



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

## ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY

DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

## PŘÍMÉ MĚŘENÍ ZÁTĚŽNÉHO ÚHLU LABORATORNÍHO GENERÁTOROVÉHO SOUSTROJÍ

DIRECT LOAD ANGLE MEASUREMENT ON THE LABORATORY GENERATOR UNIT

### BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jiří Dvořáček

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Jaroslava Orságová, Ph.D.

BRNO 2019

# Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika**

Ústav elektroenergetiky

**Student:** Jiří Dvořáček

**ID:** 195484

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2018/19

**NÁZEV TÉMATU:**

## Přímé měření zátěžného úhlu laboratorního generátorového soustrojí

**POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:**

Cílem práce je navrhnout způsob přímého měření zátěžného úhlu laboratorního synchronního generátoru s využitím inkrementálního čidla a dostupných laboratorních osciloskopů. Měřicí systém by měl sloužit jako pomůcka při měření provozních vlastností laboratorního soustrojí.

**DOPORUČENÁ LITERATURA:**

podle pokynů vedoucího práce

**Termín zadání:** 4.2.2019

**Termín odevzdání:** 27.5.2019

**Vedoucí práce:** doc. Ing. Jaroslava Orságová, Ph.D.

**Konzultant:**

**doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.**  
*předseda oborové rady*

**UPOZORNĚNÍ:**

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Bibliografická citace práce:

DVOŘÁČEK, Jiří. Přímé měření zátěžného úhlu laboratorního generátorového soustrojí. Brno, 2019. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/119141>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektroenergetiky. Vedoucí práce Jaroslava Orságová.

„Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Přímé měření zátěžného úhlu laboratorního generátorového soustrojí jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce. Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové/bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.“

V Brně dne 27. 5. 2019

Podpis: .....

## **ABSTRAKT**

Synchronní generátory jsou nejpoužívanější zařízení pro přeměnu mechanické energie na elektrickou. Je proto nutné využívat různé metody pro kontrolu provozních parametrů. Jednou z nejdůležitějších poruch je vypnutí generátoru ze synchronismu, které může vést až k poškození stroje. Cílem práce je návrh a realizace možnosti měřit přímou metodou zátěžný úhel a s jeho pomocí zjistit hodnotu nasycené synchronní reaktance. Zátěžný úhel je měřen pomocí inkrementálního snímače a průběhu výstupního napětí generátoru.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

synchronní generátor, zátěžný úhel, synchronní reaktance, nasycený, nenasycený



## **ABSTRACT**

Synchronous generators are the most used machines for production of electricity. Therefore it is crucial to use various methods for checking operating parameters. One of the worst faults is falling out of synchronism which can even lead to machine damage. Main objective of bachelor thesis is to design a method for load angle measurement using available laboratory equipment and to calculate saturated synchronous reactances using load angle. Load angle is measured using incremental sensor and output voltage waveform.

## **KEYWORDS**

synchronous generator, load angle, synchronous reactance, saturated, unsaturated

## PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucí mé bakalářské práce, paní doc. Ing. Jaroslavě Orságové, Ph.D., za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci. Dále bych rád poděkoval Bc. Viktoru Jurákovi za podnětné rady a asistenci při realizaci práce.

Brno .....

.....

podpis autora

# Obsah

Seznam symbolů, veličin a zkratk	10
Úvod	12
<b>1 Měřená sestava</b>	<b>13</b>
1.1 Popis zařízení . . . . .	13
1.2 Synchronní generátor Leroy Somer LSA 37 M5 . . . . .	14
1.3 Inkrementální snímač CNS50 . . . . .	16
<b>2 Synchronní stroj</b>	<b>17</b>
2.1 Fázorový diagram synchronního generátoru s rotorem s vyniklými póly	18
2.2 Zátěžný úhel stroje s rotorem s vyniklými póly . . . . .	18
<b>3 Zjištění provozních parametrů synchronního stroje</b>	<b>20</b>
3.1 Přímé měření zátěžného úhlu synchronního generátoru . . . . .	20
3.2 Stanovení hodnoty provozní příčné synchronní reaktance . . . . .	21
3.3 Stanovení hodnoty provozní podélné synchronní reaktance . . . . .	22
3.4 Sestava měřicího systému . . . . .	24
3.4.1 Signál inkrementálního snímače . . . . .	25
3.4.2 Výkonový analyzátor . . . . .	25
3.4.3 Osciloskop . . . . .	28
<b>4 Experimentální ověření</b>	<b>30</b>
4.1 Odpor vinutí statoru . . . . .	34
4.2 Zkouška naprázdno . . . . .	34
4.2.1 Výsledek . . . . .	35
4.3 Měření nakrátko . . . . .	37
4.4 Zjištění nenasycené hodnoty podélné synchronní reaktance . . . . .	39
4.5 Zjištění provozních hodnot synchronních reaktancí . . . . .	40
<b>5 Závěr</b>	<b>48</b>
<b>Literatura</b>	<b>49</b>

# Seznam obrázků

1.1	Frekvenční měnič Unidrive SP2404 [1] . . . . .	14
1.2	Synchronní generátor LSA 37 M5 [7] . . . . .	14
1.3	Obecné schéma generátoru LSA 37 M5 [7] . . . . .	14
1.4	Spojení vinutí statoru „D“ generátoru dle [7] . . . . .	14
1.5	Princip inkrementálního snímače [10] . . . . .	16
1.6	Výstupní signály snímače CNS50 [8] . . . . .	16
2.1	Fázorový diagram synchronního generátoru s vyniklými póly s přím- kovou magnetizační charakteristikou . . . . .	18
2.2	Stabilita generátoru v závislosti na zátěžném úhlu. Převzato z [4] . . .	19
3.1	Signály analyzované při přímém měření zátěžného úhlu [6] . . . . .	20
3.2	Fázorový diagram pro měření zátěžného úhlu . . . . .	21
3.3	Fázorový diagram pro určení podélné synchronní reaktance . . . . .	23
3.4	Blokové schéma návrhu měřicího zařízení . . . . .	24
3.5	Kabelový mezikus . . . . .	25
3.6	Výkonový analyzátor HIOKI 3390 [13] . . . . .	26
3.7	Konektorová výbava HIOKI 3390 [13] . . . . .	26
3.8	Připojení měřicích vodičů . . . . .	26
3.9	Nastavení měření napětí a proudu . . . . .	27
3.10	Nastavení měření otáček . . . . .	27
3.11	Multifunkční analyzátor Yokogawa DL850 [12] . . . . .	28
3.12	Připojení měřicích kabelů na Yokogawa DL850 . . . . .	28
3.13	Ilustrační snímek z osciloskopu zachycující signál Z a průběh svorko- vého napětí . . . . .	29
4.1	Schéma zapojení měření zátěžného úhlu ( <b>modře jsou vyznačeny vo- diče zapojované v rámci měření</b> ) . . . . .	31
4.2	Připojení měřicích vodičů na svorky MX a NX . . . . .	32
4.3	Připojení proudových snímačů IAC . . . . .	32
4.4	Připojení proudového snímače IDC . . . . .	33
4.5	Připojení mezikusu k měniči . . . . .	33
4.6	Změřená charakteristika naprázdno . . . . .	37
4.7	Změřená charakteristika nakratko . . . . .	39
4.8	Charakteristika nakratko a vzduchové mezery a odečtení hodnot pro určení nenasycené $X_d$ . . . . .	40
4.9	Závislost nasycené hodnoty $x_d$ na výkonu generátoru . . . . .	46
4.10	Závislost nasycené hodnoty $x_q$ na výkonu generátoru . . . . .	46
4.11	Závislost velikosti zátěžného úhlu na výkonu generátoru . . . . .	47

# Seznam tabulek

1.1	Vybrané parametry generátoru LSA 37 M5 [3] . . . . .	15
1.2	Vybrané parametry snímače CNS50 [8] . . . . .	16
3.1	Barvy vodičů s vyvedenými signály mezikusu . . . . .	25
4.1	Použité měřicí přístroje a jejich výrobní čísla . . . . .	30
4.2	Změřené hodnoty při měření odporu vinutí . . . . .	34
4.3	Změřené hodnoty při zkoušce naprázdno . . . . .	35
4.4	Interpolované hodnoty z měření naprázdno a hodnoty s korekcí . . . . .	36
4.5	Hodnoty zjištěné při zkoušce nakrátko . . . . .	38
4.6	Měření generátoru při zatížení s účíníkem blízkým 1 – 1. část . . . . .	41
4.7	Měření generátoru při zatížení s účíníkem blízkým 1 – 2. část . . . . .	42
4.8	Měření přebuzeného generátoru s $Q = konst.$ – 1. část . . . . .	42
4.9	Měření přebuzeného generátoru s $Q = konst.$ – 2. část . . . . .	43
4.10	Měření podbuzeného generátoru s $Q = konst.$ – 1. část . . . . .	43
4.11	Měření podbuzeného generátoru s $Q = konst.$ – 2. část . . . . .	44

# Seznam symbolů, veličin a zkratk

- A inkrementální signál enkodéru  
 $\bar{A}$  negovaný inkrementální signál enkodéru  
B inkrementální signál enkodéru  
 $\bar{B}$  negovaný inkrementální signál enkodéru  
 $E_{10}$  napětí indukované ve statoru budícím proudem  
 $E_{10}$  napětí indukované ve statoru budícím proudem  
 $f$  frekvence  
 $f_s$  frekvence napětí na výstupu generátoru  
 $I_1$  proud kotvou  
 $I_2$  budící proud  
 $I_b$  budící proud  
 $I_f$  fázový proud  
 $I_n$  jmenovitý proud  
**L1(U), L2(V), L3(W)** označení fází  
 $n$  otáčky  
 $n_n$  jmenovité otáčky  
 $p$  počet pólových dvojic  
**p.u.** *per unit* – poměrná jednotka  
 $P_1$  činný výkon  
 $P_{max}$  výkon odpovídající momentu zvratu  
 $Q$  jalový výkon  
 $R_1$  průměrný odpor vinutí statoru  
 $R_f$  odpor fáze  
 $R_{f,avg}$  průměrný odpor jedné fáze  
 $S_n$  jmenovitý zdánlivý výkon  
**T1÷T12** označení svorek vinutí statoru alternátoru  
 $t$  čas mezi nulovým signálem a kladnou půlvlnou napětí  
 $t_{kal}$  kalibrační čas  
 $T_U$  perioda výstupního napětí generátoru  
 $t_\delta$  čas pro dopočítání zátěžného úhlu  
 $U$  napětí  
 $u_0$  poměrné napětí naprázdno  
 $U_1$  fázor svorkového napětí  
 $u_1(t)$  okamžitá hodnota svorkového napětí  
 $U_1$  efektivní hodnota svorkového napětí  
 $U_n$  jmenovité napětí  
 $X_d$  podélná synchronní reaktance

$x_d$  podélná synchronní reaktance p.u.  
 $X_q$  příčná synchronní reaktance  
 $x_q$  příčná synchronní reaktance p.u.  
 $Z$  nulová pozice enkodéru – nulový pulz  
 $\bar{Z}$  negovaný nulový pulz  
 $\delta$  zátěžný úhel v elektrických stupních  
 $\delta_{mech}$  mechanický zátěžný úhel - fyzické natočení rotoru stroje oproti poloze při chodu naprázdno  
 $\varphi$  fázový posun mezi svorkovým napětím a proudem kotvou  
 $\cos \varphi$  účinník  
 $\varphi_{el}$  elektrický úhel  
 $\varphi_{mech}$  mechanický úhel  
 $\eta$  účinnost

# Úvod

Synchronní generátory (alternátory) jsou bezesporu nejpoužívanějšími zařízeními pro přeměnu mechanické energie na elektrickou. Proto je nutné kontrolovat jejich provozní stavy a předcházet poruchovým situacím. Jednou z možných poruch je vypadnutí alternátoru ze synchronismu, které je obvykle provázeno mechanickým poškozením stroje a je nutné tomuto stavu předejít. Pro kontrolu stability generátoru lze využít kontroly relativního náklonu rotoru při zatížení vzhledem k poloze naprázdno, neboli zátěžného úhlu.

Práce se v prvních částech zabývá rozбором pracoviště a popisem jednotlivých částí s důslednějším zaměřením na části využitě v následujícím návrhu měřicího systému.

Cílem bakalářské práce je provést rozbor možností měření zátěžného úhlu přímou metodou na laboratorním soustrojí složeného z asynchronního motoru TAMEL SIg 132 M4 a synchronního generátoru Leroy Somer LSA 37M5 1/4 a návrh měřicího systému včetně jeho experimentálního ověření. Dalším cílem je zjištění vhodnosti nepřímého měření provozních nasycených reaktancí.



# 1 Měřená sestava

Měřené zařízení je umístěno na ocelovém rámu obsahujícím soustrojí asynchronního motoru TAMEL SIg 132 M4 s výkonem 7,5 kW pracujícího jako pohon mechanicky spojeným pružnou spojku se čtyřpólovým synchronním generátorem Leroy Somer LSA 37 M5 o výkonu 7,5 kVA.

Asynchronní motor obsahuje inkrementální snímač otáček Sick Stegmann CNS50 připojený do otáčkového vstupu měniče.

Pro ovládání parametrů soustrojí je vedle něj umístěn rozvaděč s analyzátozem sítě a frekvenčním měničem Control Techniques Unidrive SP2404 napájející zmiňovaný asynchronní motor.

