

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA ELEKTROMECHANIKY A VÝKONOVÉ ELEKTRONIKY

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Energetická bilance asynchronního stroje

**vedoucí práce: Doc. Ing. Bohumil Skala, Ph.D.
autor: Lukáš Nekolný**

2012

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2011/2012

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Lukáš NEKOLNÝ**
Osobní číslo: **E10N0075P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Průmyslová elektronika a elektromechanika**
Název tématu: **Energetická bilance asynchronního stroje**
Zadávací katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

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

1. Stručně popište princip asynchronního stroje s důrazem na energetickou stránku v jednotlivých režimech provozu.
2. Jednotlivé režimy práce nasimulujte.
3. Vhodné režimy práce proměřte prakticky a vyhodnoťte energetickou bilanci.
4. Shrňte dosažené výsledky a diskutujte závěry.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah pracovní zprávy: 30 - 40 stran

Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická


Seznam odborné literatury:

1. Bartoš, V., Skala, B.: Měření na elektrických strojích. Skripta ZČU, Plzeň 2002
2. Trinkewitz, Z.: Průmyslové zkoušky velkých elektrických strojů točivých. SNTL Praha 1
3. internet

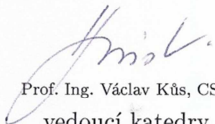
Vedoucí diplomové práce: Doc. Ing. Bohumil Skala, Ph.D.
Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

Datum zadání diplomové práce: 17. října 2011

Termín odevzdání diplomové práce: 11. května 2012


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




Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.
vedoucí katedry

Anotace

Tato diplomová práce se zabývá energetickou bilancí při rozběhu asynchronního motoru. Kapitola 1 obecně pojednává o asynchronním stroji s dvojitou kotvou nakrátko. Kapitola 2 zmiňuje vztahy pro výpočet výkonů. Kapitola 3 popisuje analýzu energií. Kapitola 4 stručně popisuje použité programy. V kapitole 5 jsou analyzovány fyzicky naměřené hodnoty na motoru Siemens při rozdílných parametrech jako je teplota statorového vinutí, směr otáčení rotoru a moment setrvačnosti. Asynchronní motor je modelován metodou stavových rovnic uvedené v kapitole 6. V závěru je provedena verifikace naměřených dat a simulace s následným porovnáním průběhů.

Klíčová slova

Energetická bilance, rozběh, efektivní hodnota, střední hodnota, moment setrvačnosti, teplota, činný výkon, jalový výkon, zdánlivý výkon, otáčky, stavové rovnice, energie, matematické modelování

Abstract

This diploma thesis deals with energy balance during start-up of induction motor. Chapter 1 generally discusses about asynchronous motor with double squirrel cage. Chapter 2 mentions relations for calculation of performance. Chapter 3 describes the analysis of energy. Chapter 4 briefly describes used programs. In chapter 5 are analyzed physically measured values of the Siemens motor with different parameters such as temperature of stator winding, direction of rotor rotation and moment of inertia. Induction motor is modeled using equation of state mentioned in chapter 6. In conclusion there is a verification of measured data and simulation with subsequent comparison of waveforms.

Key words

Energy balance, start-up, effective value, mean value, moment of inertia, temperature, active power, reactive power, apparent power, revolutions per minute, equation of state, energy, mathematical modelling

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Bohumilovi Skalovi, Ph.D. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni. 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.

V Plzni dne 9.5.2012

Jméno příjmení

.....

Obsah

OBSAH	7
ÚVOD	9
SEZNAM SYMBOLŮ	10
1 ASYNCHRONNÍ MOTOR	12
1.1 PRINCIP FUNKCE	12
1.2 KONSTRUKCE	13
1.3 NÁHRADNÍ SCHÉMA.....	14
2 VÝKONY V 3F SOUSTAVĚ	14
3 ENERGETICKÁ BILANCE	16
3.1 PŘIVEDENÁ ENERGIE	16
3.2 ENERGIE ZTRACENÁ NA VEDENÍ	17
3.3 ENERGIE ZTRACENÁ VE VINUTÍ STATORU	17
3.4 ENERGIE ZTRACENÁ VE VINUTÍ ROTORU.....	17
3.5 MECHANICKÁ ENERGIE.....	17
3.6 ZBYTKOVÁ ENERGIE	17
4 POUŽITÉ PROGRAMY	18
4.1 SCOPEWIN.....	18
4.2 MATLAB	18
4.3 SIMULINK	18
5 ANALÝZA NAMĚŘENÝCH DAT	19
5.1 SCHÉMA ZAPOJENÍ MĚŘENÉHO SOUSTROJÍ	19
5.2 URČENÍ ODPORU PŘÍVODNÍHO KABELU	20
5.3 URČENÍ MOMENTU SETRVAČNOSTI	20
5.4 MĚŘENÍ ODPORU A TEPLoty STATOROVÉHO VINUTÍ.....	20
5.4.1 <i>Určení odporu Ohmovo metodou</i>	20
5.4.2 <i>Určení teploty vinutí statoru</i>	21
5.5 NAMĚŘENÁ DATA POMOCÍ DIGITÁLNÍHO ANALYZÁTORU.....	22
5.5.1 <i>Parametry, čas a efektivní hodnota napětí rozběhu</i>	22
5.5.2 <i>Parametry a čas doběhu</i>	22
5.6 ANALÝZA VÝKONŮ	23
5.7 ANALÝZA ENERGIÍ.....	24
6 MATEMATICKÝ MODEL MOTORU	25
6.1 MODELOVÁNÍ.....	25
6.2 PARAMETRY MOTORU PRO SIMULACI	25
6.3 MODELOVANÉ NÁHRADNÍ SCHÉMA A OBLAST PLATNOSTI MODELU	26
6.4 ROVNICE POPISUJÍCÍ ASYNCHRONNÍ MOTOR S KOTVOU NAKRÁTKO.....	27
6.5 BLOKY MODELU	28
6.6 VSTUPNÍ DATA PRO MODEL	31
6.7 POROVNÁNÍ NAMĚŘENÝCH DAT A SIMULACE.....	31
6.8 VÝSLEDKY SIMULACE.....	32
7 ZHODNOCENÍ DOSAŽENÝCH VÝSLEDKŮ	34
ZÁVĚR	35
POUŽITÁ LITERATURA	36

SEZNAM OBRÁZKŮ	37
SEZNAM TABULEK.....	37
SEZNAM PŘÍLOH.....	37

Úvod

Tato diplomová práce se zabývá energetickou bilancí při rozběhu naprázdno asynchronního motoru s kotvou nakrátko Siemens 1LA7 uvedeného na Obr. 0.1 o šítkových parametrech: $U_{YN}=400$ V, $I_{YN}=21,5$ A, $f=50$ Hz, $2p=4$, $P_N=11$ kW, $n=1460$ ot./min. a $\cos \varphi_N=0,84$. Tento motor je pomocí elastické spojky spojen s druhým nenapájeným motorem podobného výkonu. Statorové vinutí je zapojeno do hvězdy a napájeno z 3f transformátoru sníženým napětím z důvodu prodloužení přechodových jevů. Mechanické otáčky a okamžité fázové hodnoty napětí a proudů byli zaznamenány pomocí 8-kanálové digitální měřicí karty při rozdílných provozních parametrech. Tyto parametry motoru jsou jednak pro pravý a levý rozběh, tak i pro studený a teplý motor a dále pro dva momenty setrvačnosti a to bez setrvačnicku a se setrvačnickem. V případě teplého motoru bez setrvačnicku pro levý chod je uvažován vliv efektivní hodnoty napětí na dobu rozběhu a odebranou energii. Kombinace těchto parametrů jsou dále analyzovány pro každou fázi zvlášť pomocí programu MATLAB z hlediska spotřebované energie od počátku rozběhu do jmenovitých otáček naprázdno, její distribuce a doby rozběhu. Teplota vinutí statoru se určuje ohmovou metodou a to z teplotní závislosti odporu. Dále je zde modelován motor metodou stavových rovnic. Pomocí těchto rovnic se vytvoří blokový model v programu SIMULINK, kde se provádí ověření naměřených průběhů mechanických otáček, efektivních hodnot a výkonů.



Obr. 0.1: Motor Siemens 1LA7 163-4AA10

Seznam symbolů

ZNAČKA	NÁZEV	FYZIKÁLNÍ JEDNOTKA
s	<i>skluz</i>	-
f	<i>frekvence</i>	Hz
n	<i>mechanické otáčky</i>	ot./min.
n_s	<i>synchronní otáčky</i>	ot./min.
ω	<i>mechanická úhlová rychlost</i>	rad/s
ω_{EL}	<i>elektrická úhlová rychlost</i>	rad/s
v	<i>obvodová rychlost</i>	m/s
M	<i>moment</i>	N·m
F	<i>síla</i>	N
J_{BEZ}	<i>moment setrvačnosti bez setrvačnicku</i>	kg·m ²
J_S	<i>moment setrvačnosti se setrvačnickem</i>	kg·m ²
U_i	<i>indukované napětí</i>	V
U_1	<i>statorové napětí</i>	V
U_2	<i>rotorové napětí</i>	V
I_M	<i>magnetizační proud</i>	A
I_1	<i>statorový proud</i>	A
I_2'	<i>rotorový proud přepočtený na stator</i>	A
R_1	<i>statorový činný odpor</i>	Ω
R_2'	<i>rotorový činný odpor přepočtený na stator</i>	Ω
R_{FE}	<i>odpor magnetického obvodu</i>	Ω
R_v	<i>odpor kabelu</i>	Ω
$X_{1\sigma}$	<i>rozptylová reaktance statoru</i>	Ω
X_1	<i>reaktance statoru</i>	Ω
$X_{2\sigma}'$	<i>rozptylová reaktance rotoru přepočtená na stator</i>	Ω
X_2'	<i>reaktance rotoru přepočtená na stator</i>	Ω
X_h	<i>hlavní (magnetizační) reaktance</i>	Ω
$L_{1\sigma}$	<i>rozptylová indukčnost statoru</i>	H
L_1	<i>vlastní indukčnost statoru</i>	H
$L_{2\sigma}'$	<i>rozptylová indukčnost rotoru přepočtená na stator</i>	H
L_2'	<i>vlastní indukčnost rotoru přepočtená na stator</i>	H
L_h	<i>hlavní (magnetizační) indukčnost</i>	H
M_{12}	<i>vzájemná indukčnost stator-rotor</i>	H
P	<i>činný výkon</i>	W
Q	<i>jalový výkon</i>	VA _r
S	<i>zdánlivý výkon</i>	VA
φ	<i>fázový posuv</i>	rad
$\cos \varphi$	<i>účinnost</i>	-
A	<i>obsah</i>	m ²
l	<i>délka</i>	m
ρ	<i>rezistivita</i>	$\Omega \cdot m$
α	<i>teplotní součinitel elektrického odporu</i>	K ⁻¹
$\Delta\theta_1$	<i>oteplení vinutí statoru</i>	K

ZNAČKA	NÁZEV	FYZIKÁLNÍ JEDNOTKA
Θ_1	teplota vinutí statoru	$^{\circ}\text{C}$
t	čas	s
t_r	čas rozběhu	s
t_d	čas doběhu	s
T	perioda	s
B	indukce	T
$2p$	počet pólů	-
E_p	přivedená elektrická energie	W·s
E_k	mechanická energie	W·s
E_2	přivedená energie do rotoru	W·s
ΔE_v	ztracená energie na vedení	W·s
ΔE_{j1}	ztracená energie ve vinutí statoru	W·s
ΔE_{j2}	ztracená energie v kleci nakrátko	W·s
ΔE_z	ztracená zbytková energie	W·s

Efektivní hodnoty jsou označeny s indexem **EF** (např. \mathbf{X}_{EF}), maximální hodnoty s indexem **M** (např. \mathbf{X}_M) a okamžité hodnoty jsou uváděny jako $\mathbf{x}(t)$.

1 Asynchronní motor

Asynchronní motor je střídavý elektrický stroj, který přeměňuje vstupní elektrickou energii na výstupní mechanickou energii s vysokou účinností. Tok energie mezi statorem a rotorem je realizován výhradně pomocí elektromagnetické indukce, proto se často v zahraniční literatuře označuje jako stroj indukční. Výstupní mechanický pohyb bývá nejčastěji otáčivý, přičemž existují i motory lineární.

U asynchronních motorů se lze setkat s dvěma základními konstrukcemi a to s kotvou nakrátko a s vinutou kotvou. Zaměříme se na hojněji používané motory s kotvou nakrátko. Tyto elektrické motory se pro svoji jednoduchost, spolehlivost a nízké výrobní náklady staly nejvíce využívaným typem elektrického pohonu nejenom v těžkém průmyslu, ale také v domácnostech. Neustálé zlepšování vlastností prvků výkonové elektrotechniky přispělo k širokému spektru využití a to díky sériovosti výroby a právě proto je nejlevnějším a nejlehčím elektrickým zdrojem hnací síly.

1.1 Princip funkce

Princip činnosti trojfázového asynchronního motoru je založen na indukčním Faradayově zákoně a Lorenzově síle působící na klec nakrátko protékanou proudem v magnetickém poli. Dále je popsán princip vzniku síly působící na rotor asynchronního motoru. Statorové vinutí je připojeno na tvrdou trojfázovou síť vytvářející točivé magnetické pole. Takto vzniklé točivé magnetické pole protínající vodiče rotoru způsobuje, že se v rotoru indukuje napětí o velikosti podle rovnice 1.1:

$$U_i = B \cdot l \cdot v \quad (1.1)$$

Protože vinutí rotoru tvoří uzavřený obvod, protéká jím proud. Tento proud vytváří magnetické pole rotoru, které působí na magnetické pole statoru. Vzájemným působením obou magnetických polí se vytváří tečná síla, která působí na vodiče rotoru a to ve směru, kterým se pohybuje magnetické pole statoru. Tato síla se určí podle rovnice 1.2:

$$F = B \cdot l \cdot I \quad (1.2)$$

Síla F tedy bude působit jen tehdy, pokud se bude ve vodičích rotoru indukovat napětí. Tento jev nastane v případě relativního pohybu pole statoru vůči vodičům rotoru. Z toho plyne, že otáčky rotoru a otáčky točivého pole statoru musejí být rozdílné.

V okamžiku počátku rozběhu motoru je rotor vůči točivému poli v klidu. V rotoru tak vznikne velké indukované napětí. Toto napětí způsobí záběrový proud, který nabývá u motoru Siemens hodnot cca 6-ti násobku jmenovitého statorového proudu.

