

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI**  
**FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**  
**KATEDRA ELEKTROENERGETIKY A EKOLOGIE**

# **DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**Optimalizace nastavení regulátoru buzení  
synchronního generátoru**

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Lukáš REINDL**  
Osobní číslo: **E11N0034K**  
Studijní program: **N2644 Aplikovaná elektrotechnika**  
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**  
Název tématu: **Optimalizace nastavení regulátoru buzení synchronního generátoru**  
Zadávající katedra: **Katedra elektroenergetiky a ekologie**

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

1. Proveďte srovnání základních typů budících systémů.
2. Popište zkoušky a optimalizaci budící soupravy při uvádění do provozu.
3. Proveďte optimalizaci nastavení systémového stabilizátoru (PSS) pro účinné tlumení kyvů činného výkonu.
4. Zhodnoťte dosažené výsledky.

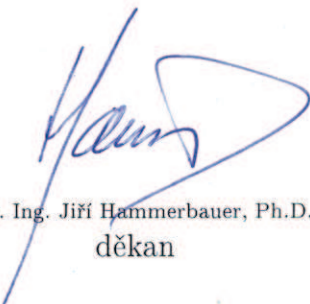


Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího  
Rozsah pracovní zprávy: 30 - 40 stran  
Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická  
Seznam odborné literatury:


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

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Martin Janda, Ph.D.**  
Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

Datum zadání diplomové práce: **14. října 2013**  
Termín odevzdání diplomové práce: **12. května 2014**

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



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

V Plzni dne 14. října 2013

## **Abstrakt**

Tato diplomová práce obsahuje stručný popis a srovnání základních druhů budících systémů, dále se zaměřuje na vybrané nastavení regulátoru buzení PRISMIC A50 pro aplikaci na projekt firmy Alpiq Kladno - buzení bezkartáčového turbogenerátoru BRUSH BDAX 9 bloku K7. Dále jsou zde uvedeny základní postupy a zkoušky, které byly provedeny při uvádění budící soupravy do provozu. Stěžejním tématem je optimalizace nastavení regulátoru a systémového stabilizátoru za pomoci různých měření na generátoru.

## **Klíčová slova**

AVR, buzení, budící systém, regulátor, regulace, kvalita regulace, stabilizace, stabilita, provozní diagram, synchronní generátor, turbogenerátor, statická budící souprava, bezkartáčová budící souprava, systémový stabilizátor, optimalizace, uvedení do provozu.

## **Abstract**

This master thesis presents brief description and comparison of common design excitation systems. It also presents settings of automatic voltage regulator PRISMIC A50. This setting is designed for application in the project of Alpiq Kladno company - excitation set for turbo-generator BRUSH BDAX 9 of unit K7. Finally there are described procedures and tests, which has been performed during commissioning of the excitation set. Main topic of this thesis is optimization of main regulation loop and power system stabilizer during measuring on the generator.

## **Key words**

AVR, excitation, excitation system, regulator, regulation, quality of regulation, stability, stabilization, capability diagram, synchronous generator, turbo generator, static excitation set, brushless excitation set, power system stabilization, optimization, commissioning.

## Prohlášení

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

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

.....  
Podpis

V Plzni dne 9.5.2014

Lukáš Reindl

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu této diplomové práce Ing. Martinovi Jandovi, Ph.D. za vstřícnost při vyřízení vlastního zadání a vedení, bez kterého by tato práce nemohla vzniknout.

Dále děkuji mému konzultantovi Ing. Danielovi Navrátilovi za četné rady a náměty, které mi před i po dobu tvorby této diplomové práce vždy ochotně poskytoval. Také děkuji Ing. Tomášovi Pancovi za konstruktivní kritiku a korekce této práce. V neposlední řadě děkuji své manželce a rodičům za značnou podporu během studia, bez které by tato práce nikdy nevznikla.

## Obsah

<b>OBSAH</b> .....	<b>7</b>
<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK</b> .....	<b>10</b>
<b>ÚVOD</b> .....	<b>11</b>
<b>1 BUDÍCÍ SYSTÉMY PRO SYNCHRONNÍ GENERÁTORY</b> .....	<b>12</b>
1.1 ZÁKLADNÍ TYPY BUDÍCÍCH SYSTÉMŮ .....	14
1.1.1 <i>Statické budící systémy</i> .....	15
1.1.2 <i>Budící systémy s AC budiči</i> .....	17
1.1.3 <i>Budící systémy s bezkroužkovými budiči</i> .....	19
1.1.4 <i>Budící systémy s DC budiči</i> .....	21
1.2 POŽADAVKY NA MODERNÍ BUDÍCÍ SYSTÉMY .....	23
1.2.1 <i>Vysoká provozní spolehlivost</i> .....	23
1.2.2 <i>Rychlá a kvalitní regulace</i> .....	24
1.2.3 <i>Spolehlivé odbuzení stroje</i> .....	25
1.2.4 <i>Funkce omezovačů</i> .....	25
1.2.5 <i>Další požadavky na budící soupravy</i> .....	26
1.3 POROVNÁNÍ UVEDENÝCH BUDÍCÍCH SYSTÉMŮ .....	27
<b>2 NASTAVENÍ REGULÁTORU BUZENÍ</b> .....	<b>28</b>
2.1 PARAMETRY GENERÁTORU BRUSH BDAX 9 - 450ERH .....	28
2.2 POŽADAVKY NA BUDÍCÍ SYSTÉM.....	29
2.3 NASTAVENÍ BUDÍCÍHO SYSTÉMU .....	29
2.3.1 <i>Automatické regulace napětí</i> .....	30
2.3.2 <i>Omezovač svorkového napětí generátoru</i> .....	31
2.3.3 <i>Omezovač přesycení</i> .....	31
2.3.4 <i>Omezovač rotorového proudu (ORP)</i> .....	32
2.3.5 <i>Omezovač statorového proudu (OSP)</i> .....	34
2.3.6 <i>Hlídač meze podbuzení (HMP)</i> .....	35
<b>3 ZKOUŠKY A OPTIMALIZACE BS PŘI UVÁDĚNÍ DO PROVOZU</b> .....	<b>37</b>
3.1 STATICKÉ TESTY I/O A KOMUNIKACÍ .....	37



3.2	ZKRATOVÉ ZKOUŠKY .....	38
3.3	ZKOUŠKY NAPRÁZDNO.....	41
3.3.1	<i>Základní zkoušky.....</i>	41
3.3.2	<i>Testování regulační smyčky budícího proudu .....</i>	42
3.3.3	<i>Testování napěťové regulační smyčky.....</i>	43
3.3.4	<i>Odezva na skokovou změnu žádané hodnoty napětí.....</i>	45
3.3.5	<i>Omezovač svorkového napětí.....</i>	47
3.3.6	<i>Omezovač přesycení.....</i>	49
3.4	FÁZOVÁNÍ .....	51
3.5	ZKOUŠKY NA VÝKONU.....	52
3.5.1	<i>Odezva na skokovou změnu žádané hodnoty napětí.....</i>	52
3.5.2	<i>Test beznárazového přechodu mezi redundantními kanály .....</i>	54
3.5.3	<i>Test omezovače rotorového proudu (ORP).....</i>	55
3.5.4	<i>Test omezovače statorového proudu (OSP).....</i>	56
3.5.5	<i>Test hlídače meze podbuzení (HMP).....</i>	57
3.5.6	<i>Ostatní zkoušky.....</i>	59
<b>4</b>	<b>OPTIMALIZACE REGULAČNÍ SMYČKY A PSS .....</b>	<b>60</b>
4.1	FREKVENČNÍ CHARAKTERISTIKA .....	60
4.1.1	<i>Měření frekvenční charakteristiky.....</i>	64
4.2	HLAVNÍ REGULAČNÍ SMYČKA .....	65
4.2.1	<i>Nastavení hlavní regulační smyčky.....</i>	66
4.3	RYCHLOST A STABILITA REGULACE .....	68
4.3.1	<i>Optimalizace hlavní regulační smyčky .....</i>	70
4.4	SYSTÉMOVÝ STABILIZÁTOR ČINNÉHO VÝKONU (PSS) .....	76
4.4.1	<i>Struktura a princip PSS2B.....</i>	78
4.4.2	<i>Kritéria a zkoušky pro nastavení PSS .....</i>	81
4.5	ZKOUŠKY A OPTIMALIZACE PSS2B.....	82
4.5.1	<i>PSS2B s původním nastavením.....</i>	84
4.5.2	<i>PSS2B s novým nastavením.....</i>	85
<b>5</b>	<b>ZHODNOCENÍ NAMĚŘENÝCH VÝSLEDKŮ .....</b>	<b>88</b>
5.1	ZHODNOCENÍ OPTIMALIZACE HLAVNÍ REGULAČNÍ SMYČKY .....	88
5.2	ZHODNOCENÍ OPTIMALIZACE A PROVOZNÍ NASTAVENÍ BUDÍCÍ SOUPRAVY .....	90

5.3 ZHODNOCENÍ NASTAVENÍ SYSTÉMOVÉHO STABILIZÁTORU .....	91
<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>93</b>
<b>SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ .....</b>	<b>1</b>
<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>3</b>
<b>SEZNAM GRAFŮ .....</b>	<b>4</b>
<b>SEZNAM TABULEK .....</b>	<b>5</b>
<b>SEZNAM PŘÍLOH .....</b>	<b>5</b>
<b>PŘÍLOHY .....</b>	<b>6</b>

## Seznam symbolů a zkratk

<i>AVR</i> .....	Automatic Voltage Regulator - Automatický napěťový regulátor
<i>PSS</i> .....	Power System Stabilizer - Systémový stabilizátor výkonu
<i>PMG</i> .....	Permanent Magnet Generator - Generátor s permanent. magnety
<i>CT</i> .....	Current Transformer - Proudový transformátor
<i>VT</i> .....	Voltage Transformer - Napěťový transformátor
<i>AC</i> .....	Alternating Current - Střídavý proud
<i>DC</i> .....	Direct Current - Stejnoseměrný proud
<i>ET</i> .....	Excitation transformer - Budicí transformátor
<i>BS</i> .....	Budicí soustava
<i>BT</i> .....	Blokový transformátor
<i>ORP</i> .....	Omezovač rotorového proudu
<i>OSP</i> .....	Omezovač statorového proudu
<i>HMP</i> .....	Hlídač meze podbuzení
<i>P</i> .....	Proporcionální regulace
<i>PI</i> .....	Proporcionálně - integrační regulace
<i>PID</i> .....	Proporcionálně - integračně - derivační regulace
$\beta$ .....	Zátěžný úhel generátoru (též označován $\delta$ )
$\cos\varphi$ [-] .....	Účinník
$1f, 3f$ .....	Počet fází
$I_{fe}$ .....	Budicí proud budiče
$I_t$ .....	Svorkový proud generátoru
$U_{fe}$ .....	Budicí napětí budiče
$U_t$ .....	Svorkové napětí generátoru

## Úvod

Tato diplomová práce se zabývá problematikou nastavování a testování budících souprav pro synchronní generátory. Cílem práce je přiblížit čtenáři základní postupy a metody, které se používají pro zkoušení a nastavování regulátorů budících souprav. Zkoušky a optimalizace nastavení jsou prakticky prováděny během testů při uvedení do provozu synchronního turbogenerátoru BRUSH BDAX 9 – 450 ERH.

Práce je rozdělena do pěti kapitol. První kapitola se zaměřuje na obecný popis a srovnání nejčastějších druhů budících systémů, jejich výhod, nevýhod a aplikací.

Druhá kapitola stručně shrnuje nastavení základních parametrů regulační smyčky budící soupravy s regulátory BRUSH PRISMIC A50 pro generátor *BRUSH BDAX 9 – 450 ERH*. Hlavním cílem této kapitoly je pochopení základních funkcí moderních regulátorů buzení a ve vybraných případech je zde objasněno nastavení jednotlivých regulačních bloků.

Ve třetí kapitole je popsán postup zkoušek, které jsem prováděl při uvedení výše zmíněné budící soupravy do provozu - konkrétně se jedná o statické a primární zkoušky. Jsou zde prezentovány zkoušky, které jsou nutné pro odzkoušení generátoru, buzení a částečně i elektrických ochran. Na základě těchto zkoušek je prováděno upřesnění nastavení regulátoru.

Čtvrtá kapitola se zabývá optimalizací nastavení hlavní napěťové smyčky a systémového stabilizátoru činného výkonu. Jsou zde uvedeny postupy a měření, které byly provedeny pro vylepšení vlastností regulátoru buzení. V neposlední řadě se zde zabývám zkouškami a měřeními pro optimalizaci parametrů systémového stabilizátoru činného výkonu (PSS), za účelem maximálního zvýšení jeho efektivity.

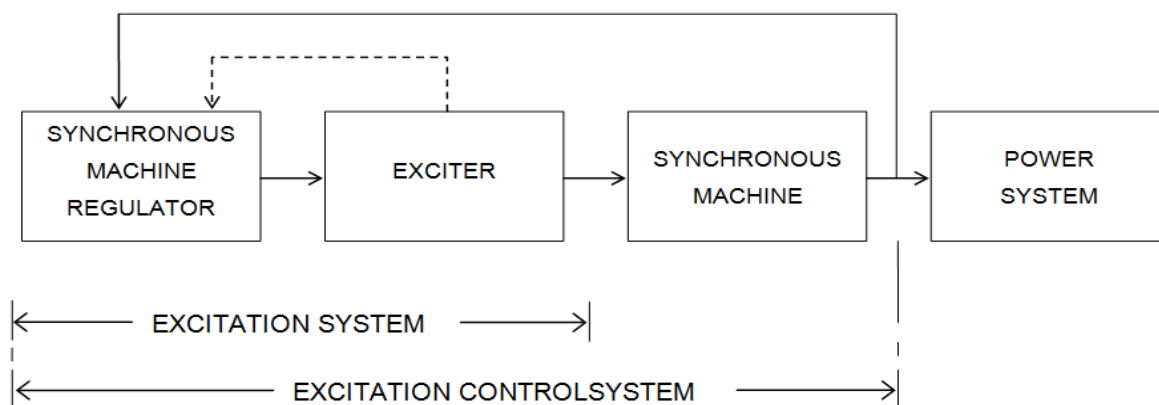
V poslední kapitole je uvedeno zhodnocení optimalizovaného nastavení regulátoru, kvality regulace a efektivity systémového stabilizátoru činného výkonu oproti výchozímu stavu. Toto zhodnocení je provedeno pomocí porovnání naměřených dat před a po optimalizaci.

# 1 Budící systémy pro synchronní generátory

Tato kapitola se zabývá obecným popisem a srovnáním nejčastějších druhů budících systémů, jejich výhod, nevýhod a aplikací. Jejím účelem je poskytnout čtenáři přehled o možnostech moderních budících systémů a zároveň uvést problematiku následujících kapitol. Tento teoretický rozbor vychází z praktických znalostí autora, ze znalostí načerpaných ze zdrojů [1], [2], [3], a hlavně z interního dokumentu firmy BRUSH SEM s.r.o. [10].

Z principu fungování synchronního stroje je zřejmé, že pro vytvoření napětí na svorkách stroje je nutné magnetické pole rotoru. Toto magnetické pole je tvořeno stejnosměrným proudem, který prochází hlavním rotorovým vinutím.

Primární funkcí budící soupravy (systému) je dodávat do budícího vinutí generátoru stejnosměrný budící proud a jeho velikostí regulovat napětí na svorkách generátoru při chodu na prázdko, popřípadě velikost napětí a jalového výkonu po připojení na elektrizační soustavu. Správná funkce budícího systému je naprosto nezbytná proto, aby mohla být předávána energie do elektrizační soustavy. Obecné schéma budícího systému je znázorněno na Obr. 1.



Obr. 1 - Blokové schéma základních prvků budícího systému [6]

<b>Synchronousmachineregulator</b>	= Regulátor budící soupravy (AVR)
<b>Exciter</b>	= Budič
<b>Excitationsystem</b>	= Budící souprava
<b>Synchronousmachine</b>	= Synchronní generátor
<b>PowerSystem</b>	= Elektrizační soustava

Dnešní moderní elektrárny s turbo a nebo hydro generátory, vyžadují od budících souprav mnohem více, než je samotné dodávání proudu do budícího vinutí. Velký důraz se klade na rychlost a stabilitu regulace, na bezporuchový provoz a jednoduchost obsluhy. Naprosto samozřejmá je dnes automatická napěťová regulace, která musí udržet konstantní napětí na svorkách generátoru při nejrůznějších situacích v elektrizační soustavě. Těmi mohou být zkraty na lince, připojení/spouštění elektrických strojů s velkým výkonem nebo přechod do režimu vlastní spotřeby elektrárny (odhození činného výkonu). Zmíněná možnost regulace napětí je jen pouhou špičkou ledovce. Budící systém musí být schopen pracovat i v dalších režimech, jako je například regulace jalového výkonu, účinníku, popřípadě v ruční regulaci.

Buzení v dnešní době neplní jen funkci regulační, ale i ochrannou - velmi důležitou funkcí jsou takzvané omezovače. Ty slouží k tomu, aby se stroj nedostal do nebezpečných stavů (například přepětí, přesycení, prokluz pólů nebo přehřátí statorového či rotorového vinutí). Tyto stavy mohou nastat buď chybou manipulací od operátora, anebo náhlou změnou v elektrizační soustavě. Omezovače musí být logicky nastaveny tak, aby měly přísnější parametry než elektrické ochrany generátoru. Jejich hlavním úkolem je pomocí zásahu do regulační smyčky udržet parametry stroje v bezpečných hodnotách.

Další neméně důležitou součástí budících souprav jsou návaznosti na řídicí systémy elektráren. Budící souprava musí mít dostatek tzv. „hard-wire“ logických i analogových vstupů a výstupů. Zároveň však musí být vybaveny možností sběrníkových komunikací, jako například MODBUS RTU, PROFIBUS nebo ETHERNET TCP/IP.

## 1.1 Základní typy budících systémů

Budící systémy lze rozdělit do dvou hlavních skupin. **Nezávislé budící systémy** jsou napájeny z výkonového zdroje, který je nezávislý na svorkovém napětí generátoru. Do této skupiny patří hlavně bezkroužkové systémy a systémy s budiči. Další možností, která se občas zařazuje mezi nezávislé budící systémy je systém napájený z nezávislé místní sítě.

Druhou skupinou jsou **závislé budící systémy**. Tyto systémy jsou napájeny ze svorek generátoru nebo ze sítě vlastní spotřeby přes výkonový snižovací transformátor a jsou nejčastěji reprezentované statickými budícími soupravami.

Každý z výše zmíněných systémů má svoje výhody, ale i nevýhody a proto nelze obecně určit, který systém je výhodnější. U závislých soustav bývá největší problém při vzniku blízkého  $3f$  zkratu. V důsledku tohoto zkratu dochází k poklesu napětí na svorkách generátoru, tím i k poklesu napětí na snižovacím (budícím) transformátoru a tudíž i k poklesu napájecího napětí výkonového měniče. Budící souprava pak musí být schopna správně pracovat i při tomto poruchovém stavu. Správnou funkcí se rozumí schopnost poskytnout stropní (maximální) buzení po dobu trvání zkratu a tím zabránit generátoru v prokluzu pólů a nesynchronním běhu. Z logiky věci tedy vyplývá, že čím bližší je zkrat, tím je větší pokles napájecího napětí výkonového měniče a tím větší problém poskytnout stropní buzení. U nezávislých systémů tento problém odpadá úplně. V praxi jsou zkraty odpojovány distančními ochranami přenosové soustavy ve velmi krátkém čase, takže nedochází k ohrožení stability generátoru samotným zkratem, ale až následným odpojením linky a s tím související ztrátou odběru výkonu.

Nevýhodami nezávislých systémů jsou pak hlavně vyšší pořizovací náklady a složitější údržba. Dalším výhodám a nevýhodám se budou detailněji věnovat následující kapitoly, kde jsou popsány základní typy budících souprav.

### 1.1.1 Statické budicí systémy

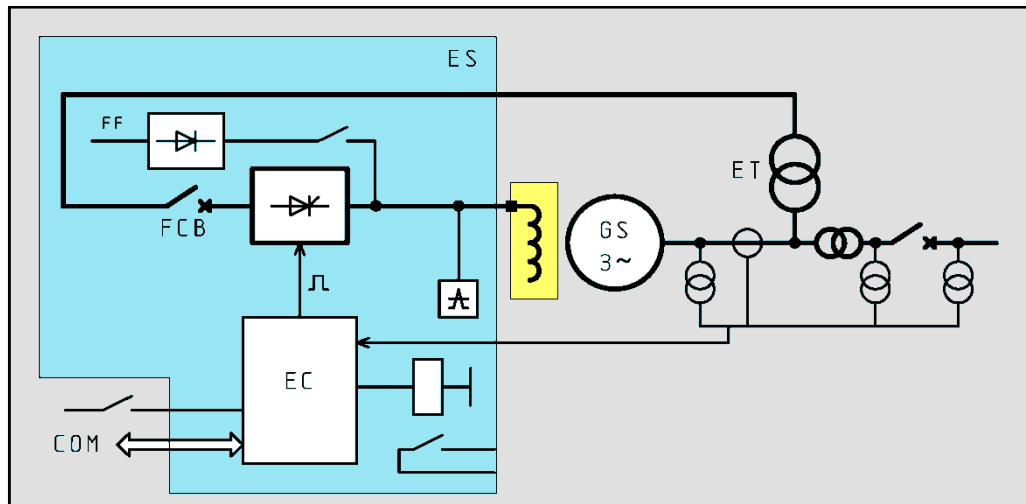
Tento typ budicího systému lze rozdělit na dvě základní podskupiny, a to **neřízené** a **řízené** statické BS. Tato práce se však bude věnovat pouze řízeným statickým soustavám, protože neřízené BS se již téměř nevyrábí a na moderních elektrárnách se vůbec nevyskytují.

Statické budicí systémy jsou nejčastěji napájeny ze svorek generátoru, přes třífázový výkonový transformátor (budicí transformátor). Jedná se tedy nejčastěji o *závislý budicí systém*. Výstup výkonové části budicí soupravy je veden přímo na hlavní budicí vinutí rotoru, pomocí sběracího ústrojí.

Statický BS je velmi univerzální typ budicí soupravy, který může být použit pro všechny typy synchronních generátorů. Mezi jeho největší výhody patří velmi rychlá odezva (v řádech desítek milisekund). Tato rychlost změny buzení může být natolik velká, že dojde k vytvoření oblasti umělé stability se zátěžným úhlem  $\beta$  o velikosti až  $120^\circ$ . Nejslabším místem tohoto systému bývá sběrací ústrojí, protože se jedná o mechanický prvek, který lze jen velmi těžko zálohovat. Navíc zde mohou vznikat problémy při nedostatečné údržbě - například kvůli obrusu uhlíkových kartáčů dochází k usazování vodivého uhlíkového prachu na rotoru a v krajních případech může dojít i ke zkratu na rotorovém vinutí a následné odstávce stroje. Dalším problémem sběracího ústrojí bývá nesouměrné rozložení proudu uhlíkovými kartáči. Nové, nebo ne přesně vyprofilované kartáče nedoléhají přesně na rotor a tím dochází k přetěžování a degradaci některých uhlíků.

Jak již bylo zmíněno, jedná se o závislý budicí systém, a proto musí být dimenzován tak, aby byl schopen zvládnout velký pokles napětí při třífázovém zkratu v blízkosti elektrárny, jak je popsáno v kapitole 1.1. V případě propojených sítí může být tento budicí systém napájen například ze spouštěcí linky elektrárny, což mu poskytuje nezávislý charakter. Stropní budicí napětí odpovídá plnému kladnému výstupnímu napětí výkonového měniče. Poměr stropní a jmenovité hodnoty budicího napětí se v praxi volí 1,6 pro nezávislé systémy a 2 pro závislé systémy. Doba stropního buzení je obvykle specifikována jako 10 nebo 20 s. Blokované schéma řízené statické soustavy je uvedeno na Obr. 2 - Blokované schéma statické BS





Obr. 2 - Blokové schéma statické BS [10]

### Vysvětlivky:

<b>Žluté pole</b>	Rotující části
<b>Modré pole</b>	Budící souprava
<b>GS</b>	Synchronní generátor
<b>COM</b>	Komunikační linka
<b>EC</b>	Kontrolér buzení

**ET** = Budící transformátor - Moderní statické budící systémy bývají napájeny přes výkonové třífázové transformátory, které jsou obvykle v zapojení hvězda-trojúhelník, nejčastěji v suchém provedení, zalité do pryskyřice.

**FF** = Obvod počátečního nabuzení – Tento obvod se využívá při startu budící soupravy, když je na svorkách generátoru pouze napětí z remanentního magnetismu rotoru (cca 2-5 %  $U_n$ ). Toto zbytkové napětí není dostatečné pro nabuzení generátoru. Účelem tohoto obvodu je při startu budící soupravy připojit na budící vinutí proud z nezávislého zdroje (např. ze staniční baterie elektrárny). To zajistí počáteční nabuzení generátoru na přibližně 15 % jmenovitého napětí, které je již dostatečné pro tyristorový můstek k převzetí kontroly a nabuzení na nominální napětí generátoru.

**FCB** = Odbuzovač generátoru - Používá se k odbuzení generátoru, kde odpojuje budící vinutí od napájecího zdroje. Dalším úkolem odbuzovače může být spotřebovat magnetickou energii nakumulovanou v rotoru. Odbuzovač statických budících

souprav musí být schopen odepnout velké proudy (až tisíce ampér) a proto bývá jednou z nejdražších částí budící soupravy.

Výkonový měnič je většinou složený z tyristorových modulů, zapojený jako plně řízený třífázový tyristorový můstkový usměrňovač. Pro menší výkony (do stovek ampér) pak mohou být použity kompaktní měniče. Měniče jsou často doplněny chlazením (aktivní chlazení - ventilátory, pasivní chlazení - využití komínového efektu), zapalovacími obvody pro tyristory, rychlými pojistkami a teplotními čidly.

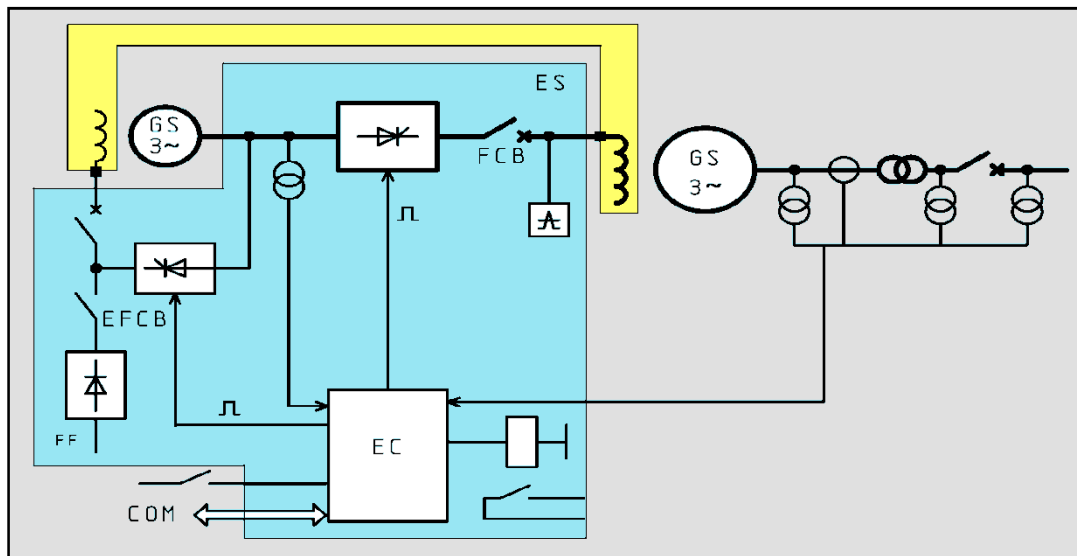
Dalšími součástmi statické budící soupravy mohou být přepětové ochrany. Stejnoseměrná přepětová ochrana chrání budící systém a rotor generátoru proti přepětí, které vzniká při odbuzování generátoru a je realizována pomocí vybíjecího nelineárního odporu, který se dočasně připojuje na výstupní svorky budící soupravy. Střídavá přepětová ochrana pak omezuje komutační špičky a zároveň chrání budící soupravu před přepětím ze strany budícího transformátoru.

### 1.1.2 Budící systémy s AC budiči

Tento budící systém je napájený ze střídavého budiče, který je přímo spojen s rotorem generátoru. Jedná se o nezávislý budící systém, který musí obsahovat dvě řídicí a dvě výkonové části (sekce buzení generátoru a sekce buzení budiče). Sekce buzení generátoru je velmi podobná statickému systému (viz kapitola 1.1.1). Střídavý budič lze použít v aplikacích pro turbogenerátory i hydrogenerátory libovolných velikostí, ale z ekonomických důvodů se většinou používá pouze u strojů s velkými výkony.

Budící systém s AC budičem spojuje dvě klíčové vlastnosti: Vysokou regulační rychlost a schopnost poskytovat stropní buzení při zkratu na vývodech generátoru. Střídavé budiče v moderních budících systémech jsou třífázové synchronní generátory, které se regulují na konstantní statorové napětí. Toto napětí je navrženo tak, aby vyhovovalo požadavkům na stropní buzení. Počet pólů AC budiče bývá shodný s počtem pólů generátoru, tím pádem je i jeho frekvence shodná s frekvencí generátoru. Budič také bývá vybaven předdimenzovaným rotorovým tlumičem, který slouží k omezení vyšších harmonických.

Pro start buzení je podobně jako u statických systémů nutný obvod počátečního nabuzení, který neslouží k nabuzení hlavního vinutí generátoru jako v případě statického systému, ale k počátečnímu nabuzení budiče. Poté, co budič dosáhne nominálního napětí, může být spuštěn hlavní budící obvod. Blokové schéma budícího systému se střídavým budičem je znázorněno na Obr. 3.



Obr. 3 - Blokové schéma budící soupravy se střídavým budičem [10]

#### Vysvětlivky:

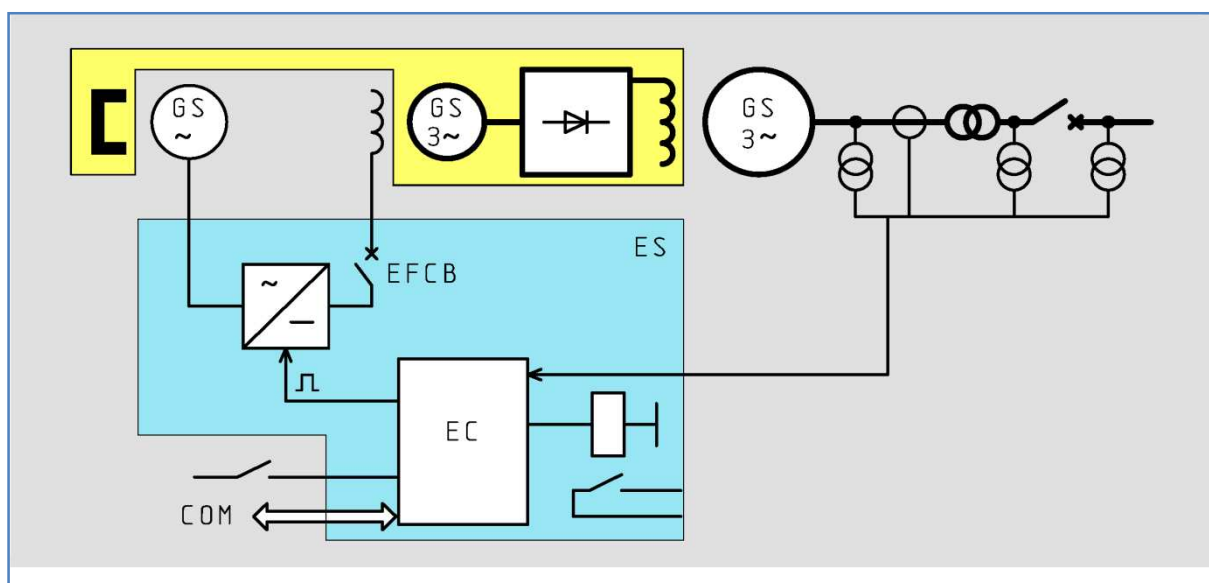
<b>Žluté pole</b>	Rotující části
<b>Modré pole</b>	Budící souprava
<b>GS</b>	Synchronní generátor (Zleva doprava: AC budič, Hlavní generátor)
<b>COM</b>	Komunikační linka
<b>EC</b>	Kontrolér buzení
<b>FCB</b>	Odbuzovač generátoru
<b>EFCB</b>	Odbuzovač budiče
<b>FF</b>	Počáteční nabuzení

Mezi největší nevýhody tohoto zapojení patří zvýšené požadavky na údržbu - oproti statickému systému neobsahuje jen jedno, ale dvě sběrací ústrojí. Nevýhody sběracích ústrojí již byly zmíněny. Další nevýhodou tohoto systému je jeho vysoká pořizovací cena. Je nutné si uvědomit, že na rozdíl od statické budící soupravy, kde stačí pořídit pouze budící transformátor, se zde musí přidat na hřídel turbo-ústrojí další „generátor“, který je oproti transformátoru nesrovnatelně dražší. Další náklady vznikají na samotné budící soupravě, kde se musí řešit buzení dvou synchronních generátorů najednou.

### 1.1.3 Budicí systémy s bezkroužkovými budiči

Tento typ budících souprav je velmi populární, protože přináší výrazné zjednodušení údržby díky odstranění sběracího ústrojí. Sběrací ústrojí se používá jen ojediněle, a to pro měření budícího napětí, popřípadě k připojení diagnostiky zemní ochrany rotoru. Další nespornou výhodou tohoto systému je, že k regulaci stačí přibližně 100 - 200 krát menší budící proud oproti statickým nebo střídavým budícím soustavám, neboť se reguluje pouze budící proud do budiče. Tím pádem může být rozvaděč buzení umístěn poměrně daleko od samotného generátoru a navíc má několikanásobně menší rozměry oproti přímým budícím soupravám. Jednou z jeho hlavních výhod je, že díky nižším proudům bývá vybaven menšími, většinou kompaktními měniči a tudíž je výrazně levnější, oproti většině budících systémů.