## 1.1 Popis zařízení

Dle [3] dokáže zařízení pracovat ve dvou režimech:

- **Autonomní provoz** – provoz do oddělené zátěže nezávislé na okolní síti. Zařízení pracuje jako zdroj konstantního napětí a frekvence. Buzení zajišťuje regulátor napětí R250 nebo laboratorní zdroj STATRON. Při této volbě lze nastavit frekvenci výstupního napětí změnou otáček pohonu. Změnou buzení lze regulovat výstupní napětí soustrojí.
- **Paralelní spolupráce** – určen pro provoz zdroje paralelně s napájecí sítí (případně jakoukoliv tvrdou sítí). Pro buzení nelze využít regulátor napětí R250, pouze laboratorní zdroj STATRON. Tento režim umožňuje nastavit činný výkon regulací momentu na hřídeli asynchronního motoru činný výkon dodávaný do sítě. Před připojením generátoru na napájecí síť se pro potřeby fázování chová stejně jako v případě autonomního provozu.

Při využití režimu autonomního provozu lze nastavovat rychlost otáčení soustrojí a tím požadovanou frekvenci výstupního napětí pomocí potenciometru „RYCHLOST“. Výstupní napětí reguluje potenciometr s označením „NAPĚTÍ“ ovládající regulátor R250, který je napájen přímo ze statorového vinutí generátoru. Ovládání při režimu paralelní spolupráce se sítí je zajištěno voličem „MOMENT“ pro nastavení činného výkonu dodávaného asynchronním motorem. Napětí generátoru a napájení budiče se nastavuje pomocí laboratorního zdroje umístěného na skříni rozvaděče. Podrobný popis ovládání zařízení je uveden v [3].

Měnič Control Techniques Unidrive SP2404 je frekvenční měnič o výkonu 7,5 kW s trvalým výstupním proudem 16 A. Umožňuje ovládat pohon ve dvou režimech odpovídající provozu do ostrovní sítě nebo paralelně s napájecí sítí:

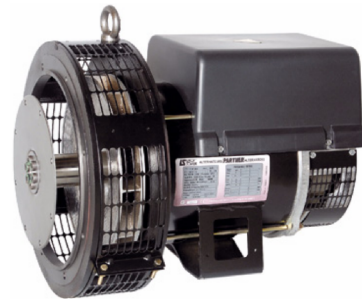
- **Konstantní otáčky** – Měnič udržuje otáčky asynchronního motoru na stálé hodnotě a dle toho přizpůsobuje proud dodávaný asynchronnímu motoru. Využito

pro „Autonomní provoz“ a fázování pro „Paralelní spolupráci“.

- Konstantní moment – Při paralelní spolupráci udržuje otáčky motoru vnější napájecí síť většího výkonu, než pohon zařízení, asynchronní motor tedy může dodávat pouze další činný výkon synchronnímu generátoru. Tato funkce je zajištěna hodnotou momentu dodávaného motorem synchronními generátoru.



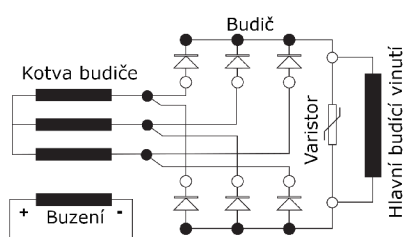
Obr. 1.1: Frekvenční měnič Unidrive SP2404 [1]



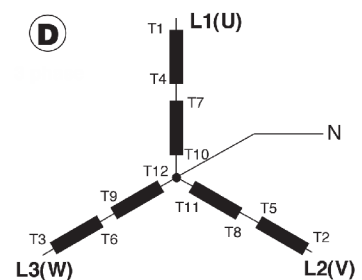
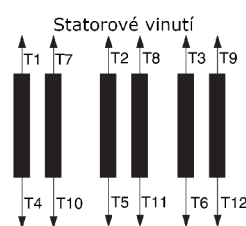
Obr. 1.2: Synchronní generátor LSA 37 M5 [7]

## 1.2 Synchronní generátor Leroy Somer LSA 37 M5

Bezkartáčový budič alternátoru se skládá z budícího vinutí umístěného jako stator kolem kotvy budiče umístěné na hřídeli stroje. Napětí se dále usměrňuje pomocí šestipulzního usměrňovače umístěného na stejné hřídeli a přivádí se na hlavní budící vinutí alternátoru. Jako přepětová ochrana je použit varistor (napětově závislý rezistor). Obecné schéma budiče a generátoru je na obrázku 1.3.



Obr. 1.3: Obecné schéma generátoru LSA 37 M5 [7]



Obr. 1.4: Spojení vinutí statoru „D“ generátoru dle [7]

T1÷T12 označení svorek vinutí statoru alternátoru  
L1(U), L2(V), L3(W) označení fází

Stator generátoru je proveden jako dělený trojfázový (každá fáze je složena z dvou oddělených vinutí) s různými možnostmi spojení. Aktuálně je generátor dle [3] spojený do hvězdy a statorová dělená vinutí jsou spojena do série jako na obrázku 1.4.

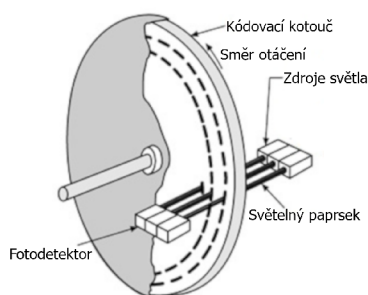
Dle poměru hodnot  $x_d$  a  $x_q$  z tabulky 1.1 můžeme soudit že jde o stroj s vyniklými póly. [4] uvádí, že pro synchronní stroje s hladkým rotorem mají hodnoty příčné i podélné reaktance velmi podobnou hodnotu, zatímco stroje s vyniklými póly se vyznačují rozdílnými hodnotami synchronní reaktance v podélné ( $x_d$ ) a příčné ( $x_q$ ) ose.

Název	Označení	Hodnota
Typové označení	-	LSA 37 M5 1/4
Jmenovitý zdánlivý výkon	$S_n$	7,5 kVA
Jmenovitá účinnost při $\cos \varphi = 0,8$	$\eta$	75,5 %
Jmenovité napětí	$U_1$	$3 \times 400$ V
Jmenovitý proud	$I_1$	10,83 A
Jmenovité otáčky	$n_n$	1500 $\text{min}^{-1}$
Počet pólových dvojic	$p$	$2p=4$
Poměrná podélná synchronní reaktance	$x_d$	140 %
Poměrná příčná synchronní reaktance	$x_q$	70 %

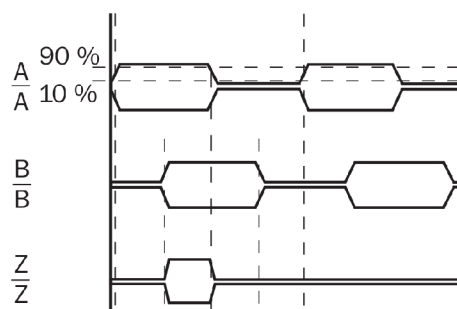
Tab. 1.1: Vybrané parametry generátoru LSA 37 M5 [3]

### 1.3 Inkrementální snímač CNS50

Inkrementální snímač otáček pracuje na principu clonění světelného toku mezi zdrojem světla a fotodetektorem. [9] Princip inkrementálního snímače je zobrazen na obrázku 1.5. CNS50 obsahuje 2 inkrementální signály použitelné pro detekci rychlosti otáčení i pro detekci pozice rotoru A a B (pouze za běhu, nejedná se o absolutní snímač polohy). Dále obsahuje referenční signál Z pro detekci celé otáčky. [8] Enkoder vysílá do komunikačního vodiče i negované signály  $\bar{A}$ ,  $\bar{B}$ ,  $\bar{Z}$  z důvodu eliminace rušení signálu.



Obr. 1.5: Princip inkrementálního snímače [10]



Obr. 1.6: Výstupní signály snímače CNS50 [8]

Název	Hodnota
Počet pulzů [3]	4096 pulzů na otáčku
Jmenovité otáčky	6000 min <sup>-1</sup>
Jmenovité napětí	5 V ± 10 %
Jmenovitý proud	50 mA

Tab. 1.2: Vybrané parametry snímače CNS50 [8]

## 2 Synchronní stroj

Synchronní stroje (typ střídavého točivého stroje) se vyznačují otáčkami rotoru přímo úměrnými frekvenci statorovému napětí, neboli se otáčejí za normálního provozu synchronními otáčkami. [2]

Převážně se používají k výrobě elektrické energie, protože je možná jejich hospodárná výroba pro velké výkony. Synchronní generátory se běžně označují jako alternátory a lze dělit dle typu zdroje mechanické energie (a tím pádem obvykle i dle poháněcí rychlosti) [2] na:

1. Turboalternátory – poháněné parní nebo plynovou turbínou s rychlostí  $1500 \text{ min}^{-1}$  nebo  $3000 \text{ min}^{-1}$  v síti o frekvenci 50 Hz.
2. Hydroalternátory – poháněné vodní turbínou. Rychlost otáčení těchto alternátorů je nižší, než u turboalternátorů, tudíž obsahují více pólů pro dosažení stejné frekvence výstupního napětí.

Jako kotva slouží ve většině případů stator<sup>1</sup>, který je složen z tenkých vzájemně izolovaných plechů pro snížení ztrát vířivými proudy a pro zvýšení vzájemné indukce mezi rotorovým a statorovým magnetickým obvodem. Na kotvě je umístěno trojfázové vinutí s cívkami posunutými vzájemně o  $120^\circ$  elektrických. U dvoupólového stroje je elektrický úhel  $\varphi_{el}$  shodný s úhlem mechanickým  $\varphi_{mech}$ . U vícepólových strojů je se  $\varphi_{el}$  řídí dle počtu pólových dvojic  $p$ :

$$\varphi_{mech} = \frac{\varphi_{el}}{p} [^\circ; ^\circ, -] \quad (2.1)$$

Na rotoru je umístěno budící vinutí. Na rozdíl od statoru není nutné tvořit jej z jednotlivých izolovaných plechů, protože se otáčí shodnou rychlostí s fázorem magnetického toku ve vzduchové mezeře, tudíž ztráty vířivými proudy za ustáleného chodu nevznikají. Dle konstrukčního uspořádání rotoru lze generátory dělit na synchronní stroje s:

- hladkým rotorem – rotor je pevný válec s drážkami na povrchu, v nichž je vsypáno rotorové vinutí buzené stejnosměrným proudem (obvyklé uspořádání turboalternátorů). Z důvodu vyšší rychlosti otáčení a vyššímu mechanickému namáhání jsou navrhovány s menším průměrem a delší osovou délkou, než hydroalternátory. Pracují na hranici mechanické pevnosti. [2]
- vyniklými póly – na rotoru složeného z rotorového kola je umístěno několik pólů s vlastní budící cívkou (uspořádání používané při konstrukci hydroalternátorů). Charakteristikou je i větší průměr úměrný počtu pólů a kratší osová délka. [2]

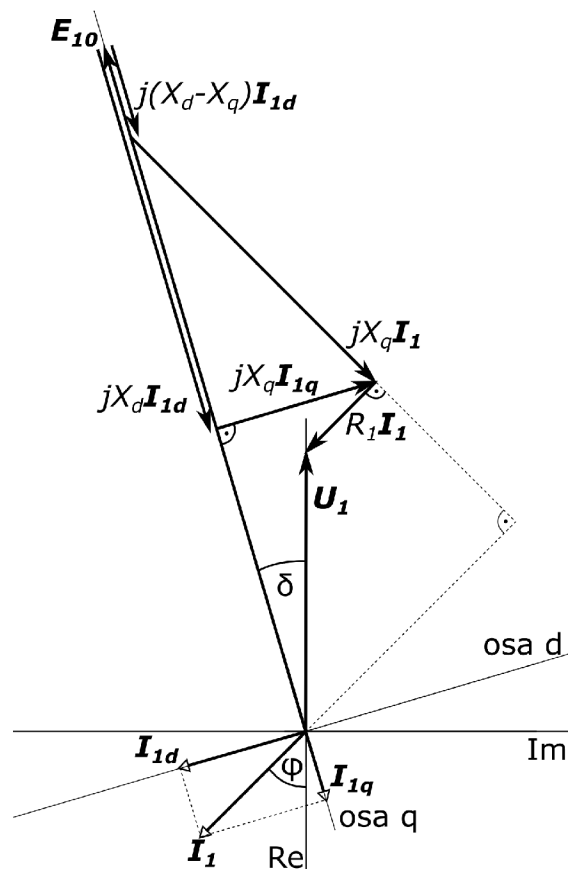
---

<sup>1</sup>[2, 4] uvádí ojedinělé používání rotoru jako kotvy pro nízká napětí a malé výkony. Této konstrukce je např. budič generátoru LSA 37 M5.

Pólové nástavce rotoru s vyniklými póly můžou být vytvořeny z plechů, v kterých je umístěno další (pomocné, tlumící) vinutí – amortizér a slouží jako opatření proti kývání rotoru. [4]

## 2.1 Fázorový diagram synchronního generátoru s rotorem s vyniklými póly

Dle [4] lze sestavit fázorový diagram synchronního generátoru s rotorem s vyniklými póly dle obrázku 2.1.



