

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA VÝKONOVÉ ELEKTRONIKY A STROJŮ**

# **BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**Funkce výkonového stabilizátoru v energetických  
modelech**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2020/2021

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Dominik Karel KADLEC**  
Osobní číslo: **E17B0021P**  
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Elektrotechnika a energetika**  
Téma práce: **Funkce výkonového stabilizátoru v energetických modelech**  
Zadávající katedra: **Katedra výkonové elektroniky a strojů**

### Zásady pro vypracování

1. Popište funkci výkonového stabilizátoru v energetických modelech.
2. Popište možnosti modelování výkonových stabilizátorů.
3. Na vybraném přechodném ději porovnejte model obsahující a neobsahující výkonový stabilizátor.

Rozsah bakalářské práce: **30 – 40 stran**  
Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**  
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

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

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Martin Vinš**  
Regionální inovační centrum elektrotechniky

Datum zadání bakalářské práce: **9. října 2020**  
Termín odevzdání bakalářské práce: **27. května 2021**



L.S.

  
\_\_\_\_\_  
**Prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.**  
děkan

  
\_\_\_\_\_  
**Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.**  
vedoucí katedry

V Plzni dne 9. října 2010

## **Abstrakt**

Tato předkládaná bakalářská práce je zaměřena na funkci výkonových stabilizátorů. Na začátku práce jsou obecně popsány synchronní stroje a budicí soustavy, pro vysvětlení principu a použití výkonových stabilizátorů. Jsou zde specifikovány základní komponenty, které se vyskytují ve většině modelů výkonových stabilizátorů. Dále zde je obecně popsán popis způsobu ladění výkonových stabilizátorů spolu s konkrétním popsáním použitých typů PSS1A a PSS2A. Praktickou část práce tvoří simulační ověření funkce výkonového stabilizátoru v energetickém modelu sestaveném v simulačním rozhraní Simulink (MATLAB).

## **Klíčová slova**

výkonový stabilizátor, PSS, alternátor, synchronní stroj, elektrizační soustava, stabilizace oscilací, turboalternátor, budicí systém, PSS1A, PSS2A

## **Abstract**

This presented bachelor thesis is focused on the function of power stabilizers. At the beginning of the bachelor thesis, synchronous machine and excitation systems are generally described, to explain the principle and use of power stabilizers. The basic components that occur in most models of power stabilizers, are specified here. Furthermore, a description of the method of tuning the power stabilizer is generally described here together with a description of the types PSS1A and PSS2A used. The practical part of the bachelor theses consists of simulation verification of function of power stabilizer in the energy model compiled in the simulation interface Simulink (MATLAB).

## **Key words**

Power Stabilizer, PSS, Synchronous Machine, Electrical System, Oscillation Stabilization, Excitation System, PSS1A, PSS2A

## **Prohlášení**

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

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

.....

podpis

V Plzni dne 25.5.2021

D. K. Kadlec

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Martinu Vinšovi za jeho nenahraditelné profesionální rady, připomínky a klidné metodické vedení. Bez takového přístupu bych bakalářskou práci vypracovával jen stěží. Dále bych chtěl poděkovat své rodině, která mě při psaní práce podporovala.

# Obsah

<b>OBSAH</b> .....	<b>8</b>
<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK</b> .....	<b>9</b>
<b>ÚVOD</b> .....	<b>11</b>
<b>1 ÚVOD DO ENERGETICKÝCH SYSTÉMŮ</b> .....	<b>12</b>
1.1 BUDÍCÍ SYSTÉMY SYNCHRONNÍCH GENERÁTORŮ.....	14
1.1.1 Regulace budicích systémů.....	14
1.1.2 Druhy budicích systémů.....	15
<b>2 VÝKONOVÉ STABILIZÁTORY</b> .....	<b>20</b>
2.1 FUNKCE VÝKONOVÉHO STABILIZÁTORU.....	23
2.2 LADĚNÍ VÝKONOVÝCH STABILIZÁTORŮ.....	25
2.2.1 Fázová kompenzace.....	25
2.2.2 Nastavení filtrů horní a dolní propust.....	27
2.2.3 Nastavení zesílení.....	29
2.2.4 Výstupní omezení.....	29
2.3 TYPY VÝKONOVÝCH STABILIZÁTORŮ.....	29
2.3.1 Jedno-vstupový výkonový stabilizátor typu PSS1A.....	30
2.3.2 Dvou-vstupový výkonový stabilizátor typu PSS2A.....	30
<b>3 POUŽITÍ VÝKONOVÉHO STABILIZÁTORU V ENERGETICKÉM MODELU</b> .....	<b>32</b>
3.1 POPIS BLOKŮ ENERGETICKÉHO MODELU.....	32
3.1.1 Blok Turbíny.....	33
3.1.2 Blok Budicí soustavy.....	36
3.1.3 Blok Alternátoru.....	37
3.1.4 Parametry výkonových stabilizátorů.....	39
3.1.5 Blok elektrizační soustavy.....	40
3.2 ZAPOJENÍ ENERGETICKÉHO MODELU V PROGRAMU.....	42
3.3 SIMULACE.....	43
<b>ZÁVĚR</b> .....	<b>47</b>
<b>SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ</b> .....	<b>1</b>



## Seznam symbolů a zkratk

$C$ .....	Kapacita kondenzátoru (F)
$f$ .....	Frekvence (Hz)
$I_b$ .....	Budicí proud (A)
$J$ .....	Moment setrvačnosti ( $kg \cdot m^2$ )
$l$ .....	Délka (m)
$M$ .....	Moment (Nm)
$M_{max}$ .....	Maximální moment (Nm)
$n_s$ .....	Synchronní otáčky točivého magnetického pole (ot/min)
$P_e$ .....	Elektrický výkon (W)
$P_m$ .....	Mechanický výkon (W)
$P_{max}$ .....	Maximální výkon (W)
$p$ .....	Počet pólových dvojic
$Q$ .....	Jalový výkon (VAr)
$r$ .....	Poloměr (m)
$T_0$ .....	Napěťová odezva budicího systému (s)
$\Delta T_{e2}$ .....	Moment vytvářený vnuceným proudem do budicího vinutí (s)
$t$ .....	Čas (s)
$U$ .....	Svorkové statorové napětí (V)
$U_{ib}$ .....	Indukované budicí napětí (V)
$u_i$ .....	Indukované napětí (V)
$v_x$ .....	Rychlost ( $\frac{m}{s}$ )
$X_c$ .....	Kapacitní reaktance ( $\Omega$ )
$X_d$ .....	Synchronní reaktance ( $\Omega$ )
$\delta$ .....	Zátěžný úhel ( $^\circ$ )
$\Psi$ .....	Magnetický tok (Wb)
$\omega$ .....	Úhlová rychlost ( $\frac{rad}{s}$ )
$\Delta\omega$ .....	Odchylka od synchronní rychlosti rotoru ( $\frac{rad}{s}$ )

## **Seznam zkratek:**

*B* ..... Magnetická indukce

*BS* ..... Budicí systém

*ES* ..... Elektrizáční soustava

*GEP* ..... Generator, Excitation System, Power System – přenosová funkce  
regulátoru buzení, alternátoru a přenosové soustavy

*MATLAB* ..... Matrix Laboratory

*NERC* ..... North American Electric Reliability Council – severoamerická elektrická  
společnost, viz GEP

*PSS* ..... Power System Stabilizer – Výkonový stabilizátor

*WECC* ..... Western Electricity Coordinating Council – západní koordináční rada pro  
elektrinu, viz GEP

## Úvod

Tato předkládaná bakalářská práce je zaměřena na ověření funkce výkonových stabilizátorů, které je demonstrativně provedeno na vybraném energetickém modelu.

Práce je celkem rozdělena do tří částí. První část se zabývá obecným úvodem do energetických systémů, kde je také uveden obecný popis budicích systémů. Je zde kladen důraz na popis regulace buzení synchronních strojů a zároveň i na vysvětlení, proč a u jakých budicích soustav se výkonové stabilizátory používají. Pro obecnější seznámení s budicími systémy jsou zde rozepsány i jejich základní typy.

Druhá část popisuje funkci výkonového stabilizátoru. Zde je obecný popis, funkce výkonového stabilizátoru a princip stabilizace nežádoucích oscilací. Dále je popsán princip ladění výkonových stabilizátorů, a jejich základních částí, které jsou obsaženy téměř u všech typů. Na konci druhé části je uveden detailní popis konkrétních typů výkonových stabilizátorů PSS1A a PSS2A, které byly použity i v následných simulacích.

Třetí část se zaměřuje na simulace výkonových stabilizátorů v energetickém modelu za použití simulačního prostředí Simulink. V této kapitole je uveden popis jednotlivých komponent, dílčích částí, subsystémů a prvků, které jsou v energetickém modelu použity. Na konci kapitoly jsou uvedeny výsledky simulací, které jsou posouzeny a diskutovány. V závěru bakalářské práce je zhodnocen efekt jednotlivých typů výkonových stabilizátorů v energetickém modelu a též i výsledků simulace.

# 1 Úvod do energetických systémů

Synchronní stroje se v energetice převážně využívají jako generátory, které přeměňují mechanickou energii na energii elektrickou. Též se synchronní generátor označuje jako alternátor, který generuje střídavé napětí a dnes je obsažen téměř ve všech elektrárnách. Výjimky mohou například tvořit solární elektrárny, kde je pro transformaci stejnosměrné fotovoltaické energie na střídavou energii používán měnič. Alternátory lze nalézt i mimo samotné elektrárny. V daleko menších provedeních se používají například v automobilech. Může být použito mnoho zdrojů mechanické energie s čímž se zároveň určují rozdílné nároky na samotnou konstrukci alternátorů. Konstrukcí lze alternátory zjednodušeně rozlišovat na turboalternátory, které z pravidla pohání parní nebo plynová turbína a hydroalternátory, které pohání turbína vodní [2]. V této bakalářské práci je konkrétně kladen důraz na parní turbíny.

Konstrukčně se alternátor skládá ze dvou hlavních částí, a to z rotoru a statoru. Rotor je tvořen z točivého tělesa, které může být spojeno například s hřídelí parní turbíny, a budicího vinutí, které se podle konstrukce umísťuje buď na vyniklé póly či přímo do materiálu rotoru, pokud se jedná o rotor s hladkým povrchem [1]. Stator je tvořen pevnou netočivou konstrukcí s drážkami, ve kterých jsou podobně jako u asynchronních strojů umístěná statická statorová vinutí [2]. Princip alternátoru spočívá v indukci točivého pole, které se v tomto případě indukuje točivým pohybem rotorového magnetického pole kolem vodičů statoru. Tím vzniká dle konstrukčního uložení tří cívek navzájem od sebe prostorově pootočených o  $120^\circ$ , třífázové střídavé napětí. Hodnota okamžitého indukovaného napětí ve statorovém vinutí může být určena podle indukčního zákona [8]:

$$u_i = B \cdot l \cdot v_x = B \cdot l \cdot v \cdot \sin(\omega t) = B \cdot l \cdot \omega \cdot r \cdot \sin(\omega t) \quad \left(V; T, m, \frac{m}{s}\right) \quad (1.1)$$

Pro zajištění konstantního toku v rotoru musí být v rotoru alternátoru obsaženo buzení. To může být realizováno buď jako permanentní magnet, nebo elektromagneticky. Permanentní magnety se používají u menších strojů, kde není vyžadována regulace buzení. U větších strojů jako jsou například alternátory v elektrárnách se používají elektromagnety, u nichž lze hodnotu buzení řídit.

Budící vinutí je pomocí budící soustavy (BS) napájeno stejnosměrným proudem, díky čemuž v něm nedochází ke změně toku, dle vztahu:

$$\frac{d\Psi}{dt} = 0 \quad (1.2)$$

Vzhledem k nulové změně magnetického toku, může být rotor alternátoru konstruován z magnetického obvodu v podobě masivního železa [1]. To u asynchronních strojů z důvodů velkých ztrát možné není. Buzením, které vytváří magnetické pole, lze následně v nenabuzeném stavu alternátoru regulovat hodnotu výstupního indukovaného napětí statoru. Důležitá funkce BS však spočívá ve změně hodnoty jalového výkonu  $Q$ . Při nárůstu kapacitní zátěže v elektrizační soustavě (ES) začíná alternátor jalový výkon ze sítě odebírat (alternátor je v podbuzeném stavu). Naopak při nárůstu indukivní zátěže začíná alternátor jalový výkon do sítě dodávat (alternátor je v přebuzeném stavu) [1].

Rychlost otáčení rotoru alternátoru je dána počtem pólových dvojic a frekvencí sítě, ke které je alternátor připojený. V práci je řešen turboalternátor, na jehož rotoru je uvažována pouze jedna pólová dvojice  $p$ . Zároveň je v ČR stanoven kmitočet sítě  $f$  na 50 Hz. Pro převod otáček ze sekund na minuty se číselník násobí číslem 60. Při dosazení těchto hodnot do následujícího vztahu vychází, že se rotor točí rychlostí 3000 ot/min.

$$n_s = \frac{f \cdot 60}{p} \quad (\text{ot/min}; \text{Hz}, -) \quad (1.3)$$

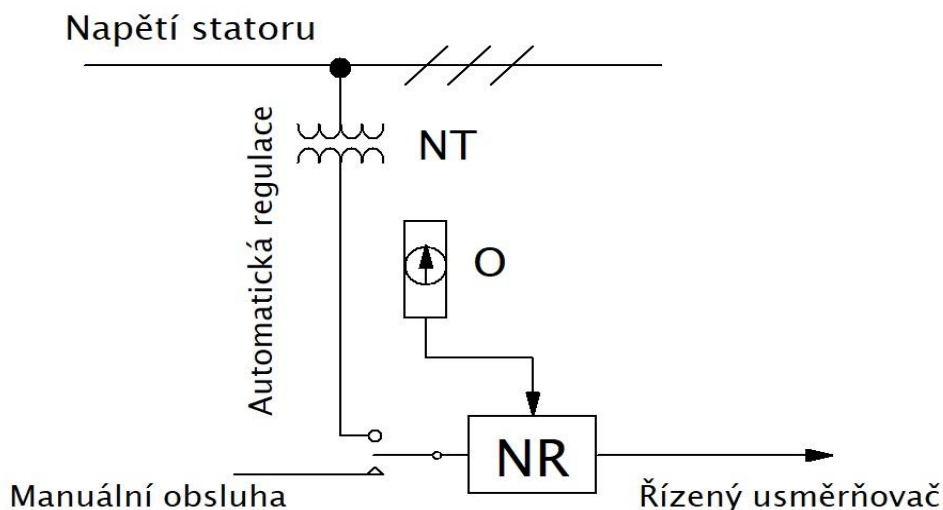
Hodnota výstupního činného výkonu, který dodává alternátor do sítě je závislá na velikosti momentu hřídele parní turbíny. Se zvyšujícím se hmotnostním průtokem páry turbínou se zároveň zvyšuje i moment, což vede k nárůstu činného výkonu.

