

**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ**

Fakulta elektrotechnická  
Katedra elektrických pohonů a trakce

**STABILIZACE VÝKONU SYNCHRONNÍHO  
GENERÁTORU PROSTŘEDNICTVÍM REGULÁTORU  
BUZENÍ**



Diplomová práce

Autor práce: Jan Fišera

Vedoucí práce: Ing. Jan Bauer, Ph.D.

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management

2018

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Fišera** Jméno: **Jan** Osobní číslo: **372409**  
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**  
Zadávající katedra/ústav: **Katedra elektrických pohonů a trakce**  
Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**  
Studijní obor: **Elektrické stroje, přístroje a pohony**

## II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

**Stabilizace výkonu synchronního generátoru prostřednictvím regulátoru buzení**

Název diplomové práce anglicky:

**Synchronous Generator Output Power Stabilization by Excitation Control**

Pokyny pro vypracování:

1. Proveďte rešerši způsobů stabilizace činného výkonu pomocí regulátoru buzení
2. Vytvořte matematický model a s jeho pomocí parametry stabilizátoru nalaďte
3. Realizujte měřicí pracoviště vhodné k měření činného výkonu synchronního generátoru
4. Odkoušejte stabilizaci výkonu pomocí regulátoru buzení na reálném soustrojí

Seznam doporučené literatury:

- [1] KUNDUR, P., Neal J. BALU a Mark G. LAUBY. Power system stability and control. New York: McGraw-Hill, c1994. ISBN 007035958X.
- [2] IEEE 421.5: Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies, The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., USA, New York 2005
- [3] Měřička, J. Hamata, V. Voženílek, P.: Elektrické stroje. Praha: ČVUT. 2000, ISBN 80-01-02109-2
- [4] KRISHNAN, R. Electric motor drives: modeling, analysis, and control. Upper Saddle River, N.J.: Prentice Hall, c2001
- [5] CHIASSON, John Nelson. Modeling and high performance control of electric machines. Hoboken: Wiley, 2005.
- [6] MOHAN, Ned. Advanced electric drives: analysis, control, and modeling using MATLAB / Simulink. Hoboken: Wiley, 2014.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

**Ing. Jan Bauer, Ph.D., katedra elektrických pohonů a trakce FEL**

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **26.04.2018** Termín odevzdání diplomové práce: **25.05.2018**

Platnost zadání diplomové práce: **30.09.2019**

Ing. Jan Bauer, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.  
podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

\_\_\_\_\_  
Datum převzetí zadání

\_\_\_\_\_  
Podpis studenta

# Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne 25.5.2018

Podpis .....

# Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu práce Ing. Janu Bauerovi, Ph.D. za cenné rady a metodické vedení při tvorbě této diplomové práce. Dále musím poděkovat mojí rodině, bez které bych toto studium nebyl schopný absolvovat a tato práce by tedy nikdy nevznikla.

## Anotace:

Tato diplomová práce je zaměřena na problematiku týkající se stabilizace činného výkonu synchronních generátorů za pomoci regulátoru buzení. Jinými slovy se zabývá systémovými stabilizátory. Po teoretickém rozboru generátoru, budících systému a samotných PSS následuje praktická část, ve které jsou odladěny parametry systémového stabilizátoru na Heffron-Phillipsově modelu synchronního generátoru připojeného k síti nekonečného výkonu a odsimulována jeho funkce v Matlabu. Poté je v práci popsána úprava zkušebního pracoviště vhodná pro měření činného výkonu a na závěr je PSS vyzkoušený na reálném stroji.

## Annotation:

This master thesis is focused on issues of stabilization of active power of synchronous generators by excitation system. In other words it is about Power system stabilizers. After theoretical analysis of generator, excitation systems and power system stabilizers follows practical part in which are adjusted parameters of power system stabilizer on Heffron-Phillips model of synchronous generator connected to infinite bus and the function is simulated in Matlab. Then it is described adjustment of the test station to be suited for measuring of active power and at the end the power system stabilizer is tested on the real machine.

## Klíčová slova:

PSS, Systémový stabilizátor, GEP, Bodeho charakteristiky, Synchronního generátor, Budící systémy, Matlab, Simulink, Stabilita, Lokální kývání, SMIB, Stroj připojený k síti nekonečného výkonu

## Keywords:

PSS, Power System Stabilizer, GEP, Bode characteristics, Synchronous generator, Excitation systems, Matlab, Simulink, Stability, Local swinging, SMIB, Single machine connected to infinity bus

# Obsah

1. Úvod.....	- 8 -
2. Synchronní generátor .....	- 9 -
2.1. Úvod k synchronním generátorům .....	- 9 -
2.2. Přifázování synchronního generátoru na síť.....	- 11 -
2.3. Charakteristiky přifázovaného generátoru .....	- 11 -
2.3.1. V-křivky .....	- 11 -
2.3.2. P-Q diagram .....	- 12 -
2.4. Statická stabilita .....	- 12 -
2.5. Dynamická stabilita .....	- 13 -
2.6. Rovnice kývání.....	- 14 -
2.7. Elektromechanické oscilace .....	- 16 -
2.7.1. Lokální kývání .....	- 16 -
2.7.2. Systémové kývání .....	- 17 -
2.7.3. Kývání blízkých generátorů.....	- 17 -
3. Budící systémy synchronních generátorů.....	- 18 -
3.1. Popis budících systémů .....	- 18 -
3.2. Automatický regulátor napětí AVR .....	- 18 -
3.3. Budič.....	- 18 -
3.3.1. Budiče se stejnosměrným zdrojem .....	- 19 -
3.3.2. Budiče rotační se střídavým napájecím zdrojem .....	- 20 -
3.3.3. Budiče statické se střídavým zdrojem .....	- 20 -
3.4. Vhodnost budících systémů pro PSS.....	- 21 -
4. Power System Stabilizer PSS.....	- 23 -
4.1. Princip funkce PSS .....	- 23 -
4.2. Rozdělení PSS dle vstupní veličiny .....	- 24 -
4.3. Základní bloky PSS.....	- 25 -
4.3.1. Washout filtr.....	- 25 -
4.3.2. zesílení.....	- 26 -
4.3.3. Kompenzace fáze.....	- 26 -
4.4. Typy PSS .....	- 26 -
4.4.1. PSS1A.....	- 26 -
4.4.2. PSS2B.....	- 27 -
4.4.3. PSS3B.....	- 27 -

---

4.4.4.	PSS4B .....	- 28 -
5.	Model k odladění parametrů PSS .....	- 29 -
5.1.	Samostatný stroj pracující do sítě nekonečného výkonu (SMIB).....	- 29 -
5.2.	Heffron-Phillipsův model .....	- 29 -
5.3.	Implementace modelu do prostředí Simulink od Matlabu .....	- 32 -
5.4.	GEP metoda.....	- 33 -
5.4.1.	Nastavení washout filtrů .....	- 34 -
5.4.2.	Nastavení fázové kompenzace .....	- 36 -
5.5.	Nastavení konvenčního PSS1A .....	- 38 -
5.6.	Simulace .....	- 40 -
5.7.	Vytvoření SMIB za pomoci SimScape toolboxu v Matlab-simulinku.....	- 44 -
6.	Realizace pracoviště k měření na reálném soustrojí .....	- 47 -
6.1.	Schéma a popis pracoviště .....	- 47 -
6.2.	Úprava pracoviště k měření činného výkonu přes počítač .....	- 50 -
6.2.1.	Výběr převodníku .....	- 50 -
6.2.2.	Výběr měřící karty .....	- 51 -
6.2.3.	Realizace převodů proudových výstupu na napěťové vstupy .....	- 52 -
7.	Měření vlivu PSS na reálném soustrojí .....	- 53 -
8.	Závěr .....	- 55 -
9.	Seznam symbolů .....	- 56 -
10.	Seznam zkratk .....	- 57 -
11.	Seznam obrázků .....	- 58 -
12.	Seznam tabulek.....	- 60 -
13.	Seznam literatury .....	- 60 -

# 1. Úvod

V této práci se zabývám stabilizací výkonu synchronních generátorů pomocí budícího systému. Což je jinými slovy aplikace Power System Stabilizerů (PSS), v české literatuře často překládaných jako Systémové stabilizátory. Tento způsob stabilizace je nejlevnější způsob stabilizace výkonu. Provádí se implementováním PSS jako pomocné funkce do regulátoru buzení. Stabilita napájecí elektrické sítě je klíčová pro kvalitu dodávané energie a nestabilní síť může způsobit velké problémy, které mohou vyústit dokonce i v tzv. Black-Out, což je výpadek sítě ve velké oblasti. Stabilitou a tlumením elektromechanických kyvů přímo na síti se potom zabývají tzv. systémy FACTS (Flexible Alternate Current Transmission Systems), které jsou ovšem cenově náročnější.

V této práci mám dva hlavní cíle. Za prvé odladění PSS na matematickém modelu, konkrétně na tzv. Heffron-Phillipsově modelu synchronního generátoru připojeného k nekonečně tvrdé síti, který je hojně využíván právě pro základní ladění. Jedná se o linearizovaný model v okolí pracovního bodu v poměrných jednotkách a zahrnuje v sobě všechny důležité vazby. Druhý cíl je poté odzkoušení principu funkce na reálném zkušebním soustrojí ve firmě Tenel ČR, s.r.o. K odladění je potřeba také upravit toto zkušební soustrojí, lze také říct modernizovat, aby bylo možno měřit přímo přes počítač. Nyní přejdu k obsahu práce.

V druhé kapitole se věnuji obecně synchronním strojům. Rozebírám důležité provozní diagramy pro práci synchronního stroje na síti a věnuji se také stabilitě synchronního stroje. Dále rozebírám rovnici kývání, což je rovnice popisující elektromechanické oscilace, které chceme stabilizovat.

V třetí kapitole se zabývám budícími systémy synchronních generátorů. Je zde provedeno základní dělení a poté probrány používané typy budících systémů. Na závěr kapitoly je ukázáno, co je důležité pro aplikaci PSS.

Ve čtvrté kapitole se věnuji samotným PSS. Zde rozebírám hlavně jejich princip, který je založen na vytvoření signálu vstupujícího do regulátoru a který má způsobit následně kladný tlumící moment na hřídeli stroje. Dále se zde věnuji jednotlivým PSS, které jsou dané normou IEEE Std 421.5.

V páté kapitole poté probíhá odladění parametrů PSS na základě Heffron-Phillipsově modelu v programu Matlab a jeho nadstavbě Simulinku. Je ukázáno postupné systematické odladění PSS tzv. metodou GEP a v Matlabu je odzkoušena jeho funkce.

V posledních kapitolách se věnuji úpravě zkušebního soustrojí a zdůvodňuji proč a jak byly vybrány jednotlivé komponenty. Na závěr proběhne ověření funkce PSS měřením právě na tomto soustrojí.



## 2. Synchronní generátor

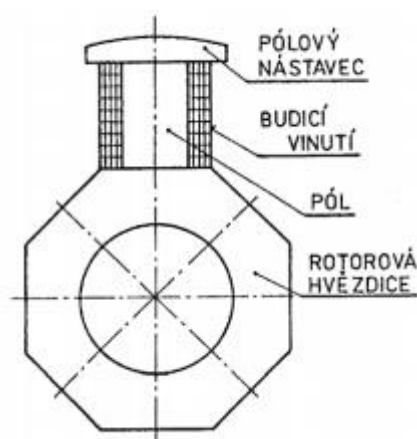
### 2.1. Úvod k synchronním generátorům

Synchronní generátor je nejpoužívanější elektrický stroj sloužící k přeměně mechanické na elektrickou energii. Nejčastěji pracuje jako třífázový stroj, kterému se říká **alternátor**. Alternátory mohou pracovat s výkony řádově až jednotky gigawattů.

V této práci se dále budu zabývat pouze klasickými synchronními generátory s budícím vinutím na rotoru, buzeným budícím systémem.

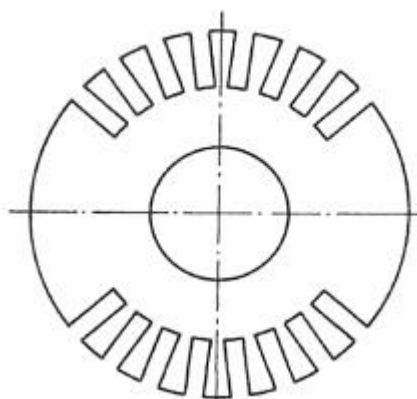
Konstrukčně se takový generátor skládá ze dvou hlavních částí a to statoru a rotoru. Ve statoru je uloženo statorové vinutí, přes které odvádíme elektrický výkon ze stroje. Na rotoru je na pólech navinuto budící vinutí, kterým budíme hlavní magnetický tok stroje.

Synchronní stroje dále dělíme podle typu rotorových pólů. **Hydroalternátor** je stroj, který má póly vyniklé a používá se hlavně tam, kde je vhodné pracovat s menšími otáčkami a menšími výkony, tj. např. vodní elektrárny. Řez rotorem stroje s vyniklými póly je na Obr. 1.



Obr. Řez rotorem hydrostroje, převzato z [10]

Druhý typ je obvykle nazýván **turboalternátor**, který má hladký rotor a póly nejsou vyniklé. Takový stroj je přizpůsoben vysokým otáčkám a tím pádem menšímu počtu pólů. Turboalternátory najdou použití hlavně v jaderných a uhelných elektrárnách velkých výkonů.



Obr. 1 Řez rotorem turbostroje, převzato z [10]

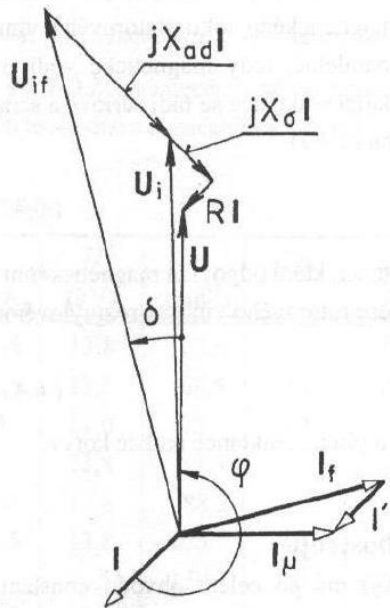
Základní vztah pro frekvenci indukovaného napětí  $f$ , z kterého plyne, jakými otáčkami je stroj potřeba pohánět, aby frekvence statorového napětí byla shodná se síťovou frekvencí 50 Hz a stroj se mohl připojit na síť.

$$f = \frac{p * n}{60} \quad (2.1)$$

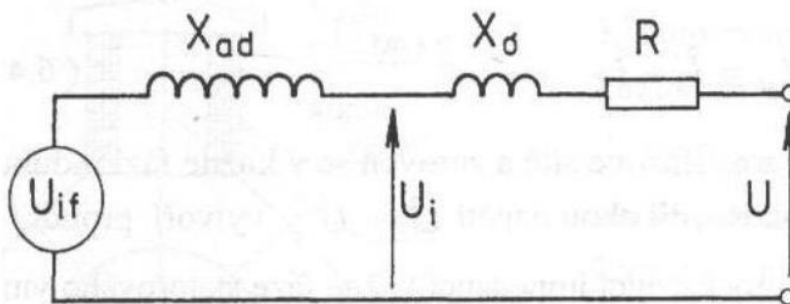
U turboalternátoru je podélná reaktance  $X_d$  rovná příčné reaktanci  $X_q$ . Napěťová rovnice turboalternátoru pak má tvar:

$$U = RI + jX_{ad}I + jX_{\sigma}I + U_{if} \quad (2.2)$$

Z ní lze sestavit fázorový diagram touto úvahou. Máme vnitřní napětí generátoru  $U_{if}$  vytvořené budícím proudem. Úbytkem napětí na podélné reaktanci  $X_{ad}$  je dané indukované napětí ve statorovém vinutí. Další úbytek napětí je způsoben na rozptylové reaktanci statoru  $X_{\sigma}$  a jako poslední úbytek na odporu statorového vinutí  $R$ , což nám dá napětí na svorkách generátoru  $U$ . Zpoždění vnitřního napětí generátoru za svorkovým napětím se nazývá vnitřní zátěžný úhel generátoru  $\delta$ . Odpovídající fázorový diagram je na Obr. 2 a náhradní schéma na Obr. 3.



Obr. 2 Fázorový diagram turbostroje, převzato z [1]



Obr. 3 Náhradní schéma turbostroje, převzato z [1]

## 2.2. Přifázování synchronního generátoru na síť

Při připínání synchronní alternátoru k síti je nutné zajistit, aby alternátor měl co možná nejméně shodné parametry jako síť, na kterou je připínán. Přizpůsobení se zaručí 4. základními podmínkami a to:

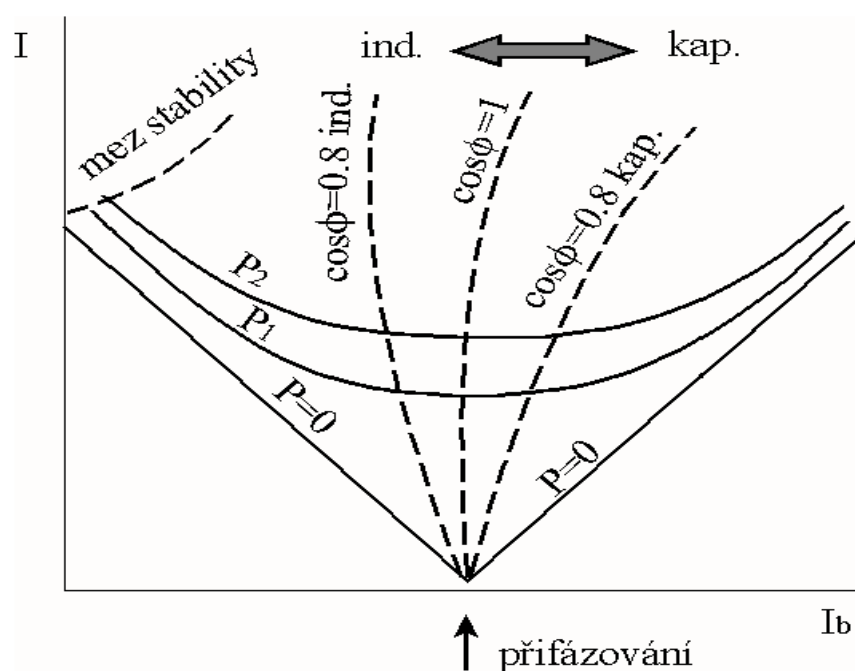
- 1) Stejný sled fází
- 2) Shodná frekvence
- 3) Stejně veliké napětí
- 4) Stejná fáze

Odchylkami od podmínek 2,3,4 vznikají proudové rázy, které jsou tím vyšší, čím jsou větší odchylky. Proto se k přifázování používají tzv. synchronizátory, které tyto odchylky minimalizují a tím chrání generátor.

## 2.3. Charakteristiky přifázovaného generátoru

### 2.3.1. V-křivky

Základní regulační charakteristikou synchronního generátoru je vztah mezi budícím proudem  $I_b$  a statorovým proudem  $I$ . Takové charakteristiky se kvůli jejich tvaru říká V-křivka. Křivka je platná pro konstantní výstupní činný výkon a konstantní statorové napětí. Typické V-křivky jsou na Obr. 4.



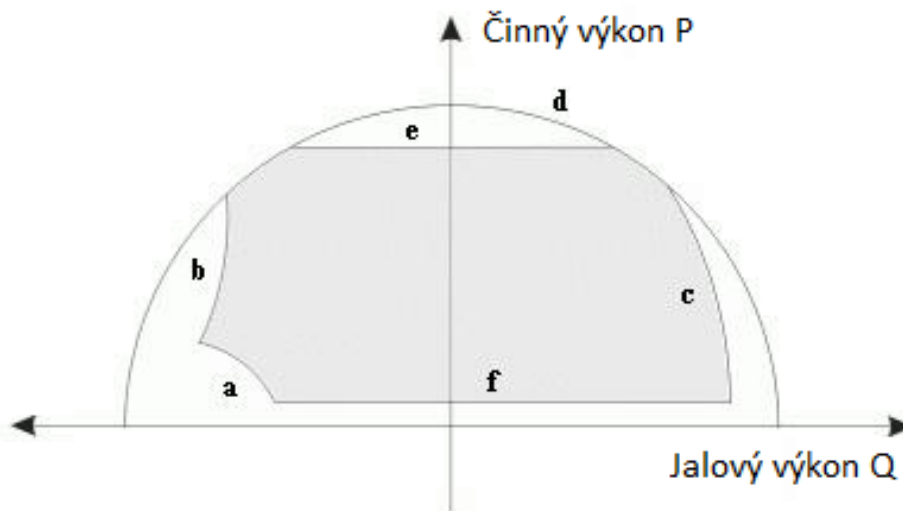
Obr. 4 V-křivky synchronního generátoru, převzato z [14]

Jakmile je budící proud nižší než jmenovitý, stroj pracuje v podbuzeném chodu a k síti se jeví jako indukčnost. Tím pádem ze sítě odebírá jalový výkon. Při budícím proudu vyšším než jmenovitém, je stroj přebuzený a k síti se jeví jako kapacita. Tedy do sítě jalový výkon dodává. Pomocí budícího proudu můžeme tedy podle požadavků řídit velikost dodávaného, resp. odebíraného jalového výkonu.

Maximální velikost odebíraného jalového výkonu ze sítě je omezena mezí statické stability.

### 2.3.2. P-Q diagram

Další důležitým diagramem pro provoz alternátoru na síti je tzv. **P-Q diagram**. Tento diagram udává v jakém rozmezí můžeme regulovat činný a jalový výkon generátoru. Typický tvar P-Q diagramu je na Obr. 5.



Obr. 5 P-Q diagram synchronního alternátoru, převzato z [19]

Na obrázku jsou vidět mezní křivky, které nám omezují v jakých mezích lze regulovat. Jsou dány takto:

- Křivka a – Omezení minimálním budícím proudem
- Křivka b – Omezení mezí statické stability
- Křivka c – Omezení maximálním budícím proudem
- Křivka d – Omezení maximálním statorovým proudem
- Křivka e – Omezení maximálním výkonem turbíny
- Křivka f – Omezení minimálním výkonem turbíny

### 2.4. Statická stabilita

Nejprve je vhodné definovat si pojem stabilita jako takový. Stabilita je schopnost generátoru vrátit se do ustáleného chodu po nějakém rozruchu, který stroj dostane z rovnovážného chodu.

