

**Vysoká škola báňská-Technická univerzita  
Ostrava**

**Fakulta elektrotechniky a informatiky**

**Katedra elektroenergetiky**

**Problematika samobuzení asynchronního  
generátoru**

**The Problem of self-excitation of Induction  
Generator**

2015

Kamil Horenský

VŠB - Technická univerzita Ostrava  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Katedra elektroenergetiky

## Zadání bakalářské práce

Student: **Kamil Horenský**  
Studijní program: B2649 Elektrotechnika  
Studijní obor: 3907R001 Elektroenergetika  
Téma: **Problematika samobuzení asynchronního generátoru**  
**The Problem of self-excitation of Induction Generator**

Zásady pro vypracování:

- 1) Teoretický rozbor samobuzení asynchronního generátoru
- 2) Tvorba modelu samobuzeného asynchronního generátoru v programu ATP-EMTP
- 3) Měření na samobuzeném asynchronním generátoru
- 4) Závěr

Seznam doporučené odborné literatury:

- 1) Petrov, G.N.-Elektrické stroje 2, Academia 1982
- 2) Krause, P.; Wasynczuk, O.- Analysis of Electric Machinery and Drive Systems, IEEE Press 2002
- 3) Boldea, I.; Nasar, S.A.-The Induction Machine Handbook, CRC Press 2001
- 4) Hrabovcová, V. a kol.- Meranie a modelovanie elektrických strojov, Žilina 2008

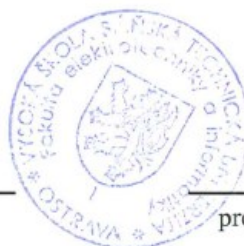
Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Václav Čech, Ph.D.**

Datum zadání: 01.09.2014

Datum odevzdání: 07.05.2015

prof. Ing. Stanislav Rusek, CSc.  
*vedoucí katedry*



prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.  
*děkan fakulty*

### Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně.

Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

Dne: 5.5.2015

Podpis: *Kamil Horáček*

## Poděkování

Rád bych poděkoval Ing. Václavu Čechovi, Ph.D za odbornou pomoc a konzultace při vytvoření této bakalářské práce.

## **ABSTRAKT**

V této práci je popsán princip, konstrukce a provozní režimy asynchronního stroje. Práce je podrobněji zaměřena na generátorický režim provozu asynchronního stroje při ostrovním režimu. Práce obsahuje měření zaměřené na nabuzení stroje při různých hodnotách budící kapacity a při různých otáčkách. V práci je také popsán model samobuzení v programu ATP-EMTP. Výsledky měření a modelování na samobuzeném asynchronním generátoru jsou prezentovány v závěru této práce.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

asynchronní stroj, asynchronní generátor, samobuzení, ATP-EMTP

## **ABSTRACT**

The work deals with description of principle, structure and operation modes of induction machine. Work is more geared to generator mode of induction machine in island mode. The work includes the measurement focused to excitation machines for different values of the excitation capacity and for different revolution. The work also described a model self-excitation in program ATP-EMTP. The results of measurements and modelling self- excited generator are presented at the end of this work.

## **KEY WORDS**

induction machine, induction generator, self-excitation, ATP-EMTP

## SEZNAM NĚKTERÝCH POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZNAČEK

<b>Veličina</b>	<b>Značka</b>	<b>Jednotka</b>
Elektrické napětí	$U$	V
Elektrický proud	$I$	A
Elektrický proud naprázdno	$I_0$	A
Elektrický proud nakrátko	$I_K$	A
Činný výkon	$P$	W
Zdánlivý výkon	$S$	VA
Jalový výkon	$Q$	var
Jmenovitý příkon	$P_l$	W
Jmenovitý výkon	$P_n$	W
Jmenovitý skluz	$s_n$	-
Skluz zvratu	$s_{zv}$	-
Frekvence sítě	$f_l$	Hz
Frekvence rotoru	$f_2$	Hz
Účinnost	$\eta$	-
Jmenovité otáčky motoru	$n_n$	min <sup>-1</sup>
Synchronní otáčky motoru	$n_s$	min <sup>-1</sup>
Účinitík	$\cos \varphi$	-
Účinitík naprázdno	$\cos \varphi_0$	-
Účinitík nakrátko	$\cos \varphi_K$	-
Úhlová rychlost statoru	$\omega_l$	rad·s <sup>-1</sup>
Úhlová rychlost rotoru	$\omega_2$	rad·s <sup>-1</sup>
Počet pólů stroje	$p$	-
Kapacita	$C$	F
Indukčnost	$L$	H
Kapacitní reaktance	$X_C$	$\Omega$
Induktivní reaktance	$X_L$	$\Omega$
Odpor	$R$	$\Omega$

Odpor statorového vinutí	$R_s$	$\Omega$
Čas	$t$	S
Moment	$M$	Nm

# Obsah

Úvod .....	9
<b>1. Teoretický rozbor samobuzení asynchronního generátoru .....</b>	<b>10</b>
1.1. Popis asynchronního stroje .....	10
1.2. Princip funkce asynchronního motoru.....	13
1.3. Princip funkce Asynchronního generátoru .....	13
1.4. Princip funkce Asynchronní brzdy.....	13
1.5. Způsob provozu asynchronního generátoru.....	14
1.6. Samobuzení asynchronního generátoru.....	16
<b>2. Měření na samobuzeném asynchronním generátoru.....</b>	<b>18</b>
2.1. Popis měření .....	18
2.2. Měřený stroj.....	18
2.3. Měření naprázdno a nakrátko.....	19
2.4. Parametry náhradního schématu .....	20
2.5. Průlomové otáčky .....	23
2.6. Nabuzení stroje .....	26
2.7. Použité přístroje.....	29
<b>3. Tvorba modelu samobuzení asynchronního generátoru v programu ATP-EMTP.....</b>	<b>30</b>
3.1. Popis programu ATP-EMTP .....	30
3.2. Popis modelu .....	30
3.3. Simulace modelu vytvořeného v ATP-EMTP .....	31
<b>4. Vyhodnocení výsledků měření a modelu ATP .....</b>	<b>34</b>
<b>5. Závěr .....</b>	<b>35</b>
<b>6. Seznam použité literatury .....</b>	<b>36</b>

## Úvod

Asynchronní stroj patentovaný Nikolajem Teslou v roce 1887 je v současné době nejpoužívanějším elektrickým strojem. Oblíbenost tohoto stroje spočívá v jeho jednoduchosti, spolehlivosti, relativně nízké ceně a v jeho nízkých nárocích na údržbu. Toto elektrické zařízení najde uplatnění od největších pohonů v továrnách až po nejmenší jednofázové motory v domácnostech. V těchto případech je asynchronní stroj využíván ve dvou z jeho tří pracovních stavů a to v motorickém a výjimečně v brzděném.

V posledním pracovním režimu je asynchronní stroj využíván jako zdroj elektrické energie. Tento pracovní režim je v současné době využíván v malých elektrárnách a to zejména ve vodních a větrných. V převážné většině případů jsou tyto elektrárny připojeny do stávající rozvodné nebo přenosové soustavy. V těchto případech, kdy je do sítě připojeno více elektráren (zejména však se synchronními generátory), není zapotřebí použít zvláštní zdroj budící kapacity. Pro zbytek případů, kdy je elektrárna provozována samostatně, je třeba pomocí kondenzátorových baterií dodat generátoru potřebnou jalovou energii.

Tato práce je zaměřena na popis, modelování a měření nabuzení stroje při provozu v ostrovním režimu.