## 1.1 Budící systémy synchronních generátorů

### 1.1.1 Regulace budících systémů

Každým rokem v ES narůstá spotřeba elektrické energie. S tím jsou v elektrárnách kladeny přísné požadavky na napájení ES [7]. Alternátor by se proto měl při normálních provozních stavech chovat jako tvrdý zdroj, aby se hodnota výstupního statorového napětí držela na konstantní hodnotě. To je ovšem v praxi velmi komplikované. Proto byl stanoven procentuální rozsah možných napěťových odchylek. Hodnota generovaného napětí je zpravidla určena konstrukcí samotného alternátoru. Napěťové rozsahy velkých alternátorů se pohybují v řádech kV. Převod na vyšší napěťové hladiny ES pak zajišťuje až blokový transformátor připojený na výstupní svorky alternátoru. Často jsou blokové transformátory u velkých elektráren připojeny k síti velmi vysokého napětí (VVN), jehož hodnoty se pohybují v řádů stovek kV. Převod na VVN napětí se provádí z důvodu snížení ztrát při přenosu elektrické energie na větší vzdálenosti.

BS musí zajistit stálé buzení alternátoru jak při provozních, tak i přechodných stavech. BS se skládá ze tří hlavních částí, z budiče, regulátoru buzení a odbuzovače. Budič zajišťuje dodání budícího proudu  $I_b$  na budící vinutí rotoru alternátoru. Regulátor buzení provádí regulaci napětí buď pomocí manuální obsluhy nebo automatickou regulací. Automatické regulační řízení udržuje samočinně hodnotu statorového napětí na konstantní hodnotě, která je stanovena obsluhou zařízení [9]. V minulosti byly hojně využívány regulátory s odvalovacími kontakty, olejotlaké regulátory nebo transduktorové regulátory. Dnes se však v provozu používají pouze regulátory s polovodičovými součástkami jejichž parametry se dle různorodých požadavků liší [6]. V běžném provozu se regulace napětí jako taková provádí výhradně automaticky. Pro udržení konstantního statorového napětí musí regulátor reagovat pokaždé změně zátěže alternátoru. Automatická regulace může být prováděna například pomocí napěťového transformátoru NT a ovladače O. Napěťový transformátor měří hodnotu statorového napětí a přivádí jí na vstup napěťového regulátoru NR. Ke vstupu regulátoru je připojen i ovladač, kterým se nastavuje požadovaná hodnota statorového napětí. V samotném regulátoru se nachází komparátor, který tyto dvě hodnoty porovnává a následně reguluje pomocí řídicího usměřovače velikost budícího proudu.



1.1 Regulace budiče

Každý BS má i rozdílný rozsah necitlivosti. Tento rozsah udává do jak velké změny satorového napětí, regulátor nezareaguje. Dle typu regulátoru se hodnota necitlivosti liší, ale obecně se mohou hodnoty pohybovat v rozsahu setin až desetin procent [6].

Odbuzovač se v BS používá k bezpečnému odstavení alternátoru z provozu. Princip odbuzovače spočívá ve snížení hodnoty budicího proudu  $I_b$  při poruše stroje, která může být například v podobě zkratu ve satorovém vinutí nebo zemním spojení. Tím dochází k celkovému odbuzení alternátorů [2]. Dnes je již odbuzovač obsažen v každé BS.

### 1.1.2 Druhy budicích systémů

V této podkapitole jsou uvedeny typy BS, které se u alternátorů používají. Jelikož je pro simulace použit alternátor, který svou jmenovitou hodnotou zdánlivého výkonu 235 MVA spadá do kategorie středních turboalternátorů (do 350 MVA), tak lze použít statickou i bezkartáčovou BS. Všechny typy zde uvedených BS lze dle požadavků provozovat buď jako závislou soustavu či nezávislou. Závislá soustava napájí BS přímo z ES, ke které je připojen samotný alternátor. Použití této soustavy je výhodné především cenově, jelikož se nemusí konstruovat nezávislé napájení BS. Avšak negativní vlivy, které mohou vzniknout v ES pak ovlivňují samotnou BS. Napájení je většinou realizováno pomocí transformátoru. Nezávislá soustava napájí BS z jiného zdroje, než je ES. Zdrojem může být například pomocný budič, střídavý generátor či derivační vinutí. Výhodou této soustavy je nezávislost na provozních stavech alternátorem napájené ES. Nicméně s tím rostou i pořizovací náklady [6].

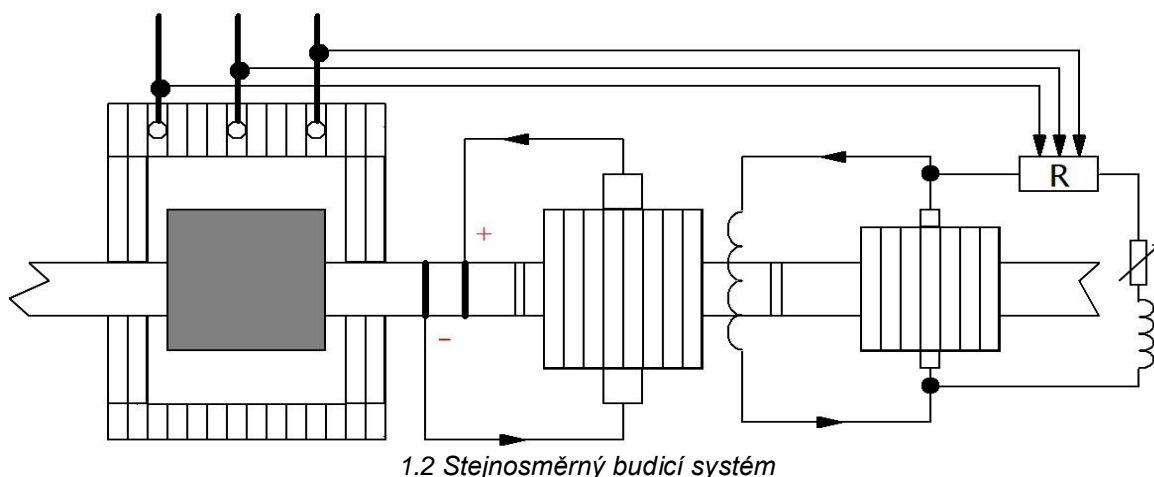
Dále lze BS dělit podle rychlosti jejich napěťové odezvy  $T_0$  na klasické, rychlé a velmi rychlé BS. Klasické BS mají pomalou napěťovou odezvu, a tak nevytvářejí významně velký záporný tlumicí moment, díky čemuž jsou pro vybavení výkonovým stabilizátorem nevhodné. Rychlé a velmi rychlé BS mají napěťovou odezvu  $T_0 \leq 0,1s$  a již vytvářejí velký záporný tlumicí moment díky čemuž musejí být vybaveny výkonovým stabilizátorem [6].

### 1.1.2.1 Kartáčové budiče se stejnosměrnými generátory

Tyto typy budičů se v dnešní době používají jen výjimečně. Díky své konstrukci se řadí do kategorie klasických BS. K jejich činnosti se používají stejnosměrné generátory označovány též jako dynamo, které dodávají pomocí sběrných kroužků a kartáčů budičí proud na budičí vinutí rotoru. Konstrukčně se používají dva budičí generátory, řídicí a hlavní budičí generátor. Řídicí generátor je nabuzen a svým vinutím dodává stejnosměrný proud na vinutí hlavního generátoru. Hlavní generátor poté pomocí kartáčů a sběrných kroužků napájí budičí vinutí rotoru alternátoru. Přivedený budičí proud na budičí vinutí rotoru alternátoru vytváří magnetické pole. Pomocí magnetické indukce vytvořené budičím proudem vzniká na statoru střídavé napětí. Spolu s napětím na statoru vzniká i střídavý proud, který je následně odváděn do ES. Výstupní napětí je odváděno zpět na regulátor BS, který reguluje výstupní napětí statoru pomocí reostatu. Pokud je hodnota statorového napětí vysoká tak se na reostatu zvýší jeho odpor a tím klesne budičí proud na rotoru. Tyto typy budičů jsou v dnešní době převážně nahrazovány bezkartáčovými budiči. Vlastnosti těchto typů budičů mohou být například:

- *Vznik jiskření v místech mezi kartáčem a sběrnými kroužky*
- *Ztráta energie v kartáčích a sběrných kroužcích*
- **Finančně nákladné na údržbu** – *Po vyhoření se musejí kartáče nahrazovat za nové*
- *Jejich výkon je pro alternátory s výkonem vyšším jak 500 MW nedostatečný. Přes kartáče a sběrné kroužky nemohou přenést vysoké proudy*
- *Pomalá napěťová odezva  $T_0$*



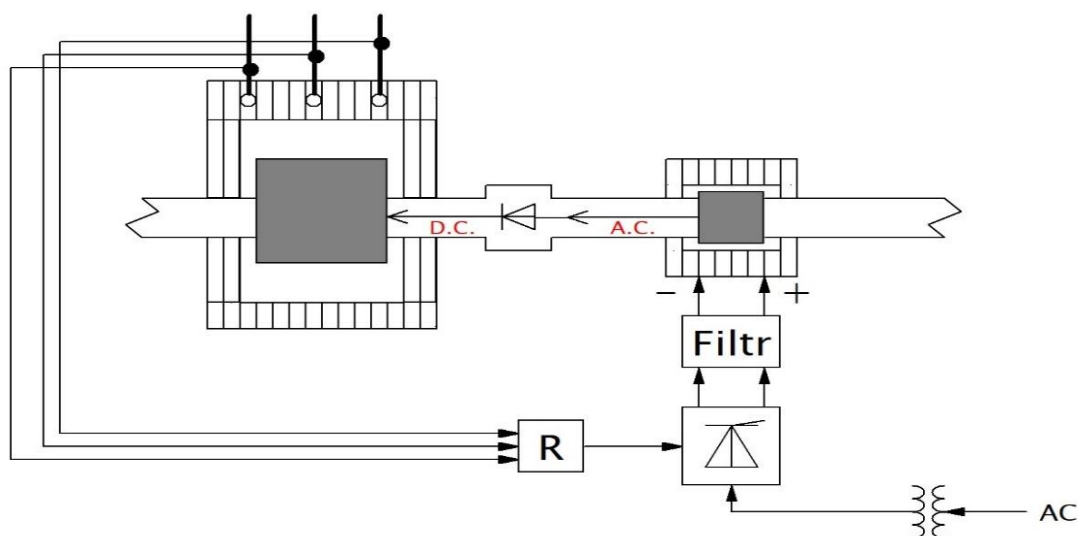


### 1.1.2.2 Bezkartáčové budiče se střídavým zdrojem

U těchto typů budičů se BS umísťuje na hřídel alternátoru. Díky této konstrukci nemusejí být použity kartáče a sběrné kroužky, které jsou problematické na údržbu. Svým provedením je lze zařadit do kategorie rychlých BS. Na začátku budicího systému je použit řízený třífázový tyristorový usměrňovač v můstkovém zapojení, jehož rozměry jsou oproti statickým budičům daleko menší, jelikož dodává pouze proud pro vytvoření satorového pole na rotačním budiči. Zároveň musí být hodnota střídavého napájecího napětí ponížena na hodnotu při níž nehrozí poškození usměrňovače. Usměrněné napětí se zde vyhlazuje pomocí filtru. Vyhlazené napětí se odvádí na satorové vinutí rotačního budiče, kde se posléze v rotačním budiči vytváří magnetické pole, které generuje na vinutích rotoru rotačního budiče střídavé napětí. Trojfázové kotvové vinutí je uloženo na společné hřídeli s rotorem budiče [2]. Toto vinutí je připojené k trojfázovému usměrňovači, který je zapojený do můstkového zapojení. Všechny části usměrňovače musí být dlouhodobě provozně schopné a zároveň musejí spolehlivě pracovat i při vlivu velkých odstředivých sil a přídavného chvění [6]. Toto usměrněné napětí může být znovu vyhlazeno filtrem. Již usměrněné napětí je odváděno na rotor, v jehož budicím vinutí vzniká pomocí budicího proudu magnetické pole. Následné generování satorového napětí je zde stejné jako u stejnosměrných BS. Opět je zde na výstupní svorky alternátoru připojen regulátor.

Vlastnosti těchto BS mohou být například:

- Díky konstrukci zde nejsou zapotřebí kartáče a sběrné kroužky
- Hodnota budícího proudu může být vyšší jak 5kA
- **BS může být použita u alternátorů vyšších výkonů**
- Bezkartáčová soustava nepotřebuje velkou údržbu [6]
- Rychlá napěťová odezva  $T_0 \leq 0,1s$
- Invertorový režim třífázového tyristorového plně řízeného usměrňovače
- Provoz alternátoru v oblasti umělé stability



1.3 Bezkartáčový budicí systém

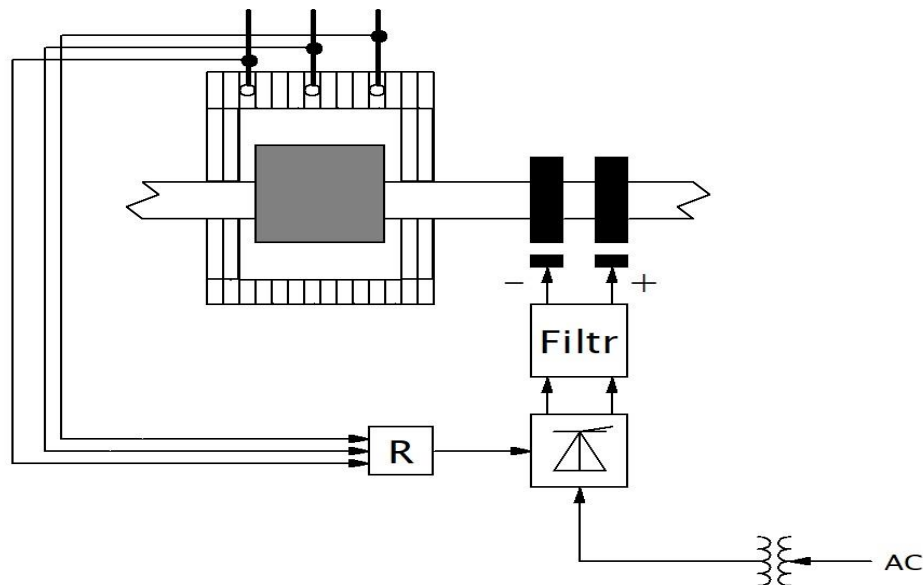
### 1.1.2.3 Statické budiče se střídavým zdrojem

Statické budiče jsou umístěny mimo rotující těleso alternátoru. Svým provedením je lze zařadit do kategorie rychlých a velmi rychlých BS. Skládají se stejně jako bezkartáčové BS z regulátoru, řízeného tyristorového usměrňovače v můstkovém zapojení, filtru, kartáčů a sběrných kroužků. Napájení usměrňovače musí být stejně jako u bezkartáčové BS sníženo na hodnotu při které nehrozí riziko jeho poškození. Zároveň, jak u statické BS, tak i bezkartáčové BS jsou tyristorové usměrňovače díky zapojení do plně řízeného můstku schopné invertorového režimu. Díky invertorovému režimu mohou téměř okamžitě přepojit hodnotu stropního budícího napětí do záporné polarity čímž je odbuzování mnohem rychlejší než samotné nabuzení alternátoru. Dále díky své vysoké rychlosti umožňují provoz alternátoru i v oblasti umělé stability s celkovým zátěžným úhlem až do  $120^\circ$  [6]. Napětí, které se v usměrňovači usměrní dále vstupuje do bloku filtru.

Filtrem může být například RC filtr, který zvlněné usměrněné napětí vyhladí. Vyhlazené napětí je připojeno na kartáče a následně sběrné kroužky. Následně je pak na budící vinutí přiváděn budící proud. Princip generování statorového napětí je stejný jako u předešlých typů budičů. Ke statorovému napětí je připojený i regulátor, který je popsán v předešlé podkapitole.