Statická stabilita nám určuje maximální dodávaný výkon generátoru do sítě, při kterém synchronní stroj zůstane v synchronismu se sítí. Ten je dán rovnicí (2.3)

$$P = \frac{U_g U_s}{X} \sin \delta \quad (2.3)$$

,kde  $U_g$  je napětí generátoru,  $U_s$  je napětí sítě,  $X$  je celková impedance mezi vnitřním napětím generátoru a sítí a  $\delta$  je zátěžný úhel mezi vnitřním napětím generátoru a napětím sítě.

Maximální teoretický dodávaný výkon generátoru je při zátěžném úhlu  $90^\circ$ .

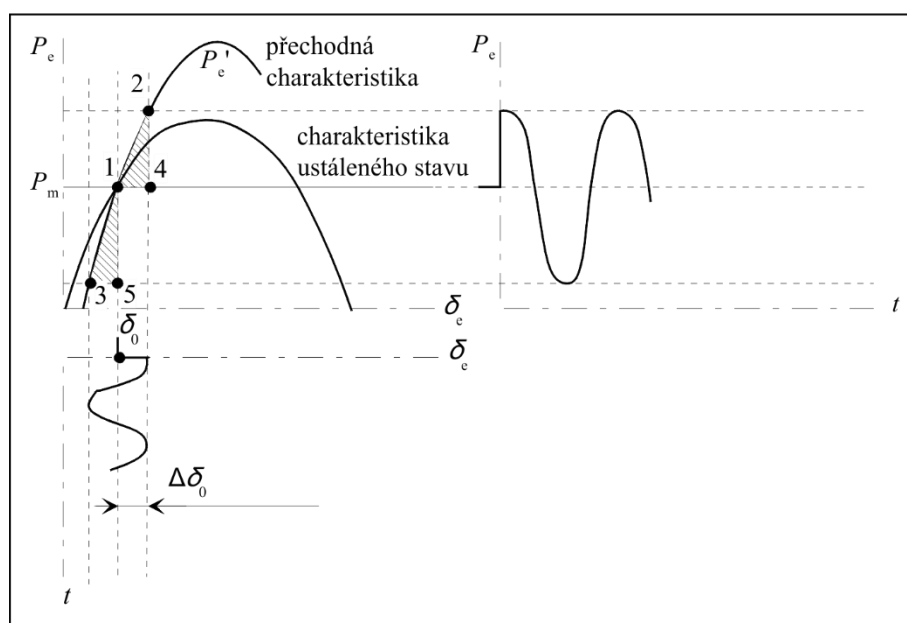
Z toho nám plyne základní podmínka statické stability :

$$\frac{dP}{d\delta} > 0 \quad (2.4)$$

## 2.5. Dynamická stabilita

Přechodový děj, při kterém přechází generátor na nový pracovní bod vlivem změny nějaké stavové veličiny je popsán tzv. **rovnici kývání**.

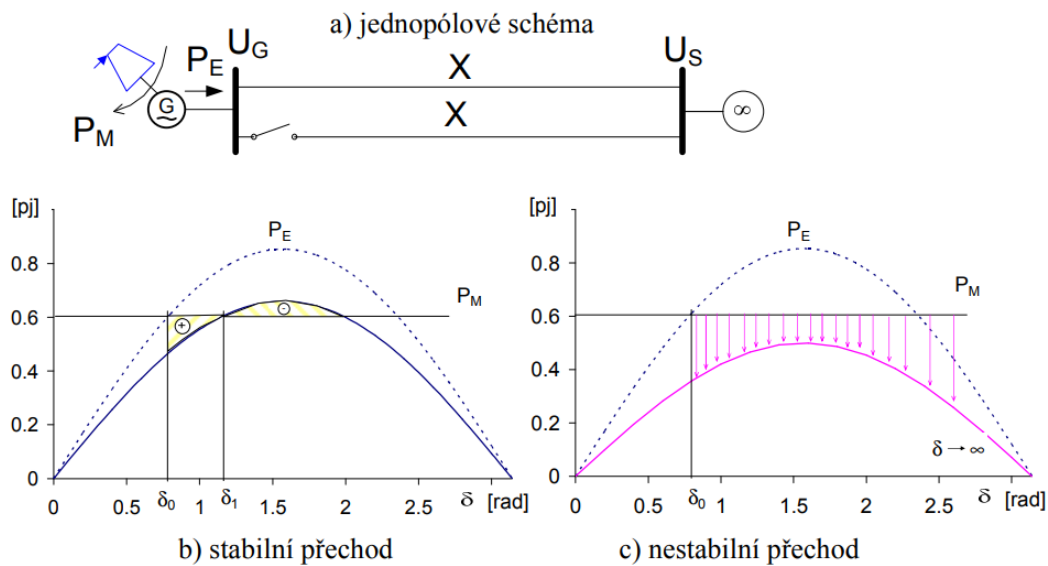
Typický průběh tohoto přechodové děje je na Obr. 6.



Obr. 6 Typický průběh kývání synchronního stroje, převzato z [18]

Popis děje bude proveden pro příklad, kdy zvedneme skokově mechanický výkon na turbíně. Při zvýšení mechanického výkonu vznikne na hřídeli přebytek momentu, čímž se rotor začne urychlovat. Při dosažení nového zátěžného úhlu se však rotor nezastaví a urychlování bude pokračovat vlivem setrvačnosti a zátěžný úhel bude dále stoupat. V této chvíli již je naopak nedostatek momentu na hřídeli a stroj začne zpomalovat až dojde k maximu prvního kyvu. Poté stroj pokračuje ve zpomalování, než bude opět přebytek momentu na hřídeli a toto se opakuje několikrát, dokud nedojde k ustálení na novém pracovním bodě.

Jestli-že stroj najde nebo nenajde nový pracovní ustálený stav lze určit z tzv. **pravidla ploch** pro první kyv z momentové charakteristiky, resp. výkonové charakteristiky [12]. Pravidlo ploch na Obr. 7 je ukázáno pro případ, kdy dojde k přerušení jednoho z dvou paralelních vedení. Aby se systém ustálil na ustáleném pracovním bodě po poruše, je potřeba, aby první plocha (plocha mezi  $P_e$  a  $P_m$  označená plus) byla minimálně tak velká, jako plocha druhá. Takovému přechodu odpovídá Obr. 7b. Naopak přechodu, kdy stroj ztratí stabilitu a musí být odstaven je na Obr. 7c.



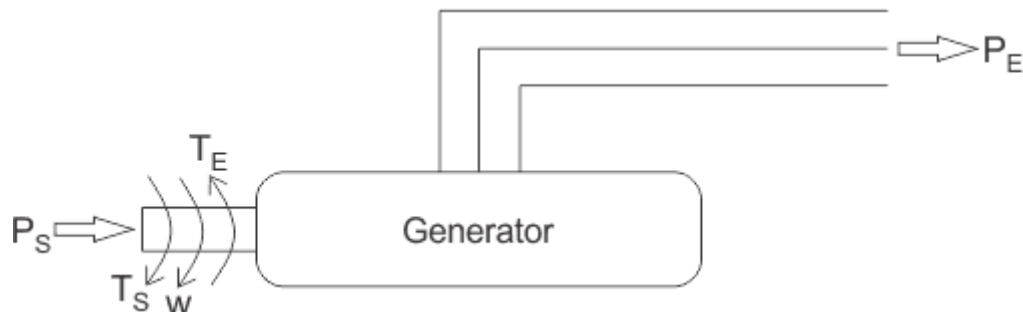
Obr. 7 K vysvětlení pravidla ploch, převzato z [12]

## 2.6. Rovnice kývání

Za ustáleného stavu je mechanický moment  $T_s$  a elektromagnetický moment  $T_e$  shodný.

$$T_s - T_e = 0 \quad (2.5)$$

Pro generátor jsou tyto momenty kladné, pro motor záporné.



Obr. 8 Momenty působící na hřídel generátoru a smysl výkonů, převzato z [13]

Zavedením tzv. urychlovacího momentu  $T_a$ , kterým se systém dostane do kývání dostanu rovnice:

$$T_s - T_e = T_a \quad (2.6)$$

Rovnice (2.6) je základní tvar **rovnice kývání** pro synchronní stroj.

Vím, že urychlovací moment je roven změně mechanické úhlové rychlosti v čase a jeho velikost závisí na velikosti momentu setrvačnosti generátoru a pohonu, který generátor pohání.

$$T_a = J \frac{d\omega_s}{dt} \quad (2.7)$$

Dosazením (2.6) do (2.7):

$$T_s - T_e = J \frac{d\omega_s}{dt} \quad (2.8)$$

Nyní si pro další úpravu zavedu konstantu setrvačnosti  $H$ . Ta je daná poměrem energie uložené v rotoru při nominální úhlové rychlosti ku MVA ratingu stroje.

$$H = \frac{\text{energie uložená v rotoru při } \omega_{0m}}{\text{MVA rating}} = \frac{1}{2} \frac{J\omega_{0s}^2}{VA_{base}} \quad (2.9)$$

Z čehož si můžu vyjádřit moment setrvačnosti:

$$J = \frac{2H}{\omega_{0s}^2} VA_{base} \quad (2.10)$$

Dosazením momentu setrvačnosti z (2.10) do (2.8) dostanu upravenou rovnici kývání:

$$\frac{2H}{\omega_{0s}^2} VA_{base} \frac{d\omega_s}{dt} = T_s - T_e \quad (2.11)$$

Nyní upravím rovnici do tvaru v poměrných jednotkách:

$$2H \frac{d\bar{\omega}_r}{dt} = \bar{T}_s - \bar{T}_e \quad (2.12)$$

,kde elektrická úhlová rychlost v poměrných jednotkách je rovna:

$$\bar{\omega}_r = \frac{\omega_s}{\omega_{0s}} \quad (2.13)$$

Vztah mezi mechanickou a elektrickou úhlovou rychlosti rotoru je dán vztahem:

$$\omega_s = \frac{\omega_r}{p_p} \quad (2.14)$$

Dosazením (2.14) do (2.13) dostanu:

$$\bar{\omega}_r = \frac{\omega_r}{\omega_0} \quad (2.15)$$

Zátěžný úhel  $\delta$  je úhel, který určuje o kolik je pozice rotoru posunutá oproti synchronní:

$$\delta = \omega_r t - \omega_0 t + \delta_0 \quad (2.16)$$

Nyní zátěžný úhel zderivuji v čase:

$$\frac{d\delta}{dt} = \omega_r - \omega_0 \quad (2.17)$$

Derivací zátěžného úhlu dostanu:

$$\frac{d^2\delta}{dt^2} = \frac{d\omega_r}{dt} = \omega_0 \frac{d\overline{\omega_r}}{dt} \quad (2.18)$$

Nyní dosadím (2.18) do (2.12)

$$\frac{2H}{\omega_0} \frac{d^2\delta}{dt^2} = \overline{T}_s - \overline{T}_e \quad (2.19)$$

Rovnice (1.16) je tvar rovnice kývání při zanedbaném tlumícím momentu. Levá část rovnice je urychlující moment  $T_a$ .

$$\overline{T}_a = \frac{2H}{\omega_0} \frac{d^2\delta}{dt^2} \quad (2.20)$$

Do rovnice ještě uvedu tlumící moment  $T_t$  od tlumících vinutích a později od PSS a rovnice bude mít tvar:

$$\overline{T}_a = \overline{T}_s - \overline{T}_e - \overline{T}_t \quad (2.21)$$

,kde tlumící moment  $T_t$  je dán vztahem:

$$\overline{T}_t = \frac{K_D}{\omega_0} \frac{d\delta}{dt} \quad (2.22)$$

## 2.7. Elektromechanické oscilace

Elektromechanické oscilace jsou přechodný děj, při kterém přechází stroj na nový zátěžný úhel. Projevuje se kýváním rotoru stroje.

Z rovnice kývání můžeme určit, jaké veličiny tento přechodný děj nejčastěji vyvolají:

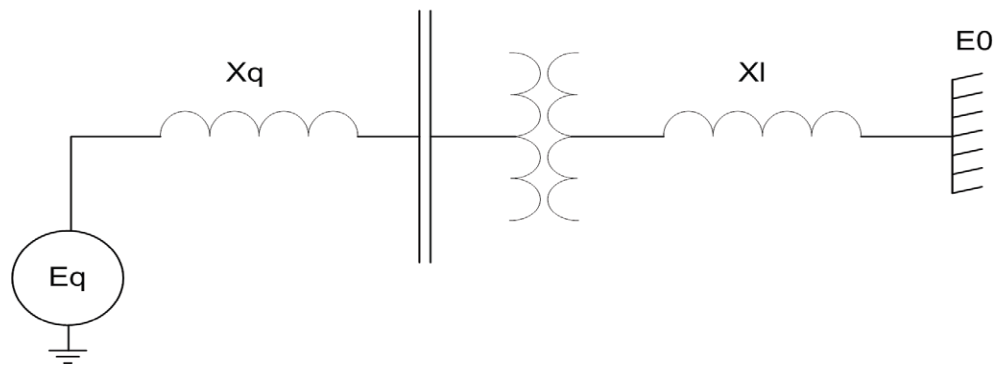
- změna mechanického výkonu
- změna ekvivalentní impedance za generátorem
- změna referenční hodnoty napětí

Z pohledu PSS se má smysl zabývat nízkofrekvenčními elektromechanickými oscilacemi. Rozlišují se 3 základní typy a to lokální, systémové a kývání blízkých generátorů. Jednotlivé typy popíšu v následujících kapitolách.

### 2.7.1. Lokální kývání

Jedná se o kývání jednoho generátoru, proti zbytku sítě. Kývání se projevuje na lince připojené do mohutné sítě. Toto uspořádání se nazývá Single machine infinite bus systém (SMIB), tedy jeden stroj pracující do sítě nekonečného výkonu. Typické frekvence tohoto kývání jsou 0,7 Hz až 2 Hz.

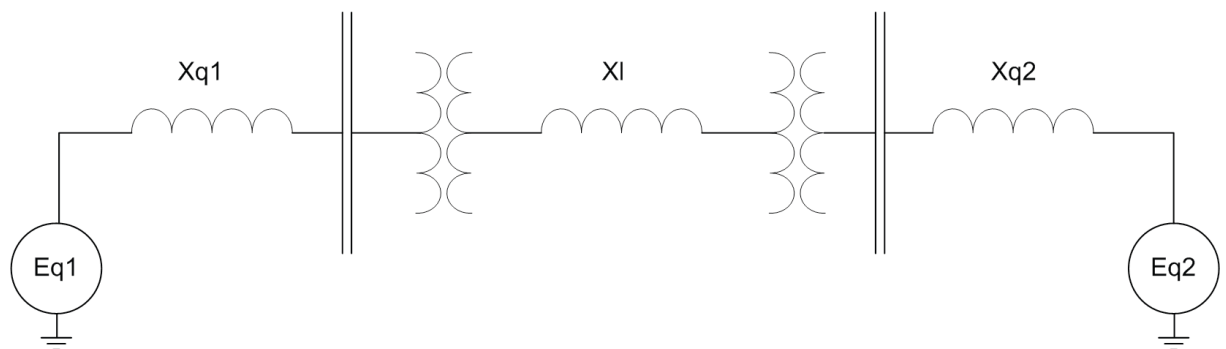




Obr. 9 Topologie při lokálním kývání, převzato z [11]

### 2.7.2. Systémové kývání

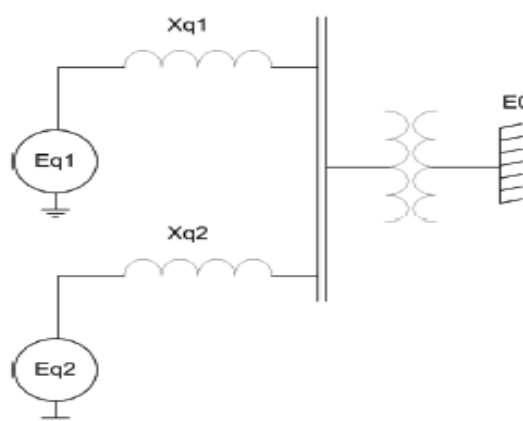
U tohoto typu kývají velké oblasti obsahující několik generátorů proti sobě. Toto kývání se projevuje na celé lince mezi těmito oblastmi. Typické frekvence tohoto kývání jsou 0,1 Hz až 0,7 Hz.



Obr. 10 Topologie při systémovém kývání, převzato z [11]

### 2.7.3. Kývání blízkých generátorů

Tyto kyvy se projevují při paralelní práci generátorů, které jsou fyzicky blízko u sebe. Stroje kývou proti sobě. Typické frekvence tohoto kývání jsou 1,5 až 3 Hz.



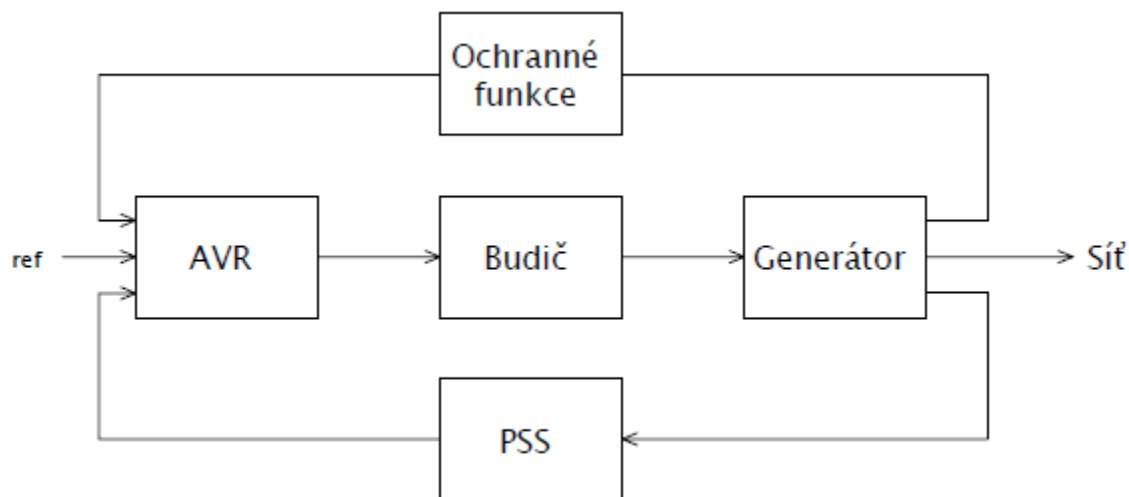
Obr. 11 Topologie při kývání blízkých generátorů, převzato z [11]

## 3. Budicí systémy synchronních generátorů

### 3.1. Popis budících systémů

Budicí systém je nedílnou součástí klasických synchronních generátorů. Hlavním úkolem budícího systému je dodávat stejnosměrný proud do budícího vinutí generátoru.

Základní prvky moderních budících systémů jsou automatický regulátor napětí (AVR) a výkonový budič. Blokové schéma je na Obr. 12.



Obr. 12 Principiální zapojení budícího systému

Moderní budicí prvky také obsahují mnoho dalších funkcí. Jednou z nich je právě PSS, kterými se v této práci budu detailněji zabývat. Další funkce jsou tyto:

- hlídání podbuzení
- hlídání přebuzení
- omezovač statorového proudu
- omezovač budícího proudu
- hlídání poměru napětí ku frekvenci (U/f ochrana)
- stabilizační obvody

### 3.2. Automatický regulátor napětí AVR

Automatický regulátor napětí je část budícího systému, která řídí polovodičové prvky v budiči za pomoci PI nebo PID regulátoru. Jako vstupní veličinu využívá rozdíl mezi referenční a měřenou hodnotou statorového napětí. Tento signál dále vhodně zesílí a tím se řídí generátory řídicích impulsů výkonových polovodičových prvků v budiči.

### 3.3. Budič

Výkonová část budícího systému se nazývá budič. Jeho úkolem je přímo dodávat stejnosměrné budící napětí a proud do budícího vinutí. V dnešní době se používají převážně polovodičové řízené usměrňovače složené buď z tyristorů nebo z IGBT tranzistorů.

Budiče můžeme dělit z několika hledisek. Jako první hledisko je způsob dodávání výkonu do budícího usměrňovače. Z tohoto pohledu dělíme budič na závislý na výstupním výkonu generátoru a nezávislý na výstupním výkonu generátoru. Máme tedy:

- budiče závislé
- budiče nezávislé

Budiče můžeme také dělit podle toho, jakým způsobem se dodává budící proud do budícího vinutí na:

- bezkartáčové budiče
- kartáčové budiče

Pro potřeby PSS je potřeba budiče dělit podle jejich časové konstanty na:

- velmi rychlé
- rychlé
- pomalé

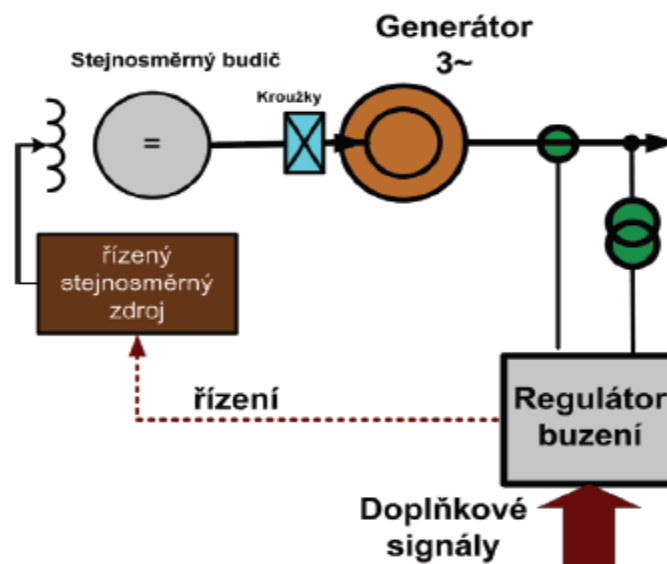
Další často používané dělení budičů je z hlediska typu zdroje, odkud odebíráme výkon do budiče. Rozdělujeme na:

- budič se stejnosměrným zdrojem
- budič se střídavým zdrojem

Právě podle tohoto rozdělení se dále budu věnovat budičům.

### 3.3.1. Budiče se stejnosměrným zdrojem

Budiče se stejnosměrným zdrojem používají jako zdroj nejčastěji stejnosměrný generátor. Stejnosměrný generátor je na společné hřídeli s buzeným generátorem a výstupní vinutí je spojeno přes kroužky.