Svoji práci jsem rozdělil do pěti hlavních částí. První část popisuje asynchronní stroj z pohledu konstrukce, principu funkce a principu samobuzení. Druhá část obsahuje kapitole měření. V této kapitole jsem vzájemně porovnal průběhy nabuzení při různých parametrech otáček a budící kapacity. V třetí části je pomocí software ATP-EMTP vytvořen model samobuzeného asynchronního generátoru simulující nabuzení při ostrovním režimu. Čtvrtá část se zabývá vzájemným porovnáním výsledků získaných pomocí modelu ATP a měření. V poslední závěrové kapitole jsem popsal výsledky této práce.

# 1 Teoretický rozbor samobuzení asynchronního generátoru

## 1.1 Popis asynchronního stroje

Asynchronní stroj je zařízení pro přeměnu elektrické energie na mechanickou a naopak. Motorický režim je u tohoto stroje využíván v drtivé většině případů. Je to zásluhou především jeho jednoduchosti a spolehlivosti. V tomto pracovním stavu přeměňuje stroj elektrickou energii na energii mechanickou. Méně využívaný generátorický režim přeměňuje mechanickou energii na energii elektrickou. Tento režim provozu je vzhledem k vlastnostem stroje málo užívaný. Asynchronní stroj nedokáže svépomocí vytvořit a regulovat elektromagnetické pole pro správnou funkci generátoru, nedá se tedy provozovat ve velkém měřítku v elektrizační síti.

Princip asynchronního stroje je založen na vzájemném elektromagnetickém působení točivého magnetického pole statoru a proudů vyvolaných ve vinutí rotoru tímto polem. Rotor asynchronního stroje není elektricky spojen se státorem. Výkon se do rotoru přenáší elektromagnetickou indukci a odtud je také často používán název indukční stroj.[1]

Hlavní části asynchronního stroje jsou statická část stator a točící se část rotor. Stator je tvořen kostrou stroje, elektrotechnickými plechy, statorovým vinutím a ložisky. Kostra je hlavní konstrukční část stroje. Kostra je vyráběna podle požadavků nejvíce z litiny a hliníku. Vnější část kostry má ve většině případů žebrování pro lepší odvod tepla. V kostře jsou nalisovány plechy z křemíkové oceli. Jednotlivé plechy jsou od sebe odizolovány z důvodu snížení ztrát vířivými proudy. Hlavní funkcí elektrotechnických plechů je mechanická opora statorového vinutí. Vinutí je v drtivé většině případů třífázové. Část strojů určené pro provoz na jednu fázi jsou konstrukčně provedeny pro třífázový provoz, pouze s jiným zapojením pomocí rozběhového kondenzátoru. V malém množství jsou vyráběny asynchronní stroje s jednofázovým vinutím. Na kostře je dále umístěna svorkovnice s vyvedenými konci vinutí statoru. V případě kroužkového stroje jsou do svorkovnice motoru vyvedeny také vývody rotorového vinutí. Rotorové vinutí je do statoru vyvedeno pomocí kroužků, které jsou umístěny na hřídeli a kartáčů, které

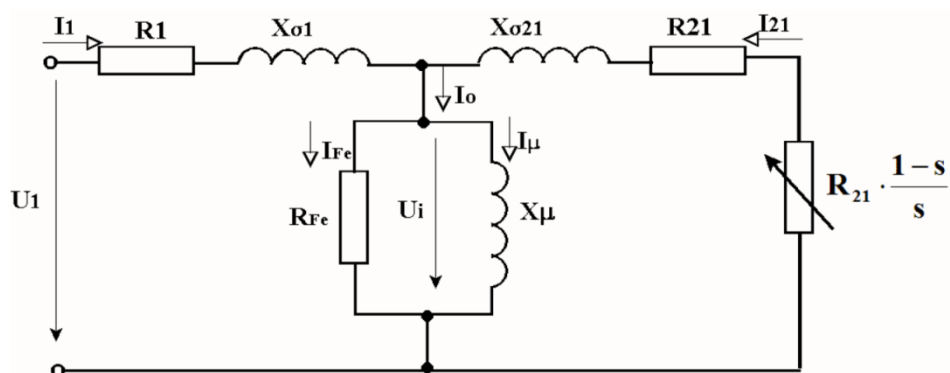
jsou umístěny na vnitřní části statoru. Výhodou kroužkového motoru je možnost spouštění motorů velkých výkonů bez dalších technologií. Další statorovou částí jsou ložiskové štíty. Ložiskové štíty jsou umístěny s přední a zadní části stroje. Slouží k upevnění rotoru pomocí ložisek.

Druhou hlavní částí stroje je rotor. Ten je tvořen hřídelí, elektrotechnickými plechy a dále podle druhu rotoru rotorovou klecí nebo vinutím. V případě klecového rotoru jsou v drážkách elektrotechnického plechu vloženy rotorové tyče.

Hlavním konstrukčním prvkem rotoru je hřídel. Hřídel zajišťuje přenesení výkonu z elektrické části rotoru na pracovní mechanismus. Na hřídeli jsou nalisovány navzájem odizolované elektrotechnické plechy ze stejného důvodu jako ve statorové části. V případě klecového rotoru jsou v drážkách elektrotechnických plechů umístěny rotorové tyče. Tyto tyče jsou na každé straně navzájem spojeny kruhy na krátko. V tomto případě vznikne v rotoru mnohofázový systém.

Pokud se jedná o vinutý rotor, tak rotorová část je tvořena třífázovým vinutím. Vinutí je z pravidla spojeno do hvězdy nebo do trojúhelníku rovnou na hřídeli. Druhé vývody vinutí jsou pomocí kroužků a kartáčů vyvedeny do svorkovnice motoru.

Pro rozbor asynchronního stroje můžeme uvažovat následující schéma. Stator reprezentují na schéma parametry  $R_1$  a  $X_{\sigma 1}$ . Rotor je zastoupen parametry  $R_{21}$ ,  $X_{\sigma 21}$  a proměnným odporem  $R_{21}$ , který je proměnný se zatížením.

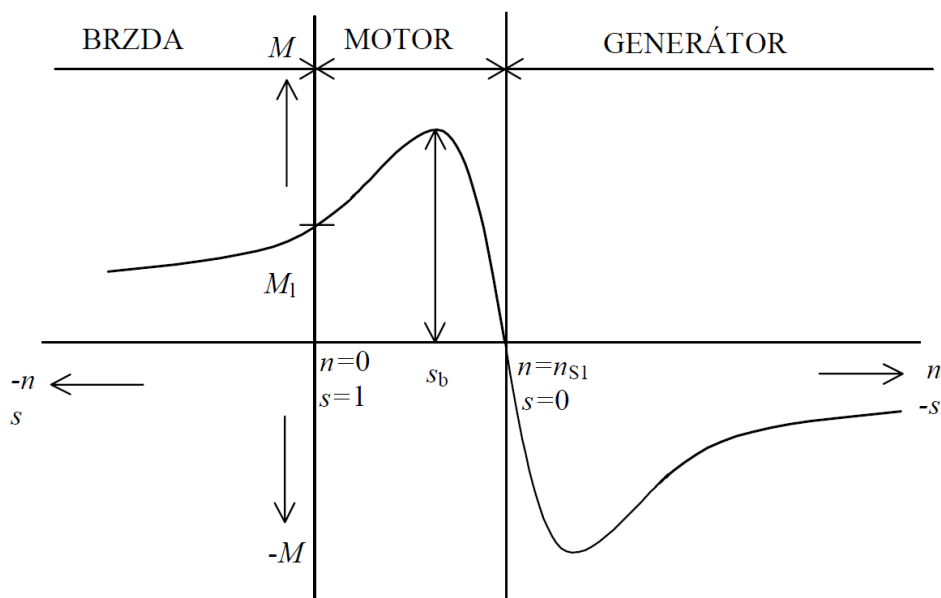


Obrázek č. 11: Náhradní schéma 1. fáze asynchronního motoru [1]

Podle Klossova vztahu můžeme vynést přibližnou podobu momentové charakteristiky. Momentová charakteristika je z hlediska režimu provozu stroje rozdělena na tři části. Ve kluzu větší než 1 se jedná o brzdny režim, tedy směr otáčení rotoru a magnetického točivého pole jsou rozdílné. Nejpoužívanější motorický režim patří do intervalu 1 až 0. Skluz menší než 0, tzn. Otáčky větší než synchronní odpovídá generátorickému režimu. Motorický režim lze dále rozdělit podle stability na stabilní a labilní část. Stabilní část se nachází v rozmezí skluzu 0 až  $S_{zv}$ , labilní od  $S_{zv}$  směrem k vyššímu skluzu.