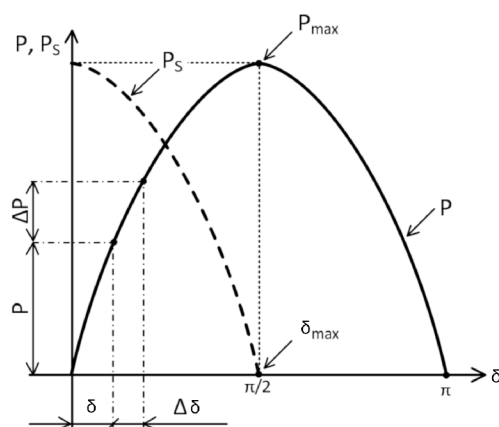
Obr. 2.1: Fázorový diagram synchronního generátoru s vyniklými póly s přímkovou magnetizační charakteristikou

## 2.2 Zátěžný úhel stroje s rotorem s vyniklými póly

Zátěžným úhlem  $\delta$  (viz Obr. 2.1) se rozumí elektrický úhel mezi indukovaným napětím  $E_{10}$  a svorkovým napětím  $U_1$  neboli fázový posun mezi jím odpovídajícími průběhy okamžitých hodnot  $E_{10}$  a  $u_1(t)$ . [2] Zátěžný úhel roste se snižujícím se

buzení i při zvyšování poháněcího momentu generátoru. Dodá-li pohon generátoru moment vyšší než hodnotu odpovídající výkonu  $P_{max}$ , bude elektromagnetický moment alternátoru nižší (klesá při  $\delta$  vyšším, než  $\delta_{max}$ ), než moment turbíny, rotor alternátoru se začne rozdílem momentů zrychlovat a alternátor vypadne ze synchronismu. Hodnota  $P_s$  se nazývá činitel stabilizačního výkonu a udává schopnost stroje udržovat se v synchronismu. [4]

Mechanicky je zátěžný úhel možné definovat jako skutečný úhel, o který je rotorové kolo při určitém zatížení a buzení natočeno z polohy, v které by bylo při běhu stroje naprázdno<sup>2</sup>. Toto odpovídá i úhlu, který svírá osa pólů stroje s osou výsledného magnetického pole ve vzduchové mezeře. [2, 4]



Obr. 2.2: Stabilita generátoru v závislosti na zátěžném úhlu. Převzato z [4]

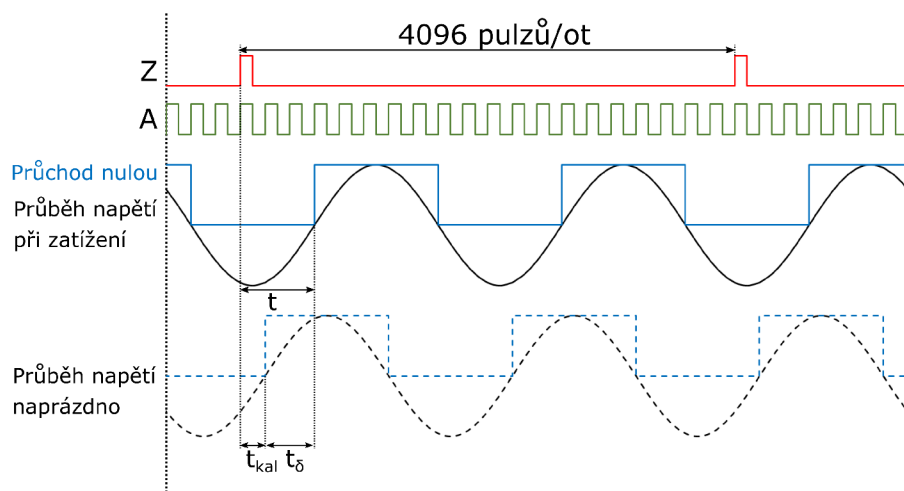
<sup>2</sup>Toto platí pouze pro dvoupólový stroj, pro vícepólový stroj je mechanický úhel  $p$ -krát menší dle vztahu 2.1.

## 3 Zjištění provozních parametrů synchronního stroje

### 3.1 Přímé měření zátěžného úhlu synchronního generátoru

Námět na přímé měření zátěžného úhlu pomocí dostupných signálů převzat z [6]. Metoda spočívá v přímém odečtení hodnoty  $\delta$ . Tuto hodnotu je možné odečíst porovnáním polohy rotoru k průběhu signálu výstupního svorkového napětí  $u_1(t)$ .

Metoda využívá odečítání času mezi nulovým pulsem  $Z$  enkodéru a nejbližším průchodem nulou průběhu výstupního napětí  $U_1$  generátoru. Tímto získáme čas  $t$ . Princip je zobrazen na obrázku 3.1. Nezáleží na tom, jestli je využita první, druhá nebo třetí fáze generátoru, každá z nich má stejný průběh, který je jen fázově posunutý o  $120^\circ$  elektrických. Ani nulový pulz enkodéru není mechanicky natočený na určitou fázi. Tyto problémy lze vyřešit kalibrací. Dalším problémem je průběh dvou period napětí v jedné otáčce stroje, který ale stačí vyřešit pouhým vynásobením mechanického zátěžného úhlu počtem pólových dvojic stroje.



Obr. 3.1: Signály analyzované při přímém měření zátěžného úhlu [6]

Kalibrace se provede při provozu generátoru naprázdno. Při tomto provozu lze z 2.1 vyčíst, že při  $I_1 = 0A$  jsou nulové i úbytky na synchronních reaktancích i odporu statorového vinutí. Z toho vyplývá i rovnost napětí  $E_{10} = U_1$  a  $\delta = 0^\circ$ . Při provozu naprázdno lze získat kalibrační čas  $t_{kal}$ . Lze uvažovat:

$$t_\delta = t - t_{kal} \text{ [s; s, s]} \quad (3.1)$$

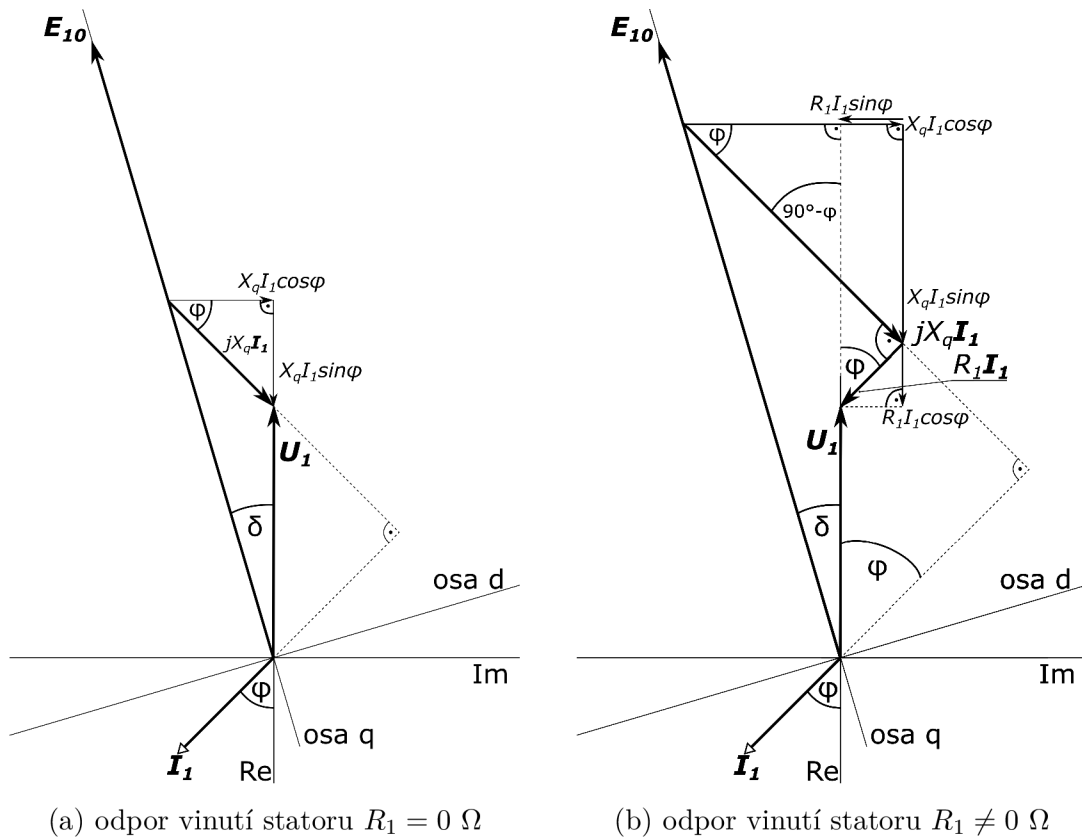


$$\delta = p \cdot \frac{t_\delta}{T_U} \cdot 360^\circ \text{ [}^\circ; -, s, s\text{]} \quad (3.2)$$

Kde  $t_\delta$  je čas pro určení zátěžného úhlu,  $T_U$  je doba periody výstupního napětí generátoru,  $p$  počet pólových dvojic<sup>1</sup>.

### 3.2 Stanovení hodnoty provozní příčné synchronní reaktance

Metoda vychází z fázorového diagramu. Pro měření je možné použít zjednodušující podmínku, kdy předpokládáme, že odpor vinutí statoru  $R_1$  je nulový<sup>2</sup>.



Obr. 3.2: Fázorový diagram pro měření zátěžného úhlu

Jak již napovídá obrázek 3.2, je nutné pro zjištění zátěžného úhlu znát:

- svorkové napětí  $U_1$ ,

<sup>1</sup>Kompenzace násobku času nutných pro jednu otáčku vícepólového alternátoru pro určitou výstupní frekvenci.

<sup>2</sup>[4] uvádí, že u synchronních generátorů je odpor vinutí mnohem nižší, než synchronní reaktance. Tento předpoklad tedy nezanášá příliš hrubou chybou. Platí ale pouze u velkých výkonů.

- proud kotvou (statorovým vinutím)  $I_1$ ,
- zátěžný úhel měřený přímou metodou  $\delta$ ,
- Fázový posun  $\varphi$  mezi  $U_1$  a  $I_1$  nebo činný výkon  $P_1$ ,
- Hodnotu odporu vinutí statoru  $R_1$  pokud je hodnota k dispozici.

Dle shodnosti úhlů na fázorových diagramech 3.2 a dle [5] je možné na základě takto změřených hodnot určit zátěžný úhel pomocí goniometrické funkce a využití znalostí o pravoúhlém trojúhelníku. Při zanedbání  $R_1$  jsou vztahy pro určení  $\delta$ :

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{X_q I_1 \cos \varphi}{U_1 + X_q I_1 \sin \varphi} [-; \Omega, A, -; V, \Omega, A, -] \quad (3.3)$$

$$\delta = \operatorname{arctg} \frac{X_q I_1 \cos \varphi}{U_1 + X_q I_1 \sin \varphi} [^{\circ}; \Omega, A, -; V, \Omega, A, -] \quad (3.4)$$

V případě známé hodnoty  $R_1$  lze použít následující vztahy:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{X_q I_1 \cos \varphi - R_1 I_1 \sin \varphi}{U_1 + R_1 I_1 \cos \varphi + X_q I_1 \sin \varphi} [^{\circ}; \Omega, A, ^{\circ}, \Omega, A, ^{\circ}; V, \Omega, A, ^{\circ}, \Omega, A, ^{\circ}] \quad (3.5)$$

$$\delta = \operatorname{arctg} \frac{X_q I_1 \cos \varphi - R_1 I_1 \sin \varphi}{U_1 + R_1 I_1 \cos \varphi + X_q I_1 \sin \varphi} [^{\circ}; \Omega, A, ^{\circ}, \Omega, A, ^{\circ}; V, \Omega, A, ^{\circ}, \Omega, A, ^{\circ}] \quad (3.6)$$

Vztah 3.5 lze upravit pro zjištění hodnoty příčné synchronní reaktance  $X_q$ :

$$X_q = \frac{U_1 \operatorname{tg} \delta + R_1 I_1 (\operatorname{tg} \delta \cos \varphi + \sin \varphi)}{I_1 (\cos \varphi - \operatorname{tg} \delta \sin \varphi)} [\Omega; V, ^{\circ}, \Omega, A, ^{\circ}, ^{\circ}, ^{\circ}; A, ^{\circ}, ^{\circ}, ^{\circ}] \quad (3.7)$$

V poměrných jednotkách:

$$x_q = X_q \cdot \frac{I_n}{U_n} \cdot 100 [\%; \Omega, A, V] \quad (3.8)$$

Kde  $I_n$  je jmenovitý proud a  $U_n$  jmenovité napětí.

### 3.3 Stanovení hodnoty provozní podélné synchronní reaktance

Pro zjištění hodnoty podélné synchronní reaktance  $X_d$  je nutné provést zkoušku naprázdno z důvodu nutnosti znát pro výpočet vnitřní indukované napětí  $E_{10}$ . Dále

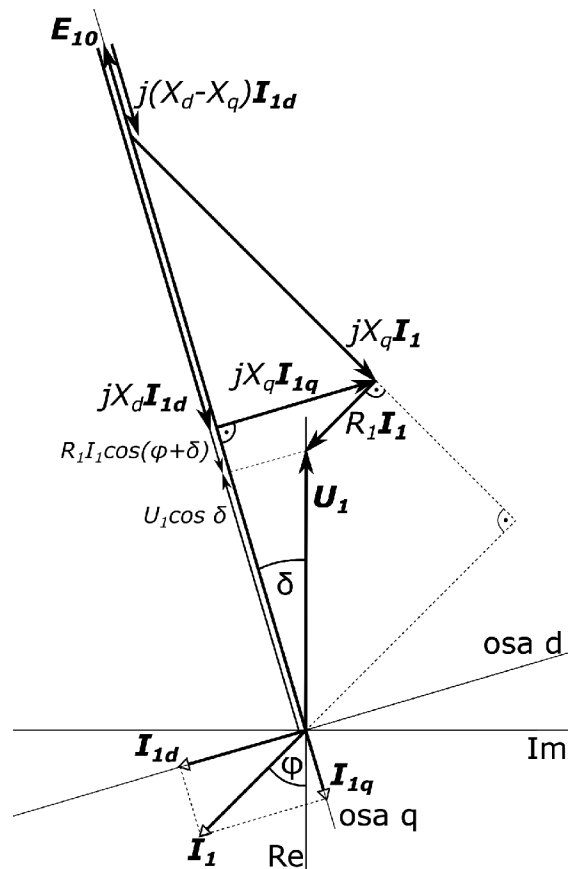
je nutné při samotném měření při zatížení měřit stejné hodnoty jako v předchozí kapitole 3.2.