Vlastnosti statické BS mohou být tyto:

- *Díky použití kartáčů a sběrných kroužků jsou zde stejné nevýhody jako u stejnosměrných budičů*
- *Při správném seřízení nedochází při změně buzení k překmitu*
- *Rychlá napěťová odezva  $T_0 \leq 0,1s$*
- *Invertorový režim třífázového tyristorového plně řízeného usměrňovače*
- *Provoz alternátoru v oblasti umělé stability*



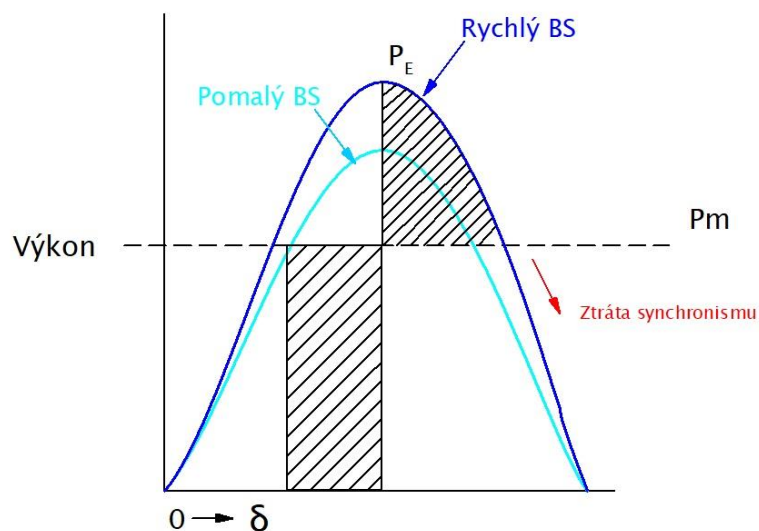
1.4 Statický budicí systém

## 2 Výkonové stabilizátory

V ES se často objevují nežádoucí situace, které mohou významně ovlivnit chod alternátoru. Jednou z těchto situací může být například kolísání výkonu obnovitelných zdrojů energie. Typickým příkladem je větrná či solární elektrárna u nichž je zajištění konstantního výkonu komplikované. Tyto výkyvy výkonu vytvářejí zvýšené nároky na regulaci a stabilitu ES [5]. Důležité je, aby byl alternátor udržen v synchronním chodu. Pokud by došlo ke stavu, při němž by ze synchronismu vypadnul tak musí být následně ihned odstaven. Dochází totiž ke značnému prokluzu mezi otáčkami rotoru a statoru. Alternátor by měl být schopný se sám po poruše udržet v synchronismu. Této schopnosti se říká přechodná stabilita. Narušení synchronismu může být dále způsobeno například při zkratu, kde na jeho počátku u alternátorů dochází ke vzniku zkratového proudu, který může podle okamžiku vzniku zkratu nabývat vysokých hodnot. Dále se pak zkratový proud po odeznění přechodného děje ustálí na hodnotě proudu nakrátko. Během tohoto stavu se otáčky rotoru zvyšují vlivem přebytku magnetického výkonu, což může vést ke zvýšení momentu na hodnotu při níž by mohlo dojít k výpadku ze synchronismu [3].

Postupný výzkum přinesl nové technologie, které zlepšily stabilizaci dodávky elektrické energie do ES. Jedním z těchto systémů je výkonový stabilizátor, který se používá jako kompenzační zařízení BS. Platí zásada, že každá nově nainstalovaná BS připojená k alternátoru, která zároveň vyhovuje požadavkům, musí být vybavena výkonovým stabilizátorem [3].

U pomalejších BS dochází vlivem poruchy ke snazšímu výpadku ze synchronismu díky menšímu brzdnému výkonu. Při použití rychlejších budicích systémů je naopak brzdný výkon daleko vyšší a též je i větší přebuzení. Bohužel tím se rychlejší budicí systémy po odstranění poruch hůře tlumí [3]. Kmity, které pak u rychlých budicích BS vznikají, odstraňujeme pomocí výkonových stabilizátorů. Z toho je tedy zřejmé, že použití stabilizátorů u pomalých BS není zapotřebí. Statické nebo dostatečně rychlé bezkartáčové budiče se používají jako rychlé budicí systémy a udávají se podle napěťové odezvy, která musí být kratší jak 0,1s.



2.1 Přechodná stabilita

Na Obr.2.1 je znázorněna závislost elektrického výkonu na velikosti zátěžného úhlu  $\delta$ . Hodnota výkonu může být, při ustáleném stavu, vypočtena ze vztahu:

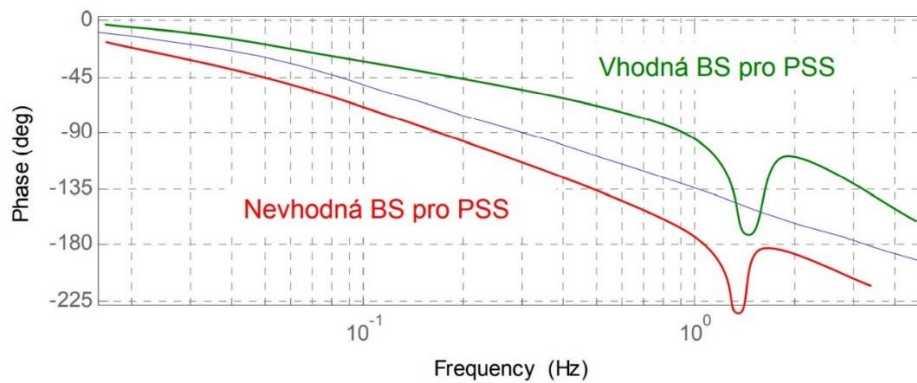
$$P_{max} = \omega_s \cdot M_{max} = \frac{\sqrt{3} \cdot U \cdot U_{ib}}{X_d} \quad (W; V, \Omega) \quad (2.1)$$

Ze vztahu 2.1 si lze všimnout, že je výkon závislý na svorkovém statorovém napětí  $U$ , indukovaném budícím napětí  $U_{ib}$  a synchronní reaktanci  $X_d$ . Nicméně kromě indukovaného budícího napětí  $U_{ib}$  jsou ostatní hodnoty pro alternátor konstantní. Z toho je zřejmé, že je hodnota maximálního elektrického výkonu závislá na indukovaném budícím napětí  $U_{ib}$  a tedy na typu BS. Pokud dojde v ES k náhlé změně odebíraného výkonu zátěže, což může být například při zapálení obloukové pece, tak zároveň dochází k rozkývání rotoru ze synchronních otáček rotoru  $\omega_s$ . Během provozu synchronních strojů musí být otáčky stabilní. Pro udržení otáček na synchronní rychlosti dochází ke skokové změně momentu  $M$ . Při podsynchronní rychlosti hodnota momentu  $M$  pro dotočení otáček narůstá a při nadsynchronní rychlosti hodnota momentu  $M$ , též označovaném jako brzdny moment, pro ponížení otáček klesá. Během těchto změn dochází i ke změně zátěžného úhlu  $\delta$ , který se ale na rozdíl od momentu mění spojitě. Při ustálení na požadované hodnotě vznikají nežádoucí kmity, které jsou následně tlumeny tlumičem alternátoru. Tlumič se používá kvůli svým vysokým pořizovacím nákladům pouze u velkých strojů, kde je konstruován podobně jako klec nakrátko u asynchronních strojů.

Používá se pro tlumení veškerého kývání a nesynchronních složek rychlosti, což může být způsobeno náhlou změnou buzení či momentu. Dále je vyráběn z materiálu (mosaz, bronz) s 3x až 5x větší vodivostí, než jakou má samotná hřídel. K tlumícímu momentu tlumiče se přidává ještě moment budicího vinutí spojeného s řízeným třífázový usměrňovačem. Pokud by nebylo budicí vinutí napájeno proudem, tak by jeho moment přispíval k celkovému tlumení kývání rotoru. Nicméně v praxi se budicí vinutí napájí budícím proudem  $I_b$ , a tak je hodnota momentu závislá na parametrech regulátoru BS a způsobu jeho řízení. Pokud bude regulátor udržovat konstantní napětí na svorkách statoru, tak může dojít ke vzniku záporného tlumícího momentu jehož velikost bude úměrná samotnému zesílení regulátoru. Takový regulátor musí být vybaven výkonovým stabilizátorem [3].

Jak již bylo zmíněno, použití výkonových stabilizátorů záleží parametrech BS. Při dostatečně rychlé odezvě BS se může stát, že hodnota zátěžného úhlu  $\delta$  přesáhne mezní hodnotu, jenž je udávána jako  $90^\circ$ , ale umožní alternátoru nadále pracovat v oblasti umělé stability, aniž by došlo k výpadku ze synchronismu. Toho se však docílí pouze u rychlých BS. Pomalé BS při překročení mezní hodnoty způsobí výpadek ze synchronismu vlivem pomalé odezvy  $T_0$ . Použití rychlých BS, ale zároveň přináší i vznik již zmíněných nežádoucích oscilací.

Dále se dá vhodnost použití výkonových stabilizátorů, dle norem WECC (Western Electricity Coordinating Council), v překladu Západní koordinační rada pro elektřinu, posoudit podle vlivu fázového zpoždění uzavřené smyčky regulace napětí, tj. od referenčního napětí ke statorovému napětí. WECC vydává normy pro jednu z osmi částí Severní Ameriky, které spadají pod organizaci NERC (North American Electric Reliability), v překladu Severoamerická elektrická společnost. Tato organizace se stará o spolehlivost elektrizačních systémů všech osmi částí Severní Ameriky. WECC se pak konkrétně zabývá problematikou výkonových stabilizátorů [3].



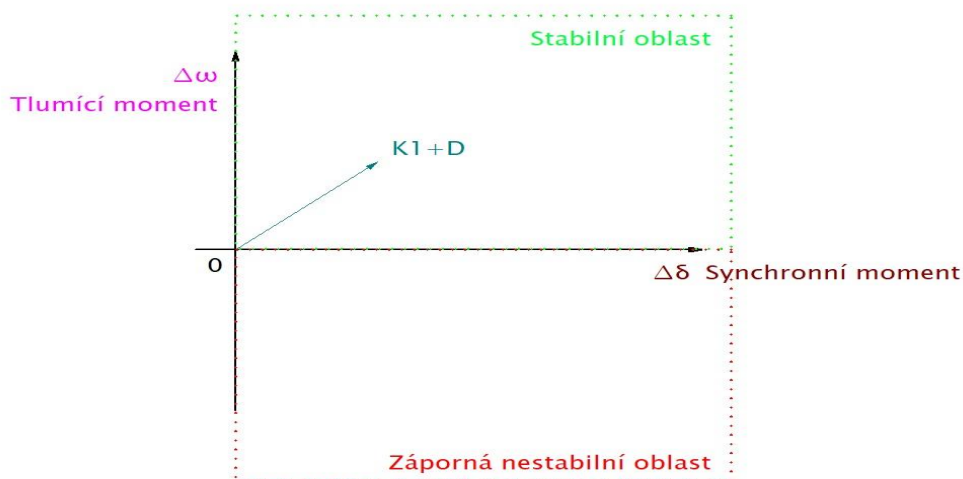
2.2 Posouzení PSS pro BS dle WECC, převzato z [3]

Na Obr 2.2 lze vidět průběhy změřeného fázového zpoždění soustavy GEP (přenosová funkce regulátoru buzení, alternátoru a přenosové soustavy), při použití rychlé a pomalé BS. Zelený a červený průběh je porovnáván s modrým průběhem typizované přenosové funkce u níž lze vidět, že má v oblasti 1 Hz fázové zpoždění 135°. Porovnávaná oblast je cca od 0.1 do 3 Hz. Pokud je v této oblasti fázové zpoždění soustavy GEP menší, než je fázové zpoždění typizované přenosové funkce, tak je BS vyhodnocená jako vhodná pro vybavení výkonovým stabilizátorem [3].

## 2.1 Funkce výkonového stabilizátoru

U alternátorů s rychlou BS může docházet k nízkofrekvenčním elektromechanickým oscilacím, které vytvářejí nežádoucí záporné tlumící momenty. Proto je důležité, aby se zajistilo udržení výsledných úhlových momentových charakteristik ve stabilní oblasti. K zajištění této stability se používají právě výkonové stabilizátory, které generují signál odesílaný do regulátoru budiče. Regulátor pomocí budičeho proudu vytvoří dostatečně velký kladný tlumící moment, který posune výsledný moment do stabilní oblasti [3].

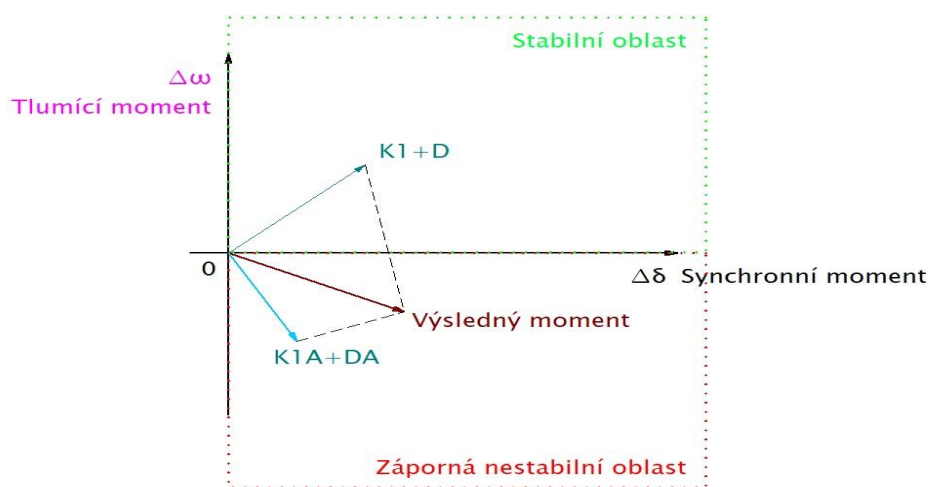
Při konstantním buzení se dle Obr.2.3 výsledný moment nachází ve stabilní oblasti v níž by se měl alternátor provozovat a je tvořen vektorem synchronizačního momentu  $K1$  a vektorem tlumícího momentu  $D$ .



2.3 Výsledný moment při konstantním buzení

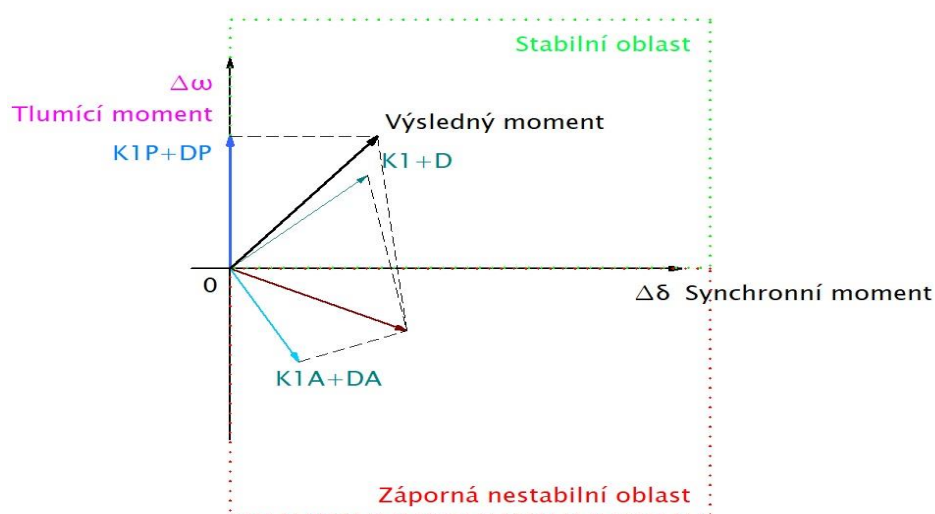
Nicméně při použití regulátoru budiče se výsledný moment působením budicího proudu natočí do nestabilní oblasti pomocí vektoru synchronizačního momentu regulátoru  $K1A$  a vektoru tlumícího momentu regulátoru  $DA$ , lze vidět na Obr. 2.4. Pokud by alternátor setrval v této nestabilní oblasti, tak by mohlo dojít ke vzniku nežádoucích oscilací. Ty by mohly narušit celkovou stabilitu alternátorů a generovaný výkon na výstupních svorkách alternátoru.

