (s odpojeným integračním členem). Přepojení do základního režimu je nutné provést, stejně jako u reálného regulátoru ručně. Model je funkční pouze s modelem turbíny 'ST A', který respektuje i činnost záchytných ventilů.

Na následujícím řádku je seznam typových parametrů modelu regulátoru otáček v úseku přidavných automatik regulátoru turbín katalogu typových parametrů modelů bloku:

Kp1(-)	Kp2(-)	Td1(s)	Td2(s)	TI2(s)	Trend(-/s)	TrRRV(-/s)
--------	--------	--------	--------	--------	------------	------------

### 7.1.4 Rychlé zavírání ventilů

Režim rychlého zavírání ventilů (RZV) je v modelu aktivován:

- po vypnutí blokového vypínače zásahem 'UNIT' při zrychlování a nadsynchronních otáčkách
- přidavnou automatiku akceleračního relé při splnění podmínky, že zrychlení je větší než hodnota  $trRRV$  a otáčky jsou nadsynchronní.
- působením **automatiky** nebo v předem zadaném čase (podle scénáře) zásahem 'VALV'.

Ve všech případech se regulační (záchytné) ventily zavírají rychlostí  $v_{stopC}$  ( $v_{stopI}$ ).

Během působení RZV sleduje výstup integrátoru (označený ⑧) výstup čidla výkonu se zpožděním  $T_{EHP}$  a zároveň výstup EHP (označený č.18) sleduje výstup integrátoru se zpožděním  $T_{EHP}$ . Po ukončení RZV je tak zajištěn beznárazový přechod do regulace výkonu nebo otáček. V režimu RZV lze zásahem TURB změnit okamžitou hodnotu výstupu integrátoru.

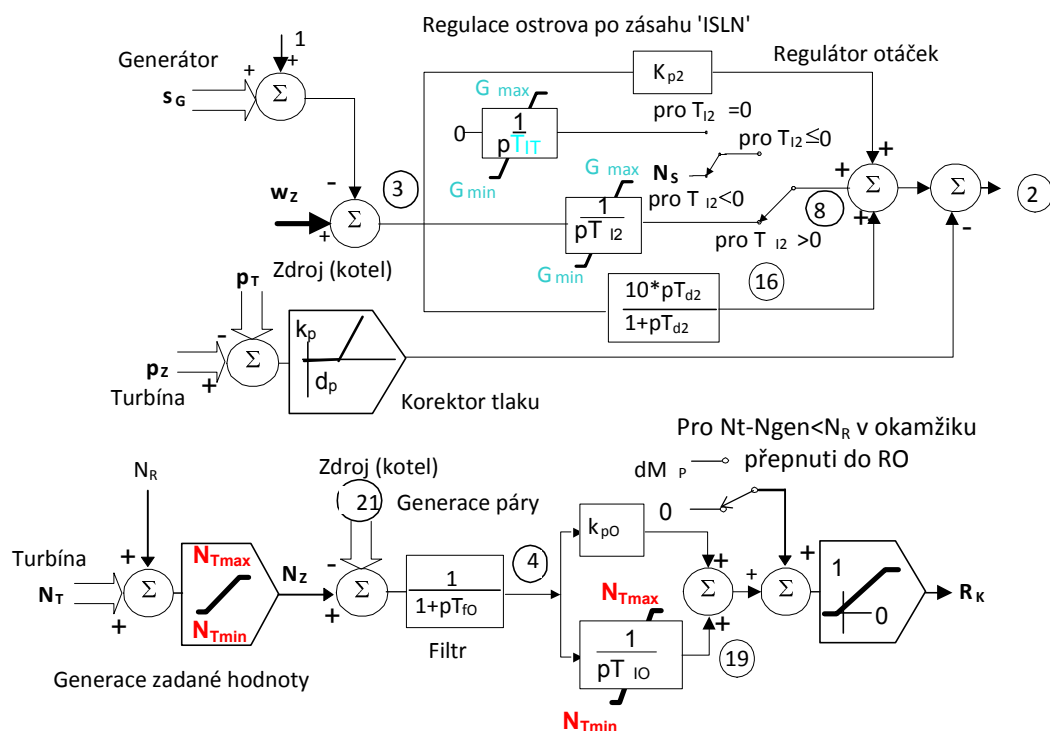
V případě odepnutí bloku se navíc automaticky přechází do režimu pracovní regulace otáček. Žádaná hodnota výkonu  $N_S$  se nastaví na 0.1 pj., zadaná hodnota otáček je jmenovitá.

### 7.1.5 Ostrovní regulace

Přechod do režimu regulace ostrova se provede zásahem ISLN, který způsobí:

1. přepnutí regulátoru turbíny do pracovní regulace otáček
2. připnutí korekce tlaku (pro kladné regulační odchylky) na výstup regulátoru otáček
3. změnu režimu regulace kotle na PI regulaci požadovaného množství páry
4. vyhodnocení výkonové bilance bloku pomocí akceleračního momentu turbíny
5. vynulování necitlivosti tlaku  $dp$  v PID regulátoru přepouštěcí stanice.

Model regulátoru ostrova je na následujícím obrázku.



**Obr. 41** Blokové schéma modelu regulátoru ostrova pro parní turbínu

Vstupy:  $s_G$  skluz generátoru,  $p_T$  admisní tlak turbíny,

$w_z$  zadaná hodnota otáček (dá se měnit zásahem TURB),  $p_z$  zadaná hodnota tlaku = 1

$N_S$  požadovaná hodnota výkonu turbíny,  $N_T$  výkon turbíny, Generace páry v kotli

Výstup:  $R_t$  výstup regulátoru turbíny (odpovídá tlaku oleje ovládající regulační ventily)

$R_k$  výstup regulátoru kotle (odpovídá požadovanému množství paliva)

Turbína přejde do režimu regulace otáček. V případě, že parametr  $T_{i2} \leq 0$ , jedná se o proporcionální regulaci se statikou  $1/k_{p2}$ . Pro  $T_{i2} < 0$  se pracovní bod statické charakteristiky turbíny se rovná hodnotě  $N_S$ , která je rovná hodnotě výkonu v předporuchovém stavu bez korekce frekvence. Pro  $T_{i2} = 0$  odpovídá pracovní bod neintegrovane hodnotě na výstupu integračního členu, který je společný i regulátoru výkonu (v Obr. 41 označen jako ⑧) v okamžiku přepnutí. Po přepnutí do regulace otáček se dá poloha pracovního bodu ovlivnit zásahem TURB, který mění zadanou hodnotu otáček  $w_z$ , jejíž výchozí hodnota je rovna 1 p.j..

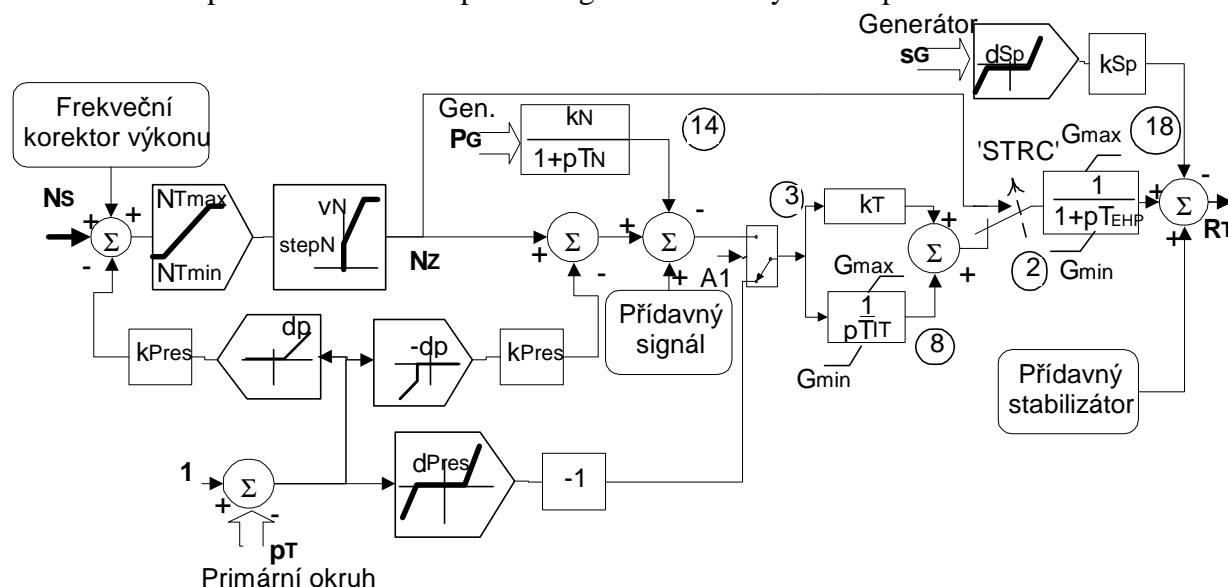
Výstup integračního členu regulátoru kotle se omezí na regulační rozsah turbíny  $N_{Tmin} - N_{Tmax}$  aby integrátor neulít. Parametry PI regulátoru jsou obecně jiné než v běžném provozu. Při zásahu ISLN se vyhodnotí akcelerační moment turbíny a v případě, že je menší než hodnota  $N_R$  provede se forsáž na hodnotu  $dM_p$ . Tím se kotel natopí a přebytečná pára bude odvedena přepouštěcími stanicemi (viz Obr. 45) zpět do přehříváku.

Na následujícím řádku je seznam dodatečných parametrů modelu regulátoru ostrova v úseku přídatných automatik regulátoru turbín katalogu typových parametrů modelů bloku:

...	kp(-)	dp(-)	dpPS(-)	kpPS(-)	TIPS(s)	kdPS(-)	TdPS(s)	NR(-)	TfO(s)	kpO(-)	TIO(s)	dMp(-)
-----	-------	-------	---------	---------	---------	---------	---------	-------	--------	--------	--------	--------

### 7.1.6 Jaderný blok

Volbou parametru  $A2=1$  se přiřadí regulátoru turbíny model podle Obr. 42.



**Obr. 42 Model regulátoru turbíny jaderného bloku**

Model odpovídá regulátoru TVER používaného pro bloky VVER jaderných elektráren. Regulátor turbíny umožňuje jak regulaci výkonu - tzv. režim 'N' ( $A1=1$ ), tak regulaci tlaku v parním kolektoru - tzv. režim 'P' ( $A1=0$ ). V běžném provozu se používá režim 'N'.

Rozdíl proti předchozím regulátorům tkví v tom, že kmitočtový korektor výkonu působí před omezovačem rychlosti zatěžování. Pro jeho správnou funkci je nutné, aby omezovač propouštěl skokovou změnu  $step_N$  úměrnou dovolenému příspěvku primární regulace  $N_{FR}$ , jinak by účinek korektoru byl zpomalen dovolenou rychlostí zatěžování  $v_N$ .

Korektor tlaku je rozdělen na dvě části (pro kladné a záporné odchylky) a působí při odchylkách větších než zadaná necitlivost  $d_p$ . Předpokládá se konstantní zadaná hodnota tlaku (rovna jmenovité hodnotě).

Korektor frekvence má stejnou strukturu jako u modelu klasického bloku.

### 7.1.7 Regulátor ostrovního provozu (ROP)

Pokud má pořadové číslo v katalogu typových parametrů záporné znaménko, je to příznak toho, že se automaticky přepíná do proporcionální regulace otáček při odchylce frekvence sítě mHz (bez potřeby zásahu ISLN). Model je upraven tak, že je možno ponechat kladnou hodnotu  $Ti2$ . Integrovaná část se uplatní jen v případě, že blok je vypnut. V zapnutém stavu je integrovaná část vyřazena a regulátor má PD charakter. Integrovaná část se uplatní po vypnutí bloku.

Během simulace je možno přepnout do astatické PI regulace zásahem ISLN s parametry 1 a 1.

Přidáním dalších tří dodatečných parametrů (tedy zvýšením počtu na 20, 21 nebo 22) na řádku typových parametrů přídavných automatik regulátoru turbín lze definovat minimální výkon turbíny  $P_{ROP}$ , který bude turbína udržovat během režimu ROP a specifické hodnoty odchylky frekvence  $df_{ROP}$  a času  $t_{ROP}$  při kterých dojde k přepnutí do ROP). Obě hodnoty se zadávají v poměrných jednotkách.

... | kp(-) | dp(-) | dpPS(-) | kpPS(-) | TIPS(s) | kdPS(-) | TdPS(s) | NR(-) | TfO(s) | kpO(-) | TiO(s) | dMp(-) | **PROP(-)** | **dfROP(-)** | **tROP(s)**

Pokud se parametry  $df_{ROP}$  a času  $t_{ROP}$  nedefinují explicitně, použije se standardní hodnoty pro přepnutí do ROP ( $\pm 200$  mHz s nulovým zpožděním).



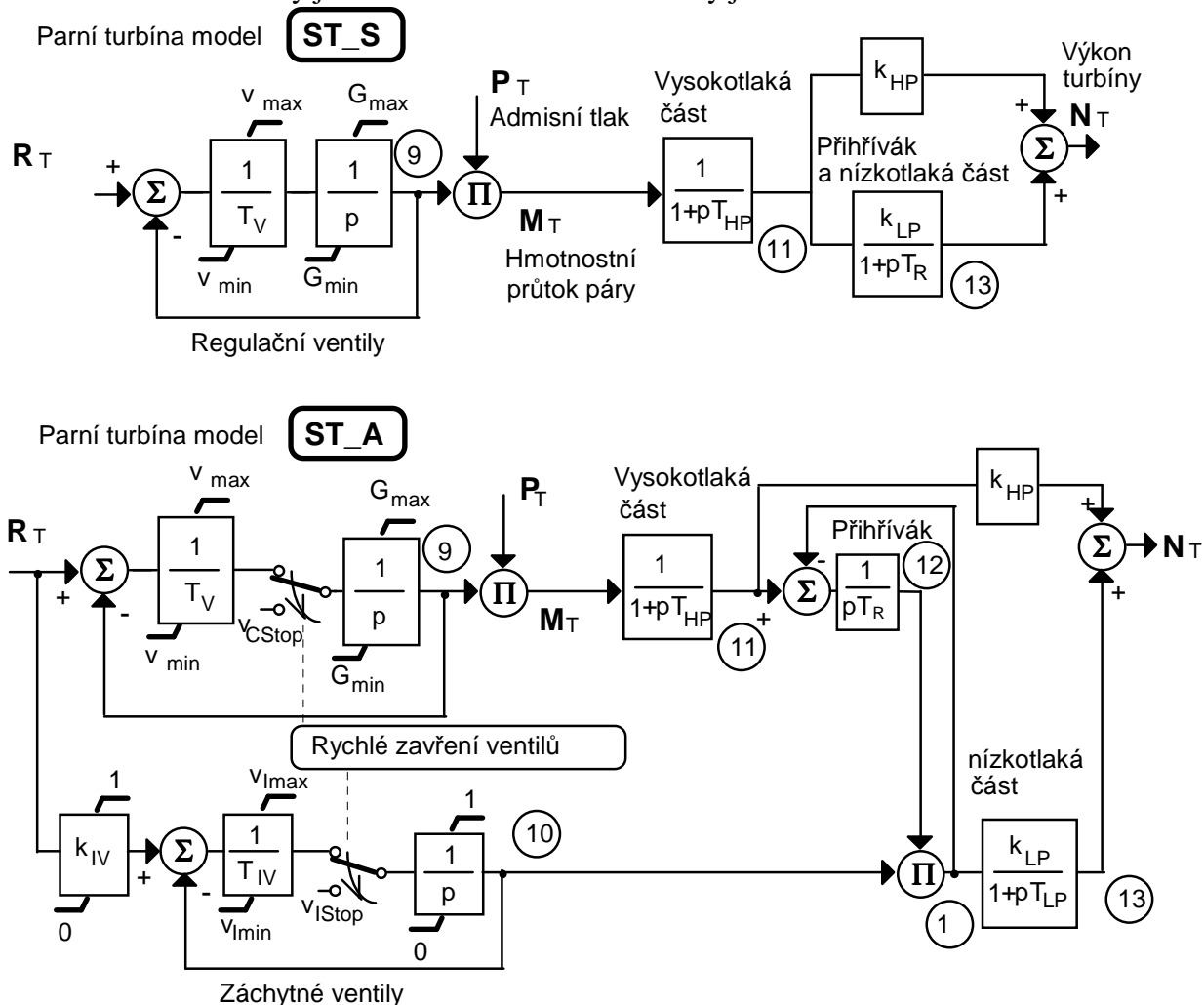
## 7.2 Model parní turbíny

Výstup regulátoru turbíny  $R_T$  ovládá prostřednictvím regulačních orgánů průtok pracovního média vlastním akčním členem turbínou.

Při vytváření modelu parní turbíny byla dodržována metodika IEEE [6] s tím rozdílem, že modely turbíny a její regulace jsou rozděleny. Byly implementovány dva modely.

'ST\_S' představuje zjednodušený model třítelesové turbíny s mezipřihříváním páry. Zpoždění v nízkotlaké části je zanedbáno, resp. zahrnuto ve zpoždění přehříváku. Záchytné ventily nejsou modelovány, takže model nelze použít pro prudké a velké změny výkonu, typické pro působení regulátoru přeběhu a rychlého zavírání ventilů.

Pro tyto děje je nutné použít podrobného modelu 'ST\_A', který modeluje činnost záchytných ventilů i nízkotlaké části turbíny. V obou modelech jsou zanedbány nelinearity ventilů, které jsou zjednodušeně modelovány jako ekvivalentní ventil. Modely jsou na Obr. 43. :



**Obr. 43. Schéma zjednodušeného a podrobného modelu parní turbíny**

Ve schématu je naznačeno i zavírání ventilů maximální rychlostí  $v_{\text{STOP}}$ . Tato rychlost může být obecně jiná než rychlost regulačních ventilů  $v_{\min}$ .

Modely umožňují respektovat proměnný tlak, takže jsou vhodné pro výpočty dlouhodobé dynamiky.

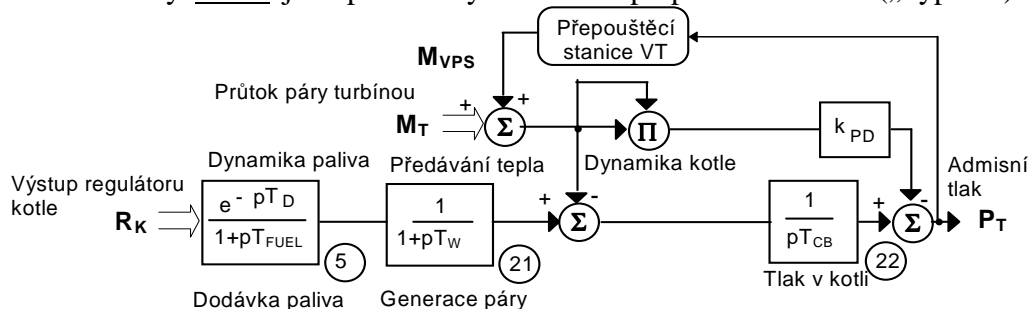
Na následujících řádcích je seznam typových parametrů modelů parní turbíny v úseku turbín katalogu typových parametrů modelů bloku:

kN	TV(s)	TIV(s)	THP(s)	TR(s)	TLP(s)	vmin(-/s)	vmax(-/s)	vlmin(-/s)	vlmax(-/s)	vcstop(-/s)	vlstop(-/s)	Gmin	Gmax	KLP	KHP	kIV-
----	-------	--------	--------	-------	--------	-----------	-----------	------------	------------	-------------	-------------	------	------	-----	-----	------

### 7.3 Model kotle

Při modelování kotle se vyšlo z metodiky IEEE popsané v [6] a [8]. Model platí pro bubnové i průtláčné kotle (liší se pak parametry) v okolí pracovního bodu.