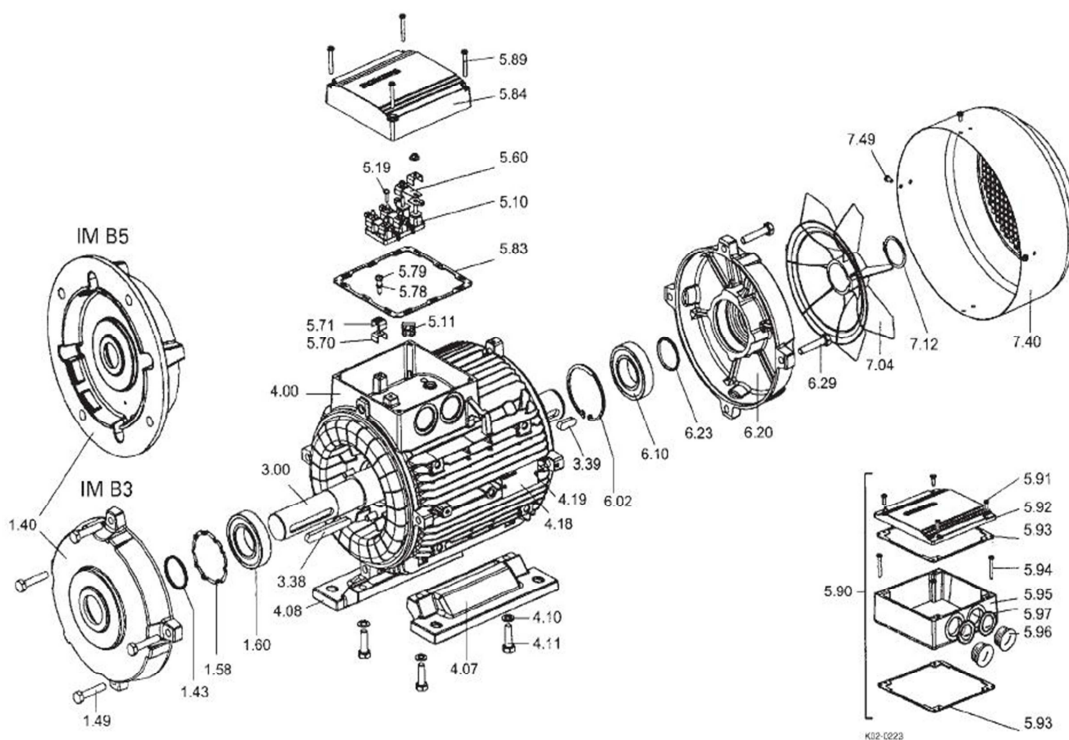
Rozdíl synchronních otáček pole n_s a mechanických otáček rotoru n vztahený na jednu otáčku pole n_s , nazýváme skluzem asynchronního motoru. Skluz charakterizuje stav motoru, je to bezrozměrné číslo v našem případě motorického chodu v intervalu od 0 do 1. Skluz se určuje z rovnice 1.3:

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \quad (1.3)$$

Hodnota skluzu závisí na mechanickém zatížení motoru a při jmenovitém zatížení je přibližně rovna 2,6 %, což odpovídá frekvenci v rotorovém vinutí cca 1,33 Hz.

1.2 Konstrukce

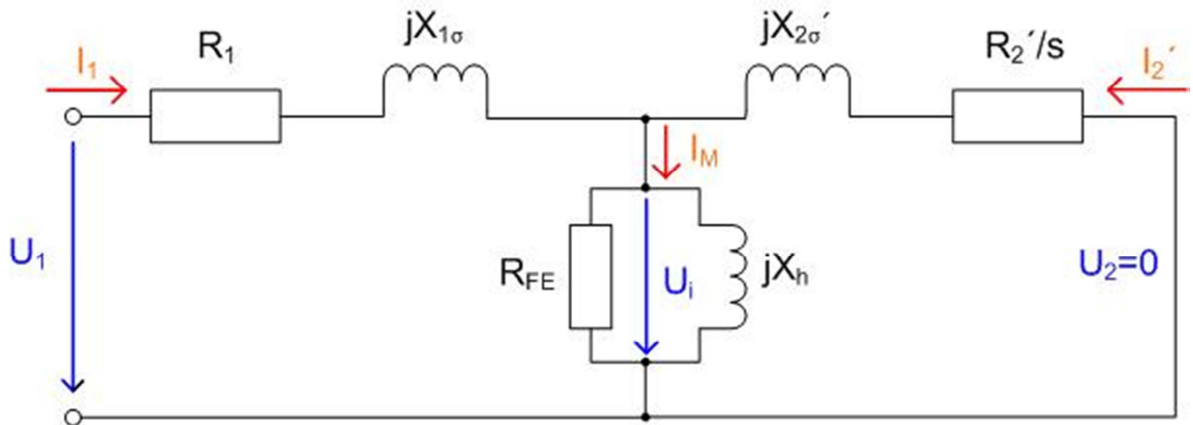
Motor typu 1LA7 je trojfázový asynchronní motor s kotvou nakrátko v patkovém provedení určený pro pohon průmyslových zařízení. Podle [6] krytí IP55 je dosaženo použitím pryžových těsnících kroužků tzv. CD kroužků. Motory jsou provedeny v tepelné třídě izolace F a využití odpovídá tepelné třídě B. Kostra statoru s povrchovým chlazením je tlakově odlita z hliníku. V kostře je pevně uložen svazek z navzájem izolovaných elektrotechnických plechů o tloušťce 0,5mm ve tvaru dutého válce. Plechy jsou pokryty na povrchu izolační vrstvou a to buď lakovou, keramickou nebo získanou oxidováním. V polouzavřených drážkách staženého plechového svazku je uloženo jednovrstvé 3f měděné vinutí izolované bezrozpouštědlovou pryskyřičnou izolací. Vzduchová mezera mezi státorem a rotorem se u asynchronních motorů volí co nejmenší a to z důvodu velkého magnetického odporu procházejícímu magnetickému toku. Rotor je složen také z izolovaných elektrotechnických plechů ve tvaru dutého válce. Tento svazek plechů je nalisován na vroubkovanou hřídel a zajištěný pomocí drážkového pera proti protočení. V uzavřených rotorových drážkách je uložena dvojité klec nakrátko z hliníku odlitá metodou tlakového lití. Dvojitá klec je složena z dvou klecí, kde vnější klec malého průřezu tyčí má velký odpor a malou reaktanci, a proto se uplatňuje zejména při rozběhu. Vnitřní klec velkého průřezu tyčí má malý odpor a velkou reaktanci, proto se často označuje jako běhová klec. Hřídel se otáčí na dvou kuličkových ložiskách s trvalou tukovou náplní, které jsou uloženy ve štítech motoru. Na hřídeli je uložen plastový radiální ventilátor s ocelovým krytem, který chladí motor nezávisle na směru otáčení.



Obr. 1.1: Motor Siemens rozložený na jednotlivé komponenty

1.3 Náhradní schéma

Hledáme-li náhradní schéma asynchronního motoru v podobě T-článku, řešíme vlastně úlohu nalézt takovou kombinaci pasivních odporů a indukčností, která by se chovala podobně jako uvažovaný stroj. Vinutí statoru a rotoru tvoří vázaný magnetický obvod s vlastními indukčnostmi L_1 , L_2 a vzájemnými indukčnostmi M_{11} (stator-stator), M_{22} (rotor-rotor) a M_{12} (stator-rotor). Veličiny uvedené na Obr. 1.2 označené indexem 1 znázorňují statorové veličiny a indexem 2' jsou označené rotorové veličiny přepočtené na stator. Podélnou větev tvoří rozptylová reaktance X_σ a činný odpor vinutí R , který je u vinutí rotoru závislý na skluzu, zatímco příčnou větev tvoří hlavní (magnetizační) reaktance X_h paralelně k neznámému odporu R_{FE} zastupující magnetické ztráty ve statoru i rotoru.



Obr. 1.2: Náhradní schéma asynchronního motoru

2 Výkony v 3f soustavě

Předpokládá se vyvážená 3f soustava. Pro názornost zde uvádím sinusové průběhy o amplitudě U_M resp. I_M , o elektrické úhlové frekvenci ω_{EL} a o fázovém posuvu mezi napětím a proudem $\varphi = \varphi_U - \varphi_I$. Pak pro napětí a proud platí rovnice 2.1 a 2.2.

$$u(t) = U_M \cdot \sin(\omega_{EL}t + \varphi_U) = \sqrt{2} \cdot U_{EF} \cdot \sin(\omega_{EL}t + \varphi_U) \quad (2.1)$$

$$i(t) = I_M \cdot \sin(\omega_{EL}t + \varphi_I) = \sqrt{2} \cdot I_{EF} \cdot \sin(\omega_{EL}t + \varphi_I) \quad (2.2)$$

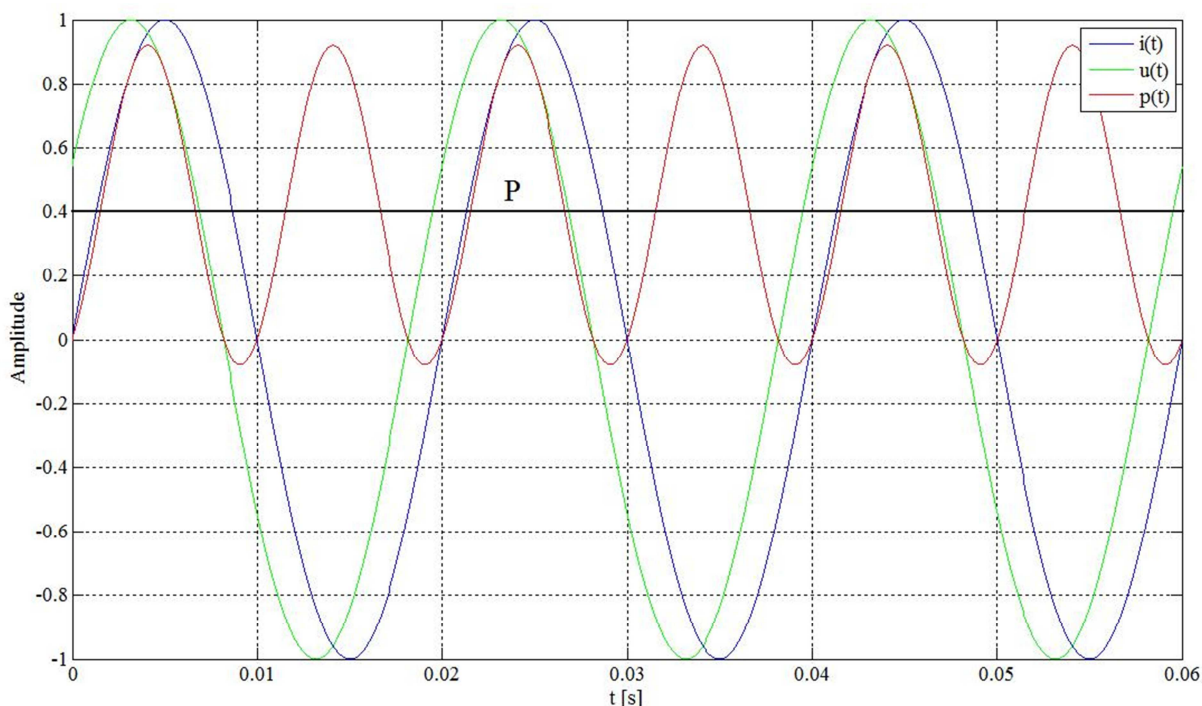
Okamžitý výkon u sinusového průběhu má též sinusový průběh, ovšem kmitá s dvojnásobnou frekvencí, jak je zřejmé z Obr. 2.1. To vyplývá z goniometrických vztahů a jejich úpravou na požadovaný tvar podle rovnice 2.3. Dále podle rovnice 2.4 pro okamžitý výkon platí, že se nechá rozložit na činnou a jalovou složku. Platí tedy následující vztahy.

$$p(t) = u(t) \cdot i(t) = U_{EF} \cdot I_{EF} \cdot \{ [1 - \cos(2\omega_{EL}t)] \cdot \cos \varphi + \sin(2\omega_{EL}t) \cdot \sin \varphi \} \quad (2.3)$$

$$p(t) = u(t) \cdot [i_c(t) + i_j(t)] = u(t) \cdot i(t) \cdot [\cos \varphi + j \cdot \sin \varphi] = p_c(t) + j \cdot p_j(t) \quad (2.4)$$

Činný výkon je dle [7] definován jako střední hodnota součinu okamžitých hodnot napětí a proudu. Představuje užitečný výkon přenášený od zdroje ke spotřebiči, kde se nenávratně přeměňuje v jiné formy energie. Vypočte se podle rovnice 2.5.

$$P = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T u(t) \cdot i(t) \cdot dt \quad (2.5)$$

Obr. 2.1: Průběh okamžitého výkonu pro jmenovitý $\cos \varphi$

Jalový výkon má periodický průběh s nulovou střední hodnotou. Představuje výkon přelévající se mezi zdrojem a spotřebičem a je způsoben budováním magnetického pole v kladné části vlny a zanikáním tohoto pole v záporné části vlny. Výpočet jalového výkonu vychází z rovnice 2.6.

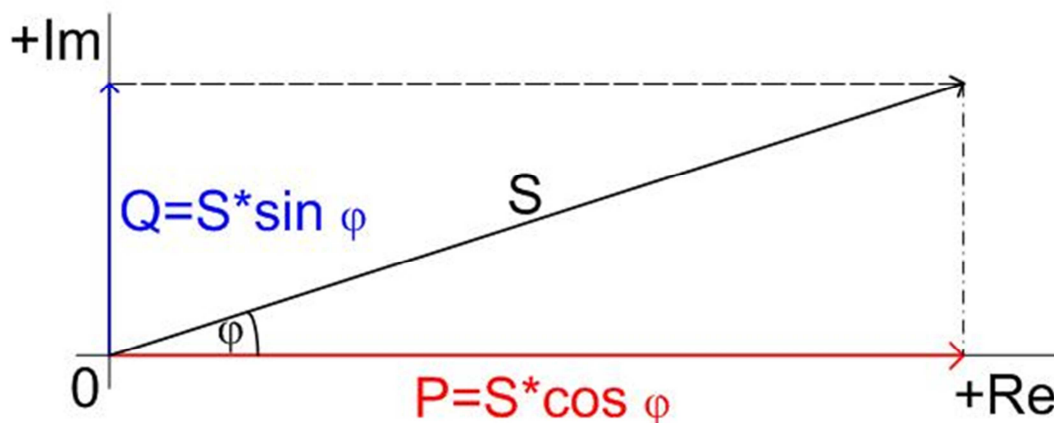
$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} \quad (2.6)$$

Zdánlivý výkon se definuje z praktických důvodů. Nemá fyzikální význam, ale je důležitý z hlediska dimenzování elektrického obvodu. Určuje se z rovnice 2.7.

$$S = U_{EF} \cdot I_{EF} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2(t) \cdot dt} \cdot \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) \cdot dt} \quad (2.7)$$

Vztah mezi zdánlivým výkonem S , činným výkonem P a jalovým výkonem Q vyjadřuje výkonový trojúhelník uvedený na Obr. 2.2. Vztah mezi nimi vyjadřuje rovnice 2.8.