Momentová charakteristika je závislost momentu  $M$  na úhlové rychlosti popřípadě na skluzu.

$$M = \frac{2 \cdot M_{zv}}{\frac{s}{s_{zv}} + \frac{s_{zv}}{s}} \quad (1.1)$$



Obrázek č. 12: Momentová charakteristika asynchronního stroje [3]

## 1.2 Princip funkce asynchronního motoru

Asynchronní stroj v motorickém režimu pracuje v rozmezí skluzu  $0 < s < 1$ . Při hodnotě  $s=1$  se hřídel motoru netočí. Poměr synchronních a skutečných otáček motoru jsou 1. Tento stav se nazývá stavem na krátko. V případě skluzu  $s=0$  se hřídel motoru otáčí stejnou úhlovou rychlostí jako magnetické točivé pole statoru. Tohoto skluzu ale nelze z principu funkce asynchronního stroje dosáhnout. Při synchronních  $s=0$  otáčkách by se točivé magnetické pole statoru srovnalo s otáčkami magnetického pole rotoru, a tím pádem by se neindukovalo napětí v kleci rotoru. Neprotékal by proud rotorovou klecí, takže by nevznikala tažná síla potřebná pro otáčení hřídelí.

## 1.3 Princip funkce asynchronního generátoru

Asynchronní generátor na rozdíl od synchronního generátoru má své výhody i nevýhody. Mezi jeho hlavní výhody patří snadné připojení do elektrické sítě. Nenabuzený motor se roztočí (například vodní turbínou) lehce nad jeho synchronní otáčky a připojí se přímo k síti. V případě synchronního generátoru je přifázování stroje daleko složitější. Je potřeba dodržet pravidla, kterými jsou: stejný kmitočet sítě a stroje, sled fází, amplituda napětí  $U_G=U_S$  a fázový posun. Generátorckého režim u tohoto stroje v elektrizační síti dosáhneme pouhým zvýšením úhlové rychlosti rotoru nad jeho synchronní hodnotu.

## 1.4 Princip funkce asynchronní brzdy

Brzdění asynchronním strojem se používá ve dvou případech. V prvním případě je požadováno z pravidla rychlé zpomalení nebo úplné zastavení rotoru. V druhém případě na motor působí výkon zátěže od poháněného mechanismu, který potřebujeme udržet v nulové úhlové rychlosti (odvíječka, výtah, jeřáb).

Brzdny režim nastává při skluzu  $s > 1$ , to znamená v záporných otáčkách vůči točivému magnetickému poli statoru. Brzdného režimu dosáhneme přepólováním statorového vinutí za provozu motoru. Při záměně dvou fází navzájem se změní směr točivého pole statoru. Točivé pole rotoru ale zůstává stejné, takže rotor začne velmi rychle zpomalovat. Při takovém brzdění dosahuje statorový proud až dvacetinásobku jmenovitého proudu. Motor je ale nutno v nulových otáčkách, nebo těsně před touto hranicí odpojit od napájení. V případě setrvání tohoto stavu by se rotor začal otáčet na opačnou stranu.

### **1.5 Způsob provozu asynchronního generátoru**

Asynchronní generátor lze provozovat dvěma způsoby. Jedním způsobem je připojení alternátoru přímo do stávající elektrické sítě. Druhý způsob, takzvaný ostrovní režim pracuje samostatně bez připojení do vnější elektrické sítě.

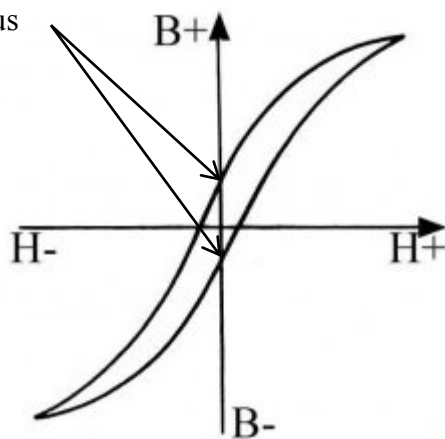
Jednodušším případem provozu alternátoru je připojením do stávající elektrické sítě. V tomto případě alternátor získává jalovou energii pro buzení motoru přímo z elektrické sítě.

V ostrovním režimu je jalová energie získávána z kondenzátorových baterií. Stroj je nezávislý na elektrické síti. V tomto případě jsou ke statorovému vinutí připojeny budící kondenzátory. Generátoru je dodávána mechanická energie na hřídel, která se musí otáčet vyšší rychlostí, než jsou synchronní otáčky stroje. Pro dosažení jmenovité hodnoty napětí a frekvence na statoru stroje regulujeme otáčky rotoru.

To ale nestačí pro generování elektrické energie. Pro uvedení generátoru v ostrovním režimu do provozu musí mít generátor remanentní magnetický tok. To znamená, že části stroje zůstanou zbytkově zmagnetizované z předchozího provozu. Pokud stroj nemá remanentní magnetický tok, musíme jej krátkodobě připojit na zdroj stejnosměrné elektrické energie pro zmagnetizování jednotlivých částí. Bez remanentního magnetického toku by stroj v generátorickém režimu nefungoval.

Prakticky by se jenom navzájem točila vinutí, které by se navzájem nijak neovlivňovala.