Jako zdroj pro budící soupravu slouží většinou pilotní generátor s permanentními magnety - PMG (nebo také Permanent Magnet Generator), který je umístěn na hřídeli stroje. PMG může být v 1f nebo 3f provedení. Permanentní magnety jsou umístěny na rotoru stroje, do cívek statoru se indukují napětí. V závislosti na počtu pól párů a rychlosti stroje bývá toto napětí 150 – 400 V a frekvence 150 - 450 Hz. Toto napětí je přivedeno do řízeného tyristorového, popřípadě IGBT měniče, kde je usměrněno a regulováno. Regulovaný stejnosměrný výstup se přivádí na budící vinutí budiče. Samotný bezkroužkový budič je třífázový synchronní generátor se stacionárním buzením a rotující kotvou. Rotující vinutí kotvy je přímo připojeno k rotujícímu neřízenému diodovému usměrňovači. Použité diody musí být odolné proti vysokým odstředivým silám a odvod tepla je zajištěn chladiči na diodách a axiálním ventilátorem v generátoru. Obvykle jsou používány diody na vyšší proud a minimální počet paralelních větví. Blokované schéma buzení s bezkroužkovým budičem je uvedeno na Obr. 4.



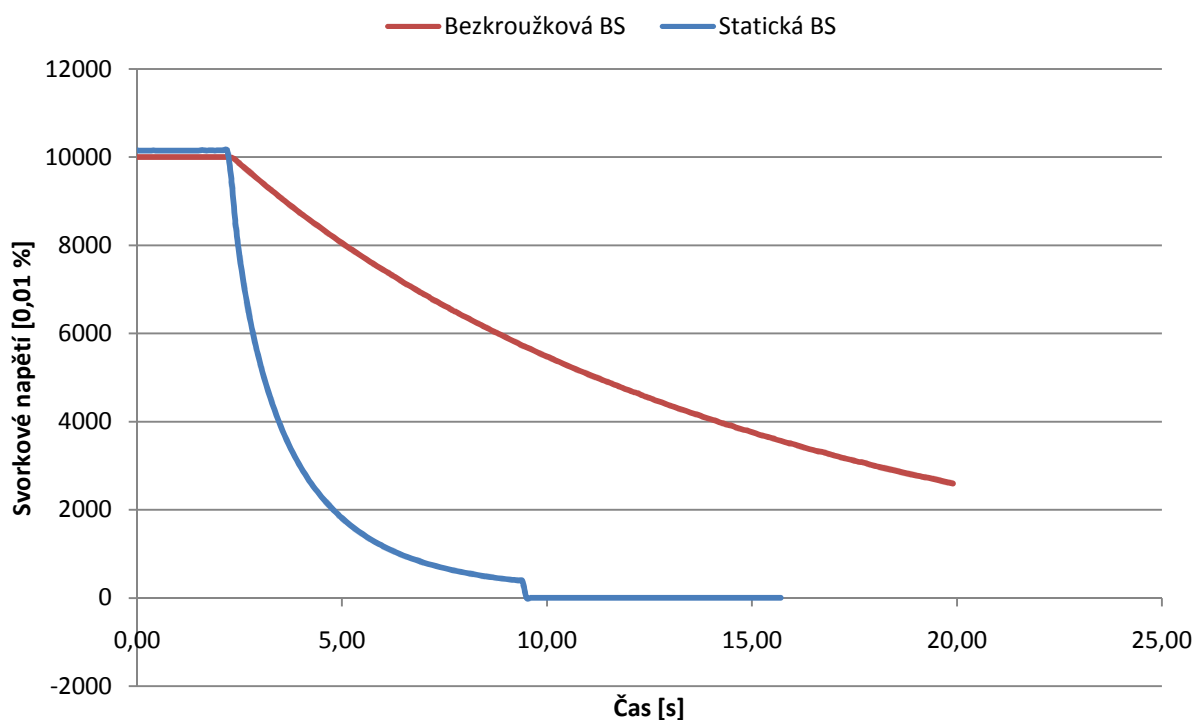
Obr. 4 - Blokové schéma systému s bezkroužkovým budičem [10]

#### Vysvětlivky:

<b>Žluté pole</b>	Rotující části
<b>Modré pole</b>	Budící souprava
<b>GS</b>	Synchronní generátory (Zleva: PMG, Bezkrůžkový budič, Generátor)
<b>COM</b>	Komunikační linka
<b>EC</b>	Kontrolér buzení
<b>EFCB</b>	Odbuzovač budiče

Buzení prostřednictvím bezkroužkového budiče na hřídeli se používá u turbogenerátorů široké řady výkonů a zároveň u hydrogenerátorů malých a středních výkonů. Nevýhodou těchto budících systémů je hlavně delší doba odezvy. Ta je způsobena tím, že se k časové konstantě hlavního budícího vinutí generátoru přičítá ještě časová konstanta budiče. Kvůli tomuto zpomalení nejsou schopny generátory vybavené tímto budícím systémem reagovat na skokové změny tak rychle, jako statické systémy, což přináší mnohé komplikace hlavně při nastavování systémových stabilizátorů činného výkonu (PSS). Další nezanedbatelnou nevýhodou je i pomalé odbuzení stroje, které trvá až několik desítek sekund (statické systémy zvládnou stroj odbudit v řádech sekund). Toto je dáno tím, že energii v hlavním vinutí rotoru není možné umožnit připojením odbuzovacího odporu, a generátor nelze odbudit ani pomocí invertorového chodu měniče. Rozdíl v rychlosti odbuzení statické a bezkartáčové soustavy na základě vlastních naměřených dat je zobrazen na Obr. 5.

## Rychlost odbuzení stroje invertorovým chodem usměrňovače



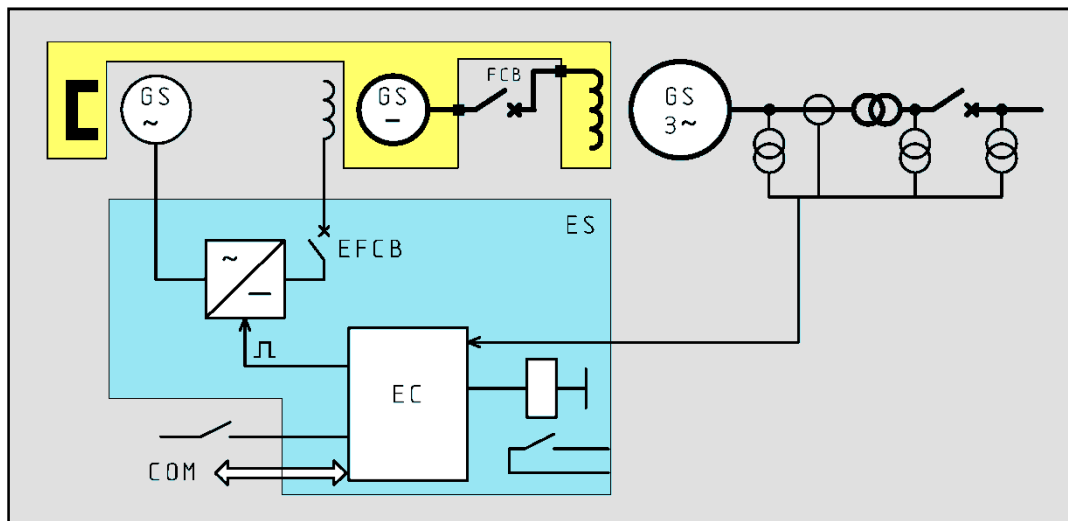
Obr. 5 - Rychlost odbuzení bezkrůžkové a statické budící soustavy

### 1.1.4 Budící systémy s DC budiči

Tento typ budících systémů se již u nových generátorů téměř nepoužívá. Největší nevýhody těchto systémů jsou nepříznivé pořizovací a provozní náklady a zároveň i velké požadavky na údržbu. Nicméně v padesátých a šedesátých letech minulého století to byl pro svou jednoduchost jeden z nejpoužívanějších systémů. Mnoho těchto budících systémů je nyní stále v provozu a na konci své životnosti, a proto bývají často nahrazovány statickými systémy nebo systémy se střídavým budičem. Příklad zapojení budícího systému se stejnosměrným budičem je znázorněn na Obr. 6.

*Stejnoseměrný budič může být spojen s generátorem buď přímo anebo přes převodovku. U turboalternátorů menších výkonů nebo u hydroalternátorů, které mají nižší otáčky, se používá stejnosměrný budič s komutátorem. Přenos budícího proudu do rotoru alternátoru se provádí pomocí sběracího ústrojí. V mnoha případech*

se používá pomocného budiče umístěného na hřídeli alternátoru pro buzení budiče. Regulace napětí se provádí prostřednictvím odporu v obvodu vinutí magnetů hlavního budiče.[1]



Obr. 6 - Blokové schéma budicího systému se stejnosměrným budičem [10]

#### Vysvětlivky:

<b>Žluté pole</b>	Rotující části
<b>Modré pole</b>	Budící souprava
<b>GS</b>	Generátor (Zleva: PMG, Stejnosměrný budič, Generátor)
<b>FCB</b>	Odbuzovač generátoru
<b>COM</b>	Komunikační linka
<b>EC</b>	Kontrolér buzení
<b>EFCB</b>	Odbuzovač budiče

Budicí systém se stejnosměrným budičem byl určen hlavně pro buzení malých a středně velkých výkonů, protože SS stroje jsou výkonově omezeny. Další nevýhodou oproti statickým soustavám je, že se kvůli časové konstantě stejnosměrného budiče přidává do regulační smyčky zpoždění až 0,25 s. Pravděpodobně největším problémem bývá velmi obtížná a nákladná údržba komutátoru.

Nejčastěji dochází k nahrazování DC budících souprav buzeními statickými, kde se po nainstalování nového systému přivádí budicí proud přes sběrací ústrojí, které se na stroji nachází již z výroby.

## 1.2 Požadavky na moderní budicí systémy

Jak bylo nastíněno v úvodu této práce, na moderní budicí systémy je kladeno mnoho požadavků. Ty nejdůležitější budou přiblíženy v následující podkapitole.

### 1.2.1 Vysoká provozní spolehlivost

Toto je jeden z nejdůležitějších parametrů u budicích souprav. Je nutné si uvědomit, že v případě poruchy budicí soupravy dojde v lepším případě k odstavení stroje elektrickými ochranami a tím finančním ztrátám při výpadku výroby elektrické energie. V horším případě pak může dojít i k poškození samotného generátoru. Obecně by mělo platit, že spolehlivost budicí soupravy by měla být vyšší než spolehlivost samotného generátoru.

Větší spolehlivosti se v praxi dosahuje díky zálohování neboli **redundanci**. Redundantní (dvou, případně i více kanálové) systémy se používají hlavně tam, kde v případě výpadku hrozí velké ekonomické škody nebo ohrožení lidských životů. Redundance může být částečná, kde se zálohuje se pouze řídicí nebo výkonová část. Častější bývá ovšem redundance úplná, kde se provádí záloha řídicí i výkonové části. Takováto zálohovaný systém se většinou skládá ze dvou regulátorů a dvou výkonových měničů. Pro redundantní systémy se často v elektrárnách zálohují i měřicí transformátory napětí a proudu. V případě kritické chyby v jednom z měničů / regulátorů dojde automaticky k převzetí regulace druhým kontrolérem. To s sebou však přináší komplikace a tím i další požadavky, jako je například **beznárazový přechod mezi dvěma redundantními kontroléry** (při přechodu z jednoho kontroléru na druhý se nesmí změnit hodnota svorkového napětí / jalového výkonu).

Díky redundanci může budicí souprava při menších poruchách pokračovat v normálním provozu víceméně bez omezení. U menších generátorů nebo u generátorů, kde není vyžadována nejvyšší provozní spolehlivost, pak při menších problémech proběhne přepnutí na ruční řízení.

Jak již bylo nastíněno, různé stupně redundance se aplikují i při návrhu tyristorového usměrňovače. Často se používá druhý výkonový můstek, takže i při jednom odepnutém můstku souprava může pokračovat v provozu bez omezení.

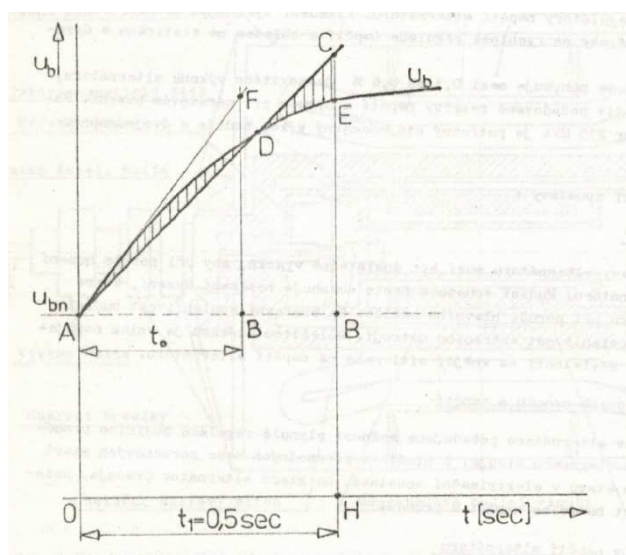


Ve speciálních případech při použití redundance na výkonové části lze dokonce vyměnit vadný tyristorový modul za provozu. Je nutné poznamenat, že takováto opatření se provádějí přesto, že poruchy jsou vzhledem k vysoké spolehlivosti součástek krajně nepravděpodobné.

## 1.2.2 Rychlá a kvalitní regulace

Kvalita, rychlost a stabilita regulace patří mezi základní požadavky, které se na dnešní regulátory kladou s velkým důrazem. Základem je automatická napěťová regulace, jejíž hlavní účel byl již popsán. Regulace musí být za všech okolností rychlá, ale zároveň nesmí docházet k rozkmitání výstupu regulátoru při velkých změnách.

*„Pro normální provozní stav regulátoru požadujeme možnost plynulé regulace budícího proudu v mezích daných provozním diagramem stroje. Všeobecným požadavkem provozu ES je možnost rychlého růstu napětí alternátoru, které je podmíněno rychlým růstem budícího proudu a dále pak rychlou činností regulátoru buzení. Rychlost růstu budícího napětí je charakterizováno střední rychlostí této změny, za prvních 0,5 s. Změna budícího napětí se vyjadřuje v poměrných jednotkách.“ [1]*



Obr. 7 - Charakteristika  $U_b = f(t)$  [1]

Přesnost regulace svorkového napětí současných regulátorů se udává mezi 0,1 % až 0,5 %. Základní předpoklad pro kvalitní regulaci je přesnost měření statorových veličin, a to při 3f nebo 1f měření.

### 1.2.3 Spolehlivé odbuzení stroje

Budící souprava musí být schopna odbudit stroj jak během normálního provozu (provozní odstavení), tak i v případě poruchového stavu. V případě BS se střídavým budičem musí dojít k odbuzení budiče i generátoru. V případě bezkroužkových budících systémů dochází pouze k odbuzení budiče – přímé odbuzení hlavního budícího vinutí není možné.

Provozním odbuzením se rozumí odbuzení na příkaz operátora nebo při způsobení „pomalých elektrických ochran“ pro provozní odstavení. Toto odstavení se nejčastěji provádí invertorovým chodem měniče. K poruchovému odbuzení dochází při působení „rychlých elektrických ochran“, popřípadě po aktivaci nouzového odstavení operátorem. Za těchto okolností pak dochází k odbuzení pomocí odbuzovače.

Odbuzovač musí být navržen tak, aby byl za všech okolností schopen odpojit budící proud stroje. Zároveň doba, za kterou zanikne magnetické pole rotoru, musí být co nejmenší. Existují různé konfigurace uspořádání odbuzovače, například střídavý vypínač na vstupní straně výkonového měniče či stejnosměrný vypínač na jeho výstupu. Odbuzovač by měl mít více vypínacích cívek, které budou umožňovat vypnutí z různých systémů.

### 1.2.4 Funkce omezovačů

Jak již bylo zmíněno v úvodní kapitole, dnešní budící systémy neplní jen funkci regulační, ale i ochrannou - zásadní funkcí jsou právě omezovače. Ty slouží k tomu, aby se stroj nedostal do nebezpečných stavů.

Provozní diagram generátoru (viz Příloha 2) se skládá ze tří hlavních úseků, které vyjadřují různé fyzikální příčiny omezení. Když vyjdeme z čistě jalového zatížení v přebuzeném stavu (pravá strana diagramu), pak první úsek omezovací křivky je dán maximálním trvale přípustným budícím proudem. Prostřední úsek ve tvaru kruhové úseče se středem v nulovém bodě představuje omezení maximálním trvalým statorovým proudem. Úsek na levé straně, obsahující zakřivenou a lomenou čáru, udává mez podbuzení, která je určena maximálním dovoleným oteplením v čelním prostoru statoru a podmínkou stability generátoru.

**Druhy omezovačů:**

- Omezovač statorového proudu
- Omezovač budicího proudu
- Hlídač meze podbuzení
- Omezovač přesycení (U/f)
- Omezovač svorkového napětí

**1.2.5 Další požadavky na budící soupravy**

- Monitorování systému pomocí záznamu dat
- Možnost komunikace s nadřazenými systémy
- Systémový stabilizátor pro tlumení kyvů činného výkonu
- Stejnoseměrná přepětová ochrana
- Střídavá přepětová ochrana
- Integrace zemní ochrany rotoru
- Diagnostika rotujícího usměřovače
- Funkce srovnávače napětí
- Integrace plnohodnotného fázovače
- Práce v extrémních podmínkách (teplo, chlad, H<sub>2</sub>S...)
- Splnění norem - směrnice CE a norma CSA US
- Ostatní specifické požadavky

### 1.3 Porovnání uvedených budících systémů

Při srovnání budících souprav nelze jednoznačně určit, která je nejvýhodnější. Vhodnost jejich aplikace se určuje hlavně na základě požadavků a podmínek v daném prostředí. Výhody a nevýhody jednotlivých systémů na základě teoretického rozboru v první kapitole byly stručně shrnuty v Tabulka 1.

Tabulka 1 - Srovnání základních typů budících souprav

Kritérium	Typ budícího systému			
	Statický	Bezokružkový	S AC budičem	S DC budičem
Rychlost regulace	++	-	++	-
Rychlost odbuzení	++	--	++	+
Účinnost PSS	++	-	++	-
Spolehlivost	+	++	+	-
Možnost buzení při blízkém zkratu	--	+	++	+
Údržba	+	++	-	---
Cena budící soupravy	-	++	--	+
Cena generátoru	++	+	--	--
Použití*	do 500MW*	do 300 MW*	nad 250 MW*	do 150MW

\*jedná se o nejčastější použití, konstrukčně není problém vytvořit menší nebo větší BS

## 2 Nastavení regulátoru buzení

Automatické regulátory napětí (AVR) zaznamenaly v průběhu posledních let velké změny. Z dříve používaných mechanicko-reléových systémů velkých rozměrů se s nástupem éry výpočetní techniky začátkem devadesátých let začaly stávat kompaktní mikroprocesorové kontroléry. Ty oproti svým předchůdcům mají několikanásobně menší rozměry a zároveň jsou výrazně spolehlivější, protože neobsahují mechanické prvky, u kterých by docházelo k opotřebením. Tento technologický pokrok má ale i další důsledky. Jak již bylo zmíněno v kapitole 1.2, regulace napětí je pouze jednou z funkcí moderních budících systémů, do kterých je nyní začleněno mnoho dalších funkcí, jako jsou omezovače a ochranná zařízení, stabilizace, záznamové a diagnostické funkce. Výsledným produktem je “**kontrolér buzení**” nahrazující v dřívější terminologii “**regulátor napětí**”.

Tato kapitola stručně shrnuje požadavky na BS a nastavení základních parametrů regulační smyčky budící soupravy *BRUSH PRISMIC A50-B1.2C* pro generátor *BRUSH BDAX 9 – 450 ERH*, použitý na novém bloku K7 Kladenské elektrárny společnosti Alpiq. Hlavním cílem této kapitoly je pochopení základních funkcí moderních regulátorů buzení. Tato kapitola vychází z praktických znalostí a zkušeností autora a opírá se o manuál kontroléru buzení PRISMIC A50 společnosti BRUSH SEM s.r.o.[11]. Ve vybraných případech je zde objasněno nastavení jednotlivých regulačních bloků.

### 2.1 Parametry generátoru BRUSH BDAX 9 - 450ERH

V první řadě je pro správné zvolení budícího systému a následného nastavení regulátoru potřeba znát parametry samotného generátoru dalších součástí, jako jsou budič, PMG nebo měřící transformátory napětí (VT) a proudu (CT).

Generátor BRUSH BDAX 9 - 450 ERH je dvoupólový turboalternátor o výkonu 168,75 MVA, s bezkroužkovým budičem a pilotním generátorem s permanentními magnety (PMG) na hřídeli. Katalogový list generátoru [17] je k dispozici na samostatném CD nosiči, který tvoří elektronickou přílohu diplomové práce. Nejdůležitější parametry stroje shrnuje **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.Příloha 1 – Parametry generátoru, budiče, PMG a měřících transformátorů.**

## 2.2 Požadavky na budicí systém

Z parametrů generátoru jasně vyplývá, že pro tento stroj musí být použita bezkroužková budicí souprava. Ta musí být vybavena řízenými usměrňovači, které budou schopny trvale dodávat nominální budicí proud a napětí budiče - 8,7 A / 67 V. Budicí souprava musí mít možnost krátkodobě dosáhnout stropního buzení, které je minimálně 1,5 násobek jmenovitých hodnot.

Vzhledem k velikosti stroje byla požadována kompletní redundance výkonové i řídicí části. Požadavek plné redundance byl i na komunikaci s řídicím systémem ABB pomocí dvou nezávislých linek PROFIBUS.

Další požadavky, jako například kompletní redundance a spolehlivý provoz, víceméně vychází ze standardních požadavků, které byly uvedeny v podkapitole 1.2.

## 2.3 Nastavení budicího systému

Obecné nastavení budicího systému a regulátoru je velice komplexní úkol. Musí se brát v potaz typ použitého budicího systému, typ stroje, požadavky zákazníka a mnohé další parametry. Tato diplomová práce se primárně zaměřuje na nastavení prvků, které zasahují do samotné regulační smyčky. Témata jako problematika nastavení jednotlivých parametrů regulátoru, popřípadě principy měření nebo logika regulátoru jsou tak rozsáhlá, že by jistě vydali na další práci ve stanoveném rozsahu. Následující seznam uvádí příklady různých problematik, které je nutné řešit při návrhu a nastavení budicí soupravy.

### **Konfigurace budicí soupravy:**

- Výpočet výkonových měničů
- Volba odbuzovače
- Nastavení AC ochran
- Nastavení DC ochran
- Primární napájecí systém
- Záložní napájecí systém
- Chlazení

### **Obecné nastavení regulátoru:**

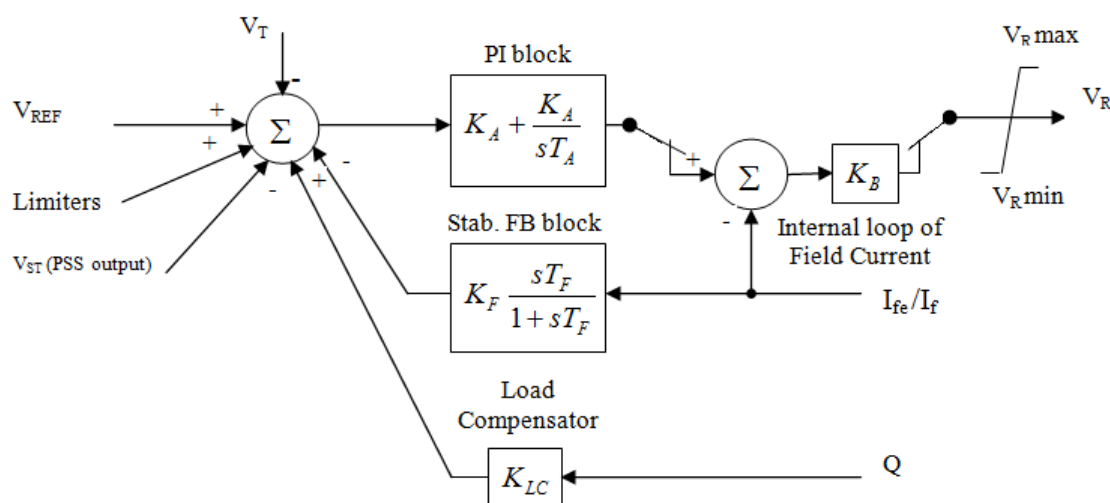
- Nastavení jmenovitých hodnot
- Výpočet stropního buzení
- Stanovení funkcí pro log. automat (Start, Stop logika, blokace...)
- Nastavení analogových výstupů
- Měření - přesnost, cejchování
- Nastavení diagnostických funkcí
- Záznam dat a komunikace

### 2.3.1 Automatické regulace napětí

Automatický regulátor napětí byl pro tento projekt realizován v softwaru kontroléru jako PI regulátor. PI regulace má za ustáleného stavu nulovou odchylku žádané hodnoty a skutečné hodnoty napětí, která je zpětnovazebně přivedena do sumačního bodu. Regulační odchylka smyčky regulace napětí je dána rozdílem mezi žádanou hodnotou napětí a skutečnou hodnotou svorkového napětí generátoru. Dále je pak korigována signály všech omezovačů, signálem od systémového stabilizátoru a kompenzací úbytku napětí na blokovém transformátoru, který je způsobený průchodem jalového proudu – takzvaná funkce „statiky“. Výsledný signál je veden na vstup PI regulátoru s přenosovou funkcí:

$$K_A + \frac{1}{s \cdot T_A} \quad (2.1)$$

Ve své podstatě je regulátor napětí kaskádní spojení PI regulátoru napětí a proporcionálního regulátoru proudu, doplněný stabilizační zpětnou vazbou od budícího proudu budiče. Základní (zjednodušené) schéma napěťového regulátoru je zobrazeno na Obr. 8.

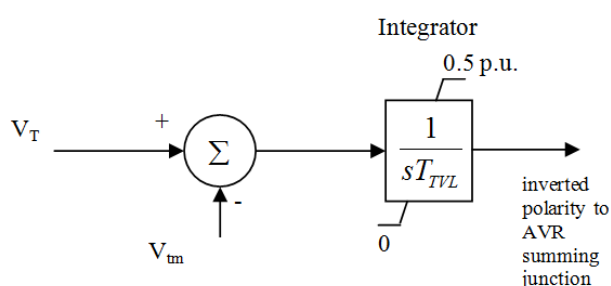


Obr. 8 - Základní schéma napěťového regulátoru [11]

Podrobnější popis regulační smyčky, model AC7B, principy nastavování PI regulátoru, faktory ovlivňující rychlost a stabilitu, popřípadě postupy optimalizace nastavení budou podrobně popsány v kapitole 4.

### 2.3.2 Omezovač svorkového napětí generátoru

Tento omezovač slouží k ochraně generátoru před nebezpečným přepětím. Pokud dojde k překročení trvalého dovoleného napětí statoru ( $U_t > U_{tmax}$ ), omezovač okamžitě (bez časového zpoždění) zasáhne do hlavní regulační smyčky a udržuje v ustáleném stavu  $U_t = U_{tmax}$ , a to i v případě, že se nadále zvyšuje žádaná hodnota napětí generátoru. Tento omezovač je proveden jako integrální regulátor, který je blokově zobrazen na Obr. 9. Obr. 9 - Blokové schéma omezovače  $U_t$ . Veličina  $V_{tm}$  je nastavená hodnota limitu svorkového napětí generátoru,  $V_T$  je měřená hodnota svorkového napětí a  $T_{TVL}$  je integrační časová konstanta.



Obr. 9 - Blokové schéma omezovače  $U_t$  [11]

#### Nastavení parametrů:

$$V_{tm} = 105 [\%U_{tn}]$$

$$T_{TVL} = 500 \text{ ms}$$

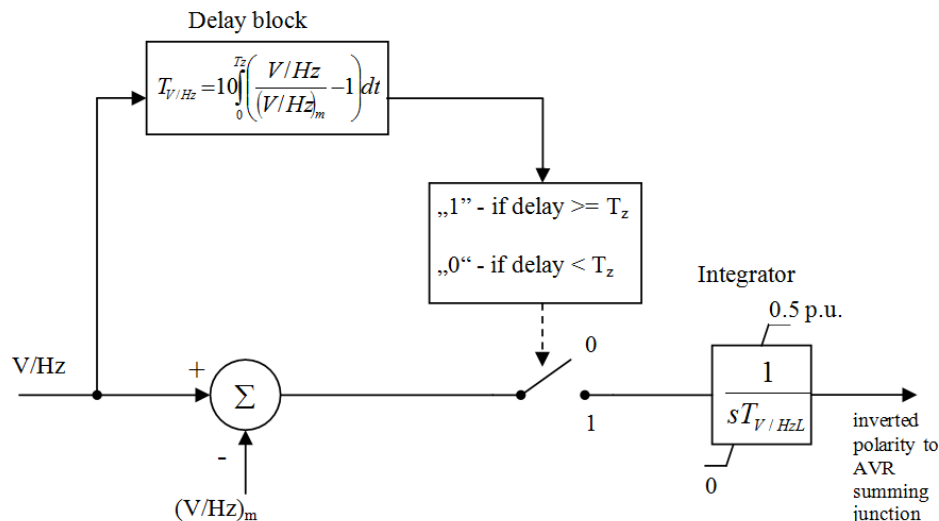
### 2.3.3 Omezovač přesycení

Omezovač přesycení neboli omezovač poměru napětí ku frekvenci ( $U/f$ ) chrání generátor, případně i blokový transformátor, před přesycením magnetického obvodu. To pak způsobuje přehřátí jádra stroje nebo transformátoru. Protože hlavní nebezpečí přesycení stroje spočívá v tepelném namáhání, je tento omezovač proveden jako integrální regulátor s časovým zpožděním zásahu. Časové zpoždění zásahu je závislé na míře překročení limitního poměru  $U/f$ . Generované zpoždění zajistí, že při krátkodobém překročení dovoleného poměru  $U/f$  nedojde k ovlivnění primární regulační smyčky.

Princip funkce omezovače přesycení je prezentován na Obr. 10. Pokud je překročena nastavená limitní hodnota poměru  $U/f$  a uplyne zpoždění  $T_z$ , omezovač zasáhne do hlavní regulační smyčky a sníží buzení generátoru tak, že navrátí poměr  $U/f$  na zadanou hodnotu. Časové zpoždění  $T_z$  udává zpoždění zásahu omezovače,



pokud byl limit  $U/f$  překročen o 10 %. Pro chladnutí je definován koeficient zpětného časování, který vychází z času zpoždění a respektuje rozdílné časy při chladnutí a ohřevu jádra stroje. Poměr  $U/f$  je vhodné nastavit tak, aby byl při nominální frekvenci nad omezovačem svorkového napětí. Tím pádem nebude docházet k zásahu od obou omezovačů najednou.



Obr. 10 - Blokové schéma omezovače přesycení ( $U/f$ ) [11]

### Nastavení parametrů:

Protože se teplota jádra nemůže měnit skokově, není nutné, aby omezovač reguloval s vysokou rychlostí jako omezovač svorkového napětí. Proto v praxi volíme delší integrační časy.

$$V/Hz = 105,1 \text{ [\%} U_{tn}/f_n \text{]}$$

$$T_z = 10 \text{ s}$$

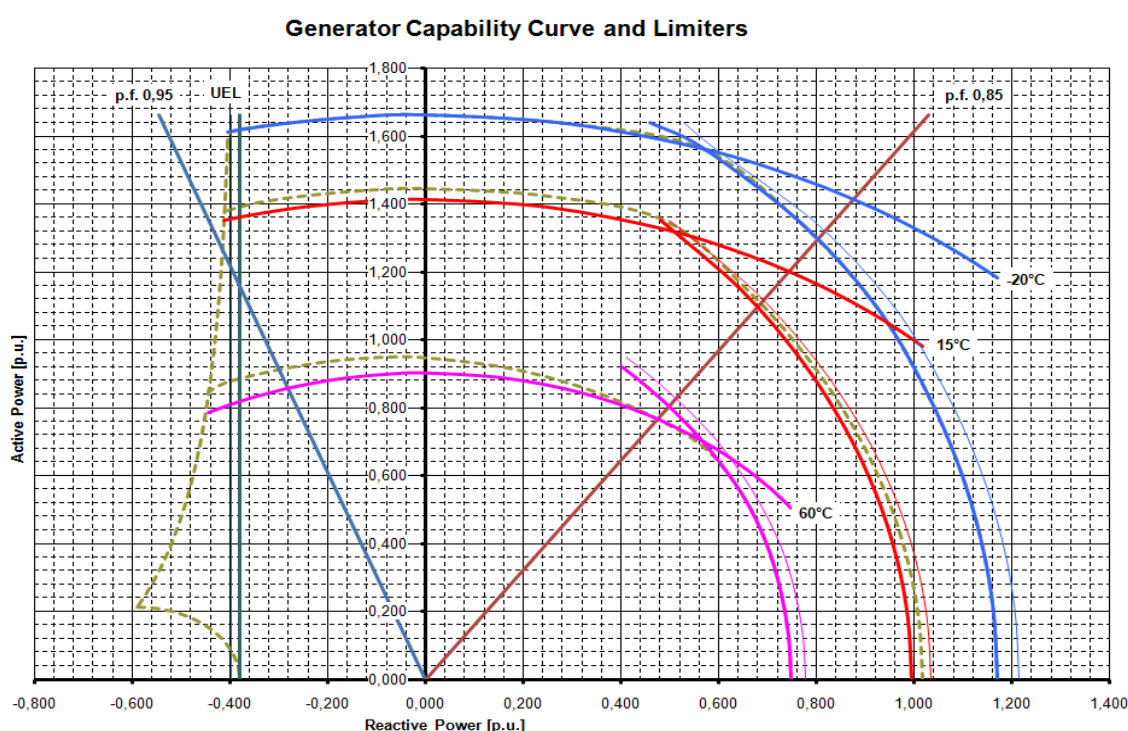
$$T_{V/Hz} = 1000 \text{ ms}$$

### 2.3.4 Omezovač rotorového proudu (ORP)

Tento proudový omezovač je dvoustupňový a chrání generátor před ohřevem rotorového vinutí, které nastává v důsledku překročení maximální hodnoty buďícího proudu. První stupeň, podobně jako omezovač  $U/f$  je vybaven časovačem, protože na pozvolné tepelné namáhání rotoru není nutné reagovat okamžitě. Toto zpoždění dává regulátoru možnost krátkodobě pracovat i v přetížení, popřípadě umožnit stropní buzení po krátký čas v případě blízkého zkratu. Díky přetížitelnosti může regulátor zajistit i správné chování (udržení konstantního napětí na svorkách) při velkém poklesu napětí v síti v důsledku zvýšení požadavků na jalový výkon. Druhý

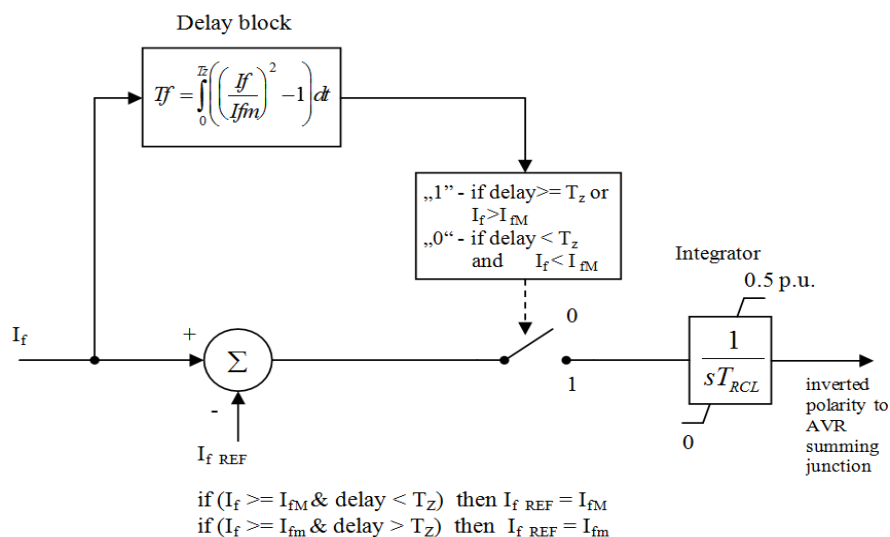
stupeň je definován maximálním proudem  $I_{fM}$  - při jeho překročení zasáhne omezovač bez časového zpoždění a sníží budící proud na hodnotu  $I_{fM}$ . Zároveň začne pracovat časovací obvod, který po uplynutí zpoždění sníží budící proud až na hodnotu limitu  $I_{fm}$ .