Na Obr.2.5 je vidět použití výkonového stabilizátoru, který pomocí dostatečně velkého kladného tlumícího momentu za pomoci vektorů synchronního momentu stabilizátoru a tlumícího momentu stabilizátoru výslednou úhlovou momentovou charakteristiku natočí do stabilní oblasti.



2.4 Výsledný moment v nestabilní oblasti

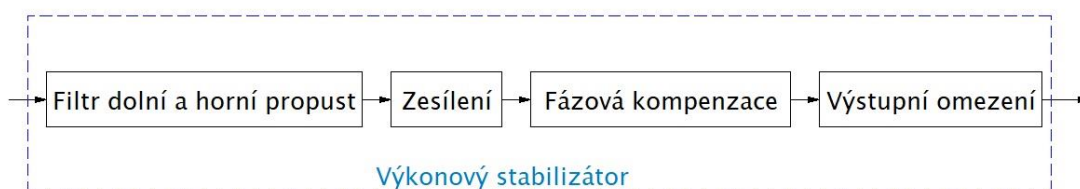




2.5 Výsledný moment ve stabilní oblasti za použití výkonového stabilizátoru

## 2.2 Ladění výkonových stabilizátorů

Výkonový stabilizátor se v základním provedení skládá z několika částí, které dohromady zajišťují účinnou stabilizaci. Hlavními částmi jsou filtr typu dolní a horní propust, zesílení, fázová kompenzace a výstupní omezení. Pro správné fungování výkonového stabilizátoru se musejí tyto členy postupně naladit. V této práci jsou použity dva odlišné typy výkonových stabilizátorů, u nichž konkrétně jsou, ale podmínky pro nastavení fázové kompenzace stejné. Takže pro ně mohou být použita téměř stejná pravidla ladění.

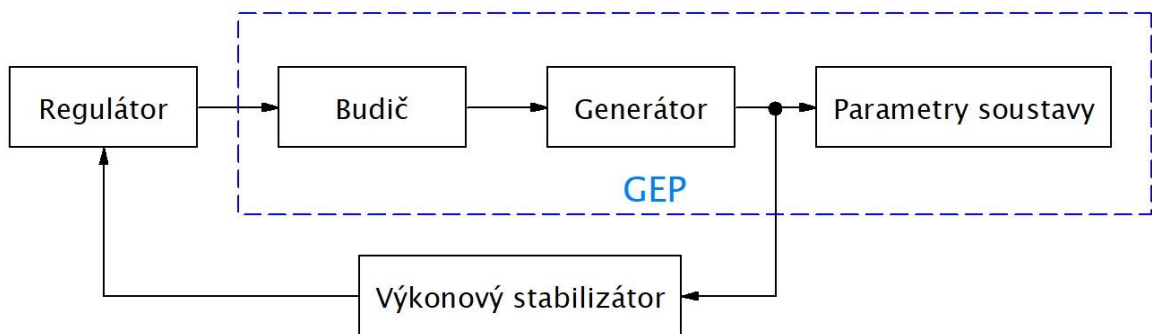


2.6 Blokové schéma výkonového stabilizátoru

### 2.2.1 Fázová kompenzace

Fázová kompenzace kompenzuje zpoždění soustavy GEP, aby byl výsledný tlumící moment ve fázi s odchylkou úhlové rychlosti. Důležitou vlastností je přenos soustavy GEP, který je proporcionálně úměrný přenosu uzavřené smyčky regulace napětí [3].

Pomocí této vlastnosti se určuje požadovaná fázová kompenzace, jelikož dle Obr. 2.7 je vidět, že při fázově zpožděné soustavě GEP se musí nastavit patřičný fázový předstih výkonového stabilizátoru. To je z toho důvodu, že je soustava GEP frekvenčně závislá a vytváří fázový posuv mezi referenční hodnotou regulátoru a momentem vzduchové mezery. Obecně přenos soustavy GEP fázově zpožďuje tlumící moment čímž se musí vytvořit dostatečný velký fázový předstih výkonového stabilizátoru, aby byl ve fázi s odchylkou rotorové rychlosti  $\Delta\omega$ . Použitím fázového předstihu výkonového stabilizátoru se v ideálním případě výsledný fázový průběh přiblíží k  $0^\circ$  v požadovaném frekvenčním rozsahu. Nemělo by docházet k překompenzování, jelikož by to mohlo vést ke snížení synchronizačního momentu a tím následně ke snížení přechodné stability. Pro nastavení fázové kompenzace se používá obvykle několik členů Lead-Lag ve struktuře stabilizátoru. Lead vytváří kladný posuv fáze zatím co Lag je záporný.

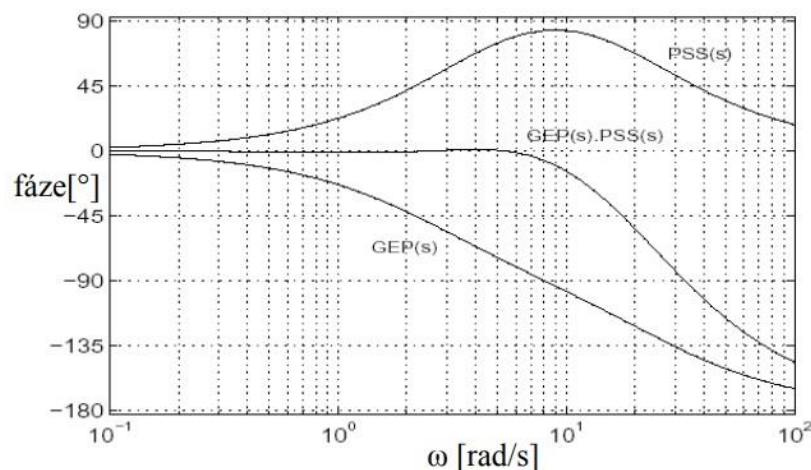


2.7 Blokové schéma soustavy GEP

Přenos soustavy GEP je citlivý na změnu veličin:

- Zesiluje se s rostoucím zatížením alternátoru a s větší tvrdostí vnější sítě
- Fázové zpoždění roste se zvyšující tvrdostí vnější sítě

Mezní ladění je proto tedy limitované na stav při maximální zátěži alternátoru v tvrdé síti.



2.8 Stabilizace fázového zpoždění soustavy GEP, převzato z [3]

Na Obr. 2.8 je vidět fázové zpoždění soustavy GEP a charakteristiku fázového předstihu výkonového stabilizátoru. Hodnota fázového předstihu je zvolena tak, aby bylo výsledné fázové zpoždění od vstupu výkonového stabilizátoru (odchylka od rychlosti rotoru  $\Delta\omega$ ) ke složce momentu výkonového stabilizátorů  $\Delta T_{e2}$  v požadovaném frekvenčním rozsahu téměř rovné 0°.

### 2.2.2 Nastavení filtrů horní a dolní propust

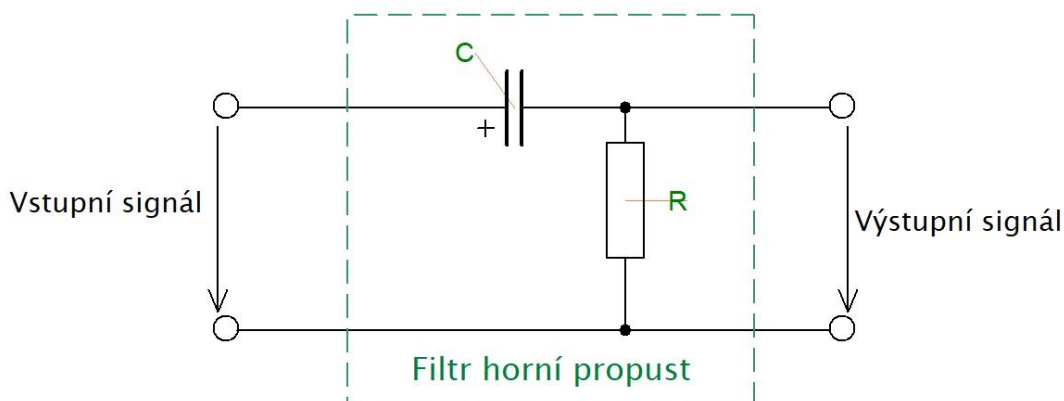
Na vstup výkonového stabilizátoru jsou připojovány podle situace různé typy veličin jako je například odchylka rychlosti rotoru od požadované, úhlové zrychlení, činný výkon, či odchylka frekvence. Vstupní hodnota se musí ve stabilizátoru zpracovat s patřičnou filtrací, která odstraní nežádoucí frekvence. U každého typu výkonových stabilizátorů se objevují filtry typu horní a dolní propust. Základním prvkem filtru je použití kombinace součástek, a to buď RL (rezistoru, cívky) nebo RC (rezistoru, kondenzátoru). Zařazení konkrétních prvků do příčné nebo podélné větve obvodu posléze určuje o jaký typ filtru se jedná. Dále se budou filtry řešit pouze v podobě RC členu. Hodnota časové konstanty  $T_w$  se nastavuje na nízké hodnoty, aby podle WECC byla dodržena kritéria pro fázovou kompenzaci [3]. Obecně tímto nastavením vzniká přídavný fázový předstih k fázovému předstihu výkonového stabilizátoru což zmenšuje celkové zesílení a zároveň snižuje vliv interakce stabilizátoru s regulací turbíny při rychlých změnách výkonu [3]. Při vhodném nastavení hodnot časové konstanty  $T_w$  lze docílit k přídavnému fázovému předstihu který, se přičítá k celkovému předstihu výkonového stabilizátoru oproti fázovému zpoždění soustavy GEP.

Díky přídavnému fázovému předstihu nemusí být celkové zesílení tak vysoké, jelikož se hodnota celkového předstihu zvýšila na hodnotu, kde by mohlo při stálém zesílení dojít k možné překompenzaci a tím i ke snížení přechodné stability.

### 2.2.2.1 Filtr typu horní propust

Tento typ filtru se používá k odfiltrování nežádoucích nízkofrekvenčních signálů. Lze jím odstraňovat například i stejnosměrnou složku. Princip funkce filtru vychází z jeho zapojení. Dle Obr 2.9 je zřejmé, že je v zapojení použit elektrolytický kondenzátor, u kterého je hodnota reaktance  $X_C$  závislá na frekvenci. Při malých frekvencích je hodnota reaktance  $X_C$  vysoká a kondenzátor signál nepropouští. Nicméně s rostoucí frekvencí se hodnota reaktance  $X_C$  snižuje a hodnota výstupního signálu narůstá. Tento jev filtru vychází ze vztahu:

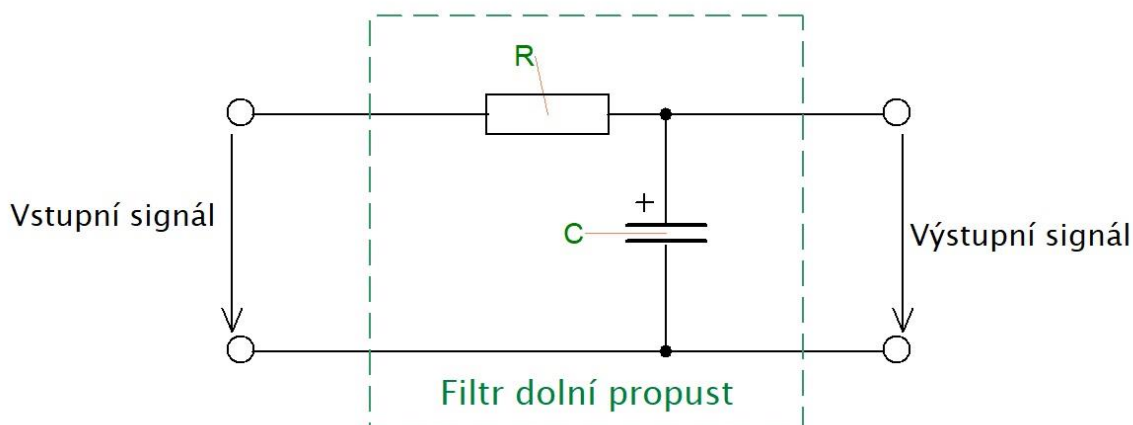
$$X_C = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C} \quad (\Omega; Hz, F) \quad (2.2)$$



2.9 Zapojení filtru typu horní propust

### 2.2.2.2 Filtr typu dolní propust

Tento typ filtru se používá k odfiltrování nežádoucích vysokofrekvenčních signálů, které jsou vyšší než řešené oscilace. Na rozdíl od filtru horní propust je zde zapojení součástek dle Obr 2.10 opačné. Hodnota reaktance je zde opět závislá na frekvenci a její hodnota se tedy mění stejně jako u filtru horní propust. Při malé frekvenci filtr propouští výstupní signál. Zatím co při vysoké frekvenci signál přes filtr neprochází.



2.10 Zapojení filtru typu dolní propust

### 2.2.3 Nastavení zesílení

Dalším důležitým parametrem pro ladění výkonových stabilizátorů je nastavení jeho zesílení. Pro správnou funkci stabilizátoru se musí vstupní signál zesílit na dostatečnou hodnotu, aby byl vytvořený potřebný tlumící moment, jenž posune výsledný moment do stabilní oblasti. Zesílení by se mělo testovat na situacích, kdy je k alternátoru připojena velmi tvrdá síť s maximálním zatížením. Právě za těchto podmínek je celkové zesílení soustavy GEP maximální tak lze testovat chování systému při zvyšování zesílení stabilizátoru. Musí se, ale brát ohled na maximální možnou hodnotu budicího proudu. Vhodné zesílení lze stanovit z měření maximálního rozkvy v závislosti na změně zesílení stabilizátoru [3].

### 2.2.4 Výstupní omezení

Podle WECC se výstupní omezení nastavuje na hodnotu zpravidla menší než 5 % jmenovitého napětí alternátoru, ale často se rozsah nastavení stanovuje mezi 5–10 % [3].

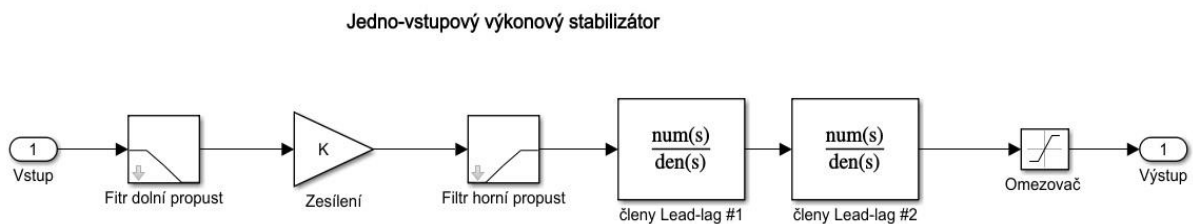
## 2.3 Typy výkonových stabilizátorů

Parametry výkonových stabilizátorů jsou podle situací často odlišné a zároveň s tím se kladou i různé požadavky na jejich konstrukční uspořádání. Musí se brát ohledy na typ a počet vstupních veličin a na to, aby stabilizátor vytvořil složku elektrického momentu rotoru, která bude ve fázi s úhlovou rychlostí. Obecně musí přenosová funkce stabilizátoru zajistit kompenzaci fázového zpoždění a zesílení soustavy GEP.