Model označený 'BOIL' je doplněn o vysokotlakou přepouštěcí stanici („bypass“):

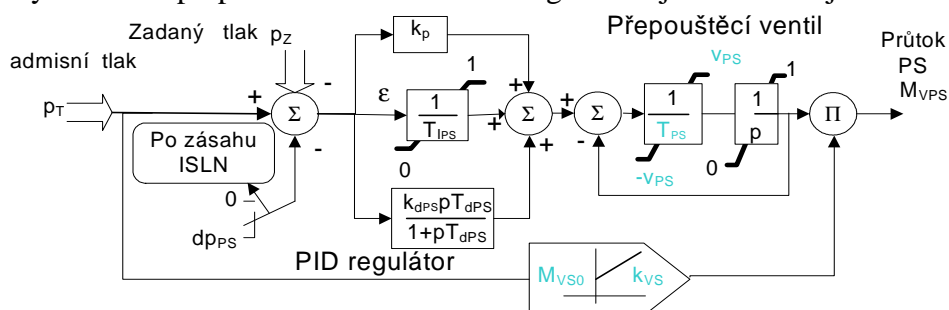


**Obr. 44 Blokové schéma modelu parního kotle**

Pořadí typových parametrů modelu kotle v úseku zdrojů je následující:

TD(s)	TFUEL(s)	TW(s)	TCB(s)	kPD(-)	-	-	-	-	-	-	-
-------	----------	-------	--------	--------	---	---	---	---	---	---	---

Model vysokotlaké přepouštěcí stanice včetně regulátoru je na následujícím obrázku:



**Obr. 45 Blokové schéma modelu přepouštěcí stanice**

Po zásahu ISLN (přepnutí do režimu regulace ostrova) reguluje přepouštěcí stanice na zadaný tlak  $p_z$ , generovaný v modelu regulátoru pohonu (viz Obr. 38).

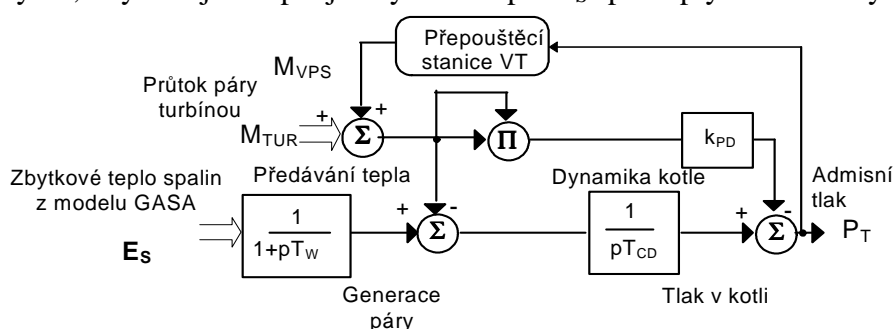
Parametry PID regulátoru se zadávají v úseku přídatných automatik regulátoru turbín:

...	.....	...	dpPS(-)	kPSP(-)	TIPS(s)	kdPS(-)	TdPS(s)	....	....	.....
-----	-------	-----	---------	---------	---------	---------	---------	------	------	-------

Parametry přepouštěcí stanice se zadávají v úseku turbín:

....	TPS(s)	vPS(-/s)	MvS0(-)	kvS(-)
------	--------	----------	---------	--------

Na následujícím obrázku je model kotle HRSG, který se používá pro modelování paroplynového cyklu, kdy zdrojem tepla je zbytkové teplo  $E_s$  spalin plynové turbíny.



**Obr. 46 Blokové schéma modelu kotle na zbytkové teplo spalin plynové turbíny**

Blok s tímto modelem kotle musí v tabulce bloků následovat blok s plynovou turbínou (model GASA). Pokud jsou oba bloky (s plynovou a parní turbínou) vyvedeny do společné přípojnice je zbytkové teplo  $E_s$  spočteno v modelu plynové turbíny (viz kap. 10.1).

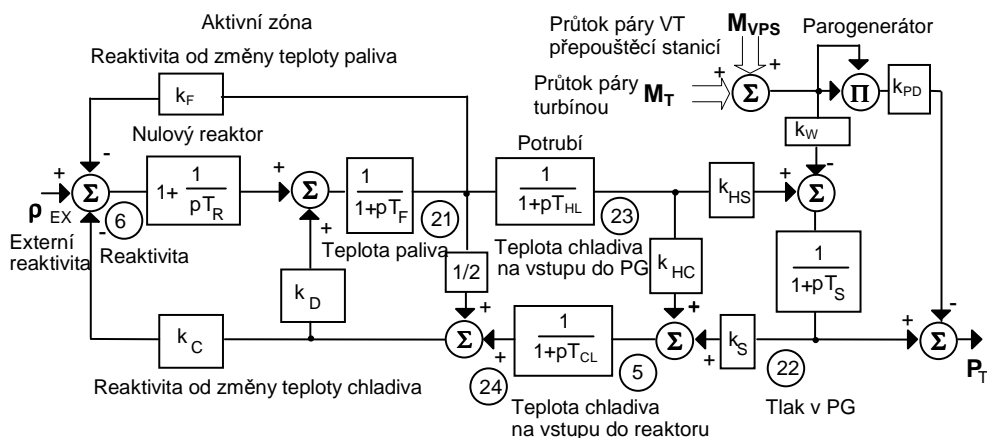
Pokud jsou bloky plynových turbín a jedné parní vyvedeny do různých přípojníc spočítá se  $E_s$  podle vztahu  $E_s = k_s T_e w [1 - A_e (T_e - T_{emax})^2]$ , kde  $T_e$  se dopočítá ze střední hodnoty teplot spalin a  $w$  ze sumárního průtoku všech plynových turbín. Parametry  $k_s$ ,  $A_e$  a  $T_{emax}$  jsou součástí typových parametrů modelu kotle:

AE(-)	TEMAX(-)	TW(s)	TCB(s)	kPD(-)	-	-	-	-	-	-	kS(-)
-------	----------	-------	--------	--------	---	---	---	---	---	---	-------



## 7.4 Model jaderného reaktoru

V dalším výkladu se omezíme na tlakovodní reaktory. Pro aktivní zónu reaktoru bylo použito zjednodušeného modelu dle [9] za předpokladu, že nezasahuje regulace řídících tyčí reaktoru. Pro parogenerátor bylo použito schéma z [10]. Vytvořený model 'NUCL' je na následujícím obrázku.



**Obr. 47** Blokové schéma modelu primárního okruhu a parogenerátoru

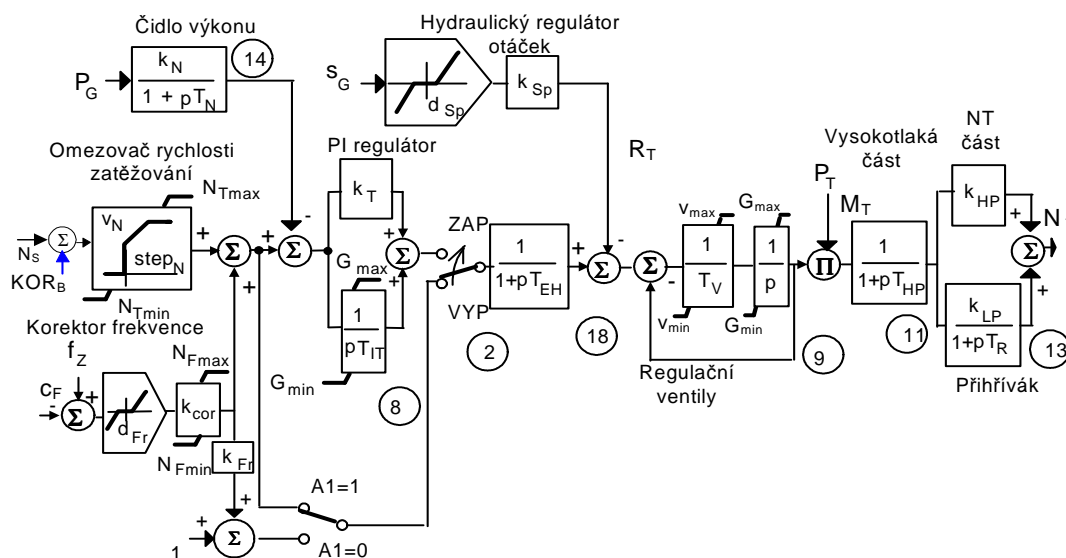
Model je použitelný pro malé změny výkonu (primární regulace), kdy tlakové změny v parním kolektoru jsou v pásmu necitlivosti regulace reaktoru (tomu odpovídá pro reaktory VVER 400 regulace výkonu - tzv. režim 'N' u turbíny a tzv. strážný režim 'S' u reaktoru). Model tedy respektuje tzv. samoregulační efekt, kdy se reaktor vyrovnává s odchylkami tlaku díky svým fyzikálním vlastnostem sám (bez zásahu regulace). Při větším odběru páry turbínou, klesá teplota chladiva, čímž se zvýší reaktivita a tím i výkon tepla, což umožní vygenerovat více páry. Podmínkou jsou malé změny tlaku, což se zajistí omezením na korektoru frekvence.

Na následujícím řádku je seznam alternativních typových parametrů modelu jaderného reaktoru v úseku zdrojů katalogu typových parametrů modelů bloku (Pozn.:  $T_{CL}=T_{HL}$ ):

THL(s)	TR(s)	TF(s)	TS(s)	kPD(-)	kC(-)	kF(-)	kD(-)	kW(-)	kS(-)	kHS(-)	kHC(-)
--------	-------	-------	-------	--------	-------	-------	-------	-------	-------	--------	--------

## 7.5 Zjednodušený modely pohonu

V některých případech není nutné uvažovat všechny funkce regulátoru turbíny, ani uvažovat změny admisního tlaku. Pak lze použít tzv. standardní model pohonu:



**Obr. 48** Standardní model parní turbíny

Předpokládá se konstantní tlaku v režimu klasické regulace. Odpojením regulátoru turbíny je zjednodušeně modelována předtlaková regulace. Model je použitelný pro výpočty dynamické stability a krátkodobé dynamiky, kdy je předpoklad konstantního tlaku splněn.

Pro neregulovaný blok lze použít model 'CONS' s konstantním výkonem.

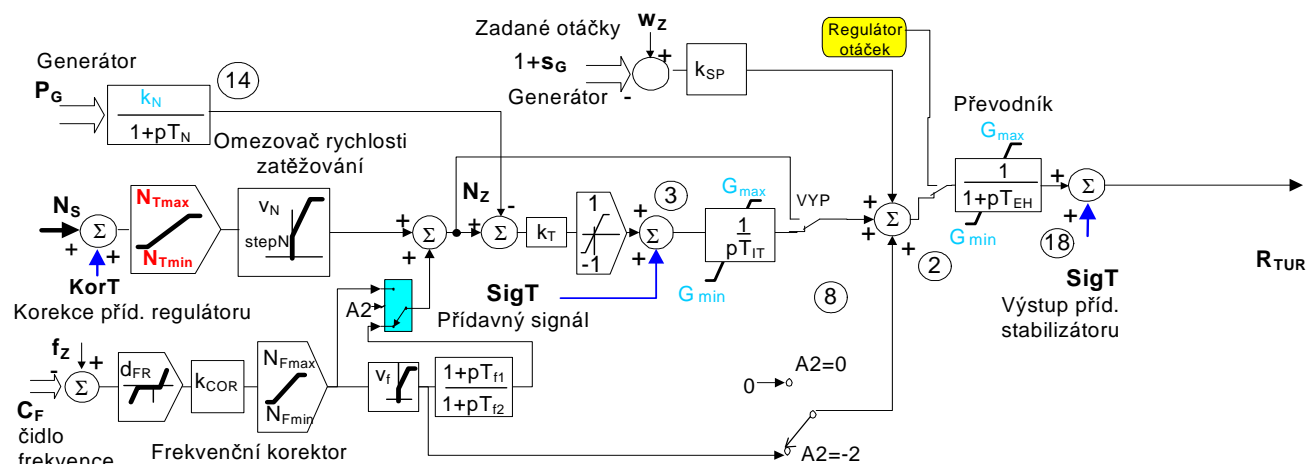
## 8. Vodní turbína

### 8.1 Výkonová regulace

Moderní elektronické regulátory vodních turbín mohou plnit tyto funkce:

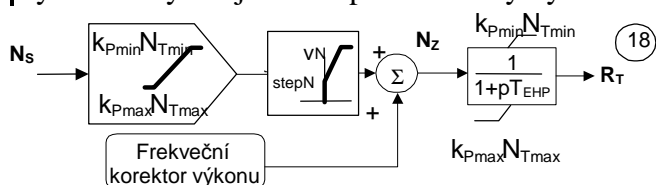
- regulaci výkonu - tvoří základní režim regulace
- regulaci otevření - používá se u reverzačních vodních turbín v čerpadlovém provozu; zadané otevření regulačního orgánu je určeno statickou závislostí na vodním spádu
- regulaci otáček - uplatňuje se, při spouštění bloku nebo když frekvence vybočí ze zadaných mezí.

Model regulátoru turbíny pro režim regulace výkonu je na Obr. 49



Obr. 49 Blokové schéma modelu regulátoru vodní turbíny

Frekvenční korektor výkonu je alternativně (pro volbu parametru  $A2 < 0$ ) doplněn o omezení rychlosti změny a člen typu „lead-lag“ z důvodů kompenzace zpoždění v regulátoru výkonu, protože ten má pouze integrační charakter (na rozdíl od regulátoru parní turbíny, který má charakter PI). Při volbě parametru  $A2 = -2$  se signál korektoru za omezovačem rychlosti přičítá k výstupu regulátoru výkonu. Urychluje se tak přenos odchylky frekvence  $s_U$  přes regulátor výkonu.



Regulace otevření (také hladinová) se používá v čerpadlovém provozu, který je rozpoznán podle záporného činného výkonu generátoru ve výchozím stavu. Během výpočtu lze přejít do čerpadlového provozu zásahem 'PUMP'.

Obr. 50 Blokové schéma modelu regulace čerpání

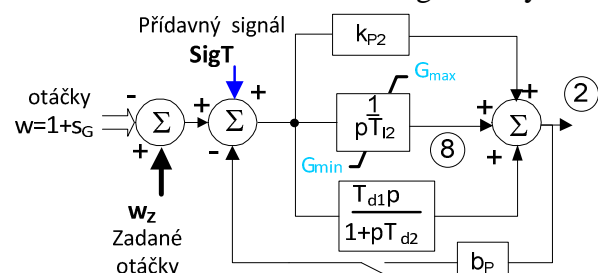
Jelikož v programu není modelována (jako model pohonného media se u vodní turbíny použije model 'CONS') statická změna hladiny (spádu) a tedy hladina je konstantní (rovna jmenovité), je v tomto režimu regulace modelována v otevřené smyčce. Jen se automaticky změní meze, neboť čerpadlo pracuje se zápornými výkony. Omezení regulačního je pásma  $N_{Tmax} \cdot k_{Pmax} - N_{Tmin} \cdot k_{TPmin}$ . Parametry  $k_{Pmax}$  a  $k_{TPmin}$  mají zápornou hodnotu.

Na následujícím řádku je seznam alternativních typových parametrů modelu regulátoru vodní turbíny v úseku regulátoru turbín katalogu typových parametrů modelů bloku:

A1	A2	TIT(s)	TN(s)	TEHP(s)	kT(-)	kSp(-)	KCOR(-)	Tf1(s)	Tf2(s)	vf(1/s)	vN(%/min)	stepN(%)	dFr(%)	NFmax(%)	NFmin(%)
----	----	--------	-------	---------	-------	--------	---------	--------	--------	---------	-----------	----------	--------	----------	----------

### 8.2 Otáčková regulace

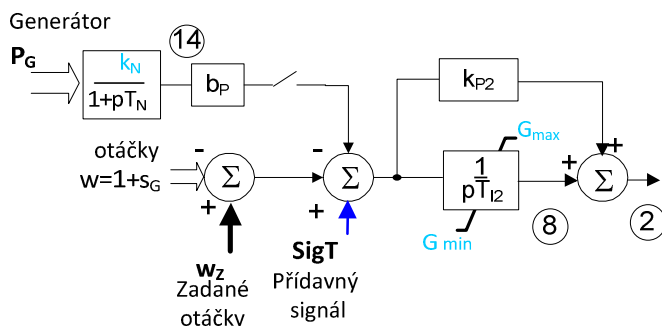
Ze základního režimu regulace výkonu dochází k přepnutí do regulace otáček:



- zásahem 'STRC' nebo 'ISLN'
  - automaticky při odchylce frekvence od jmenovité o hodnoty  $df1$  a  $df2$
  - zásahem frekvenčního relé (viz kap.14.12).
- Pomocí zásahu 'ISLN' lze vyřadit trvalou statiku  $b_P$  a regulátor se stane astatickým PID regulátorem.

Obr. 51 Blokové schéma modelu regulátoru otáček vodní turbíny PIDP s vyřaditelnou statikou

Pokud se zadá parametr  $A1=-1$  v úseku typových parametrů regulátoru turbíny použije se variantní schéma podle následujícím obrázku.



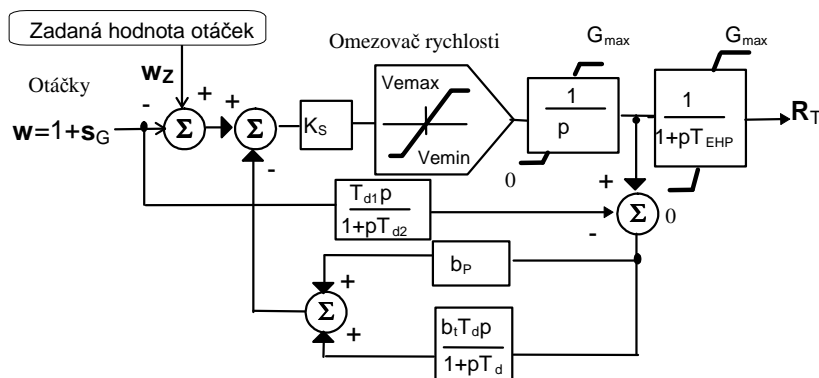
**Obr. 52 Blokové schéma modelu variantního regulátoru**

Opět lze zásahem 'ISLN' vyřadit trvalou statiku  $b_p$  a regulátor se stane astatickým PI.

Na následujícím řádku je seznam typových parametrů modelu regulátoru otáček v úseku přídatných automatik regulátoru turbín katalogu typových parametrů modelů bloku:

$b_p(-)$	$K_{p2}(-)$	$T_{d1}(s)$	$T_{d2}(s)$	$T_{I2}(s)$	$df1(-)$	$df2(-)$
----------	-------------	-------------	-------------	-------------	----------	----------

Alternativně je možno zvolit jinou strukturu regulátoru otáček podle obrázku:



**Obr. 53 Schéma alternativního modelu mechanicko-hydraulického regulátoru otáček**

Příznakem modelu je zadání čtyř typových parametrů navíc:

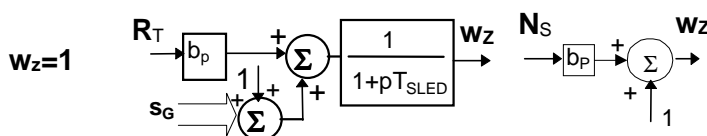
$b_p(-)$	$bt(-)$	$T_{d1}(s)$	$T_{d2}(s)$	$T_d(s)$	$df1(-)$	$df2(-)$	$T_{sled}(s)$	$ks(-)$	$vemin(1/s)$	$vemax(1/s)$
----------	---------	-------------	-------------	----------	----------	----------	---------------	---------	--------------	--------------

Zpět do režimu regulace výkonu je nutno přepnout regulátor turbíny zásahem 'STRC'. Ve schématu je vidět ve zpětné vazbě tzv. trvalá statika  $b_p$ , která umožňuje, aby tento režim byl provozován i v paralelním provozu v propojené ES, neboť regulace má proporcionální charakter.