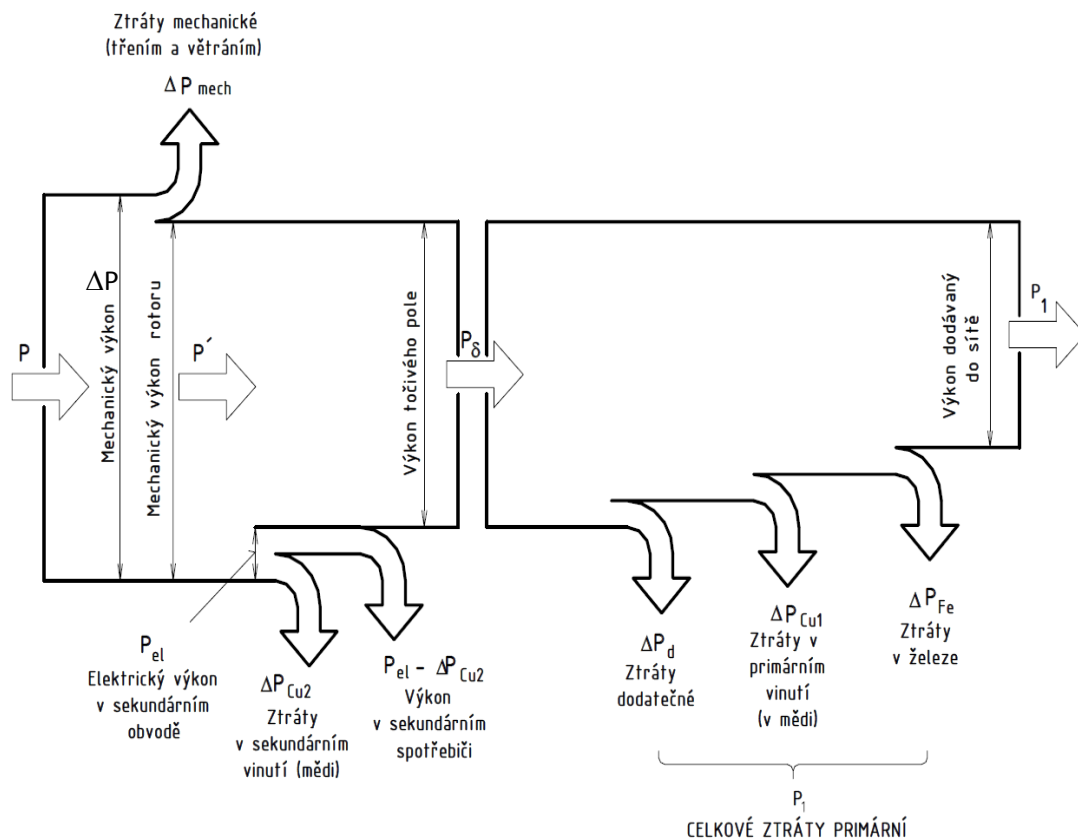
Remanentní magnetismus



Obrázek č. 13: Hysterezní smyčka

Elektrotechnické plechy pro vedení magnetického toku jsou vyráběny v tloušťce kolem 0,5mm. Z jednotlivých plechů je poskládán magnetický obvod. Plechy jsou používány z důvodu snížení ztrát vířivými proudy, které tečou kolmo k magnetickému toku. Magnetický obvod je vyráběn z magneticky měkkého materiálu, který má úzkou hysterezní smyčku. Tento požadavek je z důvodu snížení ztrát v železe. Jelikož magnetický obvod při frekvenci 50Hz stokrát změní polaritu magnetického toku, magneticky měkký materiál je vhodný z důvodu snadné magnetizace i demagnetizace. Naopak tato vlastnost neumožňuje udržení remanentního magnetického toku.

Ve všech třech režimech vznikají stejné ztráty. Mění se pouze jejich hodnota a pořadí při přeměně z jedné energie na druhou. V následujících diagramu zvaných energetické bilance si vyobrazíme ztráty asynchronního stroje v generátorickém režimu.



Obrázek č. 14: Energetická bilance asynchronního generátoru [1]

## 1.6 Samobuzení asynchronního generátoru

Buzení všech elektrických strojů je potřebné pro vytvoření magnetického pole. Jak jsem se již zmínil, nabuzení asynchronního stroje lze dosáhnout pomocí připojení stroje do stávající elektrizační soustavy. V tomto případě dodávají asynchronnímu generátoru jalovou energii synchronní generátory, které mají možnost regulace potřebné jalové energie pro síť.

Druhý způsob provozu potřebuje vlastní zdroj jalové energie. Tato jalová energie musí být dodána do motoru pomocí budících kondenzátorů. Správnou hodnotu budících kondenzátorů zjistíme z prvků náhradního schématu. Příčná větev náhradního schématu obsahuje rezistor, který reprezentuje ztráty způsobené hysterézí. Paralelně k rezistoru je připojena indukčnost. Právě tato indukčnost vyvolá

magnetické pole. Proto se reaktance parametru  $X_{\mu}$  musí rovnat reaktanci budící kapacity  $X_c$ .

Pro vznik magnetického pole je také zapotřebí přítomnost remanentního magnetického toku. Remanentní magnetický tok zapříčiní postupné zvýšení napětí při rozběhu motoru. Pokud stroj neobsahuje zmíněný remanentní magnetický tok, musíme jedno vinutí připojit alespoň na okamžik na zdroj elektrické energie.

Z definice generátorického režimu plyne, že otáčky rotoru musí být větší než rychlost synchronní.

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} < 0 \quad (1.2)$$

## 2 Měření na samobuzeném asynchronním generátoru

### 2.1 Popis měření

Měření jsem si rozdělil na hlavní tři části. První částí bylo měření naprázdno a na krátko. Při tomto měření jsem získal hodnoty veličin pro výpočet parametrů náhradního schématu motoru. Tyto parametry následně posloužily jako vstupní hodnoty pro model asynchronního stroje v programu ATP.

Při druhém měření jsem pomocí výkonového analyzátoru MAGTROL zaznamenával efektivní hodnotu statorového napětí v závislosti na otáčkách. Toto měření jsem opakoval pro 9 různých hodnot budící kapacity.

V třetí části měření jsem pomocí osciloskopu zaznamenával průběhy okamžitého statorového napětí v závislosti na čase. Toto měření jsem opakoval pro tři různé hodnoty budících kondenzátorů a pro tři hodnoty otáček.

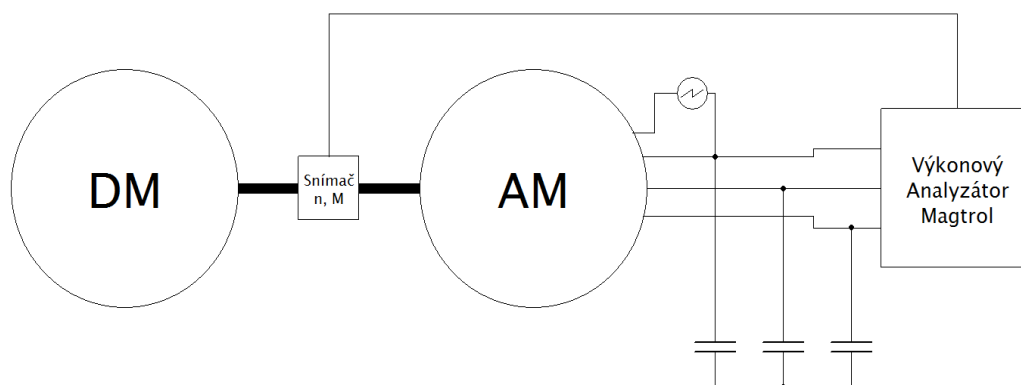
### 2.2 Měřený stroj

Měření jsem provedl na 3 fázovém asynchronním motoru Siemens, který má následující štítkové parametry:

Tabulka č. 21: Jmenovité parametry motoru

Zapojení	$P(\text{kW})$	$f(\text{Hz})$	$U(\text{V})$	$I(\text{A})$	$n(1/\text{min})$	$\eta(\%)$	$\cos\phi(-)$
D	2,2	50	230	8,6	1425	79,7	0,81
Y	2,2	50	400	4,9	1425	79,7	79,7
Y	2,55	60	460	4,7	1720	83,0	83,0

Pro měření jsem zvolil zapojení do hvězdy pro jmenovité napětí 400V. Ve dvou měření bylo třeba na asynchronním stroji vyvolat moment k roztočení asynchronního stroje. K tomu posloužil dynamometr, který dokázal roztočit motor nad jeho jmenovitou hodnotu otáček. Motor je s dynamometrem spojkou, která umožňuje měření otáček a momentu.



Obrázek č. 21: Zapojení měřené soustavy

### 2.3 Měření naprázdno a nakrátko

Pro zjištění parametrů náhradního schématu je třeba provést tři měření. Prvním měřením zjistíme pomocí multimetru činný odpor statorového vinutí. Měřením naprázdno zjistíme parametry příčné větve náhradního schématu. Pomocí měření nakrátko získáme parametry podélné větve.

Měření naprázdno se provádí pro jmenovité napětí nezatíženého motoru. Na spotřebě činného výkonu se podílí převážně jen ventilátor pro chlazení stroje. Potřeba jalového výkonu se ze zátěží mění jenom nepatrně.

Poslední měření, tedy měření nakrátko se provádí za sníženého napětí a za nulové úhlové rychlosti. Nulových otáček dosáhneme mechanickým zablokováním rotoru stroje. Napětí nakrátko je snížené napětí při kterém statorovým vinutím teče jmenovitý proud za podmínky nulových otáček rotoru.