V této bakalářské práci byly použity modely výkonových stabilizátorů PSS1A a PSS2A z důvodu rozlišení významu jednoho a více vstupů. Konkrétní parametry byly následně kvůli nedostupnosti lepší parametrizace použity z energetického modelu s alternátorem o výkonu 100MVA.

### 2.3.1 Jedno-vstupový výkonový stabilizátor typu PSS1A

Jak už jeho název napovídá, tak je na jeho vstup připojen pouze jeden signál, který bývá zpravidla v podobě odchylky synchronní rychlosti rotoru  $\Delta\omega$ , ale lze připojit i signál frekvence ES  $f$  či výstupní elektrický výkon  $P_e$ . Tento výkonový stabilizátor se považuje za základní typ výkonových stabilizátorů. Signál, kterým stabilizuje nežádoucí oscilace je generován za pomoci měřením získaného vstupního signálu, filtrem dolní propust, který odfiltruje vyšší frekvence, než jaké jsou u řešených oscilací a jsou často způsobeny torzními kmity hřídele, dále potřebným zesílením, filtrem horní propust, který odfiltruje stejnosměrné složky, bloky Lead-Lag pro zajištění fázové kompenzace a omezovače maximální a minimální hodnoty [4],[11].



2.11 Jedno-vstupový výkonový stabilizátor, převzato z [3],[4],[10],[11]

### 2.3.2 Dvou-vstupový výkonový stabilizátor typu PSS2A

Další typ výkonového stabilizátoru už obsahuje dva signálové vstupy. Na první vstup je přiváděna buď odchylka od synchronní rychlosti rotoru  $\Delta\omega$  nebo v některých případech frekvence ES  $f$  a na druhý vstup se přivádí činný elektrický výkon  $P_e$ . Zde se oproti jedno-vstupovému stabilizátoru stanovuje stabilizační signál z integrálu akceleračního výkonu, který je tvořen z rozdílu mezi mechanickým  $P_m$  a elektrickým výkonem  $P_e$  [4],[11]. Mechanický výkon  $P_m$  je výkon, který je přenášen na hřídel parní turbínou a v praxi se

obtížně měří. Jelikož je měření mechanického výkonu  $P_m$  problematické tak je jeho hodnota určena z integrálu:

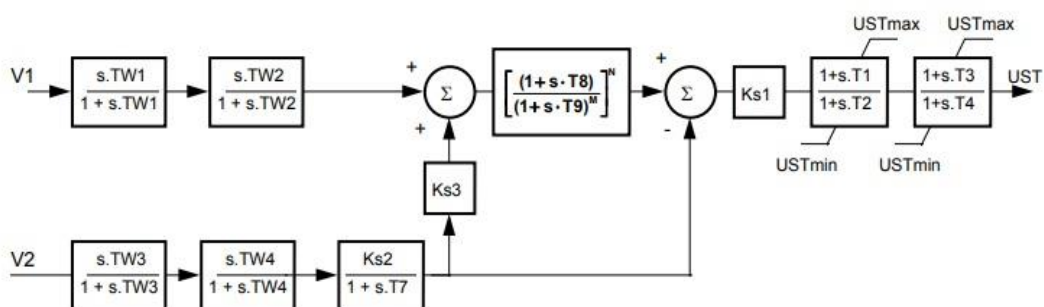
$$\int \Delta P_m dt = \int \Delta P_e + 2H \cdot \Delta\omega \quad (W; W, s, \frac{rad}{s}) \quad (2.3)$$

Dále se v bakalářské práci pracuje se softwarovými modely, u nichž není určení mechanického výkonu  $P_m$  problematické. Hodnota elektrického výkonu  $P_e$  se měří na výstupních svorkách statoru. Odchylka od synchronní rychlosti  $\Delta\omega$  je získávána za pomoci převodníku. Poslední proměnnou je hodnota setrvačností konstanty  $H$ , která se určuje ze vztahu:

$$H = \frac{1}{2} \cdot \frac{J \cdot \omega^2}{S_n} \quad (s; kg \cdot m^2, \frac{rad}{s}, VA) \quad (2.4)$$

Setrvačností konstanta úzce souvisí s rotační setrvačností všech hmot, které jsou připojeny na hřídel alternátoru. Při konstantních otáčkách se v hřídeli ukládá kinetická energie, která například při odlehčení zátěže v ES způsobí, že dojde k urychlování hřídele.

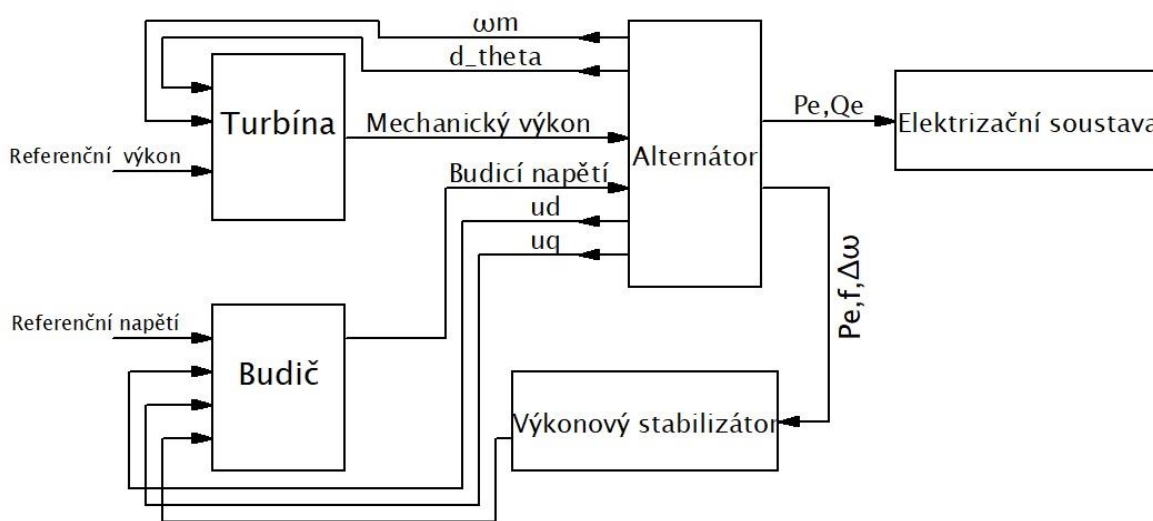
Z důvodu výskytu torzních kmitů hřídele se do obvodu umísťuje i filtr typu dolní-propust jehož zvláštností je to, že pro první vstup, ke kterému je připojen signál odchylky od synchronní rychlosti rotoru  $\Delta\omega$  pracuje jako dolní propust, a naopak pro druhý vstup, kde je připojen signál výkonu zase jako horní propust. Signál akceleračního výkonu se jako u jedno-vstupového stabilizátoru zesílí a fázově upraví. Ještě se musí u výsledného signálu v posledních blocích omezovačů opět stanovit maximální a minimální hodnoty.



2.12 Dvou-vstupový výkonový stabilizátor, převzato z [3],[11]

### 3 Použití výkonového stabilizátoru v energetickém modelu

Tato kapitola se zabývá použitím výkonových stabilizátorů typu PSS1A a PSS2A v energetickém modelu simulovaném v simulačním prostředí Simulinku softwaru MATLAB. Jednotlivé části energetického obvodu se skládají ze samostatných bloků, které jsou popsány v podkapitolách. Hlavní částí této kapitoly jsou výsledné simulace signálů výstupního elektrického výkonu, otáček, buzení a výkonových stabilizátorů při tlumených a netlumených oscilacích. Zároveň jsou signály doplněny i o průběhy samotných výkonových stabilizátorů. Na Obr 3.1 je vidět blokové schéma energetického modelu, který bude simulován. Jedná se o obvyklé energetické schéma v elektrárnách s parními turbínami. V práci tedy bude uvažovaná parní turbína, která se využívá u tepelných či jaderných elektráren. Celý energetický model, kromě výkonových stabilizátorů, využívá systém poměrných jednotek a je naparametrizovaný na alternátor s hodnotou 235 MVA.



3.1 Blokové schéma celkového energetického modelu

#### 3.1 Popis bloků energetického modelu

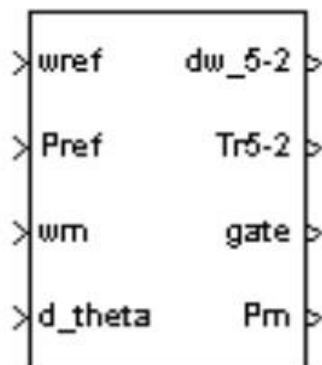
V této podkapitole jsou popsány jednotlivé bloky řešeného energetického modelu. U každého modelu je tabulka s použitými parametry, které jsou pak pod touto tabulkou následně popsány. Model výkonového stabilizátoru zde není popsán, jelikož se této problematice již věnovala předchozí kapitola. Avšak je zde též jako u jiných modelů vložena tabulka s parametry obou typů výkonových stabilizátorů a bližšími popisy těchto parametrů.



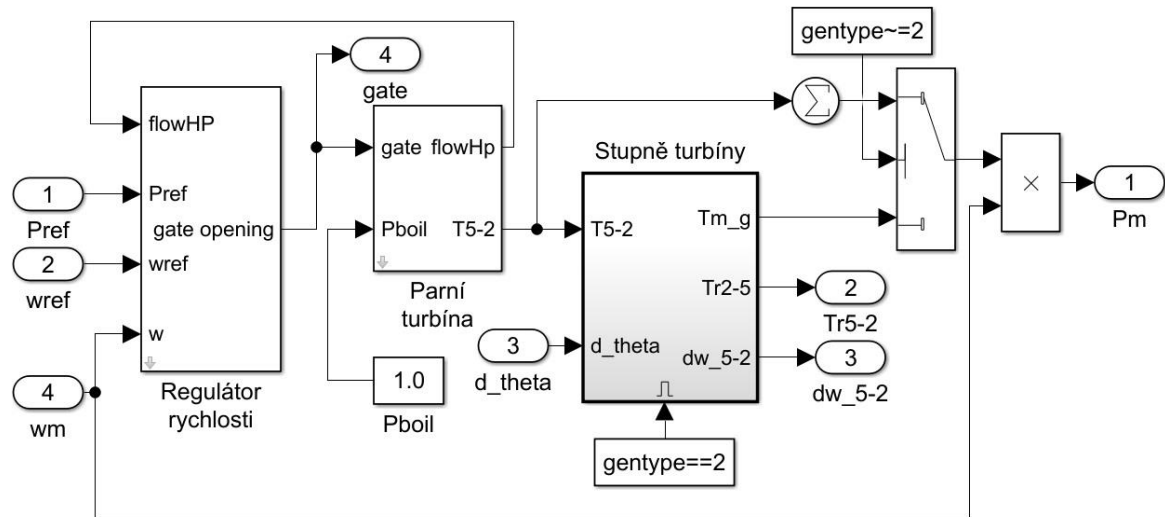
### 3.1.1 Blok Turbíny

V tomto energetickém modelu je použita parní turbína, vycházející z modelu typu IEEEG1, jejíž předpřipravený blok v simulačním rozhraní Simulink je vidět na Obr 3.2. V modelu řešeného v této práci bylo použito zjednodušení, kde je mechanická část uvažována jako jeden díl reprezentovaný jednou přechodovou funkcí. Turbína je tedy brána pouze jako jednostupňová. Díky tomu, že je hřídel turbíny celistvá zde dále nejsou mezi jednotlivými díly uvažovány i pružné spojky.

Blok samotný má následně čtyři vstupy a čtyři výstupy. První vstup je pro referenční hodnotu otáček turbíny  $\omega_{ref}$ , která se podle doporučení udává na hodnotu 1 a jedná se tak zároveň o synchronní rychlost alternátoru. Dalším vstupem je jmenovitý výkon  $P_{ref}$ , který je idealizovaně činným výkonem alternátoru a je stanovený na nominální hodnotu 0,85. Další vstupní veličinou jsou otáčky rotoru alternátoru  $\omega_m$  a zátěžný úhel alternátoru  $d\_theta$ . Obě tyto hodnoty jsou získávány ze samotného alternátoru pomocí výstupu  $m$  a rozříděním v bus selektoru. První výstupní hodnota  $dw_{5-2}$  zobrazuje odchylky mezi stupni turbíny 2 až 5, které jsou však v této simulaci zanedbány jelikož, jak již bylo zmíněno, je tento model uvažován pouze jako jednostupňový, a tudíž jsou zde ostatní stupně 2 až 5 vynechány. Druhý výstup  $Tr_{5-2}$  udává velikost mechanických momentů stupňů turbíny 2 až 5, které jsou také zanedbány. Vstup  $gate$  udává velikost průtoku páry lopatkami turbíny a často se připojuje na takzvaný terminátor, ke kterému se připojují nevyužité výstupní veličiny. Posledním výstupem je hodnota mechanického výkonu turbíny  $P_m$ , která je odváděná na vstup alternátoru.

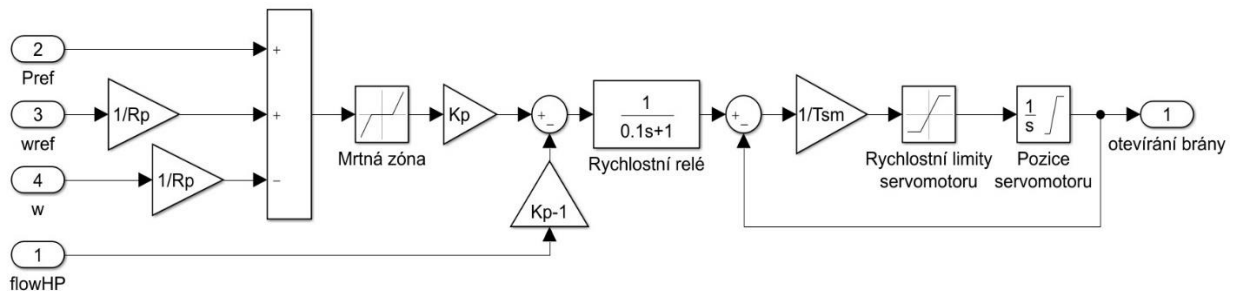


3.2 Model parní turbíny, převzato z [10]



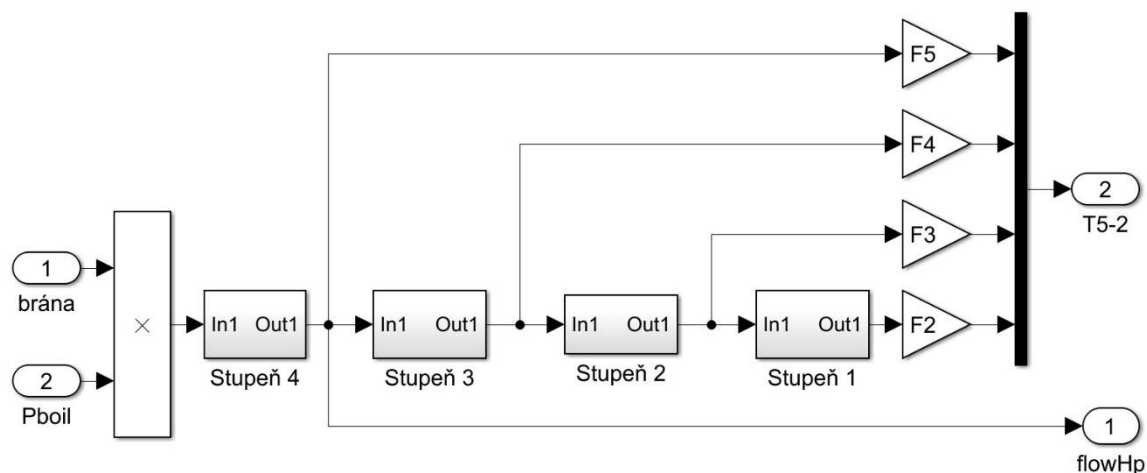
3.3 Vnitřní struktura modelu turbíny, převzato z [10]

Na Obr 3.3 vidíme vnitřní strukturu modelu parní turbíny, která se skládá ze tří hlavních částí, a to z bloku regulátoru otáček, bloku, který reprezentuje samotnou parní turbínu a bloku reprezentujícího stupně turbíny 2 až 5, jelikož je však hřídel uvažována jako celistvá tak je efekt tohoto blok ze simulací vynechán. Na vstup otáčkového regulátoru rychlosti jsou přiváděny požadované hodnoty. Jeho vnitřní uspořádání je vidět na Obr 3.4, se skládá z proporcionálního regulátoru, rychlostního relé a servomotoru, který se stará o změnu hmotnostního průtoku páry za stavu, kdy je tlak páry z kotle dostatečný.