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (2.8)$$

Obr. 2.2: Výkonový trojúhelník pro jmenovitý $\cos \varphi$

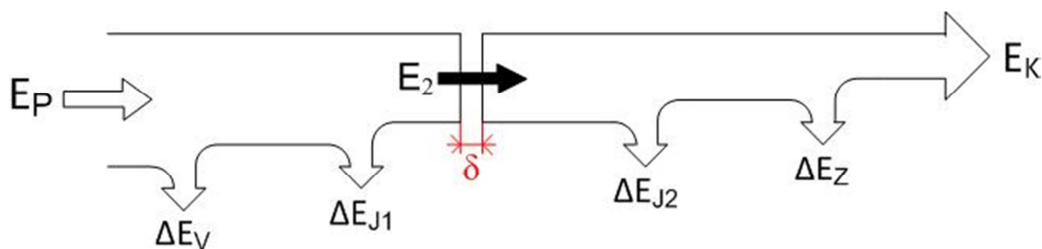
Celkový zdánlivý, činný a jalový výkon v 3f soustavě získáme jako součet zdánlivých, činných a jalových výkonů od jednotlivých fází. Platí tedy rovnice 2.9 až 2.11.

$$S_{3f} = S_U + S_V + S_W \quad (2.9)$$

$$P_{3f} = P_U + P_V + P_W \quad (2.10)$$

$$Q_{3f} = Q_U + Q_V + Q_W \quad (2.11)$$

3 Energetická bilance



Obr. 3.1: Energetická bilance asynchronního motoru

V praxi nás zajímá velikost a rozložení ztrát uvnitř motoru uvedené na Obr. 3.1. V ustáleném stavu (např. stav nakrátko nebo naprázdno) se jedná o ztráty okamžité, tedy na čase nezávislé, udávané ve wattech. Ovšem v případě rozběhu motoru jde o přechodový jev, jedná se tedy o ztráty v určitém časovém intervalu, které určíme podle rovnice 3.1 integrací výkonu nebo ztrátového výkonu podle času, a výsledkem je přivedená nebo ztracená energie udávaná v joulech. Tyto dva zcela odlišné významy je nutno rozlišovat. Obecně je energie skalární fyzikální veličina, která se charakterizuje jako schopnost látky nebo pole konat práci. Jelikož se z fyzikálního hlediska energie nemůže měnit skokem, jedná se o stavovou veličinu. Platí zde zákon zachování energie, který říká, že se energie v uzavřené soustavě může měnit z jedné formy na druhou, ale její množství zůstává stejné. Pro přivedenou (odebranou) energii platí rovnice 3.1.

$$(\Delta)E = \int_0^{t_r} (\Delta)P \cdot dt \quad (3.1)$$

Základní jednotkou energie v soustavě SI je joule, definovaný jako energie, kterou vykoná 1W za jednu sekundu. Existují i další odvozené veličiny jako kilowatthodiny, kde vztah mezi nimi je uveden v rovnici 3.2.

$$E[J] = E[Ws] = \frac{E[kWh]}{3,6 \cdot 10^6} \quad (3.2)$$

3.1 Přivedená energie

Jedná se o užitečnou elektrickou energii, kterou odebíráme ze sítě za účelem rozběhu motoru do jmenovitých otáček. Tuto energii získáme jako plochu pod křivkou činného výkonu, kde meze integrace jsou od 0 do času rozběhu. Tato energie se určuje z rovnice 3.3.

$$E_P = \int_0^{t_r} P(t) \cdot dt \quad (3.3)$$

3.2 Energie ztracená na vedení

Energie ztracená v přívodním kabelu je uvažována, jelikož rozběhový proud nabývá velkých hodnot. Její velikost odpovídá ploše pod kvadrátem efektivní hodnoty proudu během rozběhu násobená odporem kabelu, jenž se určuje z rovnice 5.1. Odpor závisí na geometrických parametrech a na použitém materiálu vodičů, což je v našem případě měď. Ze znalosti rozběhového proudu a činného odporu vodičů se energie určí přesně z rovnice 3.4.

$$\Delta E_V = R_V \cdot \int_0^{t_r} I_{EF}^2(t) \cdot dt \quad (3.4)$$

3.3 Energie ztracená ve vinutí statoru

Energie ztracená ve vinutí statoru je závislá jednak na ploše pod kvadrátem efektivní hodnoty proudu, a jednak na odporu statorového vinutí, které je měděné a jednovrstvé. Při průchodu proudu tímto vinutím dochází vlivem činného odporu k přeměně části přivedené energie na Jouleovo teplo. Tato energie se vyzáří v podobě tepelné energie, která způsobuje oteplení vinutí statoru. Toto oteplení nesmí překročit teplotu odpovídající tepelné odolnosti izolace vinutí. Velikost této energie se určí přesně z rovnice 3.5.

$$\Delta E_{J1} = R_1 \cdot \int_0^{t_r} I_{EF}^2(t) \cdot dt \quad (3.5)$$

3.4 Energie ztracená ve vinutí rotoru

Jedná se o tepelnou energii ztracenou ve dvojité kleci nakrátko. V případě konvenčního rozběhu motoru bez zátěže do mechanických otáček naprázdno, které jsou 1493 ot./min., odpovídá ztracená Jouleova energie v rotoru právě kinetické energii roztáčených hmot a její velikost je na čase rozběhu nezávislá. Určuje se z rovnice 3.6.

$$\Delta E_{J2} = \frac{1}{2} \cdot J \cdot \omega^2 = konst. \quad (3.6)$$

3.5 Mechanická energie

Výstupní mechanická energie se rovná kinetické energii roztáčených hmot. Její velikost je nezávislá na době rozběhu. Kinetická energie je přímo úměrná momentu setrvačnosti a kvadrátu koncové mechanické úhlové rychlosti rotoru, což je 152,9 rad/s. Její velikost je shodná jako energie ztracená ve vinutí rotoru. Její velikost se určí z rovnice 3.7:

$$E_K = \frac{1}{2} \cdot J \cdot \omega^2 = konst. \quad (3.7)$$

3.6 Zbytková energie

Tuto energii získáme, když od přivedené energie ze sítě odečteme energii ztracenou na vedení, energii ztracenou ve vinutí rotoru a statoru a výstupní mechanickou energii rotoru. Tato energie zahrnuje energii ztracenou v magnetickém obvodu a energii ztracenou třením

v ložiskách. Tyto energie jsou dále od sebe matematicky neoddělitelné, lze ovšem předpokládat, že dominantní bude energie ztracená třením v ložiskách, zatímco energie ztracená v magnetickém obvodu úměrná kvadrátu napětí a frekvenci bude díky sníženému napájecímu napětí nabývat nízkých hodnot. Zbytková energie se určí z rovnice 3.8.

$$\Delta E_Z = E_P - \Delta E_V - \Delta E_{J1} - \Delta E_{J2} - E_K = \Delta E_{FE} + \Delta E_{LOŽ}. \quad (3.8)$$

4 Použité programy

4.1 ScopeWin

Tento program byl použit pro záznam naměřených hodnot. Podle [4] se jedná o výkonný program pro měření a zpracování dat pracující na operačních systémech Windows. Je vybaven grafickým procesorem umožňujícím snímání v reálném čase. Program je vybaven multikanálovým grafickým vyhodnocením, řízením experimentů a grafickým výstupem dat na zařízení podporovaná Windows. Jedná se o otevřený systém, který umožňuje realizaci speciálních uživatelských funkcí. Ovládání funkcí modulu se děje v pěti úrovních prostřednictvím myši, menu, horkých kláves, povelů a programu. Ačkoliv prezentovaný systém umožňuje standardní měření a zpracování včetně automatizace experimentu, byl hlavní důraz kladen na aplikaci a testování nových metod zpracování signálu. Ve srovnání se systémem jako je Matlab umožňuje plně rutinní nasazení a rychlé zaškolení. To vytváří dobrý základ pro pořizování dostatečně velkých a věrohodných souborů dat, které jsou nezbytné pro skutečně korektní ověřování a testování nových metod. Tento program je na českém trhu vhodný především pro ty, kteří chtějí realizovat různá laboratorní a průmyslová měření a přitom nechtějí investovat příliš velké finanční prostředky. Za přijatelnou cenu přitom mohou získat základní a přitom kvalitní měřicí a zpracovatelské prostředí s možností uživatelských modifikací.

4.2 Matlab

Matlab, dle [3] název vzniklý ze spojení MATrix LABoratory neboli maticová laboratoř, je dnes jedním z nejrozšířenějších programových balíčků určený především pro technické výpočty používaný ve firmách, výzkumných pracovištích a univerzitách po celém světě. Spojuje maticové výpočty, vizualizaci dat a programovací jazyk v jednom prostředí. Problémy a jejich řešení jsou nejčastěji vyjádřeny pomocí matematických vztahů. Typické oblasti použití jsou inženýrské výpočty, tvorba algoritmů, modelování a simulace, analýza dat, vědecká grafika, tvorba aplikací. Mezi základní vlastnosti lze zahrnout vlastnost, že veškeré objekty v Matlabu jsou považovány za prvky pole. Tyto prvky však mohou být nejen čísla, proměnné, ale i složitější struktury. Výkonnost Matlabu je rozšiřována díky navazujícímu softwaru, které tvoří především soubory programu nazývané toolboxy orientované zpravidla na daný problém nebo uživatelem sestavené programy, tzv. m-files.

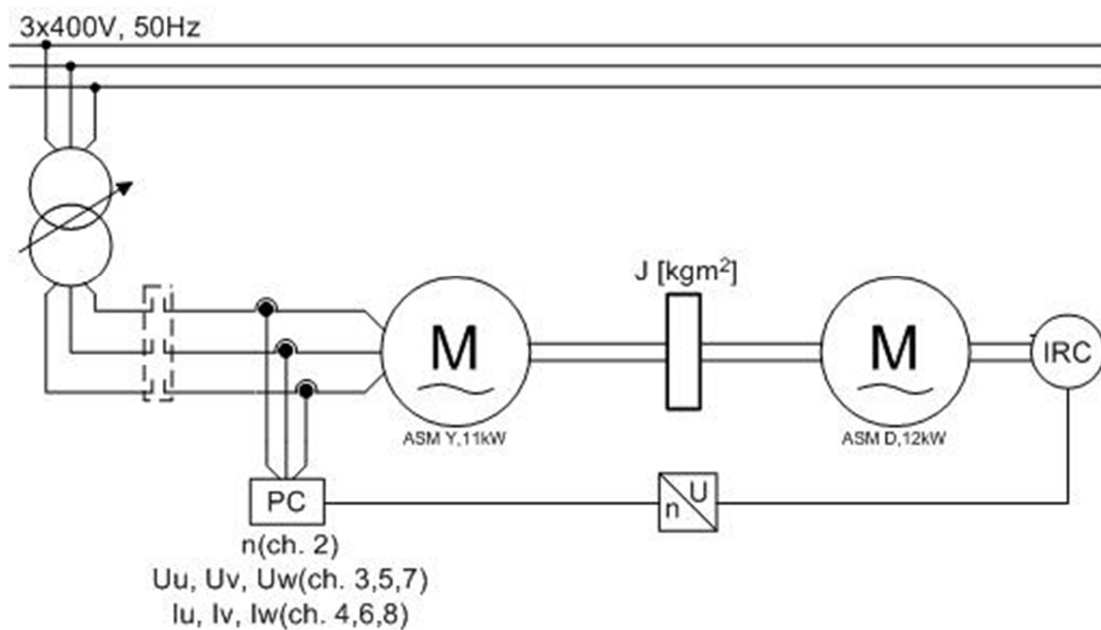
4.3 Simulink

Simulink, název vzniklý ze slov SIMUlation LINK neboli simulace a spojení, je jedno z nejnámějších a nejpoužívanějších rozšíření program Matlab, pro modelování, simulaci, vizualizaci a analýzu přechodových jevů v přehledném uživatelském rozhraní bez nutnosti

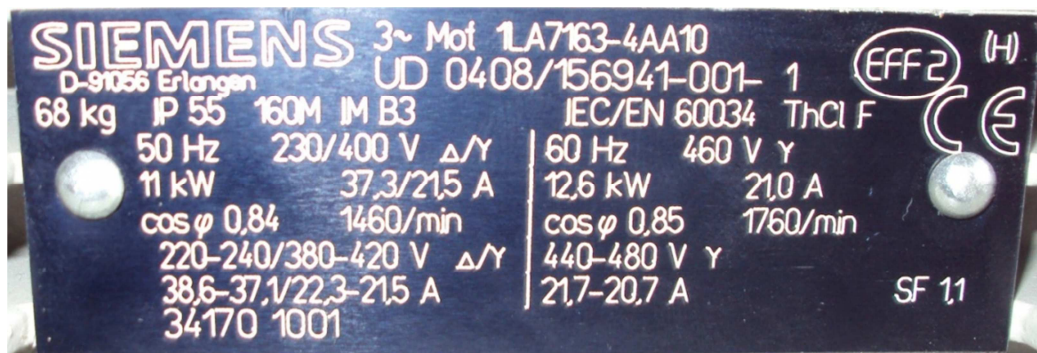
programování. Tvorba modelu je velice rychlá a intuitivní. Knihovna obsahuje velké množství předdefinovaných bloků pro lineární i nelineární analýzu. Vzhledem k tomu, že Simulink je součástí Matlabu, je jednoduché přecházet z jednoho do druhého prostředí a využívat tak jejich výhod.

5 Analýza naměřených dat

5.1 Schéma zapojení měřeného soustrojí



Obr. 5.1: Schéma zapojení měřeného soustrojí



Obr. 5.2: Štítek motoru Siemens (ASM Y, 11kW)



Obr. 5.3: Štítek motoru Mohelnice (ASM D, 12kW)

5.2 Určení odporu přívodního kabelu

$$A = 2,5 \text{ mm}^2$$

$$l = 6 \text{ m}$$

$$\rho_{CU} = 0,0169 \cdot 10^{-6} \text{ } \Omega \cdot \text{m}$$

$$R_V = \rho_{CU} \cdot \frac{l}{A} = 0,0169 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{6}{2,5 \cdot 10^{-6}} = 0,0405 \text{ } \Omega \quad (5.1)$$

5.3 Určení momentu setrvačnosti

Momentu setrvačnosti pro měřený AM 11kW včetně plastového ventilátoru na hřídeli byl určen z katalogu [6]. Moment setrvačnosti setrvačnicku byl určen výpočtem z jeho geometrických rozměrů.

AM 11kW:	$J_{M11} = 0,04 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$
Setrvačnick:	$J_{SETR} = 0,12 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$

Zatímco moment setrvačnosti AM 12kW byl určen odhadem. Jedná se o motor podobného výkonu, který je starší konstrukce, a proto lze předpokládat větší průměr rotoru tedy i větší moment setrvačnosti než AM 11kW. A dále hřídel je osazena litinovým radiálním ventilátorem o hmotnosti cca 4kg na poloměru 0,2m.

AM 12kW:	$J_{M12} = 0,11 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$
Ventilátor AM 12kW:	$J_V = 0,08 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$

Součtem těchto elementárních momentů setrvačnosti podle rovnic 5.2 a 5.3 dostaneme celkový moment setrvačnosti pro soustrojí bez setrvačnicku a se setrvačnickem.

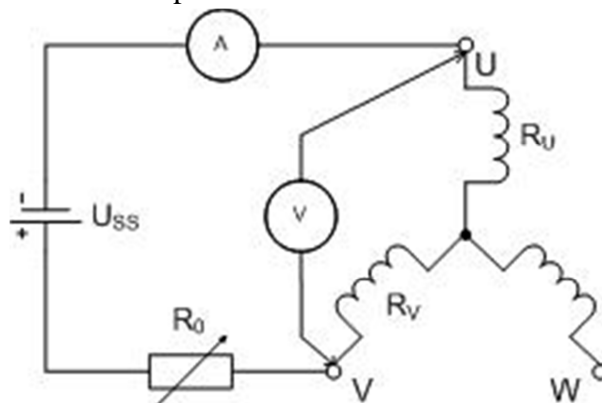
$$J_{BEZ} = J_{M11} + J_{M12} + J_V = 0,04 + 0,11 + 0,08 = 0,23 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \quad (5.2)$$

$$J_S = J_{BEZ} + J_{SETR} = 0,23 + 0,12 = 0,35 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \quad (5.3)$$

5.4 Měření odporu a teploty statorového vinutí

5.4.1 Určení odporu Ohmovo metodou

Jelikož se jedná o měření velmi malých odporů, je nutné pro co nejmenší chybu měřit napětí přímo na svorkovnici motoru podle Obr. 5.4.