Z těchto tří měření jsem získal hodnoty pro výpočet náhradního schématu.

Tabulka č. 22: Výstupní hodnoty z měření naprázdno a nakrátko

$\cos\varphi_0(-)$	$I_0(A)$	$\cos\varphi_k(-)$	$U_k(V)$	$R_s(\Omega)$
0,11	3,29	0,56	91,4	3,39

## 2.4 Parametry náhradního schématu

Vstupní veličiny pro určení parametrů náhradního schématu asynchronního stroje jsou: jmenovité napětí  $U_1$ , jmenovitá frekvence statoru  $f_1$ , činný odpor statorového vinutí  $R_s$ , proud naprázdno  $I_0$ , účinník naprázdno  $\cos \varphi_0$ , napětí nakrátko  $U_k$ , jmenovitý proud  $I_1$ , účinník nakrátko  $\cos \varphi_k$ , proud nakrátko  $I_k$ .

Tabulka č. 23: Veličiny pro výpočet náhradního schématu

$U_1(V)$	$\cos\varphi_0(-)$	$f_1(Hz)$	$R_s(\Omega)$	$I_0(A)$	$\cos\varphi_k(-)$	$U_k(V)$	$I_1(A)$
400	0,11	50	3,39	3,29	0,56	91,4	4,9

Proudy tekoucí prvky příčné větve získáme pomocí účinníku a proudu naprázdno.

$$I_{\mu} = I_0 \cdot \sin(\varphi_0) = 3,29 \cdot 0,99 = 3,26A \quad (2.1)$$

$$I_{Fe} = I_0 \cdot \cos(\varphi_0) = 3,29 \cdot 0,11 = 0,36A \quad (2.2)$$

Pomocí dílčích proudů získáme parametry příčné větve.

$$X_{\mu} = \frac{U_{1f}}{I_{\mu}} = \frac{231}{3,26} = 70,86\Omega \quad (2.3)$$

$$L_{\mu} = \frac{X_{\mu}}{2\pi f_s} = \frac{70,86}{2\pi \cdot 50} = 0,226H \quad (2.4)$$

$$R_{Fe} = \frac{U_{1f}}{I_{Fe}} = \frac{231}{0,36} = 642\Omega \quad (2.5)$$

$$I_{kN} = \frac{U_{1n}}{U_k} \cdot I_k = \frac{400}{91,4} \cdot 4,9 = 21,44A \quad (2.6)$$

Činný odpor podélné větve je dán vztahem číslo 2.7.

$$R_k = \frac{U_{1f} \cdot \cos\varphi_k}{I_{kN}} = \frac{231 \cdot 0,56}{21,44} = 6,03\Omega \quad (2.7)$$

Činný odpor rotorového vinutí je dán rozdílem činného odporu podélně větve a činného odporu statorového vinutí.

$$R'_r = R_k - R_s = 6,03 - 3,39 = 2,64\Omega \quad (2.8)$$

Induktivní reaktance podélné větve je dána vztahem číslo 2.9.

$$X_{\sigma} = \sqrt{\left(\frac{U_{1f}}{I_{kN}}\right)^2 - R_k^2} = \sqrt{\left(\frac{231}{21,44}\right)^2 - 6,03^2} = 8,93 \Omega \quad (2.9)$$

Induktivní reaktance statorového a rotorového vinutí jsou stejné.

$$X_{\sigma 1} = X'_{\sigma 2} = \frac{X_{\sigma}}{2} = \frac{8,77}{2} = 4,38 \Omega \quad (2.10)$$

$$L_{\sigma} = \frac{X_{\sigma}}{2\pi f_s} = \frac{8,93}{2\pi \cdot 50} = 0,0284 \text{ H} \quad (2.11)$$

$$L_{\sigma 1} = L'_{\sigma 2} = \frac{L_{\sigma}}{2} = \frac{0,0285}{2} = 0,0142 \text{ H} \quad (2.12)$$

$$Z_N = \frac{U_{fn}}{I_{fn}} = \frac{231}{4,9} = 47,14 \Omega \quad (2.13)$$

Pro správné nabuzení stroje je nutná podmínka  $X_{\mu} = X_c$ . Z toho plyne, že budící kapacita musí mít hodnotu podle vztahu 4.14.

$$X_c = \frac{U_{1f}}{I_{\mu}} = \frac{231}{3,26} = 70,86 \Omega \quad (2.14)$$

$$C = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot X_c} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 70,86} = 4,5 \cdot 10^{-5} F = 45 \mu \quad (2.15)$$

## 2.5 Průlomové otáčky

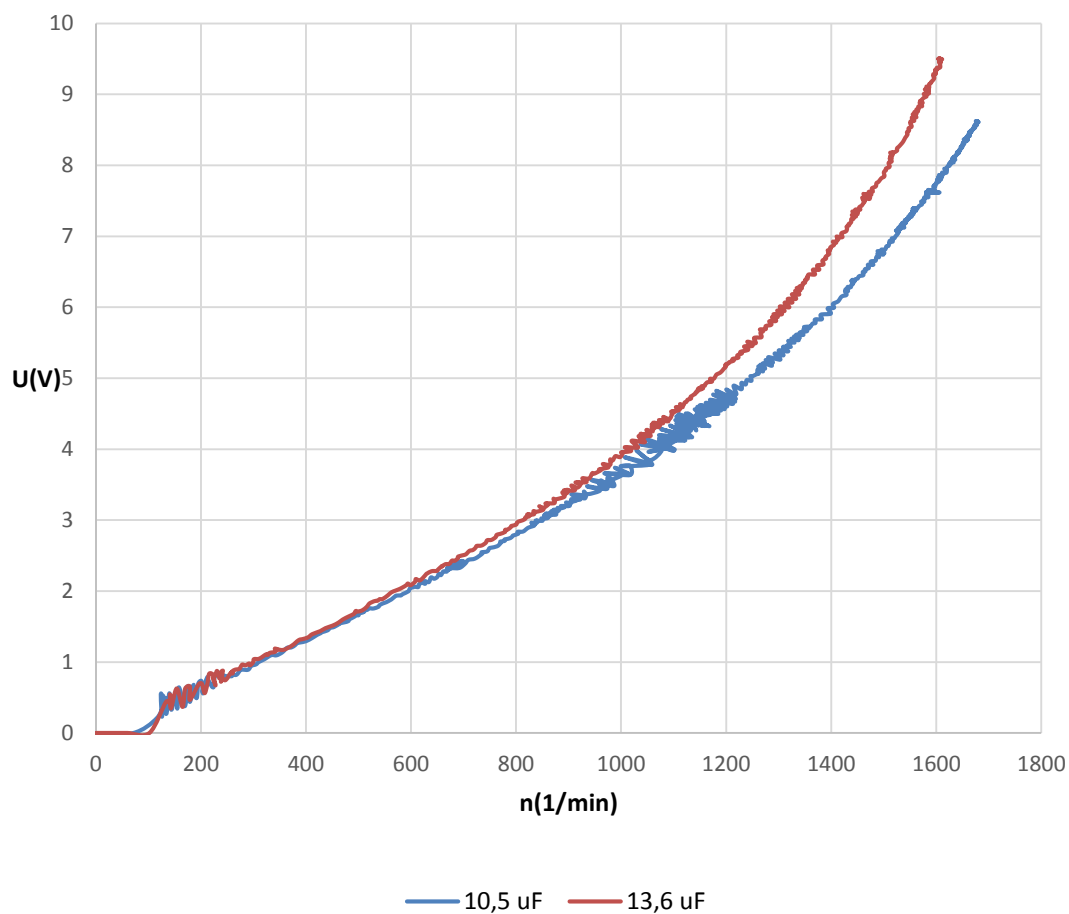
Podstatou tohoto měření je porovnání statorových napětí při různých hodnotách budících kapacit v závislosti na otáčkách rotoru. Měření jsem opakoval pro následujících devět hodnot budících kapacit.