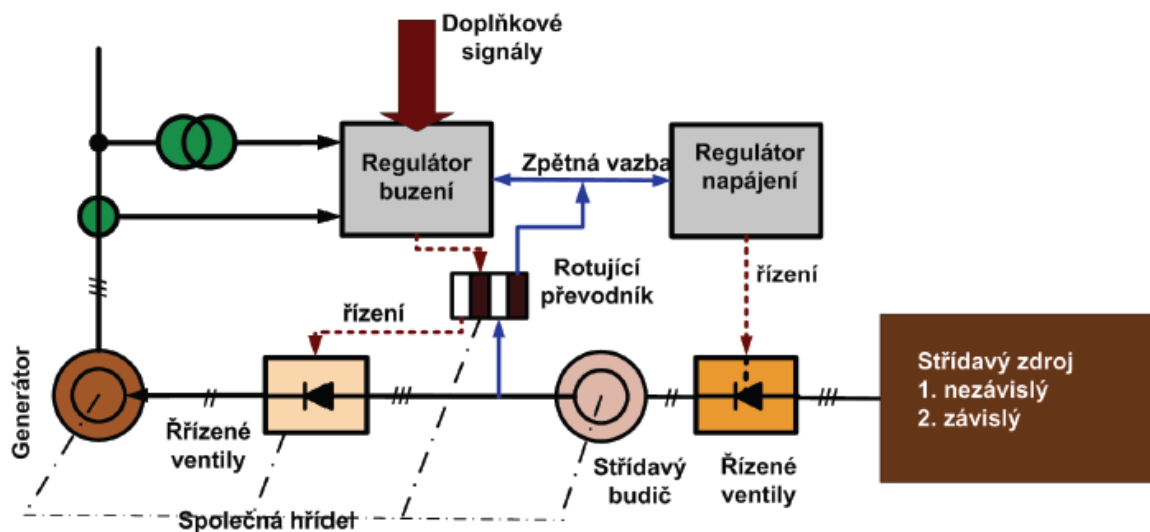
Obr. 13 Budič se stejnosměrným zdrojem, převzato z [11]

Tyto budiče se v dnešní době používají spíše výjimečně, jelikož rozvojem polovodičových řízených prvků je vhodnější používat budiče se střídavým zdrojem.

### 3.3.2. Budiče rotační se střídavým napájecím zdrojem

Tento typ budičů se často nazývá jako bezkartáčový, jelikož odpadá použití sběracích kartáčů, které jsou problematické na údržbu. Toho se docílí tím, že střídavý budič společně s usměrňovačem jsou na stejné hřídeli s generátorem, což je patrné z Obr. 14.

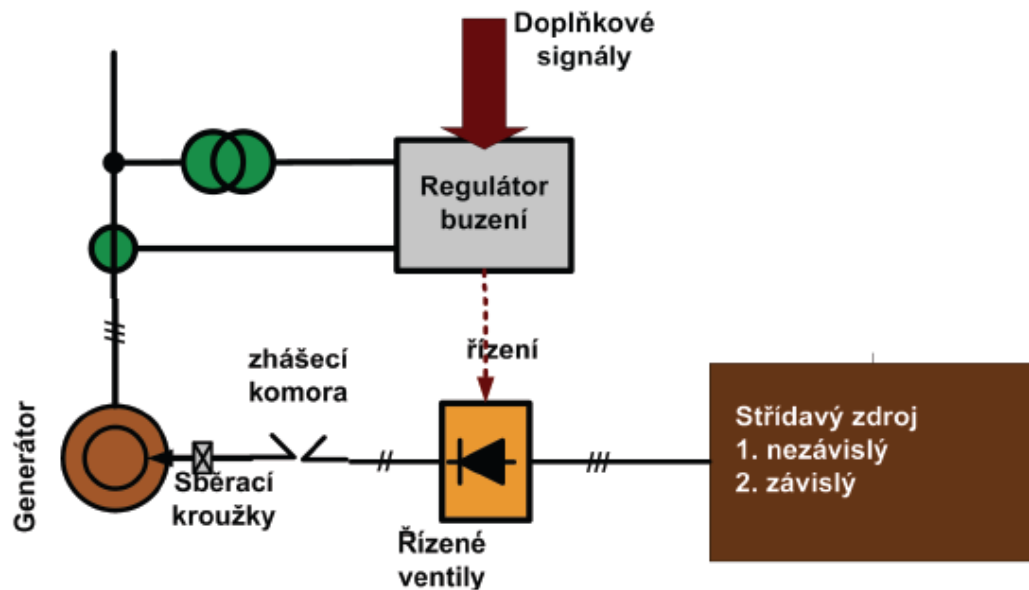
U rotačních budičů se jako zdroj budícího proudu pro generátor používá jiný synchronní generátor, tudíž musíme jeho výstup usměrnit, abychom získali požadovaný stejnosměrný budící proud. Buzení pomocného budícího synchronního generátoru můžeme napájet ze zdroje, který je buď závislý nebo nezávislý na výstupním napětím generátoru. Napětí z napájecího zdroje usměrníme, jelikož i pomocný synchronní generátor potřebuje stejnosměrný budící proud.



Obr. 14 Budič rotační se střídavým zdrojem, převzato z [11]

### 3.3.3. Budiče statické se střídavým zdrojem

Jak již z názvu vyplývá, všechny prvky statického budiče jsou statické, neboli neobsahují žádné rotační části. U těchto budičů se budící proud dodává do budícího vinutí opět přes kroužky. Základní zapojení statického budiče je vidět na Obr. 15.



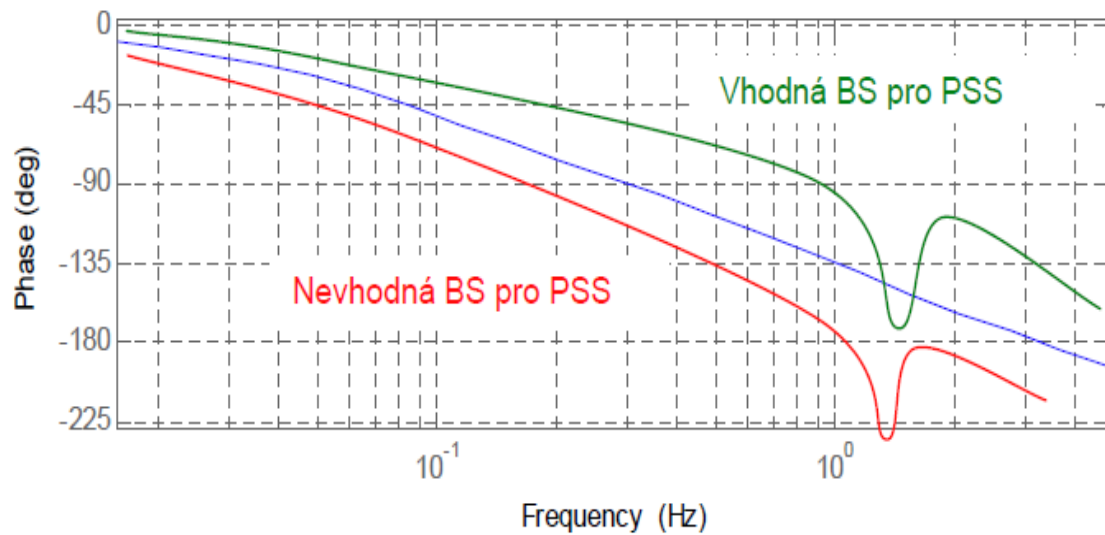
Obr. 15 Budič statický se střídavým zdrojem, převzato z [11]

Zdrojem statického budiče bývá nejčastěji tzv. budící transformátor, který může být buď závislý nebo nezávislý na výstupním napětím generátoru. Jako řízené ventily se používají řízené tyristory, do kterých jsou vpouštěny zapalovací impulzy řízené regulátorem buzení.

### 3.4. Vhodnost budících systémů pro PSS

Vhodnost budících systémů pro PSS je dána hlavně jejich rychlostí. Je potřeba, aby byl budící systém pro efektivní tlumení kyvů synchronního generátoru co nejrychlejší. Z tohoto pohledu jsou nejvhodnější statické budící systémy, jelikož v sobě zahrnují pouze jednu časovou konstantu. Bezkartáčové budící systémy jsou vhodné pouze tehdy, jsou-li dostatečně rychlé.

Z norem WECC plyne, že vhodnost PSS se dá také posoudit dle vlivu fázového zpoždění uzavřené smyčky regulace napětí, tj. od referenčního napětí k statorovému napětí [5].



Obr. 16 Porovnání vhodnosti budícího systému pro aplikaci PSS, převzato z [5]

Jestli-že bude toto zpoždění ležet pod typizovanou funkcí (na Obr. 16 modře), tak již není vhodná pro PSS. Příklad systému s nevhodným budícím systémem je ukázán červeně.

Typizovaná funkce má dle [5] tvar:

$$H(s) = \frac{6,28^3}{(s + 0,628)(s + 6,28)(s + 62,8)} \quad (3.1)$$

## 4. Power System Stabilizer PSS

### 4.1. Princip funkce PSS

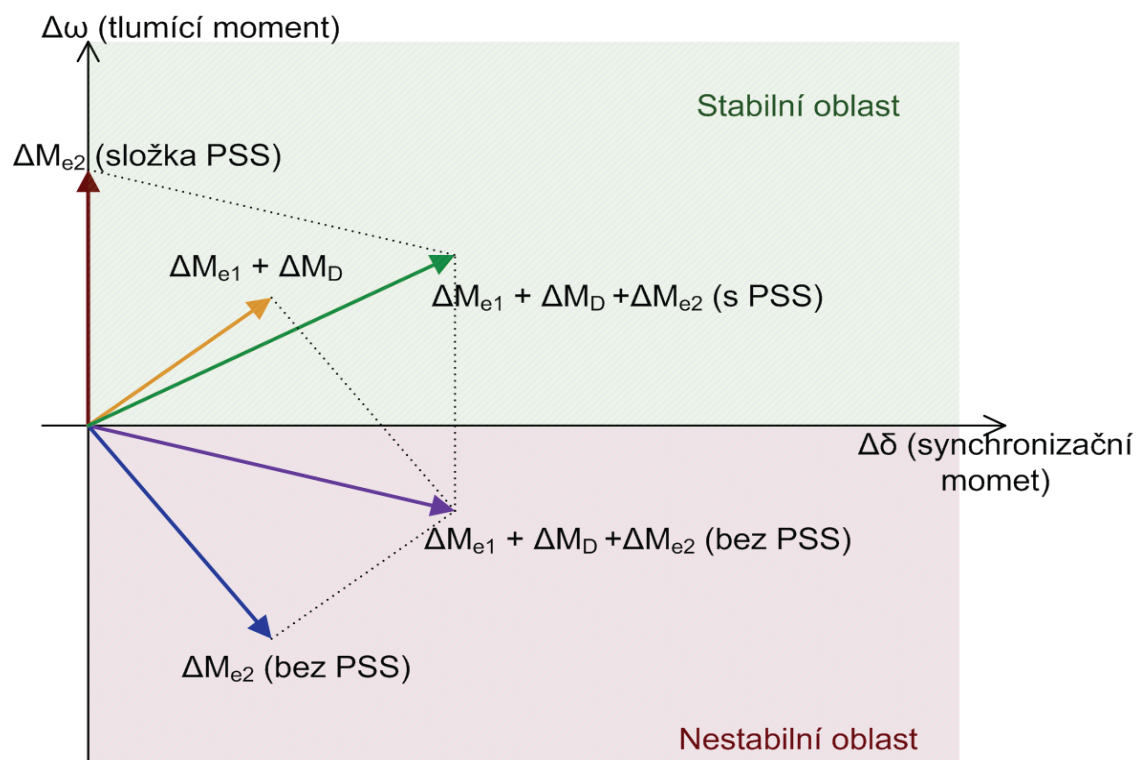
Základní funkcí PSS je vytvoření signálu, který poté přes automatický regulátor napětí bude tlumit nízkofrekvenční elektromechanické oscilace pomocí budícího proudu. Budícím proudem se vytváří složka momentu, která by měla být ve fázi s odchylkou úhlové rychlosti generátoru při oscilacích, čímž dochází k jejich nejúčinnějšímu tlumení.

Při rozkývání působí na hřídel 4 hlavní odchylky momentů od jejich rovnovážného stavu a to:

- moment tlumící  $M_D$  vytvářený z tlumících vinutí, který je ve fázi s  $\Delta\omega$
- synchronizační moment  $M_{e1}$ , který je ve fázi s  $\Delta\delta$
- mechanický moment  $M_m$  od poháněcího soustrojí (např. turbína)
- moment vytvářený budícím vinutím  $M_{e2}$

Součet těchto momentů dává dohromady **akcelerační moment  $M_a$** .

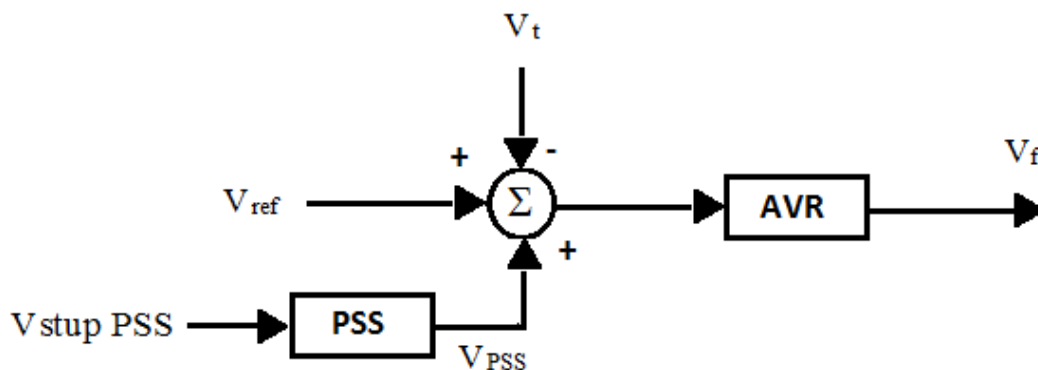
K vysvětlení na fázorovém diagramu je uveden Obr. 17, kde lze vidět, proč je důležité mít moment od budícího proudu ve fázi s odchylkou úhlové rychlosti. Dostaneme tak totiž výsledný akcelerační moment více do **stabilní oblasti**, neboli oblasti, kde dochází ke kladnému tlumení oscilací. Bez aktivního PSS může budící systém vytvářet kvůli fázovému zpoždění dokonce i záporný tlumící moment, tj. destabilizovat soustavu.



Obr. 17 Vysvětlení vlivu jednotlivých momentů, převzato z [5]

Při správném nastavení by tedy PSS mělo zlepšit tlumení při elektromechanickém rozkývání stroje.

PSS je jak již bylo zmíněno součástí automatického regulátoru napětí a jeho principiální zapojení je k AVR je na Obr. 18.



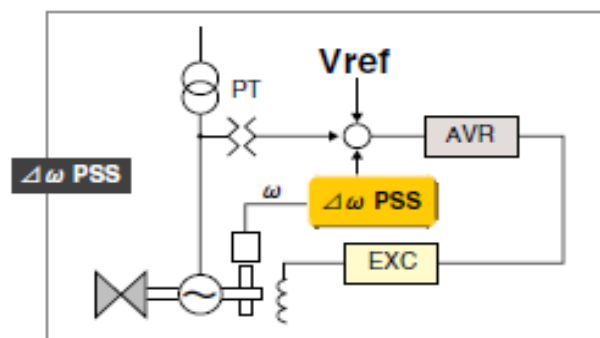
Obr. 18 Principiální zapojení PSS k AVR

Výstupní signál z PSS přičítáme k referenční hodnotě napětí. Od tohoto součtu odečítáme reálnou měřenou hodnotu napětí na svorkách generátoru. Takový signál je poté zpracován AVR a požadované budící napětí, resp. budící proud je přiveden na budící vinutí generátoru.

## 4.2. Rozdělení PSS dle vstupní veličiny

PSS mohou pracovat s různými vstupními veličinami. Základním kritériem pro výběr vstupní veličiny je možnost realizace na generátoru. Například v určitých situacích není možné měřit úhlovou rychlost přímo a podobně. Jako vstupní veličiny se používají hlavně úhlová rychlost, činný výkon a frekvence.

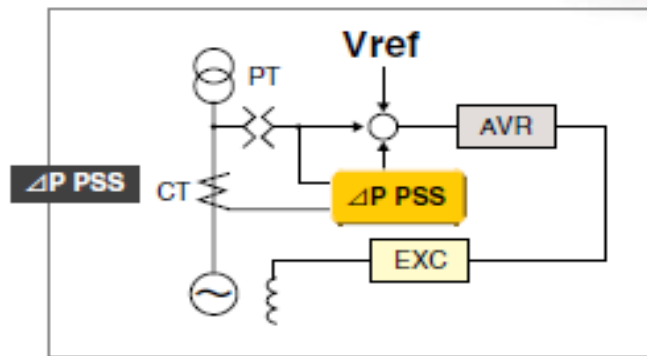
Úhlová rychlost se měří přímo na hřídeli generátoru pomocí snímače úhlové rychlosti. Pro potlačení torzních kmitů je vhodné senzor umístit co nejbližší k ložisku [3].



Obr. 19 Měření úhlové rychlosti, převzato z [6]

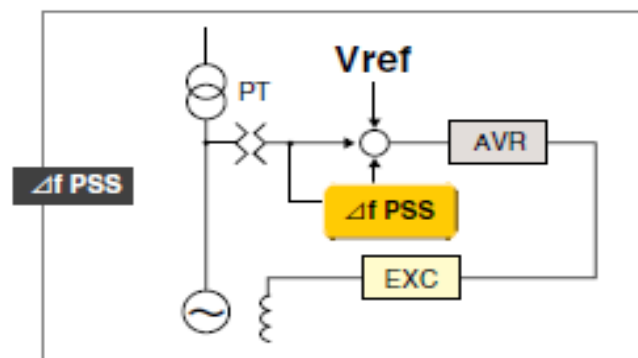
Činný výkon lze získat měřením pomocí měřicích transformátorů proudu a napětí mezi svorkami generátoru a blokovým transformátorem.





Obr. 20 Měření činného výkonu, převzato z [6]

Frekvenci získáme opět měřením svorkového napětí a statorového proudu za pomoci měřících transformátorů proudů a napětí.



Obr. 21 Měření frekvence, převzato z [6]

### 4.3. Základní bloky PSS

Mezi základní bloky, které se používají ve všech typech PSS patří washout filtr, zesílení a bloky kompenzace fáze.

#### 4.3.1. Washout filtr

Washout filtr slouží k odfiltrování nepotřebných frekvencí. V případě PSS to je stejnosměrná složka a vyšší frekvence než jsou elektromechanické oscilace, čímž vyloučíme například vliv torzních kmitů na hřídeli vytvářené turbínou. Tím zajistíme, aby PSS reagoval pouze na změny měřené veličiny v pásmu typických frekvencí elektromechanických oscilací.

Odfiltrování stejnosměrné složky se zajistí horní propustí, jejíž popis v Laplaceově transformaci je:

$$H(s) = \frac{sT_1}{1 + sT_2} \quad (4.1)$$

K odfiltrování vyšších frekvencí se používá dolní propust, jež je popsána v Laplaceově transformaci:

$$H(s) = \frac{1}{1 + sT} \quad (4.2)$$

### 4.3.2. Zesílení

Blok zesílení se používá k nastavení zesílení vstupního signálu do PSS a tím dodání potřebného tlumícího momentu. Zesílení však nesmí být ani příliš velké s ohledem na maximální budící proud.

Popis v Laplaceově transformaci:

$$H(s) = K \quad (4.3)$$

### 4.3.3. Kompenzace fáze

Bloky kompenzace fáze je nutno použít, abychom zajistili, že výsledný tlumící moment bude ve fázi s odchylkou úhlové rychlosti. Je toho zapotřebí kvůli tomu, že budící systém, generátor i síť jsou frekvenčně závislé a způsobují fázový posuv mezi referenční hodnotou AVR a momentem ve vzduchové mezeře.

Kompenzační bloky se nazývají lead v případě, že způsobují kladný posuv fáze a lag v případě, že způsobují záporný posuv fáze procházejícího signálu.

Kompenzační bloky mají popis v Laplaceově transformaci:

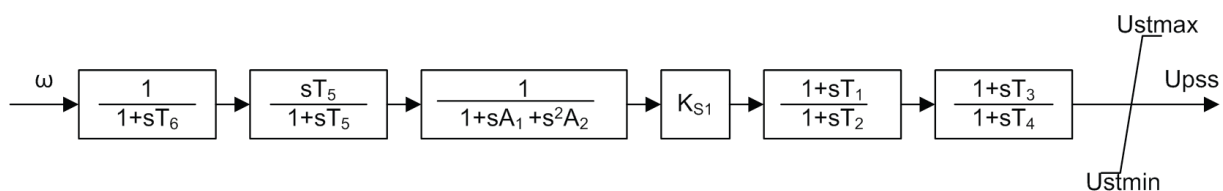
$$H(s) = \frac{1 + sT_1}{1 + sT_2} \quad (4.4)$$

Jakmile je časová konstanta  $T_1$  vyšší než  $T_2$ , pak se blok chová jako lead, jakmile je  $T_2$  vyšší než  $T_1$ , pak se blok chová jako lag.

## 4.4. Typy PSS

### 4.4.1. PSS1A

Základní typ stabilizátoru, který používá jeden vstup je nazýván **PSS1A**. Jako vstup se nejčastěji využívá přímo odchylka úhlové rychlosti. První blok představuje zpoždění měřícího členu. Druhý blok je horní propust sloužící k odfiltrování stejnosměrné složky. Následně signál projde blokem dolní propusti druhého řádu, kde se odfiltrují vyšší frekvence, nejčastěji způsobené torzními kmity hřídele. Po zesílení signálu následují dva bloky (případně více) fázové kompenzace. Na závěr je stabilizační signál limitován maximální a minimální hodnotou.



Obr. 22 Blokové schéma PSS1A, převzato z [2]

#### 4.4.2. PSS2B

Dvoustupový PSS byl další krok ve vývoji PSS. Tento stabilizátor využívá urychlující výkon, resp. jeho integrál. Jako první vstup  $V_{s1}$  je použit úhlová rychlost  $\omega$ , jako druhý vstup činný elektrický výkon  $P_e$ .