Obr. 5.4: Měření odporu statoru Ohmovo metodou

Z naměřených hodnot mezi fázemi U_{XY} a I_{XY} se určí R_{XY} podle rovnice 5.4 a řešením soustavy 3 rovnic 5.5 o 3 neznámých dostaneme fázové odpory statorových cívek R_1 .

$$R_{XY} = \frac{U_{XY}}{I_{XY}} \quad (5.4)$$

$$\begin{bmatrix} R_{UV} \\ R_{VW} \\ R_{UW} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} R_U \\ R_V \\ R_W \end{bmatrix} \quad (5.5)$$

5.4.2 Určení teploty vinutí statoru

Z naměřených hodnot R_{20} , uvedených v Tab. 5.1 jako STUD, R_1 a $\alpha_{CU} = f(\Theta)$ určené z tabulek se z rovnice 5.6 udávající teplotní závislosti odporu určuje oteplení statorových cívek. Celkovou teplotu dostaneme součtem oteplení statoru a teploty okolí podle rovnice 5.7.

$$\alpha_{CU20^\circ C} = 0,0043 \text{ K}^{-1}, \Theta_{OKOLÍ} = 20^\circ C$$

$$R_1 = R_{20}(1 + \alpha_{CU20^\circ C} \cdot \Delta\theta_1) \Rightarrow \Delta\theta_1 = \frac{\left(\frac{R_1}{R_{20}} - 1\right)}{\alpha_{CU20^\circ C}} \quad (5.6)$$

$$\Theta_1 = \Theta_{OKOLÍ} + \Delta\theta_1 \quad (5.7)$$

STUD	U_{XY} [V]	I_{XY} [A]	R_{XY} [Ω]
U - W	0,374	0,5	0,748
V - W	0,376	0,5	0,752
U - V	0,375	0,5	0,750
STUDBEZ(L-R)			
U - W	0,378	0,5	0,756
V - W	0,377	0,5	0,754
U - V	0,379	0,5	0,758
STUDSL			
U - W	0,388	0,5	0,776
V - W	0,384	0,5	0,768
U - V	0,392	0,5	0,784
STUDSR			
U - W	0,384	0,5	0,768
V - W	0,383	0,5	0,766
U - V	0,382	0,5	0,764
TEP			
U - W	0,482	0,503	0,959
V - W	0,488	0,503	0,971
U - V	0,477	0,503	0,949
TEPBEZL(D)			
U - W	0,466	0,508	0,918
V - W	0,467	0,508	0,920
U - V	0,462	0,508	0,910

STUD	R_{20} [Ω]	θ_1 [$^\circ C$]
U	0,373	20,0
V	0,377	20,0
W	0,375	20,0
STUDBEZ(L-R)		
	R_1 [Ω]	θ_1 [$^\circ C$]
U	0,380	24,4
V	0,378	20,6
W	0,376	20,6
STUDSL		
U	0,396	34,3
V	0,388	26,8
W	0,38	23,1
STUDSR		
U	0,383	26,2
V	0,381	22,5
W	0,385	26,2
TEP		
U	0,469	79,9
V	0,481	84,2
W	0,491	91,1
TEPBEZL(D)		
U	0,454	70,5
V	0,456	68,7
W	0,464	75,2

TEPBEZR	U_{xy} [V]	I_{xy} [A]	R_{xy} [Ω]	TEPBEZR	R_1 [Ω]	θ_1 [$^{\circ}$ C]
U - W	0,465	0,510	0,912	U	0,455	71,1
V - W	0,467	0,510	0,916	V	0,459	70,6
U - V	0,466	0,510	0,914	W	0,457	70,9
TEPSL				TEPSL		
U - W	0,48	0,508	0,946	U	0,468	79,2
V - W	0,482	0,505	0,954	V	0,476	81,1
U - V	0,482	0,510	0,945	W	0,477	83,3
TEPSR				TEPSR		
U - W	0,472	0,508	0,930	U	0,46	74,2
V - W	0,474	0,508	0,934	V	0,467	75,5
U - V	0,473	0,510	0,927	W	0,47	78,9

Tab. 5.1: Naměřené hodnoty odporů, určení fázových odporů a teploty vinutí statoru

5.5 Naměřená data pomocí digitálního analyzátoru

Měření na 8-kanálovém analyzátoru probíhalo s vzorkovací frekvencí 2048Hz. Jelikož pro každou kombinaci parametrů se jedná o velmi rozměrné vektory napětí, proudu a otáček o délce 16384 hodnot nebudou tu uváděny, ale jsou znázorněny v grafické podobě.

5.5.1 Parametry, čas a efektivní hodnota napětí rozběhu

název souboru	t_r [s]	U_{EF} [V]	Teplota statoru		J [kgm^2]		Směr otáčení	
			Teplý	Studený	0,23	0,35	Vpravo	Vlevo
STUDBEZR	4,76	69		x	x		x	
STUDBEZL	4,85	68		x	x			x
STUDSR	5,27	83		x		x	x	
STUDSL	7,84	70		x		x		x
TEPBEZR	2,50	86	x		x		x	
TEPBEZL	2,46	87	x		x			x
TEPBEZLD	5,09	65	x		x			x
TEPSR	4,29	86	x			x	x	
TEPSL	4,36	87	x			x		x

Tab. 5.2: Parametry rozběhů

5.5.2 Parametry a čas doběhu

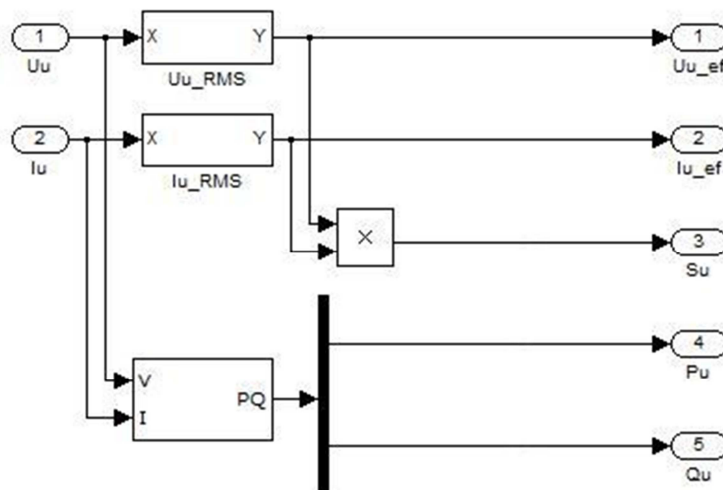
Parametry doběhů uvedené v Tab. 5.3 pro studený a teplý motor uvádím z důvodu rozdílnosti jejich časů. Motor při doběhu bez napětí brzdí právě svými mechanickými ztrátami. Z toho lze usuzovat zvýšené mechanické pnutí ve spojkách pro studený motor.

název souboru	t_d [s]	Teplota statoru		Směr otáčení	
		Teplý	Studený	Vpravo	Vlevo
STUDDOBL	4,07		x		x
TEPDOBL	5,14	x			x

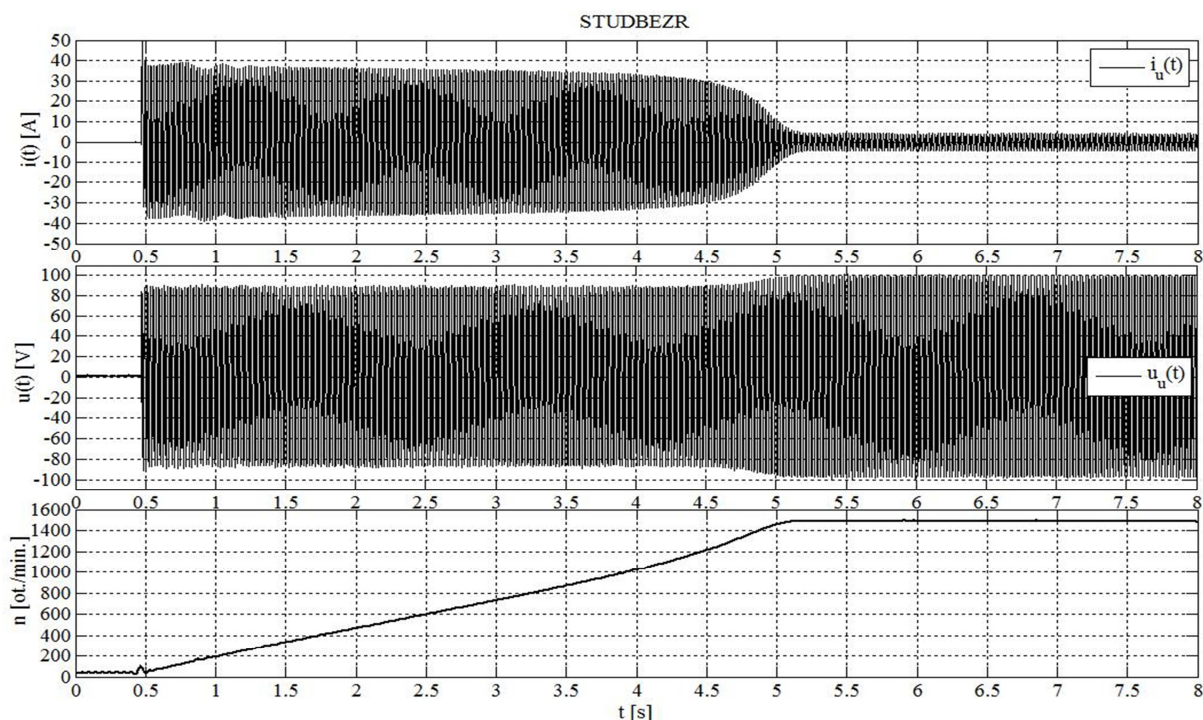
Tab. 5.3: Parametry doběhů

5.6 Analýza výkonů

Naměřené vektory jsou okamžité hodnoty napětí a proudů ve všech fázích a mechanické otáčky rotoru v závislosti na čase. Na Obr. 5.5 je uvedeno schéma zapojení pro analýzu výkonů v programu Simulink. Pro názornost jsou na Obr. 5.6 uvedeny naměřené hodnoty pro fázi U. Dále za pomoci rovnic 5.8 a 5.9 jsou na Obr. 5.7 uvedeny vypočtené efektivní hodnoty napětí a proudů. Za použití rovnic 2.5 až 2.7 dostaneme analyzované průběhy výkonů na Obr. 5.8. Průběhy výkonů pro zbylé parametry rozběhu jsou uvedeny v Příloze 2.



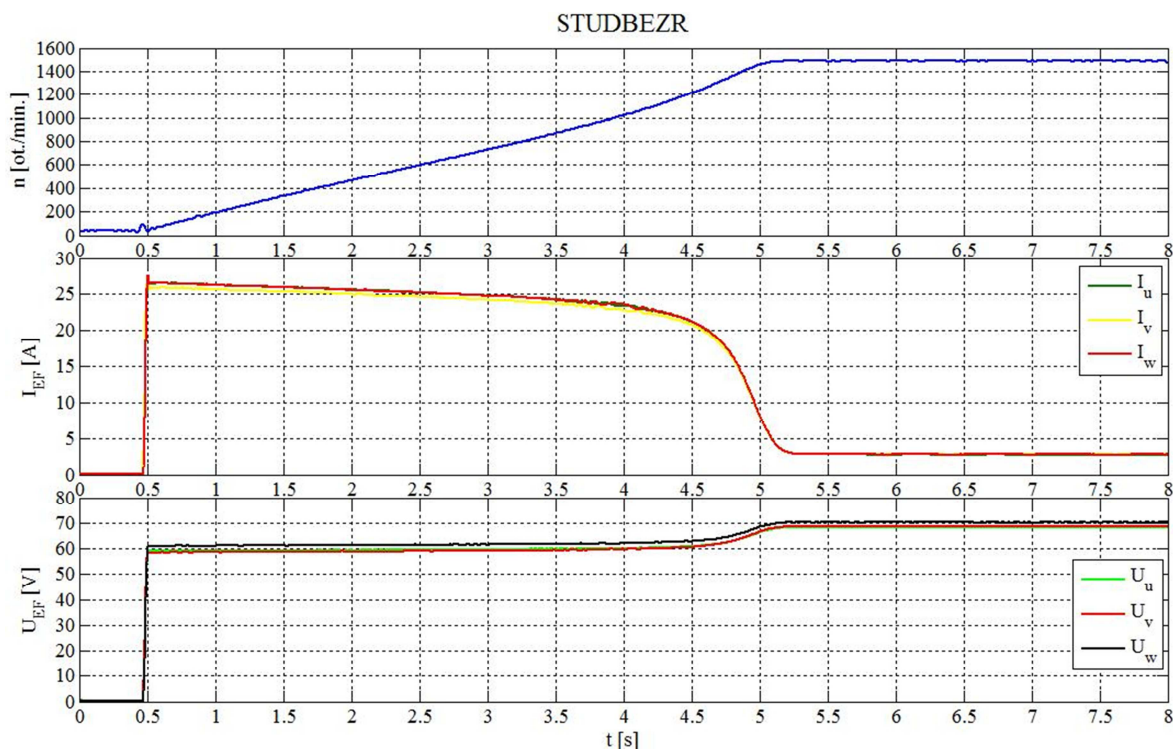
Obr. 5.5: Schéma zapojení pro analýzu výkonů fáze U



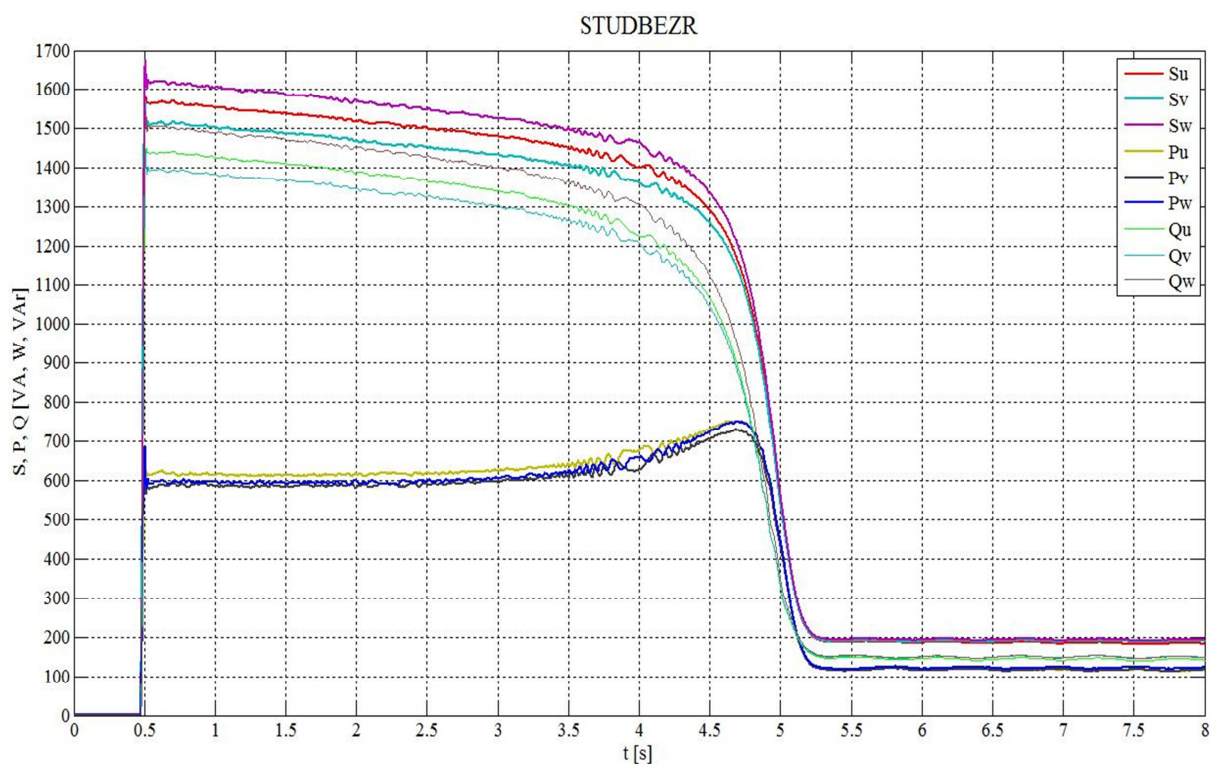
Obr. 5.6: Ukázka naměřených okamžitých hodnot pro fázi U

$$I_{EF} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt} \quad (5.8)$$

$$U_{EF} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2(t) dt} \quad (5.9)$$