3.4 Vnitřní struktura regulátoru rychlosti parní turbíny, převzato z [10]

Na Obr 3.5 vidíme vnitřní strukturu bloku reprezentujícího parní turbínu. Ta se skládá celkem ze čtyř stupňů, kde je každý stupeň reprezentován jednou přenosovou funkcí prvního řádu. V simulaci je použit pouze první stupeň a ostatní stupně jsou tedy zanedbány. Blok kotle zde není modelován a jeho tlak je stanoven na konstantní hodnotu 1. Bloky F2 až F5 se používají k přenosu energie do různých stupňů hřídele turbíny. Nicméně v této simulaci je hřídel uvažována jako celistvá, a tak jsou jejich hodnoty nulové.



3.5 Vnitřní struktura bloku turbíny, převzato z [10]

### 3.1.1.1 Parametry turbíny

Tabulka I Parametry parní turbíny

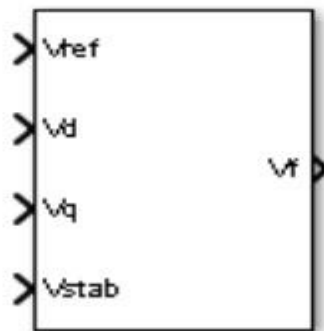
<b>Kp</b>	<b>Rp</b>	<b>Dz</b>	<b>Tsr</b>	<b>Tsm</b>	<b>vgmin</b>	<b>vgmax</b>	<b>gmin</b>	<b>gmax</b>
30 (-)	0,015 (-)	0 (-)	0,1 (s)	0,6 (s)	-0,1 (-)	0,1 (-)	0 (-)	1 (-)
<b>n</b>	<b>T2</b>	<b>T3</b>	<b>T4</b>	<b>T5</b>	<b>F2</b>	<b>F3</b>	<b>F4</b>	<b>F5</b>
3000 (ot/min)	0,0001 (s)	0 (s)	0 (s)	0 (s)	1 (-)	0 (-)	0 (-)	0 (-)

Tabulka II Popis parametrů parní turbíny

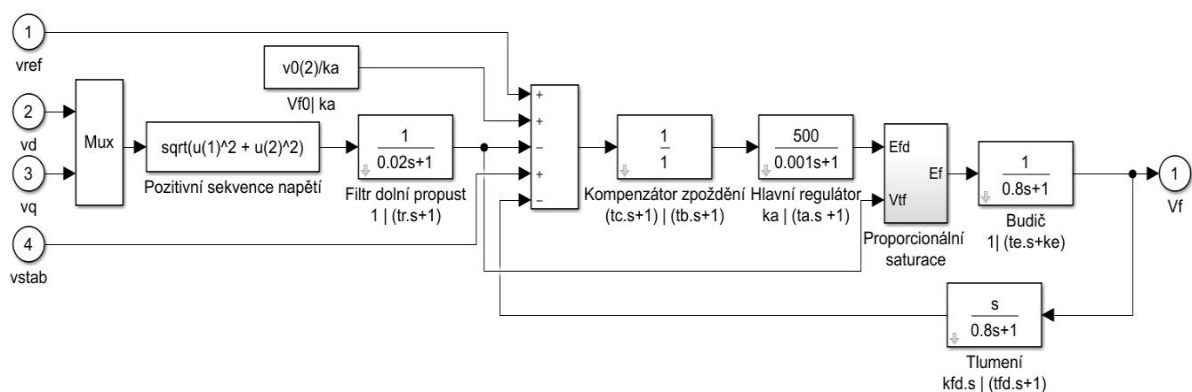
<b>Kp</b>	Zesílení regulátoru	<b>n</b>	Otáčky
<b>Rp</b>	Permanentní pokles	<b>T2</b>	Časová konstanta 2 stupně parní turbíny
<b>Dz</b>	Mrtvá zóna	<b>T3</b>	Časová konstanta 3 stupně parní turbíny
<b>Tsr</b>	Časová konstanta rychlostního relé	<b>T4</b>	Časová konstanta 4 stupně parní turbíny
<b>Tsm</b>	Časová konstanta servomotoru	<b>T5</b>	Časová konstanta 5 stupně parní turbíny
<b>vgmin</b>	Minimální rychlost změny hmotnostního průtoku páry	<b>F2</b>	Konstanta 2 stupně turbíny
<b>vgmax</b>	Maximální rychlost změny hmotnostního průtoku páry	<b>F3</b>	Konstanta 3 stupně turbíny
<b>gmin</b>	Minimální změna hmotnostního průtoku páry	<b>F4</b>	Konstanta 4 stupně turbíny
<b>gmax</b>	Maximální změna hmotnostního průtoku páry	<b>F5</b>	Konstanta 5 stupně turbíny

### 3.1.2 Blok Budící soustavy

Předpřipravený model budiče dle Obr 3.6 obsahuje čtyři vstupy a jeden výstup. Jedná se o zjednodušený typ stejnosměrného budiče, který sám nemá saturační funkci. Prvním vstupem je hodnota referenčního napětí  $V_{ref}$ . Velikost tohoto napětí určuje požadovanou hodnotu buzení alternátoru. Další vstupní veličinou je statorové napětí v ose d  $V_d$  a statorové napětí v ose q  $V_q$ . Tato napětí jsou na výstupu statoru a připojují se na vstup budiče jako zpětné cyklické veličiny pro správnou regulaci výsledného statorového napětí. Posledním vstupem je výstupním signál z výkonového stabilizátoru  $V_{stab}$ , jehož hodnota udává velikost fázového předstihu tak, aby došlo ke správnému natočení tlumícího momentu. Výstupem budiče je hodnota budícího napětí  $V_f$ , která se připojuje na vstup alternátoru, a jedná se tedy o jeho skutečné buzení. Princip samotného budícího systému je popsán v první kapitole.



3.6 Model budiče, převzato z [10]



3.7 Vnitřní struktura modelu budiče, převzato z [10]

Na Obr 3.7 je zobrazena vnitřní struktura BS. Lze si všimnout, že je tento typ BS konstruován převážně, jako napěťový regulátor. Budič samotný zde reprezentuje jediná

přenosová funkce vycházející z přenosu mezi budícím napětím  $V_{fd}$  a výstupem z napěťového regulátoru  $ef$ . Tento přenos je dán vztahem:

$$\frac{V_{fd}}{ef} = \frac{1}{Ke + sTe} \quad (-; -, s) \quad (3.1)$$

### 3.1.2.1 Parametry budiče

Tabulka 3.III Parametry budiče

<b>Tr</b>	<b>Ka</b>	<b>Ta</b>	<b>Ke</b>	<b>Te</b>	<b>Tb</b>	<b>Tc</b>
20e-3 (s)	500 (-)	0,001 (s)	1 (-)	0,8 (s)	0 (s)	0 (s)
<b>Tf</b>	<b>Ef<sub>min</sub></b>	<b>Ef<sub>max</sub></b>	<b>Kp</b>	<b>Vt<sub>0</sub></b>	<b>Vf<sub>0</sub></b>	<b>Kf</b>
0,8 (s)	-12,26 (-)	15,32 (-)	0 (-)	1 (-)	2 (-)	1 (-)

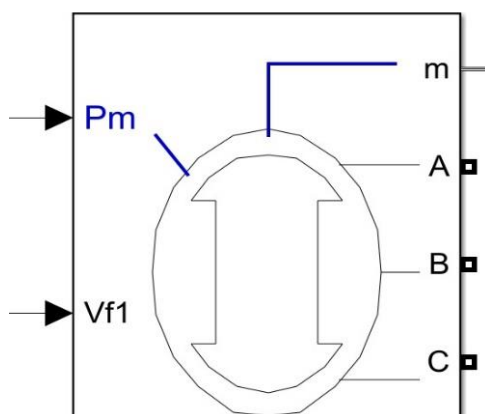
Tabulka IV Popis parametrů budiče

<b>Tr</b>	Časová konstanta filtru dolní propust	<b>Tf</b>	Časová konstanta tlumícího filtru
<b>Ka</b>	Zesílení regulátoru	<b>Ef<sub>min</sub></b>	Minimální výstupní hodnota napěťového regulátoru
<b>Ta</b>	Časová konstanta regulátoru	<b>Ef<sub>max</sub></b>	Maximální výstupní hodnota napěťového regulátoru
<b>Ke</b>	Zesílení budiče	<b>Kp</b>	Časová konstanta parní turbíny
<b>Te</b>	Časová konstanta budiče	<b>Kf</b>	Zesílení tlumícího filtru
<b>Tb</b>	Časová konstanta redukce přechodného zisku	<b>Vt<sub>0</sub></b>	Počáteční hodnota svorkového napětí
<b>Tc</b>	Časová konstanta redukce přechodného zisku	<b>Vf<sub>0</sub></b>	Počáteční hodnota napětí pole

### 3.1.3 Blok Alternátoru

Na Obr 3.8 je zobrazen použitý model alternátoru v simulačním rozhraní Simulink s označením Synchronous Machine pu Standart, který pracuje v poměrných jednotkách. Tento model zohledňuje změny statorových magnetických toků a tlumícího vinutí. Elektrická část je zde reprezentována šesti diferenciálními rovnicemi a mechanická část je zde reprezentována dvěma diferenciálními rovnicemi. Jedná se tedy o dynamický model. Tento model pracuje s provozními parametry synchronních strojů přiváděných na jeho vstup. Jako u většiny podobných modelů lze i zde změnou polarity mechanického výkonu využívat model v generátorovém či motorickém režimu [12]. Model obsahuje dva vstupy a čtyři výstupy.

Prvním vstupem je hodnota mechanického výkonu  $P_m$ , který je přiváděn z parní turbíny. Dalším vstupem je hodnota budicího napětí přiváděného z bloku budiče. Tři výstupy s označením A, B, C symbolizují fázové svorky alternátoru a jsou po správném nařazování připojeny k blokovému transformátoru. Vybrané elektrické a mechanické veličiny generátoru lze pozorovat například pomocí bloku scope připojeného na výstup alternátoru  $m$ . Dále je možné s těmito výstupními veličinami, které jsou identifikovány podle aktivovaných proměnných, pracovat například připojením k jiným modelům. Jako měřicí veličiny jsou udávány například otáčky rotoru, výstupní výkon alternátoru, satorové napětí, satorový proud nebo odchylka otáček rotoru od požadované. Tyto měřicí veličiny lze posléze rozřadit pomocí bus selektoru a použít např. ve zpětné smyčce u turbíny. Nebo je lze rovnou zobrazit pomocí bloku scope. V této práci je vzhledem k typu turbíny použit alternátor s hladkým rotorem, který obsahuje jeden pól pár.



3.8 Model alternátoru, převzato z [10]

### 3.1.3.1 Parametry alternátoru

Tabulka 3.V Parametry alternátoru

$X_d$	$X_d'$	$X_d''$	$X_q$	$X_q'$	$X_q''$	$X_l$	$T_{d0}'$	$T_{d0}''$	$T_{q0}'$
2,78	0,294	0,217	2,64	0,557	0,239	0,17	13,55	0,044	2,3
(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(s)	(s)	(s)
$T_{q0}''$	$R_s$	$S_n$	$V_n$	$f_n$	$H$	$F$	$p$	$V_f$	$i_{a,b,c}$
0,037	8,2997	235e <sup>6</sup>	15,75	50	4,423	0	1	2,95	1
(s)	e <sup>-4</sup> (-)	(VA)	e <sup>3</sup> (V)	(Hz)	(s)	(-)	(-)	(-)	(-)

Tabulka VI Popis parametrů alternátoru

$X_d$	Reaktance osy d	$T_{q0}''$	Rázová časová konstanta naprázdno osy q
$X_d'$	Přechodná reaktance osy d	$R_s$	Odpor vinutí statoru
$X_d''$	Rázová reaktance osy d	$S_n$	Jmenovitý zdánlivý výkon
$X_q$	Reaktance osy q	$V_n$	Jmenovité statorové napětí
$X_q'$	Přechodná reaktance osy q	$f_n$	Jmenovitá frekvence ES
$X_q''$	Rázová reaktance osy q	$H$	Setrvačnostní konstanta
$X_l$	Rozptylová reaktance	$F$	Součinitel tření
$T_{d0}'$	Přechodná časová konstanta naprázdno osy d	$p$	Počet pólových dvojic
$T_{d0}''$	Rázová časová konstanta naprázdno osy d	$V_f$	Počáteční hodnota napětí pole
$T_{q0}'$	Přechodná časová konstanta naprázdno osy q	$i_a, i_b, i_c$	Počáteční hodnoty proudů ve fázích A, B, C

### 3.1.4 Parametry výkonových stabilizátorů

#### 3.1.4.1 Parametry stabilizátoru typu PSS1A

Tabulka VII Parametry stabilizátoru PSS1A

$T_6$	$K_s$	$T_5$	$A_1$	$A_2$	$T_4$	$T_3$	$T_2$	$T_1$	$V_{RMin}$	$V_{RMax}$
1	40	1,65	0,061	0,0017	0,02	0,16	0,02	0,16	-0,03	0,1
(s)	(-)	(s)	(-)	(-)	(s)	(s)	(s)	(s)	(-)	(-)

Tabulka VIII Popis parametrů stabilizátoru PSS1A

$T_6$	Časová konstanta snímače	$T_3$	Konstanta fázové kompenzace
$K_s$	Zesílení stabilizátoru	$T_2$	Konstanta fázové kompenzace
$T_5$	Časová konstanta filtru dolní propust	$T_1$	Konstanta fázové kompenzace
$A_1$	Konstanta torzního filtru	$V_{RMin}$	Minimální limit stabilizátoru
$A_2$	Konstanta torzního filtru	$V_{RMax}$	Maximální limit stabilizátoru
$T_4$	Konstanta fázové kompenzace	-	