Další zvláštností tohoto omezovače je možnost měnit nastavení omezovače v závislosti na měření teploty vzduchu nebo chladiva na vstupu do generátoru. Díky této korekci si můžeme dovolit při správném chlazení bez obav na delší dobu přetížít vinutí rotoru a zároveň v případě nepříznivých tepelných podmínek chránit vinutí před přehřátím.



Obr. 11 - Příklad změn OSP a ORP při různém chlazení [11]

Samotný omezovač je proveden jako integrální regulátor s omezením do kladné polarity. Jeho strukturu popisuje Obr. 12. Časové zpoždění zásahu  $T_Z$  je závislé na míře překročení limitu  $I_{fM}$ . Pro chlazení je definován koeficient zpětného časování, který vychází z času zpoždění a respektuje rozdílné časy při chlazení a ohřevu rotoru.



Obr. 12 - Blokové schéma omezovače rotorového proudu [11]

### Nastavení parametrů:

Protože se teplota rotoru nemůže měnit skokově, není nutné, aby omezovač reguloval s vysokou rychlostí. Proto volíme delší integrační časy. Čas přetížení  $T_f$  vychází z parametrů stroje - jeho odolnosti v přetížení, které by měl udávat výrobce.

$$I_{f\_REF} = 105 \quad [\% I_{fn}] \qquad T_f = 17 \quad s$$

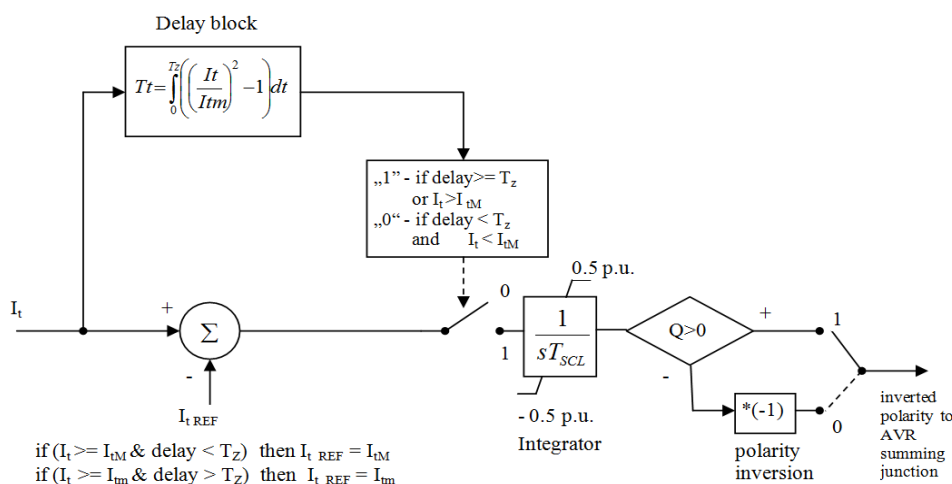
$$T_{RCL} = 1500 \quad ms$$

### 2.3.5 Omezovač statorového proudu (OSP)

Omezovač statorového proudu, podobně jako ORP, je dvoustupňový s možností korekce velikosti v závislosti na teplotě chladícího média. OSP chrání generátor před dlouhodobým přetěžováním statorového vinutí, které může nastat při maximálních výkonech v hluboce přebuzeném nebo podbuzeném stavu. Generátor musí být omezovačem přibuzován, pokud je aktuální pracovní bod v podbuzení. Naopak musí být odbuzován, pokud je aktuální pracovní bod v oblasti přebuzení. V případě, že hodnota činného proudu překročí limit statorového proudu, omezovač musí držet pracovní bod generátoru na nulovém jalovém výkonu, tedy  $\cos \varphi = 1$ .

OSP je proveden jako integrální regulátor s časovým zpožděním zásahu. Časové zpoždění je závislé na míře překročení limitu  $I_{tm}$  za podmínky, že  $I_t < I_{tm}$ . Pokud je limit proudu  $I_{tm}$  překročen, zpožďovací obvod začne časovat a po době  $T_z$  dané mírou proudového přetížení omezovač proud sníží na hodnotu  $I_{tm}$ . Pokud statorový

proud vzroste nad hodnotu  $I_{tM}$  ( $I_{tM} > I_{tm}$ ), omezovač svorkový proud sníží na hodnotu  $I_{tM}$  bez zpoždění a zároveň začne pracovat časovací obvod, který po uplynutí zpoždění sníží proud až na hodnotu limitu  $I_{tm}$ .



Obr. 13 - Blokové schéma omezovače statorového proudu [11]

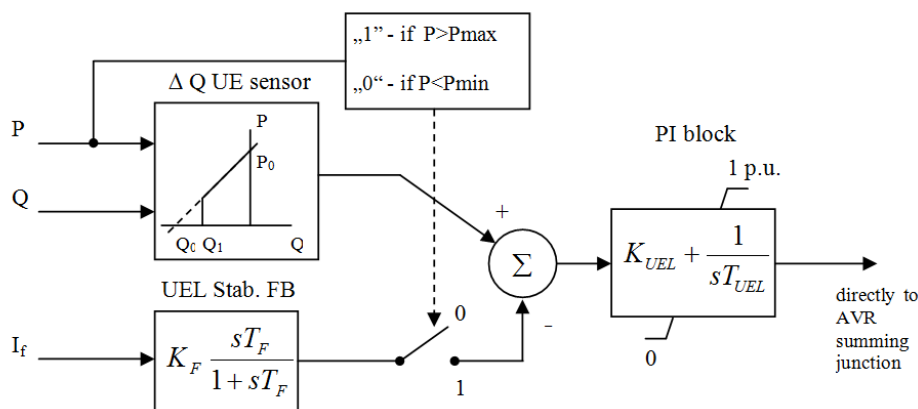
### Nastavení parametrů:

Protože se teplota statoru nemůže měnit skokově a navíc je statorové vinutí odolnější proti přetížení než rotorové, volíme ještě delší integrační časy než v případě omezovače rotorového proudu. Čas přetížení  $T_T$  vychází z parametrů stroje a jeho odolnosti v přetížení, které by měl udávat výrobce.

$I_{t\text{ REF}} =$	105	[% $I_{tn}$ ]	$I_{tM} =$	230	[% $I_{tn}$ ]
$T_T =$	20	s	$T_{SCL} =$	4000	ms

### 2.3.6 Hlídač meze podbuzení (HMP)

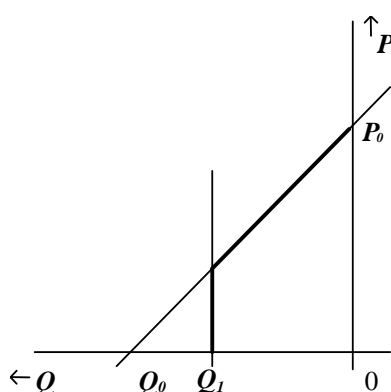
Tento omezovač chrání generátor před dvěma nepřijatelnými stavy. Při nižších výkonech zajišťuje, aby se generátor nedostal na mez statické stability a následně nedošlo k asynchronnímu chodu a prokluzu pólů. Při vyšších výkonech je to i omezení záporného jalového výkonu z důvodu přehřívání čel vinutí statoru. Při překročení přípustné meze podbuzení, omezovač reaguje bez časového zpoždění zvýšením svorkového napětí generátoru tak, aby dostal pracovní bod co nejrychleji zpět na mezní hodnotu. HMP je proveden jako PI regulátor s omezením výstupu do kladné polarity. Regulační odchylka je počítána od velikosti jalového výkonu  $Q$  jako rozdíl mezi aktuálně vypočtenou hodnotou meze hlídače a skutečnou hodnotou  $Q$ . Blokové schéma je znázorněno na Obr. 14.



Obr. 14 - Blokové schéma hlídače meze podbuzení [11]

### Nastavení parametrů:

Nastavení HMP je zobrazeno na Obr. 15. Hranice omezovače je dána tučnou lomenou křivkou. Tato křivka se skládá ze dvou přímek - první přímka spojuje body  $P_0$  a  $Q_0$ , druhá přímka je kolmá na bod  $Q_1$ . Nastavení bodů  $P_0$ ,  $Q_0$  a  $Q_1$  vychází v první řadě z diagramu stroje, který je zobrazen v příloze 2. Základní požadavek na nastavení je, že generátor musí vždy pracovat pouze ve vymezeném prostoru daným provozním diagramem stroje. Při nastavování meze omezovače se však musí ještě uvažovat další faktory ovlivňující statickou stabilitu generátoru, jako například reaktance blokového transformátoru a přípojných linek. Dále se zde musí uvažovat i rezerva pro nastavení ochrany prokluzu pólů a ochrany ztráty buzení. V praxi může být omezovač nastaven mnohem přísněji (na nižším jalovém výkonu), než udává provozní diagram stroje.



Obr. 15 - Nastavení mezí HMP [12]

$Q_0$	=	77,04 [%Sn]	$Q_1$	=	-29,63 [%Sn]
$P_0$	=	106,6 [%Sn]	$K_{UEL}$	=	15 [0.01]
$T_{UEL}$	=	2000 ms	$K_F$	=	15 [0.01]
$T_F$	=	1000 ms			

### 3 Zkoušky a optimalizace BS při uvádění do provozu

Po instalaci budící soupravy na elektrárně a jejím zapojení přichází na řadu proces uvádění do provozu. Ten spočívá ve vyzkoušení a ověření všech funkcí budící soupravy. Proces uvedení do provozu se dá rozdělit na statické zkoušky se stojícím strojem a na primární zkoušky se strojem na nominálních otáčkách.

Tato kapitola již patří do praktické části práce a zaměřuje se na popis nejdůležitějších postupů a zkoušek, které jsou nutné pro uvedení stroje do provozu. Všechny popisované zkoušky a měření byly provedeny při uvádění do provozu Kladenské elektrárny firmy Alpiq, bloku K7.

Velká část nastavení při uvádění do provozu využívá metodu inženýrského postupu. Hrubý návrh, který byl proveden před primárními zkouškami, by měl odpovídat základnímu modelu systému. Při samotném uvádění do provozu pak dochází k drobnějším úpravám, které vycházejí ze zkušeností technika. Velice často se při nastavování využívá metody experimentálního nastavení uzavřené smyčky a posléze dochází k subjektivnímu zhodnocení nastavení („**heuristicky – iterativní metoda**“).

#### 3.1 Statické testy I/O a komunikací

V prvním kroku ještě před zahájením primárních zkoušek, je nutné zkontrolovat všechny kabelové návaznosti na budící soupravu podle platné výkresové dokumentace. Před oživením rozvaděče se také nesmí opomenout přezkoumat správné velikosti pomocných napájecích napětí.

Po postupném připojení všech napájecích zdrojů následují zkoušky binárních vstupů do BS. Tyto testy se provádějí funkčně, to znamená, že v řídicím systému dochází operátorem k vynucení jednotlivých signálů a v budící soupravě se vyhodnocuje aktivace příslušného vstupu. Dále se kontrolují signály z elektrických ochran i dalšího vybavení (koncové kontakty generátorového vypínače, pojistky měřících převodníků atd.). Obdobně probíhá i kontrola binárních výstupů - v BS jsou postupně aktivovány výstupy a operátor elektrárenského bloku kontroluje, zda se signál v řídicím systému zobrazuje korektně.

Dalším krokem je kontrola analogových vstupů do BS. Těmi se rozumí měření svorkového napětí, proudu, budících veličin nebo měření teploty. Správnost těchto měření se ověřuje sekundární injektáží do měřících převodníků napětí a proudu.

Posledním krokem bývá zprovoznění komunikace. V našem případě se jednalo o plně redundantní komunikaci PROFIBUS. Přes komunikaci jsou přenášeny informace o binárních i analogových vstupech a výstupech. Opět se musí zkontrolovat význam každého signálu a jeho korektní zobrazení v řídicím systému.

Mezi nejdůležitější zkoušky pak patří funkční testy s elektrickými ochranami, kde se ověřuje funkčnost vypínacích obvodů a blokovací, tzv. interlock logika.

### 3.2 Zkratové zkoušky

Poté, co se ověří správnost všech návazností a vnitřní blokovací logiky, můžeme přistoupit k samotným primárním zkouškám. Jako první po roztočení stroje na jmenovité otáčky se provádí zkratové zkoušky.

Na vývody generátoru se nainstaluje 3f zkrat, který je dimenzován nad nominální proud generátoru. Další (použitá) možnost umístění 3f zkratu je pak za blokovým transformátorem. Výhodou tohoto umístění je, že jím bude protékat menší proud.

V našem případě je převod blokového transformátoru  $U_1 = 15 \text{ kV} / U_2 = 110 \text{ kV}$  a proud generátoru  $I_1 = 6495 \text{ A}$ , počítáme přetížení 20 %:  $I_{1'} = I_1 \cdot 1,2 = 7794 \text{ A}$ .

#### Dimenzování zkratu za blokovým transformátorem:

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{I_{1'}}{I_{2'}} \rightarrow I_{2'} = 1063 \text{ A} \quad (3.1)$$

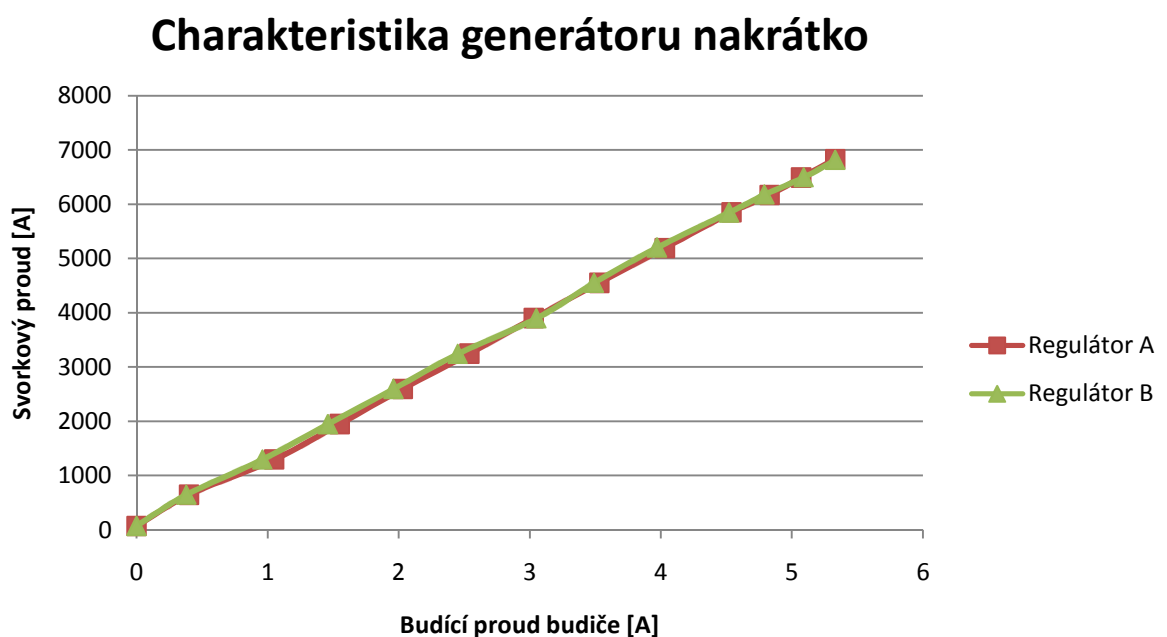
Před nabuzením do zkratu je nezbytné zkontrolovat napájecí napětí tyristorových měničů z PMG, to musí odpovídat štítkovým hodnotám stroje. Protože jsou svorky generátoru vyzkratovány, musí se budící souprava přepnout z automatické napěťové regulace do ručního řízení budícího proudu, kde lze ovládat výstup buzení od nuly.

Prvním cílem zkratových zkoušek je ověřit správnost měření svorkového proudu generátoru pro budící soupravu a pro elektrické ochrany. V případě 3f zkratu musí být proud všemi fázemi shodný a fáze jednotlivých proudů posunuty navzájem

o 120°. Po zapnutí budící soupravy se postupně začne navyšovat budící proud do budiče, dokud se nedosáhne 10 % svorkového proudu. Zde se zkontroluje správnost měření a stabilita měření proudu. Poté se buzení zvyšuje po malých krocích, dokud se nedosáhne 100 % svorkového proudu generátoru.

Po ověření správnosti měření a stability přichází na řadu odzkoušení elektrických ochran (rozdílové, nadproudové, distanční atd.). Po odzkoušení správné funkce elektrických ochran se generátor nabudí na 100 % svorkového proudu. Zde se opět provádí kontrola měření svorkového proudu. V případě odchylek mezi měřením budící soupravy a měřením ochran se provádí korekce (nepřesnosti mohou vznikat například při různých odchylkách měřících transformátorů). Dále se kontroluje měření budícího proudu a napětí budiče. Jelikož se jedná o redundantní dvoukanálový systém, musí se korekce provést v obou kontrolérech.

Na závěr zkratových zkoušek byla změřena charakteristika generátoru nakrátko, která byla naměřena pro oba regulátory, viz Graf 1.



Graf 1 - Charakteristika generátoru nakrátko

Protože byl v našem případě zkrat umístěn až za blokový transformátor, bylo možné při nominálním proudu odečíst jeho napětí nakrátko. Tato hodnota je nezbytná pro správné nastavení kompenzace úbytku napětí na blokovém transformátoru neboli statiku.



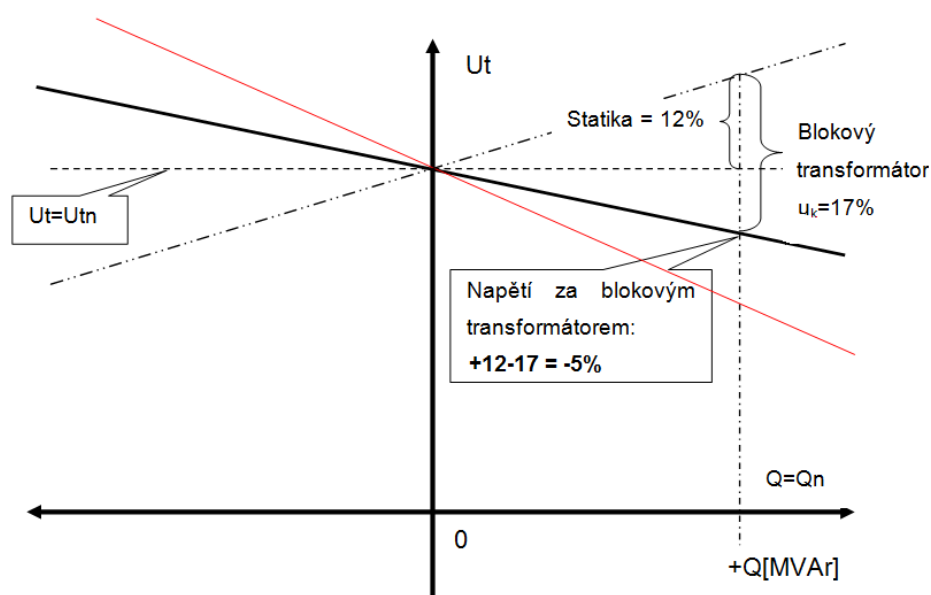
**Na svorkách generátoru bylo při nominálním proudu naměřeno:**

Svorkové napětí  $U_t = 2589$  V; Nominální napětí  $U_n = 15000$  V

$$u_k = \frac{U_t}{U_n} * 100 = 17,26 \% \quad (3.2)$$

**Díky tomuto měření lze stanovit kompenzaci:  $k = 12\%$**

Na Obr. 16 je vysvětlena funkce kompenzace úbytku napětí na blokovém transformátoru (statiky). Tento úbytek je způsoben průchodem jalové složky proudu transformátorem. Pokud by tato funkce byla vypnutá a generátor by nebyl připojen k blokovému transformátoru (BT), platí čárkovaná čára a v celém rozsahu jalového výkonu (od  $-Q_n$  až do  $+Q_n$ ) je svorkové napětí generátoru konstantní. Pokud se za generátor připojí BT, bude se napětí za BT měnit se zátěží  $Q$  tak, že při  $+Q_n$  poklesne napětí za BT právě o jeho napětí nakrátko  $u_k$  - viz červená přímka. Tedy při  $Q_n$  by napětí pokleslo o 17 %. Požadavkem však je, aby napětí za BT pokleslo pouze o 5 %. Proto se provádí kompenzace úbytku na BT pomocí nastavení statiky. Napětí na svorkách generátoru se potom mění podle čerchované přímky a při  $+Q_n$  dosáhne hodnoty +12 % nad jmenovitým svorkovým napětím. Tím působí proti úbytku na blokovém transformátoru a součtem těchto dvou přímek dostaneme výslednou křivku (plná černá přímka), která reprezentuje úbytek napětí za blokovým transformátorem po kompenzaci.



Obr. 16 - Kompenzace úbytku napětí na blokovém transformátoru (statika)

### 3.3 Zkoušky naprázdno

Po demontování zkratů přichází na řadu napěťové zkoušky. Podmínkou napěťových zkoušek je stroj na nominálních otáčkách a otevřený generátorový vypínač (stroj naprázdno). Během napěťových zkoušek se v první řadě, jako u zkratových zkoušek, otestuje funkčnost elektrických ochran. Po ověření jejich funkčnosti přichází na řadu zkoušky generátoru a obou regulátorů buzení. Veškeré zkoušky jsou prováděny na každém regulátoru zvlášť.

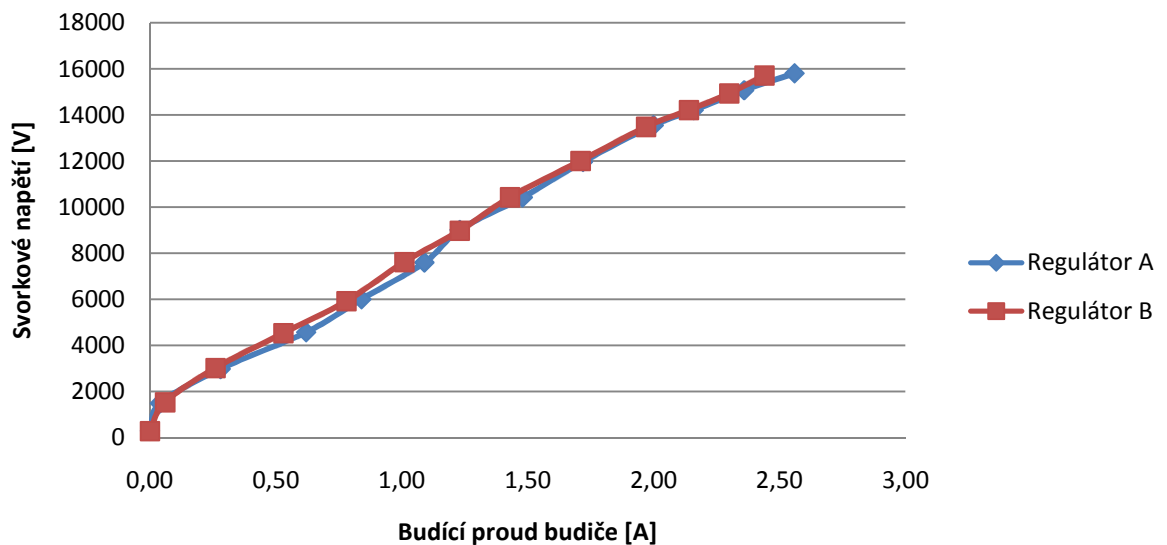
#### 3.3.1 Základní zkoušky

Prvním krokem je nabuzení generátoru na nominální napětí. Podobně jako u zkratových zkoušek je AVR v ruční regulaci budícího proudu a pomalým přibuzováním se zvyšuje napětí na svorkách generátoru až na 100 %. Přitom se kontroluje měření napětí - velikosti napětí ve všech fázích musí být stejné a fázový posuv mezi jednotlivými fázemi musí být 120°. Na nominálním napětí se kontroluje měření všech systémů. V případě odchylek mezi budící soupravou a měřením ochran musí být provedena korekce (nepřesnosti mohou vzniknout podobně jako u měření svorkového proudu - např. různými odchylkami měřících transformátorů).

Při dosažení nominálního napětí je nutné odměřit i velikost budícího proudu pro budič. Tato hodnota je zásadní v případě poruchy měřících transformátorů napětí - podle ní regulátory mohou nabudit generátor v regulaci budícího proudu na jmenovité napětí i v případě ztráty zpětné vazby od měření napětí.

V dalším kroku byla naměřena charakteristika generátoru naprázdno od nuly (remanentního napětí) až po 110 % svorkového napětí - viz Graf 2.

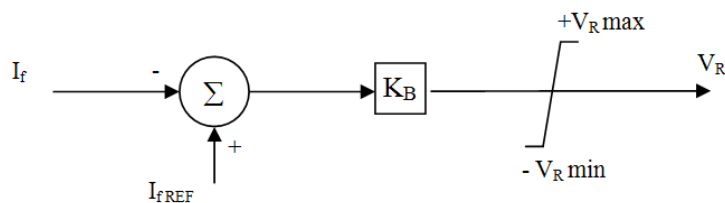
## Charakteristika generátoru naprázdno



Graf 2 - Charakteristika generátoru naprázdno

### 3.3.2 Testování regulační smyčky budícího proudu

Poslední kontrolou, kterou je nutné provést při manuální regulaci budícího proudu, je nastavení proporcionalního zesílení proudové smyčky regulátoru.



Obr. 17 - Blokové schéma regulátoru budícího proudu [11]

Protože je manuální regulace budícího proudu nejjednodušší regulační mód, využívá se zde pouze proporcionalní regulace (viz Obr. 17). Celkové zesílení proudové smyčky je dáno vztahem:

$$A_i = \frac{I_{fe}}{I_{feREF} - I_{fe}} \approx 3,5 \quad (3.3)$$

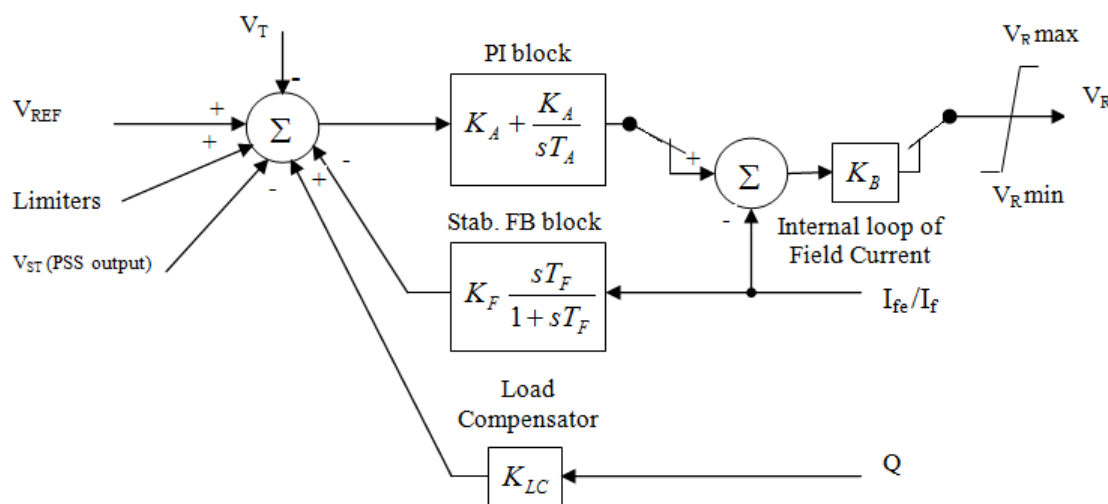
$I_{feREF}$  = žádaná hodnota budícího proudu budiče

$I_{fe}$  = budící proud budiče

Pro správný chod budicí soupravy je v *interním předpisu pro zkoušení PB07268 firmy BRUSH SEM s.r.o. [12]* doporučeno nastavit celkový zisk proudové smyčky při nominálním napětí přibližně  $A_i = 3,5$ . Pokud měřený zisk neodpovídá této hodnotě, je nutné vhodně upravit nastavení konstanty  $K_B$ .

### 3.3.3 Testování napěťové regulační smyčky

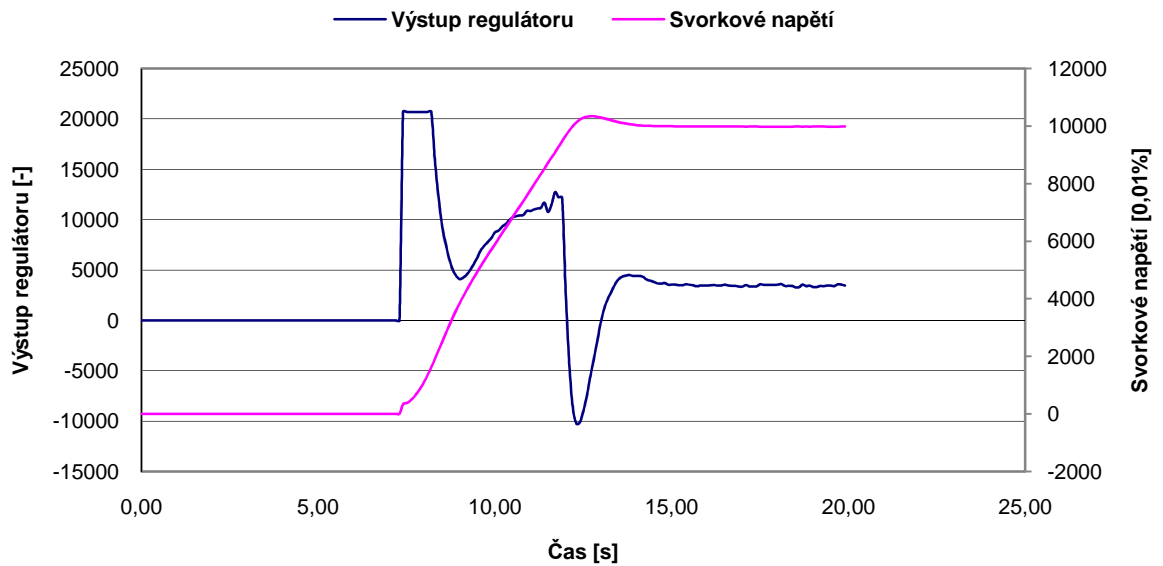
Na další testy je nutné přepnout regulátor z manuální regulace budicího proudu do automatické napěťové regulace. Pro pochopení nastavení a optimalizace regulátoru je nezbytné znát, jak základní schéma regulátoru napětí, které je znázorněno na Obr. 18, tak logiku regulátoru, která definuje případy, kdy se uplatňují příslušné regulační bloky.



Obr. 18 - Blokové schéma automatického regulátoru napětí [11]

Po zapnutí budicí soupravy v automatické napěťové regulaci dojde automaticky k nabuzení generátoru na zadané napětí v definovaném čase. Hodnota napětí při nabuzení se nastaví na nominální napětí generátoru, pokud zákazník neurčí jinak. Čas nabuzovacího procesu je volitelný - při menších časech (jednotky sekund) dochází k mírné přeregulaci a stabilizaci na jmenovitém napětí. Při větších časech je stroj nabuzován plynule a bez překmitu. Graf 3 zobrazuje naměřený průběh výstupu regulátoru a svorkové napětí při nabuzení po 5 s rampě.

## Automatické nabuzení generátoru



Graf 3 - Automatické nabuzení generátoru

Protože po nabuzení stroje pracuje regulátor ve stavu „regulace napětí naprázdno“ (generátorový vypínač je vypnutý), je ve funkci pouze proporcionální část přenosové funkce regulátoru. Zároveň do regulační smyčky nevstupují ani signály od PSS či statiky.

$$K_A + \frac{1}{s \cdot T_A} = K_A \quad (3.4)$$

$K_A$  = proporcionální zesílení napěťové smyčky,

$T_A$  = integrační konstanta  $\rightarrow \infty$

Nastavení proporcionálního zesílení napěťové regulační smyčky provádíme při jmenovitém svorkovém napětí. Konstanta proporcionálního zesílení  $K_A$  se nastavuje tak, aby celkové zesílení napěťové smyčky  $A_u$  bylo přibližně 40. Celkové zesílení napěťové smyčky je dáno vztahem:

$$A_u = \frac{U_t}{U_{tREF} - U_t} \approx 40 \quad (3.5)$$

$U_{tREF}$  = žádaná hodnota svorkového napětí

$U_t$  = svorkové napětí

Toto nastavení je z doporučených hodnot v *interním předpisu pro zkoušení PB07268 firmy BRUSH SEM s.r.o. [12]*, které vychází, stejně jako hodnota zesílení proudové smyčky, ze zkušeností s obdobnými stroji.