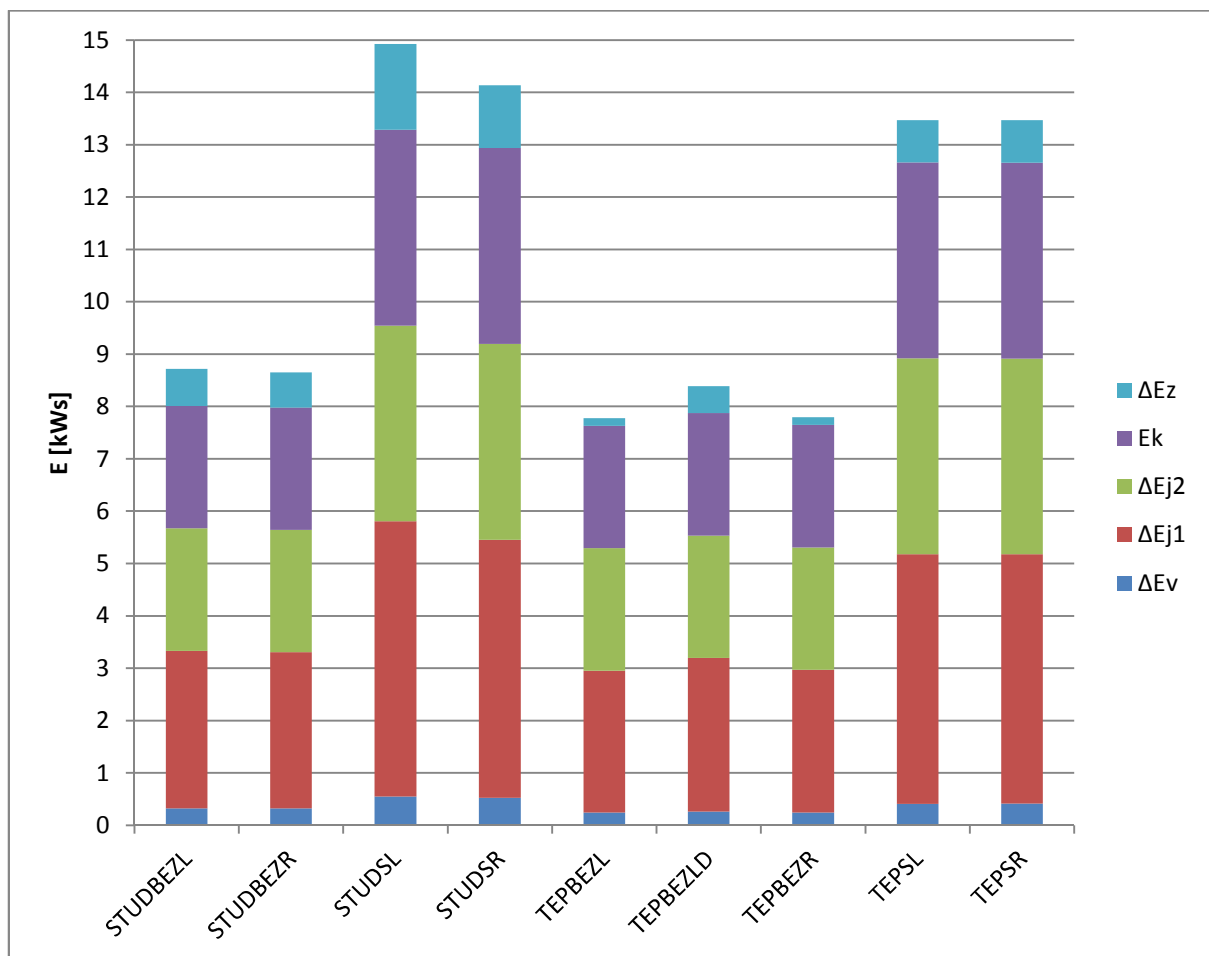
Obr. 5.7: Ukázka analyzovaných efektivních hodnot napětí a proudů



Obr. 5.8: Ukázka analyzovaných průběhu výkonů

5.7 Analýza energií

Vytvořený m-file pro výpočet energií vychází z rovnic 3.3 až 3.8 je uveden v Příloze 3. Detailní rozložení energií pro jednotlivé fáze je uvedeno v Příloze 1 ve formě sloupcových grafů. Porovnání celkových energií je uvedeno na Obr. 5.9.



Obr. 5.9: Porovnání celkových odebraných energií

6 Matematický model motoru

6.1 Modelování

Prvním krokem při počítačovém modelování bývá sestavení matematického modelu zkoumaného systému. Parametry pro model mohou být získány buď teoreticky ze základních fyzikálních vlastností systému, a nebo z empiricky naměřených dat.

Matematický model musí vhodně charakterizovat závislost výstupů systému na jeho vstupech. Obecné modely fyzikálních soustav jsou obvykle sestaveny ze soustavy parciálních či obyčejných diferenciálních rovnic. Tyto rovnice obvykle upravujeme do některé z kanonických forem. Poté soustavu rovnic řešíme vhodnou numerickou metodou a výsledky graficky interpretujeme.

Model ale málokdy dokáže popsat dění v přírodě dostatečně přesně. Výsledek jsme např. získali s použitím zjednodušujících předpokladů nebo byl použit nevhodný model. Při modelování je proto zásadní znát omezení použitého modelu a nevyvozovat z modelování nepatřičné závěry.

6.2 Parametry motoru pro simulaci

Na základě měření nakrátko a naprázdno, které bylo provedeno v práci [4], lze určit parametry náhradního schématu analyzovaného stroje. Teplotní závislost odporu statoru je u modelu na rozdíl od naměřených dat zanedbána.

$$\begin{aligned}
 R_1 &= 0,395 \, \Omega \\
 R_2' &= 0,467 \, \Omega \\
 X_{1\sigma} &= 1,074 \, \Omega \\
 X_{2\sigma}' &= 1,203 \, \Omega \\
 X_h &= 25,41 \, \Omega \\
 J_{BEZ} &= 0,23 \, \text{kg} \cdot \text{m}^2 \\
 J_S &= 0,35 \, \text{kg} \cdot \text{m}^2 \\
 n &= 1493 \, \text{ot./min.} \\
 2p &= 4
 \end{aligned}$$

Kde pro modelované reaktance a úhlovou rychlost platí:

$$X_1 = X_{1\sigma} + X_h = 1,074 + 25,41 = 26,484 \, \Omega \quad (6.1)$$

$$X_2' = X_{2\sigma}' + X_h = 1,203 + 25,41 = 26,613 \, \Omega \quad (6.2)$$

$$\omega_{EL} = \omega \cdot p \quad (6.3)$$

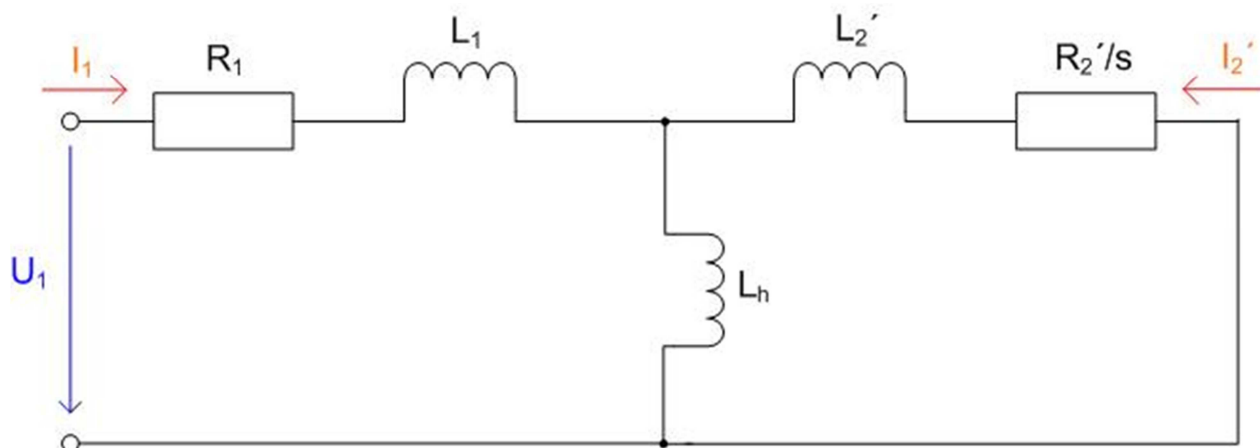
Z reaktancí se určí modelované indukčnosti:

$$L_1 = \frac{X_1}{2 \cdot \pi \cdot f} = \frac{26,484}{100 \cdot \pi} = 84,3 \, \text{mH} \quad (6.4)$$

$$L_2' = \frac{X_2'}{2 \cdot \pi \cdot f} = \frac{26,613}{100 \cdot \pi} = 84,7 \, \text{mH} \quad (6.5)$$

$$L_h = \frac{X_h}{2 \cdot \pi \cdot f} = \frac{25,41}{100 \cdot \pi} = 80,9 \, \text{mH} \quad (6.6)$$

6.3 Modelované náhradní schéma a oblast platnosti modelu



Obr. 6.1: Modelované náhradní schéma

Oblast platnosti modelu je omezená takto:

- 3f statorové napětí je harmonické a souměrné
- odpory a indukčnosti všech fází jsou shodné
- magnetizační charakteristika je lineární
- vinutí je rovnoměrně rozloženo po obvodu statoru
- rotor s kotvou nakrátko
- zanedbané mechanické a magnetické ztráty
- magnetický tok prochází vzduchovou mezerou pouze v radiálním směru

6.4 Rovnice popisující asynchronní motor s kotvou nakrátko

$$u_{1\alpha} = R_1 \cdot i_{1\alpha} + L_1 \cdot \frac{di_{1\alpha}}{dt} + L_h \cdot \frac{di_{2\alpha}}{dt} \quad (6.7)$$

$$u_{1\beta} = R_1 \cdot i_{1\beta} + L_1 \cdot \frac{di_{1\beta}}{dt} + L_h \cdot \frac{di_{2\beta}}{dt} \quad (6.8)$$

$$0 = R_2 \cdot i_{2\alpha} + L_2 \cdot \frac{di_{2\alpha}}{dt} + L_h \cdot \frac{di_{1\alpha}}{dt} + \omega_{EL}(L_h \cdot i_{1\beta} + L_2 \cdot i_{2\beta}) \quad (6.9)$$

$$0 = R_2 \cdot i_{2\beta} + L_2 \cdot \frac{di_{2\beta}}{dt} + L_h \cdot \frac{di_{1\beta}}{dt} - \omega_{EL}(L_h \cdot i_{1\alpha} + L_2 \cdot i_{2\alpha}) \quad (6.10)$$

$$M = \frac{3}{2} \cdot p \cdot L_h (i_{1\beta} \cdot i_{2\alpha} - i_{1\alpha} \cdot i_{2\beta}) \quad (6.11)$$

$$M = \frac{J}{p} \cdot \frac{d\omega_{EL}}{dt} \quad (6.12)$$

Po úpravě rovnic 6.7 až 6.10 a 6.12 na stavový tvar dostaneme:

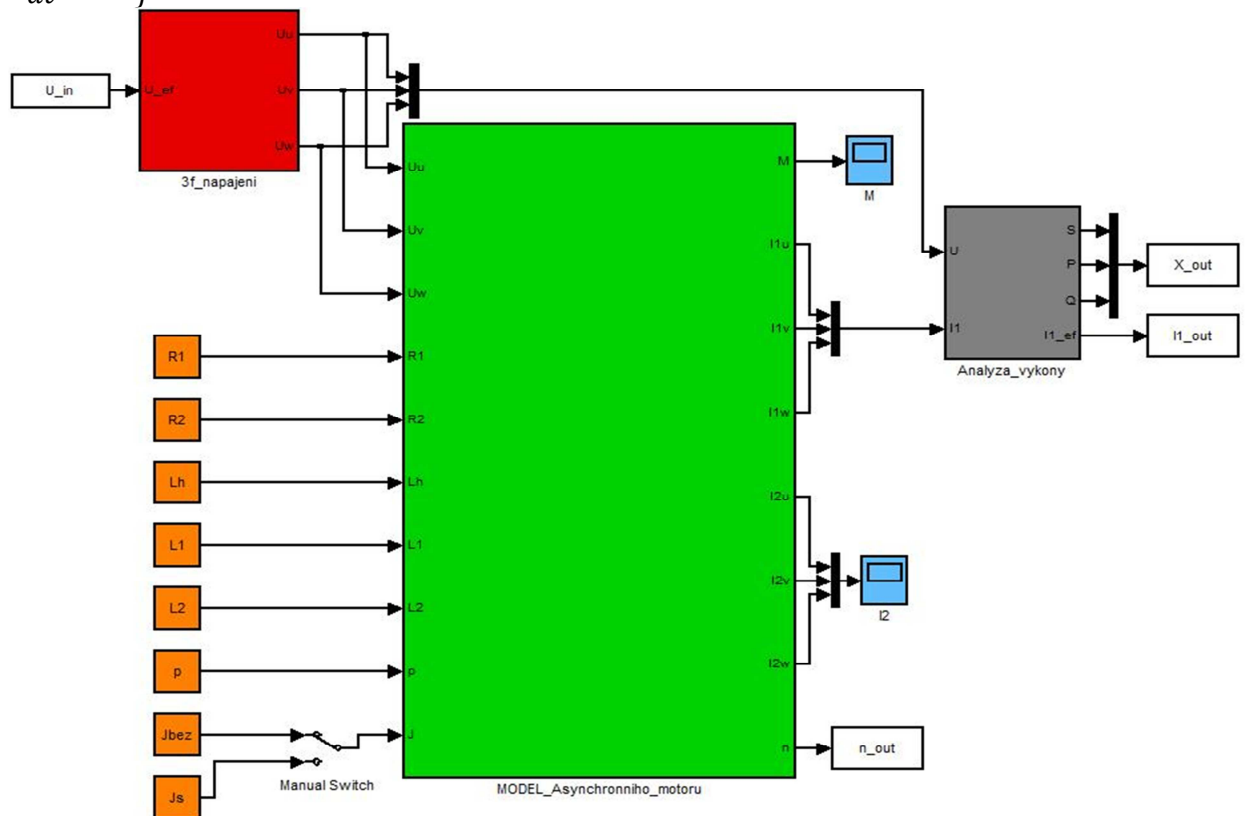
$$\frac{di_{1\alpha}}{dt} = \frac{1}{L_1} \cdot \left(u_{1\alpha} - R_1 \cdot i_{1\alpha} - L_h \cdot \frac{di_{2\alpha}}{dt} \right) \quad (6.13)$$

$$\frac{di_{1\beta}}{dt} = \frac{1}{L_1} \cdot \left(u_{1\beta} - R_1 \cdot i_{1\beta} - L_h \cdot \frac{di_{2\beta}}{dt} \right) \quad (6.14)$$

$$\frac{di_{2\alpha}}{dt} = -\frac{1}{L_2} \cdot \left(R_2 \cdot i_{2\alpha} + L_h \cdot \frac{di_{1\alpha}}{dt} + \omega_{EL} \cdot L_2 \cdot i_{2\beta} + \omega_{EL} \cdot L_h \cdot i_{1\beta} \right) \quad (6.15)$$