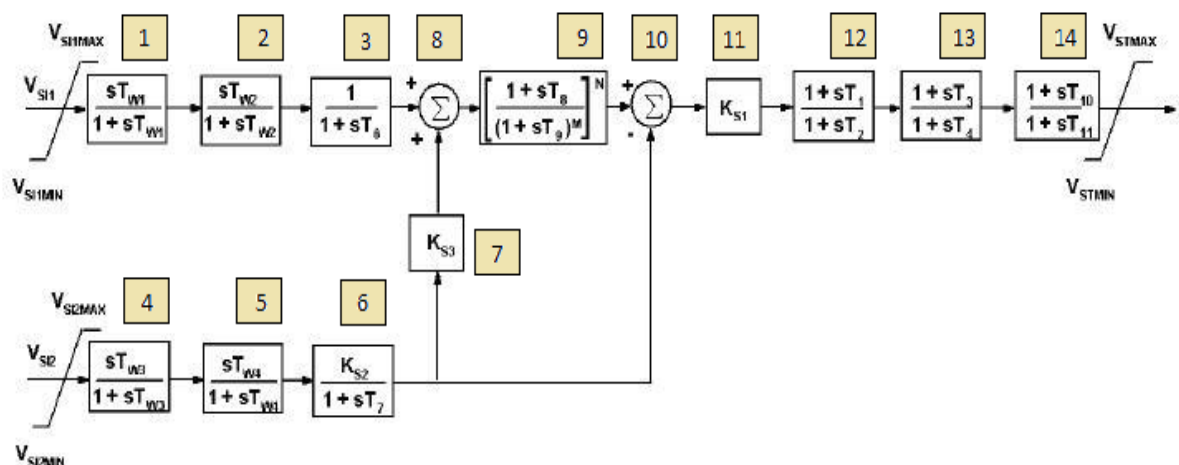
Nejprve se oba signály odfiltrují od stejnosměrné složky v blocích horní propusti 1 a 2, resp. 3 a 4.

Z úhlové rychlosti se poté vypočte mechanický výkon  $P_m$  [4]:

$$\int \Delta P_m dt = \int \Delta P_e + 2H \cdot \Delta \omega \quad (4.5)$$

Blok 9 se nazývá ramp-tracking filtr a slouží k tomu, že při skokové změně elektrického výkonu se vytvoří signál shodný s tím od  $V_{s2}$  a v bloku 10 se odečtou, tudíž nebude PSS reagovat.

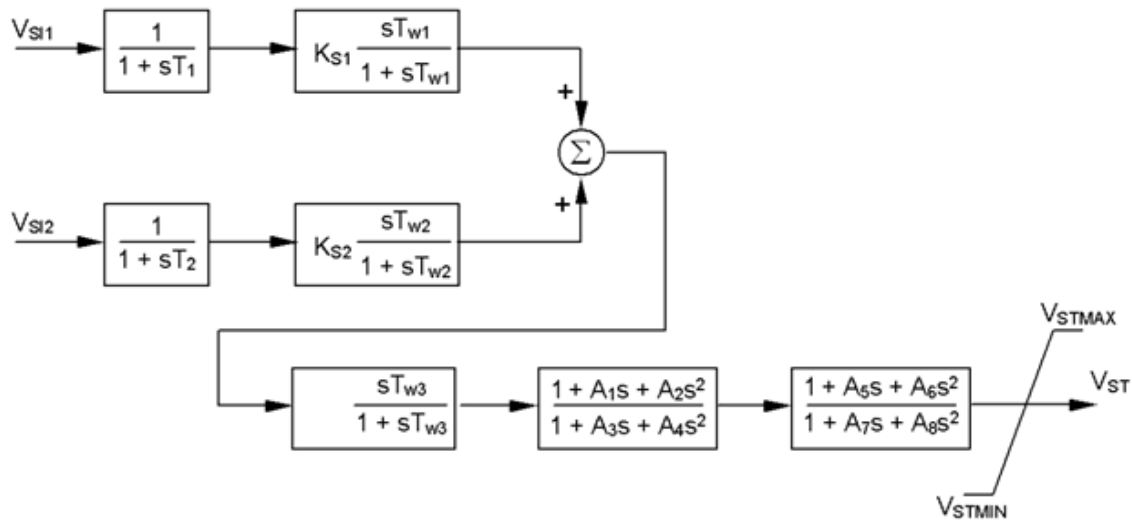
Při sečtení signálů v bloku 10 dostáváme akcelerační výkon, což je ekvivalentní úhlová rychlost rotoru. Následně již shodně s PSS1A signál zesílíme blokem 11 a bloky fázové kompenzace 12,13,14 (případně dalšími) signál vhodně fázově posuneme.



Obr. 23 Blokové schéma PSS2B, převzato z [8]

#### 4.4.3. PSS3B

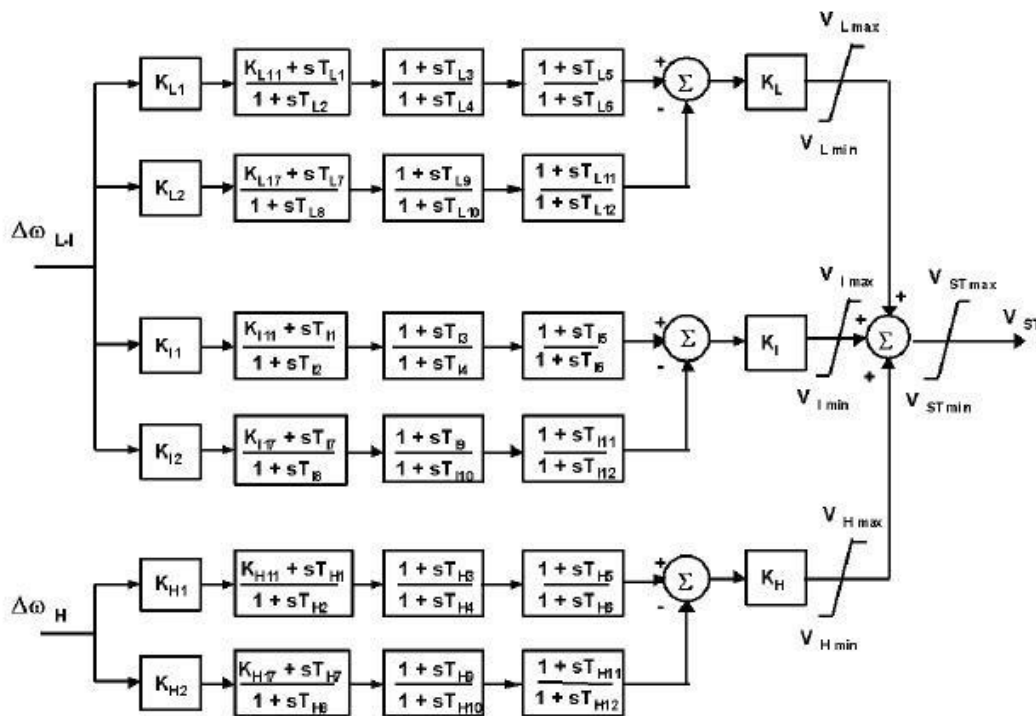
Dvoustupový stabilizátor využívá nejčastěji jako svoje vstupy elektrický výkon a úhlovou rychlost, resp. jejich odchylky. První bloky v obou cestách představují přenos měřících členů. Další blok je zesílení společně s horní propustí k odstranění ustálené složky signálu. Signály se sečtou a je znova odfiltrována stejnosměrná složka. Následují poté dva tzv. notch filtry, což je pásmová propust, kde se odstraňují torzní kmity. Nakonec se saturačně omezí výstupní signál.



Obr. 24 Blokové schéma PSS3B, převzato z [2]

#### 4.4.4. PSS4B

Tento typ stabilizéru je tzv. multipásmový. Pro každé pásmo frekvenci odpovídající jednotlivým typům oscilací je jedna větev. Pro 0,1-0,7 Hz větev začínající zesíleními  $K_{L1}$  a  $K_{L2}$ , pro 0,8-2 Hz větev začínající zesíleními  $K_{I1}$  a  $K_{I2}$  a poslední větev je pro frekvence 2-3,5 Hz. Toto nastavení se samozřejmě podle potřeby může změnit.

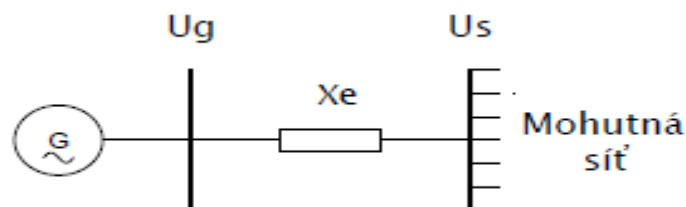


Obr. 25 Blokové schéma PSS4B, převzato z [2]

## 5. Model k odladění parametrů PSS

### 5.1. Samostatný stroj pracující do sítě nekonečného výkonu (SMIB)

K odladění parametrů PSS se běžně používá zapojení, kde samostatný synchronní generátor pracuje do sítě nekonečného výkonu. To reprezentuje lokální elektromechanické oscilace, což je nejčastější typ oscilací. Uspořádání je na Obr. 26.



Obr. 26 Single machine infinite bus

,kde  $X_e$  je ekvivalentní impedance sítě z pohledu svorek generátoru.

### 5.2. Heffron-Phillipsův model

Hojně a úspěšně využívaný matematický model k ladění parametrů PSS je linearizovaný model samostatného stroje pracujícího do sítě nekonečného výkonu od Heffrona a Phillipsa. Model je řešený například v těchto zdrojích: [3], [4], [9]. Model je popsán v osách d-q.

Tento linearizovaný odchylový model má tyto zjednodušující předpoklady [3]:

- Vliv tlumících vinutí je zahrnut pouze v konstantě D
- Je zanedbán vliv rezistencí jednotlivých vinutí
- Jelikož řešíme odchylku malých signálů, je úhlová rychlost považována za 1 p.j.
- Rezistence na síti je nulová
- Kvůli předcházejícímu předpokladu lze použít linearizovaný model pro analýzu

Po linearizaci v pracovním bodě máme soustavu rovnic popisující synchronní stroj připojený k síti nekonečného výkonu:

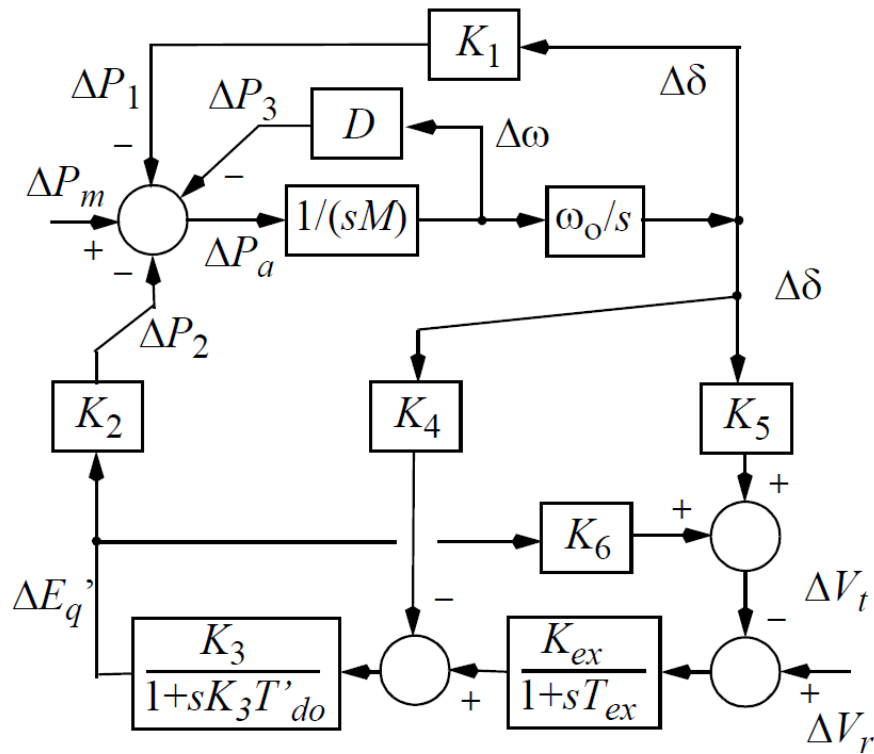
$$\Delta \dot{\delta} = \omega_0 \Delta \omega \quad (5.1)$$

$$\Delta \dot{\omega} = \frac{1}{M} (-K_1 \Delta \delta - K_2 \Delta E'_q - D \Delta \omega) \quad (5.2)$$

$$\Delta \dot{E}'_q = \frac{1}{T'_{do}} (-K_3 \Delta E'_q - K_4 \Delta \delta + \Delta E'_{fd}) \quad (5.3)$$

$$\Delta \dot{E}'_{fd} = -\frac{1}{T_{ex}} \Delta E'_{fd} - \frac{K_{ex}}{T_{ex}} (K_5 \Delta \delta + K_6 \Delta E'_q - \Delta u_{pss}) \quad (5.4)$$

Těmto rovnicím odpovídá model na Obr. 27.



Obr. 27 Heffron-Phillipsův model SMIB, převzato z [9]

V tomto modelu je jako model generátoru použit model diferenciálních rovnic třetího řádu. Budící systém je reprezentován diferenciální rovnicí prvního řádu a všechny důležité vazby v generátoru jsou zajištěné tzv. K-konstantami, kterých je 6 a vypočítají se pomocí následujících vztahů [4].

$$K_1 = \frac{V_{s0} E_{q0} \cos \delta_{s0}}{X_q + X_t} + \frac{X_q - X'_d}{X_t + X'_d} V_{s0} \sin \delta_{s0} \quad (5.5)$$

$$K_2 = \frac{X_q + X_t}{X_t + X'_d} i_{q0} \quad (5.6)$$

$$K_3 = \frac{X_t + X'_d}{X_d + X_t} \quad (5.7)$$

$$K_4 = \frac{X_d - X'_d}{X_t + X'_d} V_{s0} \sin \delta_{s0} \quad (5.8)$$

$$K_5 = -\frac{X_q V_{d0} V_{s0} \cos \delta_{s0}}{(X_q + X_t) V_{t0}} - \frac{X'_d V_{q0} V_{s0} \sin \delta_{s0}}{(X_t + X'_d) V_{t0}} \quad (5.9)$$

$$K_6 = \frac{X_t}{X_t + X'_d} \frac{V_{q0}}{V_{t0}} \quad (5.10)$$

,kde veličiny označené indexem 0 jsou hodnoty v pracovním bodě. Všechny tyto hodnoty můžeme vypočítat ze známého svorkového napětí, frekvence, činného a jalového výkonu, který dodává generátor a parametrů generátoru daných výrobcem.

$$i_{q0} = \frac{P_0 Q_0}{\sqrt{(P_0 x_q)^2 + (V_{t0}^2 + Q_0 x_q)^2}} \quad (5.11)$$

$$V_{d0} = i_{q0} x_q \quad (5.12)$$

$$V_{q0} = \sqrt{V_{t0}^2 - V_{d0}^2} \quad (5.13)$$

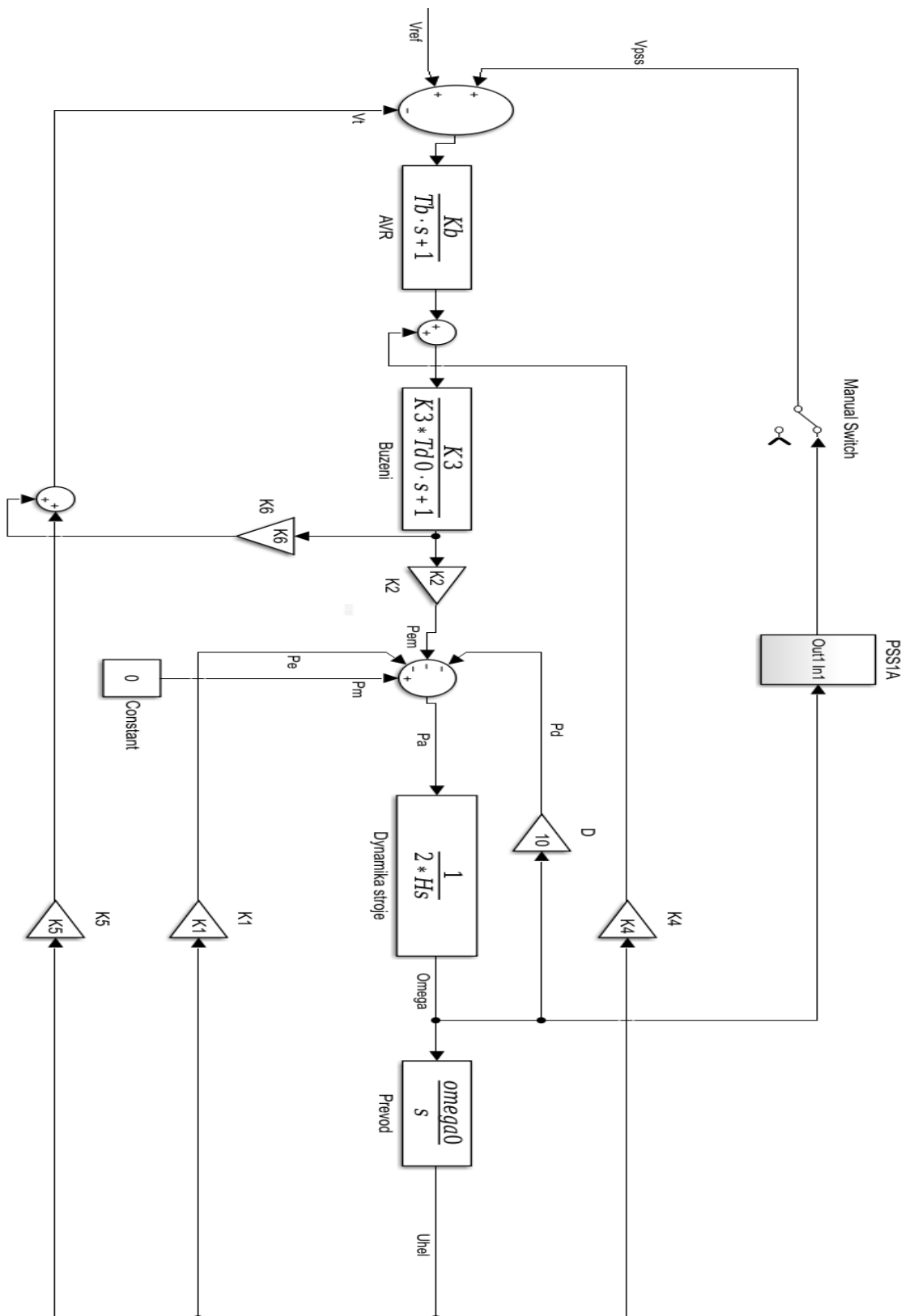
$$i_{d0} = \frac{Q_0 + x_q i_{q0}^2}{V_{q0}} \quad (5.14)$$

$$E_{q0} = V_{q0} + i_{d0} x_q \quad (5.15)$$

$$E_0 = \sqrt{(V_{d0} + x_e i_{q0})^2 - (V_{q0} - x_q i_{d0})^2} \quad (5.16)$$

$$\delta_0 = \tan^{-1} \frac{V_{d0} + x_e i_{q0}}{V_{q0} - x_q i_{d0}} \quad (5.17)$$

### 5.3. Implementace modelu do prostředí Simulink od Matlabu



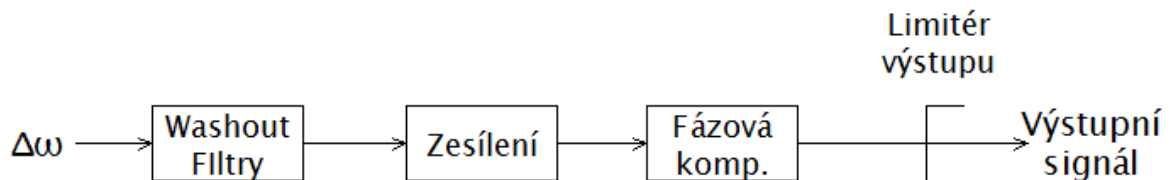
Obr. 28 Heffron-Phillipsův model vytvořený v programu MATLAB-Simulink



## 5.4. GEP metoda

Tato metoda ladění je hojně používaná při odladění parametrů PSS. Touto metodou odladím stabilizátor podobný PSS1A. Pro ladění touto metodou je použit Heffron-Phillipsův model popsany v kapitole 5.2.

Schéma mého PSS bude obsahovat klasické prvky, a je zobrazeno na Obr. 29.



Obr. 29 Vytvořený PSS - blokově

Prvním krokem je získání přenosu mezi vstupním referenčním napětím a elektrickým momentem na hřídeli stroje. Tento přenos se běžně nazývá GEP(Generator-Excitation-Power system) přenos. Je to tedy přenos, který zahrnuje zpoždění a zesílení všech důležitých částí systému. Právě toto zpoždění je potřeba vykompenzovat v PSS, abych získal výstupní signál co nejvíce ve fázi s odchylkou úhlové rychlosti. Z Obr. 27 lze odvodit, že tento přenos má tvar:

$$\frac{\Delta P_2}{\Delta V_{ref}} = \frac{K_2 K_3 K_{ex}}{s^2 K_3 T_{ex} T'_{d0} + s(T_{ex} + K_3 T'_{d0}) + (1 + K_3 K_6 K_{ex})} \quad (5.18)$$

Dále si můžu vyjádřit přenos mezi referenčním napětím a statorovým napětím:

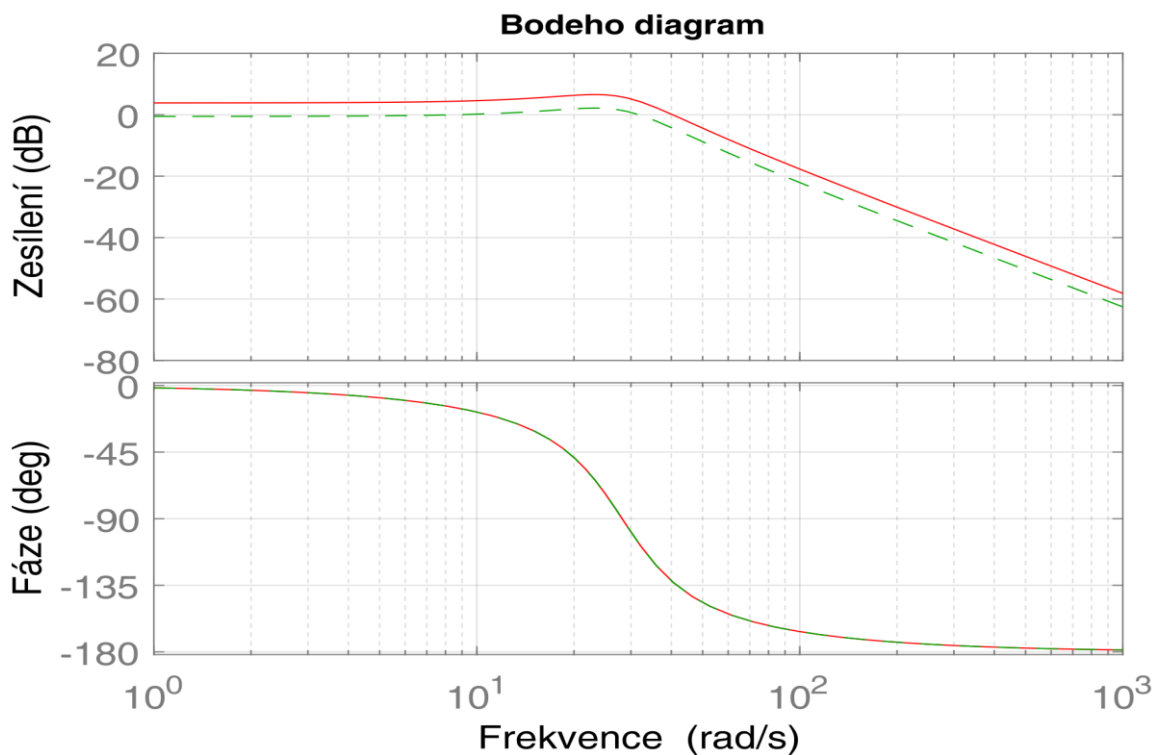
$$\frac{\Delta V_t}{\Delta V_{ref}} = \frac{K_6 K_3 K_{ex}}{s^2 K_3 T_{ex} T'_{d0} + s(T_{ex} + K_3 T'_{d0}) + (1 + K_3 K_6 K_{ex})} \quad (5.19)$$

Ze vztahu je patrné, že se oba přenosy liší pouze ve velikosti zesílení dané poměrem  $K_x$ .

$$K_x = \frac{K_2}{K_6} \quad (5.20)$$

Tohoto poznatku lze s výhodou použít při potřebě odladit PSS bez potřeby tvorby modelu a změřením frekvenční charakteristiky mezi referenčním napětím a statorovým napětím přímo na místě, kde je generátor umístěný.