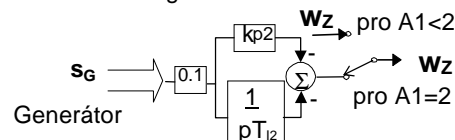
Zadaná hodnota otáček je generována jednak v režimu regulace výkonu (tzv. vlečná regulace), kdy regulátor otáček není v provozu a jednak v režimu regulace otáček, kdy může být ovládána nadřazeným PI regulátorem. Blokové schémata jsou na následujícím obrázku:

Vlečná regulace zadané hodnoty otáček v režimu regulace výkonu

1) pro  $A1=0,2$  2) pro  $A1=1$  - beznárazové přepnutí 3) pro  $A1=-1$



Nadřazená regulace zadané hodnoty otáček v režimu regulace otáček  $A1=2$



**Obr. 54 Blokové schéma modelu zadané hodnoty otáček**

O struktuře rozhoduje typový parametr  $A1$ , který se zadává v úseku regulátoru turbín:

- pro  $A1=0,2$  je zadaná hodnota regulace otáček rovna jmenovité  $=1$
- pro  $A1=1$  se přepnutí do regulace otáček provede beznárazově (proměnná  $R_T$  se nezmění)
- pro  $A1=-1$  je po přepnutí do regulace otáček pracovní bod statické charakteristiky pro nulovou regulační odchylku určen hodnotou  $N_s$

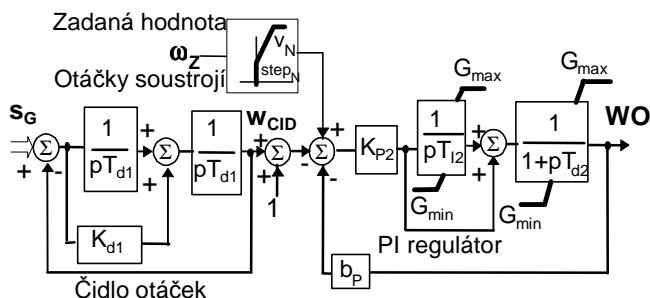
Parametrem  $A1=2$  lze zvolit režim nadřazené regulace zadané hodnoty otáček, kdy tato hodnota se mění tak dlouho, dokud existuje odchylka otáček od jmenovité hodnoty. Tento režim lze použít, pokud je potřeba v ostrovním režimu vyregulovat automaticky frekvenci na jmenovitou.

Parametrem  $T_{SLED}>0$  lze zpozditi změnu zadané hodnoty pro beznárazové přepínání.



## 9. Model dieselgenerátoru

Při modelování vznětového motoru a jeho regulace se vycházelo z podkladu [13]. Na obrázku je schéma modelu regulátoru odpovídající regulátoru WOODWARD UG-40.



Při trvalé statické  $b_p=0$  se jedná o astatickou regulaci - proporcionálně integrační regulátor. To je režim regulace vhodný pro ostrovní provoz, kdy jeden dieselgenerátor pracuje do izolované zátěže. Ustálená regulační odchylka otáček (frekvence) je pak nulová.

**Obr. 58 Blokové schéma modelu regulátoru otáček**

Volbou nenulové trvalé statiky  $b_p>0$  lze regulaci změnit na statickou. Takové uspořádání je nutné při paralelním provozu více generátorů do sítě.

Čidlo otáček má přenos ve tvaru 
$$\frac{2\xi\omega_0 p + \omega_0^2}{p^2 + 2\xi\omega_0 p + \omega_0^2}$$

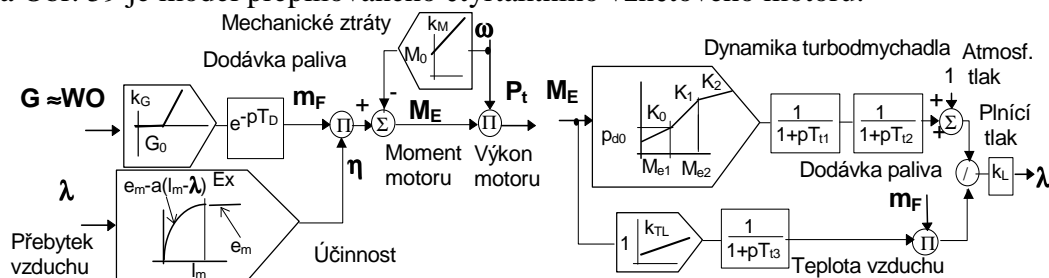
kde  $\xi = K_{d1}/2$  je činitel tlumení a  $\omega_0 = 1/T_{d1}$  je přirozená frekvence čidla.

Na následujícím řádku je pořadí typových parametrů modelu regulátoru otáček v úseku přídatných automatik regulátoru turbín katalogu typových parametrů modelů bloku:

bp(-)	Kp2(-)	Td1(s)	Td2(s)	Tl2(s)	kd1(-)	-
-------	--------	--------	--------	--------	--------	---

Zadanou hodnotu otáček  $\omega_z$  lze omezit v omezovači rychlosti zatěžování, jehož parametry  $v_N$  a  $step_N$  se zadávají v úseku regulátoru pohonu.

Na Obr. 59 je model přepřlňovaného čtyřtákního vznětového motoru:



**Obr. 59 Blokové schéma modelu přepřlňovaného vznětového motoru**

Dopravní zpoždění v reakci momentu motoru na dodávku paliva  $T_D$  je řádově rovno čtvrtině doby jedné otáčky (pro čtyřtákní motor). Teoretický moment je násoben účinností spalování  $\eta$ , která závisí na přebytku vzduchu pro spalování  $\lambda$  dodávaného turbodmychadlem.  $\eta$  dosahuje maximální hodnoty  $e_m$  pro  $\lambda>I_m$  a pro nižší  $\lambda$  se snižuje podle kvadratické ( $k_m=2$ ) nebo kubické ( $k_m=3$ ) závislosti. Mechanické ztráty celého soustrojí jsou respektovány lineární a kvadratickou závislostí na otáčkách. Přebytek vzduchu  $\lambda$  závisí na plnicím tlaku a teplotě vzduchu a na dodávce paliva  $m_F$ .

Tlak přepřlňování a teplota se získá ze statických charakteristik v závislosti na středním efektivním tlaku ve spalovacím prostoru, který je přímo úměrný momentu motoru  $M_E$ . Statické charakteristiky jsou linearizovány (pro tlak ve třech úsecích). Dynamika turbodmychadla je modelována pomocí tří časových konstant  $T_i$ , které mohou být závislé na výkonu motoru.

Na následujícím řádku je pořadí alternativních typových parametrů modelu vznětového motoru v úseku turbín katalogu typových parametrů modelů bloku:

kN(-)	TD(s)	nn(1/min)	em(-)	a(-)	Im(-)	Ex(-)	G0(-)	kG(-)	-	Gv(-)	Gmin(-)	Gmax(-)	M0(-)	KM(-)	ke(-)
-------	-------	-----------	-------	------	-------	-------	-------	-------	---	-------	---------	---------	-------	-------	-------

nn [1/min]....jmenovité otáčky Gv [dílký]....maximální poloha vstřikovacího čerpadla

ke[bar/p.j.]....koeficient úměrnosti mezi středním efektivním tlakem ve spalovacím prostoru a momentem motoru. Tyto parametry slouží pro výpočet pojmenovaných hodnot.

Na následujícím řádku je seznam alternativních typových parametrů modelu turbodmychadla v úseku zdrojů katalogu typových parametrů modelů bloku:

-	Tt1(s)	Tt2(s)	Tt3(s)	kl(-)	pd0(-)	me1(-)	me2(-)	k0(-)	k1(-)	k2(-)	kt1(-)
---	--------	--------	--------	-------	--------	--------	--------	-------	-------	-------	--------

Výpočet parametrů modelu dieselova motoru je popsán v dokumentu Param\_DG, který je součástí dodávky programu MODES.

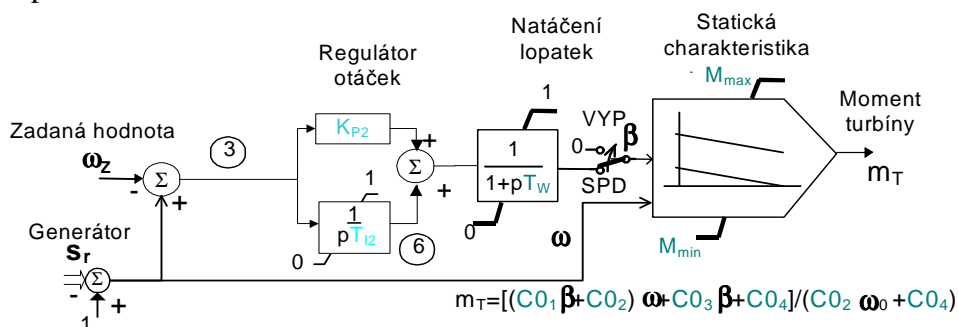






## 11. Model větrné turbíny

V knihovně programu jsou implementovány tři modely: dynamický model turbíny při konstantní rychlosti větru označený WIN0, statický model závislosti výkonu na rychlosti větru označený WINS a zdokonalený model WIND s proměnnou rychlostí větru. První model byl převzat z [22] a byl doplněn o závislost na otáčkách.



**Obr. 64 Blokové schéma modelu větrné turbíny při konstantní rychlosti větru WIN0**

Vlastní turbína je modelována statickou charakteristikou v závislosti na rychlosti rotoru  $\omega$  a natočení lopatek  $\beta$ . Tato závislost je definována čtveřicí parametrů  $C0_1$ - $C0_4$  a určí se aproximací z charakteristik turbíny. Úhel  $\beta$  se mění v od 0 do 1. Při hodnotě 0 dosahuje moment turbíny největší hodnoty. Při inicializaci modelu (ve výchozím stavu) předpokládá  $\beta = 0$ .

Úhel natočení  $\beta$  je ovládán PI regulátorem otáček. Volbou  $T_{I2} = 0$  se integrační část vyřadí a regulátor má čistě proporcionální charakter.

Setrvačnost mechanismu natočení lopatek je modelována časovou konstantou  $T_W$ . Regulátor je možno odpojit klíčovým slovem VYP v databázi modelů bloku. Úhel  $\beta$  má pak konstantní hodnotu 0.

Větrná turbína pohání asynchronní stroj a poměrná rychlost otáčení  $\omega$  je stejná pro rotor turbíny i generátoru (předpokládá se tuhý hřídel).

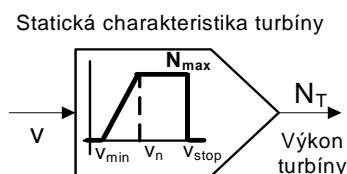
Na následujícím řádku je pořadí alternativních typových parametrů modelu v úseku turbín katalogu typových parametrů modelů bloku:

**kN(-) TW(s) C01 (-) C02 (-) C03 (-) C04 (-) ||| Mmin(-) Mmax(-) |||**

Proporcionální zesílení regulátoru otáček se zadává v úseku přídatných automatik regulátoru turbín katalogu typových parametrů modelů bloku:

**kP2(-) |||**

Statický model aproximuje závislost výkonu turbíny na rychlosti větru lineárně od minimální rychlosti  $v_{min}$  do rychlosti  $v_n$ , kdy turbína dává maximální výkon  $N_{max}$ . Při rychlosti  $v_{stop}$  se turbína odstavuje z bezpečnostních důvodů.



**Obr. 65 Blokové schéma statického modelu turbíny při proměnné rychlosti větru WINS**

Veškeré regulace větrné turbíny jsou v modelu implicitně zahrnuty, takže model se hodí pro stacionární výpočty s pomalými změnami rychlosti větru.

Na následujícím řádku je pořadí alternativních typových parametrů modelu v úseku turbín katalogu typových parametrů modelů bloku:

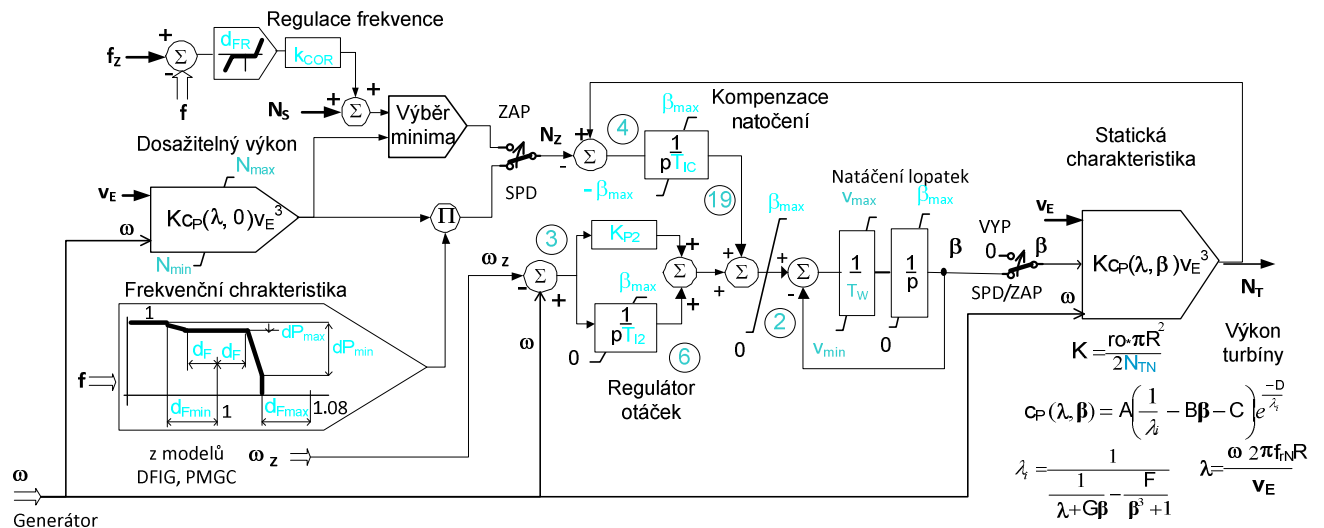
**kN(-) ||| Vmin(-) Vn(-) Vstop(-) ||| Nmin(-) Nmax(-) |||**

### 11.1 Zdokonalený model větrné turbíny WIND

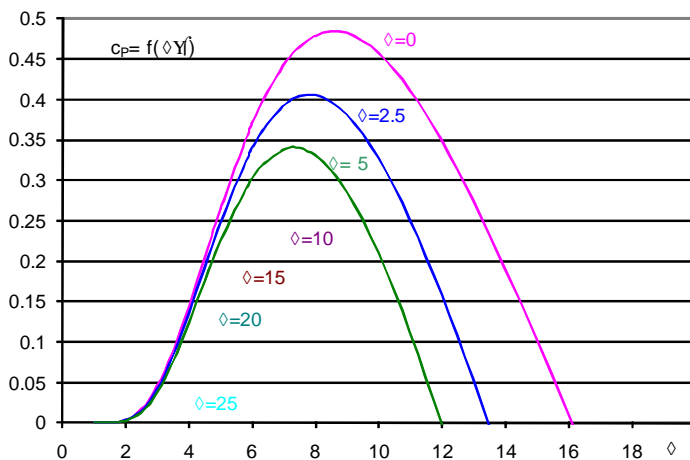
V modelu WIND je větrná turbína modelována statickou charakteristikou v závislosti na úhlu natočení lopatek  $\beta$ , kruhové rychlosti otáčení  $\omega$  (v poměrných hodnotách je rovna otáčkám) a ekvivalentní rychlosti větru  $v_E$  v ose hřídele. Úhel  $\beta$  je ovládán PI regulátorem otáček.



K výstupu regulátoru otáček se přičítá výstup kompenzace natočení, která určuje požadovaný výkon turbíny  $N_Z$  podle otáček  $\omega$  a rychlosti větru  $v_E$ . Turbína může pracovat ve třech regulačních režimech. Standardní režim je regulace otáček (zadávaná klíčovým slovem SPD v databázi dynamických modelů bloků), přičemž zadaná hodnota otáček  $\omega_Z$  je výstupem modelu DFIG nebo PMGC. Kompenzace natočení vyreguluje výkon turbíny na dosažitelný výkon modifikovaný případně modifikovaný v závislosti na frekvenci sítě  $f$  (pro nenulové parametry  $dP_{\min}$  a  $dP_{\max}$ ). Druhým režimem je zapnutá regulace výkonu (zadávaná klíčovým slovem ZAP), kdy turbína může pracovat jak v primární regulaci frekvence, tak v sekundární regulaci na požadovanou hodnotu  $N_S$ . Velikost primární regulační rezervy se zadává hodnotou PRR jako parametr bloku. Neregulovaná turbína se zvolí klíčovým slovem VYP. Schéma modelu je na následujícím obrázku:



**Obr. 66** Blokové schéma modelu větrné turbíny při proměnné rychlosti větru



Výkon turbíny  $N_T$  je v poměrných hodnotách určen součinem účinnosti turbíny  $c_P$  a třetí mocniny rychlosti ekvivalentní větru v ose rotoru  $v_E$ , dělené jmenovitou účinností  $c_{Pn}$  (při jmenovité rychlosti větru  $v_{En}$ ). Účinnost turbíny  $c_P$  závisí na činiteli rychloběžnosti  $\lambda$  a úhlu natočení  $\beta$  podle vztahu převzatého z [27].  $R$  je poloměr rotoru turbíny,  $f_m$  je jmenovitá frekvence otáčení rotoru.  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $D$ ,  $F$  a  $G$  jsou volitelné parametry, určující tvar závislosti účinnosti na rychlosti větru a otáčkách a tím i závislost výkonu na rychlosti větru při daných otáčkách. Příklad závislostí účinnosti na  $\lambda$  a  $\beta$  pro třílistou vrtuli je zobrazen na obrázku.