Z fázorového diagramu na obrázku 3.10 lze vyjádřit vztah pro výpočet  $X_d$ :

$$X_d = \frac{E_{10} - R_1 I_1 \cos(\varphi + \delta) - U_1 \cdot \cos \delta}{I_1 \sin(\varphi + \delta)} \quad [\Omega; \text{V}, \Omega, \text{A}, ^\circ, ^\circ, \text{V}, ^\circ, \text{A}, ^\circ, ^\circ] \quad (3.9)$$

A pro poměrnou hodnotu:

$$x_d = X_d \cdot \frac{I_n}{U_n} \cdot 100 \quad [\%; \Omega, \text{A}, \text{V}] \quad (3.10)$$

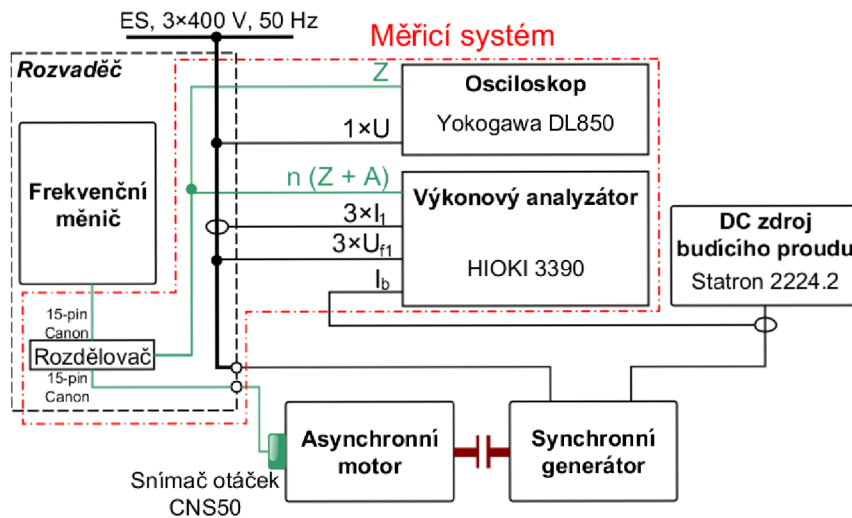


Obr. 3.3: Fázorový diagram pro určení podélné synchronní reaktance

### 3.4 Sestava měřicího systému

Pro vytvoření měřicího systému je užito zařízení dostupných v laboratoři. Pro měření času  $t_\delta$  (viz 3.1) pro počítání zátěžného úhlu je užít Yokogawa DL850, k němuž je připojeno jedno fázové napětí (v tomto případě fáze 1) a nulý pulz enkodéru z rozdělovače. Výkonový analyzátor HIOKI 3390 je využit pro měření ostatních veličin. Pro samotné zjišťování provozních reaktancí jsou důležité zejména hodnoty:

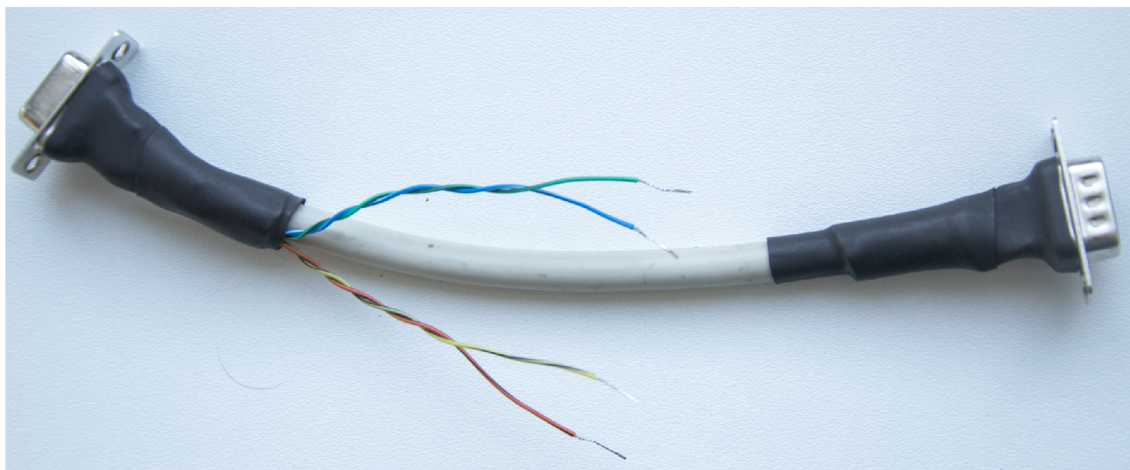
- fázového svorkového napětí  $U_1$  ve všech fázích,
- proudu  $I_1$  všemi fázemi,
- činného výkonu generátoru  $P_1$ .



Obr. 3.4: Blokové schéma návrhu měřicího zařízení

### 3.4.1 Signál inkrementálního snímače

Signál je dle [3] veden ze snímače kabele do konektoru ve stěně rozvaděčové skříňe a dále dalším kabelem (PAAR-TRONIC-CY  $8 \times 2 \times 0,25 \text{ mm}^2$ ) zakončeným třířádkovým 15-pinovým konektorem CANON do enkodérového vstupu měniče. Byl vyroben kabelový mezikus s vyvedenými signály A,  $\bar{A}$ , Z,  $\bar{Z}$  (viz 1.3). Zapojení jednotlivých pinů v konektorech CANON je popsáno v [3].



Obr. 3.5: Kabelový mezikus

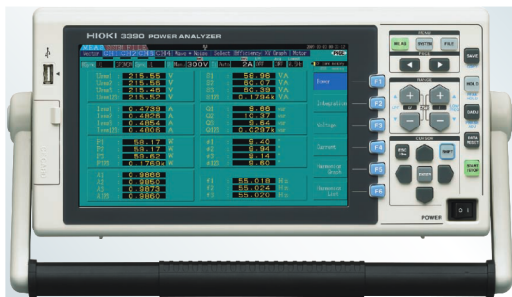
signál	barva
A	modro-bílá
$\bar{A}$	zeleno-černá
Z	žluto-černá
$\bar{Z}$	oranžovo-černá

Tab. 3.1: Barvy vodičů s vyvedenými signály mezikusu

### 3.4.2 Výkonový analyzátor

Pro měření elektrických veličin byl zvolen dostupný výkonový analyzátor HIOKI 3390. Výhodou tohoto přístroje je možnost ukládání měřených dat do přístroje ve formátu \*.csv a možnost přenesení do počítače pomocí USB. [13]

Analyzátor obsahuje 4 kanály pro měření napětí i proudů, a 3 konfigurovatelné vstupy (předně určené pro tenzometr a čidlo otáček). [13]



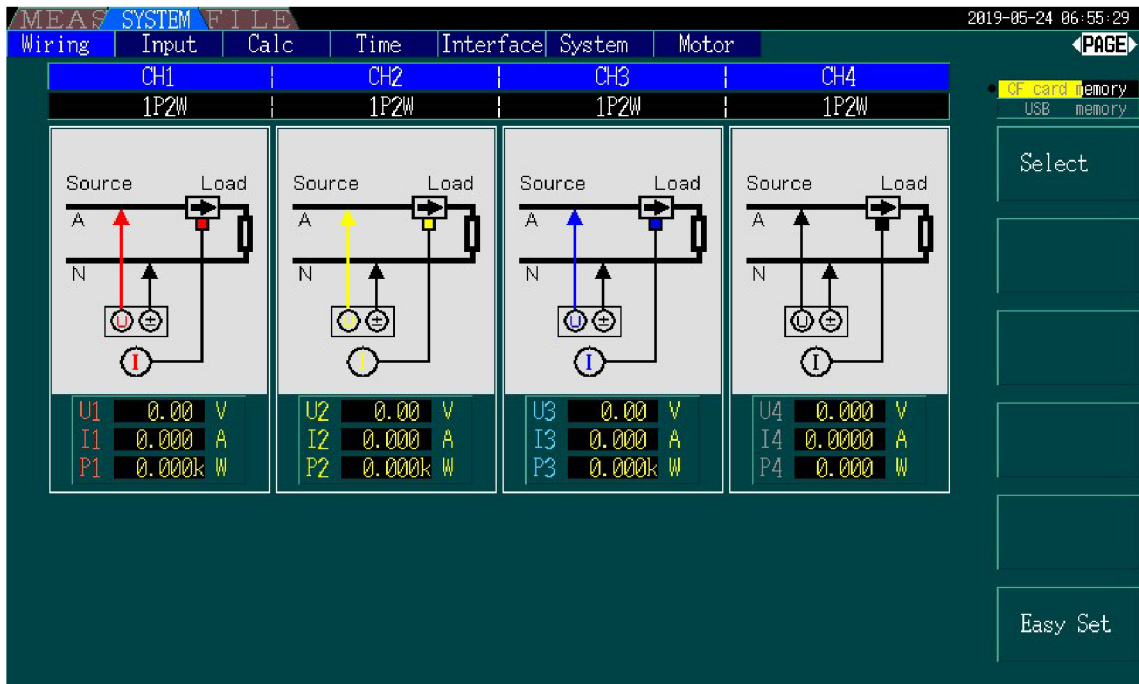
Obr. 3.6: Výkonový analyzátor HI-OKI 3390 [13]



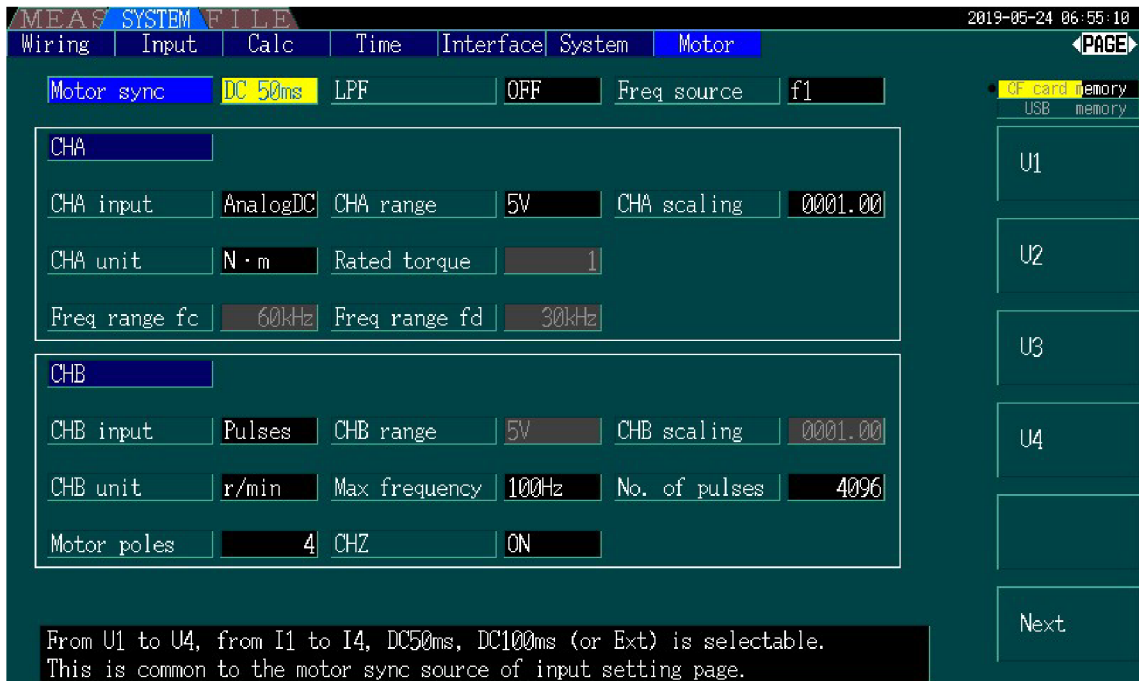
Obr. 3.7: Konektorová výbava HIOKI 3390 [13]



Obr. 3.8: Připojení měřících vodičů



Obr. 3.9: Nastavení měření napětí a proudu



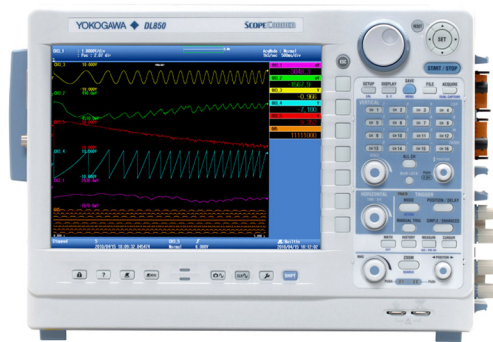
Obr. 3.10: Nastavení měření otáček



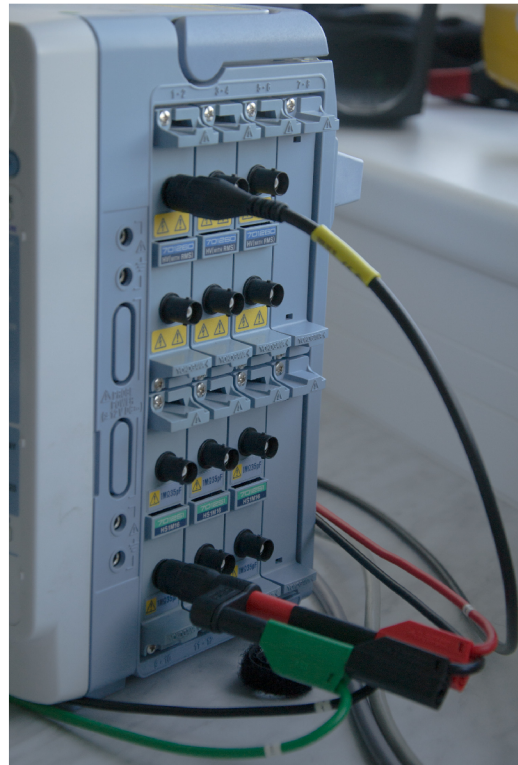
### 3.4.3 Osciloskop

Pro měření času  $t$  mezi nulovým pulzem a průchodem nulou lze užít jakýkoliv osciloskop s dostatečnou frekvencí vzorkování (ideálně alespoň 1MS/s). Vzhledem k velmi krátkému času nulového pulzu – 2  $\mu$ s. K dispozici byl multifunkční analyzátor Yokogawa DL850.