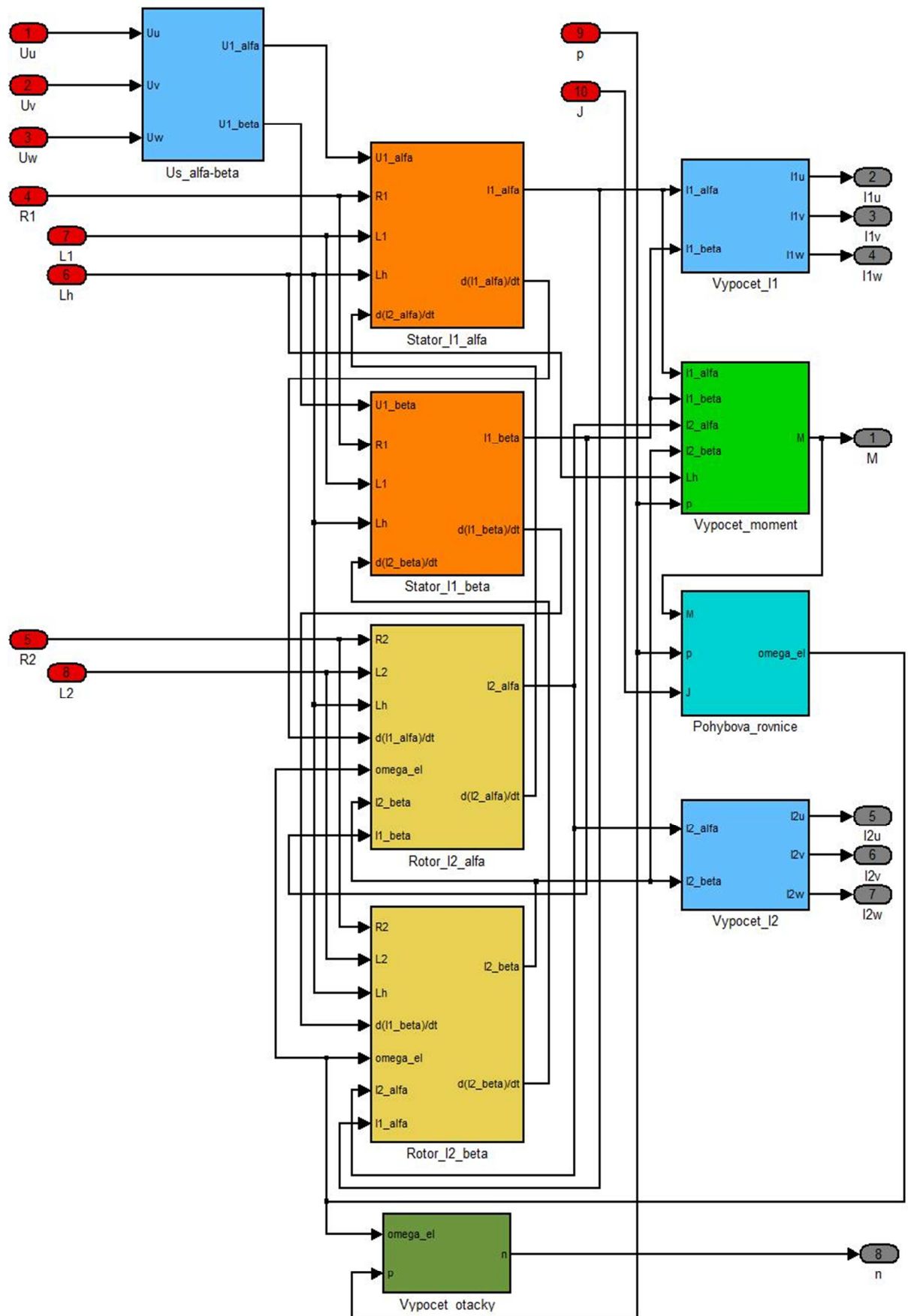
$$\frac{di_{2\beta}}{dt} = -\frac{1}{L_2} \cdot \left(R_2 \cdot i_{2\beta} + L_h \cdot \frac{di_{1\beta}}{dt} - \omega_{EL} \cdot L_2 \cdot i_{2\alpha} - \omega_{EL} \cdot L_h \cdot i_{1\alpha} \right) \quad (6.16)$$

$$\frac{d\omega_{EL}}{dt} = \frac{p \cdot M}{J} \quad (6.17)$$

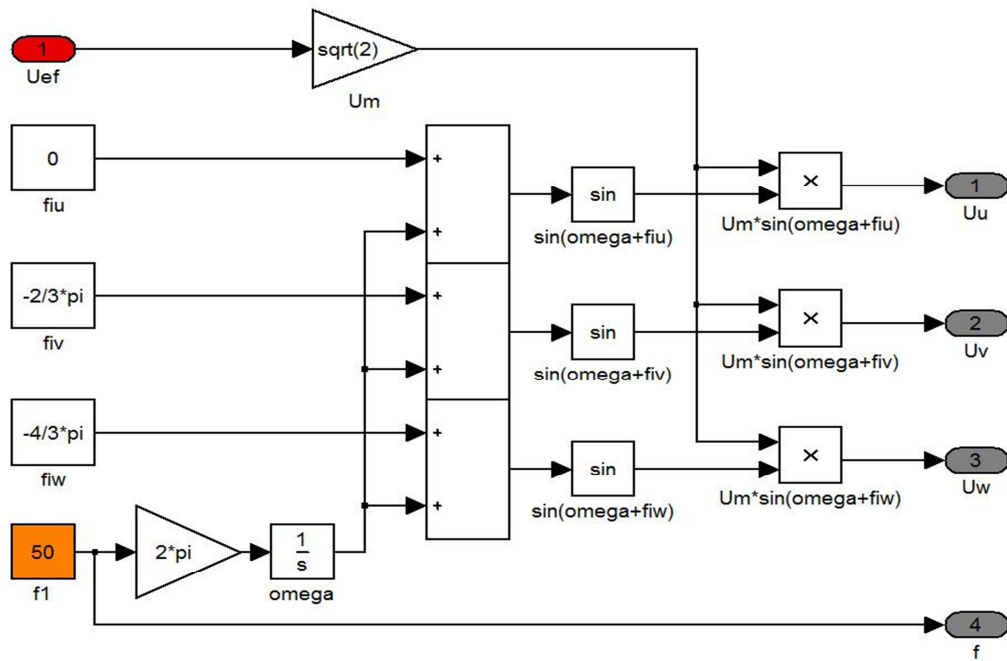


Obr. 6.2: Hlavní blok modelu

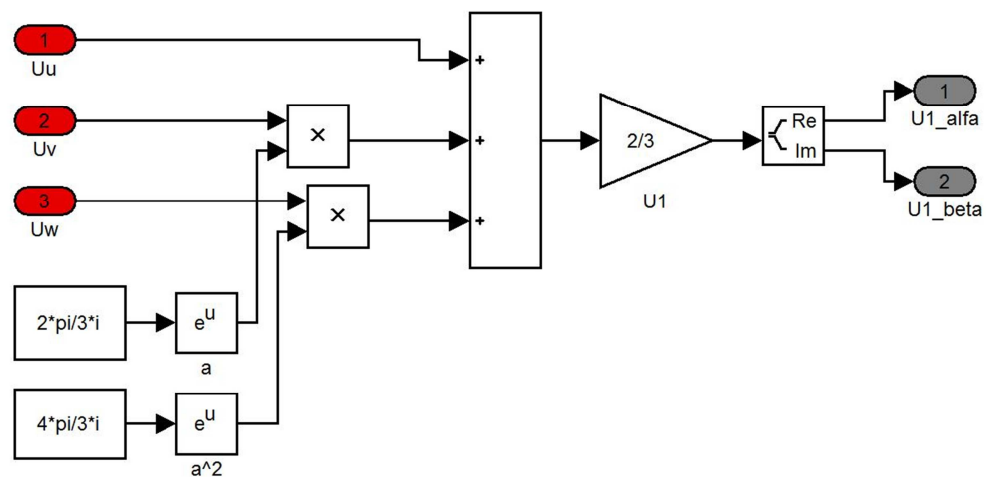
6.5 Bloky modelu



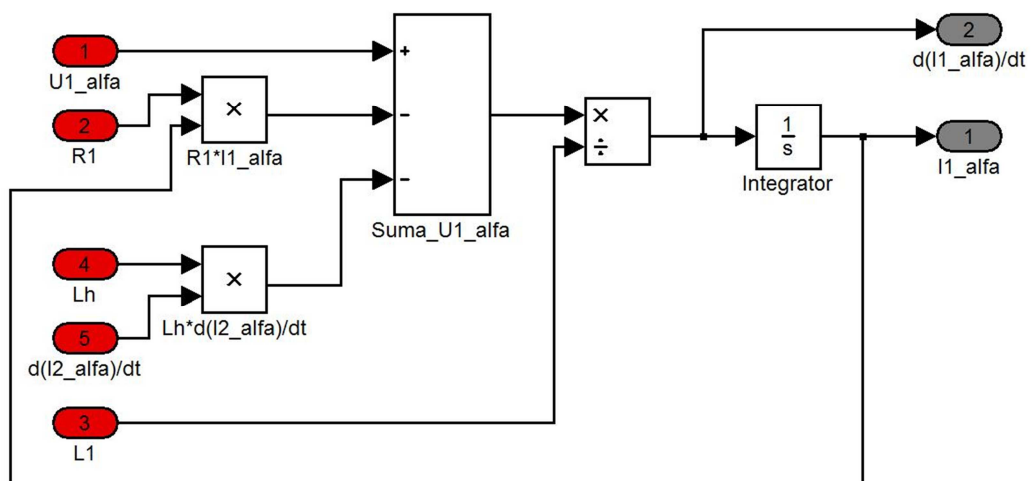
Obr. 6.3: Subsystém model asynchronního motoru

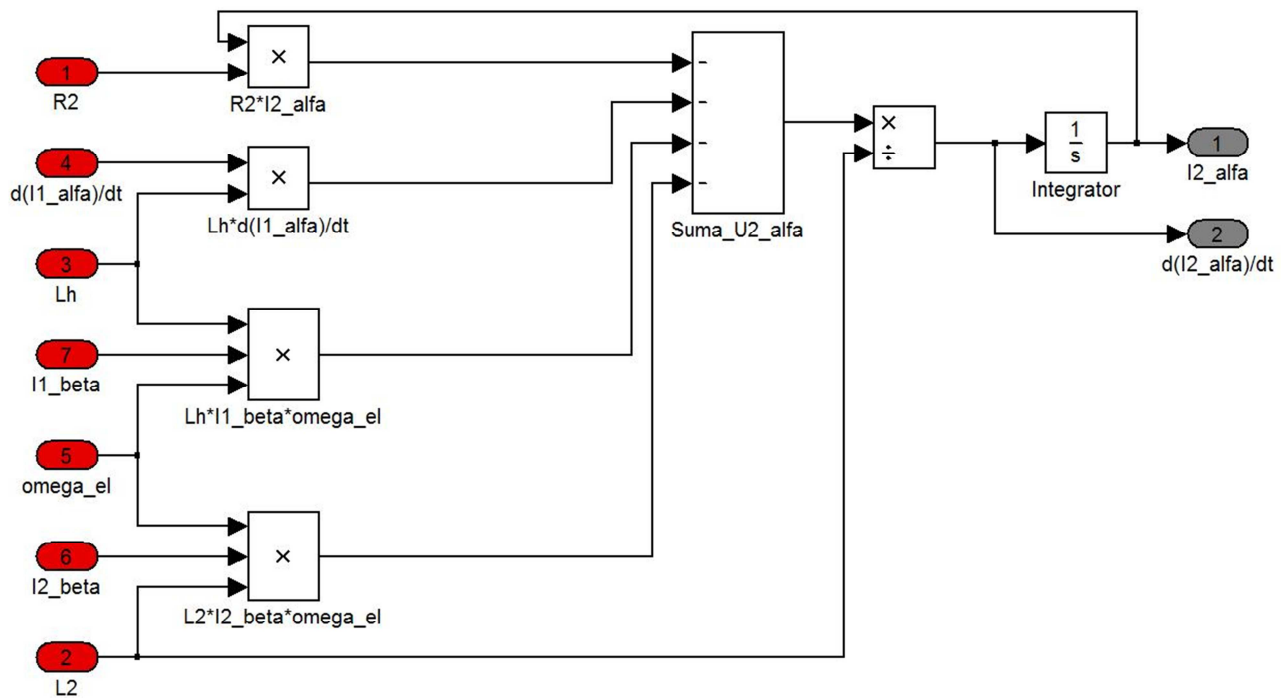
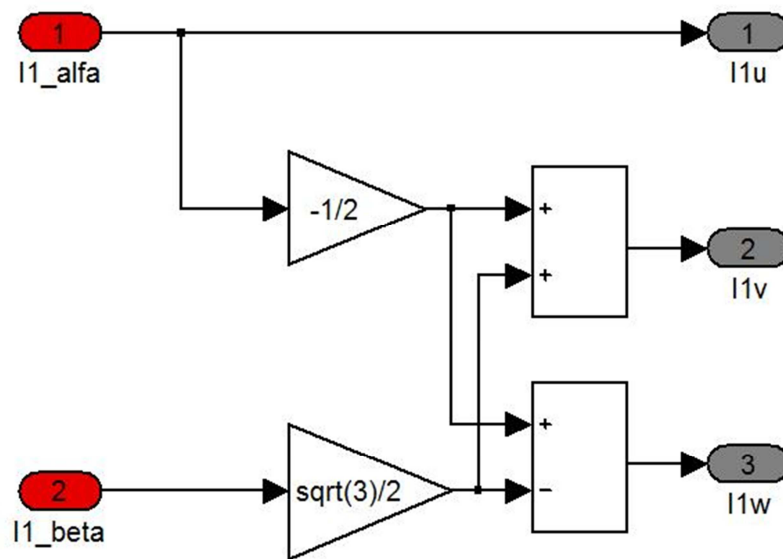


Obr. 6.4: Napájení motoru

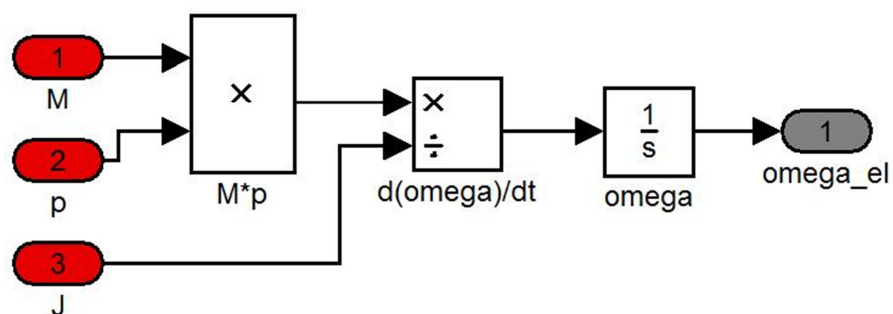


Obr. 6.5: Transformace do souřadného systému alfa-beta

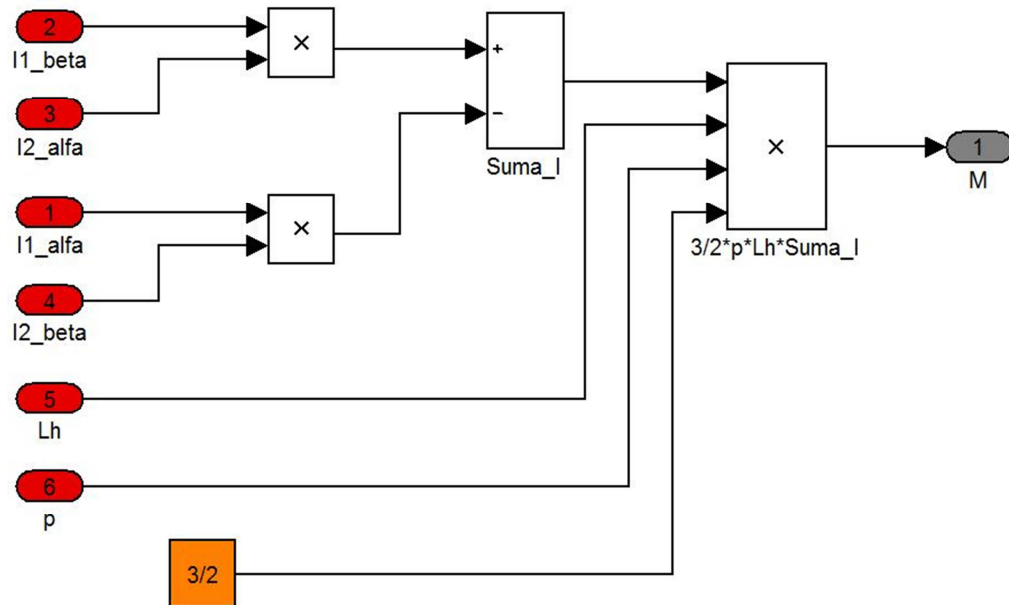
Obr. 6.6: Statorová rovnice pro I_1 alfa