### 3.1.4.2 Parametry stabilizátoru typu PSS2A

Tabulka IX Parametry stabilizátoru PSS2A

$T_{W1}$	$T_{W2}$	$T_{W3}$	$T_{W4}$	$K_{S3}$	$K_{S2}$	$K_{S1}$	$M$	$N$
10 (s)	10 (s)	10 (s)	10 (s)	1 (-)	1,130365 (-)	35 (-)	2 (-)	4 (-)
$T_9$	$T_8$	$T_7$	$T_4$	$T_3$	$T_2$	$T_1$	$V_{RMin}$	$V_{RMax}$
0,15 (s)	0,3 (s)	10 (s)	0,01 (s)	0,16 (s)	0,01 (s)	0,16 (s)	-0,04 (-)	0,2 (-)

Tabulka X Popis parametrů stabilizátoru PSS2A

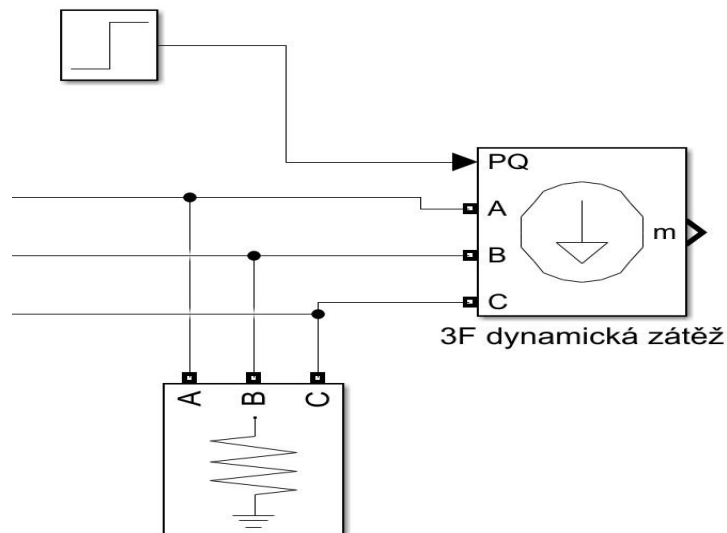
$T_{W1}$	Časová konstanta filtru	$T_9$	Konstanta bloku ramp-tracking
$T_{W2}$	Časová konstanta filtru	$T_8$	Konstanta bloku ramp-tracking
$T_{W3}$	Časová konstanta filtru	$T_7$	Integrační časová konstanta
$T_{W4}$	Časová konstanta filtru	$T_4$	Konstanta fázové kompenzace
$K_{S3}$	Zesílení stabilizátoru	$T_3$	Konstanta fázové kompenzace
$K_{S2}$	Zesílení stabilizátoru	$T_2$	Konstanta fázové kompenzace
$K_{S1}$	Zesílení stabilizátoru	$T_1$	Konstanta fázové kompenzace
$M$	Konstanta celočíselného filtru	$V_{RMin}$	Minimální limit stabilizátoru
$N$	Konstanta celočíselného filtru	$V_{RMax}$	Maximální limit stabilizátoru

### 3.1.5 Blok elektrizační soustavy

Blok ES byl pro potřeby simulace realizován jako ostrovní provoz, pro který je použit model třífázové dynamické zátěže, který je vidět na Obr. 3.9. Ostrovní provozu byl zvolen, jelikož je cílem simulace pouze demonstrovat funkci výkonového stabilizátoru pro kterou není třeba připojení alternátoru ke skutečné ES. Model se skládá ze 4 vstupů a 1 výstupu. Tři vstupy označené jako A,B,C symbolizují fázové svorky na které je připojen výstup z alternátoru. Na vstup PQ je připojen blok funkce Step pomocí, které je nastavena skoková změna odebíraného výkonu zátěží. Skokovou změnou byl nastaven pokles odebíraného výkonu o 2,5% z referenčního výkonu. Výstup s označením  $m$  se používá pro připojení k bloku Scope a následnému zobrazení signálů. V této simulaci však nebyl použit, protože pro zobrazení potřebných veličin postačil výstup  $m$  ze samotného alternátoru.

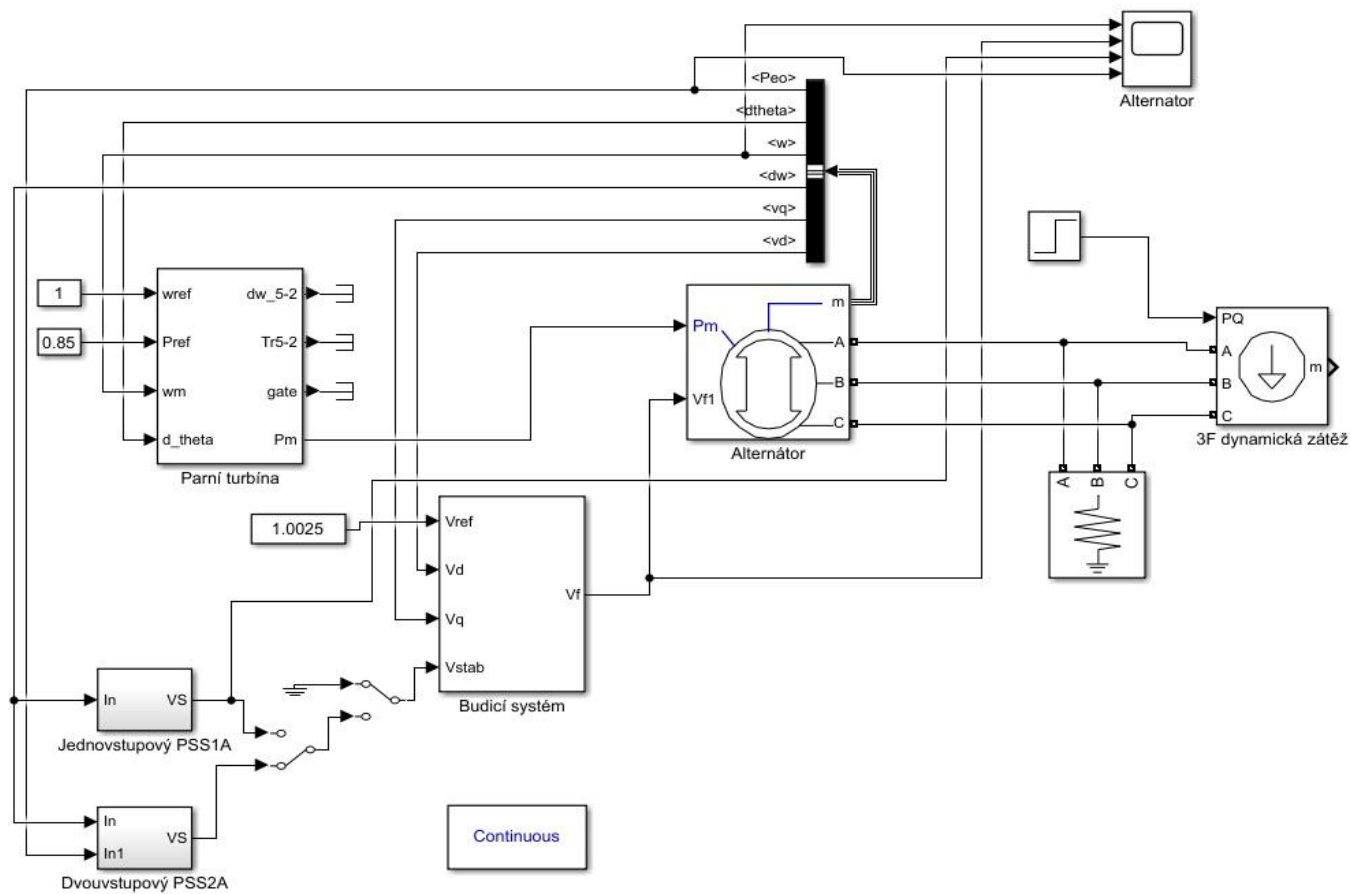


V prostředí simulačního prostředí Simulink je alternátor uvažován jako proudový zdroj. Paralelně připojená odporová zátěž je zde použita, jelikož se bez ní nemůže proudový zdroj připojit přímo v sérii k indukční zátěži, která je zde v podobě dynamické zátěže. Hodnota odporové zátěže je z numerických důvodů stanovena na nízkou hodnotu. Při zvýšení hodnoty odporové zátěže by mohlo docházet vlivem paralelního spojení s dynamickou zátěží ke změně skutečné zátěže, což je nežádoucí.



3.9 Model 3f dynamické zátěže, převzato z [10]

### 3.2 Zapojení energetického modelu v programu

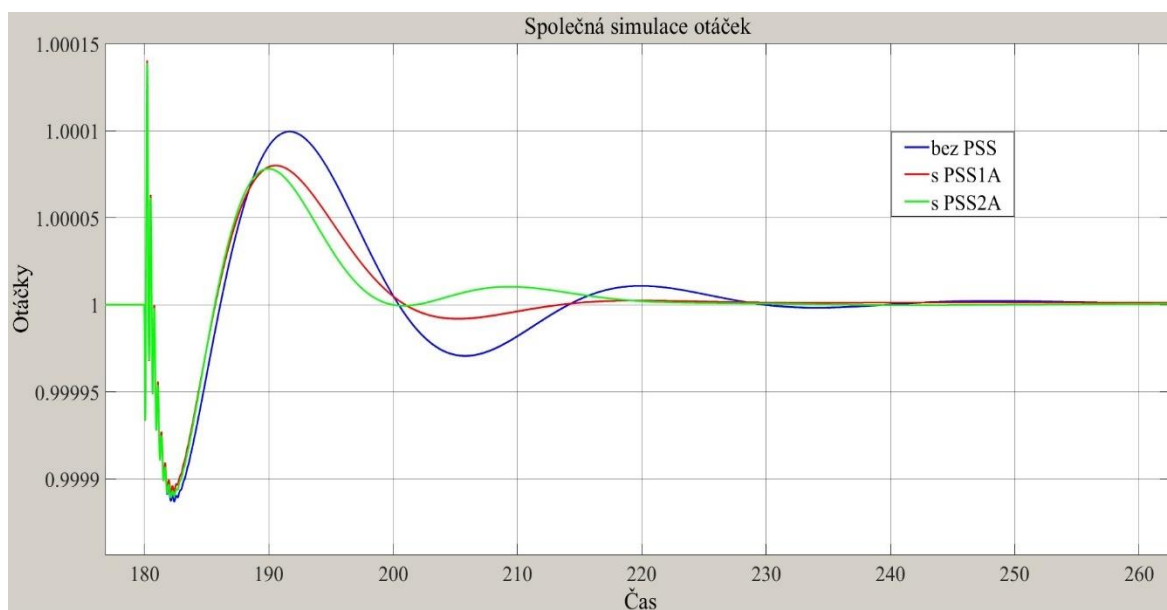


3.10 Zapojení energetického modelu v simulačním prostředí Simulink softwaru MATLAB

### 3.3 Simulace

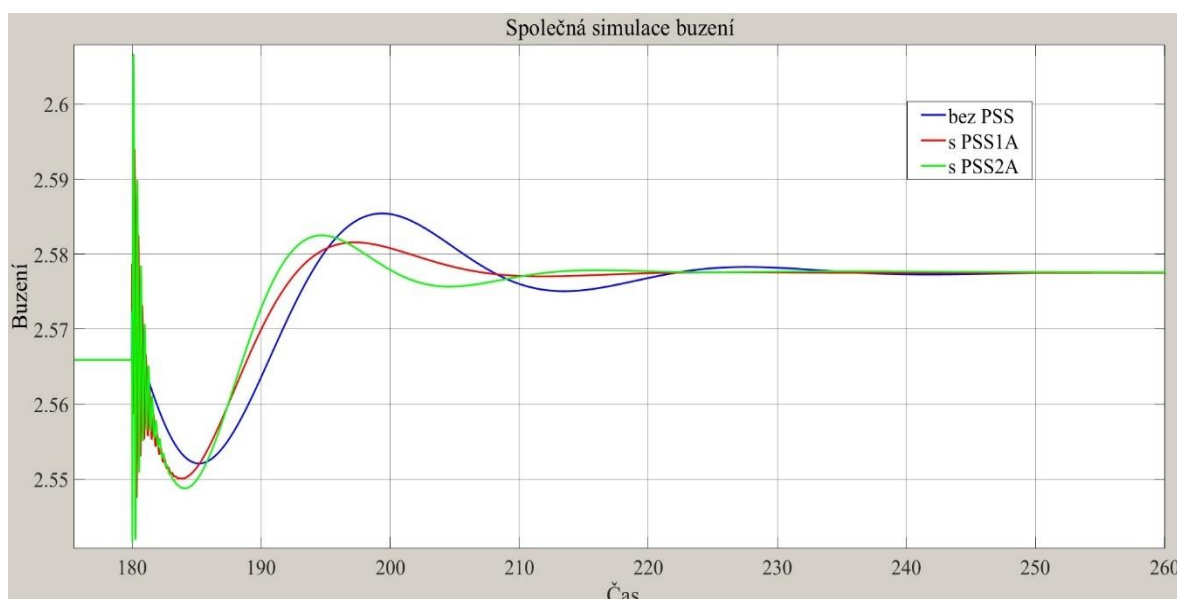
Tato podkapitola se věnuje výstupním simulacím při skokovém poklesu odebírané zátěže o 2,5 %. Výsledky simulací jsou následně diskutovány. Simulace byly provedeny pro případ bez výkonového stabilizátoru a s výkonovými stabilizátory typu PSS1A a PSS2A. Pro lepší orientaci je v každém obrázku vložena i legenda.

Na Obr 3.11 lze vidět otáčky všech tří simulací vynesené do jednoho grafu. Na první pohled je patrné, že má změna odebíraného výkonu vliv na otáčky rotoru v podobě kmitů. Dochází tedy k rozkmitání synchronní rychlosti rotoru. Při změně odebíraného výkonu začíná zároveň docházet ke změně momentu, který se snaží udržet alternátor v synchronismu. To následně vede u rychlé BS ke vzniku nežádoucích kmitů. Lze si všimnout vlivu výkonového stabilizátoru na tyto nežádoucí kmity, které se jeho působením snižují.



3.11 Společná simulace otáček

Na Obr 3.12 lze vidět společnou simulaci budících signálů BS. Do místa skokové změny odebíraného výkonu udržoval BS konstantní budící napětí. Nicméně po odeznění přechodného děje musel buzení alternátoru zvýšit a tím ho tedy přibudit. Při této změně buzení dochází ke kmitům, jelikož se hodnota buzení musí měnit spojitě. Při správném doladění například statických BS můžou být tyto kmity téměř minimální.