Princip měření času  $t$  je na obrázku 3.13.



Obr. 3.11: Multifunkční analyzátor Yokogawa DL850 [12]



Obr. 3.12: Připojení měřicích kabelů na Yokogawa DL850

Jednotlivé použité kanály nevyžadují žádné dodatečné nastavení. Oba použité kanály (pro měření napětí a nulového pulzu) byly nastaveny pouze na měření napětí.



Jak lze vidět na následujícím obrázku, nulový pulz  $Z$  se opakuje každé 2 periody svorkového napětí. Čas mezi ním a nejbližším průchodem nulou je žádaný čas  $t$ .



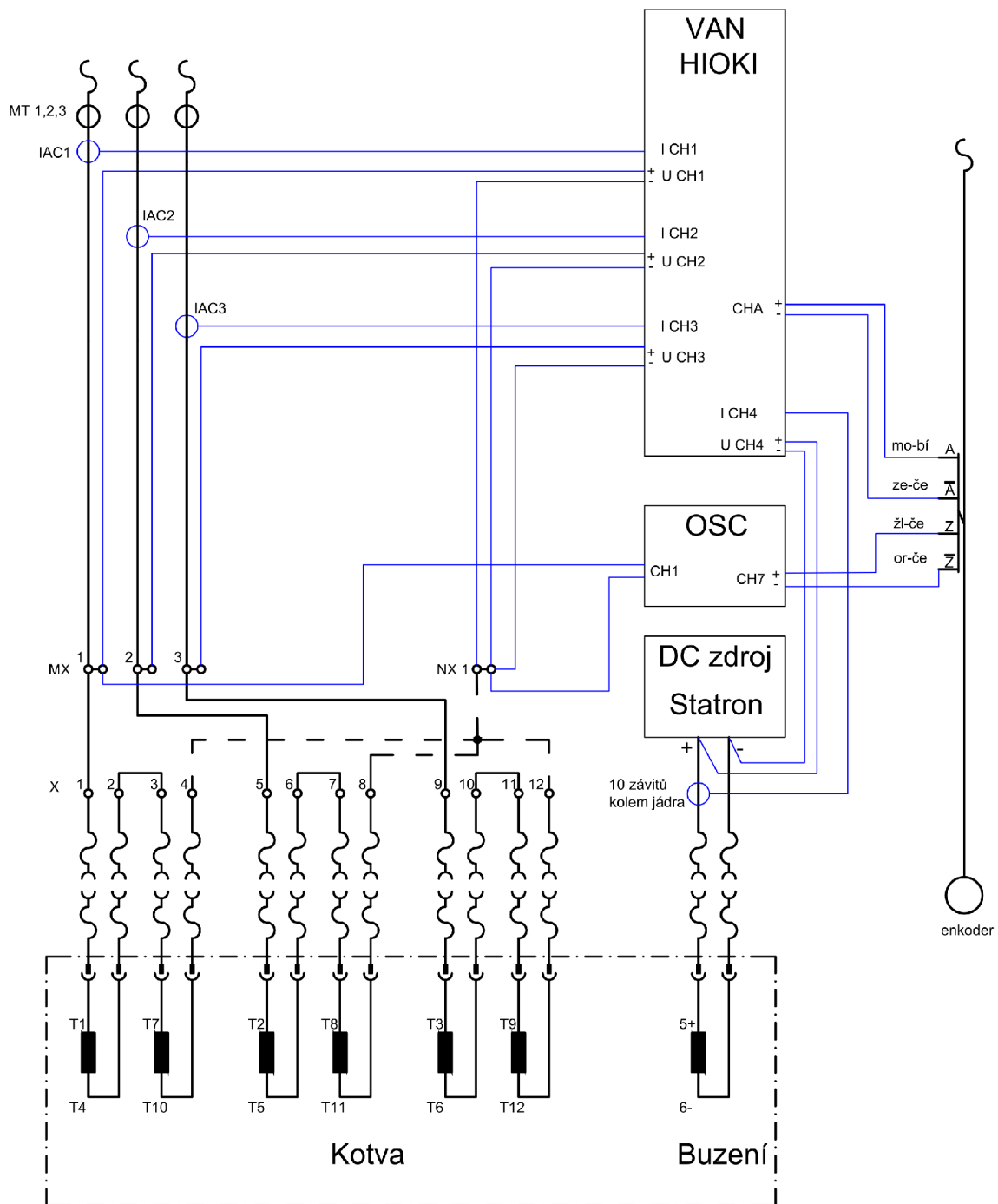
Obr. 3.13: Ilustrační snímek z osciloskopu zachycující signál  $Z$  a průběh svorkového napětí

## 4 Experimentální ověření

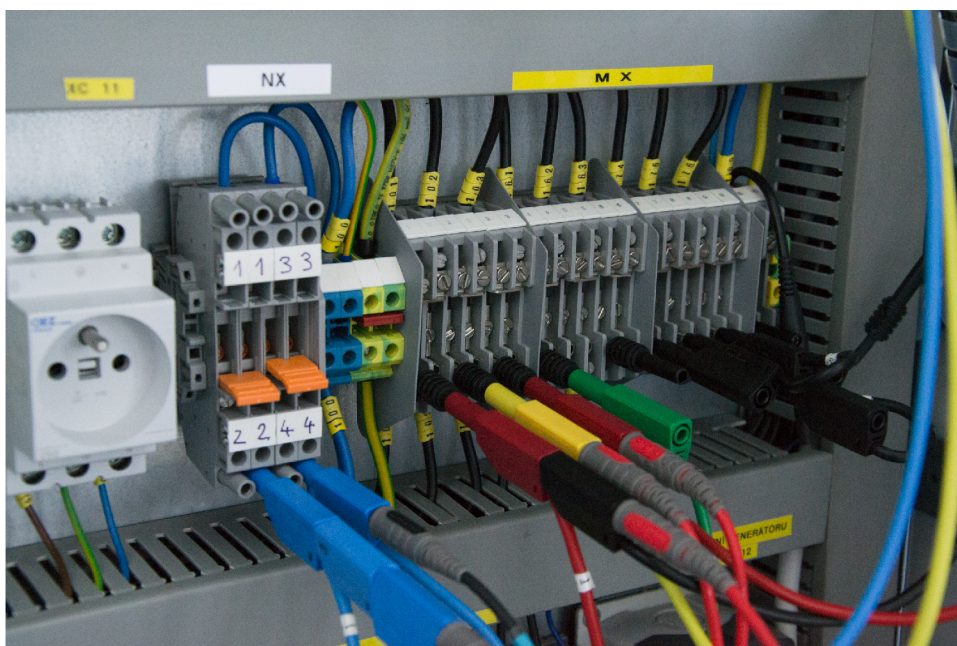
Měření bylo pro účely zjištění zátěžného úhlu zapojeno dle obrázku 4.1. Na následujících obrázcích jsou vyobrazeny místa připojení měřicích přístrojů s názvy korespondujícími se schématem.

Označení	Typ	Výrobce	Model	výrobní číslo
VAN	výkonový analyzátor	Hioki	3390	120804663
IAC1	proudový sensor AC	HIOKI	2012	120731522
IAC2	proudový sensor AC	HIOKI	2012	120731523
IAC3	proudový sensor AC	HIOKI	2012	120731524
IDC	proudový sensor AC/DC	HIOKI	2010	101120675
OSC	osciloskop	Yokogawa	DL850	91KCO6238

Tab. 4.1: Použité měřicí přístroje a jejich výrobní čísla



Obr. 4.1: Schéma zapojení měření zátěžného úhlu (modře jsou vyznačeny vodiče zapojované v rámci měření)



Obr. 4.2: Připojení měřicích vodičů na svorky MX a NX



Obr. 4.3: Připojení proudových snímačů IAC





Obr. 4.4: Připojení proudového snímače IDC



Obr. 4.5: Připojení mezikusku k měniči

## 4.1 Odpor vinutí statoru

Odpor vinutí byl měřen voltampérovou metodou dle [11]. Stejnoseměrný zdroj Statron byl připojen na každou ze 3 fází a byly změřeny hodnoty úbytku napětí při 3 různých procházejících proudech. Z nich byly vypočteny odpory a pro další výpočet bude uvažována průměrná hodnota vinutí.

fáze	$U$ V	$I$ A	$R_f$ $\Omega$	$R_{f, avg}$ $\Omega$	$R_{vin}$ $\Omega$
1	0,307	0,441	0,696		
	0,698	1,014	0,689	0,691	
	1,030	1,494	0,689		
2	0,331	0,474	0,698		
	0,710	1,029	0,690	0,693	0,693
	1,036	1,501	0,690		
3	0,340	0,488	0,697		
	0,709	1,023	0,693	0,694	
	1,083	1,564	0,692		

Tab. 4.2: Změřené hodnoty při měření odporu vinutí

### Příklad výpočtu pro fázi 1

$$R_f = \frac{U}{I} = \frac{0,307}{0,441} = 0,696 \Omega \quad (4.1)$$

$$R_{f, avg} = \frac{R_{f1,1} + R_{f1,2} + R_{f1,3}}{3} = \frac{0,696 + 0,689 + 0,689}{3} = 0,691 \Omega \quad (4.2)$$

$$R_{vin} = \frac{R_{f1} + R_{f2} + R_{f3}}{3} = \frac{0,691 + 0,693 + 0,694}{3} = 0,693 \Omega \quad (4.3)$$

## 4.2 Zkouška naprázdno

[4] označuje charakteristiku naprázdno  $U_1 = f(I_b)$ , při  $I_1 = 0$  a  $n = konst.$  jako charakteristiku vyjadřující magnetické vlastnosti stroje.

Postup je v [4] uveden následovný:

1. Pohonným rotorem roztočit generátor na synchronní otáčky.
2. Měnit budící proud  $I_b$  od 0 do maxima, kdy  $U_1 = 1,3U_n$ . Poté opět snižovat  $I_b$  do 0.

3. Vynést charakteristiku při zvyšování i snižování budícího proudu. Uvažovanou charakteristikou naprázdno bude pak střední hodnota z těchto dvou charakteristik.

Důsledek vlivu remanentní indukce a hystereze je nesterlná charakteristika při zvyšování a snižování budícího proudu. V případě, že neprotíná charakteristika naprázdno, je nutné provést korekci a ve směru osy  $x$  ji posunout tak, aby protínala počátek.