Toto lze také ukázat ze simulace, viz. Obr. 30.



Obr. 30 Bodeho graf GEP

Z obrázku je vidět, že fázově jsou charakteristika shodné, liší se pouze o konstantu v zesílení.

#### 5.4.1. Nastavení washout filtrů

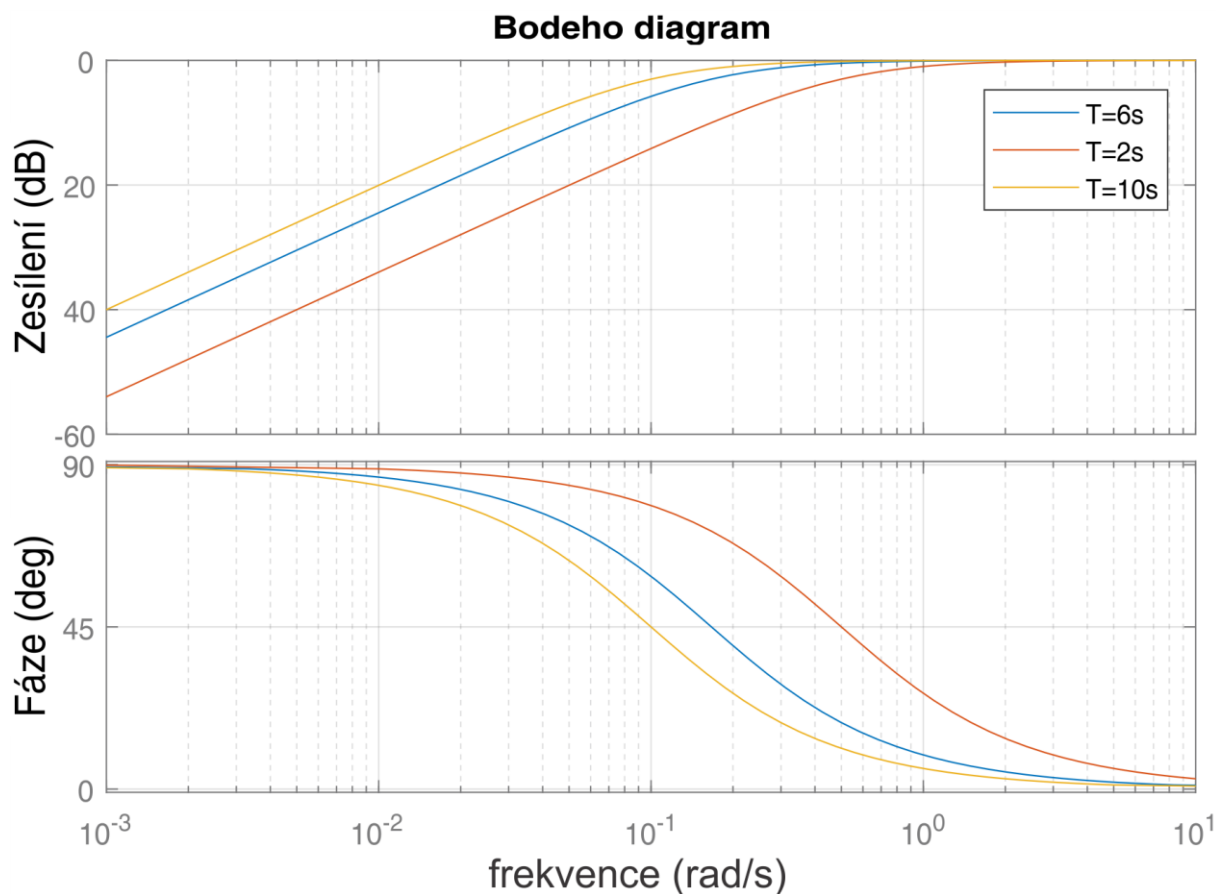
Jak jsem již zmínil, washout filtry slouží pro odfiltrování frekvencí, které neleží v typickém pásmu kývání synchronních strojů a tím zamezením reakce PSS při takových frekvencích.

Je potřeba si definovat zájmové frekvence a přepočítat je na rad/s. První oblast je oblast systémových kyvů, druhá je oblast kyvů lokálních kyvů, třetí je oblast mezi generátorickými oblastmi a nad 63 rad/s je oblast, kde se mohou vyskytovat torzní kmity nejčastěji způsobené turbínou, která je na stejné hřídeli s generátorem.

Hz	rad/s
0,1	0,63
0,7	4,40
2	12,57
3,5	21,99
10	62,83

Tabulka 1 Převod mezních frekvencí z Hz na rad/s

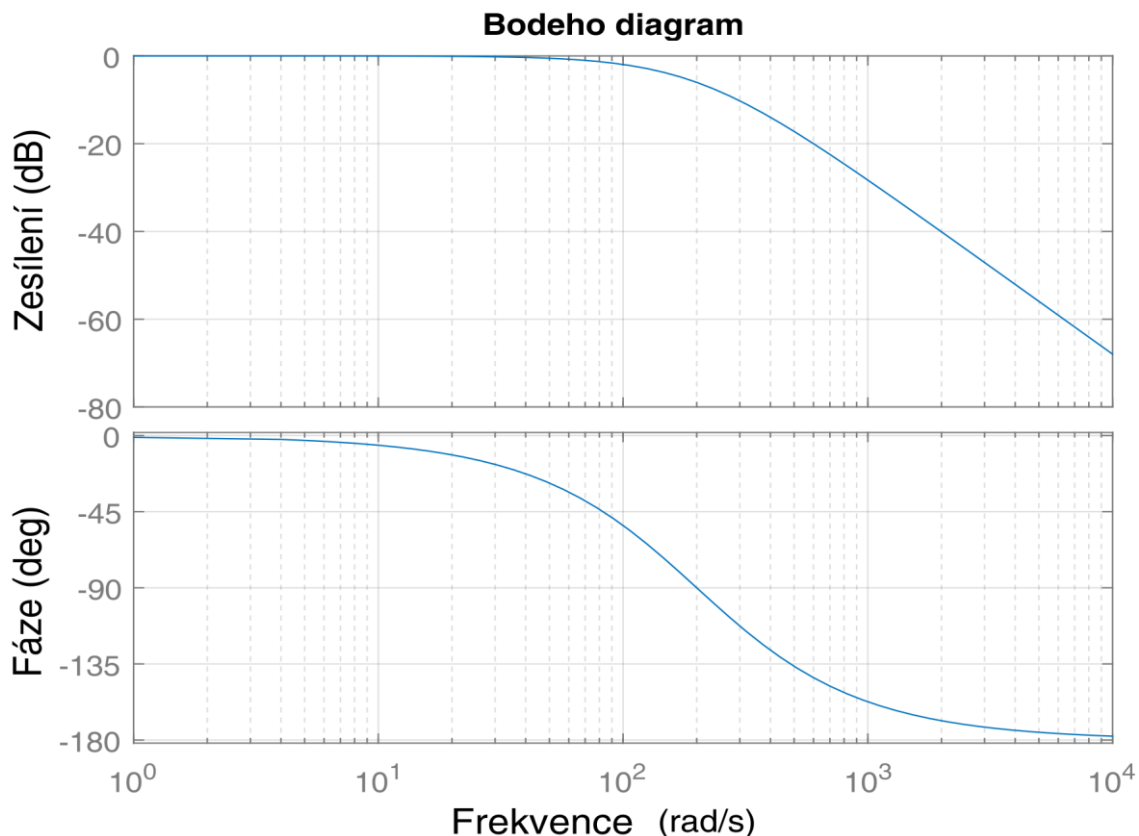
Jako první je potřeba odfiltrovat stejnosměrnou (ustálenou) složku signálu. Toho se docílí za pomoci horní propusti. Typicky se časová konstanta tohoto filtru volí mezi 2 a 10 sekundami [2]. Na následujícím bodeho diagramu ukážu frekvenční charakteristiky filtru pro různá nastavení:



Obr. 31 Bodeho graf horní propusti

Je vidět, že čím nižší časová konstanta, tím vyšší fázový posuv, který poté budeme muset kompenzovat za pomoci bloků fázové kompenzace. Já tedy zvolím střední cestu a použiju časové konstanty  $T=6$  s. Je také vidět, že pro toto nastavení je fázový posuv horní propusti pro zájmové frekvence minimální, stejně tak zesílení.

Následně je potřeba nastavit dolní propust pro odfiltrování vyšších frekvencích. Dolní propust bude zároveň sloužit pro splnění podmínky z teorie řízení, že řád čitatele v přenosu musí být rovný nebo větší než řád jmenovatele přenosu, aby byla zajištěna stabilita přenosu. Pro toto zajištění je potřeba implementovat filtr druhého řádu, tj. 2 filtry kaskádně za sebou. Jako nejvhodnější se jeví s časovou konstantou  $0,05s$ , jeho frekvenční charakteristika je na Obr. 32.



Obr. 32 Bodeho graf dolní propusti

Lze opět vidět, že v oblasti zájmových frekvencí způsobuje dolní propust minimální fázový posuv a žádnou změnu v zesílení signálu.

#### 5.4.2. Nastavení fázové kompenzace

Pro zajištění co nejmenšího fázového rozdílu mezi elektrickým momentem na hřídeli a odchylkou úhlové rychlosti rotoru je potřeba vykompenzovat fázi a to:

- Mezi referenčním napětím a momentem na hřídeli
- Fázový posuv způsobený washout filtry

Dle [5] a norem WECC je pro optimální nastavení PSS pro tlumení lokálních kyvů a maximálního vlivu PSS na tlumení systémových kyvů potřeba dodržet tyto kritéria fáze:

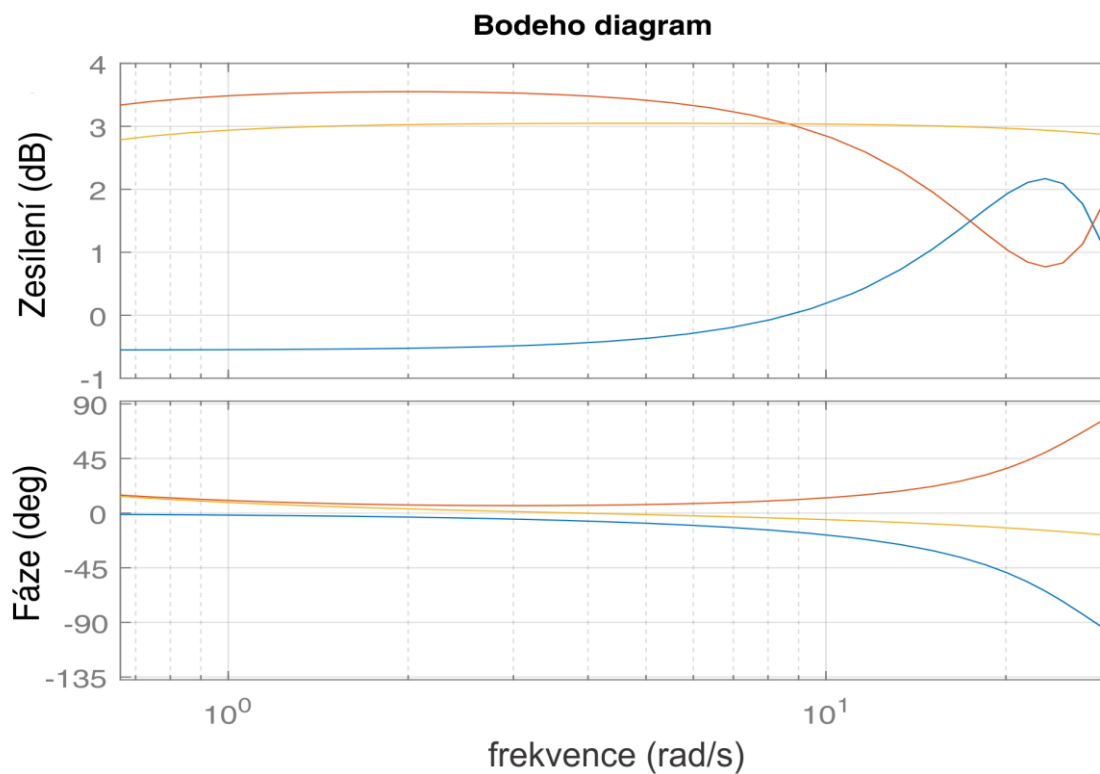
- na frekvencích 0,1-0,7 Hz, tj. frekvence, kde se vyskytují systémové kyvy, je potřeba udržovat fázový posuv mezi  $+45^\circ$  a  $-45^\circ$
- na frekvencích mezi 0,7-2 Hz, tj. frekvence, kde se vyskytují lokální kyvy, by fáze neměla klesnout pod  $-45^\circ$  a stoupnout nad  $45^\circ$
- fázový posuv na celém frekvenčním pásmu typických pro kývání, tj. 0,1 až 3,5 Hz by neměl fázový posuv klesnout pod  $-60^\circ$  a stoupnout nad  $60^\circ$

Samozřejmě, že čím blíže se bude fázový posuv blížit  $0^\circ$ , tím bude PSS lépe tlumit.

Jelikož washout filtry mají minimální vliv na fázový posuv signálu, je potřeba vykompenzovat fázový posuv GEP funkce z (5.18). Toho se docílí tím, že použijeme převrácenou hodnotu

této funkce jako blok fázového posuvu. To nám zajistí nejlepší výsledky z pohledu fázového posuvu v mezích kývání.

Výsledná frekvenční charakteristika pro je uvedena na Obr. 33, kde červeně je samotný PSS, modře GEP a žlutě jejich součet neboli celkový fázový posuv.



Obr. 33 Bodeho graf výsledné PSS + GEP

Na závěr byly nastaveny meze výstupního signálu z PSS na +0,05 a -0,05.

## 5.5. Nastavení konvenčního PSS1A

Nastavení washout filtrů je shodné s předchozí kapitolou, přejdu zde tedy k tomu jak se nastavují typické lead-bloky potřebné k vykompenzování fázového posuvu GEP funkce. Typický přenos lead-bloku

$$H(s) = \frac{1 + sT_1}{1 + sT_2} = \frac{1 + sT_1}{1 + saT_1} \quad (5.21)$$

, kde  $a$  je vždy menší než jedna, což nám zajistí to, že časová konstanta v čitateli je větší než ve jmenovateli a tím pádem se jedná o fázový předstih, který při ladění PSS je potřebný.

Při nastavování filtru se postupuje tak, že si určíme frekvenci, kde bude maximální fázový posuv:

$$\omega_{max} = \frac{1}{T_1 \sqrt{a}} \quad (5.22)$$

Dále spočítáme z rovnice (5.23) koeficient  $a$ . Pro maximální požadovanou fázi platí:

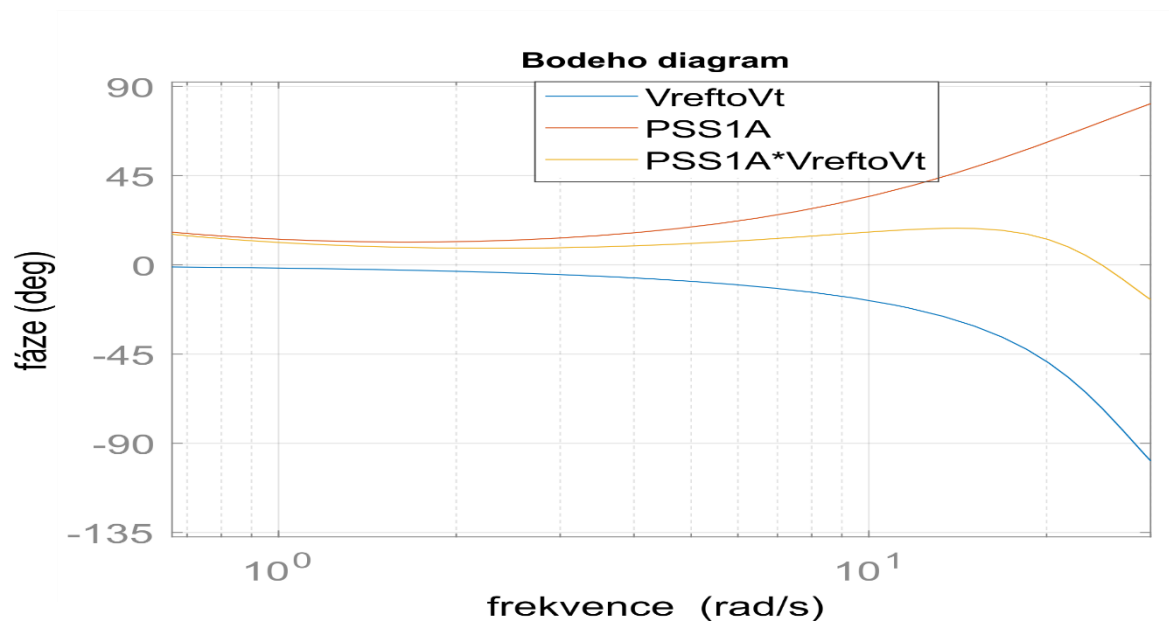
$$\sin \phi_{max} = \frac{1 - a}{1 + a} \quad (5.23)$$

Z rovnic (5.22) a (5.23) lze poté spočítat časovou konstantu  $T_1$ .

Pro spočítání časové konstanty jsem si vytvořil v Matlabu následný skript

```
fazemax=50; %Zadani faze maxima
omegam=60; %Zadani maxima
rce1=sind(fazemax)==(a-1)/(a+1); %rovnice pro vypocet konstanty a
a=(vpasolve(rce1,a)) %vpasolve vypocita z rovnice konstantu a
rce2=omegam==1/(tau*sqrt(a)); %rovnice pro vypocet casove konstanty T
tau1=vpasolve(rce2,tau) %vypocet casove konstanty
T1a=double(a)*double(tau1)
T2a=double(tau1)
```

Pro celkové vykompenzování jsem zavedl celkem 3 filtry lead o maximální fázi  $60^\circ$  v 100 rad/s a následné vykompenzování funkce GEP lze vidět na Obr. 34.



Obr. 34

Bodeho graf konvenčního PSS1A a GEP

## 5.6. Simulace

Nastavení řešiče v prostředí Simulink:

Řešič	ode4 (Runge - Kutta)
Typ kroku	fixní
Krok	0,1 ms

*Tabulka 2 Nastavení řešiče*

Parametry generátoru jsou uvedeny v příloze 1.