Tabulka č. 24: Hodnoty budících kapacit

C(μF)
10,5
13,6
16
25
30
35
41
46
56

Graf č. 22 odpovídá průběhům statorových napětí pro hodnoty 10,5 μF a 13,6 μF. Jak je z grafu patrné, motor se ani při otáčkách nad 1600 min<sup>-1</sup> nedokázal nabudit. Maximální napětí pro C=10,5 μF a n=1579 min<sup>-1</sup> odpovídá hodnotě

$U=8,5V$ . Pro  $C=13,6 \mu F$  a  $n=1611 \text{ min}^{-1}$  odpovídá hodnotě  $U=9,5V$ . K nabuzení nedošlo z důvodu nedostatečného zdroje jalové energie pro vznik elektromagnetického pole.

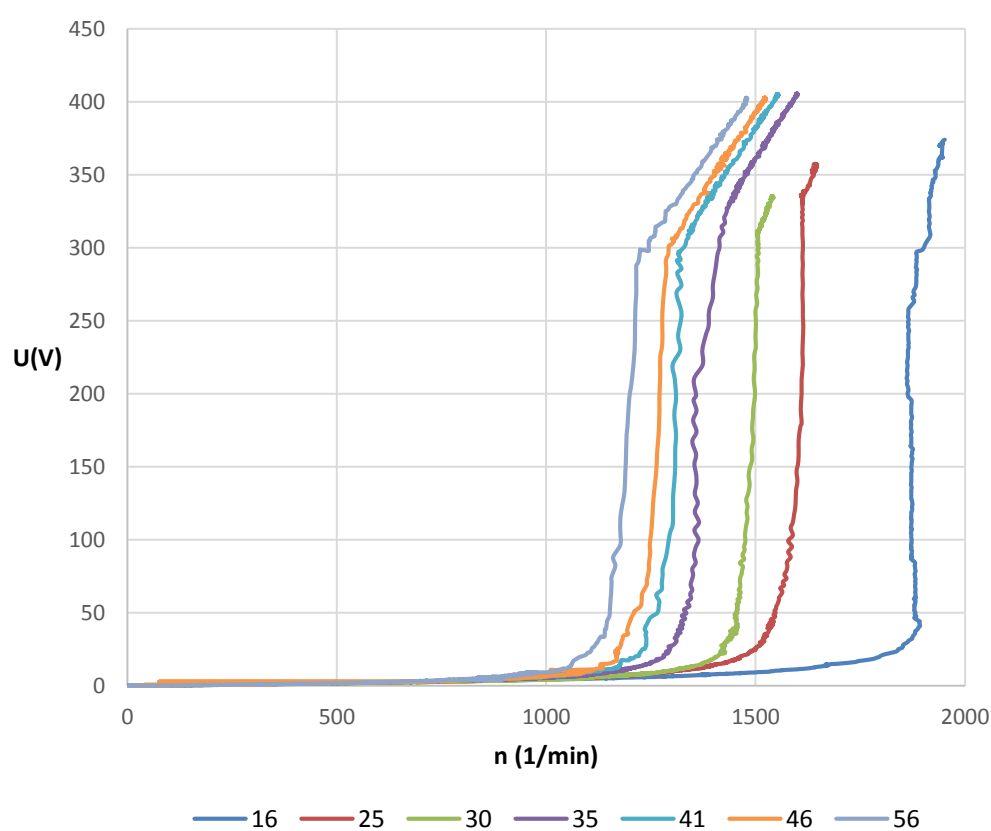


Obrázek č. 22: Závislost napětí na otáčkách

Graf č. 23 odpovídá průběhům statorových napětí pro hodnoty 16  $\mu F$ , 25  $\mu F$ , 30  $\mu F$ , 35  $\mu F$ , 41  $\mu F$ , 46  $\mu F$ , 56  $\mu F$ . Z průběhů napětí pro kapacity 16  $\mu F$ , 25  $\mu F$ , 30  $\mu F$  vyplývá, že nedošlo k úplnému nabuzení stroje na jmenovité napětí. Maximální

napětí pro  $C=16 \mu\text{F}$  a  $n=1952 \text{ min}^{-1}$  odpovídá hodnotě  $U=375\text{V}$ , pro  $C=25 \mu\text{F}$  a  $n=1623 \text{ min}^{-1}$  odpovídá hodnotě  $U=355\text{V}$ , pro  $C=30 \mu\text{F}$  a  $n=1527 \text{ min}^{-1}$  odpovídá hodnotě  $U=324\text{V}$ .

Pro hodnoty  $C=35 \mu\text{F}$ ,  $C=41 \mu\text{F}$ ,  $C=46 \mu\text{F}$ ,  $C=56 \mu\text{F}$  je z grafu zřejmé, že motor dosáhl nabuzeného stavu a tím i jmenovitého napětí. Se zvyšující se kapacitou průlomové otáčky klesaly směrem k nižším hodnotám.



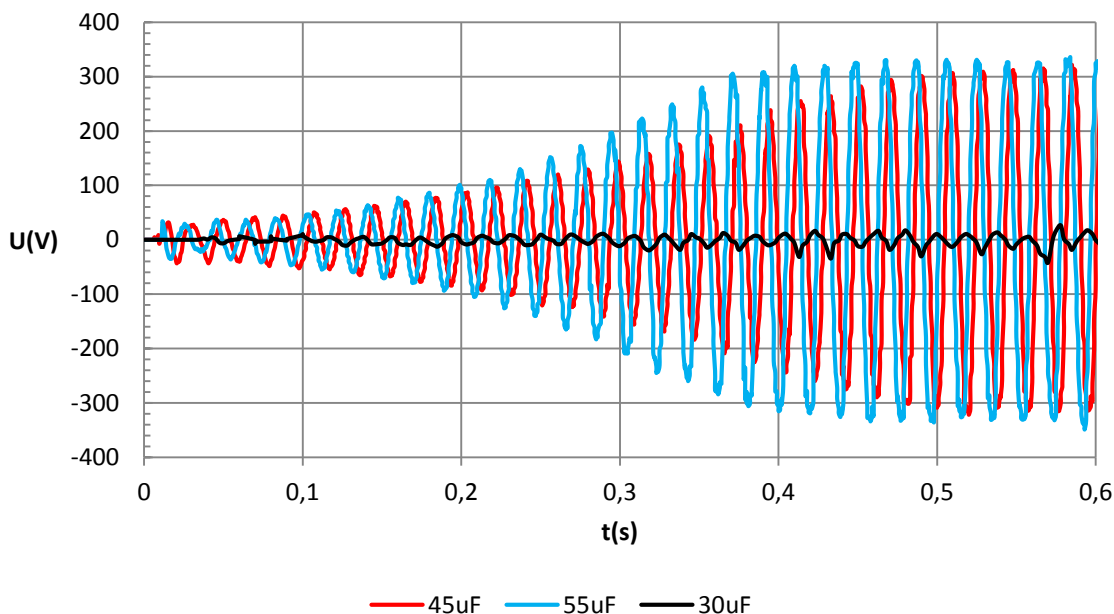
Obrázek č. 23: Závislost napětí na otáčkách