### 4.2.1 Výsledek

zvyšování $I_b$					snižování $I_b$				
$I_b$	$U_{0L1}$	$U_{0L2}$	$U_{0L3}$	$U_0$	$I_b$	$U_{0L1}$	$U_{0L2}$	$U_{0L3}$	$U_0$
A	V	V	V	V	A	V	V	V	V
0,000	22,18	22,15	22,30	22,21	0,000	31,64	31,57	31,58	31,60
0,234	90,44	90,19	90,30	90,31	0,043	40,75	40,65	40,67	40,69
0,366	132,53	132,11	132,31	132,32	0,141	76,68	76,48	76,56	76,57
0,506	171,45	170,93	171,20	171,19	0,263	118,27	117,90	118,08	118,08
0,574	185,87	185,37	185,62	185,62	0,341	143,28	142,81	143,04	143,04
0,641	198,36	197,92	198,13	198,14	0,426	168,06	167,54	167,81	167,80
0,758	215,75	215,40	215,57	215,57	0,599	203,00	202,57	202,78	202,78
0,826	223,82	223,52	223,67	223,67	0,856	232,11	231,84	231,99	231,98
0,934	234,82	234,56	234,72	234,70	1,104	246,34	246,09	246,31	246,25
1,104	246,34	246,09	246,31	246,25					

Tab. 4.3: Změřené hodnoty při zkoušce naprázdno

#### Příklad výpočtu pro 1. řádek tabulky při zvyšování $I_b$

$$U_0 = \frac{U_{0L1} + U_{0L2} + U_{0L3}}{3} = \frac{22,18 + 22,15 + 22,30}{3} = 22,21 \text{ V} \quad (4.4)$$

#### Interpolace měřených dat

Pro určení spávné charakteristiky naprázdno je nutné vypočítat střední hodnotu z měření při zvyšování a snižování  $I_b$ . Toto lze provést interpolací výsledků pro stejné hodnoty budícího proudu z polynomů, kterými byly charakteristiky proloženy a proložení těchto hodnot novým polynomem. Viz tabulku 4.4 a graf 4.6. Linearizovaná hodnota poměrného napětí s korekcí, odpovídající charakteristice vzduchové mezery

[11] (pro průchod počátkem)  $u_{0,lin+kor}$  (viz rovnici 4.9) se určí z směrnice lineární části poměrné hodnoty napětí  $u_0$  při uvažování pouze směrnice, ne posunutí.

interpolace			Průměr		
$I_b$	$U_{0,nahoru}$	$U_{0,dolu}$	$U_{0,prum}$	$u_0$	$u_{0,lin+kor}$
A	V	V	V	%	%
0,0	18,45	27,00	22,69	9,86	0,00
0,1	54,20	65,27	59,74	25,97	15,38
0,2	87,02	99,85	93,44	40,62	30,76
0,3	116,82	130,75	123,79	53,82	46,14
0,4	143,62	157,96	150,79	65,56	61,52
0,5	167,40	181,48	174,44	75,84	76,90
0,6	188,16	201,31	194,74	84,67	92,28
0,7	205,92	217,46	211,69	92,04	107,66
0,8	220,67	229,92	225,29	97,95	123,04
0,9	232,40	238,70	235,55	102,41	138,42
1,0	241,12	243,78	242,45	105,41	153,80
1,1	246,83	245,18	246,01	106,96	169,18

Tab. 4.4: Interpolované hodnoty z měření naprázdno a hodnoty s korekcí

### Příklad výpočtu pro 1. řádek

$$U_{0,nahoru} = -150,33I_b^2 + 373,04I_b + 18,45 = -150,33 \cdot 0^2 + 373,04I_b + 18,45 = 18,45 \text{ V} \quad (4.5)$$

$$U_{0,prum} = \frac{U_{0,nahoru} + U_{0,dolu}}{2} = \frac{18,45 + 27,00}{2} = 22,69 \text{ V} \quad (4.6)$$

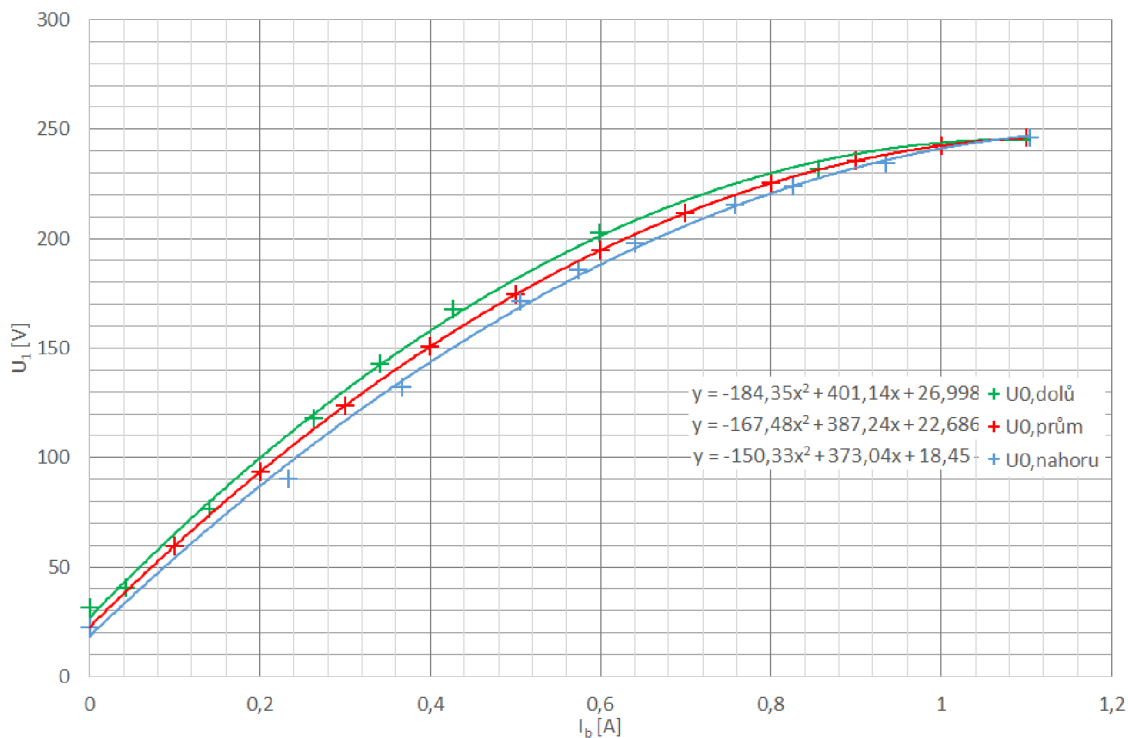
$$u_0 = \frac{U_{0,prum}}{U_n} \cdot 100 = \frac{22,69}{230} \cdot 100 = 9,89 \% \quad (4.7)$$

Linearizace byla provedena s využitím programu Microsoft Excel z řádku 1 – 3 sloupce  $u_0$ :

$$u_0 = 153,80 \cdot I_b + 10,11 \quad (4.8)$$

$$u_{0,lin+kor} = 153,80 \cdot I_b = 153,80 \cdot 0 = 0 \% \quad (4.9)$$





Obr. 4.6: Změřená charakteristika naprázdno

### 4.3 Měření nakrátko

[11] určuje průběh trojfázové zkoušky nakrátko synchronního generátoru:

1. Roztočení generátoru na jmenovité otáčky s  $I_b = 0$ .
2. Zkratování všech fází.
3. Měření zkratového proudu, napětí kotvy a budícího proudu od 125 %  $I_n$  (kvůli bezpečnosti bylo měřeno od cca 110 %  $I_n$ ) do  $I_b = 0$  A. Sestupné měření je prováděno z důvodu rovnoměrnější teploty vinutí statoru.

Z důvodu remanentní indukce byla opět provedena korekce poměrného proudu nakrátko  $i_k$  podobně jako v případě poměrného napětí naprázdno  $u_0$  zkoušky naprázdno.

$I_b$	$I_{k,L1}$	$I_{k,L2}$	$I_{k,L3}$	$I_{k,prum}$	$i_k$	$i_{k,lin+kor}$
A	A	A	A	A	%	%
0,000	0,881	0,874	0,874	0,876	8,1	0,0
0,047	1,230	1,215	1,171	1,205	11,1	5,0
0,186	2,538	2,637	2,592	2,589	23,8	19,7
0,297	3,960	3,600	3,740	3,767	34,7	31,5
0,404	5,057	4,946	4,813	4,939	45,4	42,8
0,602	7,335	7,083	7,421	7,280	67,0	63,8

$I_b$	$I_{k,L1}$	$I_{k,L2}$	$I_{k,L3}$	$I_{k,prum}$	$i_k$	$i_{k,lin+kor}$
A	A	A	A	A	%	%
0,701	8,556	8,364	8,140	8,353	76,9	74,3
0,836	9,778	10,154	9,993	9,975	91,8	88,6
0,926	11,297	10,903	11,430	11,210	103,1	98,1
0,977	12,435	11,998	12,580	12,338	113,5	103,5

Tab. 4.5: Hodnoty zjištěné při zkoušce nakrátko

### Příklad výpočtu pro 1. řádek tabulky

$$I_{k,prum} = \frac{I_{L1} + I_{L2} + I_{L3}}{3} = \frac{0,881 + 0,874 + 0,874}{3} = 0,876 \text{ A} \quad (4.10)$$

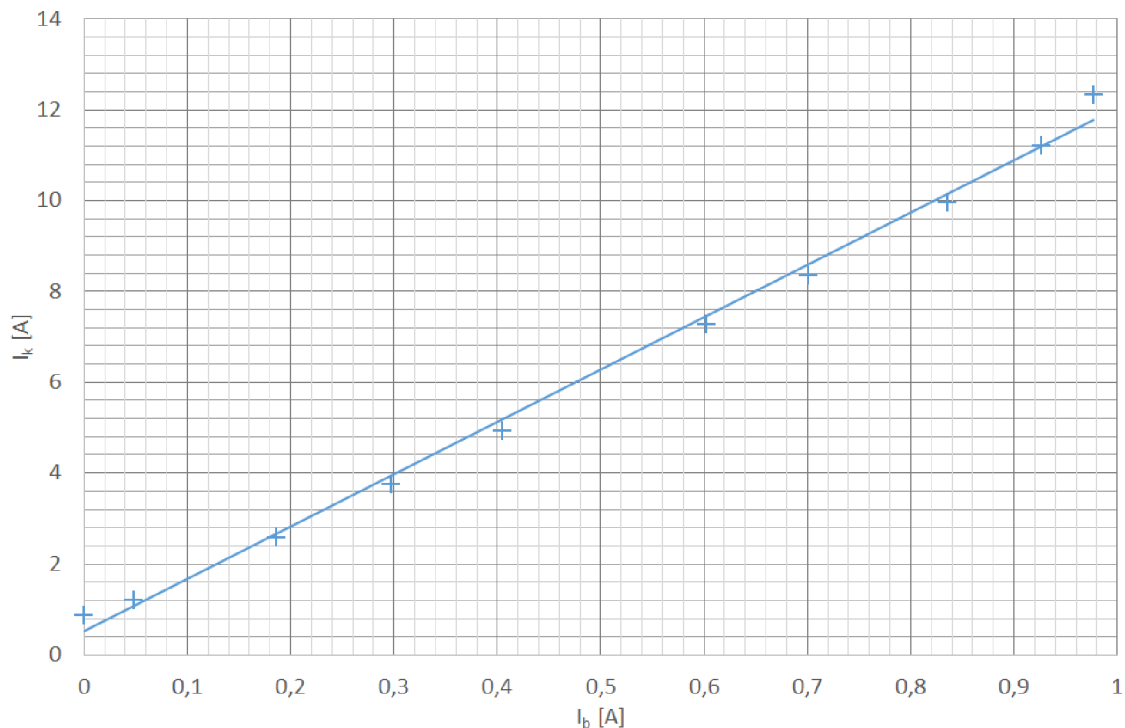
$$I_n = \frac{S_n}{3U_n} = \frac{7500}{3 \cdot 230} = 10,87 \text{ A} \quad (4.11)$$

$$i_k = \frac{I_{k,prum}}{I_n} \cdot 100 = \frac{0,876}{10,87} \cdot 100 = 8,1 \% \quad (4.12)$$

Linearizace  $i_k$  provedena pomocí programu Microsoft Excel:

$$i_k = 105,94I_b + 4,82 \quad (4.13)$$

$$i_{k,lin+kor} = 105,94I_b = 105,94 \cdot 0 = 0 \text{ A} \quad (4.14)$$



Obr. 4.7: Změřená charakteristika nakrátko

## 4.4 Zjištění nenasycené hodnoty podélné synchronní reaktance

Dle [11] lze získat nenasycenou hodnotu podélné synchronní reaktance z hodnot zkoušky naprázdno a nakrátko pomocí:

1. odečtení budícího proudu  $I_{b,X_d}$  v bodě, kdy charakteristika vzduchové mezery ( $u_{0,lin+kor}$ ) dosáhne 100 %  $U_n$ ,
2. odečtení proudu nakrátko  $i_{k,X_d}$  pro budící proud  $I_{b,X_d}$ ,
3. dosazením a vypočtením vztahu 4.17.