**Obr. 67 Závislost  $c_p$  na  $\lambda$  a  $\beta$  pro neregulovatelnou (tečkovaně) a regulovatelnou turbínu**

Na následujícím řádku je pořadí alternativních typových parametrů modelu v úsecích turbín a  
přídavných automatik regulátorů turbín katalogu typových parametrů modelů bloku ( $b_{max} = \beta_{max}$ ):

kN	TW	A	B	C	D	Vmin	Vmax	G	F	ro	Nmin	Nmax	R	vEn	frn
-	s	-	-	-	-	st/s	st/s	-	-	kg/m3	-	-	m	m/s	Hz
bmax (st)		Kp2(-)		TIC(s)		TI2(s)									

Je možno zadat proměnnou rychlost větru  $v_F$  na denní době  $T$  podle vztahu:

$$\mathbf{v}_E = \mathbf{v}_{\text{str}} \left[ A e^{-\left(\frac{\mathbf{r}-\boldsymbol{\mu}}{\sqrt{2}\sigma}\right)^2} + A_0 \right] \quad (45)$$

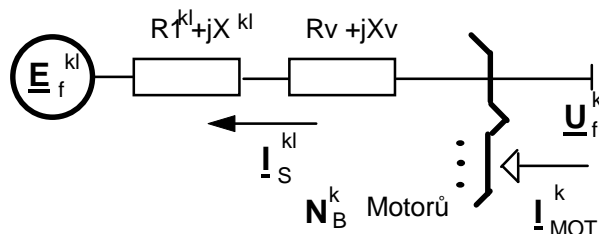
Pro model zdroje WIND jsou parametry definovány v úseku typ. parametrů modelu zdroje:

A(-)	Mi=μ (-)	Sigma=σ (-)			
------	----------	-------------	--	--	--

## 12. Model asynchronního bloku

Jelikož program MODES se zabývá ve verzi 2.3. elektromechanickými přechodnými ději je možné při zanedbání elektromagnetických přechodných dějů ve statoru nahradit asynchronní motor elektromotorickou silou  $\underline{E}$  za náhradní impedanci skládající se odporu statoru  $R_1$  a náhradní reaktance  $X$ . V případě jednoklecového (viz dále) modelu se bude jednat o přechodné hodnoty (značené ‘ $\cdot$ ’). U dvojklecového modelu se použijí rázové hodnoty (značené ‘ $\cdot$ ’). Pokud bude motor modelován současně se svým přívodním vedením (toto vedení tedy nebude součástí sítě), uváží se i náhradní impedance  $R_v + jX_v$ . Odpovídající náhradní schéma je na

Obr. 68.



Obr. 68 Náhradní schéma as. motoru jako bloku I připojeného do uzlu k

### 12.1 Rovnice asynchronního stroje

Při odvozování rovnic jsou přijaty tyto předpoklady:

- je použita Parkova transformace s koeficienty  $k_d = k_q = 2/3$
- uvažuje se pouze 1.harmonická elektromotorické síly statoru
- rovnice platí pro souřadnou soustavu synchronně se otáčející.

Za těchto předpokladů a pro jedno ekvivalentní koncentrické vinutí v podélné a příčné ose - jednoklecový model, platí v komplexním tvaru a v poměrných hodnotách:

$$\underline{U} = \underline{E}' + (R_1 + jX')I_s \quad (46)$$

$$T_0' \cdot \underline{E}' = -j\Omega_0 s_R T_0' \underline{E}' - [\underline{E}' - j(X_S - X')I_s] \quad (47)$$

$$T_0' = (X_1' + X_\mu) / \Omega_0 / R_2' \quad X' = X_1 + X_2' X_\mu / (X_2' + X_\mu) \quad X_S = X_1 + X_\mu$$

$\underline{U}, \underline{E}', I_s$	fázory svorkového napětí, vnitřní elektromotorické síly a proudu statoru
$T_0', \Omega_0$	časová konstanta naprázdno, synchronní kruhová rychlost 314 rad/s
$X_1, X_\mu$	rozptylová statorová a magnetizační reaktance
$R_2', X_2'$	odpor a rozptylová reaktance rotoru přepočtené na stator (závislé na skluzu).

Uvedené rovnice v složkovém tvaru a v pojmenovaných hodnotách jsou publikovány např. v [1]. Model jimi popsany označme jako 'ELM1'.

Přepočtené parametry rotoru mohou být závislé na skluzu a rozptylové reaktance statoru a rotoru mohou být závislé na procházejícím proudu. Tím se respektuje vliv vířivých proudů a sycení. Pro respektování závislosti odporu a rozptylové reaktance na skluzu zavedeme funkce  $F_R$  a  $F_X$ . Obdobně pro respektování závislosti rozptylové reaktance statoru a rotoru na proudu zavedeme funkce  $D_S$  a  $D_R$ . Pro výše uvedené hodnoty statorového a rotorového obvodu pak platí:

$$X_1 = X_{10} \cdot (1 - k_{S-I}(1 - D_S)) \quad (48)$$

$$R_2' = R_{R0} F_R \quad X_2' = X_{12}(1 - k_{R-I}(1 - D_R)) + X_{R0} F_X$$

$k_{S-I}$ a $k_{R-I}$ ...	koeficienty specifikující podíl sycené části na celkové reaktanci ve stavu naprázdno
$X_{10}$ .....	celková rozptylová reaktance statoru ve stavu naprázdno
$X_{12}$ .....	část rozptylové reaktance rotoru nezávislé na skluzu
$R_{R0}$ a $X_{R0}$ ...	hodnoty odporu a rozptylové reaktance rotoru závislé na skluzu pro $s_R = 0$ .

Byly implementovány tři typy funkcí F :

- linearizace podle [2] - zadávané parametrem Iklec=0 a 1, podle vztahu ( 49)
- aproximace podle dvouklecového modelu - zadávané parametrem Iklec=2, podle vztahu ( 50)
- pro hlubokou drážku upravené dle /15/ - zadávané parametrem Iklec=3, podle vztahu ( 51)

$$F_R = 1 - (1 - R_{21} / R_{20}) \frac{s_{KR} - s_{REL}}{s_{KR} - 1} \quad F_X = 1 - (1 - X_{21} / X_{20}) \frac{s_{KR} - s_{REL}}{s_{KR} - 1} \quad s_{KR} = R_{20} / X_{20} \quad x_{R0} = X_{20} \quad (49)$$

$$F_R = \frac{1 + B_R \left( \frac{s_{REL}}{d} \right)^2}{1 + \left( \frac{s_{REL}}{d} \right)^2} \quad F_X = \frac{1 + B_X \left( \frac{s_{REL}}{d} \right)^2}{1 + \left( \frac{s_{REL}}{d} \right)^2} \quad d = \left( \frac{R_3 + R_2}{X_3 + X_2} \right) \quad (50)$$

$$R_{R0} = \frac{R_3 R_2}{R_3 + R_2} \quad B_R = \frac{R_3 X_2^2 + R_2 X_3^2}{(X_1 + X_2)^2} \frac{1}{R_{R0}} \quad X_{R0} = \frac{R_3^2 X_2 + R_2^2 X_3}{(R_3 + R_2)^2} \quad B_X = \frac{X_3 X_2}{X_3 + X_2} \frac{1}{X_{R0}} \quad (51)$$

$$F_R = \frac{\beta (\sinh \beta + \sin \beta)}{2 (\cosh \beta - \cos \beta)} \quad F_X = 1 - \frac{r_{R0}}{X_{R0}} \frac{\beta (\sinh \beta - \sin \beta)}{2 (\cosh \beta - \cos \beta)} \quad \beta = df \sqrt{|s_{REL}|} \quad df = \sqrt{\frac{2 \mu_0 \Omega}{\rho}} d$$

d,  $\mu_0$ ,  $\rho$  ...hloubka rotorové drážky, permeabilita vakua ( $4\pi 10^{-7}$  H/m) a měrný odpor

$r_{R0}$ .....odpor rotoru při nulovém skluzu

$X_{R0}$  .....reaktance rotoru spojená s rozptylovým tokem neprocházejícím drážkou

$s_{REL}$ .....relativní poměrný skluz rotoru počítaný podle vztahu ( 20)

Pro Iklec=1, se parametry  $R_{20}$ ,  $X_{20}$  a  $R_{21}$ ,  $X_{21}$  zadávají přímo, jak je vidět na následujícím výpisu části řádku se seznamem typových parametrů v úseku asynchronních motorů katalogu typových parametrů modelů bloku:

Idef(-)	Sp(1/min)	Am(-)	Bm(-)	Tmech(s)	X1(-)	X20(-)	X21(-)	Xmi(-)	R1(-)	R20(-)	R21(-)	.....
---------	-----------	-------	-------	----------	-------	--------	--------	--------	-------	--------	--------	-------

Pozn.:  $X_{\mu} = X_{mi}$

Pro Iklec=0, se parametry  $R_{20}$ ,  $X_{20}$  a  $R_{21}$ ,  $X_{21}$  spočítají automaticky programem ze zadávaných hodnot dvojité klece podle vztahů ( 50) pro skluz 0 a 1. Seznam typových parametrů v úseku asynchronních motorů katalogu typových parametrů modelů bloku je následující:

Idef(-)	Sp(1/min)	Am(-)	Bm(-)	Tmech(s)	X1(-)	X2(-)	X3(-)	Xmi(-)	R1(-)	R2(-)	R3(-)	.....
---------	-----------	-------	-------	----------	-------	-------	-------	--------	-------	-------	-------	-------

Pro Iklec=2, se parametry zadávají stejně jako v předchozím případě. Pro Iklec=3, se typové parametry zadávají v následujícím pořadí:

Idef(-)	Sp(1/min)	Am(-)	Bm(-)	Tmech(s)	X1(-)	Xr0(-)	df(-)	Xmi(-)	R1(-)	Rr0(-)	-	.....
---------	-----------	-------	-------	----------	-------	--------	-------	--------	-------	--------	---	-------

Dále byly implementovány dva typy funkce sycení D:

- upravené dle [14] - zadávané parametrem Isyc=1, podle vztahu ( 52)
- dle [15] - zadávané parametrem Isyc=2, podle vztahu ( 53)

$$\text{pro } \gamma < 1 \quad D = 1 \quad \text{pro } \gamma > 1 \quad D = \frac{2}{\pi} \left[ \arctan \left( \frac{\gamma}{\sqrt{1-\gamma}} \right) + \gamma \sqrt{1-\gamma} \right] \quad \gamma = \frac{I_i}{I} \quad (52)$$

$$D = \frac{1}{1 + (a_2 I)^2} \quad (53)$$

Seznam typových parametrů pro model Isyc=1 zadávaný v úseku asynchronních motorů katalogu typových parametrů modelů bloku je následující:

Idef(-)	.....	X12(-)	ks_i(-)	kr_i(-)	Is_i(-)	Ir_i(-)	.....
---------	-------	--------	---------	---------	---------	---------	-------

Seznam typových parametrů pro model Isyc=2 zadávaný v úseku asynchronních motorů katalogu typových parametrů modelů bloku je následující:

Idef(-)	.....	X12(-)	ks_i(-)	kr_i(-)	a2s(-)	a2r(-)	.....
---------	-------	--------	---------	---------	--------	--------	-------

Modely sycení a závislosti parametrů na skluzu se dají vzájemně kombinovat zadáním parametru Idef=10\*Isyc+Iklec.

Jestliže budeme uvažovat po dvou ekvivalentních koncentrických vinutých v podélné a příčné ose (parametry budou tentokrát konstantní) obdržíme dvojklecový model označený 'ELM2'. Platí pro něj kromě ( 47) další vztahy:

$$\underline{U} = \underline{E}'' + [(R + R_V) + j(X_V - X'')] \underline{I}_S \quad \underline{E}'' = \underline{E}' + \underline{\Psi} \quad (54)$$

$$T_0'' * \underline{\Psi}'' = -j s_R \Omega_0 T_0'' \underline{\Psi} - [\underline{\Psi} - j(X' - X'')] \underline{I}_S \quad (55)$$

$$T_0'' = (X'_3 + X'_2 X_\mu / (X_2 + X_\mu)) / \Omega_0 / R'_3 \quad X'' = X_1 + X'_2 X'_3 X_\mu / (X'_3 X'_2 + X'_2 X_\mu + X'_3 X_\mu)$$

$R'_3, X'_3, \dots$  odpor a rozptylová reaktance druhého ekvivalentního obvodu rotoru.

Mechanickou pohybovou rovnici lze napsat obecně v pojmenovaných hodnotách:

$$J s_R \Omega_0 = M_{MECH} + \Delta M_M - M_{EL} \quad (56)$$

$s_R, M_{MECH}, M_{EL}$  skluz rotoru mechanický moment poháněného zařízení a elekt. moment motoru

$\Delta M_M$  mechanické ztráty soustrojí

Mechanický protimoment definujeme:

$$M_{MECH} = M_{MECH0} * f(s_R) \quad (57)$$

kde  $M_{MECH0}$  je mechanický protimoment zátěže při nulovém skluzu (synchronních otáčkách) a  $f(s_R)$  je bezrozměrná funkce skluzu, mající pro nulový skluz hodnotu rovnou 1.

Elektrický moment vyjádříme pro jednoklecový model ve tvaru podle [12] :

$$M_{EL} = 3/2 p \operatorname{Re} \{ \underline{\Psi}_R * \underline{I}_S^* \} \quad (58)$$

kde  $\Psi_R$  je magnetický spřažený tok rotoru a  $p$  je počet polpárů.

Po převedení do poměrných hodnot (vydělením vztahným momentem  $M_v = S_n / \Omega_0$ ) a úpravách dostaneme pohybovou rovnici ve tvaru:

$$T_M s_R \Omega_0 = \cos \varphi'_n k_{ZAT} k_C f(s_R) + dM_0 + k_{M1} (1 - s_R) - \operatorname{Re} \{ \underline{E}' * \underline{I}_S^* \} \quad (59)$$

$$T_M = J * \Omega_{M0}^2 / S_n \quad \cos \varphi'_n = \cos \varphi_n \eta \Omega_{M0} / \Omega_n \quad k_{ZAT} = M_{skut} / M_n \quad k_C = 1 / f(s_{Rskut})$$

$S_n$  a  $J, \dots$  jmenovitá hodnota zdánlivého příkonu a moment setrvačnosti soustrojí

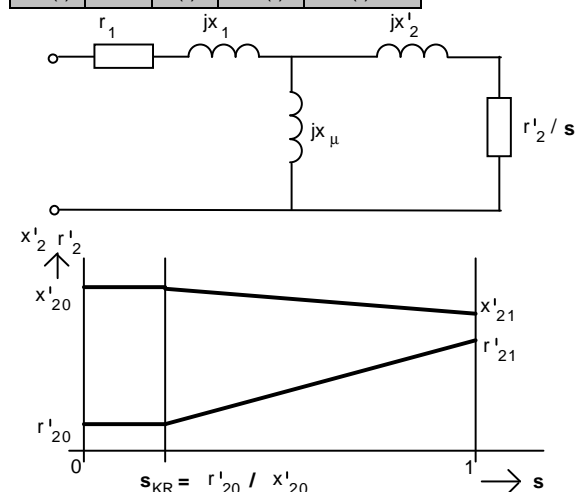
$\Omega_n, \Omega_{M0}, \dots$  jmenovitá hodnota mechanické rychlosti, mechanická synchronní kruhová rychlost.

$M_{skut}, s_{Rskut}, \dots$  skutečné hodnoty mechanického momentu a skluzu v počátečním stavu.

Pro dvojklecový model se v rovnici ( 59)  $\underline{E}'$  nahradí  $\underline{E}''$ . Zatěžovatel  $k_{ZAT}$  určuje stupeň zatížení (využití jmenovitého momentu) motoru. Činitel měřítka  $k_C$  zajišťuje, že momentová charakteristika zátěže (viz dále) a motoru má pro počáteční ustálený stav definovaný skluzem  $s_{Rskut}$  společný bod. Redukovaný účinník  $\cos \varphi'_n$  se v rovnici objeví proto, že vztahný moment  $M_v$  se nerovná jmenovitému.

Pomocí parametrů  $dM_0$  a  $k_{M1}$  se modelují ztráty třením a ventilací. Přídavné ztráty způsobené především vířivými proudy ve vinutích, na povrchu a v zubech statoru a rotoru se modelují pomocí parametru  $r_D$ , který se přičítá k odporu statoru  $R_1$ . Tyto parametry se zadávají na konci řádku v úseku asynchronních motorů katalogu typových parametrů modelů bloku:

ldef(-)	.....	rd(-)	dM0(-)	km1(-)
---------	-------	-------	--------	--------



Pro kompatibilitu s předchozími verzemi zůstává zachován stacionární model označený 'STAC'. Motor je nahrazen statickým dvojbranem. Na skluzu (jehož definice odpovídá vztahu ( 20) v kap. Ekvivalentní asynchronní motor) je závislá nejen výsledná hodnota odporu rotoru, ale i samotné rotorové parametry podle níže uvedeného obrázku nebo podle ( 49). Náhradní schéma pro toto zjednodušení je na vedlejším obrázku.

Obr. 69 Náhradní schéma asynchronního motoru



Na následujícím řádku je pořadí alternativních typ. parametrů modelu v úseku regulace turbín:

N1(-)	w1(-)	TIN(s)	TW(s)	TN(s)	kpN(-)				a(-)	b(-)	c(-)	vN(-/s)
-------	-------	--------	-------	-------	--------	--	--	--	------	------	------	---------

Regulace Q může obdobně jako u synchronního generátoru pracovat v primární nebo sekundární regulaci v závislosti na hodnotě parametru  $T_{IQ}$ . Jestliže je nulový, regulátor reguluje svorkové napětí, případně modifikované statikami jalovým a/nebo činný výkonem (volbou parametrů  $k_{IR}$  a  $k_{IA}$ ). Pro  $T_{IQ} > 0$  reguluje regulátor jalový výkon generátoru. V obou případech lze k zadané hodnotě přičítat korekční signál z externího regulátoru a simulovat tak např. regulaci napětí sítě (v definovaném místě). V případě, že proud překročí hodnotu  $I_{Gmax}$  je hodnota Q regulována tak, aby proud generátoru tuto hodnotu nepřekročil. Pro  $T_{IQ} < 0$  reguluje regulátor na konstantní účinník.

Na následujících řádcích je výpis použitých typ. parametrů modelu v úsecích regulátoru a přidavných automatik buzení:

Uzmin	Uzmax			Kp(		TI(s)				v(%/s)					KIA(-)	KIR(-)
kQ(-)	TIQ(s)	Qmin(-)	Qmax(-)													

## 12.3 Rovnice protimomentu

V programu MODES 2.3 jsou modelovány tři tvary momentových charakteristik  $f(s_R)$ :

- „Standardní“ model označený symbolem ‘STAN’
- Model se zpětnou klapkou označený symbolem ‘TCHK’
- Po úsecích lineární model označený symbolem ‘PIEC’

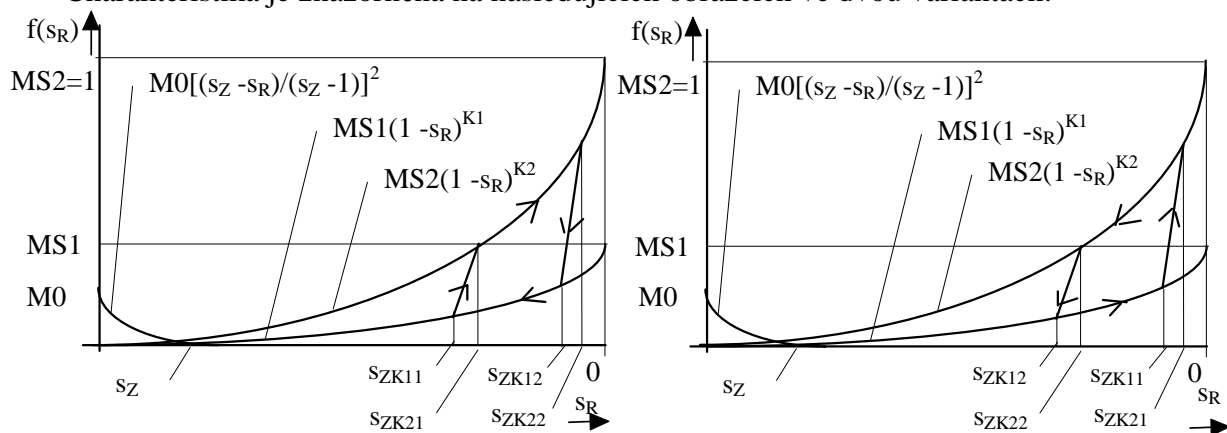
### 12.3.1 Polynommická závislost

je popsána rovnicí:

$$f(s_R) = 1 - A - B + A(1 - s_R) + B(1 - s_R)^2 \quad (60)$$

### 12.3.2 Model se zpětnou klapkou

Charakteristika je znázorněna na následujících obrázcích ve dvou variantách:



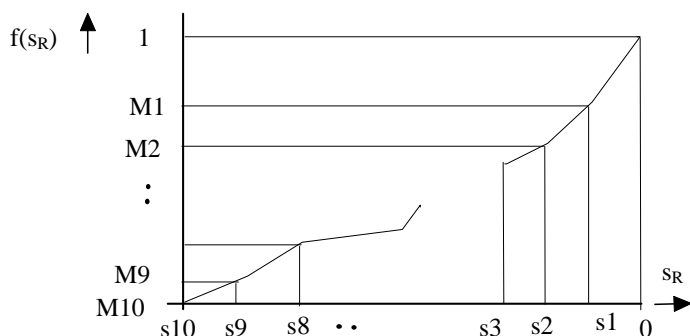
Obr. 72 Charakteristika protimomentu pro  $s_{ZK11} \geq s_{ZK12}$  a pro  $s_{ZK11} < s_{ZK12}$

Celkový protimoment se získá sečtením dvou dílčích momentů:

- třetího protimomentu s kvadratickou závislostí (uplatňuje se pro skluzu  $> s_Z$ )
- z dvojitětvové charakteristiky s hysterezní smyčkou.