## 2.6 Nabuzení stroje

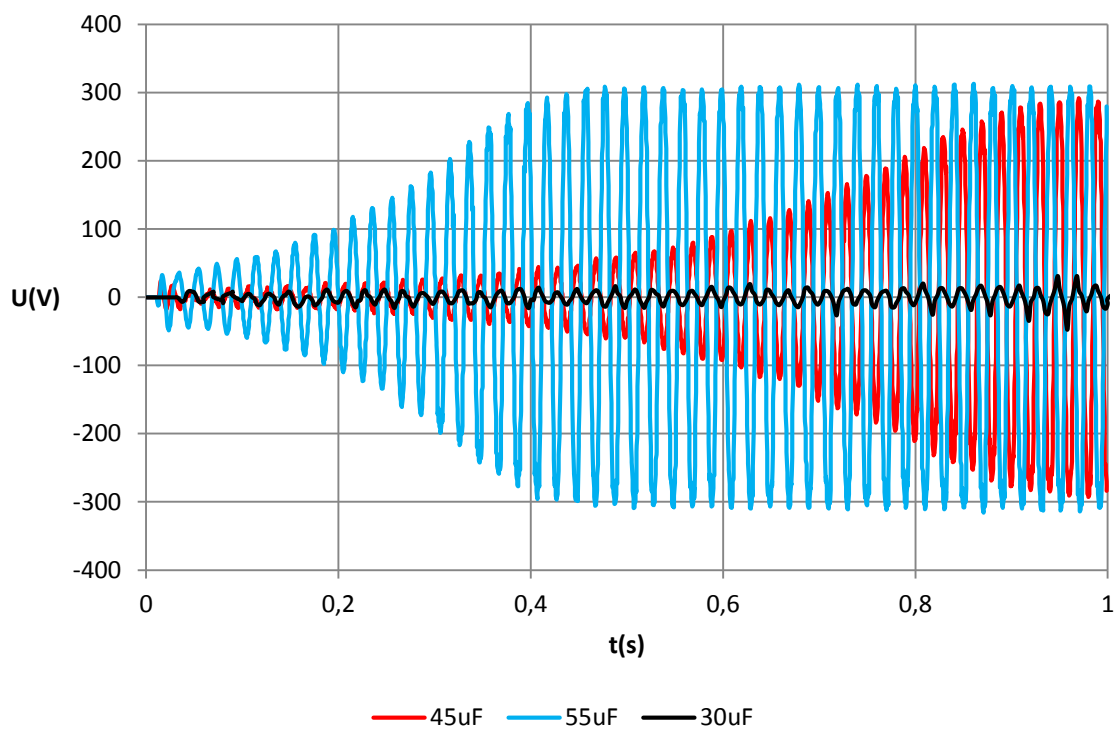
Posledním měřením jsem zjišťoval průběhy napětí při hodnotách otáček  $n_1=1425\text{min}^{-1}$ ,  $n_2=1500\text{min}^{-1}$ ,  $n_3=1575\text{min}^{-1}$  a hodnotách budících kapacit  $C_1=30\ \mu\text{F}$ ,  $C_2=45\ \mu\text{F}$  a  $C_3=55\ \mu\text{F}$ . V měření jsou srovnány průběhy napětí zaznamenané osciloskopem Fluke. Po roztočení motoru pomocí dynamometru na otáčky  $n_1$ , pro další hodnoty na  $n_1$  a  $n_3$  jsou k motoru připojeny kondenzátory pro jednotlivá měření  $C_1$ ,  $C_2$  a  $C_3$ .

V grafech č. 24, 25, 26 jsou porovnány napětí při konstantních otáčkách a proměnných hodnotách budících kapacit. V grafech č. 27, 28, 29 jsou porovnány napětí při konstantním buzení a proměnných otáčkách.

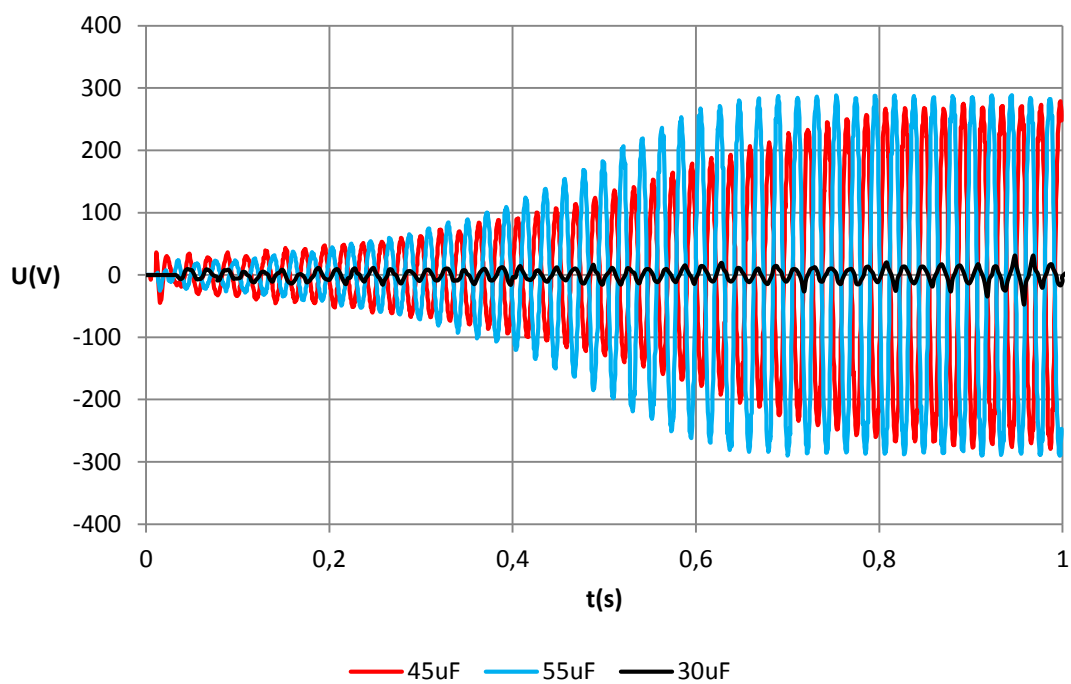
Obrázek č. 27 vyobrazuje průběhy napětí při budící kapacitě  $30\ \mu\text{F}$ . V grafu jsou zaznamenány pouze průběhy pro  $1500\text{min}^{-1}$  a  $1575\text{min}^{-1}$ . Při otáčkách  $1425\text{min}^{-1}$  nedošlo k nabuzení stroje, tudíž grafické vyobrazení nemá smysl. Jak je z grafů patrné, dobu nabuzení ovlivňuje především hodnota otáček asynchronního stroje a hodnoty budících kondenzátorů.