Grafické vyjádření odečtu vyjadřuje obrázek 4.8

### Výpočet

$I_{b,X_d}$  pro  $u_n = 100\%$ ; směrnice  $u_{0,lin+kor}$  z rovnice 4.9:

$$I_{b,X_d} = \frac{u_n}{153,80} = \frac{100}{153,80} = 0,65 \text{ A} \quad (4.15)$$

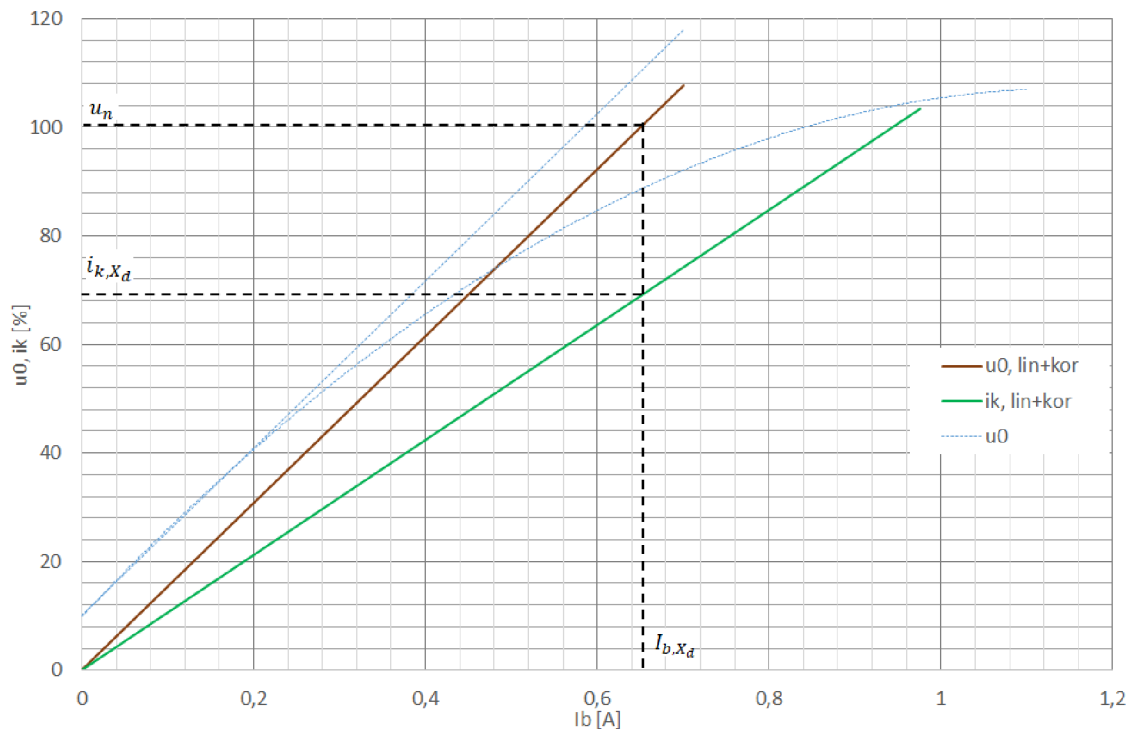
Směrnice  $i_k$  z rovnice 4.14:

$$i_{k,X_d} = 105,94 \cdot I_{b,X_d} = 105,94 \cdot 0,65 = 68,88\% \quad (4.16)$$

$$x_d = \frac{u_0}{i_{k,X_d}} \cdot 100 = \frac{100}{68,88} \cdot 100 = 145,18 \% \quad (4.17)$$

$$\Delta x_d = \frac{x_d - x_{d,katalog}}{x_{d,katalog}} \cdot 100 = \frac{145,18 - 140}{140} \cdot 100 = 3,7 \% \quad (4.18)$$

Katalogová hodnota dle [3] je 140 %. Odchylka od katalogové hodnoty je dle rovnice 4.18 3,7 %. Tato chyba může být způsobena jak zaokrouhlením při výpočtu, chybami při měření tak nepřesností hodnoty udané výrobcem.



Obr. 4.8: Charakteristika nakrátko a vzduchové mezery a odečtení hodnot pro určení nenasyčené  $X_d$

## 4.5 Zjištění provozních hodnot synchronních reaktancí

Podmínky měření zátěžného úhlu  $\delta$  jsou udány v [11]:

*„Zkouška se provádí se strojem, který pracuje paralelně se sítí. Zatížení stroje nesmí být menší než 0,5násobek jmenovitého činného zatížení při jmenovitém účinníku.“*

*Zaznamená se: proud kotvy a napětí, činný výkon nebo přímo měřený  $\cos \varphi$ , budící proud a zátěžný úhel.“*

Protože synchronní reaktance se mění při změně frekvence, svorková napětí ( $U_{f1}$ ,  $U_{f2}$ ,  $U_{f3}$ ) i proudy kotvou ( $I_{f1}$ ,  $I_{f2}$ ,  $I_{f3}$ ) budou uvažovány pouze v 1. harmonické – 50 Hz.

$U_{f1}$	$U_{f2}$	$U_{f3}$	$U_1$	$I_{f1}$	$I_{f2}$	$I_{f3}$	$I_1$	$I_b$
V	V	V	V	A	A	A	A	A
237,26	237,81	238,48	237,85	1,657	1,533	1,759	1,650	1,017
237,24	237,86	238,52	237,87	2,273	2,111	2,354	2,246	1,037
237,54	238,16	238,94	238,21	2,957	2,705	2,947	2,870	1,077
237,33	237,90	238,48	237,90	3,620	3,448	3,660	3,576	1,119
237,54	238,09	238,65	238,09	4,343	4,168	4,364	4,292	1,147
237,37	238,01	238,34	237,91	5,042	4,891	5,134	5,022	1,186
237,03	237,69	238,12	237,61	5,831	5,633	5,840	5,768	1,200
237,04	237,95	238,19	237,73	6,526	6,269	6,614	6,470	1,253
236,64	237,49	237,70	237,28	7,208	6,976	7,281	7,155	1,317
236,33	237,25	237,48	237,02	8,006	7,723	8,039	7,923	1,376
237,13	238,03	238,21	237,79	8,628	8,363	8,683	8,558	1,435

Tab. 4.6: Měření generátoru při zatížení s účínkem blízkým 1 – 1. část

$P_2$	$S_2$	$Q_2$	$t$	$\delta$	$\cos \varphi$	$x_d$	$x_q$
W	VA	VAr	ms	°	–	%	%
1031	1177	568	2,42	3,60	0,906	725,59	50,55
1492	1603	586	2,50	6,48	0,950	649,22	63,68
1951	2050	629	2,57	9,00	0,963	568,77	69,02
2453	2552	704	2,61	10,44	0,969	502,34	64,30
2972	3066	753	2,65	11,88	0,975	447,25	60,95
3484	3585	845	2,69	13,32	0,977	400,82	58,83
4007	4112	923	2,78	16,56	0,978	329,55	65,07
4501	4614	1015	2,82	18,00	0,979	312,83	63,75
4980	5094	1072	2,85	19,08	0,979	305,35	61,64
5512	5633	1161	2,90	20,88	0,980	289,13	61,86
5992	6105	1169	2,96	23,04	0,982	281,91	64,04

Tab. 4.7: Měření generátoru při zatížení s účínkem blízkým 1 – 2. část

$U_{f1}$	$U_{f2}$	$U_{f3}$	$U_1$	$I_{f1}$	$I_{f2}$	$I_{f3}$	$I_1$	$I_b$
V	V	V	V	A	A	A	A	A
237,38	238,24	238,61	238,08	5,828	5,366	5,47	5,555	1,532
237,26	238,01	238,38	237,88	6,2	5,783	5,933	5,972	1,558
237,66	238,39	238,82	238,29	6,688	6,298	6,41	6,465	1,607
237,52	238,34	238,63	238,16	7,214	6,804	6,991	7,003	1,65
237,8	238,63	238,97	238,47	7,718	7,294	7,476	7,496	1,695
237,82	238,61	238,93	238,45	8,323	7,931	8,113	8,122	1,742
237,31	238,1	238,32	237,91	9,094	8,731	8,957	8,927	1,813
238,04	238,21	238,67	238,31	9,526	9,232	9,333	9,364	1,860

Tab. 4.8: Měření přebuzeného generátoru s  $Q = konst.$  – 1. část

$P_2$	$S_2$	$Q_2$	$t$	$\delta$	$\cos \varphi$	$x_d$	$x_q$
W	VA	VAr	ms	°	–	%	%
2436	2443	3130	2,48	5,76	0,614	304,31	43,43
2935	2943	3088	2,53	7,56	0,689	305,96	46,67
3456	3464	3068	2,56	8,64	0,748	313,77	44,84
3943	3952	3078	2,61	10,44	0,788	312,22	47,60
4395	4404	3070	2,65	11,88	0,820	313,35	48,74
4916	4926	3095	2,69	13,32	0,846	309,96	48,96
5498	5509	3217	2,74	15,12	0,863	302,51	50,19
5917	5928	3130	2,79	16,92	0,884	304,60	52,58

Tab. 4.9: Měření přebuzeného generátoru s  $Q = konst.$  – 2. část

$U_{f1}$	$U_{f2}$	$U_{f3}$	$U_1$	$I_{f1}$	$I_{f2}$	$I_{f3}$	$I_1$	$I_b$
V	V	V	V	A	A	A	A	A
234,28	234,75	235,24	234,76	4,155	4,426	4,618	4,400	0,551
234,15	234,52	234,99	234,55	4,442	4,659	4,847	4,649	0,581
234,05	234,53	234,96	234,51	4,861	5,052	5,251	5,055	0,619
237,74	238,17	238,63	238,18	5,771	5,957	6,124	5,951	0,656
238,24	237,82	238,5	238,19	5,945	6,036	6,198	6,060	0,779
237,55	238,14	238,53	238,07	6,507	6,593	6,823	6,641	0,809
237,62	238,37	238,64	238,21	6,898	6,937	7,232	7,022	0,864
237,61	238,26	238,45	238,11	7,584	7,574	7,843	7,667	0,911
237,16	237,81	237,96	237,64	8,075	8,128	8,403	8,202	0,969
237,92	238,66	238,85	238,48	8,849	8,819	9,133	8,934	1,021
238,05	238,73	238,9	238,56	9,436	9,440	9,712	9,529	1,084

Tab. 4.10: Měření podbuzeného generátoru s  $Q = konst.$  – 1. část

$P_2$	$S_2$	$Q_2$	$t$	$\delta$	$\cos \varphi$	$x_d$	$x_q$
W	VA	VAr	ms	°	–	%	%
1011	3098	-2929	2,66	12,24	0,326	-37,57	478,50
1472	3272	-2922	2,67	12,60	0,450	-25,33	225,96
1990	3557	-2947	2,74	15,12	0,559	-8,35	186,14
2480	4252	-3453	2,79	16,92	0,583	2,49	180,82
3103	4330	-3017	2,91	21,24	0,717	44,30	169,22
3591	4744	-3097	2,97	23,40	0,757	51,78	161,39
3992	5019	-3039	2,99	24,12	0,795	65,90	142,99
4495	5476	-3127	3,01	24,84	0,821	73,94	127,69
4977	5848	-3068	3,07	27,00	0,851	86,35	124,94
5483	6391	-3281	3,11	28,44	0,858	91,22	123,40
5982	6820	-3273	3,15	29,88	0,877	100,59	118,43

Tab. 4.11: Měření podbuzeného generátoru s  $Q = konst.$  – 2. část



**Příklad výpočtu pro 1. řádek k tabulce 4.10 a 4.11**

$$U_1 = \frac{U_{f1} + U_{f2} + U_{f3}}{3} = \frac{234,28 + 234,75 + 235,24}{3} = 234,76 \text{ V} \quad (4.19)$$

$$I_{f3} = \frac{I_{f1} + I_{f2} + I_{f3}}{3} = \frac{4,155 + 4,426 + 4,618}{3} = 4,4 \text{ A} \quad (4.20)$$

Způsob měření času  $t$  je zobrazen na obrázku 3.13. Kalibrační čas získaný při měření naprázdno:

$$t_{kal} = 2,32 \text{ ms} \quad (4.21)$$

$$t_\delta = t - t_{kal} = 2,66 - 2,32 = 0,34 \text{ ms} \quad (4.22)$$

$$\delta = p \cdot \frac{t_\delta}{T_U} \cdot 360^\circ = 2 \cdot \frac{0,34}{20} \cdot 360^\circ = 12,24^\circ \quad (4.23)$$

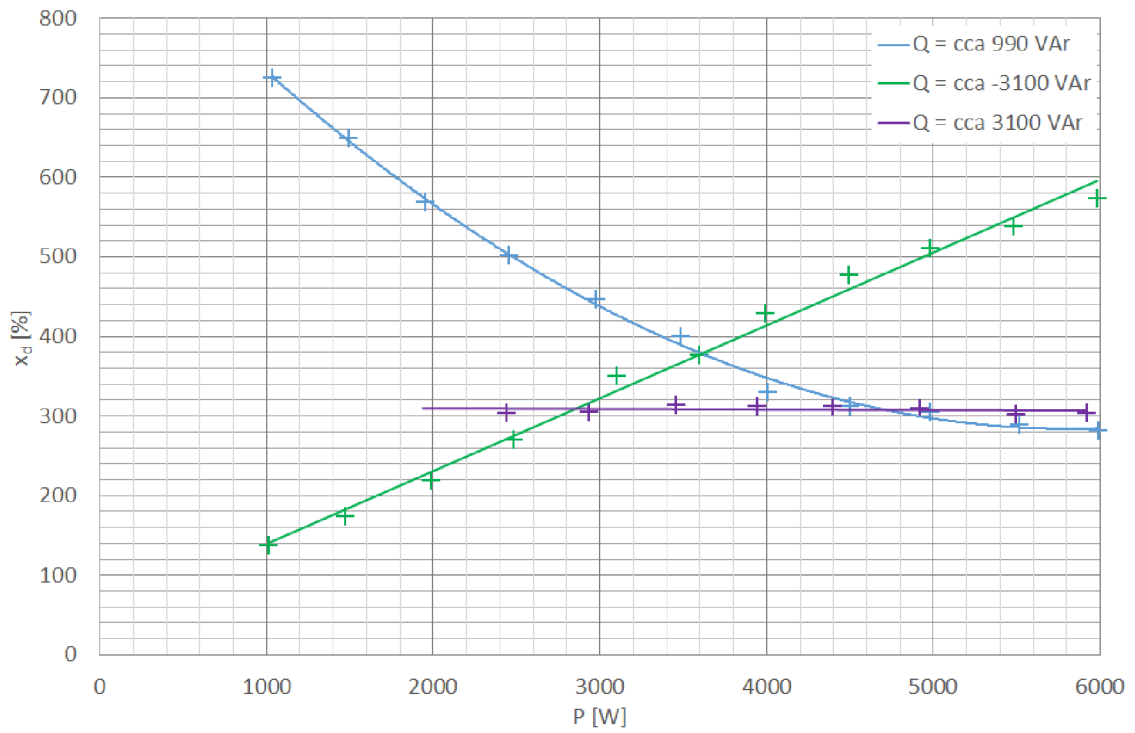
$$\cos \varphi = \frac{P_2}{S_2} = \frac{1011}{3098} = 0,326 \quad (4.24)$$