Konstanty budiče:

$K_{ex}$	100	-
$T_{ex}$	0,05	s

*Tabulka 3 Konstanty regulátoru*

Konstanty konvenčního PSS1A:

	PSS1A	
$T_1$	0,24	s
$T_2$	0,0414	s
$T_3$	0,24	s
$T_4$	0,0414	s
$T_5$	6	s
$K$	20	
$A_1$	0,01	s
$A_2$	2,50E-05	s

*Tabulka 4 Konstanty PSS1A*

Navrhovaný PSS metodou GEP je dán přenosem

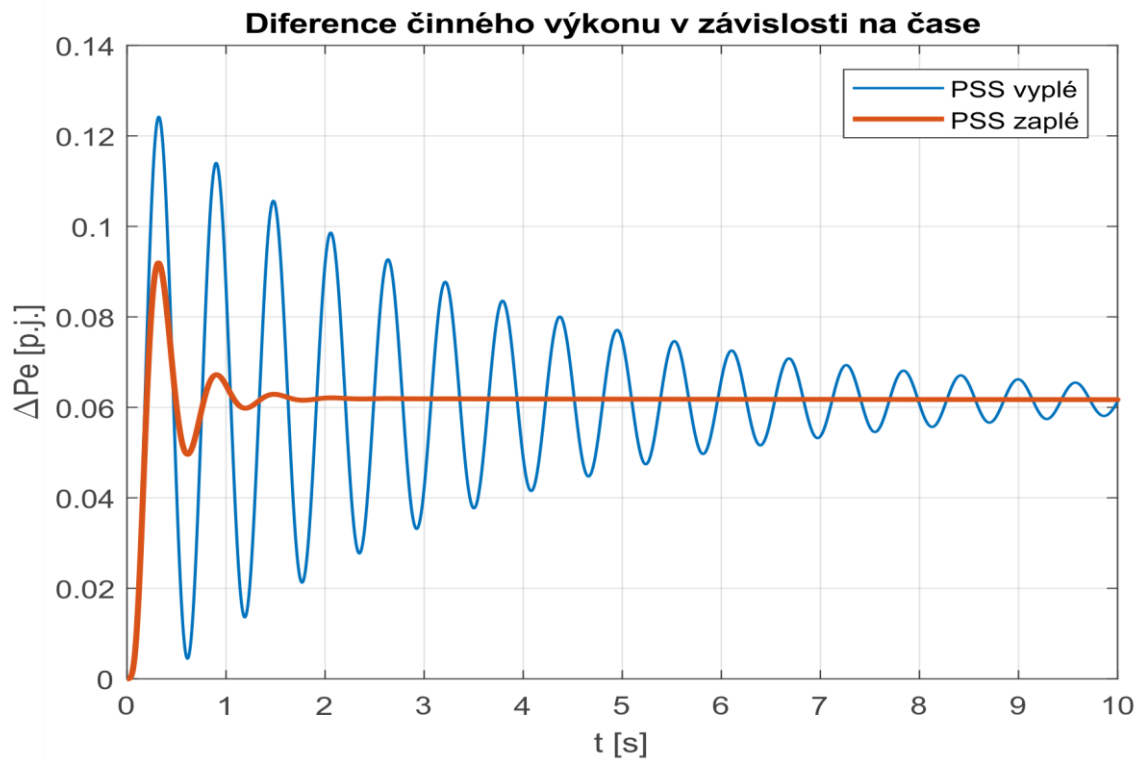
$$\frac{0,2884s^3 + 6,475s^2 + 229s}{3,777 * 10^{-6}s^4 + 0,005289s^3 + 1,663s^2 + 151,4s + 25,18} \quad (5.24)$$

Ustálené provozní podmínky a K-konstanty vypočítané z rovnic (5.5) až (5.17):

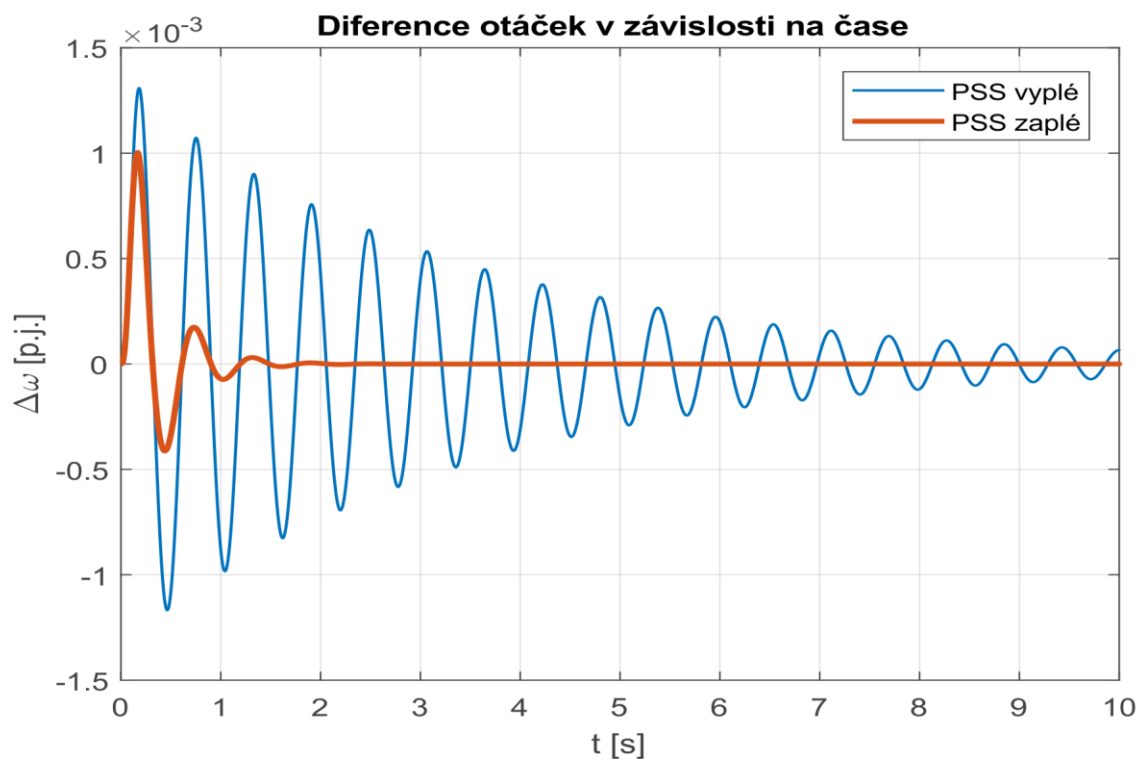
$P_0$	0,8	p.j.
$Q_0$	0,1	p.j.
$f$	1	p.j.
$U_t$	1	p.j.
$K_1$	1,7672	
$K_2$	1,1601	
$K_3$	0,2171	
$K_4$	2,3643	
$K_5$	-0,247	
$K_6$	0,6999	

*Tabulka 5 Provozní podmínky a K-konstanty*

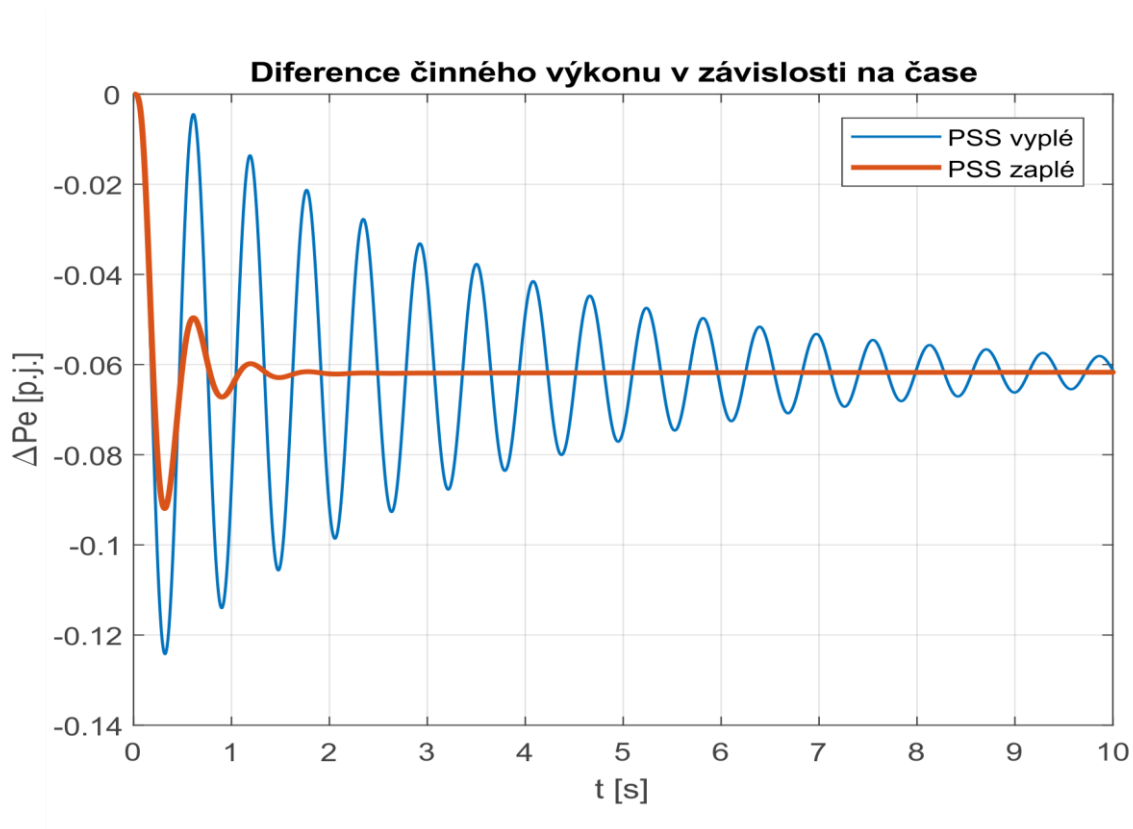




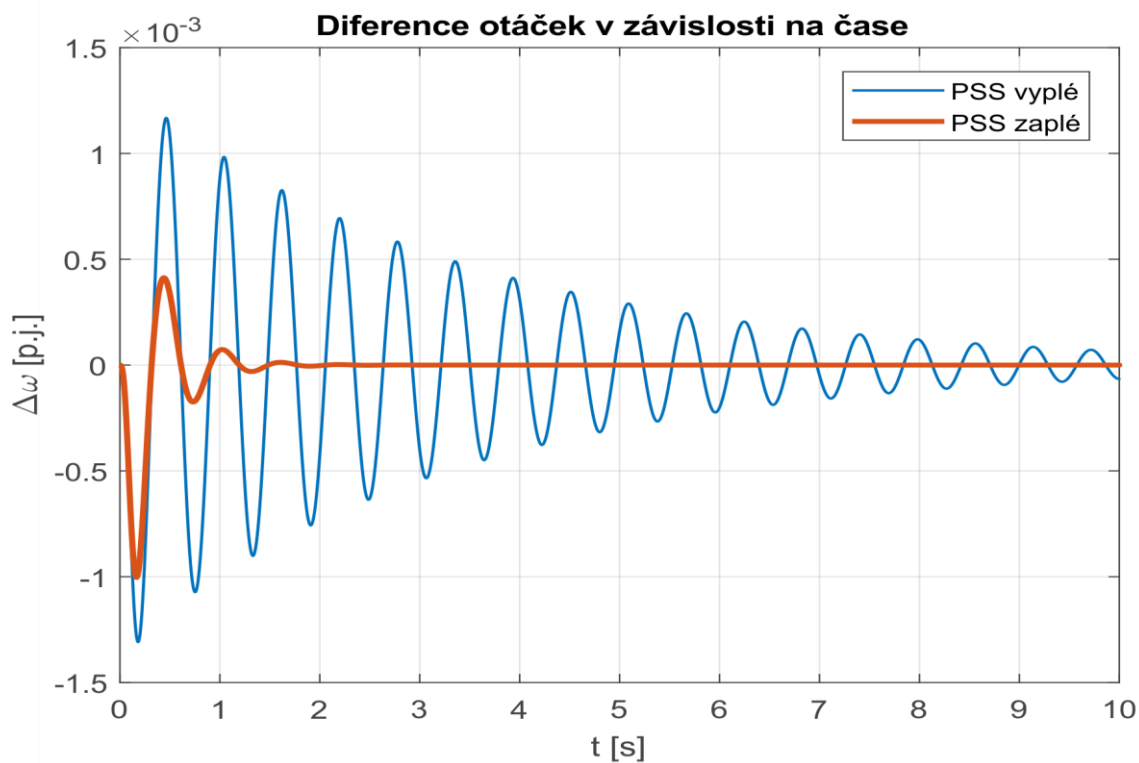
Obr. 35 Výstupní činný výkon při kladné změně  $P_{mech}$  o 5%



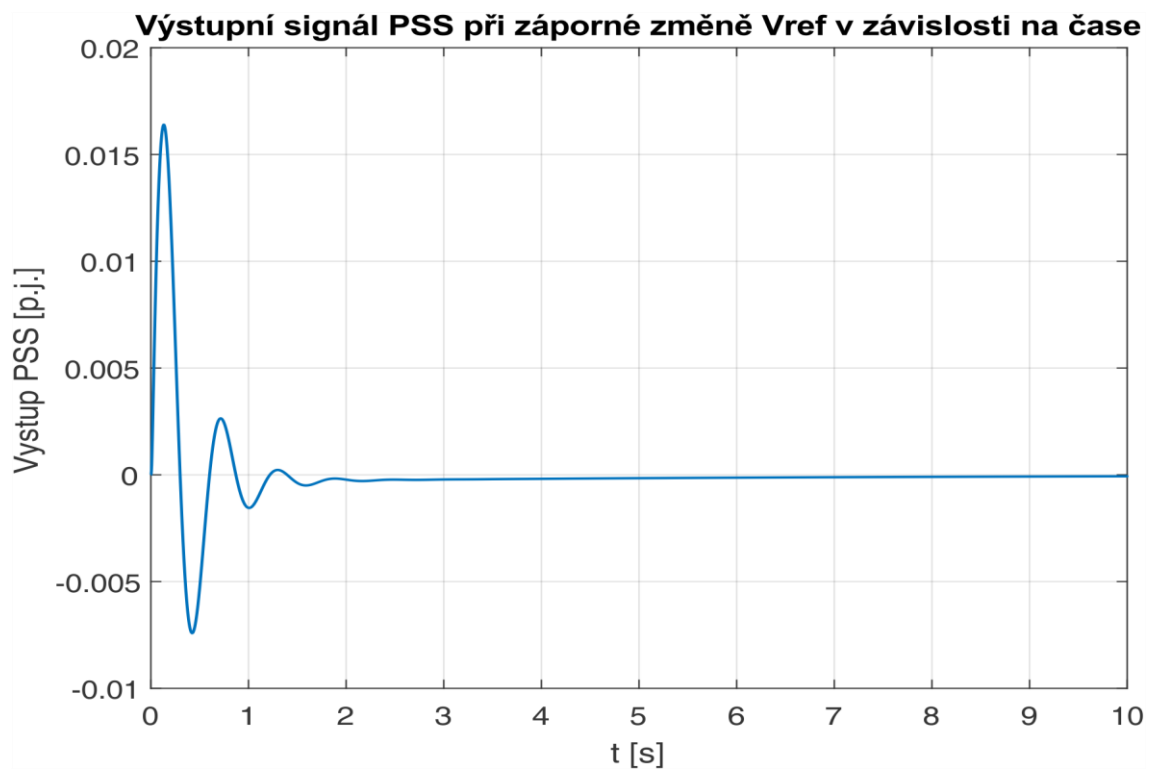
Obr. 36 Diference otáček při kladné změně  $P_{mech}$  o 5%



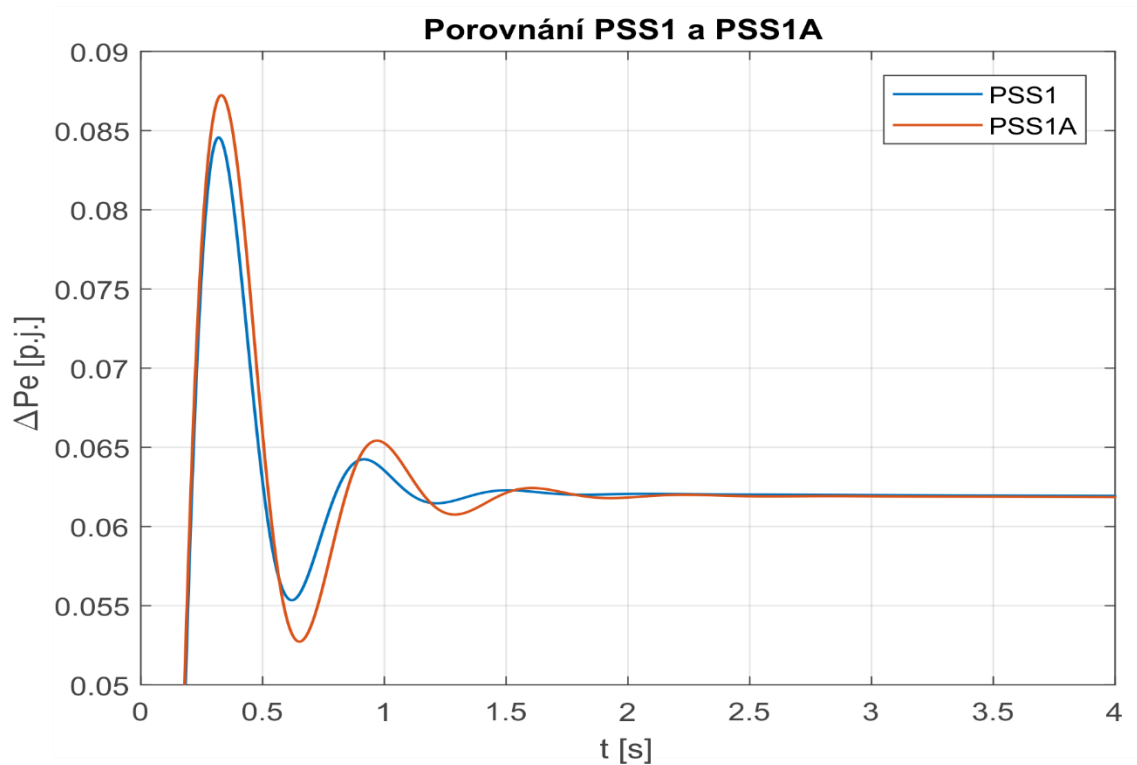
Obr. 37 Výstupní činný výkon při záporné změně  $P_{mech}$  o 5%



Obr. 38 Diference otáček při záporné změně  $P_{mech}$  o 5%



Obr. 39 Výstupní signál PSS



Obr. 40 Porovnání PSS1 a PSS1A

Nejprve byly provedeny dvě simulace skokové změny mechanického výkonu o 5% oběma polaritami. Z výsledků lze vidět, že systémový stabilizátor funguje při obou změnách a ustabilizuje kývání mezi druhou a třetí periodou.

Následně je ukázán výstupní signál z PSS, který vstupuje do AVR. Jako poslední simulace byla provedena skoková změna mechanického výkonu o +5% a porovnání obou navržených typů stabilizátorů. Konvenční systémový stabilizátor PSS1A vykazuje o něco horší výsledky z důvodu většího fázového posuvu. Vidět jsou hlavně vyšší amplitudy prvního i následujících tlumených kyvů.

## **5.7. Vytvoření SMIB za pomoci SimScape toolboxu v Matlab-simulinku**

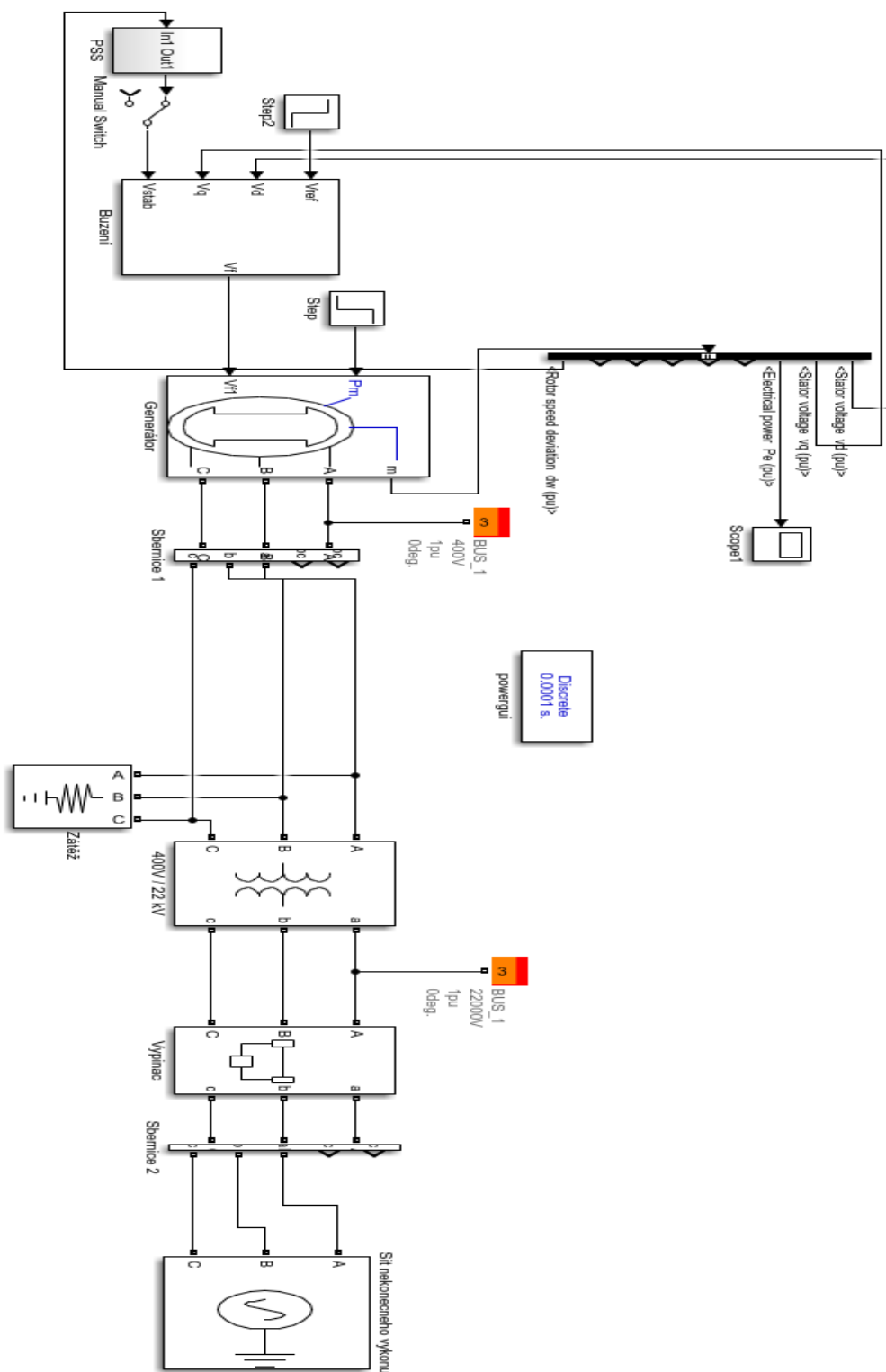
Jako další jsem přešel k ověření funkčnosti vytvořeného PSS1A na modelu jednoho stroje připojeného k síti nekonečného výkonu. K vytvoření modelu byl použit toolbox SimScape® v programu Matlab-Simulink.

Nejprve je vhodné zmínit se o tom, co to toolbox SimScape je a k čemu se dá používat. SimScape slouží k tvorbě modelů fyzikálních systémů sestávajících se z mechanických, elektrických nebo například hydraulických komponent. V toolboxu SimScape jsou zavedeny základní prvky pro modelování a zavádí reálné fyzikální veličiny jako síly, napětí, proudy apod. Spojením SimScape bloků vznikají cesty pro přenos energie. V případě potřeby lze doprogramovat další součásti, jelikož je vyvinut speciální jazyk, tzv. Simscape language.