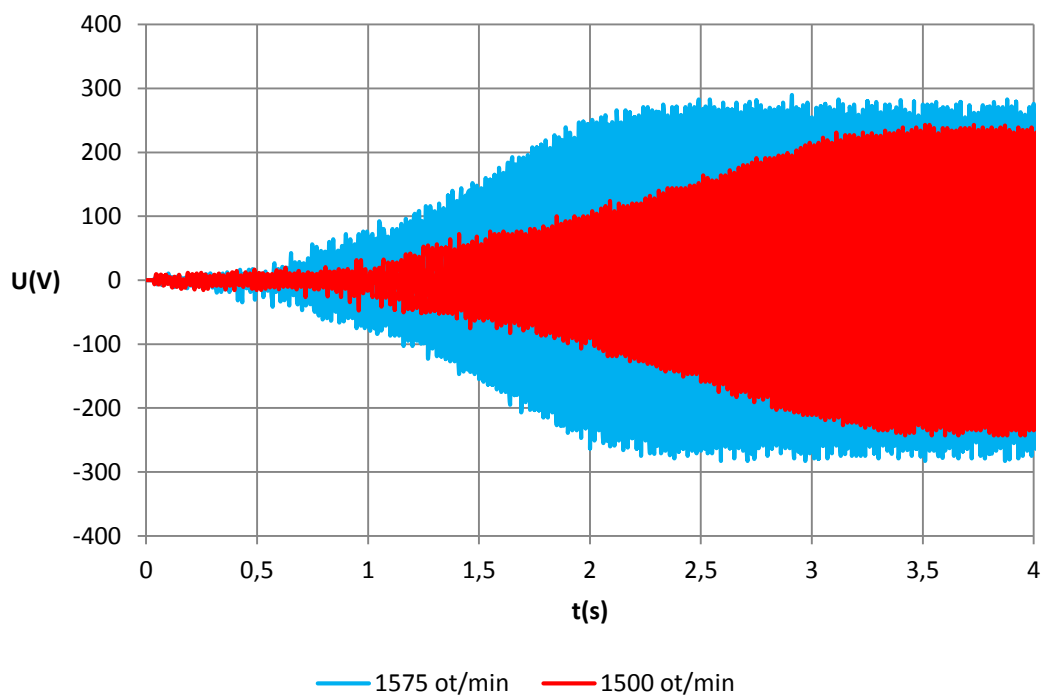
Obrázek č. 24: 1575 ot/min



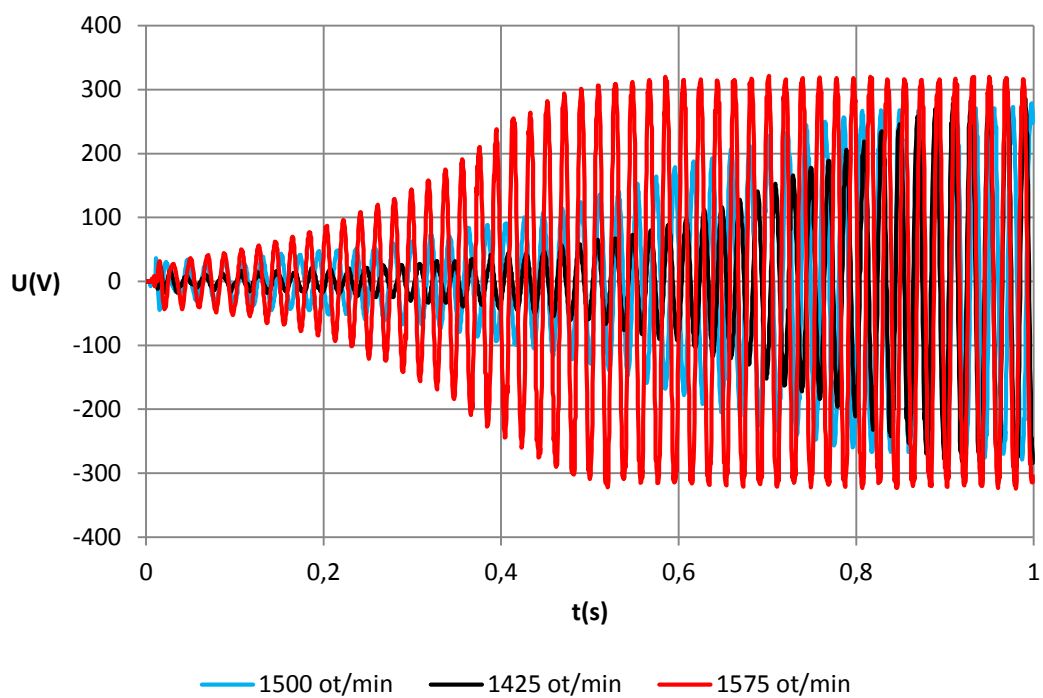
Obrázek č. 25: 1500 ot/min



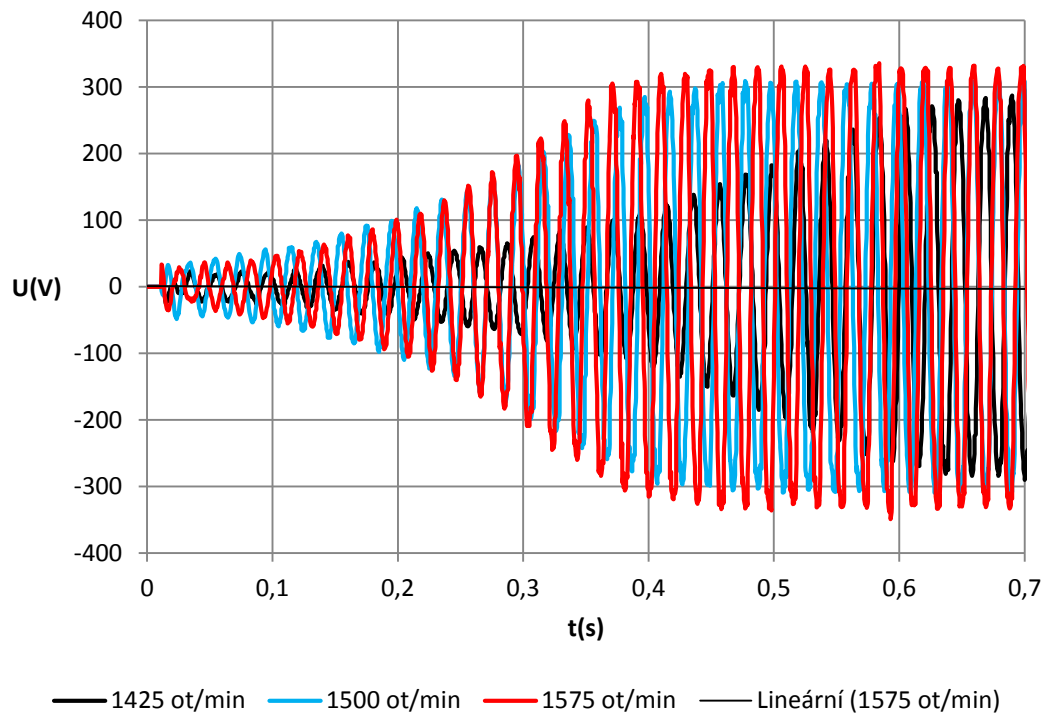
Obrázek č. 26: 1425 ot/min



Obrázek č. 27:  $30\mu F$



Obrázek č. 28:  $45\mu F$



Obrázek č. 29: 55 $\mu$ F

## 2.7 Použité přístroje

Asynchronní motor Siemens 1LE10021AB422AB0

Asynchronní dynamometr ASD 5000, VÚES Brno (5kW/260V/15,3A/2900min<sup>-1</sup>)

Osciloskop Fluke Scopemeter Color 199C

Počítač se software TORQUE 1.0

Kondenzátory 450V různých kapacit

Výkonový analyzátor MAGTROL 6530

Čidlo MAGTROL TMB 308/411

## **3 Tvorba modelu samobuzeného asynchronního generátoru v programu ATP-EMTP**

### **3.1 Popis programu ATP-EMTP**

ATP je univerzální program pro simulování elektromagnetických a elektromechanických přechodových jevů. V tomto programu můžou být simulovány celé elektrické sítě a ovládací systémy libovolných struktur. ATP má rozsáhlé možnosti modelování a další důležité funkce vedle modelování přechodových jevů.[3]

### **3.2 Popis modelu**

Simulační model v programu ATPDraw má dvě hlavní části. První část odpovídá asynchronnímu stroji (1), druhá část reprezentuje buzení (2).

Na motor je přiveden mechanický výkon pomocí momentu a úhlové rychlosti. Tato veličina reprezentuje proudový zdroj v levé části schématu (3). Další prvky na hřídeli motoru reprezentují moment setrvačnosti a tření ložisek (4).

Druhou částí jsou budící kondenzátory připojené přes třípólový vypínač. Kondenzátory jsou v zapojení do hvězdy. Při současném zapojení motoru i budící soustavy do hvězdy znamená, že za podmínky symetrie jsou kondenzátory a jednotlivé vinutí stroje spojeny paralelně. Jeden z budících kondenzátorů umožňuje nastavení počáteční hodnoty napětí. Toto napětí představuje remanentní napětí indukované remanentním magnetickým tokem.