Pro nulové parametry  $s_{ZK}$ , hysterezní smyčka zmizí a zůstane horní charakteristika.

### 12.3.3 Po úsecích lineární model

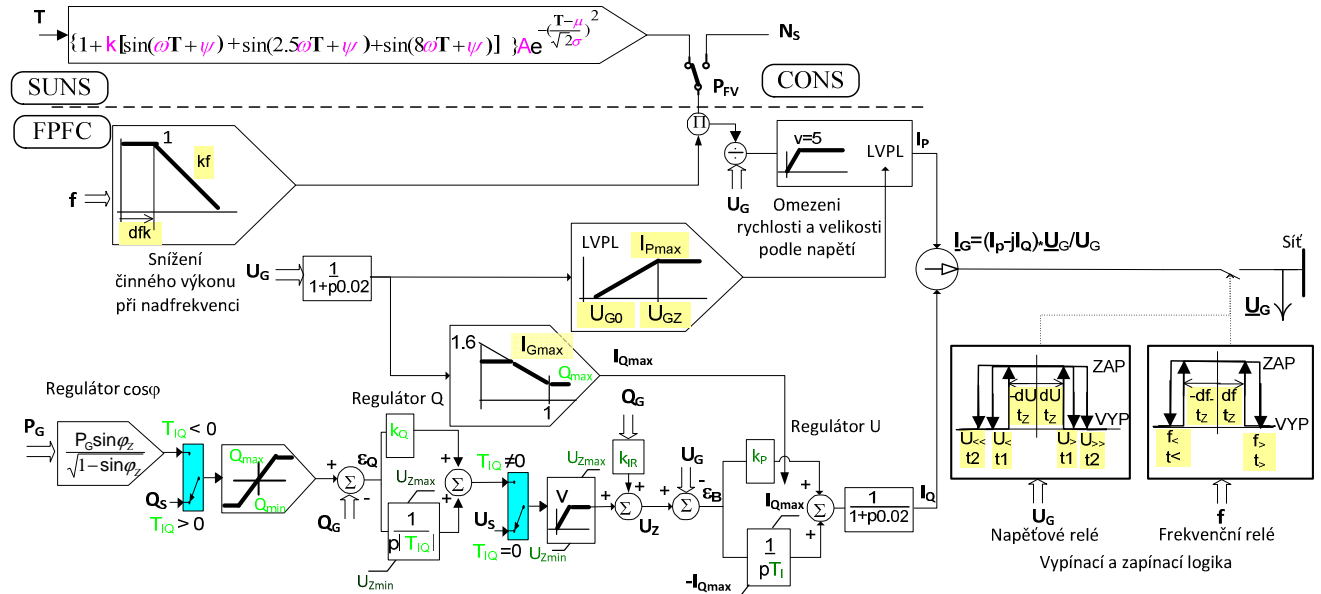


Charakteristika je znázorněna na Obr. 73: Funkce je definována pro 11 skluzů 0 -  $s_{10}$ . Pro skluz 0 (synchronní rychlost) je hodnota funkce jedna v souladu s definicí [46]. Mezi jednotlivými body se provádí lineární interpolace.

Obr. 73 Charakteristika protimomentu

### 13. Model fotovoltaické elektrárny (FvE)

V souladu s dokumentem [29] je možno FvE modelovat pomocí zjednodušeného modelu frekvenčního měniče (střídače) obdobně jako u synchronního stroje s permanentními magnety a plnovýkonovým měničem (model PMGC – viz kap. 5.3). Nově vytvořený model FPFC používá Nortonův ekvivalent vstřikovaného proudu  $I_G$  do sítě jak ukazuje následující obrázek:

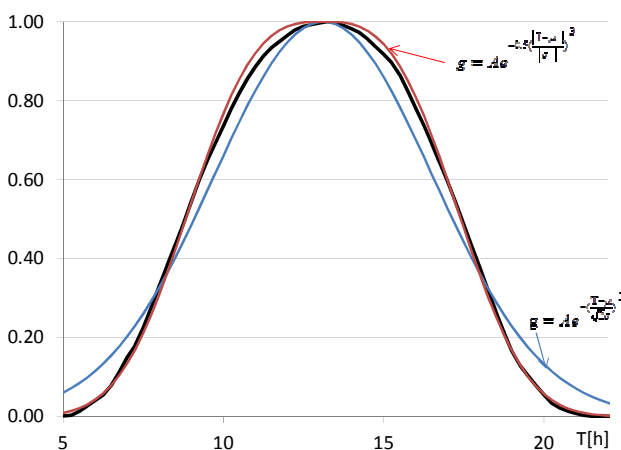


Obr. 74 Model FvE

Činná část proudu  $I_P$  je určena výkonem fotovoltaických panelů  $P_{FV}$ . Pokud se zadá model zdroje CONS je dostupný výkon panelů konstantní (případně se dá měnit zásahem TURB jako u klasických turbín). Pokud se zadá model zdroje SUNS, závis dostupný výkon  $P_{FV}$  na denní době  $T$  v hodinách ( $T \in \{0,24\}$ ). Dostupný výkon FvE s maximálním (instalovaným) výkonem  $P_{FVp}$  je aproximován vztahy:

$$P_{FV} = P_{FVp} * g \quad g = Ae^{-\frac{(T-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad g = Ae^{-0.5\left(\frac{|T-\mu|}{\sigma}\right)^3} \quad (61)$$

kde  $A$ ,  $\sigma$ ,  $\alpha$  jsou parametry. Kubická závislost se dá navolit volbou  $\sigma < 0$ .



Obr. 75 Časová závislost výkonu FvE na denním čase T

Pokud se zadá nenulová konstanta  $k_f$  model FvE snižuje výkon při nadfrekvencích ( $f > 50 + dfk$ ) lineárně podle směrnice  $k_f$ . Součástí modelu je i vypínací logika, která vypíná blok při vybočení frekvence z mezí  $f_{MIN}$ –  $f_{MAX}$ .

Zapínací logika zapne blok po návratu odchylky frekvence/napětí do pásma  $df$  -  $df \pm dU$ . Při znovuzapnutí zapínací logikou blok najíždí na dosažitelný výkon  $P_{FV}$  rychlostí Ramp.

Parametry modelu FvE se zadávají v úsecích typových parametrů modelu generátoru, regulátoru buzení a přídatných automatik buzení:

$U_n$	$\cos \delta_n$	$S_{ng}$	$f_>$	$f_<$	$df$	$T_>$	$T_<$	$Tf_z$	$df_>$	$df_k$	$Kf$	<b>Ramp</b>	$I_{Gmax}$	$I_{Pmax}$	$U_{G0}$	$U_{GZ}$
kV	-	MVA	Hz	Hz	Hz	s	s	s	Hz	Hz	%/Hz	%/min	-	-	-	-

Pokud se přidá dalších sedm parametrů navíc (celkem 25) lze modelovat i napěťové relé (dva stupně pro podpětí, dva stupně pro přepětí a dva symetrické stupně pro zapnutí):

$U_<$	$U_{<<}$	$U_>$	$U_{>>}$	$T_1$	$T_2$	$dU$
				s	s	

$U_{zmin}$	$U_{zmax}$				$Kp$		$Tl(s)$				$v(\%/s)$				$KIA(-)$	$KIR(-)$
$kQ(-)$	$TIQ(s)$	$Qmin(-)$	$Qmax(-)$													

Pro model zdroje SUNS jsou parametry definovány v úseku typ. parametrů modelu zdroje:

$A(-)$	$Mi(-)$	$Sigma(-)$	$K(-)$	$Omega(-)$	$Psi(-)$
--------	---------	------------	--------	------------	----------

Pozn.  $Mi=\mu$   $Sigma=\sigma$   $Omega=\omega$   $Psi=\psi$ .

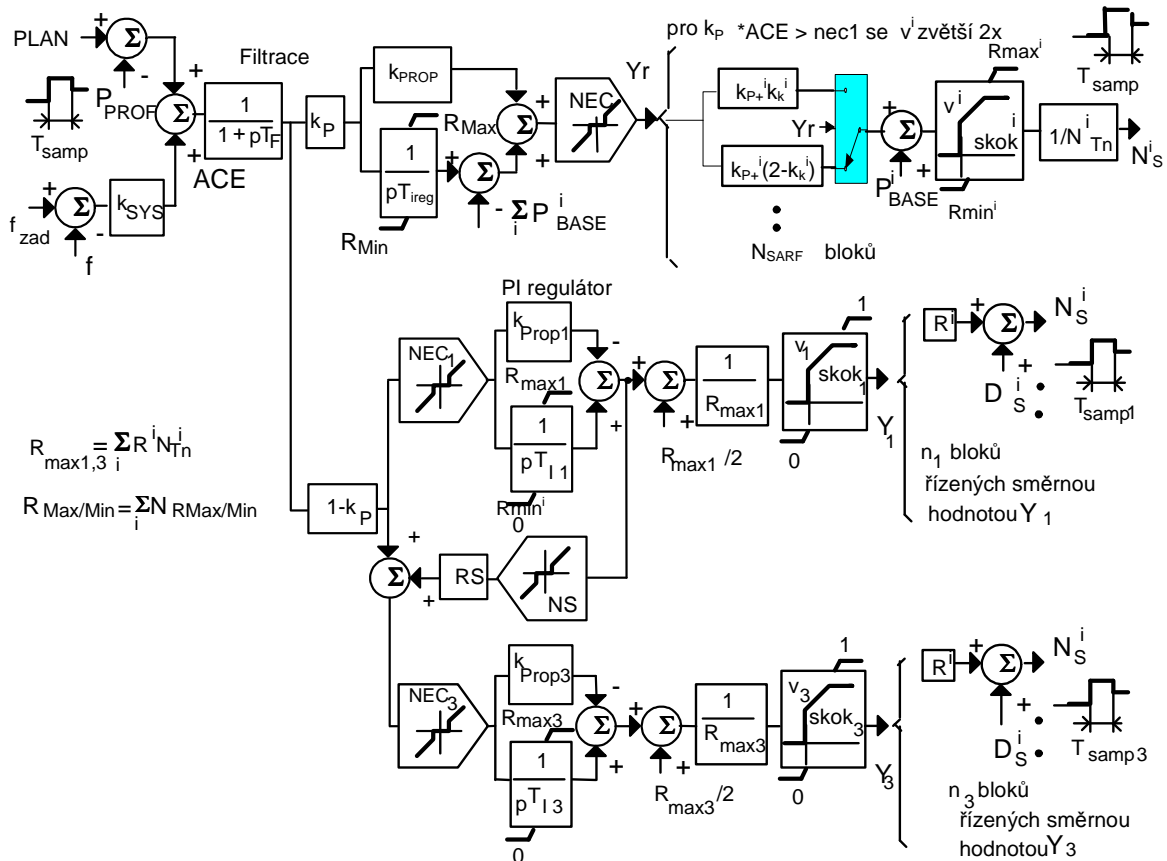


## 14. Řízení a ochrany ES

V kapitole bude pojednáno o **centrálním regulátoru**  $f$  a  $P$ , a abstraktních modelech tzv. **automatik**, logik, stabilizátorů a regulátorů, regulace napětí v pilotním uzlu, abstraktním modelu vývodu (sdružuje distanční, nadproudovou ochranu, rozdílovou ochranu trať, synchronizační zařízení a automatiku opětovného zapnutí) a ochrany bloku.

### 14.1 Centrální regulátor $P$ a $f$

Sekundární regulací  $P$  a  $f$  budeme rozumět automatickou funkci realizovanou **centrálním regulátorem** frekvence a předávaných výkonů. Model **centrálního regulátoru** je na Obr. 76.



Obr. 76 Model centrálního regulátoru  $P$  a  $f$

**Centrální regulátor** vyhodnocuje svou regulační odchylku - tzv. ACE ('Area Control Error') jako součet korigované odchylky frekvence (od zadané hodnoty  $f_{ZAD}$ ) a odchylky předávaného výkonu regulační oblasti (od zadané hodnoty  $PLAN$ ). Jedná se o  $f+P$  režim, který zajišťuje regulaci podle síťových charakteristik. Tuto regulační odchylku je možno rozdělit do dvou typů regulátorů.

První je systém individuálního řízení jednotlivých regulačních **bloků**, který tvoří PI regulátor, který přes participační koeficienty  $k_E$  rozděljuje regulační výkon mezi jednotlivé **bloky**.

Součet regulačního příspěvku a základního výkonu  $P_{BASE}$ , který je určován terciární regulací, je omezen, jak co se týče rychlosti, tak i velikosti a je posílán individuálně na jednotlivé **bloky**. V případě, že je sekundární regulační rozsah pro všechny bloky vyčerpán ( $N_s^i$  je roven  $N_{Rmin}^i$  nebo  $N_{Rmax}^i$ ) je integrační část PI regulátoru zablokována.

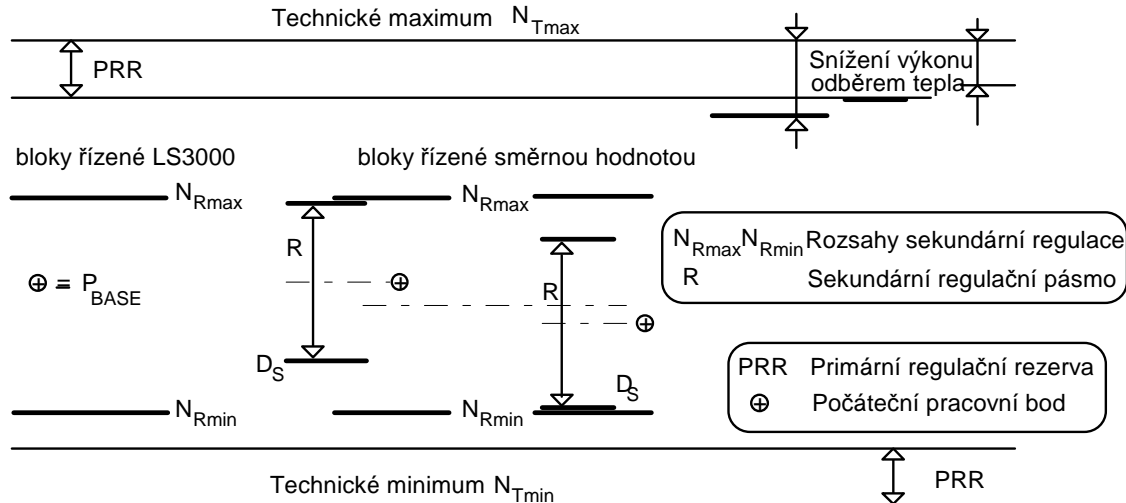
Model bere v úvahu relativní polohu pracovního bodu v regulačním pásmu (viz následující obrázek) pomocí kompenzačního koeficientu  $k_k = 2(N_{Rmax} - P_{BASE}) / (N_{Rmax} - N_{Rmin})$ , který dosahuje hodnot od 2 (pracovní bod na dolní mezi) do 0 (pracovní bod na horní mezi). Regulátor pro kladné regulační odchylky přednostně zatěžuje bloky v dolní části regulačního pásma a naopak.

Druhý představuje řízení směrnou hodnotou. **Bloky** mohou být rozděleny do dvou skupin, přičemž každá skupina má svůj PI regulátor. Výstupem obou regulátorů jsou směrné hodnoty  $Y_1$  a  $Y_3$ , pohybující se v rozmezí 0-1. Tyto hodnoty se posílají na jednotlivé regulační bloky řízené směrnou

hodnotou, kde se vynásobí sekundárním regulačním pásmem  $R$  a přičte k základnímu výkonu  $D_S$ . Tak se v obou případech vytvoří požadovaný výkon daný sekundární regulací  $N_S$ .

Vzhledem k centrálnímu charakteru nepracuje regulátor spojitě, ale s určitým vzorkovacím intervalem pro měření přenosu profilu -  $T_{SAMP}$  (je v modelu stejný i posílání hodnot  $N_S^i$  pro přímo řízené bloky) a odesílání směrných hodnot -  $T_{SAMP}^{1,3}$  na regulační bloky.

Na následujícím obrázku je rozdělení výkonového rozsah regulačního **bloku**.



**Obr. 77 Výkonový rozsah regulačních bloků**

Technické minimum a maximum  $N_{Tmin}$  a  $N_{Tmax}$  je dáno použitou technologií. Dále je ovlivňuje u parních **bloků** kvalita paliva a u vodních **bloků** spád a kavitace. U **bloků** v primární regulaci je nutno odečíst primární regulační rezervu (PRR), která by měla tvořit sumárně 2.5% z výkonu celé oblasti. Pochopitelnou snahou je rozdělit primární regulaci na co největší počet bloků, tak aby se primární regulační rezerva této hodnotě přiblížila. Pokud z ekonomických nebo technických příčin jsou některé **bloky** z primární regulace vyřazeny, zbylé je musí nahradit a hodnota primární regulační rezervy roste. U odběrových parních turbín se horní hranice  $N_{Tmax}$  snižuje o odběr páry pro teplofikaci, pokud je větší než PRR. Ve zbylém pásmu se pohybuje regulační rozsah  $N_{Rmin} - N_{Rmax}$ .

U **bloků** přímo řízených může ležet výchozí pracovní bod, kdekoli v regulačním pásmu (jeho poloha je dána terciární regulací, tedy se řídí ekonomickými hledisky). **Centrální regulátor** pak mění polohu pracovní bodu v regulačním rozsahu  $N_{Rmin} - N_{Rmax}$ .

V modelu lze simulovat terciární regulaci pomocí zásahu 'TERC', který přesune pracovní bod do prostředku vyššího nebo nižšího regulačního pásma.