### 3.3.4 Odezva na skokovou změnu žádané hodnoty napětí

Automatický regulátor napětí byl po optimalizaci nakonfigurován na rychlejší odezvy než při standardním nastavení. Samotnou optimalizací napěťové smyčky a s tím úzce související efektivitu systémového stabilizátoru pro tlumení kmitů činného výkonu (PSS) podrobněji rozebírá kapitola 4. V této podkapitole bude prezentována pouze odezva při výsledném nastavení napěťové smyčky.

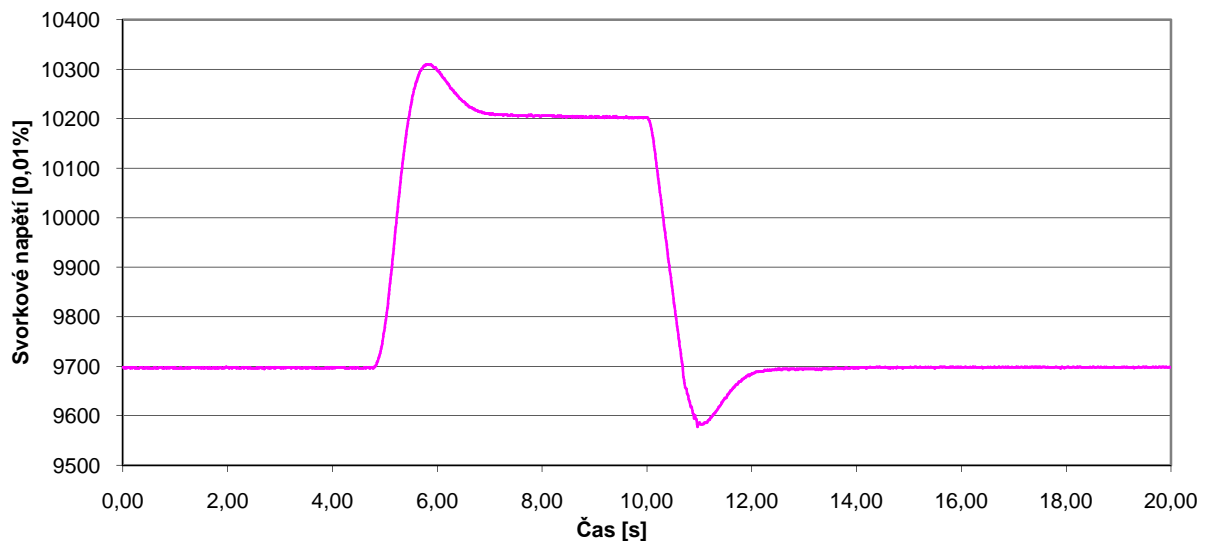
#### Nastavení regulační smyčky:

$K$	= 5,60	[1]	proporcionální zisk regulátoru budicího proudu
$K_A$	= 25	[1]	proporcionální zisk regulátoru napětí
$K_F$	= 8	[1]	zisk stabilizační ZV od budicího proudu
$T_F$	= 1000	ms	časová konst. stabilizační ZV od budicího proudu

Tato zkouška se provádí vnučením nové žádané hodnoty regulátoru napětí. Běžný operátor nemá možnost provádět skokové změny - provozní změny žádané hodnoty jsou plynulé s definovaným časový trendem, v našem případě byla po dohodě se zákazníkem nastavena maximální změna  $0,25 \% U_t / 1 \text{ s}$ . Při zkoušení odezvy je nutné vložit novou žádanou hodnotu přímo do daného registru regulátoru díky speciálnímu rozhraní.

Při samotné zkoušce odezvy se provede skok o 5 % svorkového napětí dolů a vzápětí po ustálení skok o 5 % nahoru. V záznamu naměřené hodnoty svorkového napětí nesmí dojít k více než dvěma překmitům. Amplituda prvního překmitu by podle interního dokumentu firmy BRUSH PB07268 [12] (předpis pro zkoušky při uvádění do provozu), neměla být větší než 15 % z velikosti skoku. Naměřený průběh svorkového napětí zobrazuje Graf 4.

### Odezvy na skokové změny žádané hodnoty napětí



Graf 4 - Odezva na 5 % skok žádané hodnoty napětí

Z naměřeného průběhu je zřejmé, že regulace je stabilní, protože k ustálení napětí dojde do tří sekund, pouze po jednom překmitu. Cenou za zvýšení rychlosti doby náběhu při optimalizaci regulační smyčky (kapitola 4) bylo zvětšení překmitu, který je vyšší než stanovuje předpis. Příčiny vzniku překmitu jsou vysvětleny ve zhodnocení práce. Díky změnám v nastavení regulátoru bylo dosaženo rychlejší regulace, při přijatelném poklesu bezpečnosti ve fázi. S tímto nastavením regulátor reaguje rychleji při různých přechodových jevech v elektrizační soustavě. Je ale nutné si uvědomit, že změnami v nastavení regulační smyčky dochází i k změnám při regulaci v případě vstupu dalších signálů do regulační smyčky, jako omezovače - viz Obr. 18. Díky rychlejšímu nastavení hlavní regulační smyčky pak může dojít k nestabilnímu výstupu, protože nastavení omezovačů bylo připraveno na doporučené nastavení regulační smyčky.

Dalším testem je **odbuzení stroje**. To se provádí dvěma způsoby - **provozní odstavení** - zde se musí ověřit, zda regulátor přejde do invertorového chodu a stroj bezpečně odbudí. Poté se zkusí nouzové **odbuzení stroje odbuzovačem**. Odbuzení bezkroužkového stroje je pomalejší, trvá běžně více než 15 s. Průběh odbuzení se zaznamená a vyhodnotí se jeho správná funkce. Průběh odbuzení je k dispozici na samostatném CD nosiči, který tvoří elektronickou přílohu diplomové práce (Příloha 3). Ve své podstatě je podobný průběhu odbuzení bezkroužkového stroje z Obr. 5.

### 3.3.5 Omezovač svorkového napětí

Při **testování omezovačů ve stavu naprázdno** je možné odzkoušet pouze nastavení omezovačů založených na měření a regulaci svorkového napětí. Teoreticky je možné dozkoušet i funkci omezovače rotorového proudu, ale při regulaci naprázdno se dosahuje pouze malého proudu v rotoru (přibližně 20 %  $I_{fen}$ ), což pro test není vhodné.

Základní informace, jako je struktura, nastavení, princip funkce a chování omezovače byly uvedeny v předchozích kapitolách. Samotná zkouška se provádí několika způsoby. První způsob je provozní změnou žádané hodnoty - tedy zvyšováním žádané hodnoty trendem 0,25 % za 1 s. Druhý způsob je skokem žádané hodnoty nad nastavení omezovače. Pro ověření kvality zásahu je vhodnější použít prudkou změnu žádané hodnoty.

Podle kritérií interního předpisu firmy BRUSH SEM pro zkoušky při uvádění do provozu [11], musí odezva způsobená omezovačem rychle stabilizovat napětí na maximální povolené hodnotě, ale zároveň nesmí mít při svém působení více než dva překmity. Po ustálení je nutné zkontrolovat, zda v tomto stavu nedochází k náběhu elektrických ochran (nejčastěji ochrana proti přesycení se zpožděním). Mezi nastavení omezovače a elektrické ochrany musí být vždy nastavené pásmo necitlivosti. Pro otestování omezovače byla provedena změna žádané hodnoty napětí ze 104 % na 109 %, to je 4 % nad hranici nastavení omezovače.

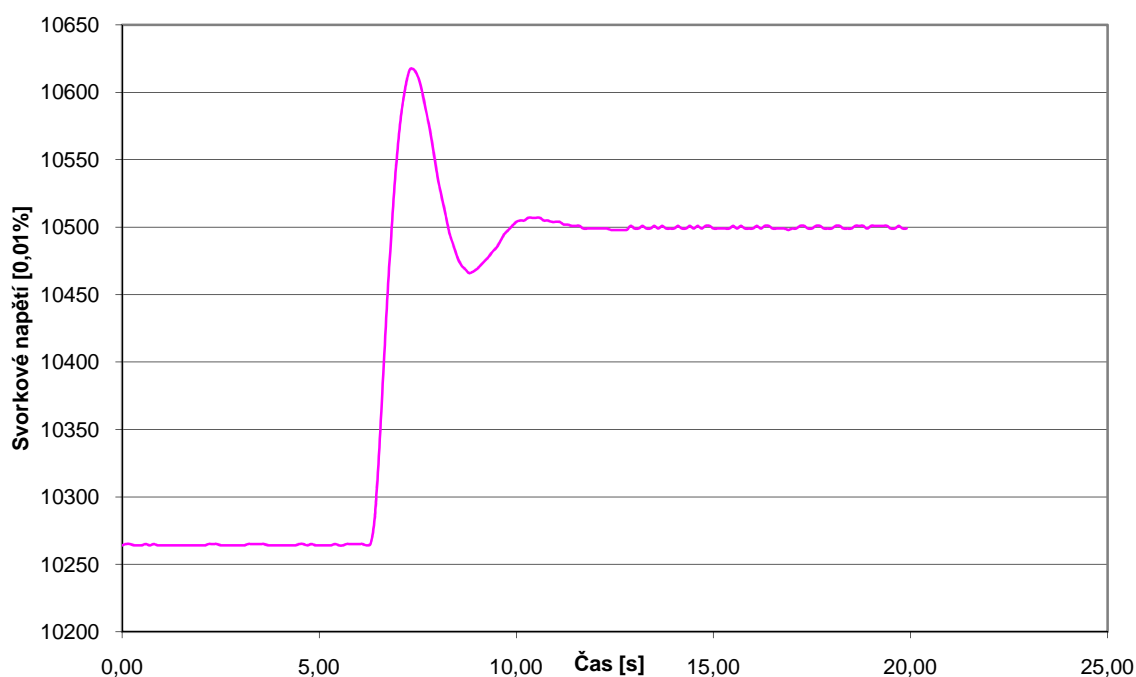


Graf 5 - Omezovač svorkového napětí ( $T_{TVL} = 500$  ms)



Z naměřeného průběhu je patrné, že omezovač nesplnil daná kritéria, protože při jeho zásahu došlo celkem ke čtyřem překmitům a napětí se ustálilo až po patnácti sekundách. Toto nestabilní chování zapříčinilo urychlení hlavní regulační smyčky. Omezovač při svém zásahu do regulační smyčky dal popud ke změně v sumárním bodu. Tato změna však byla zesílena více než s původním, konzervativnějším nastavením a tak došlo k několikanásobné přeregulaci. Protože je omezovač svorkového napětí proveden jako integrální regulátor (viz Obr. 9), kde  $T_{TVL}$  je integrační časová konstanta, je řešení zřejmé. Zvýšením integračního času dojde ke snížení výstupu omezovače a tím pádem ke stabilizaci výsledného průběhu. Postupným navyšováním integračního času bylo dosaženo finálního nastavení  $T_{TVL} = 1500$  ms.

### Zásah omezovače svorkového napětí



Graf 6 - Omezovač svorkového napětí ( $T_{TVL} = 1500$  ms)

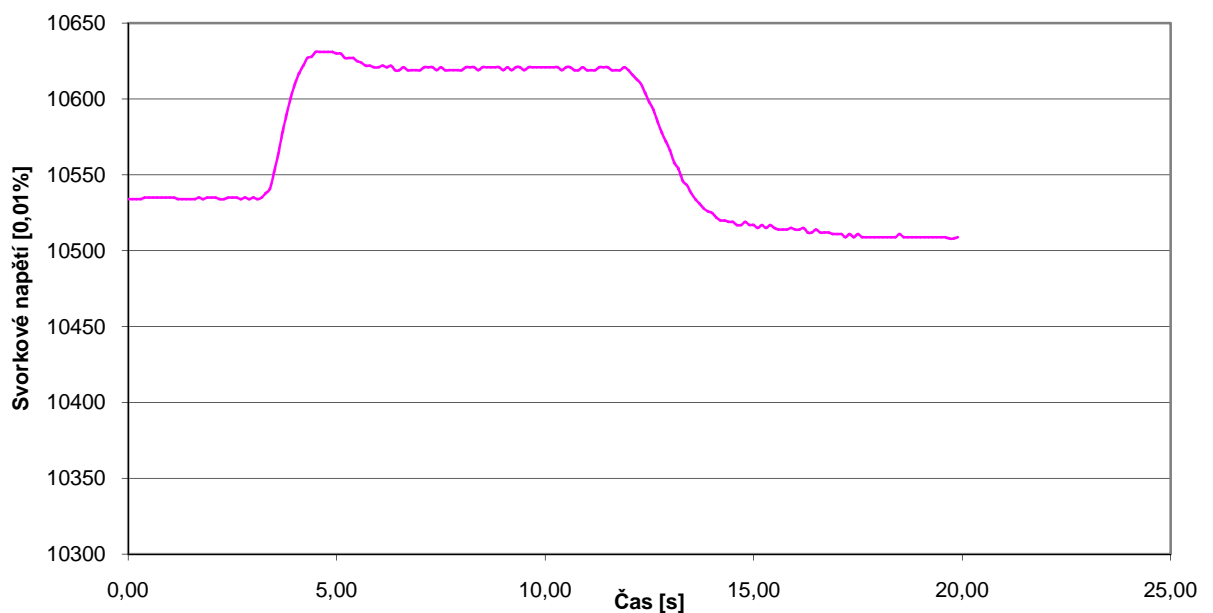
Z naměřeného průběhu po úpravách je zřejmé výrazné zlepšení. Kritérium dvou překmitů je splněno a doba stabilizace napětí se zkrátila z původních 15 s na nových 5 s. Při stabilizaci na maximálním napětí pak bylo ověřeno, že nedochází k aktivaci elektrických ochrany a tudíž se generátor nachází v bezpečném provozním pásmu.

### 3.3.6 Omezovač přesycení

Základní informace, jako je struktura, nastavení, princip funkce a chování omezovače byly uvedeny v předchozích kapitolách. Tuto zkoušku je nutné provést dvěma způsoby. První test se provádí skokem žádané hodnoty nad nastavení omezovače, kde se otestuje funkce integrálního časovače a posléze i kvalita zásahu.

Odezva způsobená omezovačem musí stabilizovat napětí na maximálním povoleném poměru napětí a frekvence. Rychlost zde není rozhodující, jako u omezovače svorkového napětí, protože nebezpečí přesycení stroje spočívá hlavně v přehřívání. Podle kritérií interního předpisu firmy BRUSH SEM pro zkoušky při uvádění do provozu [11] nesmí mít omezovač při svém působení více než jeden překmit. Po ustálení je opět nutné zkontrolovat, zda v tomto stavu nedochází k náběhu elektrických ochran, stejně jako při kontrole omezovače svorkového napětí. Pro otestování omezovače musí být vypnuta funkce omezovače svorkového napětí, aby nedocházelo k zásahům od obou omezovačů, neboť při nominální frekvenci jsou jejich limity nastavené velmi blízko sebe. Poté byla snížena doba zpoždění zásahu, aby omezovač odčasoval a zasáhl rychleji. Nakonec byla provedena změna žádané hodnoty napětí nad jeho mez.

#### Zásah omezovače přesycení - změnou napětí



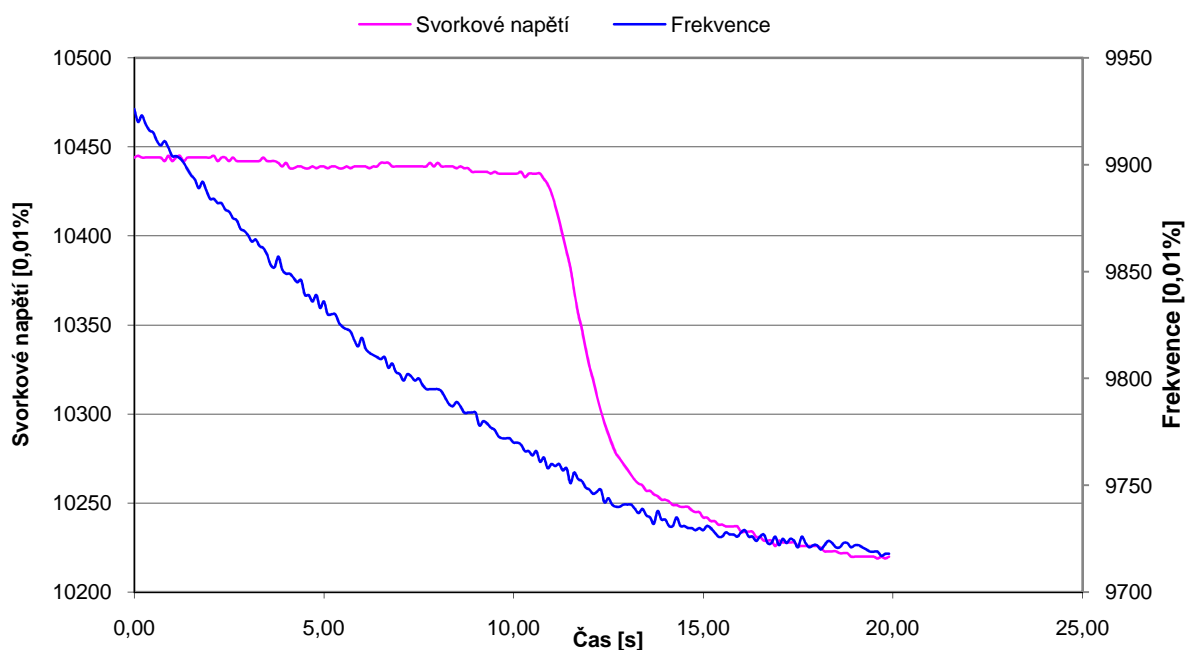
Graf 7 - Omezovač přesycení ( $T_{V/Hz} = 1500$  ms)

Při použití továrního nastavení se omezovač nechoval podle očekávání, podobně jako omezovač svorkového napětí. Proto došlo ke změně nastavení integračního času  $T_{V/Hz} = 1500$  ms.

Z naměřeného průběhu s novým nastavením (viz Graf 7) je vidět zvýšení hodnoty svorkového napětí na 106,25 %, tím došlo k aktivaci časovače. Po odčarování zasáhl omezovač a plynule, bez překmitu, stáhl napětí na příslušný poměr V/Hz. Po ustálení na limitním poměru V/Hz bylo ověřeno, že nedochází k aktivaci elektrických ochran.

Druhý test se provádí nastavením žádané hodnoty pod nastavení omezovače a následným snížením otáček stroje. Tím dojde ke změně poměru V/Hz od frekvence, spuštění integrálního časovače a nakonec i k zásahu omezovače.

### Zásah omezovače přesycení - změnou frekvence



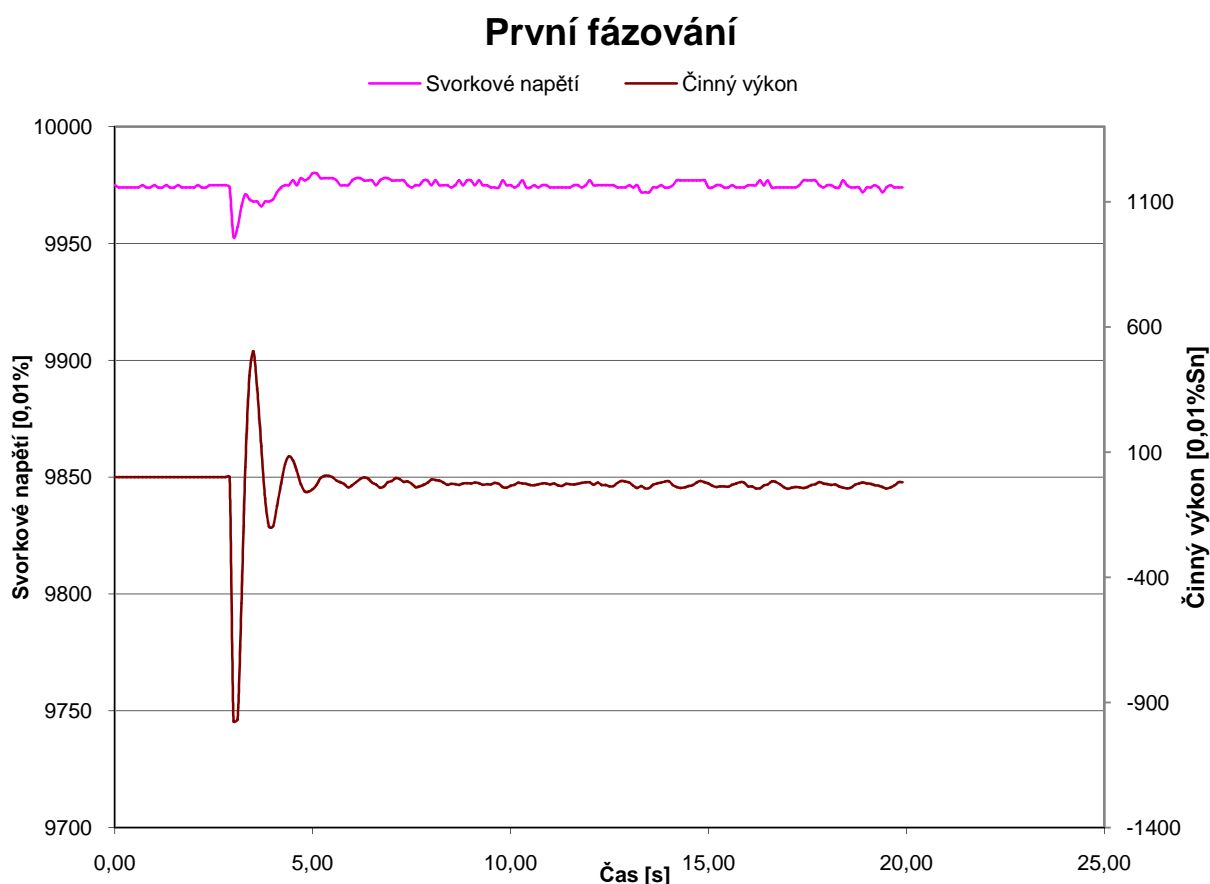
Graf 8 - Omezovač přesycení ( $T_{V/Hz} = 1500$  ms) - změnou frekvence

Z naměřeného průběhu svorkového napětí a frekvence (viz Graf 8) je vidět, že při snižování frekvence stroje došlo po dosažení limitního poměru V/Hz k aktivaci časovače. Po odčarování zasáhl omezovač a plynule, bez překmitu stáhl napětí na příslušný poměr V/Hz. Při dalším snižování frekvence pak omezovač dál reguloval svorkové napětí, tak aby nedocházelo k přesycení. V průběhu zkoušky bylo zároveň ověřeno, že nedochází k aktivaci elektrických ochran.

### 3.4 Fázování

Úloha budicí soupravy při fázování může být různá podle toho, co zákazník vyžaduje. Regulátory PRISMIC A50 v sobě mají integrovány funkci fázovače i srovnávače napětí. V případě budicí soupravy pro Kladno K7 však byl použit fázovač ABB SYNCHROTECT® 5, který byl součástí rozvaděče elektrických ochran.

V tomto případě měla budicí souprava za úkol pouze zvyšovat a snižovat napětí na svorkách generátoru, podle pulzů z ABB fázovače. Po sepnutí generátorového vypínače pak regulátory musí udržet konstantní svorkové napětí a přejít z regulačního módu naprázdno do regulace na síti. Tento přechod spočívá ve změně regulace z proporcionální na proporcionálně-integrační regulaci, odblokování funkce kompenzace statiky a možnosti regulace účinníku nebo jalového výkonu.



Graf 9 - Fázování

Z naměřeného průběhu je vidět, že fázovač správně vyrovnal napětí a frekvenci generátoru a sítě a zároveň přechod regulátoru na PI regulaci byl hladký, pokles napětí při fázování je téměř neznamenný ( $-0,25\% U_t$  za 1 s).

### 3.5 Zkoušky na výkonu

Po nafázování přichází opět jako první na řadu zkoušky elektrických ochran. Většinou se zkouší **provozní a havarijní odstavení** tzv. „zpětná wattová“. Tato zkouška spočívá v tom, že se uzavřou regulační ventily turbíny a generátor přejde do motorického chodu (spotřebovává činný výkon). Na to ochrany s definovaným zpožděním reagují otevřením generátorového vypínače a popřípadě i vypnutím budící soupravy. Úkol budící soupravy při motorickém chodu je udržet konstantní napětí na svorkách generátoru a v případě odstavení odbudit generátor. Průběhy ze zkoušení zpětné wattové ochrany jsou uvedeny na samostatném CD nosiči, který tvoří elektronickou přílohu diplomové práce (Příloha 3).

Další zkouškou je ověření funkčnosti elektrické ochrany „**ztráta buzení**“. Princip zkoušky je velmi jednoduchý - dojde ke snížení hranice pro aktivaci této ochrany a poté postupným odbuzováním stroje k její aktivaci. Při aktivaci musí dojít k otevření generátorového vypínače a následně k odbuzení stroje.

#### 3.5.1 Odezva na skokovou změnu žádané hodnoty napětí

Tato zkouška je velice podobná stejnojmenné zkoušce při regulaci naprázdno. I pro tuto zkoušku bylo použito stejného nastavení, jako v podkapitole 3.3.4. Hlavním rozdílem je, že se při regulaci na síti uplatňuje statika, integrační složka a se změnou napětí se mění jalový výkon stroje.

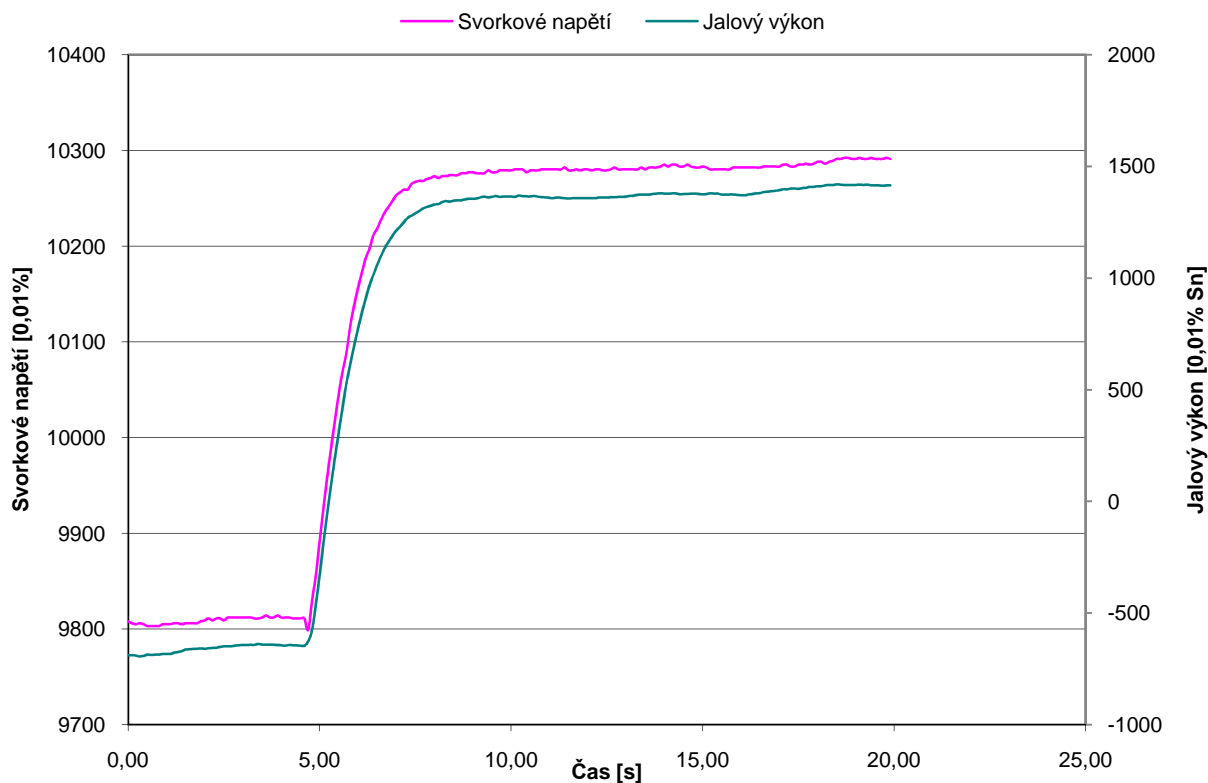
##### Nastavení regulační smyčky:

$T_A$  = 4000 ms integrační časová konstanta regulátoru napětí

$K_{LC}$  = 12 [%] koeficient statiky od jalového výkonu

Při zkoušce odezvy byl proveden skok o 5 % svorkového napětí nahoru. V záznamu naměřené hodnoty svorkového napětí by nemělo dojít k překmitu.

## Odezva na skokovou změnu - regulace na síti

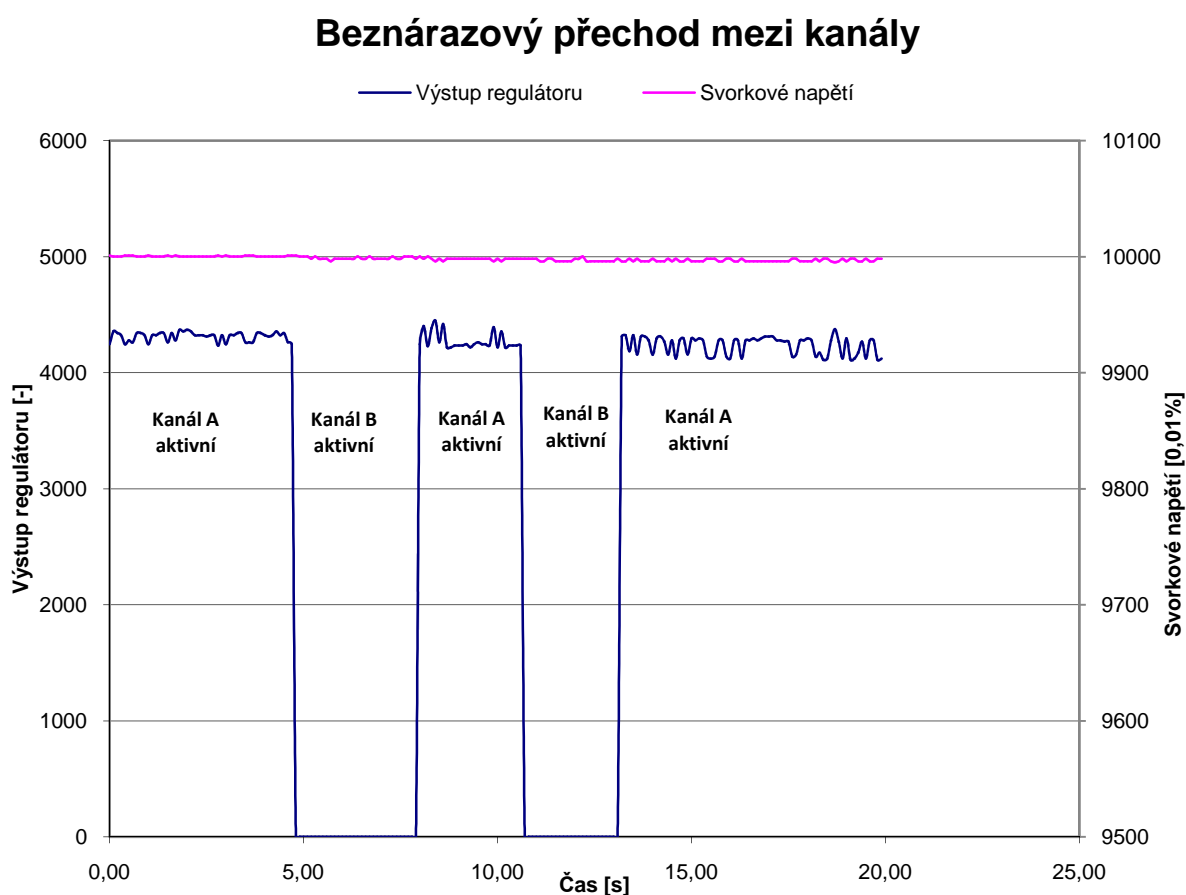


Graf 10 - Odezva na skokovou změnu žádané hodnoty napětí na síti

Průběh svorkového napětí a jalového výkonu během testu zobrazuje Graf 10. Napětí je zregulováno plynule do tří sekund a bez překmitu. Jalový výkon kopíruje průběh napětí. Je nutné si uvědomit, že při skoku o 5 % dojde k velmi velké změně jalového výkonu. V našem případě z -10 MVar až na 24 MVar, to je náhlá změna o 34 MVar, na kterou musí reagovat elektrizační soustava. Tato zkouška se dále provádí i se skokem o -5 %, její průběhy je možné dohledat na samostatném CD nosiči, který tvoří elektronickou přílohu diplomové práce (Příloha 3).

### 3.5.2 Test beznárazového přechodu mezi redundantními kanály

U redundantních budících souprav musí mít operátor kdykoliv možnost přejít z jednoho kanálu na druhý. Tento přechod musí být maximálně plynulý a nesmí při něm docházet ke znatelným změnám svorkového napětí, respektive jalového výkonu stroje. Nastavení přechodů mezi redundantními kanály budícího systému je důležité i v případě poruchy na jednom z kanálů. I v takovémto poruchovém případě musí dojít k plynulému předání regulace. Nastavení přechodového koeficientu se provádí pomocí interního měření v regulátoru a následného nastavení patřičného parametru. Test se provádí několikanásobným přepnutím z aktivního do záložního kanálu a zpět, přičemž se sleduje výstup regulátoru a svorkové napětí stroje.