Směrnice v rovnici 4.9:

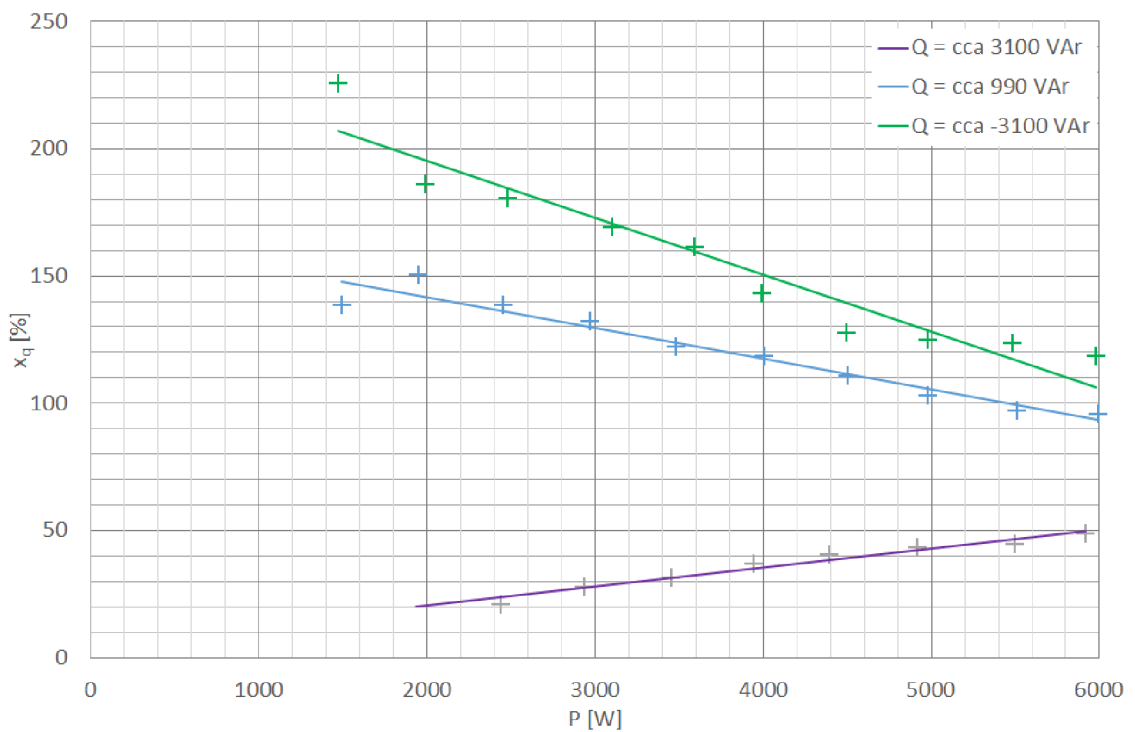
$$E_{10} = \frac{153,8 \cdot I_b}{100} \cdot U_n = \frac{153,8 \cdot 0,551}{100} \cdot 230 = 194,91 \text{ V} \quad (4.25)$$

$$\begin{aligned} x_d &= \frac{E_{10} - R_1 I_1 \cos(\varphi + \delta) - U_1 \cos \delta}{I_1 \sin(\varphi + \delta)} \cdot \frac{I_n}{U_n} = \\ &= \frac{194,91 - 0,693 \cdot 4,4 \cdot \cos[\arccos(0,326) + 12,24] - 234,76 \cdot \cos(12,24)}{4,4 \cdot \sin(\arccos(0,326) + 12,24)} \cdot \frac{10,87}{230} = \\ &= -37,57\% \quad (4.26) \end{aligned}$$

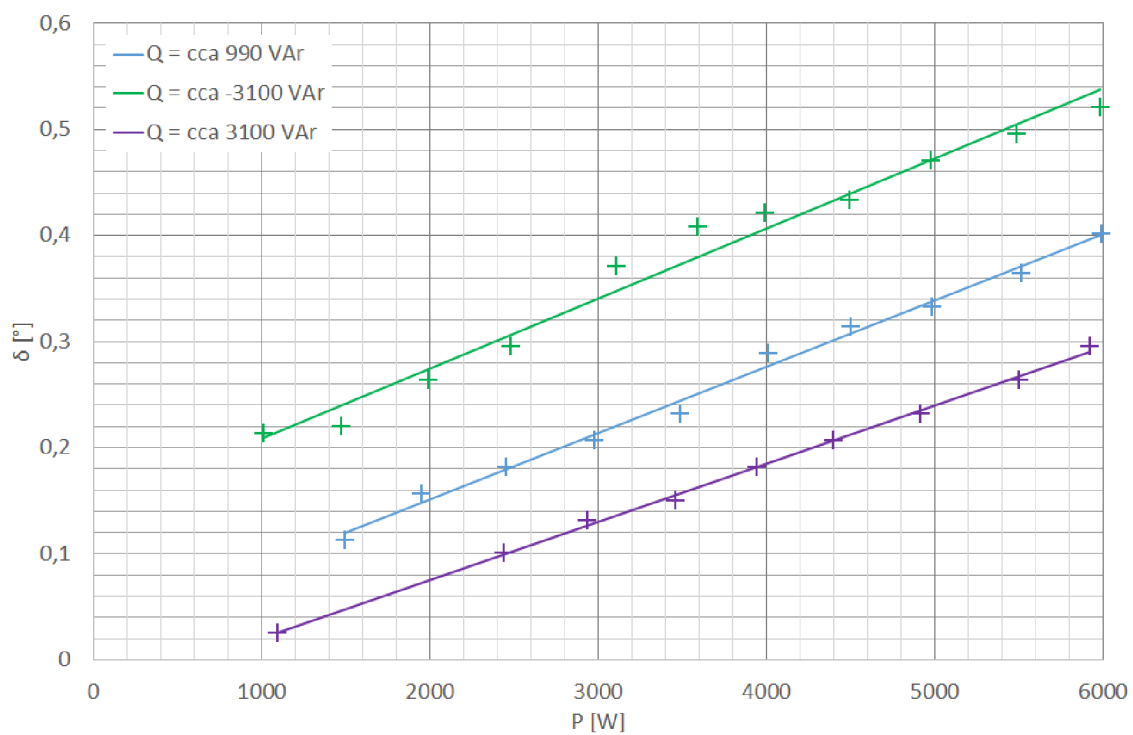
$$\begin{aligned} x_q &= \frac{U_1 \operatorname{tg} \delta + R_1 I_1 (\operatorname{tg} \delta \cos \varphi + \sin \varphi)}{I_1 \cdot (\cos \varphi - \operatorname{tg} \delta \sin \varphi)} \cdot \frac{I_n}{U_n} = \\ &= \frac{234,76 \cdot \operatorname{tg}(12,24) + 0,693 \cdot 4,4 [\operatorname{tg}(12,24) + \sin(\arccos(0,326))]}{4,4 \cdot (0,326 - \operatorname{tg}(12,24) \cdot \sin(\arccos(0,326)))} \cdot \frac{10,87}{230} = \\ &= 478,50\% \quad (4.27) \end{aligned}$$



Obr. 4.9: Závislost nasycené hodnoty  $x_d$  na výkonu generátoru



Obr. 4.10: Závislost nasycené hodnoty  $x_q$  na výkonu generátoru



Obr. 4.11: Závislost velikosti zátěžného úhlu na výkonu generátoru

## 5 Závěr

Práce se v první části zabývá popisem typu zkoušeného stroje - synchronní stroj a popisuje jeho základní typy a charakteristické vlastnosti. Dále se zabývá celkovým popisem měřeného zařízení.

Následuje teoretický rozbor částí fázorového diagramu s důrazem na možnost výpočtu synchronních reaktancí z hodnoty zátěžného úhlu. Případně na možnost nepřímého měření zátěžného úhlu z dostupných hodnot.

V experimentální části byly provedeny zkoušky naprázdno a nakrátko pro ověření nenasyčené hodnoty  $X_q$ . Z těchto zkoušek není možné získat nenasyčenou hodnotu podélné synchronní reaktance  $X_d$ , která je dle katalogu 70 %. Hodnota vypočtené příčné synchronní reaktance se lišila od katalogové hodnoty o 3,7 %.

Hlavní část experimentu a cílem bakalářské práce je návrh a ověření možnosti měřit zátěžný úhel generátoru přímou metodou pomocí dostupných přístrojů v laboratoři a zjišťování provozních parametrů - synchronních reaktancí.

Dle charakteristiky na grafu 4.11 je vidět, že zátěžný úhel roste s činným zatížením generátoru. Se zvyšujícím se buzením při stejném činném výkonu se zátěžný úhel snižuje stejně, jako se zvyšuje elektromotorické napětí rotoru.

Charakteristiky nasycených synchronních reaktancí 4.9 a 4.10 vypadají velmi nahodile při změně buzení (měřeno bylo při konstantním jalovém výkonu) a lze předpokládat chybu měření, ačkoliv bylo měření opakováno. Bylo by vhodné tyto charakteristiky ověřit i na jiném generátoru stejného typu nebo jiném synchronním generátoru s vyniklými póly, toto není součástí bakalářské práce.

# Literatura

- [1] NIDEC CONTROL TECHNIQUES LTD. *Unidrive SP Size 0 - 6 User Guide* [online]. Newtown (UK): Nidec, ©2017, 310 s. [cit. 2018-11-11]. Dostupné z: <http://www.controltechniques.com/CTDownloads/SharePoint/Download.aspx?SiteID=1&ProductID=43&DownloadID=236&VersionID=7501>
- [2] MRAVEC, Rudolf. *Elektrické stroje a přístroje I*. Praha: SNTL, 1979.
- [3] CONTROL TECHNIQUES. *Rotační zdroj 3x208/120V-400/230V, 50/60 Hz: Projektová dokumentace*. Brno, 2009. Zakázka č. 310090206.
- [4] PETROV, G.N. *Elektrické stroje 2: Asynchronní stroje-synchronní stroje*. Praha: Academia, 1982, 728 s.
- [5] IDZOTIC, T.;erceg. Load angle estimation of a synchronous generator. In: *Electrotechnical Conference, 2004. MELECON 2004. Proceedings of the 12th IEEE Mediterranean* [online]. USA: IEEE, 2004, **3**, s. 893-896 [cit. 2019-01-18]. DOI: 10.1109/MELCON.2004.1348098. ISBN 0780382714.
- [6] SUMINA, D;sala. Determination of Load Angle for Salient-pole Synchronous Machine. *Measurement Science Review* [online]. Bratislava: De Gruyter Open Sp. z o.o, 2010, **10**(3), 89-96 [cit. 2019-01-18]. DOI: 10.2478/v10048-010-0018-2. ISSN 1335-8871. Dostupné z: <http://search.proquest.com/docview/1323838425/>
- [7] LEROY SOMER. *LSA 37 SHUNT - 2 & 4 POLE ALTERNATORS: Installation and maintenance*. Angoulême (Fr), ©2007. [cit. 2019-01-11] Dostupné také z: [http://www.leroy-somer.com/documentation\\_pdf/3548\\_en.pdf](http://www.leroy-somer.com/documentation_pdf/3548_en.pdf)
- [8] SICK STEGMANN. *DiCoder® CNS50: Motor Feedback System for installation in electric motors*. Saint Brice Courcelles (Fr), ©2006. [cit. 2019-01-11] Dostupné také z: <http://www.audin.fr/pdf/documentations/sick/codeurs/codeurs-boucle-fermee/CNS50.pdf>
- [9] JEHLÁŘ, Zbyněk. *Vliv externích elektromagnetických polí na funkci snímačů otáček*. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2009.
- [10] Princip inkrementálního snímače otáček. In: *ADVANCED Motion Control* [online]. Camarillo, CA 93012 USA [cit. 2019-01-20]. Dostupné z: <https://www.a-m-c.com/wp-content/uploads/images/experience/technologies/encoder-feedback/incremental-encoder.jpg>

- [11] ČSN EN 60034-4. *Točivé elektrické stroje. Část 4, Metody určování veličin synchronních strojů ze zkoušek*. Ed. 2. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009.
- [12] YOKOGAWA. *DL850/DL850V ScopeCorder Getting Started Guide*. Tokio, 2013. Dostupné také z: [http://91.143.108.245/Downloads/Yokogawa/Handbuecher/DL850/IMDL850-03EN\\_080%20\(DL850-DL850V\\_Getting%20Sarted%20Guide\).pdf](http://91.143.108.245/Downloads/Yokogawa/Handbuecher/DL850/IMDL850-03EN_080%20(DL850-DL850V_Getting%20Sarted%20Guide).pdf)
- [13] HIOKI. *Power analyzer 3390*. Nagano, 2013. Dostupné také z: [http://www.globaltestsupply.com/pdfs/cache/www.globaltestsupply.com/hioki/power\\_quality\\_analyzer/3390/datasheet/hioki\\_3390\\_power\\_quality\\_analyzer\\_datasheet.pdf](http://www.globaltestsupply.com/pdfs/cache/www.globaltestsupply.com/hioki/power_quality_analyzer/3390/datasheet/hioki_3390_power_quality_analyzer_datasheet.pdf)