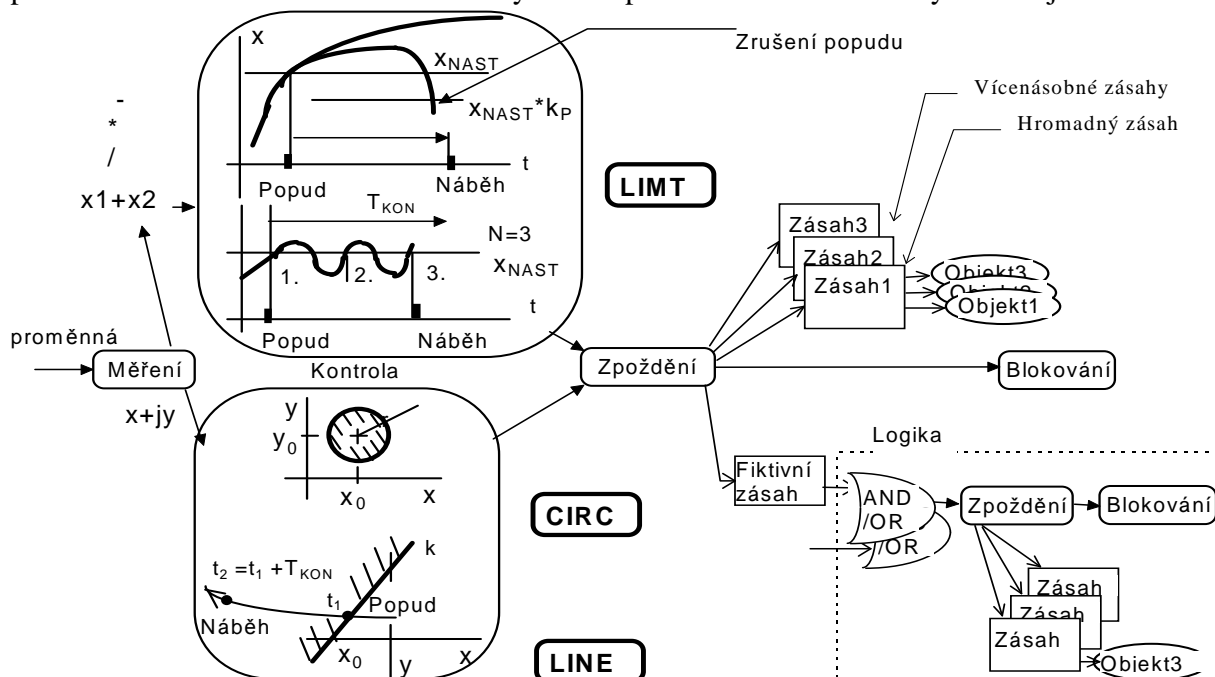
U bloků řízených směrnou hodnotou musí být relativní poloha pracovního bodu v regulačním pásmu stejná pro všechny regulační **bloky** řízené danou směrnou hodnotou. Výchozí pracovní bod, daný vstupním ustáleným stavem by tedy měl v polovině regulačního rozsahu  $N_{Rmin} - N_{Rmax}$ , jinak se hodnota použitelného regulačního pásma  $R$  zmenší, tak aby výchozí pracovní bod ležel uprostřed.

Mezi směrnými hodnotami  $Y1$  a  $Y3$  je možné zavést vazbu přes zesílení  $RS$  s necitlivostí  $NS$ . Signálem  $Y1$  je pak možno řídit "rychlé" **bloky**, zatímco hodnotou  $Y3$  "pomalé". Po najetí "rychlé" rezervy k přerozdělení regulačního výkonu na "pomalé" **bloky** a uvolnění "rychlých" **bloků** pro další regulační zásah.

Kromě základního  $f+P$  režimu je možné zadat regulaci jen na zadanou hodnotu frekvence ( $f$  režim) nebo jen zadanou hodnotu předávaných výkonů ( $P$  režim). Při odchylce frekvence sítě větší než je  $\pm 0.2$  Hz se regulátor vypne a velikosti  $N_S$  zůstanou na poslední hodnotě.

## 14.2 Model automatik

**Automatika** se skládá z měřicího, kontrolního, zpožďovacího a blokovacího článku a umožňuje provádět vícenásobné a hromadné zásahy. Principiální schéma automatiky následuje.



**Obr. 78 Schéma činnosti modelu automatiky a logiky**

Úkolem měřicího článku je vybrat příslušnou proměnnou pro vstup kontrolního článku. Pro kontrolní články typu 'LIMT' lze na vstup zadat součet, rozdíl, součin nebo podíl dvou proměnných. Jako vstupy mohou sloužit jednak stavové celočíselné signály z následující tabulky:

Symbol	Objekt	Význam signálu
#A	Automatika	0-vyřazena 1- aktivní 2- popud 3-náběh 4- blokování po zásahu
#B	Větev	0- vypnuto třífázově z obou stran 1-jedna fáze vypnuta 3- zapnuto -1 -zkrat -2/2 odepnutí větve ze zkratem ze strany počátečního/koncového uzlu -4/4 odepnutí větve ze strany počátečního/koncového uzlu
#C	Článek logiky	1 logická 1 (pravda) 0 logická 0 (nepravda)
#E	Regulátor buzení	1 působí hlídač meze podbuzení -1 působí omezovač statorového a rotorového proudu
#F	Regulátor turbíny	1 iniciováno rychlé zavírání ventilů po zásahu VALV (pro model ST_A) 1 přepnutí do režimu čerpání po zásahu PUMP (pro model HYDR) -1 přepnutí do režimu regulace ostrova po zásahu ISLN (pro model ST_A)
#G	Režim regulace turbíny	0/1 regulátor vypnut/zapnut (řízení v otevřené/zavřené regulační smyčce) 2 pracovní regulace otáček (po zásahu STRC) 3 poruchová regulace otáček (po zapůsobení regulátoru přeběhu)
#L	Logika	0 -vyřazena 1- aktivní 2-náběh 3-blokování po zásahu
#N	Uzel	0 izolovaný uzel v pasivním ostrovu 1 normální stav 2 probíhá trend
#S	Stabilizátor	0 -vyřazena 1- aktivní
#T	Příd.automatiky regulace turbíny	1 působí regulátor přeběhu (pro model ST_A) -1 působí rychlé zavírání ventilů od akceleračního relé (pro model ST_A)
#U	Blok	0 vypnut 1 zapnut -1 synchronizace (jen pro generátory)
#O	Regulační trafo	-2 blokuje od podpětí, -1 náběh, 0/1 VYP/ZAP, 2/3 na dolní/horní odbočce

Zadáním klíčového slova LIMA jde na vstup článku absolutní hodnota měřeného signálu.

Dále slouží jako vstupy proměnné modelů:

- a) vazební veličiny **bloku** tj. proměnné zobrazené na Obr. 4
- b) akcelerační moment turbíny úměrný zrychlení
- c) proměnné generátoru a asynchronního motoru popsané příslušnými rovnicemi
- d) relativní zátěžný úhel měřený mezi osou rotoru a fázorem svorkového napětí
- e) přídavné signály do regulátoru buzení a turbíny
- f) stavové a algebraické proměnné **bloku** tj. veličiny označené v schématech modelů čísly v kroužku
- g) amplituda, fáze a odchylka a derivace frekvence napětí **uzlu**
- h) toky výkonu, proud a ztráty činného výkonu **větve**
- i) složky impedance viděná ochranou, rozdíl fází/amplitud napětí počátečního a koncového **uzlu** vedení
- j) odběry a dodávky výkonu **uzlu**, toky výkonů **profilu**
- k) převod trafa
- l) sumární výkon turbín **oblasti**
- m) plánované saldo a skutečné saldo **oblasti LFC**
- n) proměnné **stabilizátorů**
- o) absolutní TABS a relativní čas TREL.

Blok kontroly může mít dvojí charakter. Jednak je to prostá kontrola překročení zadané meze nebo je to kontrola polohy bodu v kartézské souřadné rovině. V prvním případě se měřená veličina  $X$  porovnává se zadanou hodnotou  $X_{\text{NAST}}$ . Pokud je překročena tato zadaná mez spustí se časová kontrola (popud). Pokud je zadán nulový počet průchodů  $N$ , kontroluje se jen, jestli po celou dobu kontroly  $T_{\text{KON}}$  je splněna popudová podmínka. Je-li zadán nenulový počet průchodů, kontroluje se skutečný počet průchodu mezi  $X_{\text{NAST}}$  a jestliže během  $T_{\text{KON}}$  dosáhne  $N$ , **automatika** naběhne, jestliže se během  $T_{\text{KON}}$  počtu  $N$  nedosáhne, čítač průchodu se vynuluje a **automatika** čeká na další popud. V druhém případě se kontroluje, jestli bod leží v povolené nebo zakázané oblasti. Bod musí být pochopitelně definován dvěma souřadnicemi, takže měřená veličina musí mít dvě složky. Hranice oblastí jsou zadány pomocí přímky nebo vysunutě kružnice. Kontrola počtu průchodů hranicí je obdobná jako v prvním případě.

Po uplynutí doby  $T_{\text{KON}}$  automatika naběhne a po zadaném zpoždění  $T_{\text{ZAS}}$  provede zadaný zásah (případně vícenásobné zásahy) nebo změni logický výstup automatiky (tento výstup může sloužit jako vstup logického článku tzv. logiky - viz dále). Každý z vícenásobných zásahů může být hromadný, to znamená, že stejný typ zásahu proveden na více objektů.

Možné zásahy **automatiky** jsou tyto:

- a) zablokuje/odblokuje jinou **automatiku**, **logiku**, **stabilizátor** nebo regulátor
- b) vypíná/zapíná **větev**, odpojuje zkrat a rozpojuje jednu nebo dvě fáze
- c) mění převod **větve** (trafa)
- d) mění strukturu regulátoru turbíny **bloku**
- e) mění žádanou hodnotu  $U_{\text{SEC}}/Q_{\text{SEC}}$  regulátoru buzení **bloku** v primární/sekundární regulace
- f) mění zadanou hodnotu  $N_{\text{SEC}}/W_{\text{ZAD}}$  regulátoru pohonu **bloku** v základní/otáčkové regulaci
- g) mění velikost zátěže v **uzlu**
- h) vypíná/synchronizuje a zapíná **blok**.
- i) umožňuje přechod vodní turbíny do čerpadlového režimu **bloku**
- j) aktivuje/deaktivuje rychlé zavírání ventilů parní turbíny **bloku**
- k) mění zadanou hodnotu  $f_{\text{ZAD}}$  korektoru frekvence regulátoru turbíny **bloku**
- l) nastaví logickou hodnotu výstupu **automatiky**
- m) vyřazení/aktivace automatického přepínání odboček trafa a změna zadané hodnoty napětí
- n) přepnutí do režimu regulace ostrova pro parní turbínu **bloku** ('ISLN')
- o) mění zadanou hodnotu napětí regulačního trafa ('OLTC')
- p) změni pásmo sekundární regulace bloku ('TERC')
- q) . změna zadané hodnoty salda a frekvence **LFC**
- r) změna zadané hodnoty napětí **ARN**
- s) mění stav distanční a nadproudové ochrany, spouští synchronizační zařízení vývodu
- t) spíná kompenzační prostředek v uzlu.

Tyto zásahy odpovídají reálným možnostem v ES. Následující zásahy jsou virtuální:

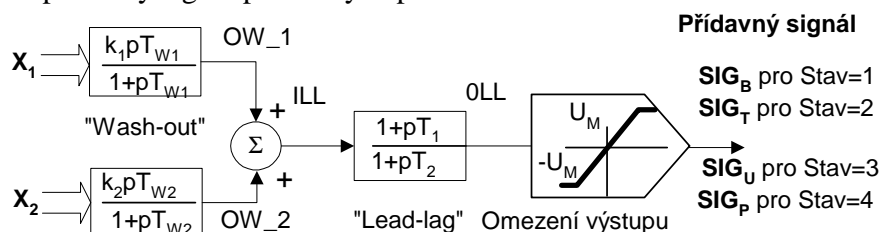
- u) změna intervalu vzorkování veličin modelu ('STEP') - časová lupa
- v) zapamatování stavu ES a návrat do tohoto stavu ('SNAP')
- w) Změna času buď absolutní (na určitou hodnotu) nebo relativní (o určitou hodnotu) ('TIME')
- x) zastavení výpočtu ('STOP')
- y) udělá značku na trajektorii v komplexní rovině grafiky ('MARK')
- z) změni typové parametry modelů bloku ('PAR#', # je pořadové číslo příslušného úseku v katalogu typ.parametrů).

### 14.3 Logiky

**Logika** představuje soubor logických článků (typu logického součinu - klíčové slovo 'AND' nebo součtu - klíčové slovo 'AND'), jejichž vstupy tvoří buď logické výstupy automatik (nastavované zásahem 'FICT') nebo výstupy jiných článků. Jestliže má výstup posledního logického článku hodnotu logické 1 (pravda) provede logika analogickou činnost jako **automatika**.

### 14.4 Externí stabilizátory

Do sumárního bodu regulátoru buzení (viz. kap. 6.1) nebo paralelně k výstupu regulátoru turbíny (viz. kap. 7.1) lze jako přídavný signál použít výstup externího stabilizátoru:



**Obr. 79 Schéma externího stabilizátoru**

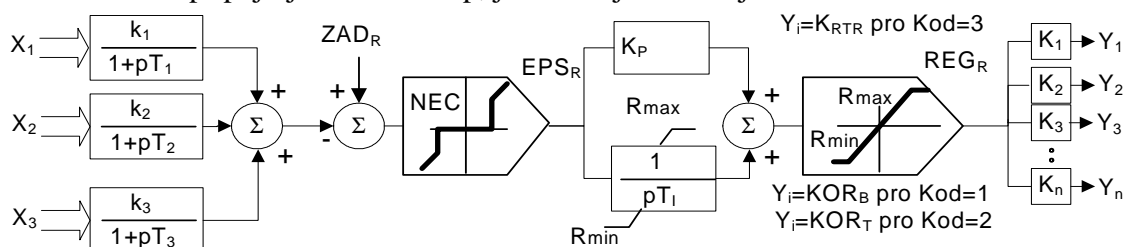
Pro Stav=3 je přídavný signál zaveden do regulátoru napětí počátečního uzlu UPFC (viz Kap. 3.7).

Parametr Stav se zadává pro výchozí stav a lze jej měnit během výpočtu zásahem 'STAB'. Je vidět, že struktura stabilizátoru je stejná jako u interního stabilizátoru regulátoru buzení. Rozdíl je, že na vstupech může být jako u **automatiky** libovolná dvojice proměnných  $X_1$  a  $X_2$ , které jsou v poměrných hodnotách kromě skluzů generátorů a odchylek frekvence (%) a úhlů (rad).

### 14.5 Externí regulátory

Externí regulátor může mít na vstupu buď libovolnou dvojici proměnných  $X_1$  a  $X_2$  (obdobně jako stabilizátor).

Je však možné připojit ještě třetí vstup, jak ukazuje následující obrázek:



**Obr. 80 Schéma externího regulátoru**

Upravená suma těchto proměnných tvoří regulovanou veličinu. Zadaná hodnota  $ZAD_R$  se zadává pro výchozí stav a lze jej měnit během výpočtu zásahem 'SETR'.

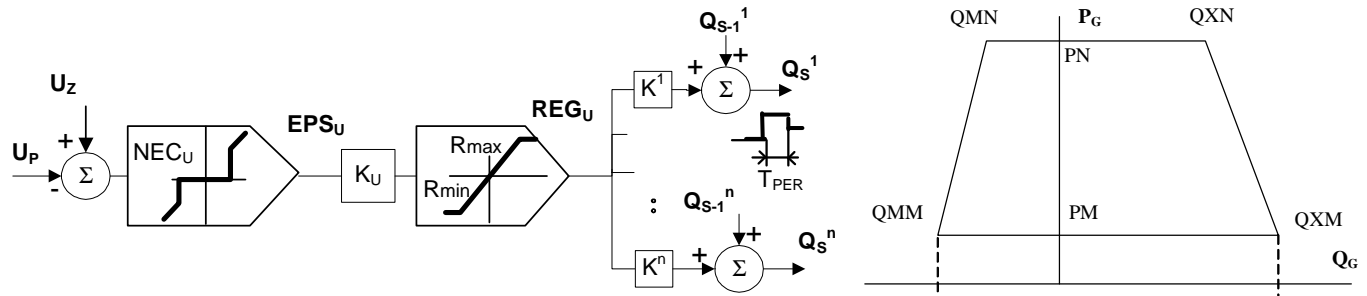
Regulační odchylka  $EPS_R$  se zpracuje v PI regulátoru. Výstup omezovače  $REG_R$  slouží ke generaci korekčních signálů  $Y_1$  až  $Y_n$ . Regulátor tedy může mít až  $n$  výstupů.

Pro každý výstup je nutno zadat tři údaje:

- kod určuje typ korekčního signálu, který se přičítá k zadané hodnotě (1 pro regulátor buzení, 2 pro regulátor pohonu a 3 pro regulační trafo),
- objekt (blok pro kod=1,2 a uzel pro kod=3)
- participační koeficient  $K$ , kterým se násobí  $REG_R$  pro každý z výstupů – korekčních signálů.

## 14.6 Automatická regulace napětí v pilotním uzlu (ARN)

Pod pojmem ARN rozumíme automatickou regulaci napětí v pilotním uzlu. ARN vyhodnocuje odchylku skutečného napětí v pilotním uzlu od zadané hodnoty a určí potřebný jalový výkon  $Q_S$  pro její odregulování. Hodnota požadovaného výkonu je rozesílána na elektrárny, jejichž bloky poskytují podpůrnou službu sekundární regulace U/Q. ARN je modelován podle blokového schématu na následujícím obrázku:



Obr. 81 Blokové schéma modelu ARN s P-Q diagramem vyznačujícím regulační meze Q

Do modelu vstupuje jako regulovaná veličina napětí v pilotním uzlu  $U_P$ , zadanou hodnotou je proměnná  $U_Z$ , která lze měnit během simulace zásahem ARNU. Regulační odchylka je vynásobena zesílením regulátoru  $k_U$ , které odpovídá citlivostnímu koeficientu  $\Delta Q/\Delta U$ . Regulátor má pulzně – integrační charakter. To znamená, že v každé periodě výpočetního cyklu mění ARN přímo požadované hodnoty jalového výkonu  $Q_S$  o regulační odchylku  $REG_U$  vynásobenou participačním koeficientem  $K$  i-tého regulačního bloku (může být až 13 regulačních bloků na jeden pilotní uzel - v Obr. 81 jsou jednotlivé regulační bloky značeny horním indexem  $i$  a stará hodnota je značena spodním indexem -1). ARN tedy mění  $Q_S$  tak dlouho, dokud neodstraní regulační odchylku nebo se nevyčerpá regulační rozsah  $R_{min} - R_{max}$ . ARN řídí  $Q_S$  tak, aby blok nevybočil z mezí svého PQ diagramu. Rozsah  $R_{min} - R_{max}$  a participační koeficienty  $K^i$  závisí na regulační rezervě jednotlivých bloků, které se zjistí z aktuálních výkonů generátoru  $P_G$  a  $Q_G$  pomocí vztahů:

$$R_{min}^i = QMN + (QMM - QMN) / (PN - PM) * (PN - |P_G|) - Q_G \quad \text{pro } |P_G| \geq PM; \quad R_{min}^i = QMM - Q_G \quad \text{pro } |P_G| < PM \quad (62)$$

$$R_{max}^i = QXN + (QXM - QXN) / (PN - PM) * (PN - |P_G|) - Q_G \quad \text{pro } |P_G| \geq PM; \quad R_{max}^i = QXM - Q_G \quad \text{pro } |P_G| < PM$$

Regulační rozsahy činného výkonu  $PM - PN$  a jalového výkonu  $QMM - QXM$  (pro minimální činný výkon  $PM$ ) a  $QMN - QXN$  (pro jmenovitý činný výkon  $PN$ ) jsou vstupní data.

$$R_{min} = \sum R_{min}^i \quad R_{max} = \sum R_{max}^i \quad (63)$$

Za  $R_{min}^i$  se dosadí vztahy [52] při splnění podmínek  $R_{min}^i < 0$  a současně  $U_G^i > 0.95$  jinak nula

Za  $R_{max}^i$  se dosadí vztahy [52] při splnění podmínek  $R_{max}^i > 0$  a současně  $U_G^i < 1.05$  jinak nula.