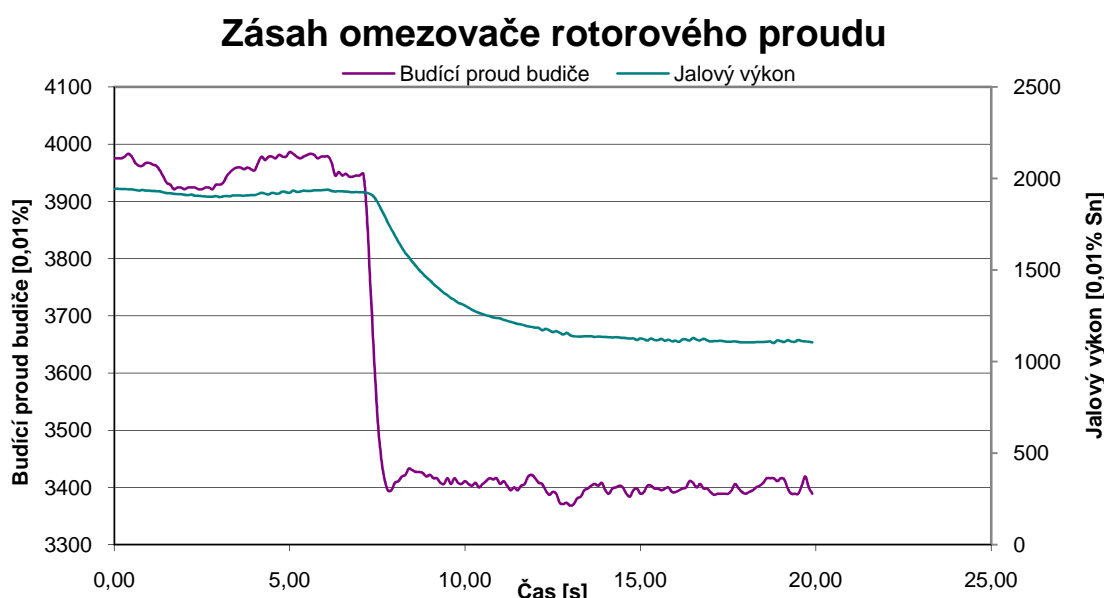


Graf 11 - Přechod mezi redundantními kanály

Z naměřeného průběhu, který zobrazuje Graf 11, je patrné, že byly oba regulátory nakonfigurovány korektně, tudíž je přechod mezi kanály beznárazový a tím pádem při přechodech nedochází ke změnám svorkového napětí.

### 3.5.3 Test omezovače rotorového proudu (ORP)

Základní informace, jako je struktura, nastavení, princip funkce a chování omezovače byly uvedeny v předchozích kapitolách. V praxi se stává, že ORP není z provozních důvodů možné otestovat na vypočítaném nastavení. Pro tyto případy se mez ORP při zkouškách ponížší tak, aby ho bylo možné otestovat. Testem se ověří správná funkce tohoto omezovače a posléze se obnoví původní meze. Odezva způsobená omezovačem musí stabilizovat budící proud budiče na maximální povolené hodnotě. Rychlost regulace zde není rozhodující jako u omezovače svorkového napětí, protože nebezpečí přebuzení stroje spočívá hlavně v přehřívání. Podle kritérií interního předpisu firmy BRUSH SEM pro zkoušky při uvádění do provozu [11] nesmí mít omezovač při svém působení více než jeden překmit.



Graf 12 - Omezovač rotorového proudu

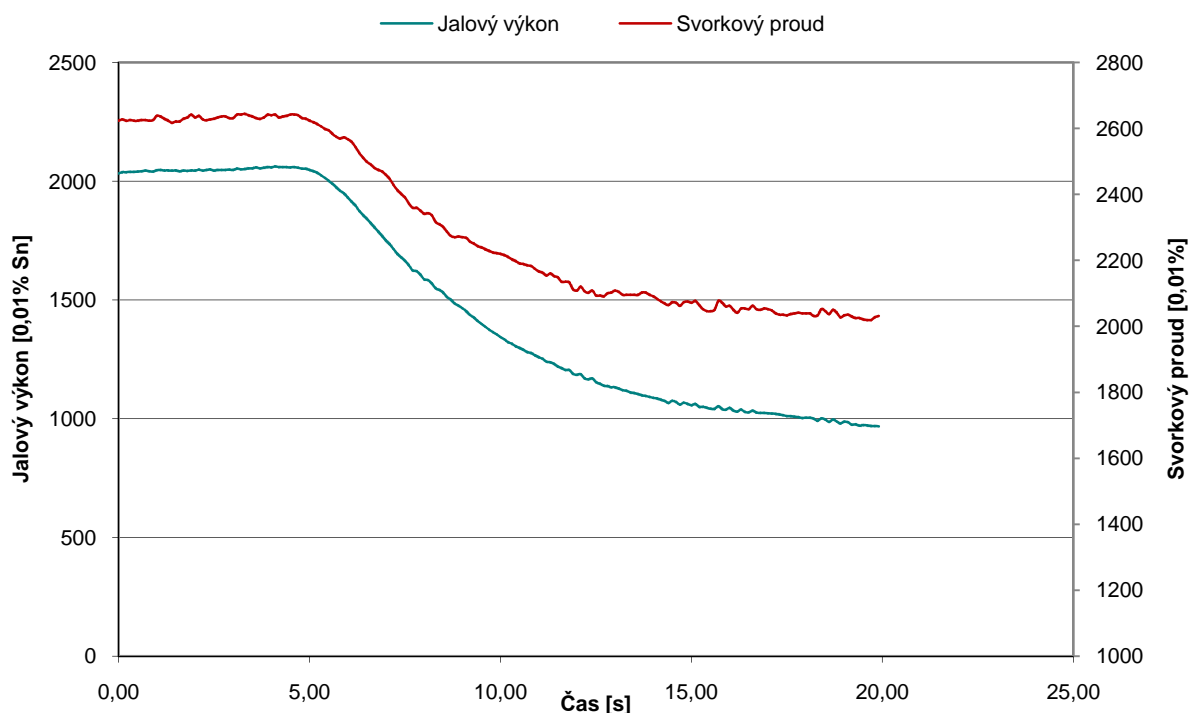
Pro test ORP byl stroj uveden do maximálního přebuzení. Kvůli malému činnému výkonu a omezení svorkového napětí bylo možné dosáhnout pouze 40 % budícího proudu. Poté se přímým zásahem do nastavení regulátoru změnila mez omezovače z původní hodnoty na  $I_{REF} = 34 \% I_{fn}$ . Tím došlo k překročení limitu a spuštění časovače. Po odčasování omezovač stáhl rotorový proud na nastavených 34 %  $I_{fn}$ . Při prvním zásahu omezovače byla zjištěna nepřiměřeně rychlá změna, proto došlo k prodloužení integračního času na  $T_{RCL} = 2000$  ms. Po úpravě byl naměřen průběh, který zobrazuje Graf 12. Rychlost změny budícího proudu budiče a následné změny jalového výkonu jsou dle očekávání.



### 3.5.4 Test omezovače statorového proudu (OSP)

Základní informace, jako je struktura, nastavení, princip funkce a chování omezovače byly uvedeny v předchozích kapitolách. Stejně jako u omezovače rotorového proudu se v praxi stává, že z provozních důvodů není možné omezovač otestovat na vypočítaném nastavení. Řešení je stejné jako u ORP – snížením vypočítaného nastavení. Podle kritérií interního předpisu firmy BRUSH SEM pro zkoušky při uvádění do provozu [11] musí omezovač při svém působení snížit svorkový proud stroje na maximální povolenou hodnotu, popřípadě na minimální dosažitelnou hodnotu ( $\cos \varphi = 1$ ). Zásah omezovače nesmí mít při svém působení více než jeden překmit. Rychlost regulace zde není rozhodující.

#### Zásah omezovače statorového proudu

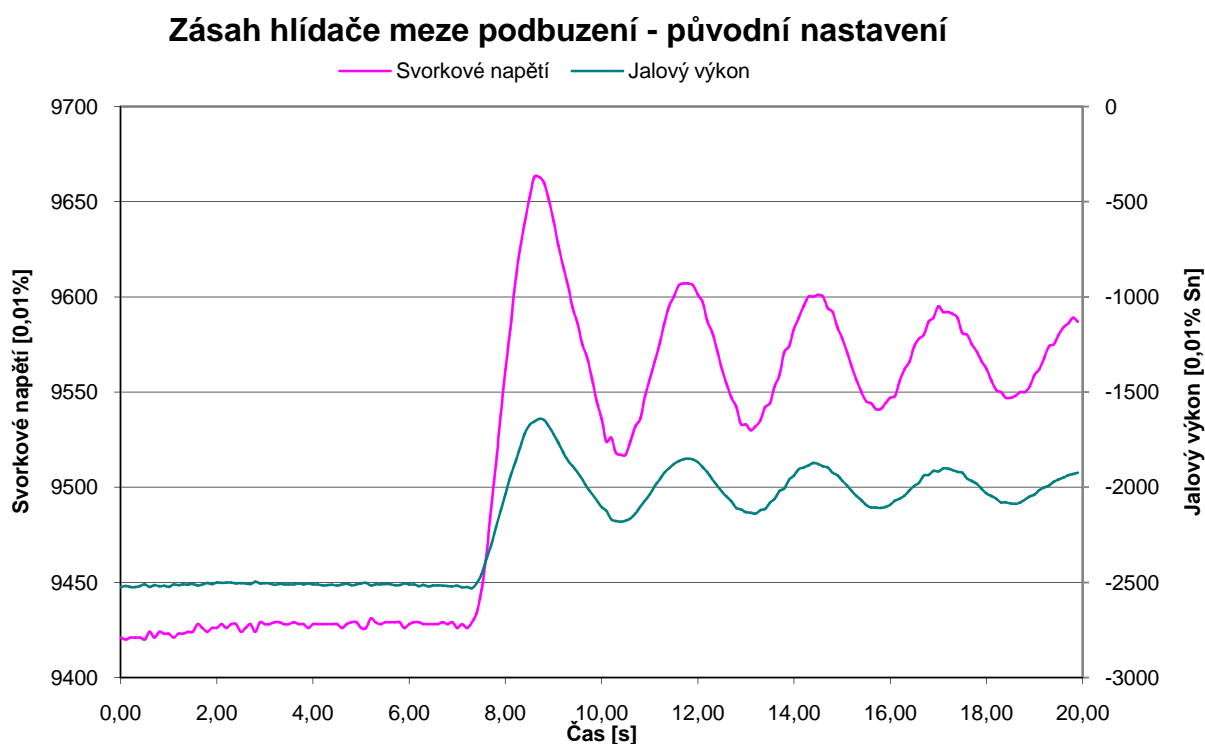


Graf 13 - Omezovač Statorového proudu

Pro test OSP byl stroj uveden do maximálního přebuzení. Kvůli malému činnému výkonu a omezení svorkového napětí bylo možné dosáhnout pouze 26 % svorkového proudu. Poté se přímým zásahem do nastavení regulátoru změnila mez omezovače z původní hodnoty na  $I_{REF} = 20 \% I_{fn}$ . Tím došlo k překročení limitu a spuštění časovače. Po odčarování omezovač stáhl rotorový proud na nastavených 20%  $I_{fn}$ . Průběh zásahu omezovače zobrazuje Graf 13. Rychlost změny svorkového proudu je velmi pozvolná, což odpovídá nastavenému integračnímu času.

### 3.5.5 Test hlídače meze podbuzení (HMP)

Základní informace, jako je struktura, nastavení, princip funkce a chování omezovače byly uvedeny v předchozích kapitolách. HMP, na rozdíl od proudových omezovačů, musí být odzkoušen na vypočítaných hodnotách, protože musí být ověřeno, že v průběhu zásahu HMP nedochází k aktivaci elektrických ochran a vypnutí generátorového vypínače. Podle kritérií interního předpisu firmy BRUSH SEM pro zkoušky při uvádění do provozu [11] musí odezva způsobená omezovačem co nejrychleji stabilizovat jalový výkon na minimální povolené hodnotě tak, aby nedošlo k asynchronnímu chodu stroje, popřípadě k prokluzu pólů. Zároveň při zásahu nesmí dojít k více než jednomu překmitu. Po ustálení je nutné zkontrolovat, zda v tomto stavu nedochází k náběhu elektrických ochran (ochrana při ztrátě buzení). Mezi nastavení omezovače a elektrické ochrany musí být vždy nastavené pásmo necitlivosti.

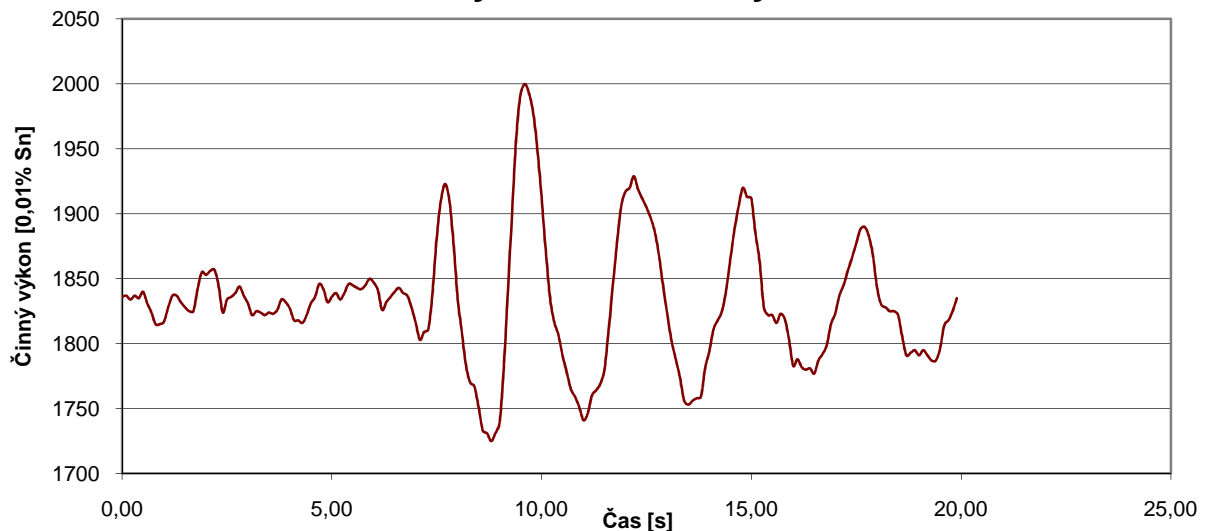


Graf 14 - Hlídač meze podbuzení -  $T_{UEL} = 1000 \text{ ms}$

Pro otestování omezovače byl stroj hluboce podbuzen, až v blízkosti omezovače podbuzení (-42 MVar). Poté byla provedena změna přímky hranice omezovače z původní hodnoty na  $Q1 = -20,00 \%Sn$ . Tím se nasimuloval náhlý napěťový skok na síti (pokles jalového výkonu) a došlo k aktivaci omezovače. HMP s původním nastavením na tento skok zareagoval rychlým, ale nestabilním zregulováním napětí,

keré naštěstí přešlo do tlumených kmitů a tím pádem nedošlo k odstavení stroje. Za zmínku stojí i rozkmitání činného výkonu stroje (rozkmit 3,5 MW), kterého bylo dosaženo periodickými změnami jalového zatížení a tudíž nechtěnou podporou kývání zátěžného úhlu stroje. Toto kývání činného výkonu zobrazuje Graf 15.

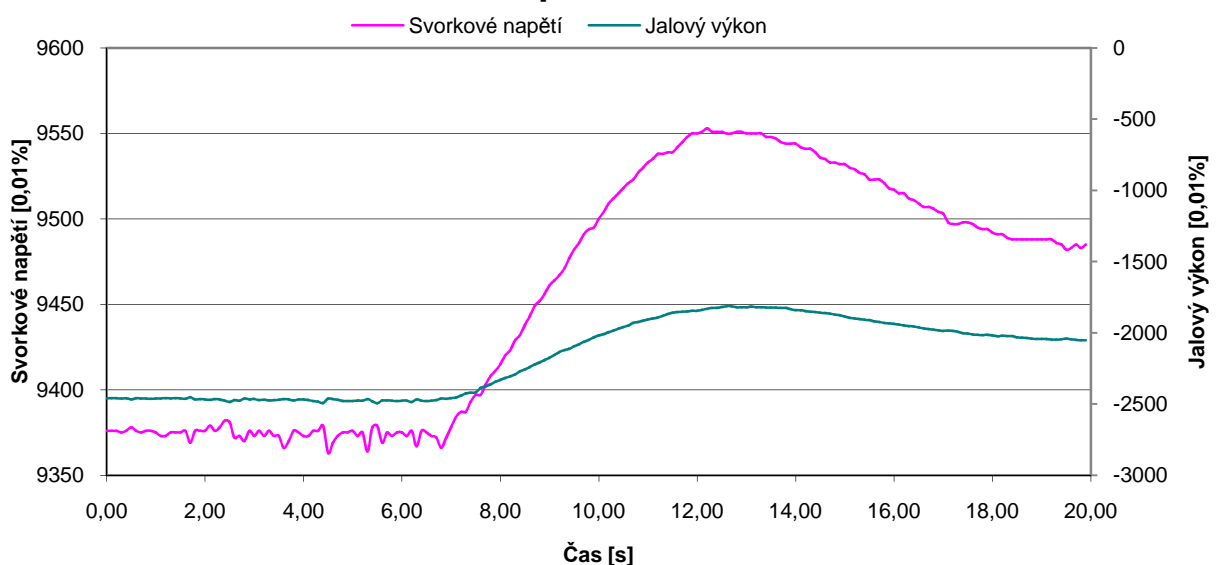
### Zásah hlídače meze podbuzení - původní nastavení Rozkývání činného výkonu



Graf 15 - Hlídač meze podbuzení - rozkývání činného výkonu

Po neúspěšné zkoušce byl upraven integrační čas omezovače  $T_{UEL}$  a test se zopakoval. S novým nastavením (viz Graf 16) došlo ke správné reakci omezovače a ke stabilizování jalového výkonu pouze s jedním překmitem.

### Zásah hlídače meze podbuzení - nové nastavení



Graf 16 - Hlídač meze podbuzení -  $T_{UEL} = 2000 \text{ ms}$

### 3.5.6 Ostatní zkoušky

Na výkonu je prováděna celá řada dalších testů pro ověření všech funkcí budící soupravy. Při těchto zkouškách většinou nedochází k zásadním úpravám v nastavení. Účel těchto zkoušek je v první řadě prokázat správnou funkci budící soupravy. Každou z výše i níže uvedených zkoušek je nutné opakovat pro oba kanály budící soupravy.

#### Ostatní zkoušky:

- Omezovač svorkového napětí
- Omezovač přesycení
- Zkouška monitorů přepětí, přesycení, podbuzení, přebuzení
- Q regulace
- PF regulace
- Manuální regulace
- Test regulace  $Q = 0$
- Beznárazový přechod mezi regulačními módy
- Ztráta výkonového napájení aktivního měniče
- Vypínací zkoušky z různých výkonů
- Zkouška nadřazené regulace (ASRU)

Celý protokol o uvedení do provozu spolu se všemi záznamy naměřených průběhů je k dispozici na samostatném CD nosiči, který tvoří elektronickou přílohu diplomové práce (Příloha 5).

## 4 Optimalizace regulační smyčky a PSS

Nastavení regulační smyčky a efektivita systémového stabilizátoru činného výkonu jsou spolu velmi úzce propojeny. Čím lépe (rychleji) bude nastavena samotná regulační smyčka, tím efektivněji bude pracovat PSS. Optimalizace znamená nalezení vhodného poměru mezi rychlostí regulace, stabilitou a samotným průběhem regulace, který by měl odpovídat normám. Tato kapitola se zaměřuje na detailní popis regulační smyčky a jejího výchozího nastavení. Jsou zde uvedeny způsoby, kterými lze regulační smyčku urychlit nebo naopak utlumit tak, aby se dosáhlo požadovaných vlastností systému. Dále je zde uveden princip funkce systémového stabilizátoru činného výkonu a také jsou zde uvedeny způsoby měření stability uzavřené regulační smyčky. Tyto teoretické znalosti jsou pak aplikovány při měření a nastavení regulátoru PRISMIC A50.

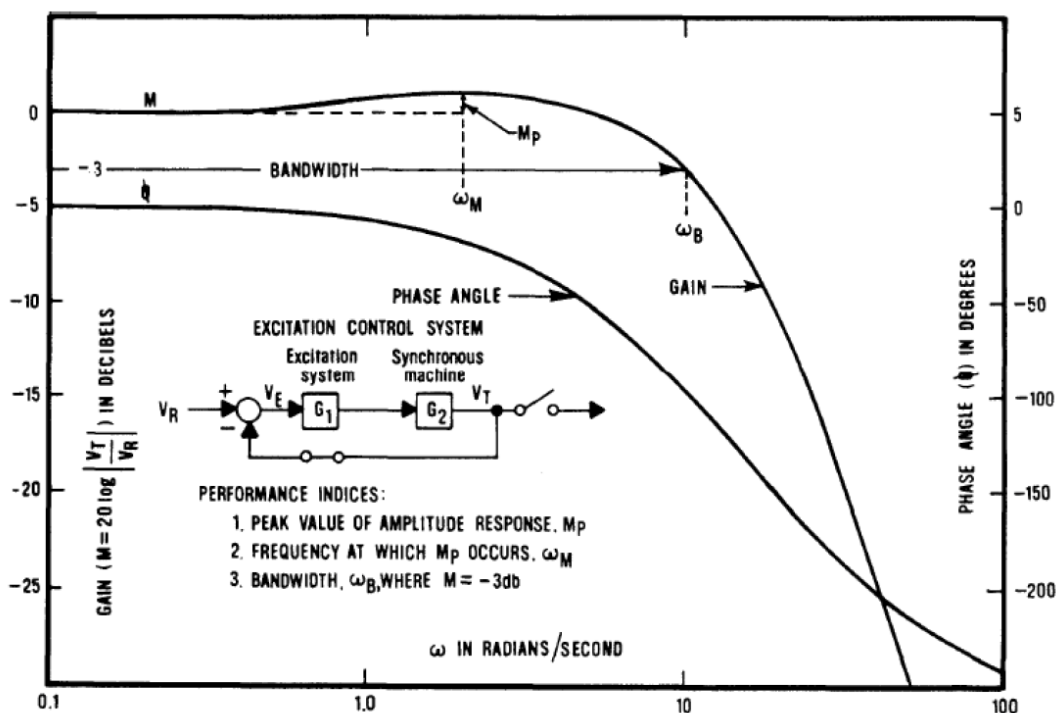
### 4.1 Frekvenční charakteristika

Frekvenčně závislý vztah zisku a fáze mezi ustálenými sinusovými vstupy do regulační smyčky a výslednými výstupy svorkového napětí se nazývá frekvenční charakteristika přenosu systému. Lze zkoumat frekvenční charakteristiku uzavřené nebo otevřené regulační smyčky. Tyto charakteristiky jsou velice užitečné pro hodnocení kvality regulace budících systémů.

V praxi se pro hodnocení kvality regulace používá nejčastěji frekvenční charakteristiky uzavřené regulační smyčky. Pro sestavení frekvenční charakteristiky uzavřené smyčky vycházíme z měření hodnot (viz Obr. 21):

$V_T$  = Měřená hodnota svorkového napětí generátoru  
 $V_n$  = Výstupní signál z generátoru signálů injektovaný do sumačního bodu

Příklad frekvenční charakteristiky uzavřené smyčky z normy IEE421.2-1990 [6] je uveden na Obr. 19.



Obr. 19 - Frekvenční charakteristika uzavřené smyčky [6]

**Gain** = Zisk regulační smyčky

**Phaseangle** = Fázový posuv

**Brandwith** = Šířka pásma

Zde jsou nejdůležitějšími parametry šířka pásma při poklesu o 3 dB  $\omega_B$ , maximální hodnota zisku  $M_p$  a frekvence  $\omega_m$ , ve které je dosaženo maximálního zisku  $M_p$ .

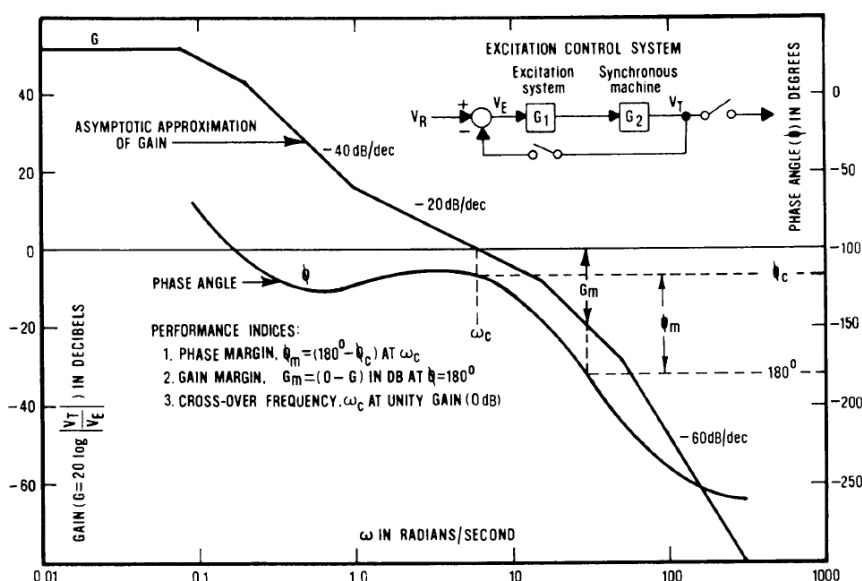
Maximální hodnota zisku  $M_p$  může být měřítkem relativní stability, protože souvisí s tlumením systému uzavřené smyčky. Zvýšením  $M_p$  se snižuje tlumení v systému tak, že při hodnotách  $M_p > 4$  dB může docházet k velkým překmitům při dynamické odezvě. Norma IEE421.2-1990 [6] udává, že správně nastavený systém by měl mít  **$0,83 \text{ dB} < M_p < 4,0 \text{ dB}$** .

Šířka pásma  $\omega_B$  je velice významný ukazatel rychlosti odezvy, protože přímo ovlivňuje dobu náběhu  $T_r$  a rychlost dynamické odezvy systému. Dále platí, že s velikostí součinu  $T_r \cdot \omega_B$  roste velikost překmitu v dynamické odezvě. Pro rychlou regulaci je zásadní dosáhnout co nejširší šířky pásma  $\omega_B$ . [6]

Pro zjištění stability regulační smyčky se používá měření frekvenční charakteristiky otevřené smyčky. Typickou frekvenční charakteristiku otevřené smyčky zobrazuje Obr. 20.

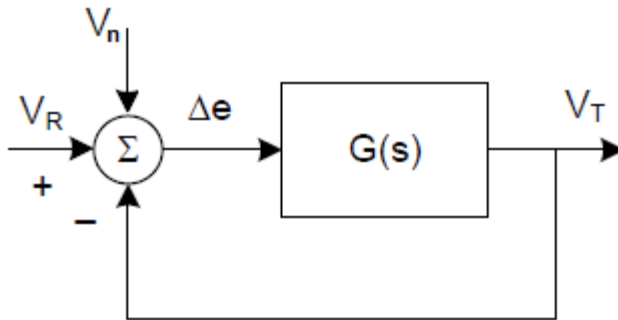
Zde je nutné definovat některé pojmy – „**Bezpečnost v zesílení (GainMargin)** měří robustní stabilitu pro frekvence, na kterých je fáze  $180^\circ$ . To kvantifikuje robustní stabilitu pro případ perturbací čistě v zesílení přenosu otevřené smyčky a nikde jinde. **Bezpečnost ve fázi (PhaseMargin)** měří robustní stabilitu pro frekvence, na kterých je zesílení přenosu otevřené smyčky jednotkové (to jsou takzvané přechodové frekvence). Tak kvantifikuje robustní stabilitu pro případ perturbací čistě ve fázi přenosu otevřené smyčky a nikde jinde.“ [16]

Pro vyhodnocení stability regulace se vychází z Nyquistova kritéria stability. Norma IEE421.2-1990 [6] udává, že pro stabilní chod regulační smyčky by bezpečnost v zisku měla být 6 dB nebo více a bezpečnost ve fázi  $40^\circ$  a více. Bohužel při zkouškách na elektrárně není možné přímo měřit frekvenční charakteristiku otevřené smyčky, protože v případě nestability a rozoscilování výstupu regulátoru by mohlo dojít k poškození generátoru. Z praktického hlediska při uvádění do provozu a nastavování regulační smyčky se stabilita systému určuje pomocí hodnotících kritérií na dynamickou odezvu při skokových změnách žádané hodnoty napětí.



Obr. 20 - Frekvenční charakteristika otevřené smyčky [6]

Jako jistou substituci přímého měření frekvenční charakteristiky otevřené smyčky uvádí norma *IEE421.2-1990* [6] možnost tuto charakteristiku určit z měření na uzavřené regulační smyčce. Za předpokladu, že známe průběh výstupního napětí, žádané hodnoty napětí a také je známá velikost vstupního signálu ze šumového generátoru, lze dopočítat odchytku, potřebnou ke stanovení frekvenční charakteristiky otevřené smyčky, viz Obr. 21.



Obr. 21 - Měření frekvenční charakteristiky

**Pro určení frekvenční charakteristiky otevřené smyčky vycházíme z hodnot:**

- $V_T$  = Měřená hodnota svorkového napětí generátoru
- $V_n$  = Výstupní signál z generátoru signálů injektovaný do sumačního bodu
- $\Delta e$  = Signál do regulátoru
- $V_R$  = Žádaná hodnota svorkového napětí generátoru

**Kde:**

$$\Delta e = V_R + V_n - V_T \quad (4.1)$$

Pak je frekvenční charakteristika otevřené smyčky určena z hodnot  $\Delta e$  a  $V_T$ . Nejedná se ovšem o „čistě“ otevřenou smyčku, protože se zde stále uplatňuje zpětná vazba stabilizace od budícího proudu, která je v regulátoru vnořena. Nicméně i přes tento fakt má tato frekvenční charakteristika velkou vypovídající hodnotu o stabilitě regulátoru.



#### 4.1.1 Měření frekvenční charakteristiky

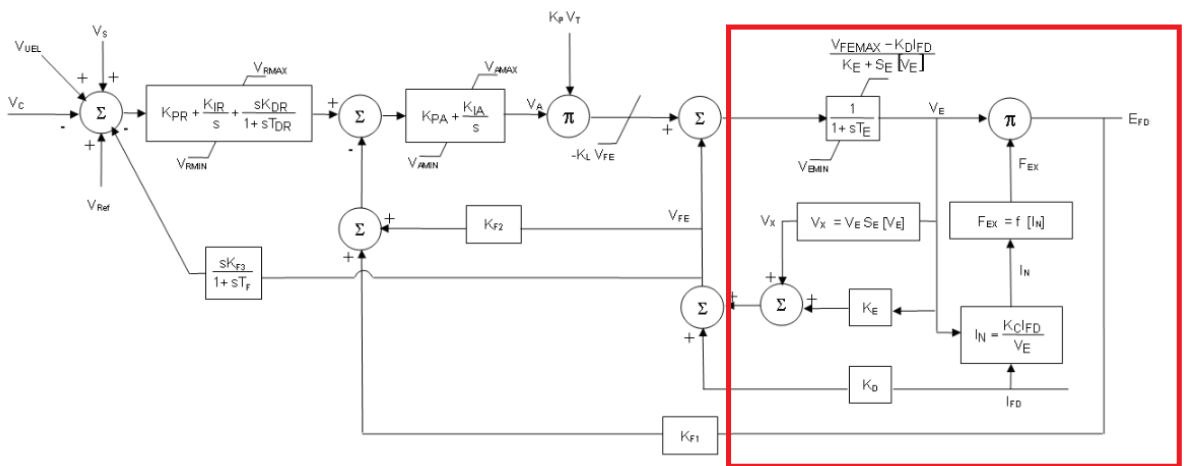
Frekvenční charakteristika otevřené i uzavřené smyčky se měří připojením generátoru signálů do sumačního bodu regulátoru. Měří se výstupní signál generátoru signálů  $V_n$ , žádaná hodnota napětí  $V_R$  (ta by měla být konstantní) a výstupní napětí generátoru  $V_T$ . Měření je znázorněno na Obr. 21. V zásadě jsou dva způsoby, jak frekvenční charakteristiku proměřit:

**Měření frekvenční charakteristiky bod po bodu** - při měření tímto způsobem jsou do sumačního bodu injektovány postupně signály se sinusovým průběhem od 0,1 Hz až do 10 Hz a měří se výstupní napětí. Z těchto naměřených průběhů se poté stanoví frekvenční charakteristika, kde měření na každé frekvenci odpovídá jednomu bodu charakteristiky. Tento způsob je sice velmi přesný, ale extrémně časově náročný. Z toho důvodu se v měřeních při optimalizacích budících souprav nepoužívá.

**Připojení šumového signálu** - při měření tímto způsobem je do sumačního bodu regulátoru přiveden speciální šumový signál, který obsahuje celé spektrum frekvencí od 0,1 Hz až do 10 Hz. Tento signál je zaznamenáván spolu s výstupním napětím generátoru. Zpracování, stejně jako vytvoření tohoto signálu je mnohem složitější, než u první zmíněné hodnoty. Při analýze dat se používá Fourierovy transformace. Tato metoda není tak přesná, jako při měření bod po bodu, ale její velikou výhodou je rychlost získání dat. Měření se po aktivaci šumového generátoru provádí přibližně jednu minutu. Tato metoda měření byla použita pro měření frekvenčních charakteristik v této práci.

## 4.2 Hlavní regulační smyčka

Za běžného provozu budící soupravy má regulátor P nebo PI charakter. Jak již bylo zmíněno v předchozích kapitolách, P regulace se uplatňuje pro regulaci naprázdno a PI regulace ve stavu regulace na síti. Použité regulační schéma je definováno v normě *IEEE 421.5 - 2005* [9], jedná se o schéma **AC7B**, které znázorňuje Obr. 22.

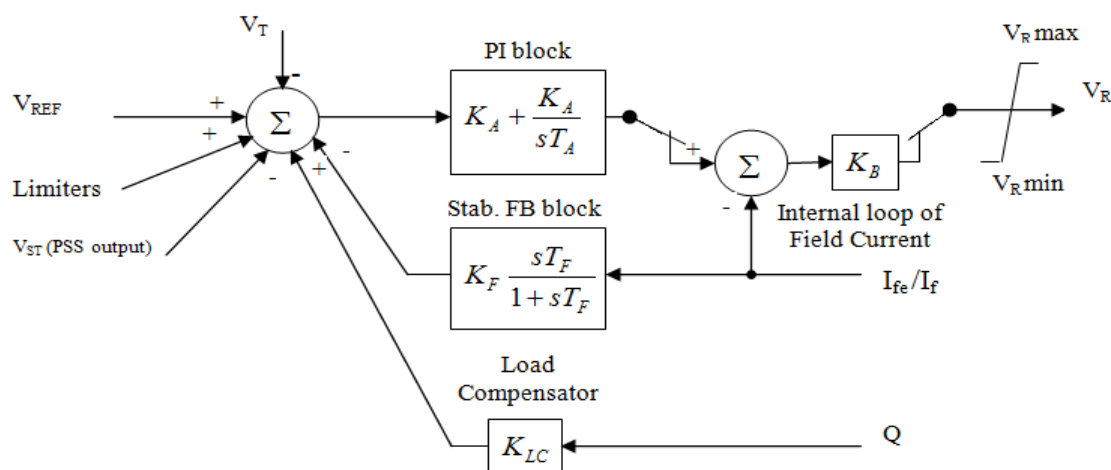


Obr. 22 - Schéma regulace AC7B podle IEEE 421.5. [11]

Toto schéma nezahrnuje pouze budící soupravu, ale i blok generátoru (respektive budiče generátoru), který reprezentuje prostor ohraničený červenou čarou. Pro budící systémy s budičem je obecně doporučeno použít regulátor s PID charakterem přenosu. Regulátor PRISMIC A50 ve schématu AC7B používá pouze PI charakter, proto je člen  $K_{DR}=0$ . Derivační člen je však nahrazen vnitřní regulační sub-smyčkou regulující budicí proud budiče. Do sumárního bodu pak ještě vstupuje derivační stabilizační zpětná vazba od budícího proudu budiče. V zásadě se tedy jedná o kaskádní spojení PI regulátoru napětí a proporcionálního regulátoru proudu. Zpětná vazba od budícího proudu rotoru přes blok  $K_{F1}$  není realizována, protože tento typ generátoru nebyl vybaven měřením rotorových veličin.