Obr. 6.7: Rotorová rovnice pro I_2 alfa

Obr. 6.8: Zpětná transformace statorových proudů



Obr. 6.9: Pohybová rovnice bez zátěže



Obr. 6.10: Momentová rovnice

6.6 Vstupní data pro model

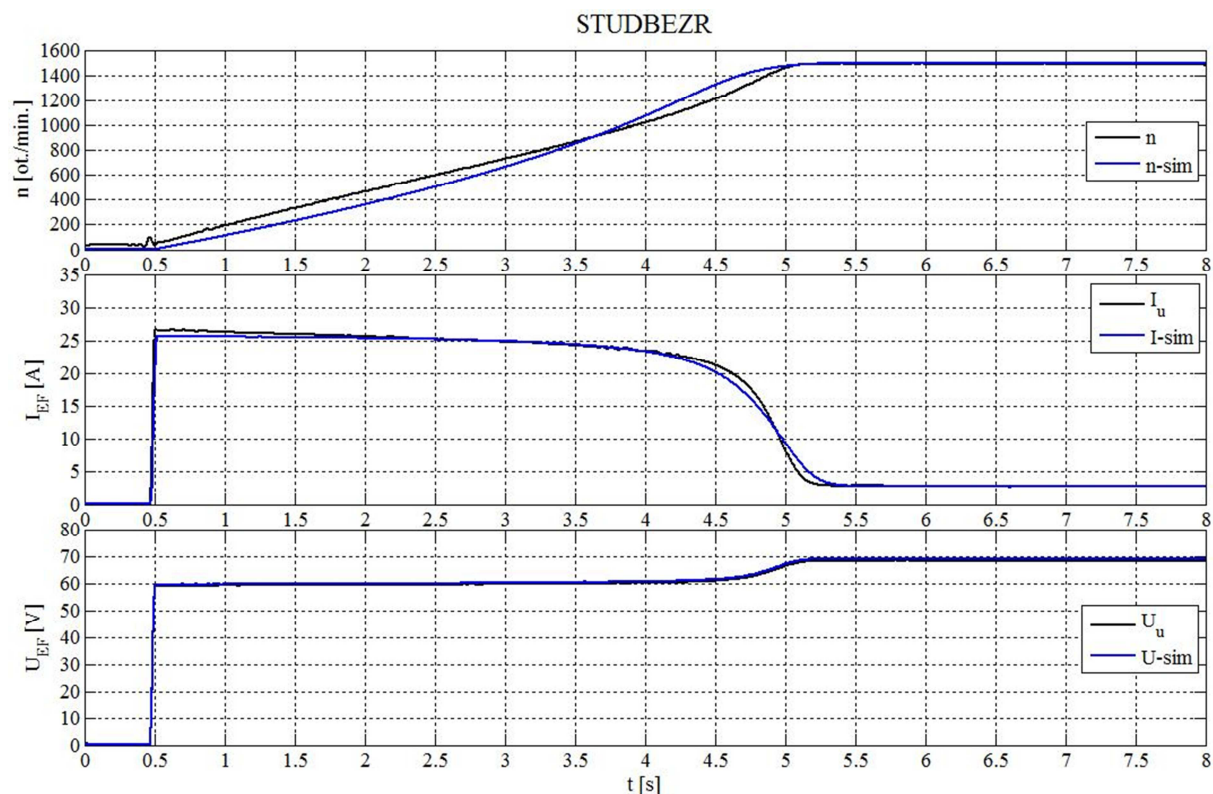
U simulace byl uvažován rozběh motoru se sníženým napětím. Za předpokladu, že odpory jsou ve všech fázích stejné, bylo vstupní napětí pro model vypočteno z rovnice 6.18 jako průměrná hodnota efektivních napětí všech fází. Tento vektor napětí je tak pro každou kombinaci parametrů jiný. Rotorové parametry z práce [4] jsou měřeny při zabržděném rotoru. Je tak maximálně vyvinut efekt dvojitě klece. Z toho vyplývá, že odpor rotoru bude ve skutečnosti menší, zatímco rozptylová reaktance bude vyšší než takto určená.

$$U_{in} = \frac{U_{EFU} + U_{EFV} + U_{EFW}}{3} \quad (6.18)$$

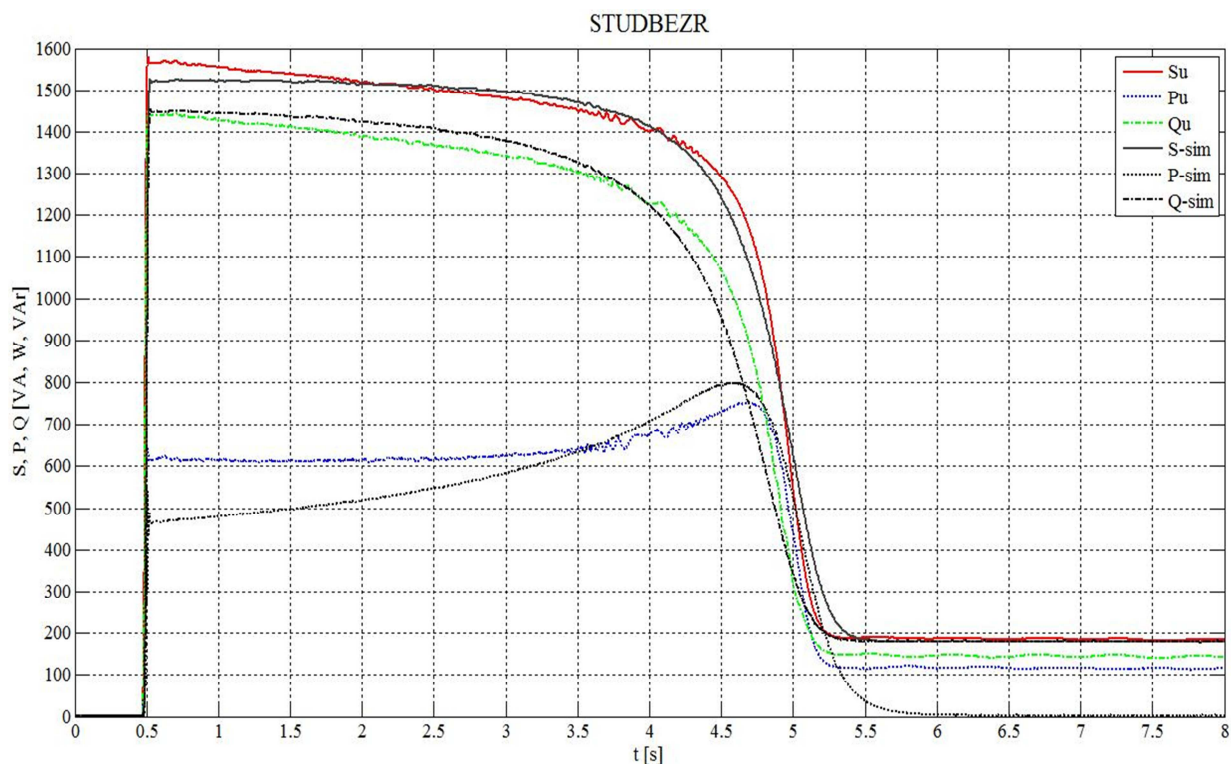
6.7 Porovnání naměřených dat a simulace

U simulace motoru byly uvažovány zjednodušující předpoklady, které omezují přesnost modelu na rozdíl od naměřených dat. Mezi tyto zjednodušující předpoklady patří stejné parametry odporů a indukčností ve všech fázích, zanedbané jsou ztráty v magnetickém obvodu a mechanické ztráty a dále se předpokládá linearizovaná magnetizační charakteristika. Z porovnání naměřených a simulovaných průběhů bez setrvačnicku z Obr. 6.11 a 6.12 plyne, že se simulace podobá naměřeným datům, ale existují tu jisté odchylky od skutečnosti právě díky zjednodušujícím předpokladům. V případě mechanických otáček si lze povšimnout, že rozběh simulovaného motoru je v první části rozběhu pomalejší než změřený. Před koncem rozběhu narůstá jeho strmost tak, že výsledný čas simulovaného rozběhu je rychlejší než naměřený. Z porovnání rozběhových proudů u simulace vychází menší maximum rozběhového proudu a jeho pomalejší pokles u konce rozběhu. Z Obr. 6.12 plynoucí závislosti výkonů se u simulace liší průběhy výrazněji od naměřených dat a to hlavně z pohledu amplitudy signálu. Při pohledu na činný výkon je vidět, že velikost maxima nastává přibližně v podobném okamžiku, jinak se oba průběhy hlavně v počátku a po ukončení rozběhu amplitudově odlišují. Plocha pod křivkou simulovaného činného výkonu určená odhadem vyšla o něco málo menší než změřená. U rozběhu motoru se setrvačnickem vycházejí simulované průběhy uvedené na Obr. 6.13 a 6.14 s podobnými vlastnostmi jako u rozběhu bez setrvačnicku s tím, že rozběh trvá delší a přivedená energie je větší.

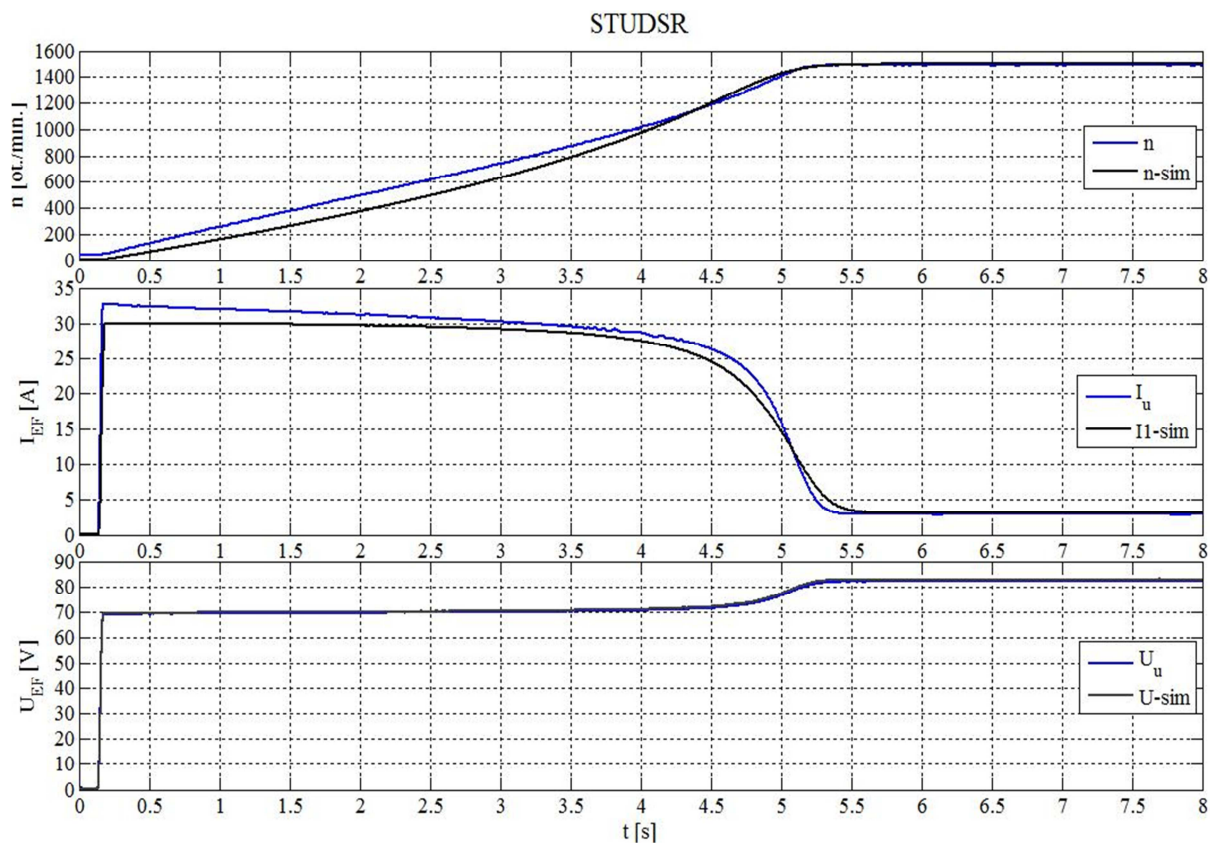
6.8 Výsledky simulace



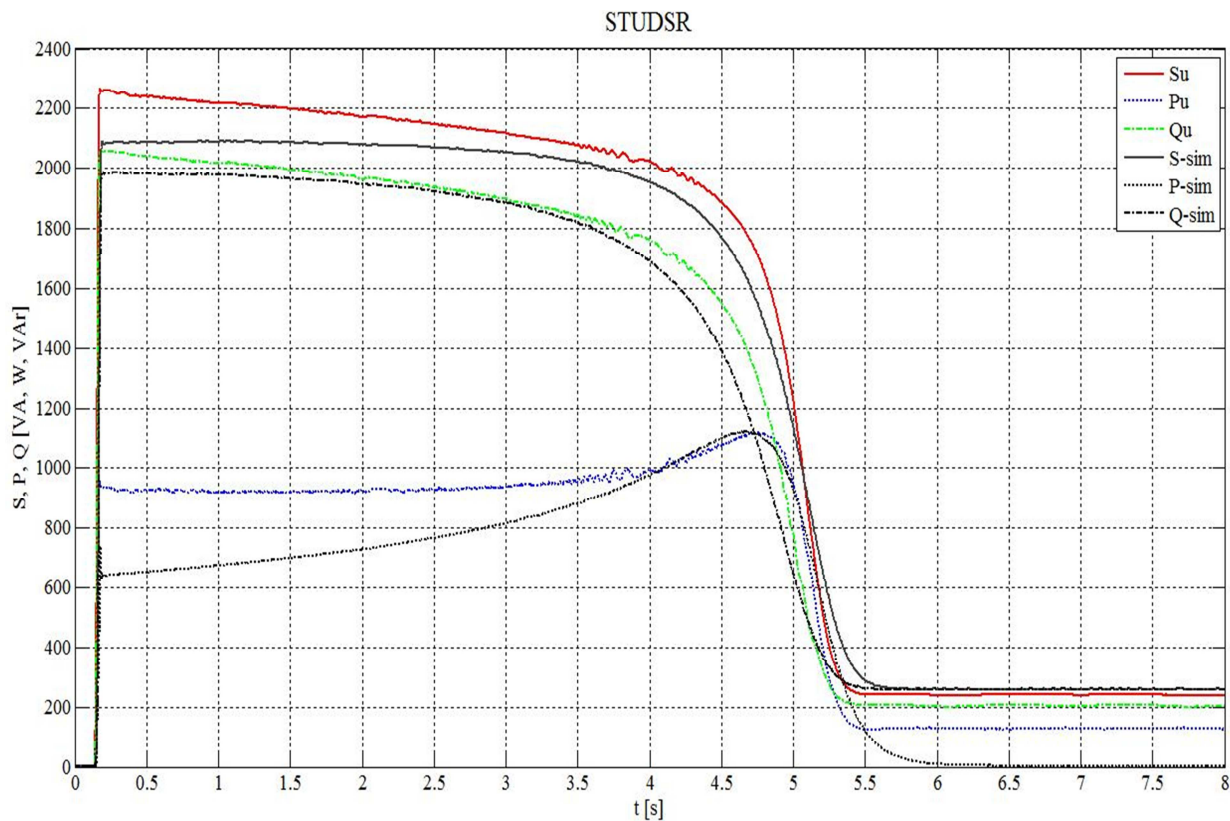
Obr. 6.11: Porovnání naměřených dat ve fázi U a simulace bez setrvačnicku