Participační koeficienty jsou úměrné podílu regulační rezervy na sumárních mezích:

$$k^i = R_{min}^i / R_{min} \quad \text{pro } REG_U < 0 \quad \text{a } k^i = R_{max}^i / R_{max} \quad \text{pro } REG_U > 0 \quad (64)$$

Vstupní data jsou ve vstupním souboru STABIL.DAT. V tabulce je vypis parametrů z úseku ARN.

Poc. Stav	Jmeno ARN	Jmeno Pil. uzlu	Per [s]	Nec [kV]	Uz [kV]	KU [MVar/kV]	Ngen [-]	PM
-----------	-----------	-----------------	---------	----------	---------	--------------	----------	----

Poté následuje Ngen řádků s parametry regulačních bloků:

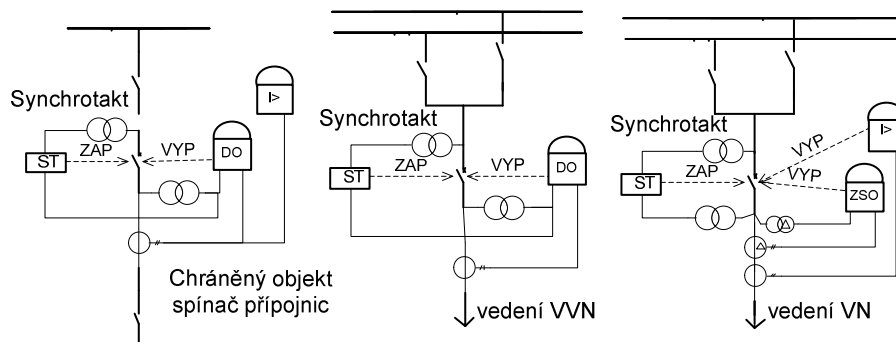
stavG	Blok	QXN [MVar]	QMM [MVar]	QXM [MVar]	QMN [MVar]	PN [MW]	PM [MW]
-------	------	------------	------------	------------	------------	---------	---------

Model ARN reaguje na tři zásahy:

- ‘ARNS’ – mění stavovou proměnnou  $iStav$
- ‘ARNU’ – mění zadanou hodnotu  $U_Z$
- ‘ARNB’ – mění stavovou proměnnou  $iStav^i$  regulačního bloku (zařazuje-vyřazuje blok z regulace)

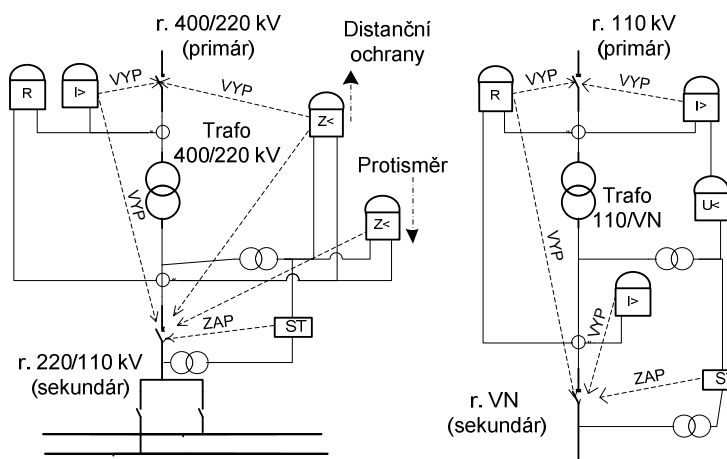
## 14.7 Model vývodu

Model tzv. **vývodu** sdružuje do jednoho objektu univerzální modely distanční (včetně OZ), nadproudové, rozdílové ochrany a synchronizačního zařízení (sychrotaktu). Model **vývodu** je přiřazen jedné straně **větve**, která obecně modeluje vedení, spínače přípojníc a trafo. Jelikož uspořádání ochran se liší pro přenosovou a distribuční soustavu, popíšeme zvlášť schémata pro vedení a trafo. Přístrojové transformátory jsou kresleny jen symbolicky, aby bylo patrné, kde se veličina měří – v modelu nejsou definovány explicitně, ale jsou atributy objektů – (napětí je proměnnou **uzlu** a proud proměnnou **větve**).



**Obr. 82 Schéma modelu vývodu – spínače přípojníc a vedení**

Spínače přípojníc (kombinovaný a příčný spínač přípojníc) pro 400 a 220 kV mají obecně instalovanu distanční a nadproudovou ochranu. Vedení ZVN/VVN jsou chráněna distanční ochranou, zatímco vedení VN nadproudovou a zemní směrovou ochranou. Všechny vývody obsahují sychrotakt popsaný dále.



**Obr. 83 Schéma modelu vývodu – trafo**

U síťových traf (400/110 a 220/110 kV) je vývod přiřazen sekundární straně (straně s nižším napětím). Zóny směrované do trafo (mají tedy kladně zadávané dosahy R a X) vypínají oba vypínače, zatímco zóny do protisměru (mají záporně zadávané nastavení R a X) vypínají jen vypínač na sekundáru (ten musí být ve vstupních datech definován jako první). Nadproudová ochrana je zadávána vždy na primáru a vypíná oba vypínače.

U distribučních traf 110 kV/VN jsou nadproudové ochrany na primáru i sekundáru, přičemž vypínají „svoje“ vypínače. Liší se tím, že 1. stupeň nadproudové ochrany na primáru pouze hlásí (nevypíná vypínač) a druhý stupeň je blokován podpětovou ochranou na sekundáru (standardně nastavenou na 70%  $U_N$ ).

Trafa mohou mít definovanu jednoduchou rozdílovou ochranu s nastavitelným procentním rozdílovým proudem a standardně nastavenou stabilizací (se směrnici 0.4). Rovněž je možno zadat sychrotakt.

Univerzální model distanční ochrany uvažuje zjednodušeně obdélníkové charakteristiky jednotlivých impedančních článků a obsahuje (v závorce je označení parametrů):

- až 5 stupňů článků měřících smyčky fáze - země pro zemní poruchy ( $R_N, X_N$ )
- až 5 stupňů článků měřících smyčky fáze - fáze pro symetrické poruchy ( $R, X$ )
- závoru proti kývání skládající se ze dvou obdélníků IN a OUT ( $R_{IN}, X_{IN}, R_{OUT}, X_{OUT}$ )

Při setrvání měřené impedance v pásmu mezi obdélníky IN a OUT déle než je nastavený čas závora okamžitě blokuje funkci všech impedančních zón kromě první zóny. Při splnění podmínky zvýšeného výskytu nulové složky proudu se funkce závora ukončí (při nesymetrických poruchách není závora proti kývání funkční).

Články pro zemní poruchy se uplatňují při zvýšeném výskytu nulové složky proudu v místě ochrany definované podmínkou:

$$3I_0 \geq 0.2 I_{pn} \quad (65)$$

Při splnění podmínky měří impedanční články zdánlivou impedanci podle vztahu (66). V opačném případě se pro nesymetrické poruchy měří smyčkové impedance  $Z_{NESYM}$  a pro třífázové zkraty sousledné impedance  $Z_{SYM}$  podle (67).

$$Z_{nesymA} = \frac{U_A}{I_A + k_N 3I_0} \quad (66)$$

$$Z_{NESYM} = \frac{U_A - U_B}{I_A - I_B} \quad Z_{SYM} = \frac{U_1}{I_1} \quad (67)$$

Indexy A, B značí fáze, indexy 1 a 0 značí souslednou a netočivou složku.

Základní podklady pro vstupní data tvoří následující údaje:

$I_{pn}$  [A] jmenovitý primární proud přístrojového transformátoru proudu  
 $R$  a  $X$  [ $\Omega$ ],  $T$  [s] rezistenční a reaktanční dosah, čas zpoždění jednotlivých impedančních zón  
 $K_N$  [-] zemní koeficient spočtený s parametru vedení pro souslednou a netočivou složku  
 $T_{blok}$   $T_{vyp}$  a  $T_{zap}$  [s] doby blokování, vypnutí a zapnutí vypínače.

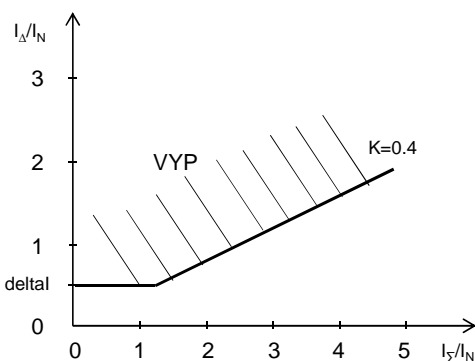
Univerzální model distanční ochrany je přizpůsoben tomu, že bude možno vypnout až čtyři vypínače. Po zapůsobení ochrany (vydání povelu VYP) je možno ochranu zablokovat na dobu  $T_{blok}$ .

Model nadproudové ochrany nezávislé - definované tedy pro každý stupeň (jsou možné tři stupně) jenom dvěma parametry – nastaveným proudem  $I_M$  a časem  $T$ , po který musí být proud větší než nastavení, aby ochrana dala vypínací povel. Ochrana dává pokyn na vypnutí **vypínače** při splnění logické podmínky pro měřený proud  $I_M$  **větve**:

$$I_M > I_L \text{ and } \Delta t > T_L \quad L=1-3 \quad (68)$$

kde  $\Delta t$  je čas uplynulý od popudu ochrany (splnění 1. podmínky).

Nadproudové ochrany budou zadány pro spínače přípojnic a pro trafa. U trafa bude měřen primární proud (t.j. na straně opačného uzlu, jak se měří impedance pro distanční ochranu) a nadproudová ochrana vypíná trafo oboustranně. Správná činnost ochrany tedy bude zaručena, pokud budou vazební trafa modelovány jedním dvouvinutovým trafem nebo jako trojvinutové trafa (ne tedy jako tři dvouvinutová).



Pro trojvinutové nebo distribuční trafo, může být součástí vývodu i rozdílová ochrana, nastavená na hodnotu  $\Delta I$  v procentech jmenovitého proudu se stabilizací podle Obr. 84. Ochrana vypíná, pokud se měřená hodnota rozdílového proudu dostane do šrafované oblasti. Ochrana se dá vypnout volbou  $\Delta I = 100$ .

**Obr. 84 Vypínací charakteristika modelu rozdílové ochrany trafa**

Model zemní směrové ochrany měří netočivou složku napětí **uzlu**  $U_{M0}$  a netočivou složku proudu **větve**  $I_{M0}$ . Ochrana dává povel na vypnutí **vypínače** nebo jenom hlásí při splnění jedné z podmínek:

$$U_{M0} > U_0 \text{ and } I_{M0} > I_0 \text{ and } \Delta t > T \text{ Re}\{U_{M0}^* I_{M0}\} > 0 \text{ pro „směr“} \quad (69)$$

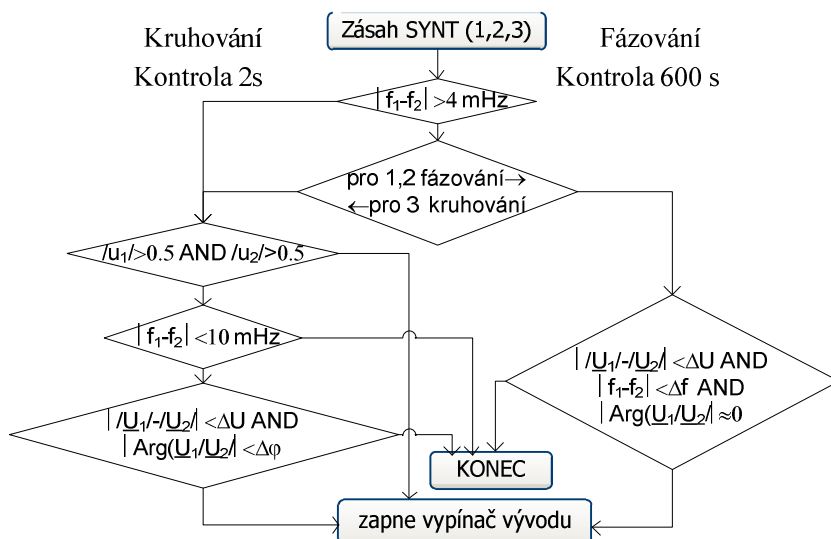
$$U_{M0} > U_0 \text{ and } I_{M0} > I_0 \text{ and } \Delta t > T \text{ and } \text{Re}\{U_{M0}^* I_{M0}\} < 0 \text{ pro „protisměr“}.$$

Poslední člen se kontroluje tok „výkonu“ směrem do vedení nebo naopak pro „protisměr“.



Při zadání parametru IOZ=1 má vývod aktivované jednofázové opětné zapnutí – po jednofázovém zkratu se provede přerušení fáze a po 1,2 s beznapěťové pauze se fáze zapne. Pokud je OZ neúspěšné (zkrat trvá) provede se definitivní třífázové vypnutí.

Model synchrotaktu je znázorněn na Obr. 85 (indexy 1 a 2 rozlišují počáteční a koncový uzel zapínaného prvku): Zásahem 'SYNT' s parametrem 1,2 nebo 3 se synchrotakt uvede do činnosti. Podle hodnoty parametru se uvede do činnosti buď smyčka kruhování (pro 3) nebo fázování (pro 1 se zadá



první sada nastavení  $\Delta f_1$ , pro 2 bude nastavena druhá sada  $\Delta f_2$ ). Synchronizační podmínky jsou kontrolovány po dobu 2s pro kruhování a 600 s pro fázování (tyto časy jsou v modelu zadány natvrdo a nedají se parametrizovat). Pro malé odchylky frekvence při fázování synchrotakt automaticky přechází do režimu kruhování. Pro malé napětí  $< 50\% U_n$  synchrotakt zapíná ihned. Při splnění synchronizačních podmínek se dá povel na zapnutí vypnutého vypínače. Při nesplnění podmínek v daném čase se činnost synchroaktu ukončí.

**Obr. 85** Algoritmus modelu synchrotaktu

Model vývodu se ovládá těmito **zásahy**.

- 'DIST' – mění stavovou proměnnou iStav
- 'SYNT' – spouští synchrotakt v režimu kruhování nebo fázování pro daný vypínač

Vstupní data pro model vývodu jsou uložena v samostatné sekci souboru AUTOMAT.DAT – Úvodní řádek je společný celému **vývodu**. Další podrobnosti jsou v Uživatelské příručce.

Stav	Jmeno	JmObj	JmUzl	JmVyp1	..	JmVypN	Ttyp	Tzap	Tblok	Ipn	KN	Ncl	NSO	NAO	NI	NSS	NAS	IOZ	deltal	NI2	NZS
							[s]	[s]	[s]	[A]									[%]		

Proměnou Stav=0 se distanční ochrana vyřadí z činnosti. Další řetězce definují jméno **vývodu**, jméno chráněného objektu (**větve** nebo trojvinutového trafa), jméno **uzlu** (u vedení určuje místo měření napětí, u trafa i místo měření proudu) a až 3 vypínače (u trafa musí být vypínač na sekundáru definován jako první). Pokud se jako jméno vypínače uvede přímo chráněné vedení, vypíná ochrana vedení oboustranně, pokud je na vedení zkrat a jednostranně pokud tam zkrat není.

Za tímto řádkem následuje Ncl řádků nastavení zón distanční ochrany (parametry NSO a NAO se zadávají standartně rovny 1): Každá zóna má svoji stavovou proměnnou StavC (hodnotou 0 se zóna ve výchozím stavu vypne – není funkční), jedna sada nastavení se skládá z impedančních dosahů X, R pro symetrické a XN, RN pro nesymetrické poruchy a zpoždění T: StavC X R XN RN T

Články ukončuje závora proti kývání: StavC X<sub>IN</sub> R<sub>IN</sub> X<sub>OUT</sub> R<sub>OUT</sub> T

Pokud se zadá IOZ=-1, je nutno zadat specifickou tzv. 6 zónu, která aktivuje automatiku OZ (viz kapitola 14.8) a má ji definovanou jako další parametr Stav<sub>6</sub> X R XN RN T JmenoOZ

Pro funkční nadproudovou ochranu (NI=2 pro dvoustupňovou a NI=3 pro třístupňovou) následuje řádek parametrů jednotlivých stupňů: Stav<sub>1</sub> I<sub>1</sub> I<sub>2</sub> I<sub>3</sub> T<sub>1</sub> T<sub>2</sub> T<sub>3</sub>

Pokud má vývod trafa definovanou i nadproudovou ochranu na sekundáru (NI2>0) následuje řádek jejího nastavení: Stav<sub>1 2</sub> I<sub>1</sub> I<sub>2</sub> I<sub>3</sub> T<sub>1</sub> T<sub>2</sub> T<sub>3</sub>

Pokud má vývod s vedením definovanou zemní směrovou ochranu (NZS=1) následuje řádek jejího nastavení (Parametr smer má hodnotu 1 pro „směr“ a -1 pro „protisměr“): Stav<sub>ZSO</sub> U<sub>0</sub> I<sub>0</sub> smer T

Pro funkční synchrotakt NSS=1 (současně se zadá NAS =1) následuje řádek nastavení synchrotaktu: Stav<sub>s</sub> dU dfi df1 df2.

## 14.8 Automatika opětného zapnutí (AOZ)

Model AOZ je aktivován popudem speciální 6. zóny distanční ochrany (je součástí **objektu vývod**) a provede vypnutí nebo zapnutí **vypínače** při splnění jedné z těchto podmínek:

$$\Delta t > T1 \quad \text{pro vypnutí} \quad (70)$$

$\Delta t > T1 + T2$  pro zapnutí a volbách „OZ provoz 1p“ or „OZ provoz 1p+3p“ pro 1fázové poruchy

$\Delta t > T1 + T2'$  pro zapnutí a volbách „OZ provoz 3p“ or „OZ provoz 1p+3p“ pro vícefázové poruchy

kde  $\Delta t$  je čas uplynulý od povelu DO nebo NO na vypnutí.