#### 4.2.1 Nastavení hlavní regulační smyčky

Pro přehlednost bylo regulační schéma AC7B přepracováno do blokového schématu hlavní regulační smyčky.



Obr. 23 - Zjednodušené schéma napěťového regulátoru [11]

Pro základní nastavení složek PI regulátoru by mělo platit, že poměr mezi integračním členem a proporcionálním zesílením  $K_{PR} / K_{IR}$  by měl být 4 / 1. [11] Vzájemný vztah mezi parametry značených v blokovém schématu AC7B a zjednodušeném schématu AVR s jejich továrním nastavením je následující:

$K_{PR} \approx K_A$	= 10	[1]	proporcionální zisk regulátoru napětí
$K_{IR} \approx T_A$	= 4000	ms	integrační časová konstanta regulátoru napětí
$K_{F3} \approx K_F$	= 10	[1]	zisk stabilizační ZV od budicího proudu
$T_F \approx T_F$	= 1000	ms	časová konst. stabilizační ZV od budicího proudu
$K_{PA} \approx K_B$	= 3	[1]	proporcionální zisk regulátoru budicího proudu
$K_{DR}$	= 0		derivační složka regulátoru - není na obrázku

Regulátor PRISMIC A50 je digitální kontrolér, to znamená, že integrace nebo derivace signálů je prováděna programem, který je nahrán v paměti regulátoru. Díky tomu získáváme velkou volnost při nastavování jednotlivých parametrů regulační smyčky. Pro správné nastavení regulátoru je nutné si uvědomit, jak se které složky regulační smyčky chovají. Nesmíme zapomenout, že chování regulátoru se velmi liší při regulaci na prázdko a v zatíženém stavu. Toto chování částečně popisuje **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů..** Je zde popsáno chování regulační smyčky při změnách parametrů PI regulátoru. Tato tabulka je pouze **orientační** a vychází z teoretických

znalostí a zároveň ze zkušeností s nastavením regulátoru se schématem AC7B. Z této tabulky však není možné „slepě“ vycházet při nastavování regulátoru, protože chování jednotlivých částí regulátorů je velmi úzce provázáno a všechny parametry se navzájem ovlivňují. V některých případech je například možné, že zvýšení proporcionálního zisku zvýší stabilitu regulační smyčky.

Tabulka 2 - Vliv jednotlivých parametrů na chování regulátoru

Změna parametru	Rychlost odezvy		Rychlost stabilizace		Překmit		Stabilita
	Naprázdko	Při zatížení	Naprázdko	Při zatížení	Naprázdko	Při zatížení	
Zvětšení proporcionálního zisku regulátoru budicího proudu	zlepšení	zlepšení	nerozhoduje	zhoršení	nerozhoduje	nerozhoduje	zhoršení
Zvětšení proporcionálního zisku regulátoru napětí	zlepšení	zlepšení	zlepšení	zlepšení	zhoršení	zhoršení	zhoršení
Zvýšení integrační časové konstanty regulátoru napětí	nerozhoduje	zhoršení	zhoršení	zhoršení	zlepšení	zlepšení	zlepšení
Zvýšení zisku stabilizační ZV od budicího proudu	zhoršení	zhoršení	zlepšení	zlepšení	zhoršení	zhoršení	zlepšení
Zvýšení časové konstanty stabilizační ZV od budicího proudu	zhoršení	zlepšení	zhoršení	zlepšení	zhoršení	zhoršení	zlepšení

**P regulátor** – V uzavřeném obvodu pracuje s trvalou regulační odchylkou, ta je přímo úměrná akční veličině. Se zvyšujícím se zesílení klesá regulační odchylka a rychlost regulace se urychluje. Nevýhodou zvyšování zesílení (zisku) je snižování stability regulačního obvodu. Nestabilní nastavení P regulátoru v praxi způsobuje, že regulovaná veličina kmitavě narůstá, v krajních případech může i narůstat bez kmitání až ke kolapsu systému.

**I regulátor** - Používá se k odstranění trvalé regulační odchylky P regulátoru. Integrační složka v regulátoru neustále mění akční veličinu, dokud není dosaženo nulové regulační odchylky. Snižováním integrační časové konstanty se rychlost regulace zvyšuje, ale roste kmitavost regulačního pochodu.

**D regulátor** - používá se pro zrychlení regulačního pochodu a tím ke zlepšení jakosti regulačního pochodu. Čím více se derivační složka uplatňuje, tím rychleji regulátor reaguje na regulační odchylku. Největší nevýhodou D regulátoru je, že zesiluje šum. Samostatný D-regulátor nepoužívá, D-složka se přidává do PI regulátoru pro zlepšení kvality regulace.

### 4.3 Rychlost a stabilita regulace

Při optimalizaci budicí soupravy se řeší zejména rychlost a stabilita regulace. Čím rychlejší budicí souprava bude, tím lépe bude zvládat regulovat různé přechodové stavy na síti a tím větší bude i mez umělé stability generátoru. Pro zkoušení rychlosti regulace není možné simulovat náhlé změny na síti, proto se vyšetřují přechodové stavy při skokových změnách žádané hodnoty. Samozřejmě regulace musí být nejen rychlá, ale zároveň i stabilní, aby nedocházelo k nestabilnímu chování při velkých změnách na síti nebo při velkých skocích žádané hodnoty. Nejčastěji se provádí zkoušky s aktivní zpětnou vazbou, neboli zkoušky uzavřené regulační smyčky. U zkoušek dynamických odezev na skokové změny se zanedbávají nelinearity stroje (sycení). [6]

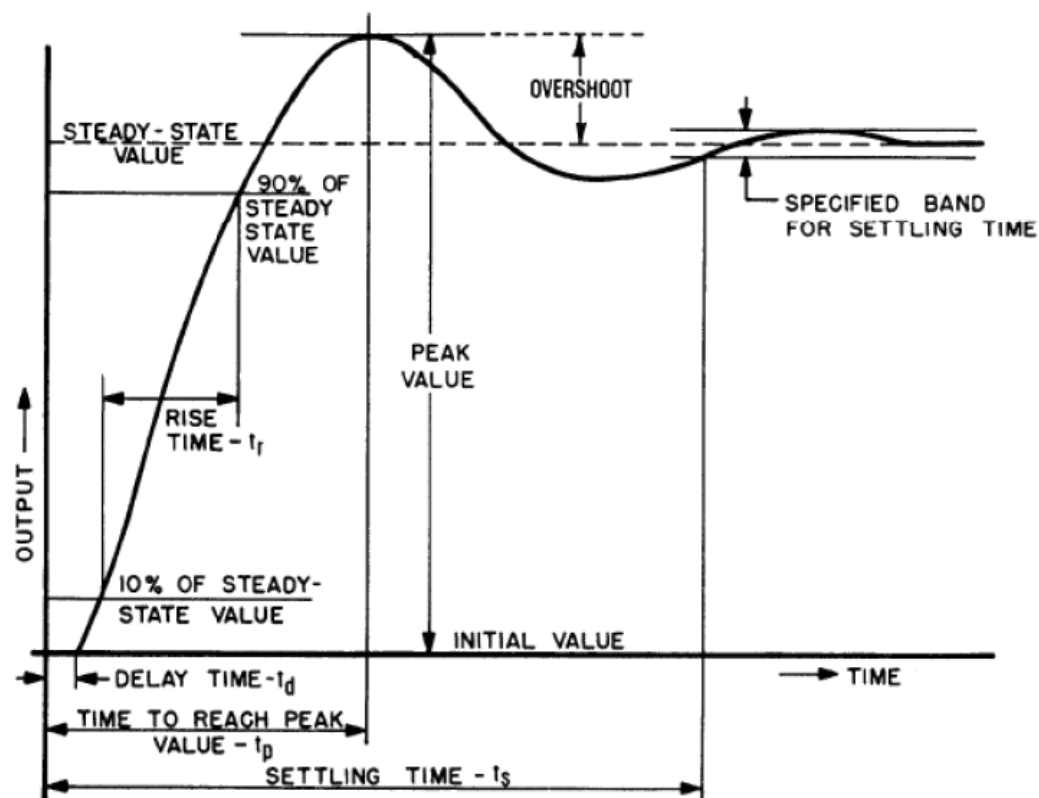
#### **Kvalita regulace:**

Pro zjišťování kvality regulace definuje *norma IEEE 421.2*. „**Small signal performance criteria**“ (=malé změny buzení) [6] jako odpověď z řídicího systému, buzení, budicí soustavy, nebo prvky s budicí soustavy na signály, které jsou tak malé, že při analýze odezvy není třeba brát v úvahu nelinearity. Malé změny buzení z budicího systému nebo jeho součástí mohou být posouzeny z dynamických změn nebo frekvenčních charakteristik.

Typická dynamická odezva na skokovou změnu žádané hodnoty svorkového napětí v systému se zpětnou vazbou je znázorněna na Obr. 24.

#### **U vyšetření průběhu je zásadní:**

- Doba nárůstu napětí z 10 % na 90 % žádané hodnoty
- Překmit
- Maximální hodnota přeregulace
- Čas potřebný k ustálení napětí



Obr. 24 - Dynamická odezva na skokovou změnu žádané hodnoty napětí [6]

**Steady state value** = Nová požadovaná hodnota napětí

**Risetime** = Doba nárůstu napětí z 10% na 90% žádané hodnoty

**Overshoot** = Překmit při přeregulaci

**Settling time** = Čas potřebný k ustálení napětí

**Peak Value** = Maximální hodnota přeregulace

Správně nastavený regulátor by měl mít co možná nejkratší dobu nárůstu napětí s přijatelným překmitem. Ten by v ideálním případě neměl být vyšší než 15% z hodnoty skoku. V době ustálení by pak nemělo dojít víc jak ke dvěma překmitům. [6] Při optimalizaci regulační smyčky se snažíme maximálně urychlit právě rychlost náběhu regulace. To umožňuje budící soupravě rychleji reagovat na změny na síti a tím pádem i při spuštěném PSS účinněji tlumit kvy činného výkonu.

### 4.3.1 Optimalizace hlavní regulační smyčky

První krok optimalizace regulační smyčky byl popsán a učiněn již v kapitolách 3.3.2 a 3.3.3 při úpravách zisků proporcionální regulace napěťové a proudové smyčky. Původní zisky byly výrazně navýšeny tak, aby odpovídaly doporučeným hodnotám.

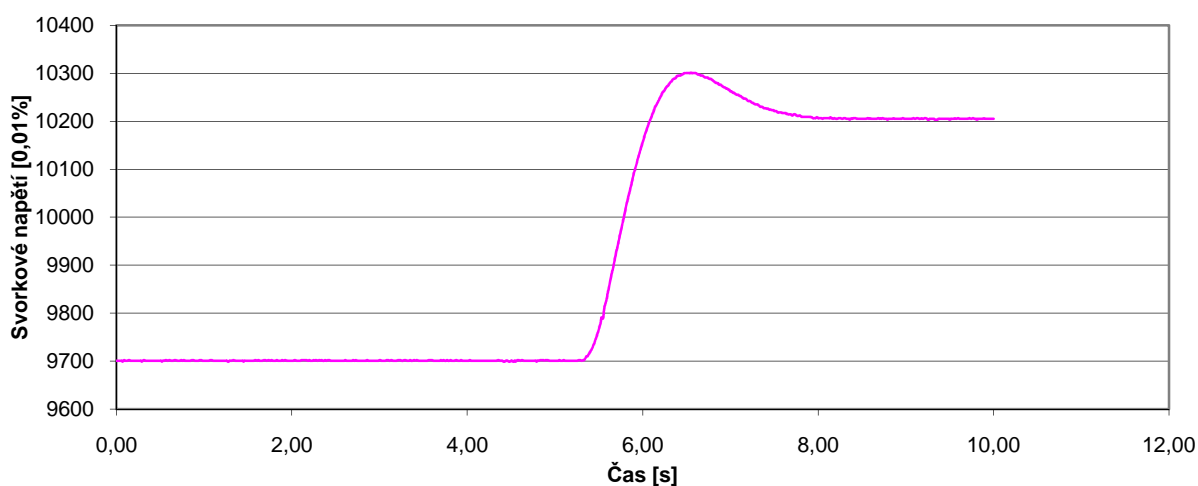
#### Změny provedené při běžném nastavení:

$K_{PR} \approx K_A$     10 => 14                    [1]    proporcionální zisk regulátoru napětí

$K_{PA} \approx K_B$     3 => 5,6                    [1]    proporcionální zisk reg. budícího proudu

První měření tedy neodpovídá regulátoru před optimalizací, ale už regulátoru s doporučeným nastavením. Pro otestování dynamické odezvy na skokovou změnu žádané hodnoty byla použita podobná metodika, která byla popsána v kapitole 3.3.4. Namísto dvojitého skoku byl použit pouze jednoduchý skok – změna žádané hodnoty z 97 %  $U_t$  na 102 %  $U_t$  a byla změřena dynamická odezva systému. Její průběh je zobrazen v Graf 17. Doba nárůstu  $T_r$  je počítána jako doba, za kterou se svorkové napětí zvýší z 97,5 % na 101,5 %.

#### Dynamická odezva na skok žádané hodnoty napětí - před optimalizací



Graf 17 - Dynamická odezva na skok žádané hodnoty o 5 % před optimalizací

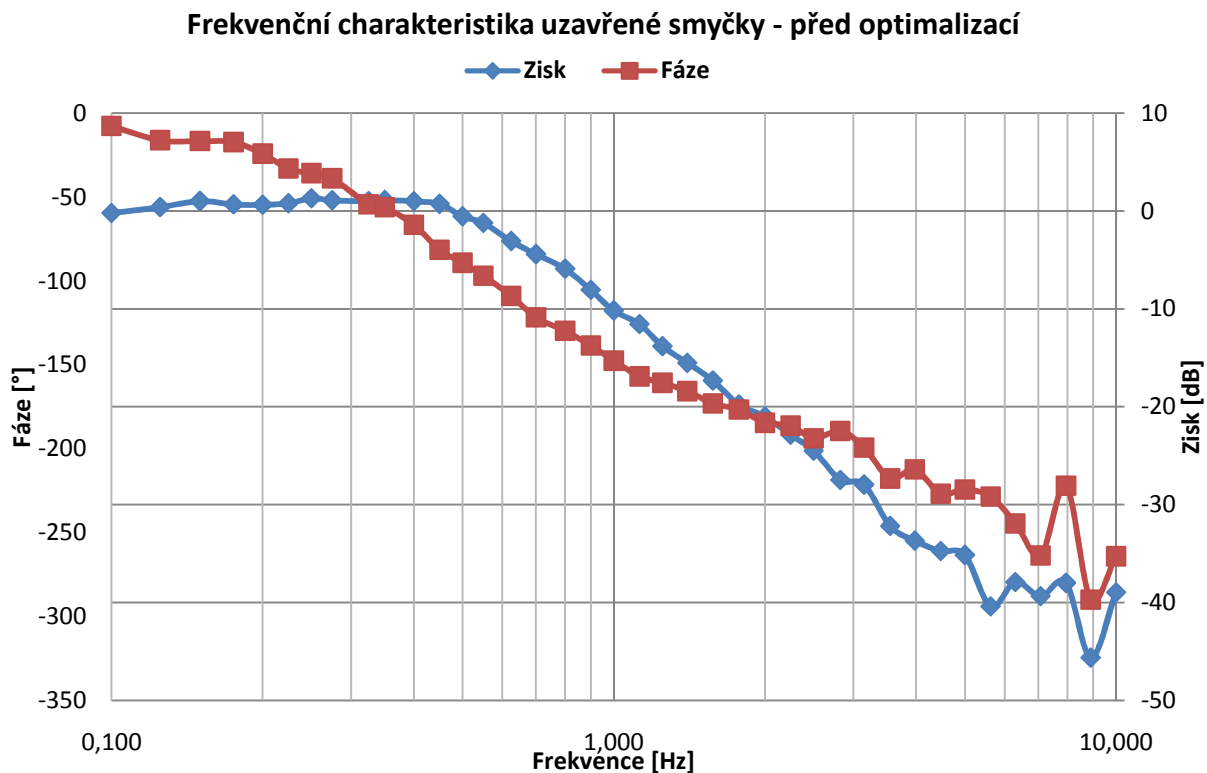
#### Z naměřených hodnot bylo odečteno:

Doba náběhu:  $T_r = 0,53$  s

Doba ustálení:  $T_s = 2,54$  s

Maximální hodnota:  $U_{max} = 103,0$  % => překmit = 20 %

Po zkoušce dynamické odezvy byl do sumárního bodu připojen šumový generátor, za pomoci kterého se proměřila frekvenční charakteristika uzavřené smyčky, jejíž průběh znázorňuje Graf 18.



Graf 18 - Frekvenční charakteristika uzavřené smyčky před optimalizací

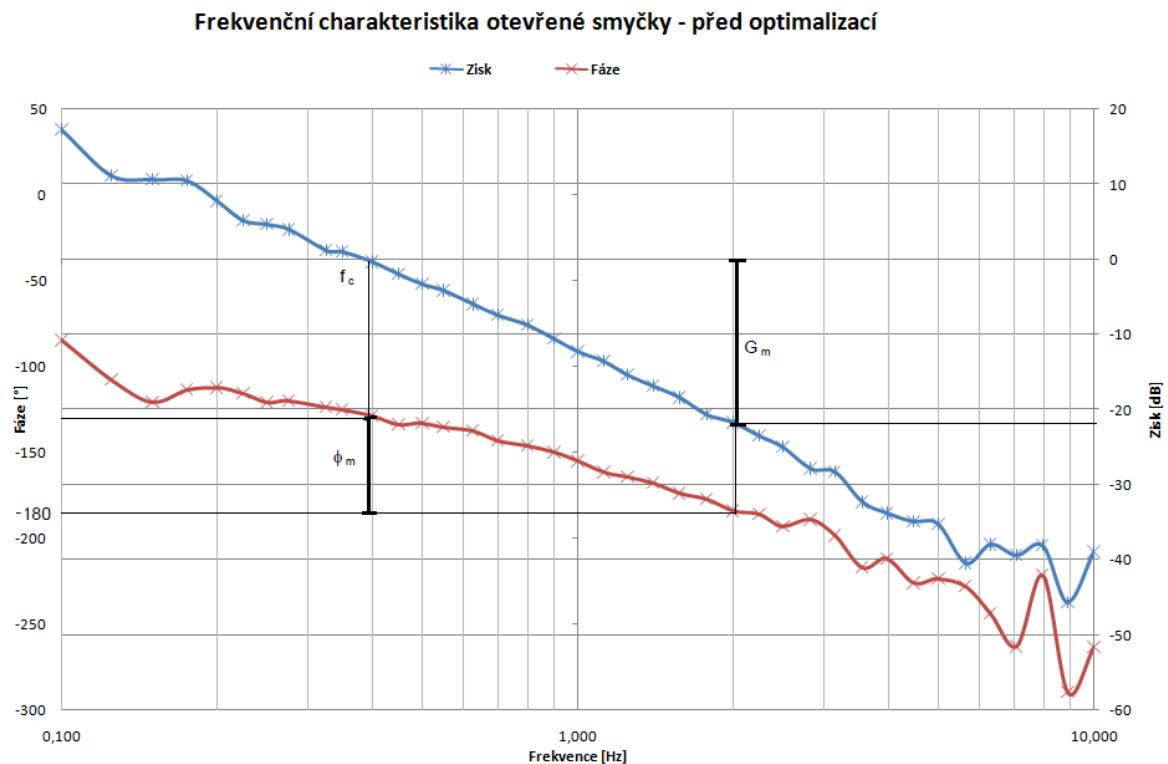
**Z naměřených hodnot bylo odečteno:**

Maximální zisk:  $M_p = 1,311$  dB

Šířka pásma:  $\omega_B = 0,625$  Hz



Pro ověření stability regulačního obvodu byla určena frekvenční charakteristika otevřené smyčky za použití zjednodušení, které bylo popsáno v kapitole 4.1. Frekvenční charakteristiku otevřené smyčky před optimalizací zobrazuje Graf 19.



Graf 19 - Frekvenční charakteristika otevřené smyčky - před optimalizací

#### Z naměřených hodnot bylo odečteno:

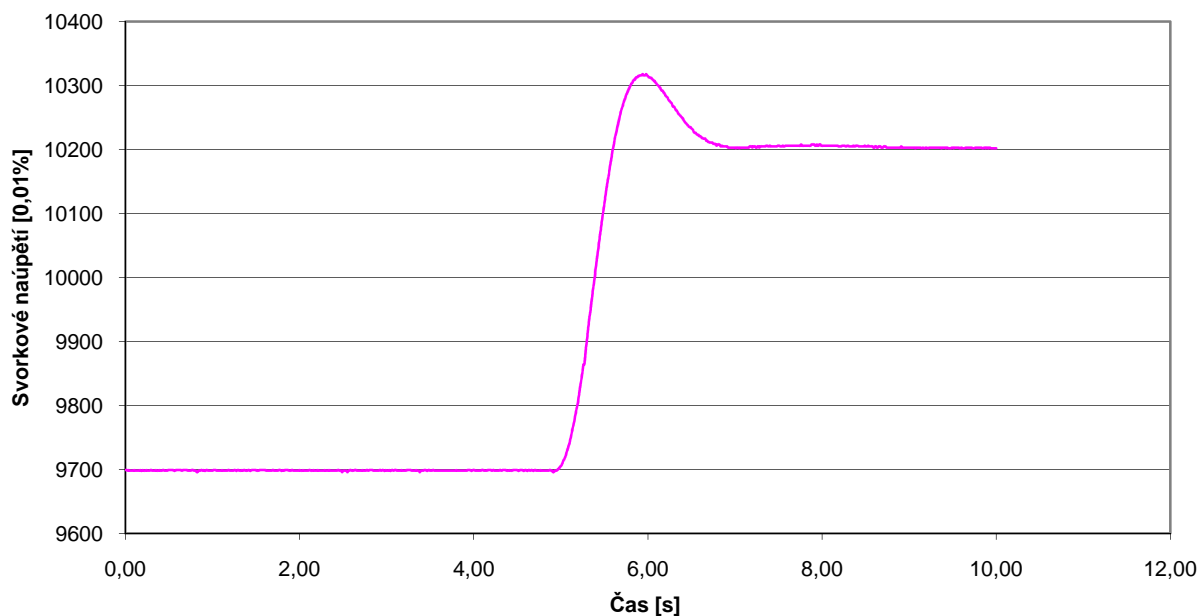
Bezpečnost ve fázi:  $\varphi_m = (180^\circ + \varphi_c)$  při  $f_c = 180 - 125 = 55^\circ$

Bezpečnost v zisku:  $G_m = 22 \text{ dB}$

Po naměření frekvenční charakteristiky a dynamické odezvy byla provedena optimalizace regulační smyčky. Ta vycházela z teoretických předpokladů zmíněných v kapitole 0 a ze zkušeností s chováním obdobných systémů. Bylo provedeno několik iterací, kdy se provádělo experimentální nastavení smyčky a následně byla testována dynamická odezva. V první řadě bylo měněno proporcionální zesílení napěťové smyčky. Značného urychlení bylo pak dosaženo i snížením vlivu stabilizační zpětné vazby od budícího proudu.

**Provedené změny:**

$K_{PR} \approx K_A$	14 =>25	[1]	proporcionální zisk regulátoru napětí
$K_{F3} \approx K_F$	10 =>8	[1]	zisk stabilizační ZV od budicího proudu

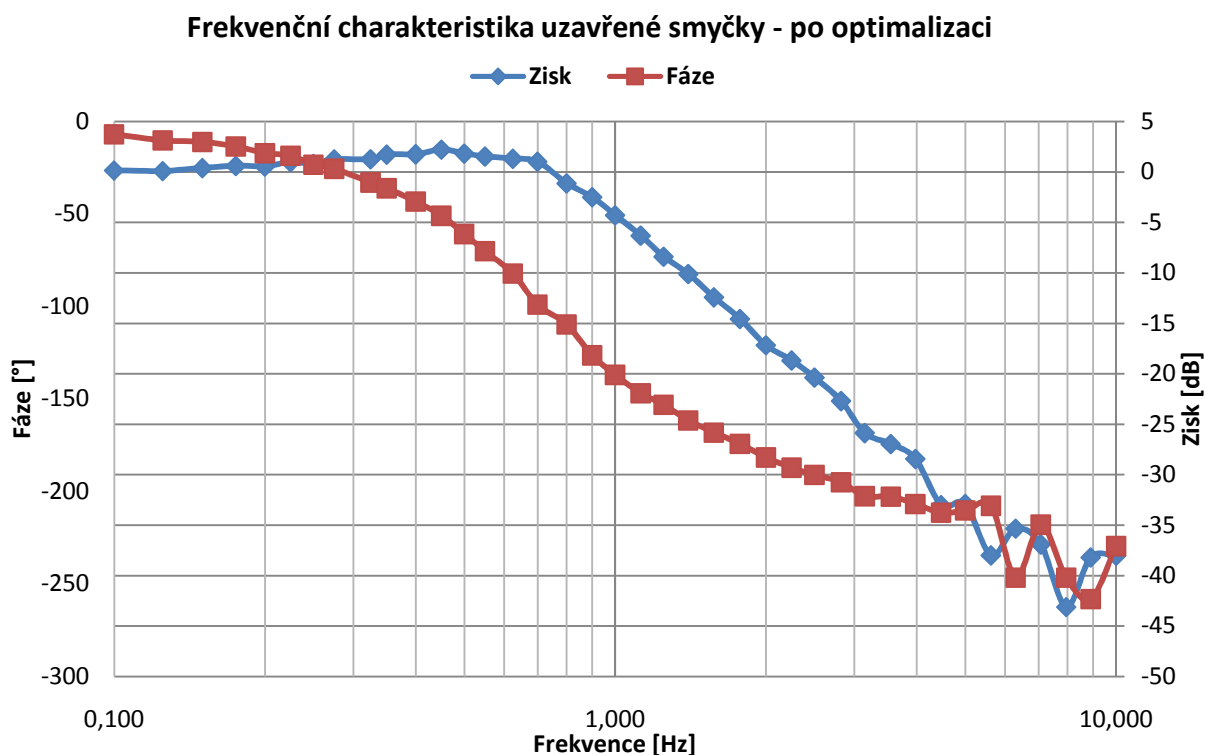
**Dynamická odezva na skok žádané hodnoty napětí - po optimalizaci**

Graf 20 - Dynamická odezva na skok žádané hodnoty o 5 % po optimalizaci

**Z naměřených hodnot bylo odečteno:**Doba náběhu:  $T_r = 0,41$  sDoba ustálení:  $T_s = 1,74$  sMaximální hodnota:  $U_{max} = 103,1$  % => překmit = 22 %

Z naměřených hodnot vyplývá, že došlo k mírnému navýšení prvního překmitu oproti výchozímu stavu. Toto navýšení však úspěšně kompenzuje razantní snížení doby náběhu i doby stabilizace. Protože pro co nejlepší účinnost systémového stabilizátoru kyvů činného výkonu požadujeme rychlou odezvu a navíc je regulační proces stabilní bez překmitů, je toto zvýšení překmitu přijatelné.

Díky zlepšení sledovaných parametrů při dynamické odezvě lze očekávat i částečné zlepšení u průběhu frekvenční charakteristiky. Ta byla naměřena za použití stejných vstupních šumových signálů, se stejnou amplitudou jako u původního nastavení. Frekvenční charakteristiku uzavřené smyčky po optimalizaci zobrazuje Graf 21.



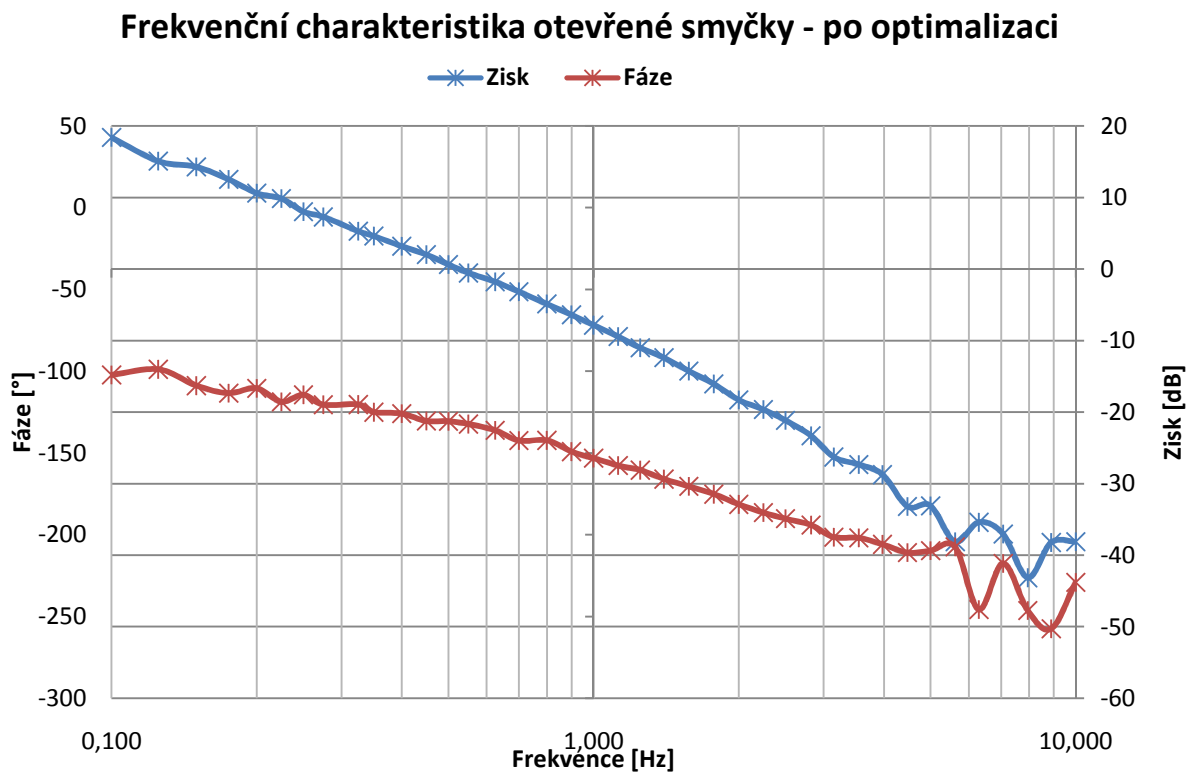
Graf 21 - Frekvenční charakteristika uzavřené smyčky – po optimalizaci

**Z naměřených hodnot bylo odečteno:**

Maximální zisk:  $M_p = 2,217$  dB

Šířka pásma:  $\omega_B = 0,91$  Hz

Pro ověření stability nového nastavení byla znovu vypočtena frekvenční charakteristika otevřené smyčky. Frekvenční charakteristiku otevřené smyčky po optimalizaci zobrazuje Graf 22.