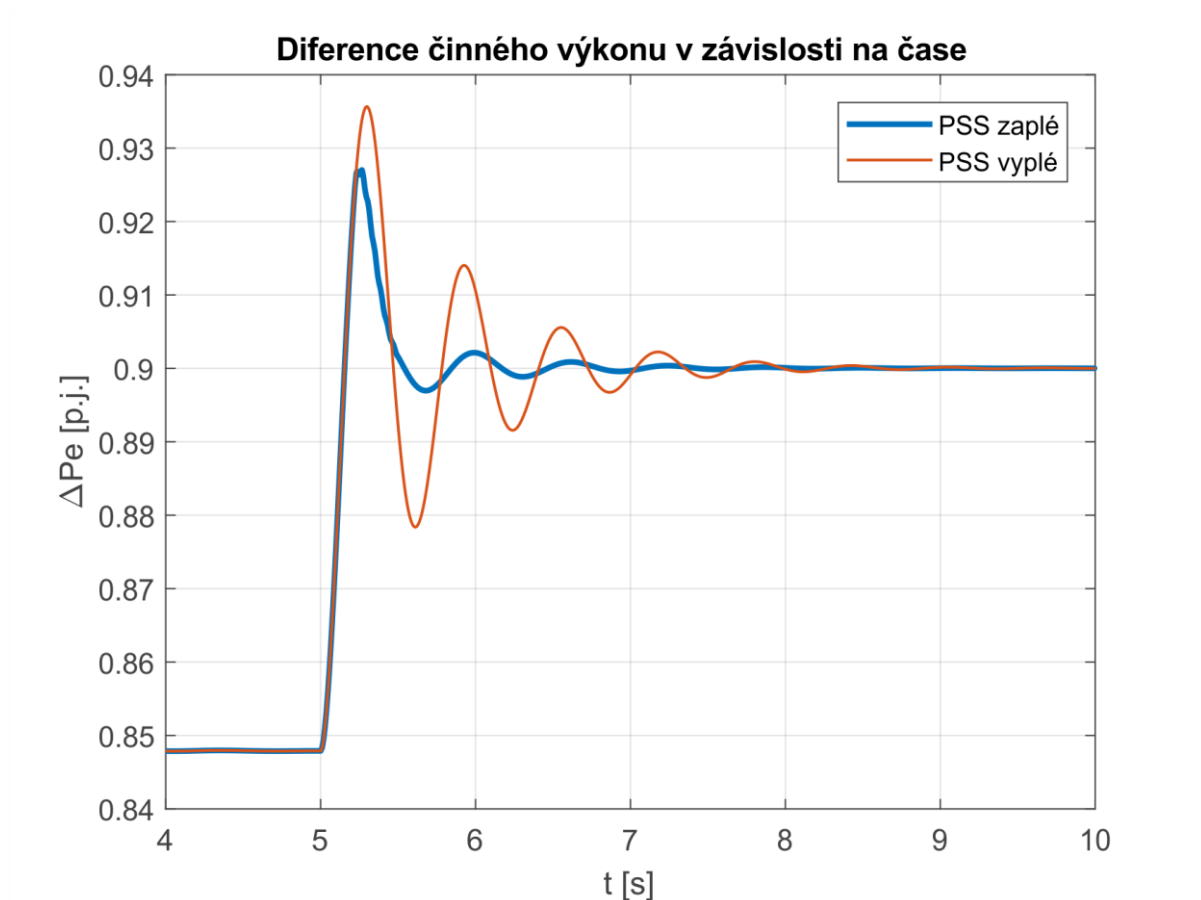
V mém případě byl vytvořen model, jímž jsem se snažil zachytit co nejvíce skutečnost zapojení zkušebního generátoru ve firmě Tenel ČR. Veškeré bloky použité jsou již předvytvořené v knihovně SimScapu. Synchronní generátor je připojen přes transformátor s převodem 400/22000 V k vnější síti. Tuto síť vzhledem k velikosti generátoru považuji za síť nekonečného výkonu. V modelu se dále nachází budící systém a také PSS. Dále se v modelu nachází malá zátěž, jelikož bez ní mi nešla spustit simulace. Kompletní model je na Obr. 41.

Parametry synchronního generátoru jsou shodné s předchozí simulací a jsou uvedeny v příloze 1. Parametry transformátoru jsou dané převodem 400/22 kV a reaktancí 0,15 p.j.. Parametry budiče jsou taktéž shodné s předchozí simulací, stejně tak jako parametry stabilizátoru.

Funkce PSS je odsimulována při skokové změně mechanického výkonu z 0,85 p.j. na 0,9 p.j. a je vidět na Obr. 42.



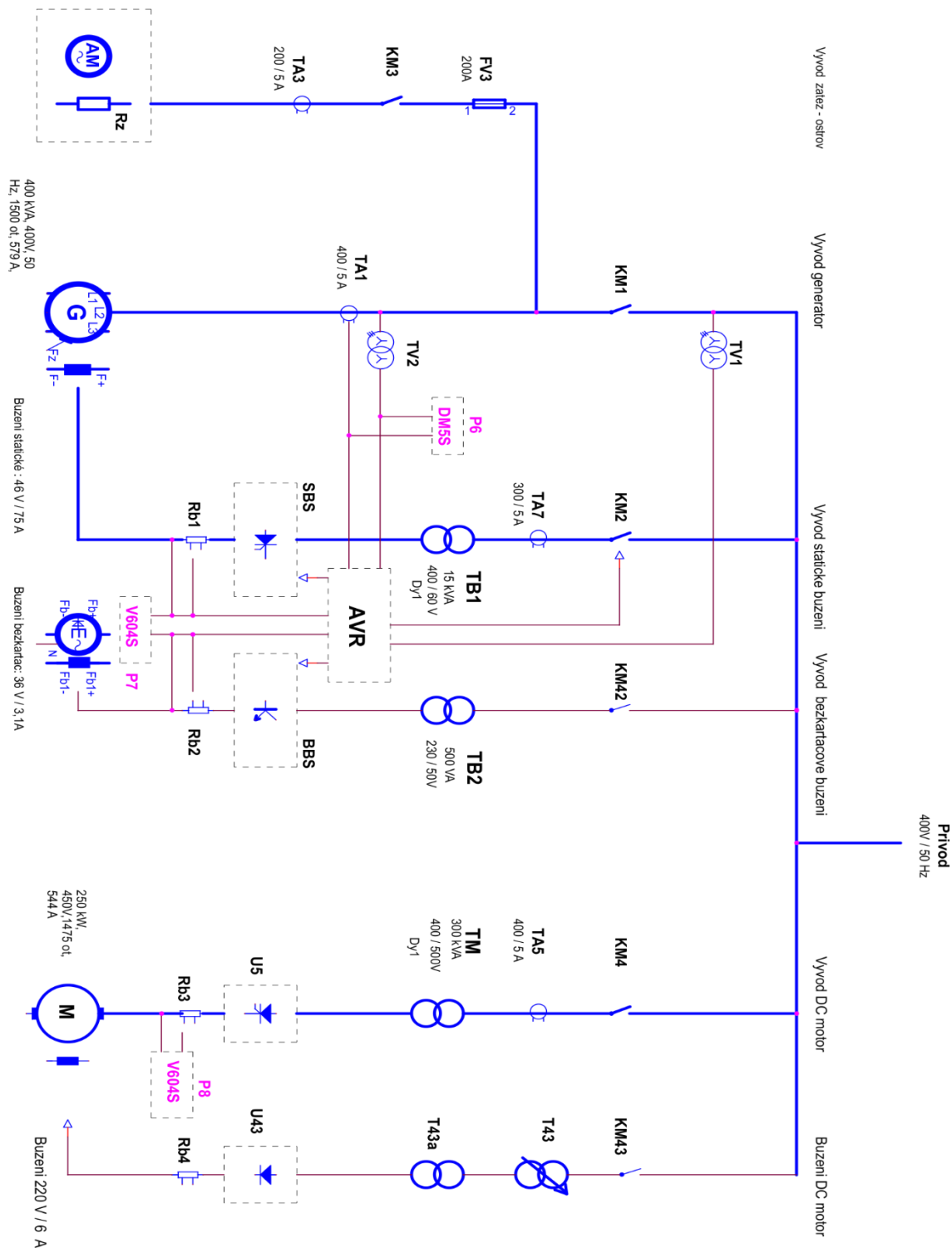
Obr. 41 Vytvoření SMIB v prostředí Matlab-Simulink za pomoci SimScape toolboxu



Obr. 42 Vliv PSS za pomoci SImScape

# 6. Realizace pracoviště k měření na reálném soustrojí

## 6.1. Schéma a popis pracoviště



Obr. 43 Schéma pracoviště, převzato z [17]

Hlavním strojem měřicího pracoviště je 4-pólový synchronní hydroalternátor 1FC2 353 – 4, ve schématu označený písmenem G. Jeho základní parametry jsou uvedené v tabulce 6.

Jmenovitý zdánlivý výkon	400	kVA
Jmenovitý činný výkon	320	kW
frekvence	50	Hz
Jmenovitý proud	577	A
Jmenovité napětí	400	V
Jmenovité otáčky	1500	min <sup>-1</sup>

*Tabulka 6 Základní parametry synchronního generátoru*

Svorkové napětí je měřeno pomocí měřicího transformátoru napětí a proud je měřen pomocí měřicího transformátoru proudu s převodem 500/5 A.

Zkušební generátor je možno budít dvěma způsoby. Prvním způsobem je statický budicí systém, přes budicí transformátor o výkonu 15 kVA a převodu 400/60 V. Ve statickém systému je použit jako usměrňovač řízený tyristorový usměrňovač a jmenovité budicí hodnoty jsou 46 V a 75 A. Tímto usměrňovačem poté přes kroužky napájíme budicí vinutí generátoru. Druhým způsobem je buzení bezkartáčové. Zde je použit budicí transformátor o převodu 230/50 V a výkonu 500 VA. Jako usměrňovač slouží řízený IGBT usměrňovač, kterým budíme synchronní budič, který je na hřídeli s hlavním generátorem. Oba budicí systémy jsou řízeny automatickým regulátorem napětí TE-5403 od firmy TENEL ČR. Součástí regulátoru je i systémový stabilizátor PSS1A.

Ke generátoru je možnost připojit zátěž ve formě rezistoru nebo ve formě asynchronního motoru.

Jako pohon pro generátor slouží stejnosměrný cize buzený motor(M), jež je napájen přes transformátor o převodu 400/500 V a výkonu 300 kVA. Základní parametry motoru jsou uvedeny v tabulce 7.

Jmenovitý činný výkon	250	kW
Jmenovité otáčky	1475	min <sup>-1</sup>
Jmenovitý proud	544	A
Jmenovité napětí	450	V

*Tabulka 7 Základní parametry DC motoru*

Měření činného výkonu je zajištěno převodníkem DM5F od Camille Bauer, na schématu označené jako P<sub>6</sub>.

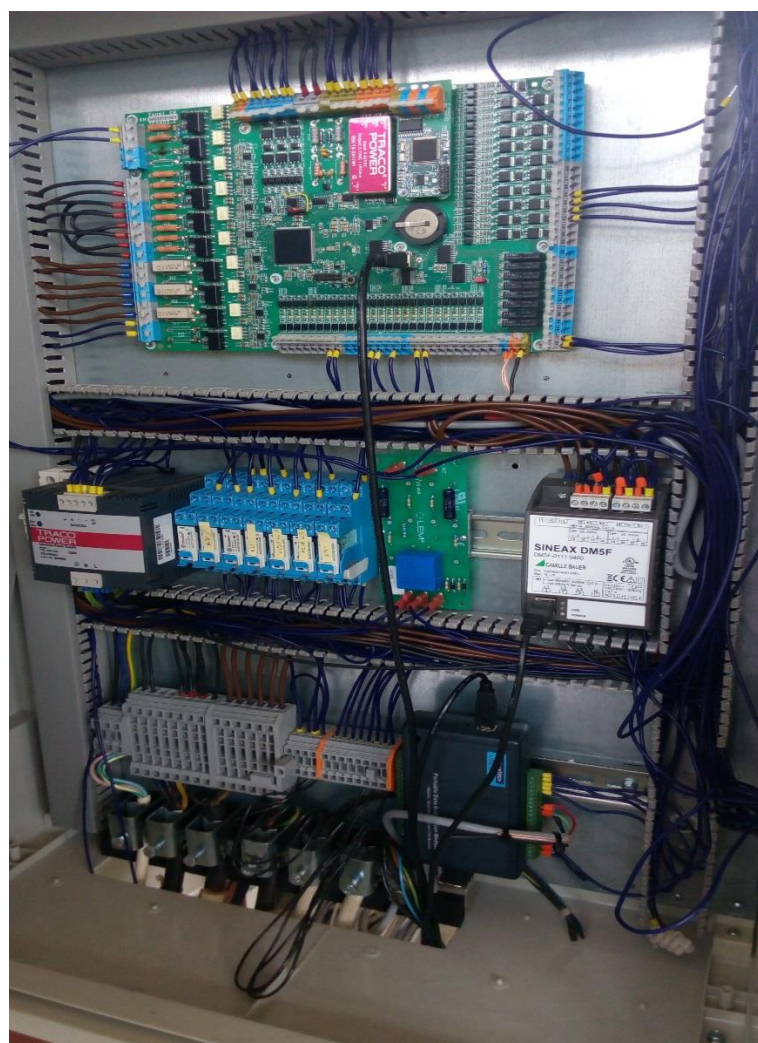
Měření budících proudů je realizováno za pomoci měřících LEMů proudu, které fungují na principu Hallovy sondy s převodem 50 A/50 mA.

Foto reálného pracoviště je na Obr. 44. Zleva je nejprve synchronní generátor, vpravo od něho DC motor. Následuje skříň vývodů a ovládání generátoru, skříň vývodů a ovládání motoru a poslední menší skříň je skříň buzení a regulátoru s měřením.





Obr. 44 Měřící pracoviště ve firmě TENEL



Obr. 45 Uspořádání přístrojů ve skříní buzení a regulace

## 6.2. Úprava pracoviště k měření činného výkonu přes počítač

### 6.2.1. Výběr převodníku

Nejprve bylo potřeba vyřešit měření výkonu, resp. jeho převod na měřící kartu. Při výběru převodníku je potřeba dbát hlavně na správné

K dispozici jsem měl převodník Sineax DM5F, který je dělaný právě pro průmyslové měření činného výkonu. Jeho výstupy jsou však proudové a měřící karta má vstupy napětové. Z toho důvodu ještě byla potřeba udělat karta k převodu proudu na napětí, což je popsáno v kapitole 6.2.3.

Převodník **Sineax DM5F** od firmy Camille Bauer:

- Komunikace pomocí USB nebo RS485
- 6 slotů k měření 3 fázových proudů do 7,5 A
- 4 sloty k měření fázových napětí do 400 V a sdružených napětí do 693 V
- 8 analogových výstupů 4 až 20 mA galvanicky oddělených
- Možnost měření činného a jalového výkonů
- Externí napájení 100 až 230 V AC nebo 24 až 230 V DC



Obr. 46 Převodník Sineax DM5F, převzato z [16]

Z hlediska měřených napětí převodník vyhovuje, jelikož měřené sdružené napětí je 400 V a fázové 230 V. Měřením proudu taktéž vyhovuje, jelikož převod proudového transformátoru je 400/5 A. Při jmenovitém proudu generátoru 577 A lze spočítat proud z MTP:

$$I = \frac{577}{400} * 5 = 7,2 \text{ A}$$

Z toho tedy vyplývá, že převodník DM5F lze použít.

## 6.2.2. Výběr měřící karty

Měřící karty bývají často označovány také jako karty pro sběr dat nebo DAQ (Data Acquisition). Jejich funkcí je měření dat a komunikace s PC v reálném čase. Přídavnou funkcí často bývá nejen měření, ale i generování signálů.

Je několik základních kritérií, kterým bychom měli věnovat pozornost při výběru měřící karty. Jako prvním kritériem bych zmínil, jakým způsobem karta komunikuje s PC/notebookem neboli jaké používá komunikační rozhraní. Mezi nejpoužívanější v průmyslovém prostředí patří komunikace pomocí rozhraní PCI, případně PXI. Díky vývoji USB portů se také často využívá komunikace právě přes toto rozhraní.

Po vyřešení chtěného způsobu komunikace je potřeba se věnovat signálům, které budu měřit. Nejprve se zaměřím na rozlišení měřící karty. Rozlišení udává kolik úrovní vstupního signálu dokáže měřící karta rozlišit. To je dáno hlavně rozlišením A/D převodníku použitého v dané kartě. Pro různé běžně používané počty úrovní jsem vytvořil následující tabulku.

Počet bitů	Počet úrovní
3	8
8	256
12	4096
16	65536

Tabulka 8 úrovně signálu z hlediska počtu bitů převodníku

Jestliže například na 12 bitovém převodníku budeme mít napěťový rozsah 0-10 V, pak budeme mít napěťové úrovně po 0,002441 V.

Dalším kritériem k zamyšlení je vzorkovací frekvence. U nejdražších měřících karet je vzorkovací frekvence neměnná na počtu kanálů. U levnějších je vzorkovací frekvence daná maximální vzorkovací frekvencí, která se poté dělí na počet použitých kanálů. To lze zapsat vztahem (6.1).

$$f_{vzork} = \frac{f_{vzorkmax}}{n} \quad (6.1)$$

,kde při použití  $n$  kanálů bude vzorkovací frekvence  $f_{vzork}$  každého dána vztahem (6.1).

V neposlední řadě je potřeba věnovat se počtu kanálů, které budou potřeba pro měření a také měřicímu rozsahu. Z parametrů lze posoudit, že měřící karta je vhodná na toho pracoviště.

Z popsaných hledisek výše a z praxi důležitého hlediska cena/výkon je použita měřící karta **USB 4711 od firmy Advantech**.

Základní parametry USB 4711:

- komunikace za pomoci USB
- 12 bitový převodník
- maximální vzorkování 150 kS/s
- měřící rozsah 0-10 V nebo -5 až +5 V
- 16 Analogových vstupů
- 8 digitálních vstupů/výstupů
- možnost připojení na DIN lištu



Obr. 47 Měřicí karta Advantech USB 4711, převzato z [7]

### 6.2.3. Realizace převodů proudových výstupů na napěťové vstupy

Jelikož měřicí karta má napěťové vstupy a všechny LEMy a převodníky mají proudové výstupy, je zapotřebí zajistit převod proudových výstupů na napěťové vstupy. To jsem zajistil pomocí rezistorů, jejichž hodnoty byly vypočteny dle Ohmova zákona. U rezistorů je zapotřebí brát zřetel také na jejich výkonovou zatížitelnost, proto byla také vypočtena a byly vybrány rezistory vyhovující této zatížitelnosti.

	Rozsah/převod	$I_{\max}$	U	R	P
		[mA]	[V]	[ $\Omega$ ]	[W]
$U_g$ převodník DM5F	4-20 mA	20	10	500	0,2
$I_g$ převodník DM5F	4-20 mA	20	10	500	0,2
$P_g$ převodník DM5F	4-20 mA	20	10	500	0,2
$Q_g$ převodník DM5F	4-20 mA	20	10	500	0,2
LEM budící proud	50 A / 50 mA	100	10	100	1
LEM budící napětí	200 V/ 25 mA	8	10	1250	0,08
Převodník P DC motor	4-20 mA	20	10	500	0,2

Tabulka 9 Vypočítané hodnoty rezistorů pro převod proudu na napětí

## 7. Měření vlivu PSS na reálném soustrojí

Měření proběhlo na soustrojí popsaného v kapitole 6. Pro měření byl použit statický budicí systém, který byl použit i v simulaci. Parametry PSS jsou uvedeny v tabulce 10.

	PSS1A	
$T_1$	0,24	s
$T_2$	0,0414	s
$T_3$	0,24	s
$T_4$	0,0414	s
$T_5$	6	s
K	20	-
$A_1$	0,01	s
$A_2$	2,50E-05	s

Tabulka 10 Parametry PSS1A

Generátor bylo potřeba nejprve přifázovat. K tomu bylo potřeba synchronizovat napětí a frekvenci se sítí. Požadovaná frekvence se zajistila regulací napětí na kotvě DC motoru a požadované napětí se zajistilo pomocí budicího proudu generátoru. Poté jsem stroj přifázoval s pomocí synchronoskopu k síti o parametrech 400 V a 50 Hz. To bylo provedeno v době, kdy byla fázová odchylka, velikost napětí i frekvence generátoru co nejvíce shodné se sítí. Na synchronoskopu je shoda značená problikáváním led diod. Následně jsem stroj nastavil na hodnoty měření shodné se simulací. Tyto hodnoty jsou uvedené v tabulce 11.

P	0,8	p.j.
Q	0,1	p.j.
f	1	p.j.
$U_t$	1	p.j.

Tabulka 11 Hodnoty při měření

Rozkývání stroje bylo provedeno za pomoci generátoru poruchových funkcí od firmy Tenel. Postup byl takový, že jsem si v mezích frekvencí od 0,1 Hz do 3 Hz generoval poruchovou funkci, z které bylo možné zjistit rezonanční frekvenci generátoru. Tato rezonance se nejvíce vyskytla při frekvenci 1,7 Hz. Stroj byl tedy rozkáván s touto frekvencí a proběhlo odzkoušení výše uvedeného systémového stabilizátoru.

Měřená data byla po měření vyexportována z měřicí karty a byly vytvořeny dva následující grafy zachycující rozkávání s PSS a bez PSS.

Rozkávání stroje s deaktivovaným PSS je ukázáno na Obr. 48. Samotné rozkávání je v čase  $t = 2$  s.

Na Obr. 49 je ukázán shodně rozkáváný stroj jako na Obr. 48, ale tentokrát s aktivovaným PSS. PSS začne pracovat až po prvním kyvu, což je způsobené softwarovým nastavením použitého regulátoru. Je vidět, že PSS dokázal stroj utlumit za 3 periody.



Obr. 48 Činný výkon synchronního generátoru bez PSS



Obr. 49 Činný výkon synchronního generátoru s PSS

## 8. Závěr

Hlavním cílem práce bylo zjistit a aplikovat metodu vhodnou pro ladění PSS. K ladění je nakonec použit Heffron-Phillipsův model generátoru připojeného k síti nekonečného výkonu, z kterého je změřena frekvenční charakteristika tohoto uspořádání – GEP. Tato charakteristika hraje klíčovou roli v následném odladění parametrů a tím zajištění robustnosti systémového stabilizátoru pro všechny typy nízkofrekvenčních oscilací. Tato robustnost je zajištěna tím, že v celém frekvenčním pásmu těchto kyvů zajistíme co nejmenší fázový posuv výstupního signálu PSS od odchylky úhlové rychlosti.

V programu Matlab, za použití jeho nadstavby Simulinku, byl tento model aplikován a v tomtéž programu byly spočítány všechny potřebné konstanty. Byly vytvořeny dva stabilizátory. První je ve formě přenosové funkce a druhý je konvenční stabilizátor PSS1A popsáný v normě [2]. Z následných simulací je vidět, jak systémový stabilizátor tlumí lokální kyvy. Pro ukázkou správné funkce jsou odsimulovány obě polarity změny od rovnovážného stavu.

Dalším řešeným bodem byla realizace měřicího pracoviště vhodné pro měření činného výkonu synchronního generátoru přes počítač. Bylo popsáno, jakým způsobem je pracoviště upraveno a uvedeno zdůvodnění vhodnosti použitých komponent.

Na závěr bylo provedeno samotné měření na popsaném soustrojí a je opět ukázáno, jak dokáže systémový stabilizátor tlumit kývání činného výkonu. Typ stabilizátoru v regulátoru je PSS1A a byly použity vypočtené konstanty z této práce.

Porovnáním simulovaných průběhů a změřených průběhů je vidět, že simulace vykazuje o něco lepší výsledky z pohledu rychlosti tlumení oscilací.

Na úplný závěr bych tedy shrnul několik věcí. První je, že Heffron-Phillipsův model se prokázal jako vhodný model k ladění systémového stabilizátoru. Druhou je, že systémový stabilizátor dokáže účinně tlumit oscilace reálných soustrojí a tedy požadavky na jeho zakotvení v automatických regulátorech napětí jsou opodstatněné. Dále je vidět, že úprava měřicího pracoviště je vhodná k měření činného výkonu a vzorkovací frekvence měřící karty je dostatečná.