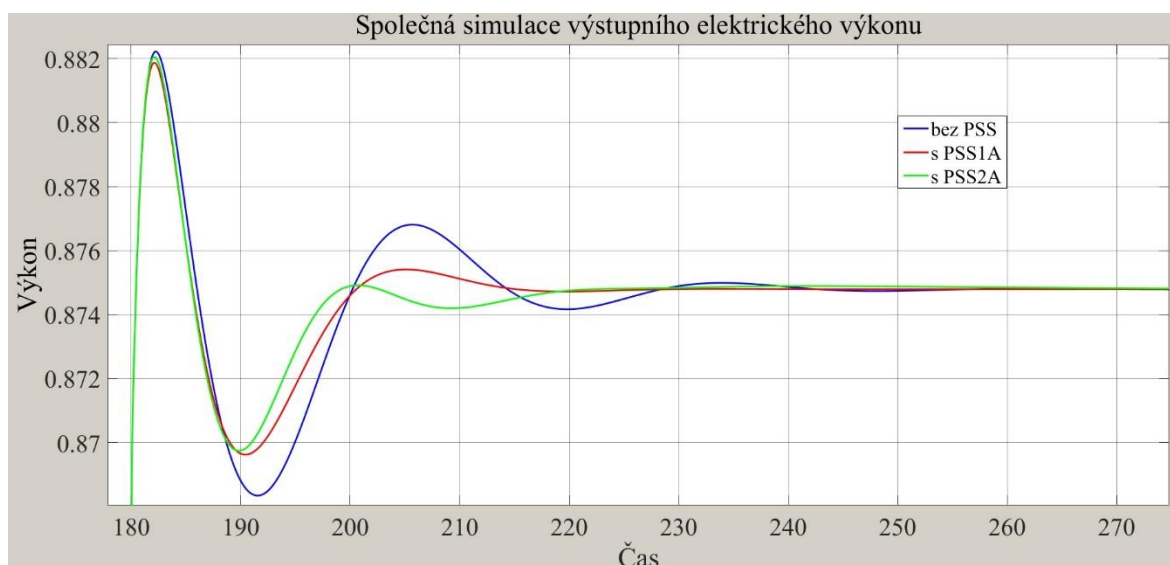


3.12 Společná simulace signálů buzení

Na Obr 3.13 lze vidět společnou simulaci výstupního elektrického výkonu. Při náhlé změně odebíraného výkonu dochází ke vzniku nežádoucích kmitů, které mohou ovlivňovat stabilitu alternátoru. Výkonové stabilizátory se v provozu používají k potlačení jak lokálních, tak i systémových kmitů. V této simulaci je uvažován ostrovní provoz, tudíž jsou zde působící kmitů pouze lokální. Bez použití výkonového stabilizátoru vznikají celkem tři výkonové překmity, které mohou negativně ovlivňovat ES, kterou alternátor přes blokový transformátor napájí. Pro zmírnění těchto překmitů je použit výkonový stabilizátor. Při použití stabilizátoru typu PSS1A dochází pouze k jednomu překmitu. Navíc se poníží i velikost celkové amplitudy jednotlivých kmitů. Při použití stabilizátoru typu PSS2A dochází k násobnému překmitu oproti typu PSS1A a stabilizace je tudíž pomalejší v porovnání s předchozím typem. Pravděpodobně je tato chyba způsobena špatným nastavením fázového předstihu stabilizátoru. Pro určení, zdali stabilizátor splňuje svou stabilizační funkci lze použít dvě kritéria a to:

- *V časovém průběhu činného výkonu s PSS musí být amplituda první půlvlny nižší než první amplituda první půlvlny bez PSS*
- *Vzniklé kmity musejí být s PSS utlumeny během 1,5 periody (což jsou 3 půlvlny), pokud toho nelze docílit například kvůli typu BS tak musejí být kmitů utlumeny max ve 4 půlvlnách*

Za utlumený průběh se považuje rozkmit pod  $\pm 0.5\%$  jmenovitého výkonu alternátoru.

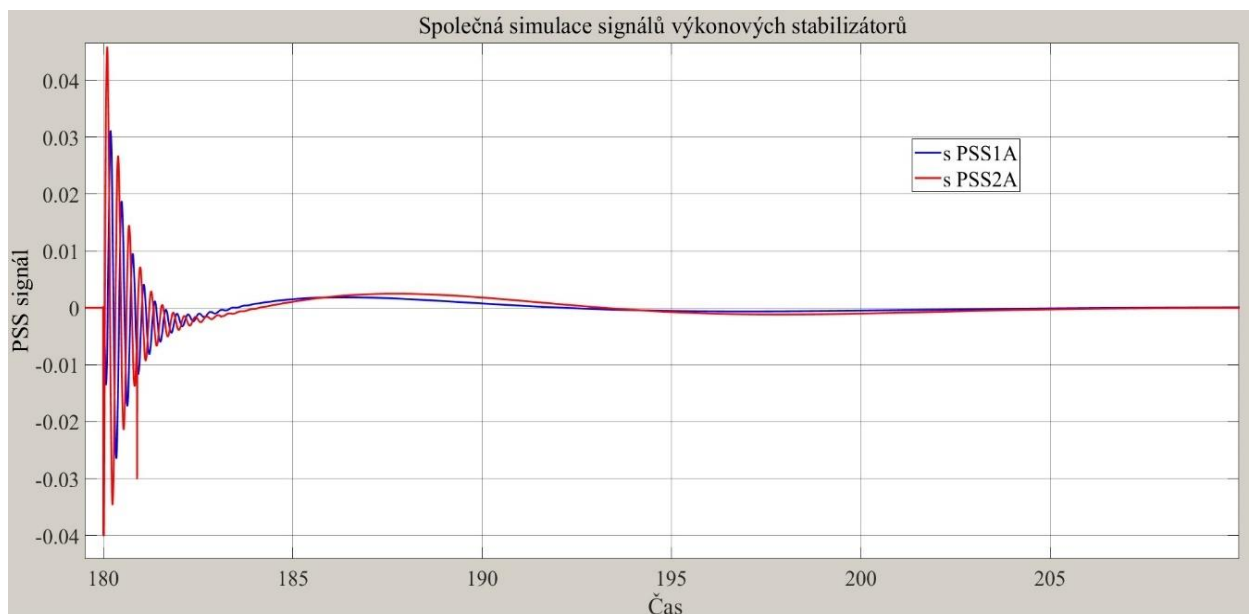


3.13 Společná simulace výstupního elektrického výkonu

Na Obr. 3.14 lze vidět společnou simulaci signálů výkonových stabilizátorů typu PSS1A a PSS2A. Výkonové stabilizátory musejí být až do místa vzniku přechodného děje nečinné. Jejich působení začíná až v místě skokové změny odebírané zátěže. V tomto místě začínají vytvářet fázový předstih pro udržení výsledného tlumícího momentu v kladné oblasti. Tím dochází k omezení působících nežádoucích kmitů, které mohou negativně ovlivňovat provoz alternátoru. U výkonového stabilizátoru PSS2A je rozdílnost ve stabilizaci otáček a výstupního elektrického výkonu. V simulaci otáček dochází během mírného rozkmitu ke snížení velikosti počáteční amplitudy kladné i záporné půlvlny. V simulaci výstupního elektrického výkonu je rozkmit oproti otáčkám větší. I zde dochází ke snížení velikosti amplitudy první záporné půlvlny. Konstrukčně je typ PSS2A lepší, a tudíž by měli být nežádoucí kmitů menší nežli u typu PSS1A. Nicméně z porovnání stabilizací obou typů vychází, že je v této simulaci lepší typ PSS1A.

To je pravděpodobně způsobeno špatným nastavením fázového předstihu u výkonového stabilizátoru PSS2A. V jeho vnitřním uspořádání by měl být fázový předstih doladěn pomocí bloku s členy Lead-Lag, kde by se měla upravit hodnota členu Lead pro zvýšení kladného fázového posuvu případně i členu Lag pro změnu záporného posuvu. Nicméně pro efektivní stabilizaci by se ještě mělo přenastavit zesílení stabilizátoru.

Výkonový stabilizátor typu PSS2A využívá k stabilizaci nežádoucích oscilací, na rozdíl od typu PSS1A, dva vstupní signály v podobě odchylky od synchronních otáček rotoru a odchylky elektrického výkonu. Odchylka otáček je mechanická veličina zatím co odchylka výkonu elektrická. Při stabilizaci nežádoucích kmitů se otáčky dle simulací stabilizují lépe nežli výstupní elektrický výkon. To je pravděpodobně způsobeno tím, že na rozdíl od otáček je elektrický výkon při stabilizaci ovlivňován více harmonickými signály, což může být například způsobeno vlivem rozkmitání magnetických polí alternátoru. Díky tomu je rozkvyv výstupního elektrického výkonu větší nežli rozkvyv otáček a tím je tedy stabilizace výstupního elektrického výkonu horší. Z tohoto důvodu je nevhodné používat odchylku výkonu pouze jako jednovstupový signál.



3.14 Společná simulace signálů výkonových stabilizátorů

## Závěr

V ES se často vyskytují nečekané situace, které mohou mít značný vliv i na funkci samotných alternátorů. Tento vliv může například způsobovat vznik nežádoucích kmitů v lokální či systémové oblasti. Ty posléze ovlivňují provoz celého zařízení, což může mít za následek negativní ovlivnění veličin alternátoru, například výstupní elektrický výkon. Kmity výkonů mohou v ES namáhat elektrická zařízení či ovlivňovat provoz ochranných přístrojů což může vést i k výpadku částí ES. To je z energetického hlediska velmi nežádoucí, a tak je kladen důraz na potlačení těchto kmitů. Zařízením, jenž má za úkol tyto nežádoucí kmity potlačit je výkonový stabilizátor. Tato bakalářská práce se zabývala použitím výkonových stabilizátorů a jejich vlivem na stabilizaci ES.

Pro simulaci byl použit starší jednovstupový typ PSS1A a dvouvstupový typ PSS2A, ty byly parametrizovány na alternátor 100 MVA, zatímco zbytek energetického modelu byl parametrizován na alternátor 235 MVA. Avšak pro zjištění, jak různě složité výkonové stabilizátory zlepšují stabilizaci alternátoru, byly tyto typy dostačující. Oba typy během simulací úspěšně snížily nežádoucí oscilace, ale objevili se u nich jisté rozdílnosti, kdy byla stabilizace pomocí typu PSS1A lepší než u typu PSS2A. Konstrukčně je typ PSS2A oproti předchozímu typu lepší, díky čemuž by měla jeho stabilizace výkonu vycházet lépe. Chyba byla nejspíš způsobena špatně nastavenou fázovou kompenzací u typu PSS2A, kde by bylo nutné ještě formou opakovaných simulací nastavit hodnotu požadovaného zesílení výkonového stabilizátoru. Při tomto odladění by měl typ PSS2A lépe stabilizovat alternátor nežli typ PSS1A. Avšak podle obecných kritérií z kapitoly 3 byla stabilizace obou typů dostačující.

V simulaci společného výstupního elektrického výkonu lze vidět, že se výkon při zapojení bez výkonového stabilizátoru ustálí v čase cca 255 s až po téměř 6 půlvlnách. Podle obecných kritérií musejí být nežádoucí kmity utlumeny maximálně do 4 půlvln. Při použití výkonového stabilizátoru typu PSS1A byly kmity výkonu v čase 210 s utlumeny již do 3 půlvln. Zároveň byl tento typ výkonového stabilizátoru schopen v čase cca 190 s snížit hodnotu záporné amplitudy téměř na hodnotu 0,87 W. Při použití druhého typu výkonového stabilizátoru PSS2A byly kmity výkonu utlumeny až ve 4 půlvlnách v čase 220 s, čímž ale i přes pomalejší stabilizaci oproti předchozímu typu PSS1A stále splňuje svou stabilizační funkci dle obecných kritérií.

Dále byl typ PSS2A schopen, stejně jako typ PSS1A, ponížít hodnotu záporné amplitudy v čase 190 s téměř na hodnotu 0,87 W. Podle obecných kritérií musí mít amplituda první půlvlny při použití výkonových stabilizátorů menší hodnotu. Amplituda první půlvlny v cca 183 s má bez použití výkonového stabilizátoru hodnotu lehce převyšující 0,882W. Při použití výkonového stabilizátoru typu PSS1A je hodnota amplitudy první půlvlny mírně menší. U výkonového stabilizátoru PSS2A je amplituda první půlvlny nepatrně vyšší nežli u předchozího typu PSS1A, ale zároveň je i menší, nežli je amplituda první půlvlny bez použití výkonového stabilizátoru. Porovnáním výsledků obou typů výkonových stabilizátorů je hodnota amplitudy první půlvlny obou typů menší než bez použití výkonového stabilizátoru. Lze tedy konstatovat, že oba typy výkonových stabilizátorů splňují i druhé kritérium, a tudíž splňují svojí stabilizační funkci. V prezentované bakalářské práci byly použity rozšířené ale starší typy výkonových stabilizátorů. Při použití modernějších typů by byl výsledek pravděpodobně lepší.

Z výsledků simulace je tedy zřejmé, že při použití výkonových stabilizátorů dochází ke snížení negativních vlivů na ES a zároveň i ke snížení možného rizika, že by mohl alternátor vypadnout ze synchronního chodu, a tím byl tedy zároveň ověřen jejich přínos v energetice.



## Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] TKOTZ, Klaus, Petr BASTIAN, Horst BUMILLER, et al. *Příručka pro elektrotechniky*. 2. doplněné vydání, dotisk. Haan-Guiten: Verlag Europa-Lehrmittel, 2017. ISBN 978-3-8085-3034-4.
- [2] MRAVEC, Rudolf. *Elektrické stroje a přístroje: 1. Elektrické stroje*. 1. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1979.
- [3] BRETTSCHEIDER, Ing. Zbyněk, ORGEZ a.s. *Definice požadavků na systémové stabilizátory do Kodexu PS*. [online]. 2007 [cit. 2020-12-15]. Dostupné z: <https://www.ceps.cz/cs/kodex-ps>
- [4] IEEE Std. 421.2, *IEEE Guide for Identification, Testing, and Evaluation of the Dynamic Performance of Excitation Control Systems*, The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., USA, New York, 1990.
- [5] VINS, Martin, Jaroslav DRAGON a Martin SIROVY. *Integration of Battery Energy Storage in Thermal Power Plant*. In: IECON 2020 The 46th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society [online]. IEEE, 2020, 2020-10-18, s. 1608–1613 [cit. 2021-03-11]. ISBN 978-1-7281-5414-5. Dostupné z: doi:10.1109/IECON43393.2020.9254725
- [6] HORA, Oldřich. *Regulační a budicí systémy synchronních strojů*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1985. Knižnice automatizace.
- [7] PLÁTENÍK, Vladimír. *Využití elektrické energie: pro střední odborná učiliště*. Praha: SNTL-Nakladatelství technické literatury, 1987.
- [8] BLAHOVEC, Antonín. *Elektrotechnika II*. 5., nezměněné vyd. Praha: Informatorium, 2005. ISBN 80-7333-044-x.
- [9] LORENC, Jiří. *Automatizační technika I: učební text pro studijní obor 05-2-03 měřicí a automatizační technika na středních průmyslových školách*. 3. nezměněné vyd. Praha: SNTL-Nakladatelství technické literatury, 1975, Řada elektrotechnické literatury.
- [10] The Math Works. MATLAB R2020b [software]. 22. září 2020 [cit. 2021-04-07]. Dostupné z: <https://www.mathworks.com>. Požadavky na systém: Linux (32bit, 64bit), Windows (32bit, 64bit), Mac OS X (64bit); velikost 32 GB.
- [11] IEEE Std. 421.5. *Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies*, The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., USA, New York, 2016.
- [12] VINS, Martin, Karel NOHAC a Martin SIROVY. *Accuracy Evaluation of Synchronous Generator Models in PSAT*. In: *2021 IEEE 19th International Power Electronics and Motion Control Conference (PEMC)* [online]. IEEE, 2021, 2021-4-25, s. 383-389 [cit. 2021-5-25]. ISBN 978-1-7281-5660-6. Dostupné z: doi:10.1109/PEMC48073.2021.9432636