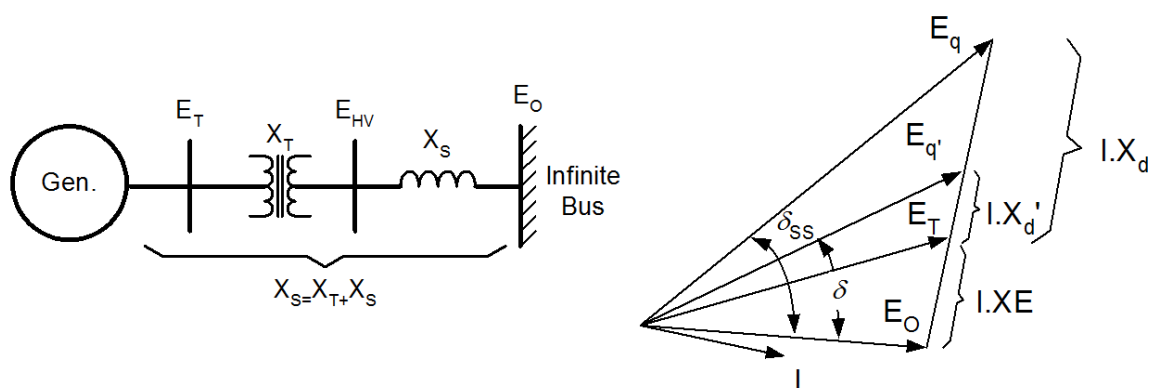
**Z naměřených hodnot bylo odečteno:**

Bezpečnost ve fázi:  $\varphi_m = (180^\circ + \varphi_c)$  při  $f_c = 180 - 132 = 48^\circ$

Bezpečnost v zisku:  $G_m = 18 \text{ dB}$

#### 4.4 Systémový stabilizátor činného výkonu (PSS)

Účelem systémového stabilizátoru činného výkonu je tlumit nízkofrekvenční kývání zátěžného úhlu rotoru, které je spojeno se vznikem kmitů činného výkonu. Správně nastavený PSS svou činností zdatelně zvětšuje oblast statické stability. Toho je dosaženo tím, že je do sumárního bodu regulátoru přiveden kompenzační signál od bloku PSS, který mění regulační odchylku  $\Delta e$  tak, aby stabilizátor vytvářel složku elektrického momentu, která působí proti změnám otáček rotoru. Pro činnost systémového stabilizátoru je tedy klíčové, že rychlými změnami buzení je možné krátkodobě ovlivnit elektrický výkon  $P_E$ . Tuto závislost popisuje Obr. 25 a rovnice 4.2 pro činný výkon stroje:



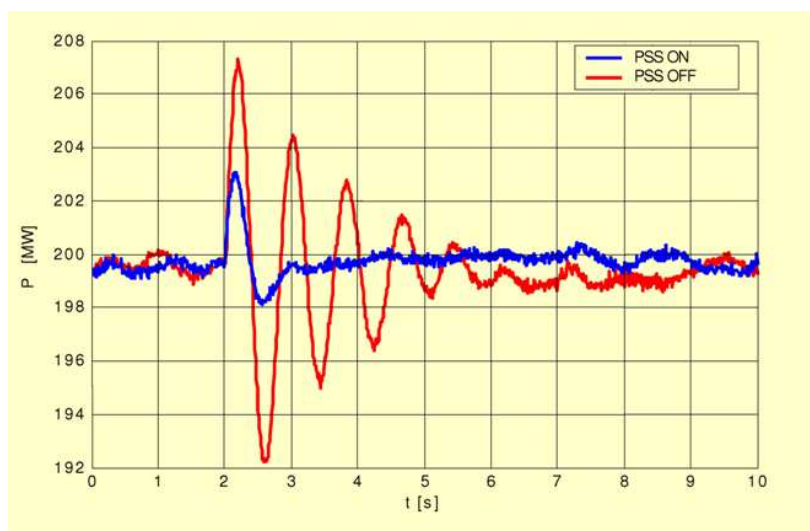
Obr. 25 - Princip činnosti PSS [15]

$$P_E = \frac{E'_q \cdot E_o}{X'_d + X_e} \cdot \sin \delta \quad (4.2)$$

Kde:

- $E_o$  Napětí sítě
- $E_T$  Svorkové napětí generátoru
- $E'_q$  Vnitřní napětí generátoru – za přechodovou reaktancí  
= **úměrné budícímu napětí**
- $E_q$  Vnitřní napětí generátoru – za synchronní reaktancí
- $\delta$  Zátěžný úhel (taktéž označován  $\beta$ )
- $X_d$  Synchronní reaktance
- $X'_d$  Přechodová reaktance

Porovnání odezvy činného výkonu při náhlé změně svorkového napětí na generátoru se zapnutým a vypnutým PSS u přímého buzení (blok 259MVA) je zobrazeno na Obr. 26. Jsou zde patrné velké překmity činného výkonu při vypnutém stabilizátoru. U bezkartáčového buzení takovéto odezvy při simulaci napěťového skoku není možné dosáhnout, protože, jak už bylo zmíněno v první kapitole, má oproti přímým budícím systémům pomalejší odezvu, a tím pádem i pomaleji mění zátěžný úhel. Proto jsou u bezkartáčového budícího systému změny činného výkonu při napěťovém skoku menší a zároveň je menší i efektivita tlumení systémového stabilizátoru.



Obr. 26 - Porovnání odezvy činného výkonu PSS ZAP/VYP [10]

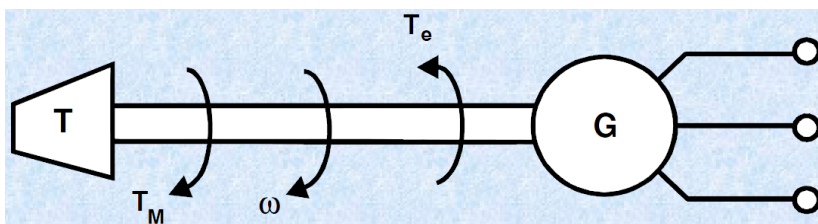
#### Frekvence kývání se dělí do tří skupin:

- Oscilace mezi bloky 1,5 – 3,0 Hz
- Vlastní oscilace bloku 0,7 – 2,0 Hz
- Oscilace mezi oblastmi ES 0,2 – 0,5 Hz

#### 4.4.1 Struktura a princip PSS2B

Norma IEE421.5-2005 [9] popisuje mnoho různých typů systémových stabilizátorů, které se navzájem liší svou stavbou, popřípadě i vstupními signály. Pro projekt Kladno K7 byl zvolen typ **PSS2B**. Tento typ PSS je navržen tak, aby využíval dvě vstupní veličiny, a to frekvenci generátoru  $f$  a činný výkon generátoru  $P$ . Výhodou PSS2B je, že potřebné veličiny jsou snadno měřitelné a eventuelní rušivé složky v signálu  $P_M$  (například torzní kmity hřídele) lze efektivně odfiltrvat.

Základní veličiny působící na hřídeli stroje zobrazuje Obr. 27:



Obr. 27 - Základní veličiny na hřídeli stroje [10]

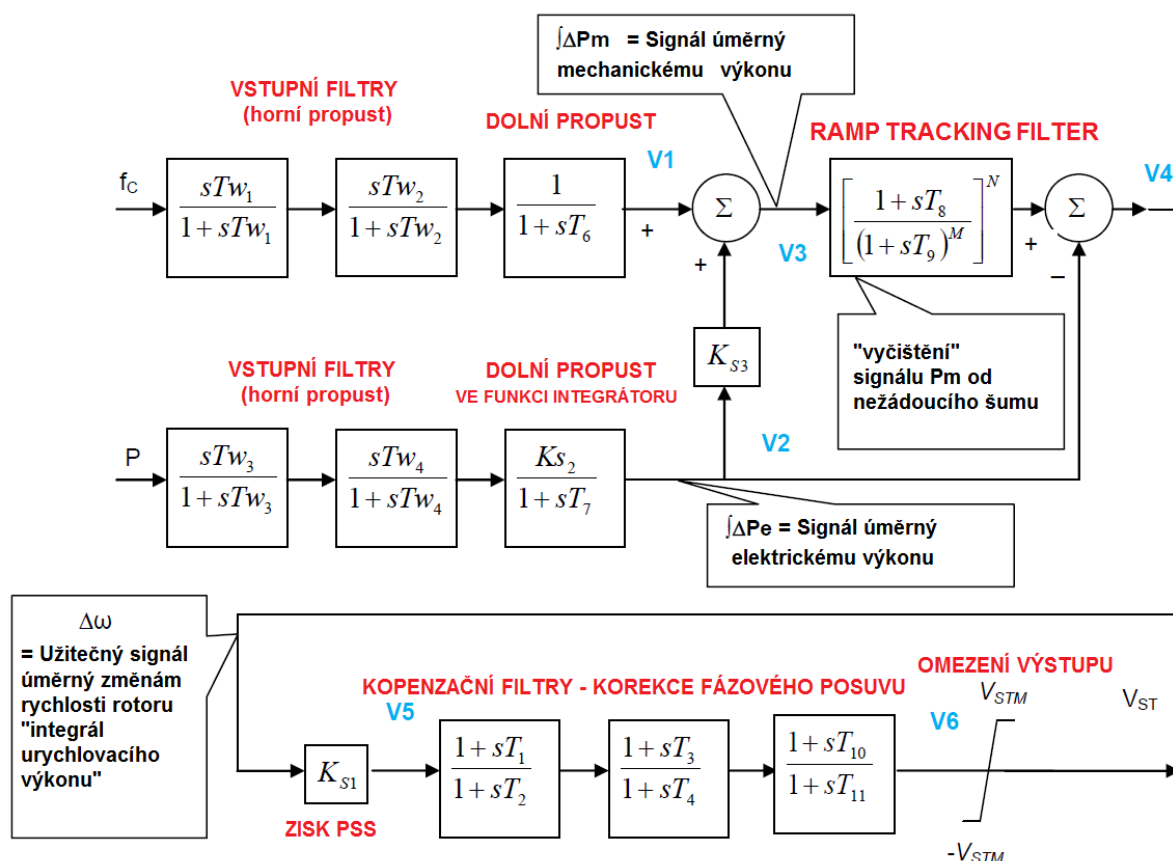
Vztah mezi změnou otáček rotoru  $\omega$ , změnou elektrického výkonu  $T_e$  a mechanického výkonu  $T_m$  (neboli točivého momentu) popisuje základní pohybová rovnice:

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{2H} (T_m - T_e) = \frac{1}{2H} T_a \quad (4.3)$$

Kde:

$T_m$	=Mechanický moment (dán turbínou a jejím regulátorem)
$T_e$	=Elektrický moment
$T_a$	=Urychlovací moment
$H$	=Setrvačnost celého turboústrojí (turbína + generátor)
$\omega$	=Úhlová rychlost rotoru

Struktura PSS2B vychází z matematických rovnic, které dalšími způsoby popisují vztahy mezi otáčkami rotoru, elektrickým a mechanickým výkonem. Tyto rovnice je možné dohledat v dokumentu *IEEE Tutorial Course, Power System Stabilization via Excitation Control* [15]. Struktura systémového stabilizátoru PSS2B je zobrazena a částečně vysvětlena na Obr. 28 **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.**



Obr. 28 - Schéma PSS2B [13]

### Popis jednotlivých bloků:

**P** – Signál od měření činného výkonu

**$f_c$**  – Kompenzovaná frekvence = nejedná se o frekvenci na výstupu stroje, ale o vnitřní frekvenci elektromotorické síly, kterou lze poměrně snadno získat výpočtem z naměřených veličin.

**Vstupní filtry (Washout)** – Jedná se o horní propust, která má za úkol předpřipavit měřený signál ke zpracování. Vstupní filtry odstraňují SS složku signálu, protože PSS musí reagovat pouze na změny v signálech.

**Dolní propust** – Většinou se využívá pro účely simulací, popřípadě pro dodatečnou filtraci signálu kompenzované frekvence.

**Dolní propust ve funkci integrátoru** – Přidává do signálu konstantu setrvačnosti turbo-ústrojů 2H prostřednictvím konstanty  $K_{S2}$  a zároveň plní funkci integrátoru.

**$K_{S3}$**  – Slouží k vyvážení větví výkonu a frekvence do správného poměru pro vznik užitečného signálu.



**Ramp tracking filter** – Odstraňuje ze signálu nežádoucí vyšší frekvence, filtruje hlavně torzní kmity hřídele a vytváří čistý užitečný signál.

$\Delta\omega$  – užitečný signál, který je úměrný změnám rychlosti rotoru

**Kompenzační filtry** – Kompenzují fázový posuv užitečného signálu tak, aby výsledný signál jdoucí do sumačního bodu regulátoru působil proti vzniku elektromechanických kmitů. Každý filtr je integrál ku derivaci – dle velikosti konstant každý blok filtru změni fázi výstupního signálu:

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

Je-li  $T_1 > T_2$ , má filtr derivační charakter (horní propust), je-li  $T_1 < T_2$  má filtr integrační charakter (dolní propust).

**Omezení výstupu** – Omezení výstupního signálu tak, aby nedocházelo k příliš velkým změnám odchylky žádané hodnoty napětí regulátoru.

Metodiku nastavení jednotlivých konstant systémového stabilizátoru popisuje *interní dokument firmy BRUSH SEM s.r.o., TI0720C* [13], jehož obsah není možné v této práci uvést, neboť jde o citlivé informace a firemní „know how“.

#### 4.4.2 Kritéria a zkoušky pro nastavení PSS

Jelikož výstup PSS bývá aktivován až po dosažení 40 – 50 % činného výkonu, je pro optimalizaci a vyzkoušení efektivity PSS nutné pracovat s generátorem co nejbližšího nominálnímu výkonu.

K vyzkoušení se používají podobné metody jako při zkoušení hlavní regulační smyčky. **Odezva na skokovou změnu žádané hodnoty napětí na síti** - postup testu je shodný s testováním dynamické odezvy regulátoru s tím rozdílem, že se mimo napětí měří i odezva činného výkonu **P** a jalového výkonu **Q**. Dalším testem je potom **měření frekvenční charakteristiky**. Na rozdíl od předchozího měření se měří závislost činného výkonu **P** na frekvenci a z amplitudové charakteristiky se zjišťuje maximální zisk (Maximální amplitudové převýšení **M**) při kritické frekvenci.

Kritéria, která byla použita pro hodnocení efektivnosti systémového stabilizátoru činného výkonu, vychází z kodexu přenosové soustavy ČR, který zpracovává ČEPS a.s. [14].

##### A) Kritéria pro měření odezvy skokové změny svorkového napětí:

1) V časovém průběhu činného výkonu  $P_G$  musí být při měření s aktivním PSS amplituda první půlvlny nižší než amplituda první půlvlny v průběhu měřeném bez aktivního PSS, tzn.:  $|A_{1pv\ s\ PSS}| < |A_{1pv\ bez\ PSS}|$

2) Oscilace PG vzniklé po skokové změně napětí při měření s aktivním PSS se musí utlmit během 1,5 periody (3 půlvlny). Pokud to vzhledem k typu BS či jinému důvodu nelze splnit, musí být lokální kyvy zcela utlumeny max. v průběhu 4 půlvln.

##### B) Kritéria při měření frekvenční charakteristiky:

1) Frekvenční charakteristika  $\Delta P_G / \Delta U_{ref}(f)$  měřená s PSS prokáže zlepšené tlumení systémových kyvů ve frekvenčním pásmu 0,3 – 1 Hz oproti měření bez PSS.

2) Maximální amplitudové převýšení frekvenční charakteristiky  $\Delta P_G / \Delta U_{ref}(f)$  měřené s aktivním PSS ( **$M_{s\ PSS}$  (dB)**) bude co nejnižší.

3) U rychlých (přímých) BS musí platit, že pro maximální amplitudová převýšení frekvenčních charakteristik měřených s PSS a bez PSS:

$$M_{bez\ PSS} - M_{s\ PSS} \geq 6\ dB$$

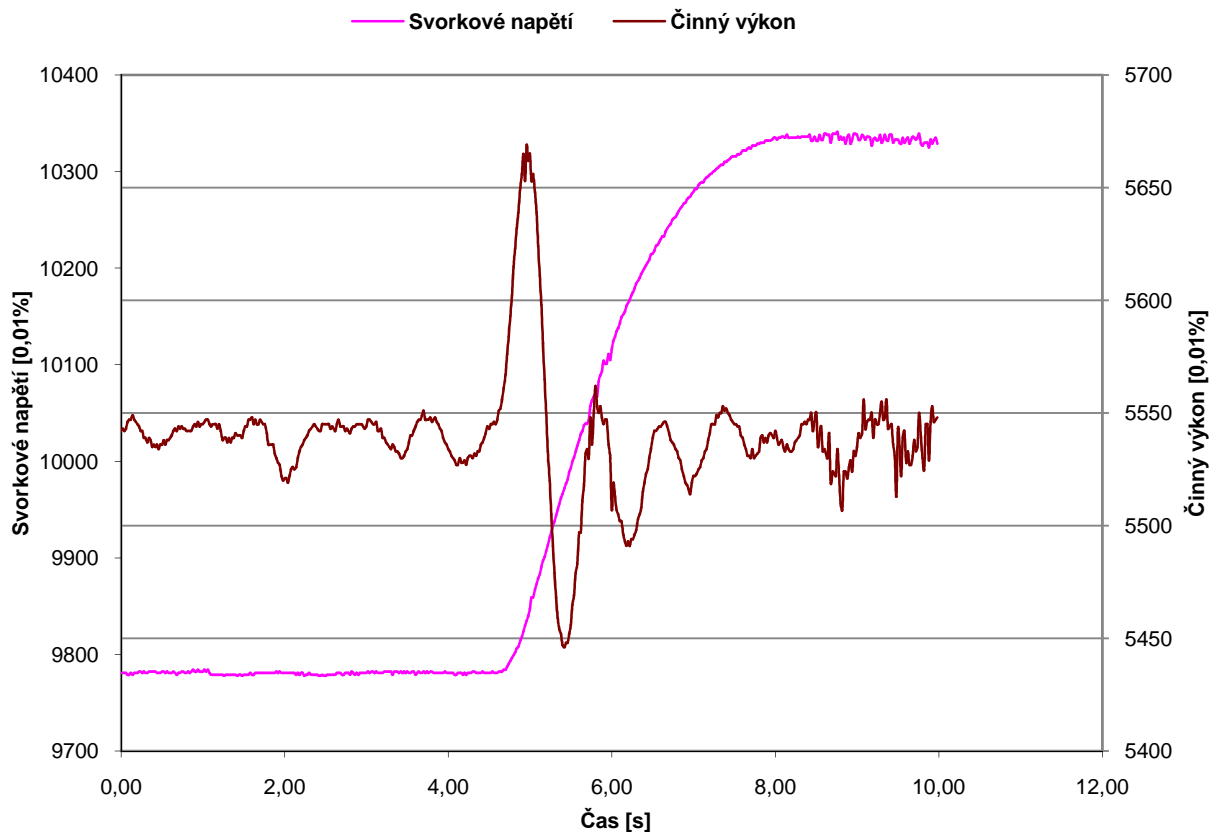
## 4.5 Zkoušky a optimalizace PSS2B

Pro zjištění výchozího stavu byly pořízeny záznamy s vypnutým PSS. Generátor byl připojen elektrizační soustavě a na maximálním výkonu, který byl z provozních důvodů dosažitelný (92 MW).

### Odezva na skokovou změnu žádané hodnoty napětí:

Velikost skokové změny byla 5 %  $U_t$ . Časový průběh napětí a výkonu při skokové změně žádané hodnoty napětí zobrazuje Graf 23.

### Odezva na skokovou změnu žádané hodnoty napětí Vypnuté PSS



Graf 23 - Odezva na skokovou změnu žádané hodnoty napětí - Vypnuté PSS

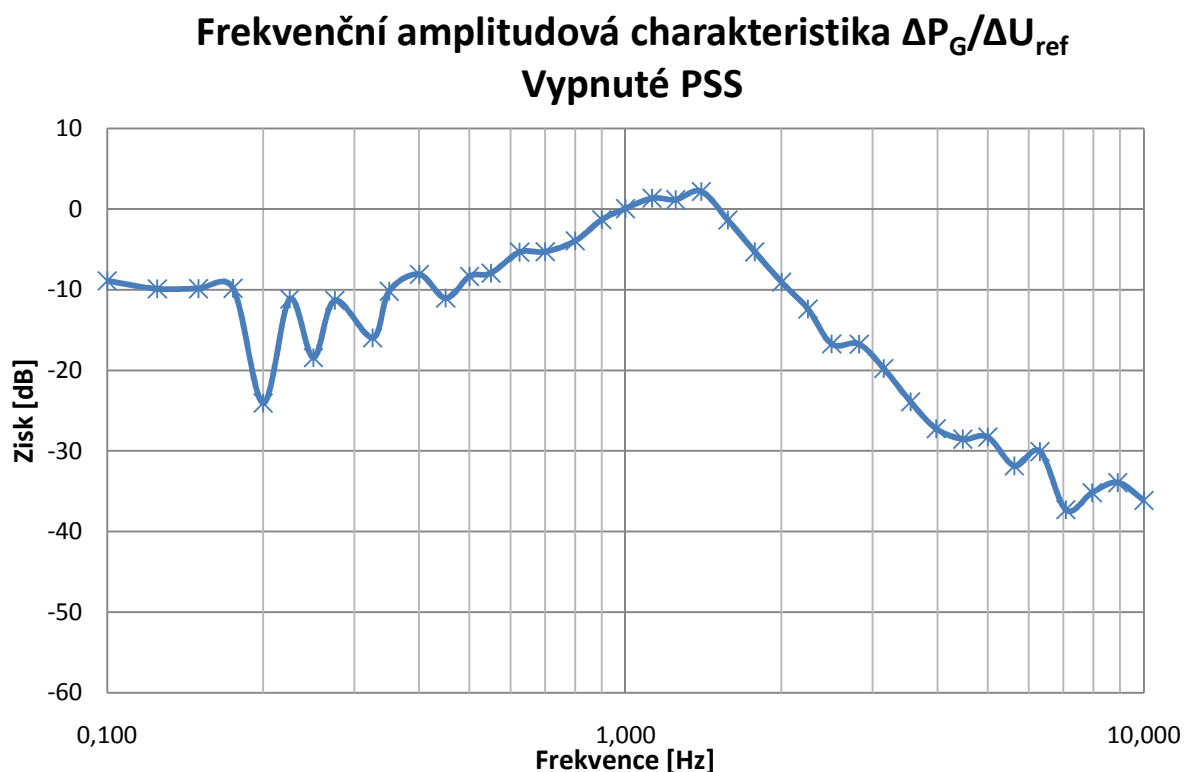
### Z naměřených hodnot bylo odečteno:

Rozkmit činného výkonu:  $A_1 = 2,1\%$   $S_n = 3,5$  MW

Ustálení:  $T_s = 3,5$  T (7 půlvln)

### Frekvenční charakteristika $\Delta P_G/\Delta U_{ref}(f)$ :

Po naměření odezvy na skokovou změnu svorkového napětí byla proměřena frekvenční charakteristika na stejném výkonu, jako byla měřena odezva na skokovou změnu (92 MW). Při měření musela být omezena amplituda výstupního signálu šumového generátoru, aby nedocházelo k velikým oscilacím jalového výkonu. Z tohoto důvodu nemusí frekvenční charakteristika při nízkých (0,1 Hz – 0,2 Hz) a vysokých (4 Hz – 10 Hz) frekvencích odpovídat skutečnosti. Frekvenční amplitudovou charakteristiku při vypnutém PSS zobrazuje Graf 24.



Graf 24 - Frekvenční amplitudová charakteristika  $\Delta P_G/\Delta U_{ref}$  - Vypnuté PSS

### Z naměřených hodnot bylo odečteno:

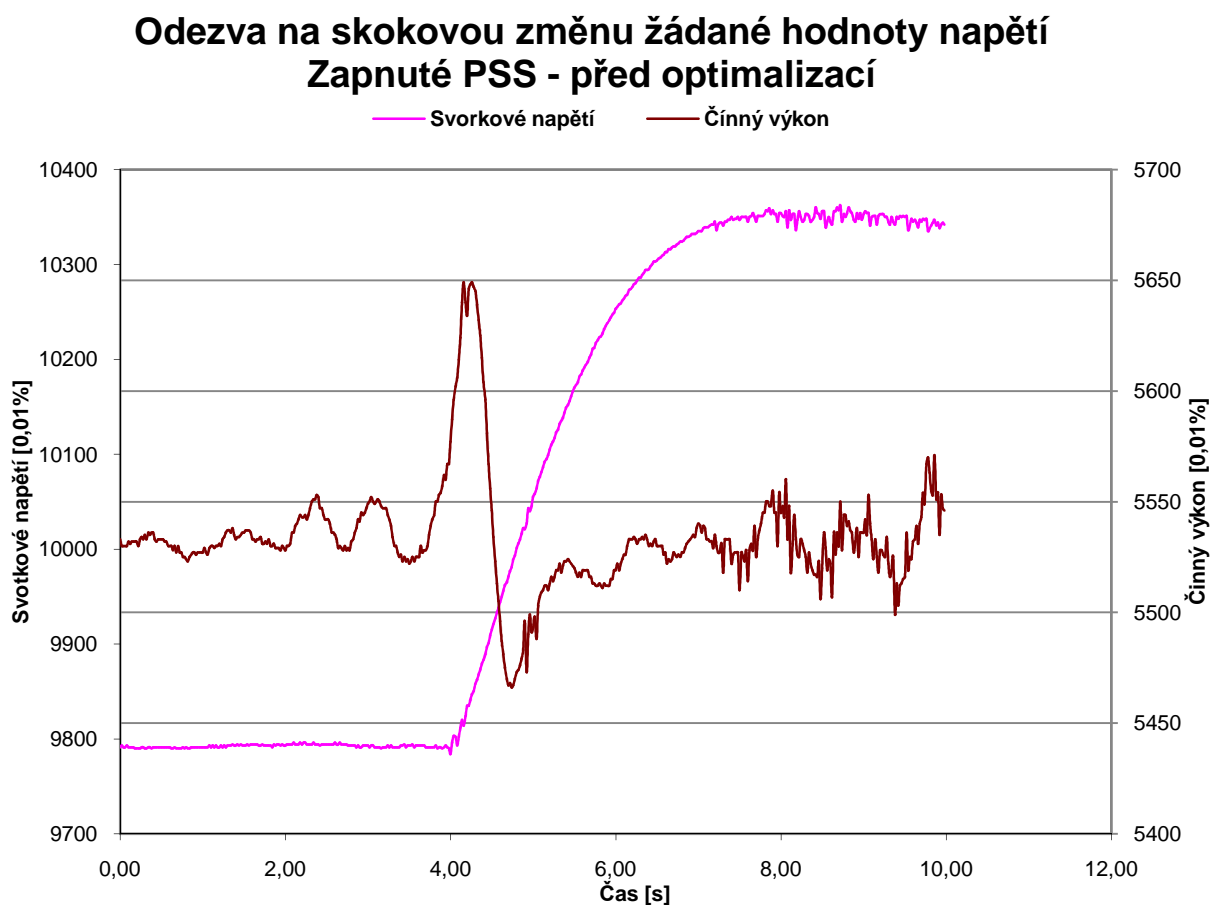
Maximální amplitudové převýšení:  $M_{PSS\ OFF} = 2,21\text{ dB}$

#### 4.5.1 PSS2B s původním nastavením

Po zjištění výchozího stavu byl aktivován výstup PSS2B a poté byly pořízeny následující záznamy, které sloužily hlavně jako podklad pro optimalizaci nastavení PSS. Generátor byl připojen na síti a na maximálním výkonu, který byl z provozních důvodů dosažitelný (92 MW).

##### Odezva na skokovou změnu žádané hodnoty napětí:

Velikost skokové změny byla 5 %  $U_t$ . Časový průběh napětí a výkonu při skokové změně žádané hodnoty napětí zobrazuje Graf 26.



Graf 25 - Odezva na skokovou změnu žádané hodnoty - před optimalizací

##### Z naměřených hodnot bylo odečteno:

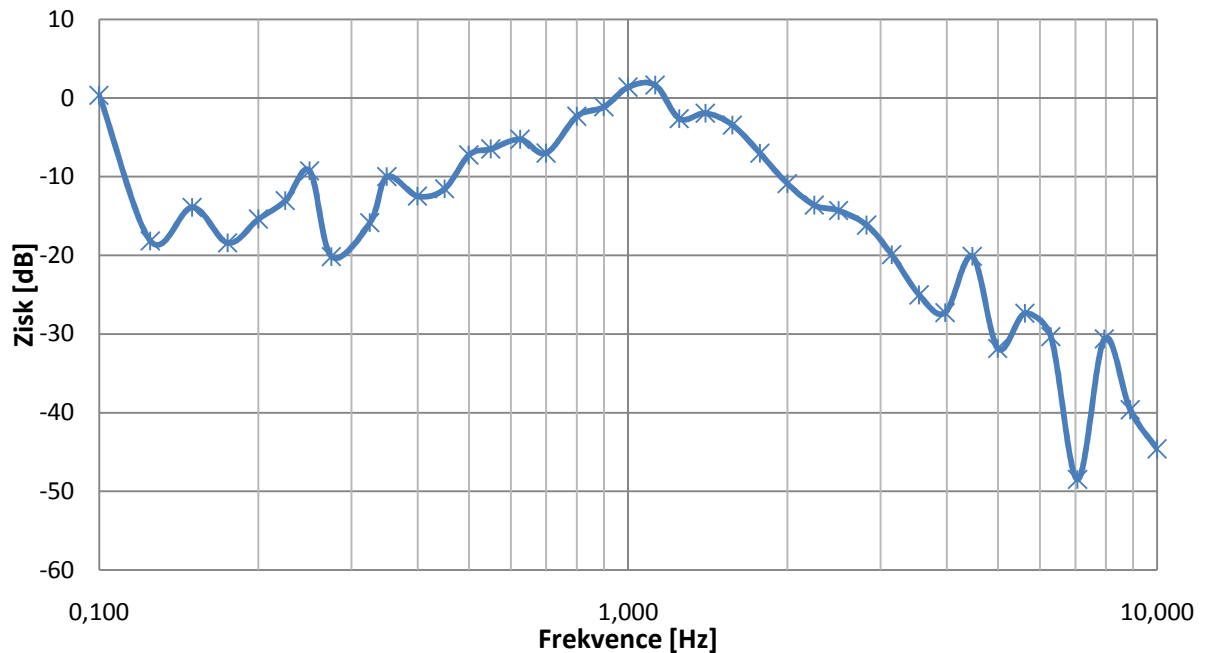
Rozkmit činného výkonu:  $A_1 = 1,8 \% S_n = 3,0 \text{ MW}$

Ustálení:  $T_s = 1 \text{ T (2 půlvlny)}$

**Frekvenční charakteristika  $\Delta P_G/\Delta U_{ref}(f)$ :**

Po naměření odezvy na skokovou změnu svorkového napětí byla proměřena i frekvenční amplitudová charakteristika. Její průběh zobrazuje Graf 26.

**Frekvenční amplitudová charakteristika  $\Delta P_G/\Delta U_{ref}$   
Zapnuté PSS - před optimalizací**



Graf 26 - Frekvenční amplitudová charakteristika  $\Delta P_G/\Delta U_{ref}$  - před optimalizací

**Z naměřených hodnot bylo odečteno:**

Maximální amplitudové převýšení:  $M_{PSS\ ON} = 1,6\text{ dB}$

**4.5.2 PSS2B s novým nastavením**

Metodiku optimalizace nastavení systémového stabilizátoru popisuje *interní dokument firmy BRUSH SEM s.r.o., T10720C* [13], jehož obsah není možné v této práci uvést, neboť jde o citlivé informace a firemní „know how“, stejně jako u stanovení základního nastavení PSS.

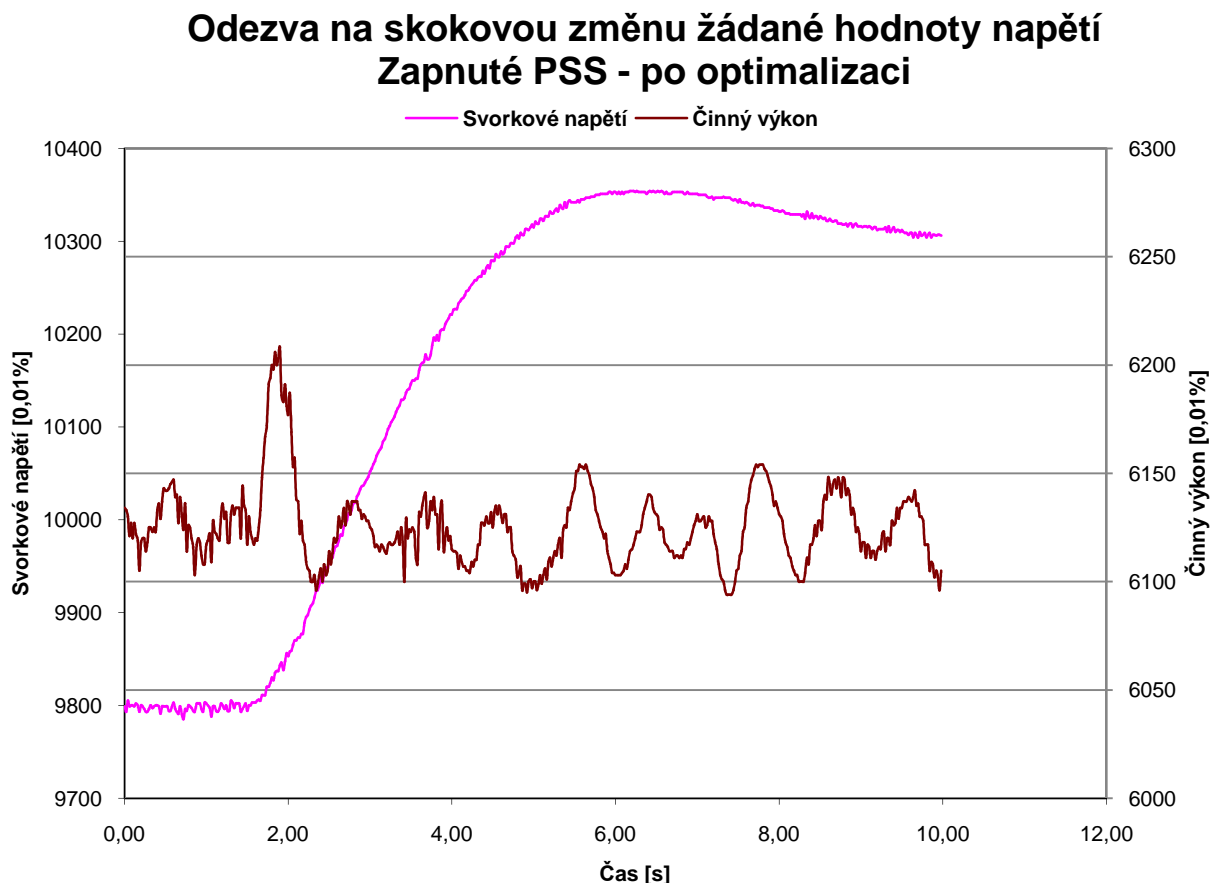
Obecně největší problém je v nastavení posledních tří kompenzačních filtrů, které natáčí fázi užitečného signálu tak, aby při kritických frekvencích (0,5 Hz – 1,5 Hz) působil proti vzniku elektromechanických kmitů. Tato optimalizace

spočívá v naměření frekvenčních fázových charakteristik  $\Delta U_G/\Delta U_{ref}$  při maximálním činném výkonu a jejím následném vyhodnocení.

Nastavení vstupních filtrů pak většinou bývá standardní, s tím, že se do spodní propusti s integračním charakterem ve větvi od činného výkonu vnese konstanta setrvačnosti ústrojí 2H. Setrvačnost turbíny i generátoru by měl uvádět výrobce. Nakonec se několika iteracemi nastaví správný poměr mezi větví kompenzované frekvence a činného výkonu.

### Odezva na skokovou změnu žádané hodnoty napětí:

Velikost skokové změny byla 5 %  $U_t$ . Časový průběh napětí a výkonu při skokové změně žádané hodnoty napětí zobrazuje Graf 27.