## 9. Seznam symbolů

Symbol	Popis	Základní Jednotka
$a$	Konstanta pro určení fáz. Posuvu	-
$D$	Konstanta tlumení	-
$E'_{fd}$	Budící napětí	V
$E_q$	Vnitřní napětí generátoru	V
$E_q$	Vnitřní napětí generátoru v ose q	V
$f$	Frekvence sítě	Hz
$f_{vzork}$	Vzorkovací frekvence 1 kanálu převodníku	Hz
$f_{vzorkmax}$	Maximální vzorkovací frekvence převodníku	Hz
$H$	Konstanta setrvačnosti	Ws/VA
$I$	Proud statorovým vinutím	A
$I_b, I_f$	Budící proud	A
$i_d$	Proud statorovým vinutím v ose d	A
$i_q$	Proud statorovým vinutím v ose q	A
$j$	Imaginární jednotka	-
$J$	Moment setrvačnosti	kg.m <sup>2</sup>
$K_1$	Heffron-Phillipsova konstanta	-
$K_2$	Heffron-Phillipsova konstanta	-
$K_3$	Heffron-Phillipsova konstanta	-
$K_4$	Heffron-Phillipsova konstanta	-
$K_5$	Heffron-Phillipsova konstanta	-
$K_6$	Heffron-Phillipsova konstanta	-
$K_{ex}$	Zesílení budícího systému	-
$M$	Konstanta setrvačnosti 2	Ws/VA
$P$	Činný výkon generátoru	W
$P_{mech}$	Mechanický výkon	W
$P_e$	Elektrický činný výkon	W
$p_p$	Počet pólpárů	-
$Q$	Jalový výkon generátoru	var
$R$	Odpor statorového vinutí	$\Omega$
$t$	Čas	sec
$T_1$	Časové konstanty filtrů	sec
$T_2$	Časové konstanty filtrů	sec
$T_a$	Akcelerační moment	Nm
$T_{do}$	Časová konstanta SG	sec
$T'_{do}$	Přechodná časová konstanta SG	sec
$T''_{do}$	Rázová časová konstanta SG	sec
$T_e$	Elektrický moment	Nm



$T_{ex}$	Časová konstanta budícího systému	sec
$T_s$	Mechanický moment	Nm
$T_t$	Tlumící moment	Nm
$U$	Statorové napětí	V
$U_g$	Napětí generátoru	V
$u_{pss}$	Výstupní signál z PSS	-
$U_s, E_0$	Napětí sítě	V
$V_{pss}$	Výstup z PSS	-
$V_{ref}$	Referenční hodnota napětí	V
$V_s$	Napětí sítě	V
$V_t$	Statorové napětí	V
$X_{ad}$	Podélná reaktance statoru	$\Omega$
$X_d$	Reaktance SG v ose d	$\Omega$
$X'_d$	Přechodná reaktance SG v ose d	$\Omega$
$x_e$	Ekvivalentní reaktance sítě	$\Omega$
$X_l$	Reaktance sítě	$\Omega$
$X_q$	Reaktance generátoru v ose q	$\Omega$
$X'_q$	Přechodná reaktance SG v ose q	$\Omega$
$X_t$	Ekvivalentní reaktance sítě	$\Omega$
$X_\sigma$	Rozptylová reaktance statoru	$\Omega$
$\delta$	Zátěžný úhel	$^\circ$
$\omega_0$	Jmenovitá úhlová rychlost	rad/sec
$\omega_r$	Elektrická úhlová rychlost	rad/sec
$\omega_s$	Mechanická úhlová rychlost	rad/sec

## 10. Seznam zkratk

PSS	Power System Stabilizer	Systémový stabilizátor
AVR	Automatic voltage regulator	Automatický regulátor napětí
PCI	Peripheral component interconnect	
PXI	PCI extensions for instrumentation	
USB	Universal Serial Bus	
SMIB	Single machine infinite bus	Jeden stroj pracující do sítě nekočného výkonu
SG	Synchronous generator	Synchronní generátor
p.j.	Per unit	poměrná jednotka

## 11. Seznam obrázků

Obr. 1	Řez rotorem turbostroje, převzato z [10] .....	- 9 -
Obr. 2	Fázorový diagram turbostroje, převzato z [1].....	- 10 -
Obr. 3	Náhradní schéma turbostroje, převzato z [1] .....	- 10 -
Obr. 4	V-křivky synchronního generátoru, převzato z [14].....	- 11 -
Obr. 5	P-Q diagram synchronního alternátoru, převzato z [19] .....	- 12 -
Obr. 6	Typický průběh kývání synchronního stroje, převzato z [18].....	- 13 -
Obr. 7	K vysvětlení pravidla ploch, převzato z [12].....	- 14 -
Obr. 8	Momenty působící na hřídel generátoru a smysl výkonů, převzato z [13].....	- 14 -
Obr. 9	Topologie při lokálním kývání, převzato z [11] .....	- 17 -
Obr. 10	Topologie při systémovém kývání, převzato z [11].....	- 17 -
Obr. 11	Topologie při kývání blízkých generátorů, převzato z [11] .....	- 17 -
Obr. 12	Principiální zapojení budícího systému .....	- 18 -
Obr. 13	Budič se stejnosměrným zdrojem, převzato z [11] .....	- 19 -
Obr. 14	Budič rotační se střídavým zdrojem, převzato z [11] .....	- 20 -
Obr. 15	Budič statický se střídavým zdrojem, převzato z [11] .....	- 21 -
Obr. 16	Porovnání vhodnosti budícího systému pro aplikaci PSS, převzato z [5].....	- 22 -
Obr. 17	Vysvětlení vlivu jednotlivých momentů, převzato z [5] .....	- 23 -
Obr. 18	Principiální zapojení PSS k AVR .....	- 24 -
Obr. 19	Měření úhlové rychlosti, převzato z [6] .....	- 24 -
Obr. 20	Měření činného výkonu, převzato z [6].....	- 25 -
Obr. 21	Měření frekvence, převzato z [6] .....	- 25 -
Obr. 22	Blokové schéma PSS1A, převzato z [2].....	- 26 -
Obr. 23	Blokové schéma PSS2B, převzato z [8].....	- 27 -
Obr. 24	Blokové schéma PSS3B, převzato z [2].....	- 28 -
Obr. 25	Blokové schéma PSS4B, převzato z [2].....	- 28 -
Obr. 26	Single machine infinite bus .....	- 29 -
Obr. 27	Heffron-Phillipsův model SMIB, převzato z [9] .....	- 30 -
Obr. 28	Heffron-Phillipsův model vytvořený v programu MATLAB-Simulink .....	- 32 -
Obr. 29	Vytvořený PSS - blokově.....	- 33 -
Obr. 30	Bodeho graf GEP.....	- 34 -
Obr. 31	Bodeho graf horní propusti .....	- 35 -
Obr. 32	Bodeho graf dolní propusti .....	- 36 -
Obr. 33	Bodeho graf výsledné PSS + GEP .....	- 37 -

---

Obr. 34	Bodeho graf konvenčního PSS1A a GEP .....	- 39 -
Obr. 35	Výstupní činný výkon při kladné změně $P_{\text{mech}}$ o 5% .....	- 41 -
Obr. 36	Diference otáček při kladné změně $P_{\text{mech}}$ o 5% .....	- 41 -
Obr. 37	Výstupní činný výkon při záporné změně $P_{\text{mech}}$ o 5% .....	- 42 -
Obr. 38	Diference otáček při záporné změně $P_{\text{mech}}$ o 5% .....	- 42 -
Obr. 39	Výstupní signál PSS .....	- 43 -
Obr. 40	Porovnání PSS1 a PSS1A .....	- 43 -
Obr. 41	Vytvoření SMIB v prostředí Matlab-Simulink za pomoci SimScape toolboxu-	45 -
Obr. 42	Vliv PSS za pomoci SimScape .....	- 46 -
Obr. 43	Schéma pracoviště, převzato z [17] .....	- 47 -
Obr. 44	Měřicí pracoviště ve firmě TENEL .....	- 49 -
Obr. 45	Uspořádání přístrojů ve skříni buzení a regulace .....	- 49 -
Obr. 46	Převodník Sineax DM5F, převzato z [16] .....	- 50 -
Obr. 47	Měřicí karta Advantech USB 4711, převzato z [7] .....	- 52 -
Obr. 48	Činný výkon synchronního generátoru bez PSS .....	- 54 -
Obr. 49	Činný výkon synchronního generátoru s PSS .....	- 54 -

---

## 12. Seznam tabulek

Tabulka 1 Převod mezních frekvencí z Hz na rad/s .....	- 34 -
Tabulka 2 Nastavení řešiče .....	- 40 -
Tabulka 3 Konstanty regulátoru .....	- 40 -
Tabulka 4 Konstanty PSS1A .....	- 40 -
Tabulka 5 Provozní podmínky a K-konstanty .....	- 40 -
Tabulka 6 Základní parametry synchronního generátoru .....	- 48 -
Tabulka 7 Základní parametry DC motoru .....	- 48 -
Tabulka 8 úroveň signálu z hlediska počtu bitů převodníku .....	- 51 -
Tabulka 9 Vypočítané hodnoty rezistorů pro převod proudu na napětí.....	- 52 -
Tabulka 10 Parametry PSS1A .....	- 53 -
Tabulka 11 Hodnoty při měření.....	- 53 -

## 13. Seznam literatury

- [1] MĚŘIČKA, Jiří, Václav HAMATA a Petr VOŽENÍLEK. *Elektrické stroje*. Vyd. 2. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2000. ISBN 80-01-02109-2.
- [2] IEEE 421.5: Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies, The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., USA, New York 2005
- [3] KUNDUR, P., Neal J. BALU a Mark G. LAUBY. *Power system stability and control*. New York: McGraw-Hill, c1994. ISBN 007035958X.
- [4] M.J. Gibbard, P. Pourbeik and D.J. Vowles, *Small-signal stability, control and dynamic performance of power systems*, University of Adelaide Press, Adelaide, 2015. ISBN 978-1-925261-03-5
- [5] Ing. Zbyněk Brettschneider, ORGREZ a.s.. *Definice požadavků na systémové stabilizátory do Kodexu PS*. 2007. Dostupné z : [www.ceps.cz](http://www.ceps.cz)
- [6] MITSUBISHI ELECTRIC, Power System Stabilizer [online]. [vid. 18.04.2018]. Dostupné z: <http://www.meppi.com/Products/GeneratorExcitationProducts/Static%20Excitation%20System/Power%20System%20Stabilizer.pdf>
- [7] ADVANTECH, manuál ke kartě USB-4711A [online]. [vid. 11.05.2018]. Dostupné z: [http://advdownload.advantech.com/productfile/PIS/USB-4711A/Product%20-%20Datasheet/USB-4711A\\_DS\(09.13.17\)20171002112316.pdf](http://advdownload.advantech.com/productfile/PIS/USB-4711A/Product%20-%20Datasheet/USB-4711A_DS(09.13.17)20171002112316.pdf)
- [8] FIŠERA, J. Počítačová simulace stabilizace výkonu synchronních generátorů. Praha: ČVUT, Fakulta elektrotechnická, 2016. Vedoucí bakalářské práce Ing. Jan Bauer Ph.D.
- [9] G. Andersson, "Modeling and Analysis of Electric Power Systems" Lecture 227-0526-00, ITET ETH Zürich, Zürich, 2008.
- [10] VOŽENÍLEK, P. NOVOTNÝ, V., MINDL, P.: Elektromechanické měniče. Praha: ČVUT. 2015, ISBN 978-80-01-04875-7
- [11] DOLEŽAL, Jaroslav. Jaderné a klasické elektrárny. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-04936-5.
- [12] MÁŠLO, Karel. *Řízení a stabilita elektrizační soustavy*. Praha: Asociace energetických manažerů, 2013. ISBN 978-80-260-4461-1.
- [13] Transient Stability in Power System. Electrical Engineering and Technology [online]. [vid 19.03.2018]. Dostupné z: <https://www.electrical4u.com/transient-stability-and-swing-equation/>
- [14] Autor neznámý, Synchronní stroje [online]. [vid. 11.05.2018]. Dostupné z: <http://www.spse.dobruska.cz/download/sokol/SG.pdf>
- [15] Dokumentace programu MATLAB. Dostupná z [www.mathworks.com](http://www.mathworks.com)
- [16] CAMILLE BAUER, Device handbook DM5F/DM5S [online]. [vid. 24.5.2018]. Dostupné z: [http://www.camillebauer.com/src/download/Device\\_handbook\\_DM5.pdf](http://www.camillebauer.com/src/download/Device_handbook_DM5.pdf)
- [17] TENEL ČR, s.r.o., Dokumentace k měřicímu pracovišti 400 kVA.

[18] DOLEŽEL, Ivo. Přednášky z předmětu B1M15PRE Přenos a rozvod elektrické energie [online] [vid. 23.5.2018]. Dostupné z: <http://www.powerwiki.cz/wiki/PRE>

[19] Vikas, Jain. Excitation system for power generation [online] [vid.24.5.2018]. Dostupné z: <http://www.powervikas.com/2013/03/avr-excitation-system-dc-ac-excitation-system-synchronous-generator-slip-rings-static-excitation-brush-less-excitation-system.html>

## **Příloha 1 – Parametry generátoru použitého pro simulaci**

Three-Phase Synchronous Generator with Salient Pole Rotor (Laminated Pole)

Nominal data		Type	1FC2 353 - 4
Output	$S_n$	400 kVA	Standard IEC 60034
Voltage	$U_n$	400 V	Marine classification ---
Frequency	$f_n$	50 Hz	Ex-Protect ---
Power factor	p.f.	0,8	Ex-Standard ---
Current	$I_n$	577 A	Cooling system IC01
Speed	$n_n$	1500 min <sup>-1</sup>	Ambient temperature 40 °C
Torque	$M_n$	2,5 kNm	Cooling water temperature --- °C
Winding pitch 2/3		no	Installation altitude 1000 m
Excitation	brushless with AVR and auxiliary winding		Insulation class 155 (F)
Mounting			Stator Winding Temperature ≤ 145 °C (R)
Enclosure			Field Winding Temperature ≤ 145 °C (R)

Operating data		Generator driven by: -		
	Apparent output	Electrical output	Mechanical input	Shaft input torque
Power factor 0,80	400 kVA	320 kWe	340 kWm	2,17 kNm
Power factor 1,00	400 kVA	400 kWe	421 kWm	2,68 kNm

Reactances and time constants				$Z_n$	0,400 Ω
	unsat.	sat.	unsat.	sat.	
$X_d$		220,3 %	$x_q$	117,1 %	$T_{d0}'$ 1,879 s
$X_d'$		16,5 %	$x_q'$	117,1 %	$T_d'$ 0,141 s
$X_d''$		14,1 %	$x_q''$	17,9 %	$T_d''$ 0,017 s
$X_2$		16,0 %	$x_0$	7,1 %	$T_a$ 0,026 s

Efficiencies						
S/S <sub>n</sub>		25	50	75	100	110 %
Power factor 0,80					94,0	%
Power factor 1,00					95,0	%

Short circuit data		
$I_k''$	4,09 kA	Initial short circuit current (3 ~)
$I_s$	10,40 kA	Max. peak current (3 ~)
$I_k$ ≥	1,73 kA	Sustained short circuit current
$k_c$	0,45	Short circuit ratio
$M_{k2}$	23 kNm	Initial short circuit torque (2~)
$M_{k3}$	18 kNm	Initial short circuit torque (3~)

Other data	
AVR type	Not supply SEM
* In case of non-locating bearings this will have effect on the shaft end.	

Remarks			

Change -	Note issued	DATE 12.08.2015	NAME Frei	<b>Electrical Data Sheet</b>		Project No.	Project Code TENEL
				<b>SIEMENS</b>		Job No.	Document No.
						Type 1FC2 353 - 4	Sheet 1 of 2





## Příloha 2 – Skripty vytvořené v matlabu

```
%Impedance v poměrných jednotkách, Zn=0.400 ohmů
xd=2.203;
xdd=0.165;
xddd=0.141;
x2=0.16;
xq=1.171;
xqq=1.171;
xqqq=0.179;
x0=0.071;
xs=0.03875;
% Časové konstanty v sekundách
Td0=1.879;
Tdd=0.141;
Tddd=0.017;
Tqq=Tdd;
Tqqq=Tddd;
Ta=0.036;

%Jmenovite hodnoty
Sn=400000; %VA
Pn=320000; %kW cos 0.8
Un=400; %V
fn=50; %Hz
In=577; %A
nn=1500 ; %min-1
Mn=2500; %Nm
H=3;
pp=2;
omega0=314;
T3b=1;
Uref=0;
Kb=100;
Tb=0.05;
Ttrans=0.002;
D=0;

% Pracovní bod
P0=0.8;
Q0=0.1;

% Vypocet pocatecnich hodnot
iq0=P0*Q0/sqrt((P0*P0*Q0*Q0)+(Vt0*Vt0+Q0*xq)^2);
Vd0=iq0*xq;
Vq0=sqrt(Vt0^2-Vd0^2);
id0=(Q0+xq*iq0^2)/Vq0;
Eq0=Vq0+id0*xq;
E0=sqrt((Vd0+xe*iq0)^2-(Vq0-xq*id0)^2);
uhel0=atan((Vd0+xe*iq0)/(Vq0-xe*id0))*180/pi

% huffner phillips constants
K1=(Vsit0*Eq0*cosd(uhel0))/(xq+xt)+(xq-xdd)/(xt+xdd)*Vsit0*sind(uhel0)
K2=Vsit0*sind(uhel0)/(xt+xdd)
K3=(xt+xdd)/(xd+xt)
K4=(xd-xdd)/(xt+xdd)*Vsit0*sind(uhel0)
K5=-((xq*Vd0*Vsit0*cosd(uhel0))/((xq+xt)*Vt0)-
(xdd*Vq0*Vsit0*sind(uhel0))/((xt+xdd)*Vt0))
K6=xt/(xt+xdd)*Vq0/Vt0
```

```

Ks=Eq0*Vsit0/xt*cosd(uhel0)
frekkyv=sqrt(Ks*omega0/(2*H))*1/(2*pi)

% Konstanty PSS
T5a=6;
T6a=0.001;
Ksa=20;
uppera=0.05;
lowera=-0.05;
A2=0.000025;
A1=0.01;
A2a=0.01;
Ala=0.2;

% Vypocet
fazemax=45;
omegam=10;
rce1=sind(fazemax)==(a-1)/(a+1);
a=(vpasolve(rce1,a))
rce2=omegam==1/(tau*sqrt(a));
tau1=vpasolve(rce2,tau)
T1a=double(a)*double(tau1)
T2a=double(tau1)

% Prenosy GEP
VreftoVt=tf([K6*K3*Kb],[K3*Tb*Td0 Tb+K3*Td0 1+K3*K6*Kb]);
VreftoPem=tf([K2*K3*Kb],[K3*Tb*Td0 Tb+K3*Td0 1+K3*K6*Kb]);

% Jednotlive prenosy PSS
PSS1=tf([1],[T6a 1])
PSS2=tf([Tw1 0],[Tw1 1])
PSS3=tf([Tw3 0],[Tw3 1])
PSS4=tf([T8 1].^N,[T9 1].^N*M)
PSS4a=tf([T8 1],[T9 1])
PSS4b=tf([1],[T9 1])
PSS4c=PSS4a*PSS4b*PSS4b*PSS4b*PSS4b
PSS5=tf([T1 1],[T2 1])
PSS6=tf([T3 1],[T4 1])
PSS7=tf([Ks2],[T7 1])
PSS=PSS1*PSS2*PSS2*PSS4c*Ks3*PSS5*PSS6*PSS6*PSS6
PSSaa=PSS1*PSS3*PSS3*PSS7*PSS4c*Ks3*PSS5*PSS6*PSS6*PSS6
% Typovy prenos
typove=tf([6.28^3],[1 69.708 437.76 247.673])
opts = bodeoptions('cstprefs');
opts.Xlim=[0.66,30]
opts.Xlabel.String=('frekvence')
prvni=VreftoVt*PSS
druhy=VreftoVt*PSSaa
bodeplot(VreftoVt,PSS,PSSaa,prvni,druhy,opts)
bodeplot(PSS1,PSS2,PSS3,PSS4c,PSS5,PSS6*PSS6*PSS6*PSS6,PSS7,opts)
grid on;

% % GRAF OTACEK
plot(Omega1.time, [Omega1.signals.values], 'LineWidth',1);
grid on;
hold on;
plot(Omega2.time, [Omega2.signals.values], 'LineWidth',2);

```

```

title('Diference otáček v závislosti na čase');
ylabel('\Delta\omega [p.j.]');
xlabel('t [s]');
% xlim([0 15])
% ylim([0 1.1])
legend('PSS vyplé', 'PSS zaplé')

% % GRAF VYKONU
plot(Vykon1.time, [Vykon1.signals.values], 'LineWidth',1);
grid on;
hold on;
plot(Vykon2.time, [Vykon2.signals.values], 'LineWidth',2);
title('Diference činného výkonu v závislosti na čase');
ylabel('\DeltaPe [p.j.]');
xlabel('t [s]');
% xlim([0 15])
% ylim([0 1.1])
legend('PSS vyplé', 'PSS zaplé')

% % GRAF VYSTUP PSS
% plot(Vykon1.time, [Vykon1.signals.values], 'LineWidth',1);
% hold on;
plot(VystupPSS.time, [VystupPSS.signals.values], 'LineWidth',1);
title('Výstupní signál PSS při záporné změně Vref v závislosti na čase');
ylabel('Vystup PSS [p.j.]');
xlabel('t [s]');
grid on;
% xlim([0 15])
% ylim([0 1.1])
% legend('PSS vyplé', 'PSS zaplé')

% % % GRAF POROVNANI
plot(Porovnnani.time, [Porovnnani.signals.values], 'LineWidth',1);
grid on;
hold on;
% plot(Omega2.time, [Omega2.signals.values], 'LineWidth',2);
title('Porovnání PSS1 a PSS1A');
ylabel('\DeltaPe [p.j.] ');
xlabel('t [s]');
xlim([0 4])
ylim([0.05 0.09])
legend('PSS1', 'PSS1A')

% GRAF VYKONU
plot(SimScape.time, [SimScape.signals.values], 'LineWidth',2);
grid on;
hold on;
plot(SimScapel.time, [SimScapel.signals.values], 'LineWidth',1);
title('Diference činného výkonu v závislosti na čase');
ylabel('\DeltaPe [p.j.]');
xlabel('t [s]');
xlim([4 10])
% ylim([0 1.1])
legend('PSS vyplé', 'PSS zaplé')

```