Pokud je AOZ ve stavu VYP ( $Stav_{ROZ}=0$ ) provede se jen třífázové vypnutí bez zpoždění. Při jednofázové poruše a volbách „provoz 1p“ ( $Stav_{ROZ}=1$ ) nebo „provoz 1p+3p“ ( $Stav_{ROZ}=4$ ) se vypíná a zapíná jen postižená fáze, pro „provoz 3p“ ( $Stav_{ROZ}=3$ ) je vypnutí i zapnutí trojfázové. Jestliže dojde během doby  $T3$  od zapnutí **vypínače** k dalšímu požadavku DO na vypnutí, pak AOZ bez zpoždění vypne **vypínače**. Následující řádek ukazuje vstupní data pro model AOZ v souboru AUTOMAT.DAT:

Stav <sub>ROZ</sub>	JmenoOZ	JmVyp	T1[s]	T2[s]	T2' [s]	T3[s]	Tvyp [s]
---------------------	---------	-------	-------	-------	---------	-------	----------

## 14.9 Automatika pro synchronizované spínání (FA)

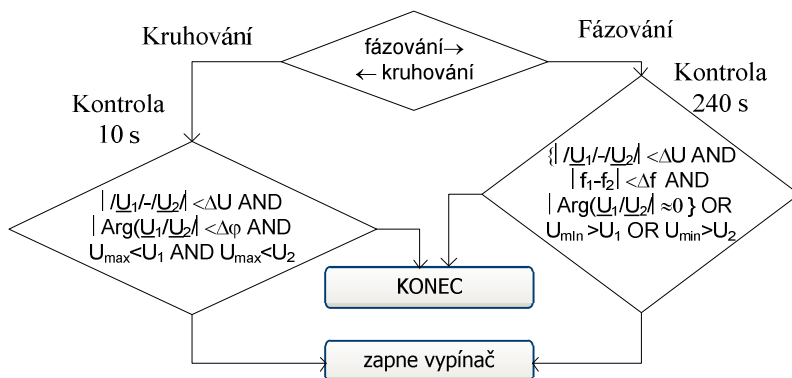
Automatika měří amplitudu, fázi a frekvenci napětí  $U1$  a  $U2$  po obou stranách **vypínače** a dá povel na jeho zapnutí při splnění následujících podmínek pro fázování (pro 1. sadu nastavení):

$$|U1-U2| < \Delta U \quad \text{and} \quad |f1-f2| < \Delta f \quad \text{and} \quad |\phi1-\phi2| < \Delta \phi \quad \text{and} \quad U_{max} < U1 \quad \text{and} \quad U_{max} < U2 \quad (71)$$

Pro kruhování se použijí ostatní sady (maximálně 7):

$$|U1-U2| < \Delta U_i \quad \text{and} \quad |\phi1-\phi2| < \Delta \phi_i \quad \text{and} \quad U_{max} < U1 \quad \text{and} \quad U_{max} < U2 \quad \text{or} \quad U2 < U_{min} \quad \text{or} \quad U1 < U_{min} \quad (72)$$

Doba kontroly je naprogramována na 240 s pro fázování a 10 s pro kruhování.



Obr. 86 Algoritmus modelu fázovací automatiky

Následující řádek ukazuje vstupní data modelu v sekci FA v souboru AUTOMAT.DAT:

StavFA	JmenoFA	JmVyp	Ns	Umin[kV]	Umax[kV]	dU[kV]	dφ [°]	df [Hz]	dU <sub>i</sub> [kV]	dφ <sub>i</sub> [°]
--------	---------	-------	----	----------	----------	--------	--------	---------	----------------------	---------------------

Za dvojice  $\Delta U_i$  a  $\Delta \phi_i$  se dosazuje dvojice hodnot pro  $N_s$  kruhovacích sad.

## 14.10 Model rozdílové ochrany (RO)

Model rozdílové ochrany má na vstupu až 20 měřených proudů (fázorů). Ochrana dává povel na vypnutí  $N$  **vypínačů** (maximálně 20), překročí-li fázorový součet všech proudů stabilizovaný rozdílový proud  $\Delta I$ :

$$|\sum I_i| > \Delta I \quad \Delta I = \max \{ K_{st} \sum |I_i|, dI \} \quad (73)$$

Následující řádek ukazuje vstupní data modelu v sekci rozdílových ochran:

StavRO	JmenoRO	JmenoV1	..	JmenoVN	JmVyp1	..	JmVypN	dI [A]	Tvyp [s]	Kst
--------	---------	---------	----	---------	--------	----	--------	--------	----------	-----

## 14.11 Model frekvenční ochrany

Model frekvenční ochrany má jedno měření frekvence v **uzlu**. Ochrana dává povel na vypnutí až **N vypínačů** (max. 20) při splnění některé z podmínek:

$$\begin{aligned} f_M > f_{NI} \text{ and } \Delta t > T_{NI} & \text{ pro } N_N \text{ nadfrekvenčních stupňů (max. 2)} \\ f_M < f_{PI} \text{ and } \Delta t > T_{PI} & \text{ pro } N_P \text{ podfrekvenčních stupňů (max. 4)} \\ |df_M/dt| > df_I \text{ and } \Delta t > T_{DI} & \text{ pro } N_D \text{ derivačních stupňů (max. 2)} \end{aligned} \quad (74)$$

Následující řádka ukazuje data modelu v sekci frekvenčních ochran souboru AUTOMAT.DAT:

StavFO	JmenoFO	JmenoUz	JmVyp1	..	JmVypN	N <sub>N</sub>	N <sub>P</sub>	N <sub>D</sub>	f <sub>NI</sub> [Hz]	t <sub>NI</sub> [s]	f <sub>PI</sub> [Hz]	t <sub>PI</sub> [s]	f <sub>DI</sub> [Hz/s]	t <sub>DI</sub> [s]	Tvyp [s]
--------	---------	---------	--------	----	--------	----------------	----------------	----------------	----------------------	---------------------	----------------------	---------------------	------------------------	---------------------	----------

Za  $f_i$  a  $t_i$  se dosazují dvojice hodnot mezí a časů pro příslušný počet stupňů  $N_N$ ,  $N_P$  a  $N_D$ .

## 14.12 Ochrany generátoru

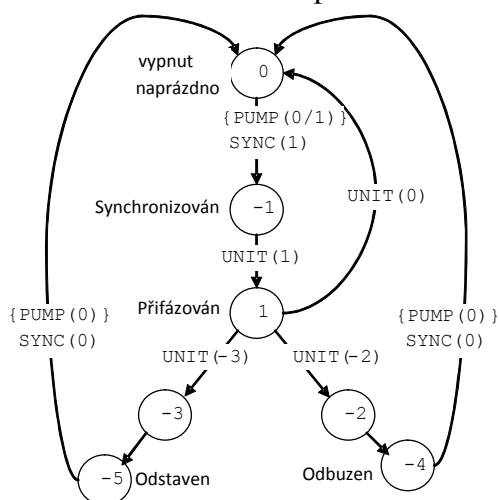
Model **bloku** nyní zahrnuje tyto ochrany a automatiky:

- proti prokluzu rotoru – vypíná vypínač generátoru, zapíná urychlovač, zapíná odbuzovač (odbuzení bloku)
- zpětnou wattovou - vypíná vypínač generátoru, působí rychlozávěr, zapíná odbuzovač (odstavění bloku)
- turbíny – vypíná vypínač generátoru při velkých odchylkách otáček (pro vodní turbíny odstavuje)
- přeběhové relé – dočasně zavírá přívod páry u parních turbín při překročení zadaného zrychlení
- frekvenční relé – přepne regulaci vodní, plynové a parní turbíny do proporcionální regulace otáček
- napětíovou – při nárůstu a poklesu svorkového napětí

Všechny ochrany kromě poslední jsou funkční jen pro zapnuté bloky. Podpětová ochrana funguje i pro vypnuté bloky a simuluje vlastně činnost podpět'ové ochrany na vlastní spotřebě (VS). Výjimku tvoří bloky, které jsou schopny najetí ze tmy (blackstart). U nich se předpokládá napájení VS z nezávislého zdroje a podpět'ová ochrana je neodstavuje, pokud jsou vypnuty. Mohou se tedy přifázovat i do sítě, kde je nulové napětí. Tyto bloky musí mít příznak schopnosti blackstartu v typových parametrech modelu regulátoru buzení. V následující tabulce jsou uvedeny podmínky působení jednotlivých ochran:

Ochrana/automatika	Podmínky	Aktivní na blocích
proti prokluzu rotoru	$ DREL  > 4\pi$ $ SG  > 0.025$	příznak v typových parametrech modelu generátoru
zpětná wattová	$PG < -0.025$ $\Delta t > 2s$	příznak v typových parametrech modelu generátoru
nadotáčky	$SG > 0.1$ , $\Delta t > 5s$ (pro vody 30s)	pro všechny bloky
podotáčky	$SG < -0.08$ , $\Delta t > 5s$	pro všechny bloky
přeběhové relé	$dSG/dt > 0.05$ $SG > 0.0$	příznak v typových parametrech modelu turbíny
frekvenční relé 1. <sup>o</sup>	$ df  > df_{ROP}^1$ , $\Delta t > t_{ROP}$	příznak v parametrech přídatných automatik turbín
podpět'ová	$U/U_0 < 0.7$ , $\Delta t > 5s$	příznak v typových parametrech modelu generátoru
nadpět'ová	$UGEN > 1.3$ , $\Delta t > 1s$	příznak v typových parametrech modelu generátoru

Příznakem se rozumí záporná hodnota pořadového čísla sady typových parametrů v katalogu. V



souvislosti s činností ochran byly zavedeny nové stavy odbuzován/odbuzen (-2/-4) a odstavován/odstaven (-3/-5). Do stavů -2 a -3 se blok dostane po zapůsobení ochran. Do stavů -4 a -5 se blok dostává po poklesu svorkového napětí  $UGEN$  pod 0.01 a poklesu otáček pod 0.01 pj. Poté se dá blok najet zásahem SYNC s parametrem 0. Přechody bloku jsou znázorněny na obrázku.

**Obr. 87 Stavový diagram bloku s možnými přechody**

<sup>1</sup> pokud se parametry explicitně nezadají (viz kap. 7.1.7) použije se standardní nastavení  $\pm 200$  mHz bez zpoždění

## **15. Závěr**

Autor doufá, že tento Popis modelování provozu elektrizační soustavy přinesl čitateli nové poznatky a bude vděčný za všechny náměty a připomínky.

Uživatel programu zde získává základní informace a přehled o modelech dostupných v programu MODES. Praktické pokyny pro práci s programem najde uživatel v Příručce uživatele. V Průvodci použití je uveden metodický postup při využívání MODESu na jednotlivých praktických příkladech.

## Literatura

- [1] J. Arrillaga a kol.: Computer Modelling of Electrical Power System; John Willey & Sons ; 1983
- [2] J.E.Gurevič a kol.: Rasčoty ustojčivosti a protivarijnoj automatiky v energosistěmach; Energoatomizdat 1990
- [3] O. Hora a kol: Regulační a budící systémy synchronních strojů; SNTL; 1985
- [4] IEEE Committee Report: Excitation System Models for Power System Stability Studies; IEEE PAS No 2; 1981
- [5] K. Máslo: Model soustavy synchronní generátor - můstkový usměrňovač; Interní materiál EGÚ Praha; 1988
- [6] IEEE Working Group Report: Dynamic Models for Fossil Fuelled Steam Units in Power System Studies; IEEE PAS No2; 1991
- [7] IEEE Working Group Report: Hydraulic Turbine and Turbine Control Models for System Dynamic Studies; IEEE PAS No1;1992
- [8] F.P. Mello: Boiler Models for System Dynamic Performance Studies; IEEE PAS No1 ;1991
- [9] J. Doležal a kol.: Elektrárny II; Doplnkové skriptum ČVUT Praha; 1989
- [10] V. Kola a kol.: Power Plant Models for Operator Training Simulator; IEEE Pas No2.; 1989
- [11] K. Máslo a kol.: Systematizace a kvantifikace regulačních potřeb ES ČSFR pro regulaci P a f; Zpráva EGÚ Praha; 1991
- [12] J. Měřička, Z. Zoubek: Obecná teorie elektrického stroje; SNTL Praha; 1973
- [13] M. Ferenc a kol.: Uproszczony model matematyczny dynamiki srednoobrotowego silnika wysokopreznego; Silniki spalinowe No4; 1989
- [14] P. Kundur: Power System Stability and Control; McGraw-Hill; 1993
- [15] A. Keyhani H.Tsai: IGSPICE simulation of induction machines with saturable inductance; IEEE Transaction on Energy Conversion No 1; 1989
- [16] P. A. Anderson: Analysis of faulted power system, IEEE PRESS, 1973
- [17] J. Hájek. Přechodné jevy v ES, skriptum VŠSE, Plzeň; 1983
- [18] ČSN 33 3020: Výpočet poměrů při zkratech v trojfázové ES, Úřad pro normalizaci a měření, Praha 1992
- [19] Z. Trojánek, J. Hájek, P. Kvasnica: Přechodné jevy v elektrizačních soustavách, SNTL/ALFA ,1987
- [20] D. Karlson a D.J. Hill.: Modelling and identification of nonlinear dynamic loads in power systems, IEEE PAS No1 ; 1994
- [21] A. Borghetti a kol.: Black-start simulation of a repowered thermoelectric unit representation on the IFAC conference, Brussels 2000
- [22] J. Tamura, M. Ueno, Y. Matsumura, Shin-ichi Kimoto: Transient Stability Simulation of Power System Including Wind Generator by PSCAD/EMTDC, IEEE Power Tech Conference, Porto, 2001
- [23] B. Price: Wind Turbine Generators Technology -Performance –Issues Modeling, prezentace na setkání uživatelů programu PSLF, San Diego Kalifornie, duben 2004
- [24] Z. Huang at al.: Application of UPFC in Interconnected Power Systems – Modeling, Interface, Control Strategy and Case Study, IEEE Transaction on Power Systems, Vol. 15, No2, May 2000
- [25] N. Dizdarevic, G. Anderson: Power flow regulation by use of UPFC's injection model, IEEE Power Tech '99 Conference, 1999 Budapest
- [26] V. Akhmatov: Analysis of Dynamic Behaviour of Electric Power System with Large Amount of Wind Power, disertační práce [www.bibliotek.dtu.dk/upload/centre/cet/projekter/05-va-thesis.pdf](http://www.bibliotek.dtu.dk/upload/centre/cet/projekter/05-va-thesis.pdf)
- [27] J.G. Slootweg , H. Polinder, W.L. Kling, "Reduced Order Models of Actual Wind TurbineConcepts", IEEE Young Researchers Symposium, 7-8 February, 2002, Leuven
- [28] K. Clark, N. W. Miller, J. J. Sanchez-Gasca: Modeling of GE Wind Turbine-Generators for Grid Studies, GE Energy report Version 4.4, 2009
- [29] K. Clark, N. W. Miller, J. J. Sanchez-Gasca: Modeling of GE Solar Photovoltaic Plants for Grid Studies, GE Energy report Version 1, 2009
- [30] K. Máslo, A. Kasembe: Matematické metody využitelné pro dispečerské řízení -vliv transformátorů s regulací fáze, sborník V. mez vědeckého symposia Elektroenergetika, St. Lesná, září 2009

**Obsah:**

<b>1. ÚVOD</b>	<b>3</b>
<b>2. MODEL ELEKTRIZAČNÍ SOUSTAVY (ES)</b>	<b>4</b>
2.1 MODEL BLOKU	6
<b>3. MODEL SÍTĚ</b>	<b>7</b>
3.1 VĚTEV	7
3.2 ZKRAT	8
3.3 ROZPOJENÍ FÁZE	8
3.4 SLOŽKOVÉ SOUSTAVY	8
3.5 PŘEPÍNÁNÍ ODBOČEK TRAFU (HRT)	10
3.6 MODEL TROJVINUŤOVÉHO TRAFU	11
3.7 MODEL UPFC	13
3.8 MODEL KOMPENZAČNÍCH PROSTŘEDKŮ	14
<b>4. MODELOVÁNÍ ZÁTĚŽE</b>	<b>15</b>
4.1 STATICKÝ MODEL ZÁTĚŽE	15
4.2 EKVIVALENTNÍ ASYNCHRONNÍ MOTOR	16
4.3 DYNAMICKÝ MODEL ZÁTĚŽE	16
4.4 KONSTANTNÍ ADMITANCE	CHYBA! ZÁLOŽKA NENÍ DEFINOVÁNA.
4.5 VLASTNÍ SPOTŘEBA BLOKU	17
4.6 FREKVENČNÍ ODLEHČOVÁNÍ	17
<b>5. MODEL GENERÁTORU</b>	<b>18</b>
5.1 ROVNICE SYNCHRONNÍHO STROJE	18
5.2 VAZBA GENERÁTORU A SÍTĚ A ŘÍDÍCÍ VELIČINY	20
5.3 SYNCHRONNÍ STROJ S PERMANENTNÍMI MAGNETY A PLNOVÝKONOVÝM MĚNIČEM	21
<b>6. MODELOVÁNÍ BUZENÍ</b>	<b>22</b>
6.1 REGULÁTOR BUZENÍ	22
6.1.1 Omezovač proudu	24
6.1.2 Hlídač meze podbuzení	25
6.1.3 Regulátor jalového výkonu	25
6.1.4 Systémový stabilizátor	26
6.2 BUDIČE	27
6.2.1 Stejnoseměrný budič	28
6.2.2 Střídavý budič	29
6.2.3 Tyristorové buzení	30
6.2.4 Kompaundované buzení	30
6.3 STANDARDNÍ MODEL BUZENÍ	31
6.4 ZJIŠTĚNÍ PARAMETRŮ MODELŮ	31
<b>7. PARNÍ TURBÍNA</b>	<b>32</b>
7.1 REGULÁTOR PARNÍ TURBÍNY	32
7.1.1 Zavřená regulační smyčka	34
7.1.2 Otevřená regulační smyčka	35
7.1.3 Otáčková regulace	36
7.1.4 Rychlé zavírání ventilů	36
7.1.5 Ostrovní regulace	37
7.1.6 Jaderný blok	38
7.1.7 Regulátor ostrovního provozu (ROP)	38
7.2 MODEL PARNÍ TURBÍNY	39
7.3 MODEL KOTLE	40
7.4 MODEL JADERNÉHO REAKTORU	41
7.5 ZJEDNODUŠENÝ MODEL POHONU	41
<b>8. VODNÍ TURBÍNA</b>	<b>42</b>
8.1 VÝKONOVÁ REGULACE	42
8.2 OTÁČKOVÁ REGULACE	42
8.3 MODEL VODNÍ TURBÍNY	44
8.4 PŘEHLED REŽIMŮ REGULACE TURBÍNY	44
<b>9. MODEL DIESELGENERÁTORU</b>	<b>45</b>
<b>10. MODEL PLYNOVÉ TURBÍNY</b>	<b>46</b>
10.1 ZDOKONALENÝ MODEL PLYNOVÉ TURBÍNY V PAROPLYNOVÉM CYKLU	46
<b>11. MODEL VĚTRNÉ TURBÍNY</b>	<b>48</b>
11.1 ZDOKONALENÝ MODEL VĚTRNÉ TURBÍNY WIND	48
<b>12. MODEL ASYNCHRONNÍHO BLOKU</b>	<b>50</b>
12.1 ROVNICE ASYNCHRONNÍHO STROJE	50
12.2 MODEL ASYNCHRONNÍHO STROJE NAPÁJENÉHO DO ROTORU FREKVENČNÍM MĚNIČEM	53
12.3 ROVNICE PROTIMOMENTU	54
12.3.1 Polynomická závislost	54
12.3.2 Model se zpětnou klapkou	54
12.3.3 Po úsecích lineární model	54
<b>13. MODEL FOTOVOLTAICKÉ ELEKTRÁRNY (FVE)</b>	<b>55</b>

<b>14. ŘÍZENÍ A OCHRANY ES</b>	<b>57</b>
14.1 CENTRÁLNÍ REGULÁTOR P A F	57
14.2 MODEL AUTOMATIK	59
14.3 LOGIKY	61
14.4 EXTERNÍ STABILIZÁTORY	61
14.5 EXTERNÍ REGULÁTORY	61
14.6 AUTOMATICKÁ REGULACE NAPĚTÍ V PILOTNÍM UZLU (ARN)	62
14.7 MODEL VÝVODU	63
14.8 AUTOMATIKA OPĚTNÉHO ZAPNUTÍ (AOZ)	66
14.9 AUTOMATIKA PRO SYNCHRONIZOVANÉ SPÍNÁNÍ (FA)	66
14.10 MODEL ROZDÍLOVÉ OCHRANY (RO)	66
14.11 MODEL FREKVENČNÍ OCHRANY	67
14.12 OCHRANY GENERÁTORU	67
<b>15. ZÁVĚR</b>	<b>68</b>