Graf 27 - Odezva na skokovou změnu žádané hodnoty - po optimalizaci

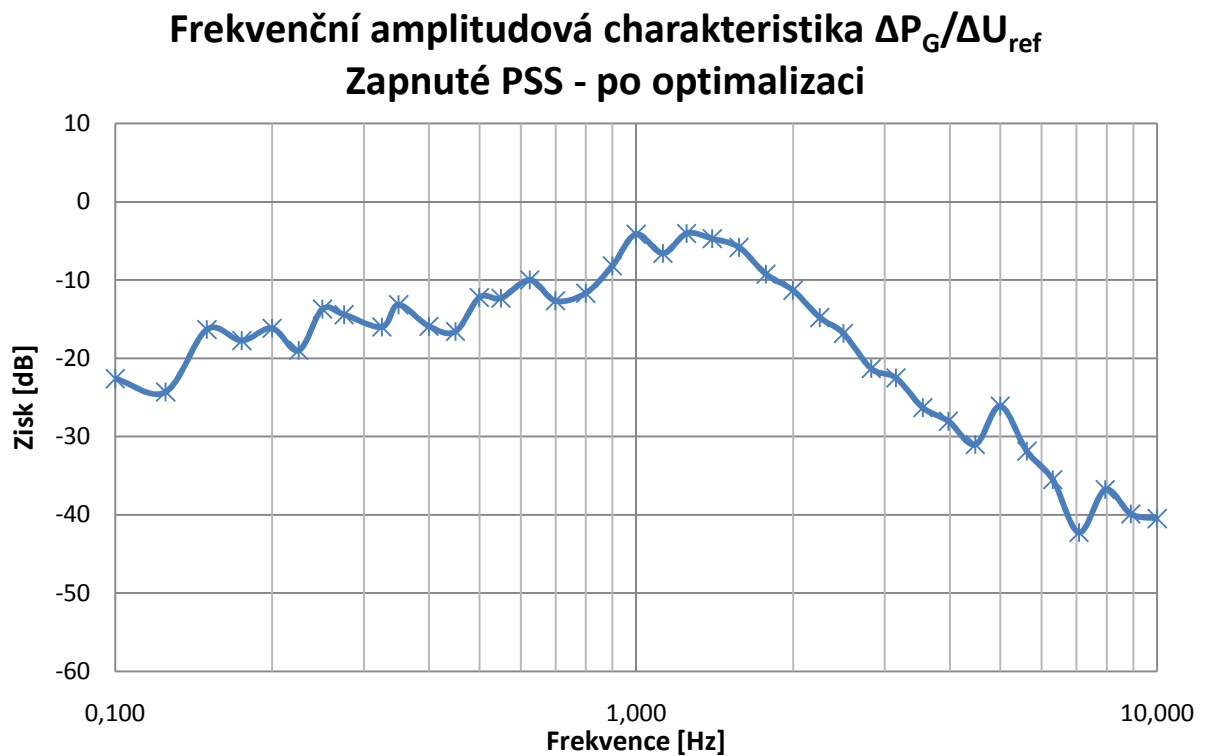
### Z naměřených hodnot bylo odečteno:

Rozkmit činného výkonu:  $A_1 = 1 \% S_n = 1,7 \text{ MW}$

Ustálení:  $T_s = 0,5 \text{ T (1 půlvlna)}$

**Frekvenční charakteristika  $\Delta P_G/\Delta U_{ref}(f)$ :**

Po naměření odezvy na skokovou změnu napětí byla také proměřena frekvenční amplitudová charakteristika. Její průběh zobrazuje Graf 28. Podle teoretických předpokladů se oproti původnímu měření musí snížit zisk při kritických frekvencích od 0,5 Hz do 1,5 Hz.



Graf 28 - Frekvenční amplitudová charakteristika  $\Delta P_G/\Delta U_{ref}$  - po optimalizaci

**Z naměřených hodnot bylo odečteno:**

Maximální amplitudové převýšení:  $M_{PSS\ ON} = -4,1$  dB



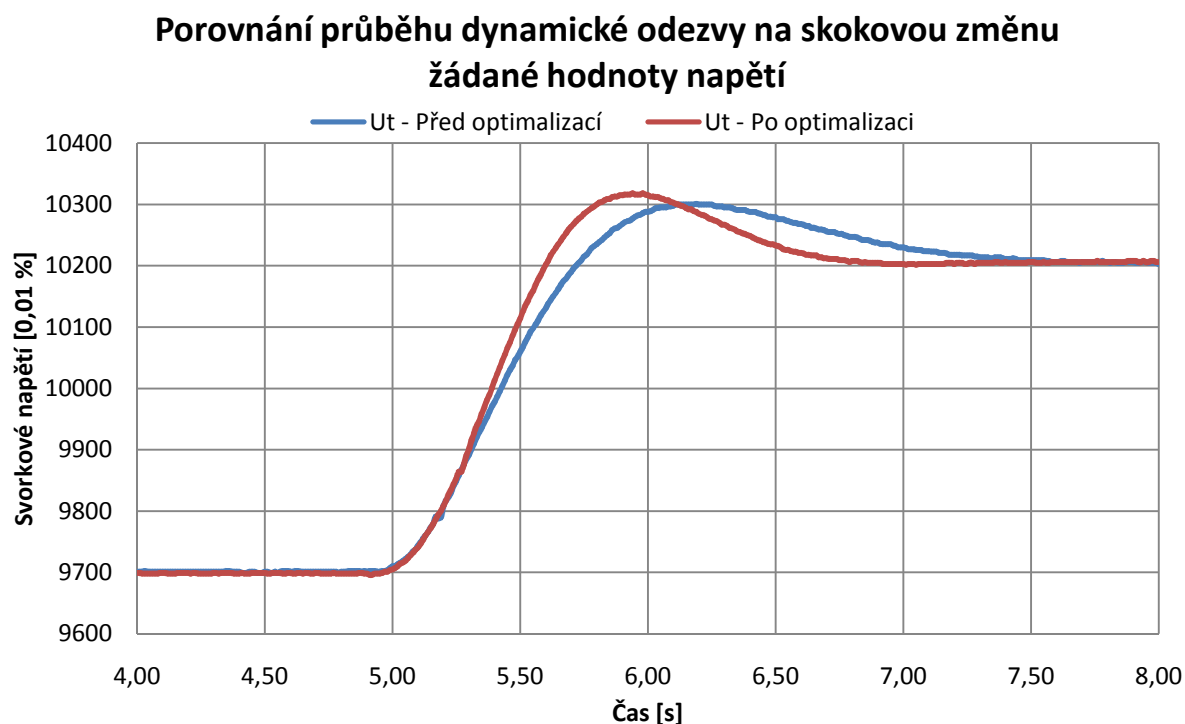
## 5 Zhodnocení naměřených výsledků

Tato kapitola ve stručnosti shrnuje naměřené údaje a na jejich základě je pak vyhodnocena úspěšnost optimalizace nastavení hlavní regulační smyčky, budicí soupravy a efektivity systémového stabilizátoru činného výkonu.

### 5.1 Zhodnocení optimalizace hlavní regulační smyčky

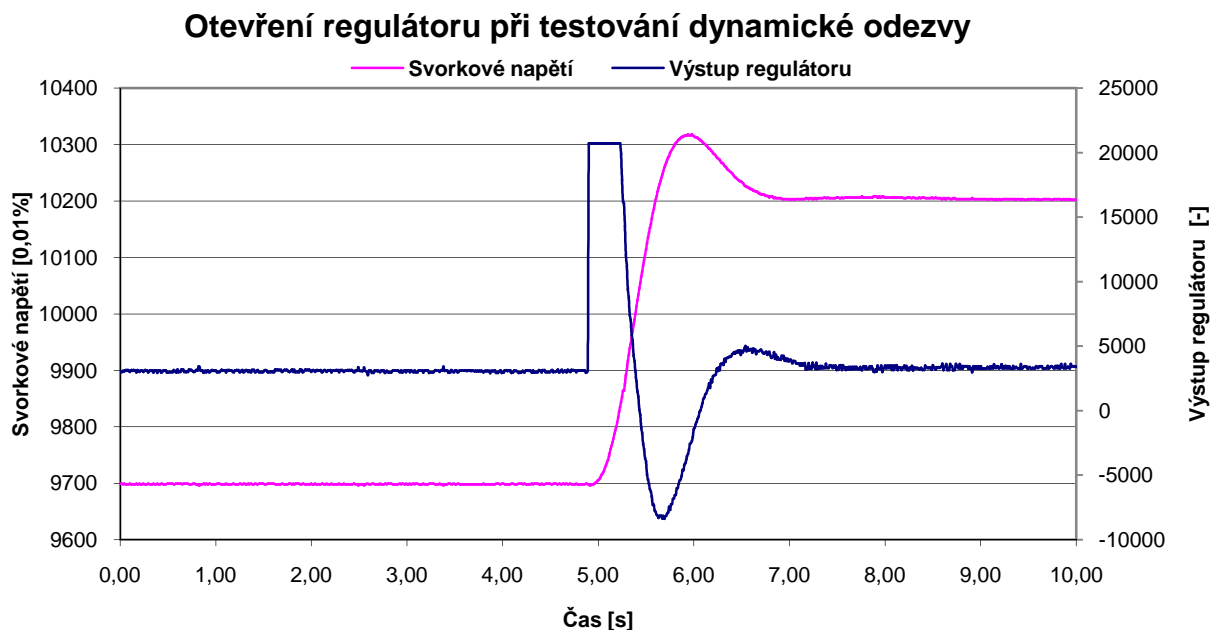
Při nastavování hlavní regulační smyčky bylo hlavním cílem co největší urychlení regulace, protože rychlost regulace je klíčová pro správné fungování systémového stabilizátoru. Dalšími kritérii při měření frekvenční charakteristiky otevřené smyčky bylo zachování doporučené bezpečnosti ve fázi ( $>40^\circ$ ) a zisku ( $>6$  dB). U frekvenční charakteristiky uzavřené smyčky bylo požadováno rozšíření šířky pásma  $\omega_B$  a zvýšení maximálního zisku  $M_p$  (optimálně do rozmezí  $0,83$  dB  $< M_p < 4,0$  dB). Hodnota překmitu neměla být vyšší než 15 % z hodnoty skoku.

Z analýzy naměřených dat lze konstatovat, že hlavního cíle bylo dosaženo, protože rychlost regulace (doba náběhu  $T_R$ ) se zlepšila téměř o 25 %. Velké zlepšení vykazuje i doba ustálení, kde nastalo zlepšení přes 30 %. Porovnání průběhu dynamické odezvy na skokovou změnu žádané hodnoty napětí zobrazuje Graf 29.



Graf 29 - Porovnání průběhu dynamické odezvy na skokovou změnu

Jediný parametr, který neodpovídá doporučeným hodnotám, je překmit. Ten byl naměřen již před optimalizací 20 % a po optimalizaci dokonce až 22 %, přičemž doporučená hodnota překmitu by měla být nižší než 15 %. Nicméně tento jev mohl být způsoben nesprávně zvolenou velikostí skoku při testování dynamické odezvy. Provedený skok byl 5 %, a to donutilo regulátor otevřít až na maximum (byl aktivován omezovač výstupu regulátoru), jak ukazuje Graf 30.



*Graf 30 - Otevření regulátoru při testování dynamické odezvy*

Tento stav vnesl do měření odezvy značnou chybu, protože se regulátor nechoval lineárně. Při správně zvolené velikosti skoku (1-2 %) by dle teoretických předpokladů mělo dojít ještě ke zvýšení rychlosti odezvy a ustálení a zároveň i ke snížení překmitu.

Pokud uvážíme, že rychlost regulace byla primárním cílem optimalizace, tak je větší překmit akceptovatelný, protože frekvenční charakteristiky otevřené smyčky potvrdily, že i přes drobný pokles bezpečnosti ve fázi a zisku nedošlo k ohrožení stability regulační smyčky. I další naměřené hodnoty u frekvenčních charakteristik odpovídají teoretickým předpokladům. Po optimalizaci došlo ke zrychlení regulace, tím pádem se zvětšila šířka pásma  $\omega_B$  i maximální zisk  $M_p$ . Relevantní parametry před a po optimalizaci uvádí Tabulka 3.

Tabulka 3 - Relevantní parametry regulace před a po optimalizaci

Parametr		Před optimalizací	Po optimalizaci
Doba náběhu	$T_r$	0,53 s	0,41 s
Doba ustálení	$T_s$	2,54 s	1,74 s
Hodnota překmitu	$U_{max}$	20 %	22 %
Maximální zisk	$M_p$	1,311 dB	2,217 dB
Šířka pásma	$\omega_B$	0,625 Hz	0,91 Hz
Bezpečnost ve fázi	$\varphi_m$	55°	48°
Bezpečnost v zisku	$G_m$	22 dB	18 dB

## 5.2 Zhodnocení optimalizace a provozní nastavení budící soupravy

Po optimalizaci nastavení hlavní regulační smyčky byly provedeny standardní zkoušky při uvádění do provozu, při kterých se provedla běžná optimalizace budící soupravy.

Při zkratových zkouškách byla budící souprava úspěšně zkalibrována a zároveň byly naměřeny ztráty blokového transformátoru nakrátko. Díky tomu bylo možné správně nastavit kompenzaci napětí od jalového výkonu (statiku).

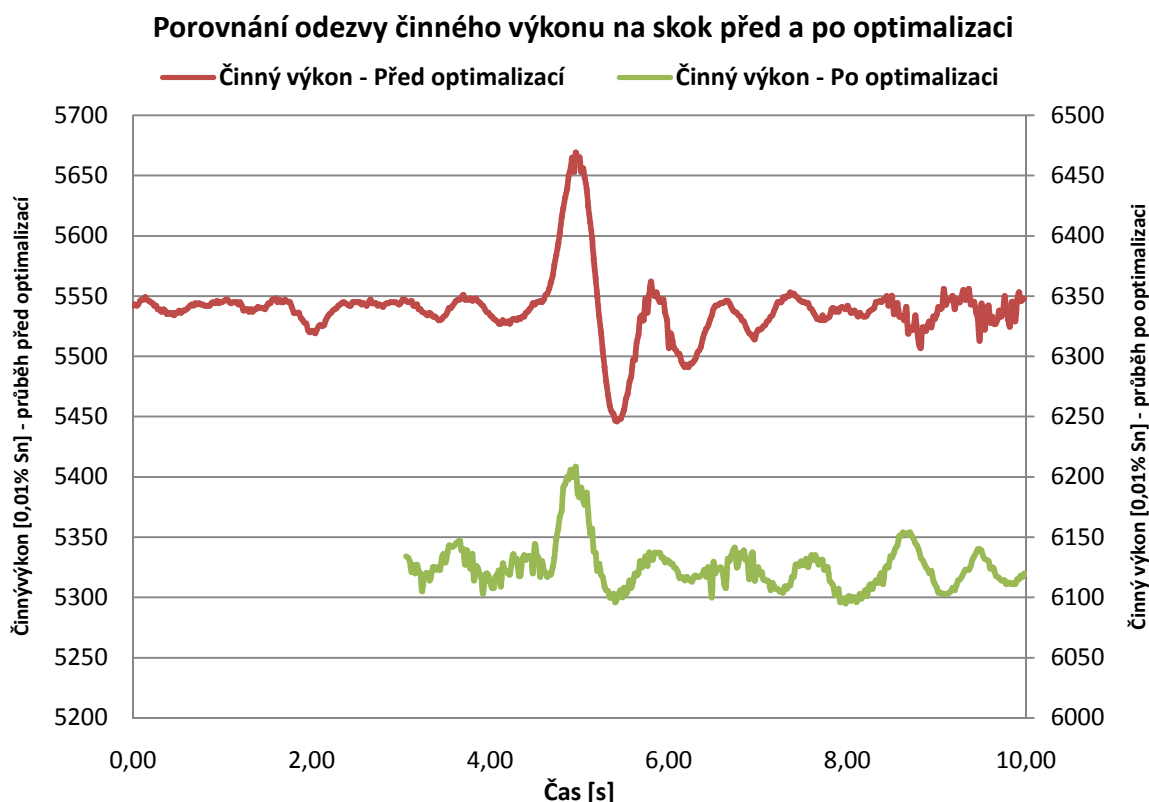
Při standardních zkouškách se vyskytlo několik komplikací, především při měření odezev jednotlivých omezovačů, protože po zrychlení hlavní regulační smyčky byla odezva na jejich zásah nestabilní, nebo jiným způsobem nepřijatelná. Proto došlo ke změně nastavení časových konstant u většiny omezovačů tak, aby se při jejich činnosti budící souprava chovala stabilně a podle teoretických předpokladů uvedených ve druhé kapitole.

### 5.3 Zhodnocení nastavení systémového stabilizátoru

Použitím systémového stabilizátoru činného výkonu došlo k zdatelnému zlepšení oproti výchozímu stavu. Už před optimalizací nastavení PSS bylo po spuštění systémového stabilizátoru vidět snížení rozkmitu činného výkonu  $A_1$  a zdatelně rychlejší ustálení následných kmitů činného výkonu. Po optimalizaci nastavení bylo zlepšení ještě výraznější.

Z naměřených hodnot je také vidět, že činný výkon není v žádném okamžiku stabilní a neustále osciluje s rozkmitem přibližně 0,4 MW. Tento jev byl způsoben nepřesnou regulací činného výkonu, neboť regulátor turbíny v době měření nebyl plně funkční. Tímto chováním turbíny mohla být do měření zanesena určitá chyba.

Lze konstatovat, že obě kritéria pro měření odezvy činného výkonu byla splněna, protože rozkmit  $A_1$  se oproti stavu bez použití systémového stabilizátoru výrazně snížil, a to dokonce více než o 50 % a zároveň se zlepšila doba ustálení z původních sedmi půlvln na pouhý jeden překmit. Porovnání stavu se zapnutým a vypnutým PSS zobrazuje Graf 31.



Graf 31 - Porovnání odezvy činného výkonu na skok před a po optimalizaci

Výrazné zlepšení prokazují i frekvenční charakteristiky, kde byla splněna všechna kritéria. Charakteristiky vykazují zlepšení tlumení systémových kyvů ve frekvenčním pásmu 0,3 – 1 Hz oproti měření bez PSS. Z původního maximálního amplitudového převýšení 2,21 dB v pásmu 0,5 - 1,3 Hz bylo použitím PSS dosaženo převýšení s maximem v -4,1 dB. Dokonce bylo splněno i kritérium pro rychlé (přímé) budící soupravy:  $M_{\text{bez PSS}} - M_{\text{s PSS}} \geq 6 \text{ dB}$ .

$$M_{\text{bez PSS}} - M_{\text{s PSS}} = 2,21 - (-4,1) = 6,31 \text{ dB}$$

Porovnání parametrů měření systémového stabilizátoru před a po optimalizaci uvádí Tabulka 4.

Tabulka 4 - Relevantní parametry PSS před a po optimalizaci

Parametr	Před optimalizací	Po optimalizaci
Rozkmit činného výkonu $A_1$	2,1% $S_n = 3,5 \text{ MW}$	1% $S_n = 1,7 \text{ MW}$
Doba ustálení $T_s$	3,5 T (7 půlvln)	0,5 T (1 půlvlna)
Max. amplitudové převýšení $M_{\text{PSS}}$	2,21 dB	-4,1 dB

## Závěr

Tato práce měla několik cílů. Prvním z cílů bylo seznámit čtenáře s dnes nejčastěji používanými typy budících systémů a s jejich výhodami i potencionálními nevýhodami. Pravděpodobně nejperspektivnější ze všech prezentovaných systémů je bezkroužkový systém pro svou dostupnost, aplikovatelnost na širokou škálu výkonů a hlavně pro minimální nároky na údržbu. Tento systém má ovšem i nezanedbatelné, často přehlížené slabé stránky, jako je pomalá odezva na skokové změny nebo výrazně nižší účinnost systémových stabilizátorů činného výkonu.

Proto hlavním cílem této práce bylo provedení měření právě na tomto typu budícího systému v reálné aplikaci se skutečným generátorem. Na základě naměřených dat byla provedena optimalizace nastavení regulátoru tak, aby byly nevýhody bezkroužkového systému minimalizovány.

Tento cíl se podařilo splnit, protože budící systém po optimalizaci vykazuje znatelné zlepšení ve všech směrech. Došlo k výraznému zrychlení budící soupravy oproti doporučenému nastavení při zachování stability regulace. Díky novému nastavení systémového stabilizátoru činného výkonu bylo dosaženo splnění všech kritérií, které jsou požadovány v kodexu přenosové soustavy České republiky pro nepřímé budící soustavy. Navíc bylo splněno i kritérium, které je požadováno pouze po systémových stabilizátorech přímých budících souprav, což může být pokládáno za velký úspěch.

Mezi další cíle patřilo seznámit čtenáře s principy fungování hlavní regulační smyčky a signálů, které do ní vstupují. V neposlední řadě zde byly popsány zkoušky, které jsem prováděl při uvádění budící soupravy do provozu.

Výsledkem této práce je optimalizovaná budící souprava s automatickými regulátory napětí BRUSH PRISMIC A50, která v současné době pracuje v elektrárně Alpiq Kladno, na bloku K7. Výsledné nastavení regulátorů je použitelné i v budoucnosti pro základní konfiguraci nastavení u podobných aplikací.

## Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] IBLER, Zbyněk; BERAN, Miloš: *Elektrárny 2*, VŠSE Plzeň, 1982
- [2] HORA, Oldřich a kolektiv: *Regulační a budicí systémy synchronních strojů*, Vydavatelství SNTL, Praha 1985
- [3] BARTOŠ, Václav: *Teorie elektrických strojů*, Plzeň: ZČU, 2006
- [4] PRABHA Kundur, *Power system stability and control*, Electric power research institute, USA, New York 1994
- [5] IEEE 421.1: *Standard Definitions for Excitation Systems for Synchronous Machines*, The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., New York 1986
- [6] IEEE 421.2: *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
- [7] IEEE 421.3: *Standard for High-Potential Test Requirements for Excitation Systems for Synchronous Machines*, The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., USA, New York 1997
- [8] IEEE 421.4: *Guide for the Preparation of Excitation System Specifications*, The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., USA, New York 1990
- [9] 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
- [10] P. Hlaváč, *BRUSH PRISMIC A50 EXCITATION SYSTEMS*, Dokument BRUSH SEM s.r.o., A50Catalogue, rev. V9F, Plzeň 2006
- [11] D. Navrátil, *Instruction Manual PRISMIC A50 EXCITATION CONTROLLER*, Dokument BRUSH SEM s.r.o., EG407682, rev. C, Plzeň 2008

- [12] D. Navrátil, P. Veselý: *Zkoušky budicí soupravy na stavbě*, Interní dokument BRUSH SEM s.r.o., PB07268, rev. A, Plzeň 2007
- [13] D. Navrátil, *PSS2B TUNING PRACTICE*, Interní dokument BRUSH SEM s.r.o., TI0720, rev. C, Plzeň 2014
- [14] ČEPS, *Kodex přenosové soustavy - Základní podmínky pro užívání přenosové soustavy – Část 1*, Praha 2014
- [15] IEEE Tutorial Course, *Power System Stabilization via Excitation Control*, The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., USA, Tampa 2007
- [16] [http://www.polyx.com/\\_ari/ruzne/Studentuv\\_pruvodce\\_systemy\\_a\\_rizenim\\_ARL\\_2012.pdf](http://www.polyx.com/_ari/ruzne/Studentuv_pruvodce_systemy_a_rizenim_ARL_2012.pdf)
- [17] Míchal, *TECHNICAL DATA AND CURVES OF THE GENERATOR*, Dokument BRUSH SEM s.r.o., AD 001148, rev. B, Plzeň 2011



## Seznam obrázků

OBR. 1 - BLOKOVÉ SCHÉMA ZÁKLADNÍCH PRVKŮ BUDÍCÍHO SYSTÉMU [6].....	12
OBR. 2 - BLOKOVÉ SCHÉMA STATICKÉ BS [10].....	16
OBR. 3 - BLOKOVÉ SCHÉMA BUDÍCÍ SOUPRAVY SE STŘÍDAVÝM BUDIČEM [10].....	18
OBR. 4 - BLOKOVÉ SCHÉMA SYSTÉMU S BEZKROUŽKOVÝM BUDIČEM [10].....	20
OBR. 5 - RYCHLOST ODBUZENÍ BEZKROUŽKOVÉ A STATICKÉ BUDÍCÍ SOUSTAVY.....	21
OBR. 6 - BLOKOVÉ SCHÉMA BUDÍCÍHO SYSTÉMU SE STEJNOSMĚRNÝM BUDIČEM [10] .....	22
OBR. 7 - CHARAKTERISTIKA $U_B = F(T)$ [1] .....	24
OBR. 8 - ZÁKLADNÍ SCHÉMA NAPĚŤOVÉHO REGULÁTORU [11].....	30
OBR. 9 - BLOKOVÉ SCHÉMA OMEZOVAČE $U_T$ [11].....	31
OBR. 10 - BLOKOVÉ SCHÉMA OMEZOVAČE PŘESYCENÍ (U/F) [11].....	32
OBR. 11 - PŘÍKLAD ZMĚN OSP A ORP PŘI RŮZNÉM CHLAZENÍ [11].....	33
OBR. 12 - BLOKOVÉ SCHÉMA OMEZOVAČE ROTOROVÉHO PROUDU [11] .....	34
OBR. 13 - BLOKOVÉ SCHÉMA OMEZOVAČE STATOROVÉHO PROUDU [11].....	35
OBR. 14 - BLOKOVÉ SCHÉMA HLÍDAČE MEZE PODBUZENÍ [11] .....	36
OBR. 15 - NASTAVENÍ MEZÍ HMP [12] .....	36
OBR. 16 - KOMPENZACE ÚBYTKU NAPĚTÍ NA BLOKOVÉM TRANSFORMÁTORU (STATIKA) .....	40
OBR. 17 - BLOKOVÉ SCHÉMA REGULÁTORU BUDÍCÍHO PROUDU [11] .....	42
OBR. 18 - BLOKOVÉ SCHÉMA AUTOMATICKÉHO REGULÁTORU NAPĚTÍ [11] .....	43
OBR. 19 - FREKVENČNÍ CHARAKTERISTIKA UZAVŘENÉ SMYČKY [6] .....	61
OBR. 20 - FREKVENČNÍ CHARAKTERISTIKA OTEVŘENÉ SMYČKY [6] .....	62
OBR. 21 - MĚŘENÍ FREKVENČNÍ CHARAKTERISTIKY .....	63
OBR. 22 - SCHÉMA REGULACE AC7B PODLE IEEE 421.5. [11].....	65
OBR. 23 - ZJEDNODUŠENÉ SCHÉMA NAPĚŤOVÉHO REGULÁTORU [11].....	66
OBR. 24 - DYNAMICKÁ ODEZVA NA SKOKOVOU ZMĚNU ŽÁDANÉ HODNOTY NAPĚTÍ [6].....	69
OBR. 25 - PRINCIP ČINNOSTI PSS [15].....	76
OBR. 26 - POROVNÁNÍ ODEZVY ČINNÉHO VÝKONU PSS ZAP/VYP [10].....	77
OBR. 27 - ZÁKLADNÍ VELIČINY NA HŘÍDELI STROJE [10] .....	78
OBR. 28 - SCHÉMA PSS2B [13] .....	79

## Seznam grafů

GRAF 1 - CHARAKTERISTIKA GENERÁTORU NAKRÁTKO .....	39
GRAF 2 - CHARAKTERISTIKA GENERÁTORU NAPRÁZDNO .....	42
GRAF 3 - AUTOMATICKÉ NABUZENÍ GENERÁTORU .....	44
GRAF 4 - ODEZVA NA 5 % SKOK ŽÁDANÉ HODNOTY NAPĚTÍ.....	46
GRAF 5 - OMEZOVAČ SVORKOVÉHO NAPĚTÍ ( $T_{TVL} = 500$ MS).....	47
GRAF 6 - OMEZOVAČ SVORKOVÉHO NAPĚTÍ ( $T_{TVL} = 1500$ MS).....	48
GRAF 7 - OMEZOVAČ PŘESYCENÍ ( $T_{V/Hz} = 1500$ MS) .....	49
GRAF 8 - OMEZOVAČ PŘESYCENÍ ( $T_{V/Hz} = 1500$ MS) - ZMĚNOU FREKVENCE .....	50
GRAF 9 - FÁZOVÁNÍ .....	51
GRAF 10 - ODEZVA NA SKOKOVOU ZMĚNU ŽÁDANÉ HODNOTY NAPĚTÍ NA SÍTI .....	53
GRAF 11 - PŘECHOD MEZI REDUNDANTNÍMI KANÁLY .....	54
GRAF 12 - OMEZOVAČ ROTOROVÉHO PROUDU .....	55
GRAF 13 - OMEZOVAČ STATOROVÉHO PROUDU .....	56
GRAF 14 - HLÍDAČ MEZE PODBUZENÍ - $T_{UEL} = 1000$ MS .....	57
GRAF 15 - HLÍDAČ MEZE PODBUZENÍ - ROZKÝVÁNÍ ČINNÉHO VÝKONU.....	58
GRAF 16 - HLÍDAČ MEZE PODBUZENÍ - $T_{UEL} = 2000$ MS.....	58
GRAF 17 - DYNAMICKÁ ODEZVA NA SKOK ŽÁDANÉ HODNOTY O 5 % PŘED OPTIMALIZACÍ .....	70
GRAF 18 - FREKVENČNÍ CHARAKTERISTIKA UZAVŘENÉ SMYČKY PŘED OPTIMALIZACÍ .....	71
GRAF 19 - FREKVENČNÍ CHARAKTERISTIKA OTEVŘENÉ SMYČKY - PŘED OPTIMALIZACÍ .....	72
GRAF 20 - DYNAMICKÁ ODEZVA NA SKOK ŽÁDANÉ HODNOTY O 5 % PO OPTIMALIZACI.....	73
GRAF 21 - FREKVENČNÍ CHARAKTERISTIKA UZAVŘENÉ SMYČKY – PO OPTIMALIZACI .....	74
GRAF 22 - FREKVENČNÍ CHARAKTERISTIKA OTEVŘENÉ SMYČKY – PO OPTIMALIZACI .....	75
GRAF 23 - ODEZVA NA SKOKOVOU ZMĚNU ŽÁDANÉ HODNOTY NAPĚTÍ - VYPNUTÉ PSS.....	82
GRAF 24 - FREKVENČNÍ AMPLITUDOVÁ CHARAKTERISTIKA $\Delta PG/\Delta U_{REF}$ - VYPNUTÉ PSS..	83
GRAF 25 - ODEZVA NA SKOKOVOU ZMĚNU ŽÁDANÉ HODNOTY - PŘED OPTIMALIZACÍ .....	84
GRAF 26 - FREKVENČNÍ AMPLITUDOVÁ CHARAKTERISTIKA $\Delta PG/\Delta U_{REF}$ - PŘED OPTIMALIZACÍ .....	85
GRAF 27 - ODEZVA NA SKOKOVOU ZMĚNU ŽÁDANÉ HODNOTY - PO OPTIMALIZACI .....	86
GRAF 28 - FREKVENČNÍ AMPLITUDOVÁ CHARAKTERISTIKA $\Delta PG/\Delta U_{REF}$ - PO OPTIMALIZACI	87
GRAF 29 - POROVNÁNÍ PRŮBĚHU DYNAMICKÉ ODEZVY NA SKOKOVOU ZMĚNU .....	88
GRAF 30 - OTEVŘENÍ REGULÁTORU PŘI TESTOVÁNÍ DYNAMICKÉ ODEZVY .....	89
GRAF 31 - POROVNÁNÍ ODEZVY ČINNÉHO VÝKONU NA SKOK PŘED A PO OPTIMALIZACI.....	91

## Seznam tabulek

TABULKA 1 - SROVNÁNÍ ZÁKLADNÍCH TYPŮ BUDÍCÍCH SOUPRAV .....	27
TABULKA 2 - VLIV JEDNOTLIVÝCH PARAMETRŮ NA CHOVÁNÍ REGULÁTORU .....	67
TABULKA 3 - RELEVANTNÍ PARAMETRY REGULACE PŘED A PO OPTIMALIZACI .....	90
TABULKA 4 - RELEVANTNÍ PARAMETRY PSS PŘED A PO OPTIMALIZACI .....	92

## Seznam příloh

<b>Příloha 1:</b>	Parametry generátoru, budiče, PMG a měřících transformátorů
<b>Příloha 2:</b>	Provozní diagram generátoru
<b>Příloha 3:</b>	Naměřená data [disk CD – ROM]
<b>Příloha 4:</b>	Katalogový list generátoru BDAX 9 - 450 ERH [disk CD – ROM]
<b>Příloha 5:</b>	Protokol o uvedení do provozu [disk CD – ROM]

## Přílohy

### Příloha 1 – Parametry generátoru, budiče, PMG a měřících transformátorů

#### Parametry generátoru [17]

Generátor					
Zdánlivý výkon	168,75	MVA	Výrobce	BRUSH SEM	
Jmenovité otáčky	3000	ot/s	Typ	BDAX 9-450 ERH	
Svorkové napětí	15 000	V	Sériové číslo	921179.010	
Svorkový proud	6 495	A	Norma	IEC 60034-3	
Cos $\varphi$	0,8		Nadmořská výška	do 1000m	
Počet fází/ frekvence	3 / 50	~ / Hz	Krytí	IP 54	
Budící napětí	202	Vdc	Rok výroby	2012	
Budící Proud	1 579	Adc	Provoz	Nepřetržitý	
Jmenovitá teplota	26,5	°C, voda	Izol. třída Stator/Rotor	155 (F)	
Označení bloku	K7		Metoda chlazení	Voda 26,5°C Vzduch 41°C	
$X_d$ (nenasycená)	2,17	PU	$X'_d$ (nasycená)	0,227	PU
$X''_d$ (nasycená)	0,158	PU	$X_2$ (nenasycená)	0,191	PU
$X_0$ (nenasycená)	0,095	PU	Zkratový poměr	0,50	

#### Parametry PMG a budiče [17]

Budič					
Výkon	385,6	kW	Výrobce	BRUSH SEM	
Nominální napětí	222	Vdc	Typ	921179.010	
Nominální proud	1737	Adc	Sériové číslo	BXF 20.18-2S	
Budící napětí	67	Vdc	Jmenovité otáčky	3000 ot/s	
Budící proud	8,7	Adc	Počet fází/ frekvence	3 /150 Hz	
PMG					
Výkon	0,84	kVA	Výrobce	BRUSH SEM	
Nominální napětí	81	Vac	Typ	921179.010	
Nominální proud	10,4	Aac	Sériové číslo	MXI 51.08-A2	
Jmenovité otáčky	3000	ot/s	Počet fází/ frekvence	1 / 400Hz	

#### Parametry měřících transformátorů

Svorkové napětí generátoru	15 000 V / 100 V
Svorkový proud generátoru	6500 A / 1 A
Napětí sítě	15 000 V / 100 V

**Příloha 2 – Provozní diagram generátoru [17]**