Obr. 6.12: Porovnání výkonů z naměřených hodnot a simulace bez setrvačnicku



Obr. 6.13: Porovnání naměřených dat ve fázi U a simulace se setrvačником



Obr. 6.14: Porovnání výkonů z naměřených hodnot a simulace se setrvačником

7 Zhodnocení dosažených výsledků

Celková odebraná energie ze sítě E_p při rozběhu motoru se setrvačnickem se pohybuje v rozmezí od 13,46 kW s pro teplý motor, do 14,92 kW s pro studený, zatímco při rozběhu motoru bez setrvačnicku je odebraná energie v rozmezí od 7,77 kW s pro teplý motor, do 8,71 kW s pro studený. Z toho vyplývá, že rozběh teplého motoru je méně energeticky náročný než u studeného motoru. Díky velkému rozběhovému proudu byla uvažována ztracená energie na kabelu mezi měřicím přístrojem a svorkami motoru. Velikost této energie se pohybuje v rozmezí 3 až 3,8 % E_p . Podle teoretických předpokladů lze předpokládat, že dominantní bude energie ztracená ve vinutí statoru, jejíž velikost je od 34,5 % E_p u studeného motoru bez setrvačnicku, do 35,4 % E_p u teplého motoru se setrvačnickem. Zbytek přivedené energie do motoru od 61,1 % do 61,9 % E_p přejde do rotoru přes vzduchovou mezeru. Tato energie se dále rozděluje na energii ztracenou v kleci nakrátko, výstupní mechanickou energii a zbytkovou ztracenou energii. Během rozběhu bez zátěže je teplo vzniklé v kleci nakrátko rovno právě kinetické energii rotoru. Užitečná mechanická energie odpovídá kinetické energii roztáčených hmot a je rovna energii ztracené v kleci nakrátko. Zbytková energie skládající se ze ztracené mechanické energie třením v ložiskách a v magnetickém obvodu, je pro studený motor větší než pro teplý, což pravděpodobně způsobuje zvýšené pnutí ve spojkách plynoucí z časů doběhů a její velikost se pohybuje v rozmezí 1,9 až 9 % E_p . Další parametr co má vliv na velikost ztracené zbytkové energie je moment setrvačnosti. Lze předpokládat, že dominantní část zbytkové energie bude ztracená v ložiskách, zatímco ztracená magnetická energie bude téměř zanedbatelná díky sníženému napájecímu napětí. Oba motory jsou osazeny radiálními ventilátory, kde odlišnosti ve spotřebovaných energiích pro pravý a levý chod se liší maximálně o 4%. Vliv efektivní hodnoty napětí na dobu rozběhu a spotřebovanou energii je uvažován u teplého motoru bez setrvačnicku. Při napětí 87 V byla doba rozběhu 2,46 s a spotřebovaná energie byla 7,78 kW s, zatímco pro napětí 65 V byla doba rozběhu 5,09 s a spotřebovaná energie byla 8,39 kW s. Z toho vyplývá, že je výhodné pro hospodárny provoz rozbíhat motor s co největším efektivním napětím. Klesne tak doba rozběhu i celková spotřebovaná energie pro rozběh motoru.

Závěr

Cílem této práce bylo určit velikost spotřebované energie během rozběhu a její rozložení uvnitř motoru pro každou fázi zvlášť. Rozběh byl prováděn se sníženým napětím pro prodloužení přechodových jevů. Hlavně byl zkoumán vliv teploty statoru, momentu setrvačnosti a směr rozběhu na čas rozběhu a odebranou energii ze sítě. Okamžité hodnoty napětí, proudů a mechanických otáček byly naměřeny pomocí programu Scopewin. Dále se určovaly pomocí programu Matlab efektivní hodnoty těchto napětí a proudů ve všech fázích. Z těchto hodnot se dále pomocí vztahů pro výkony vyhodnocovalo jejich rozložení v jednotlivých fázích. Z časové závislosti činného výkonu se pomocí integrace určovala přivedená energie. Dále se integrací kvadrátu efektivního proudu přenásobenou příslušným činným odporem zjišťovaly Jouleovy ztráty na vedení a vinutí statoru. Energie přivedená do rotoru se bez zátěže v ideálním případě rozděluje na dvě stejné poloviny rovné kinetické energii roztáčených hmot a to na energii ztracenou ve vinutí rotoru a užitečnou mechanickou energii. Zbytek tvoří zbytková energie, která byla způsobena ztracenou mechanickou energií v ložiskách a energií ztracenou v magnetickém obvodu. Na tuto energii mají vliv parametry jako moment setrvačnosti soustrojí a teplota vinutí statoru resp. motoru. U teplého motoru vychází ztracená zbytková energie zhruba poloviční a to z důvodu pnutí ve spojkách pro studený motor plynoucí z časů dobehů. Odlišnosti v přivedených energiích pro rozběhy pro pravý a levý chod se liší maximálně o 4 %, což je přijatelná odchylka vzhledem k tomu, že oba motory mají radiální ventilátory. Z vlivu efektivní hodnoty napětí na čas rozběhu a odebranou energii vyplývá, že je výhodné motor rozbíhat s co největším napětím, klesne tak doba rozběhu i celková odebraná energie.

Dalším úkolem této práce bylo vytvoření matematického modelu motoru v programu Simulink a následná verifikace naměřených dat na motoru se stejným napájecím napětím jako naměřená data. Model vychází ze znalosti stavových rovnic asynchronního motoru s kotvou nakrátko. Z porovnání těchto charakteristik je patrná přibližná podobnost matematického modelu s naměřenými daty. Podle předpokladů nemohou být naměřené hodnoty stejné jako modelované z důvodu výše uvedených zjednodušujících předpokladů matematického modelu. Model může být používán s výhodou pro predikci chování motoru v nestandardních provozních stavech, kde hrozí poškození měřeného stroje či měřicího zařízení.

Použitá literatura

- [1] Bartoš, V., Skala, B.: *Měření na elektrických strojích*. Skripta ZČU, Plzeň 2002
- [2] Trinkewitz, Z.: *Průmyslové zkoušky velkých elektrických strojů*. SNTL Praha 1
- [3] Vachtlová, M.: *Simulace a měření na asynchronním stroji v přechodovém stavu*. FEL ZČU, Plzeň, 2010, Diplomová práce
- [4] Hruška, K.: *Speciální klece asynchronních motorů*. FEL ZČU, Plzeň, 2011, Dizertační práce
- [5] <http://www.isibrno.cz/~jurak/scopewin.html>, 1.2.2012
- [6] <http://www.elektromotory-siemens.cz/upload/File/katalog-elektromotoru-11a7-0605-k02-cz.pdf>, 10.2.2012
- [7] <http://www.wikipedia.com>, 28.1.2012

Seznam obrázků

- Obr. 0.1: Motor Siemens 1LA7 163-4AA10
- Obr. 1.1: Motor Siemens rozložený na jednotlivé komponenty
- Obr. 1.2: Náhradní schéma asynchronního motoru
- Obr. 2.1: Průběh okamžitého výkonu pro jmenovitý $\cos \varphi$
- Obr. 2.2: Výkonový trojúhelník pro jmenovitý $\cos \varphi$
- Obr. 3.1: Energetická bilance asynchronního motoru
- Obr. 5.1: Schéma zapojení měřeného soustrojí
- Obr. 5.2: Štítek motoru Siemens (ASM Y, 11kW)
- Obr. 5.3: Štítek motoru Mohelnice (ASM D, 12kW)
- Obr. 5.4: Měření odporu statoru Ohmovo metodou
- Obr. 5.5: Schéma zapojení pro analýzu výkonu fáze U
- Obr. 5.6: Ukázka naměřených okamžitých hodnot pro fázi U
- Obr. 5.7: Ukázka analyzovaných efektivních hodnot napětí a proudů
- Obr. 5.8: Ukázka analyzovaných průběhu výkonů
- Obr. 5.9: Porovnání celkových odebraných energií
- Obr. 6.1: Modelované náhradní schéma
- Obr. 6.2: Hlavní blok modelu
- Obr. 6.3: Subsystém model asynchronního motoru
- Obr. 6.4: Napájení motoru
- Obr. 6.5: Transformace do souřadného systému alfa-beta
- Obr. 6.6: Statorová rovnice pro I_1 alfa
- Obr. 6.7: Rotorová rovnice pro I_2 alfa
- Obr. 6.8: Zpětná transformace statorových proudů
- Obr. 6.9: Pohybová rovnice bez zátěže
- Obr. 6.10: Momentová rovnice
- Obr. 6.11: Porovnání naměřených dat ve fázi U a simulace bez setrvačnicku
- Obr. 6.12: Porovnání výkonů z naměřených hodnot a simulace bez setrvačnicku
- Obr. 6.13: Porovnání naměřených dat ve fázi U a simulace se setrvačnickem
- Obr. 6.14: Porovnání výkonů z naměřených hodnot a simulace se setrvačnickem

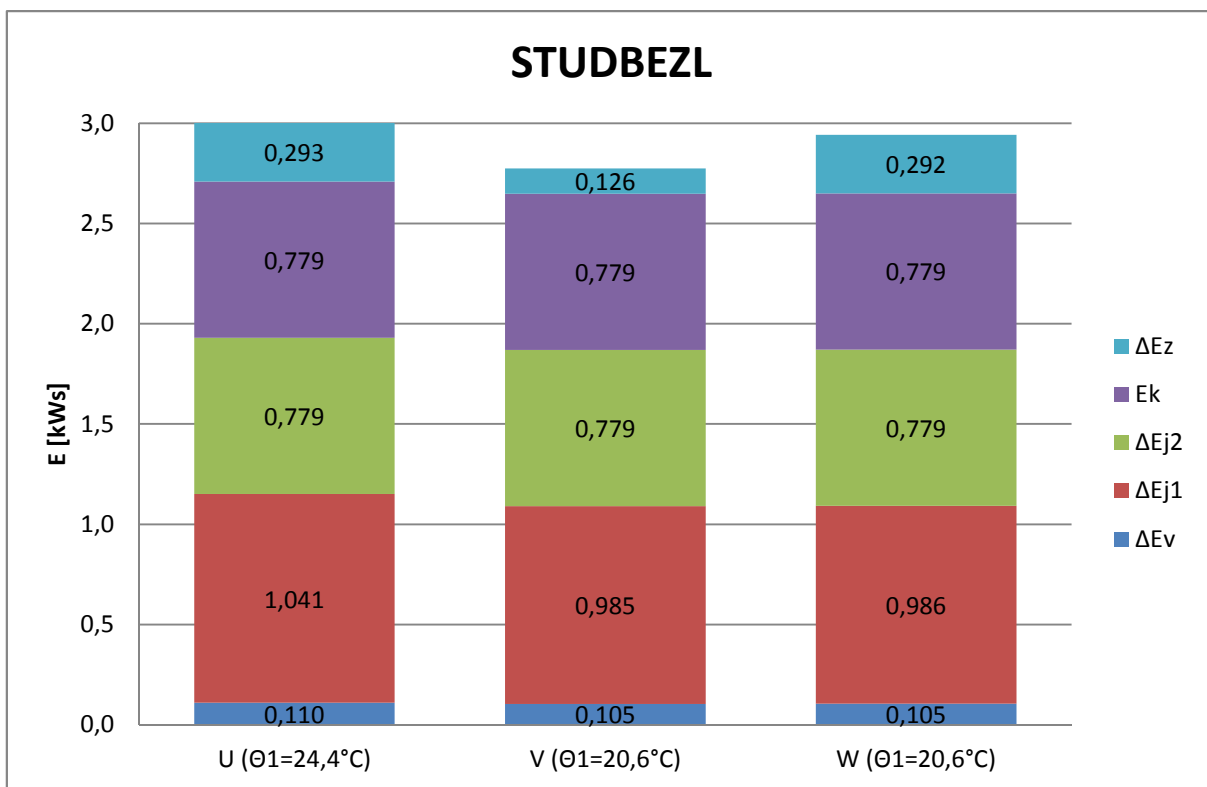
Seznam tabulek

- Tab. 5.1: Naměřené hodnoty odporů, určení fázových odporů a teploty vinutí statoru
- Tab. 5.2: Parametry rozběhů
- Tab. 5.3: Parametry doběhů

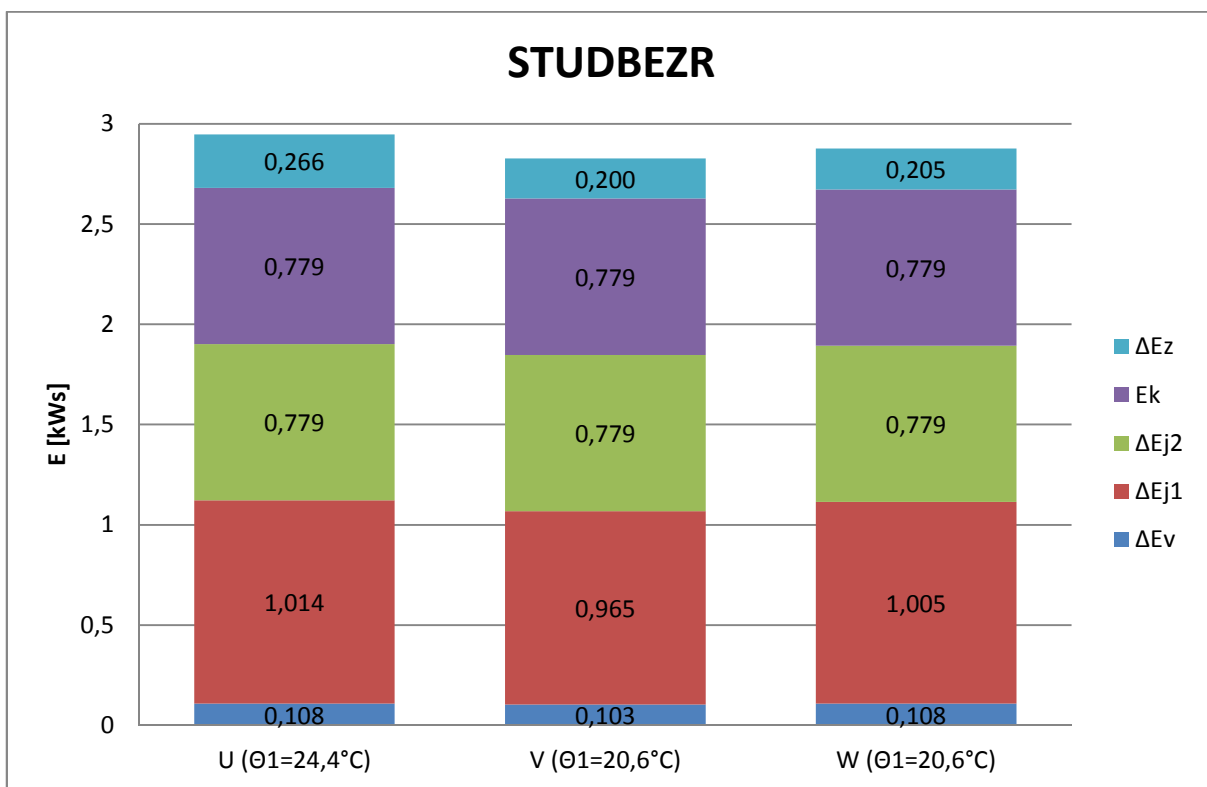
Seznam příloh

- Příloha 1 : Rozložení energií pro jednotlivé rozběhy
- Příloha 2 : Naměřené průběhy výkonů pro jednotlivé experimenty
- Příloha 3 : m-file pro výpočet energií

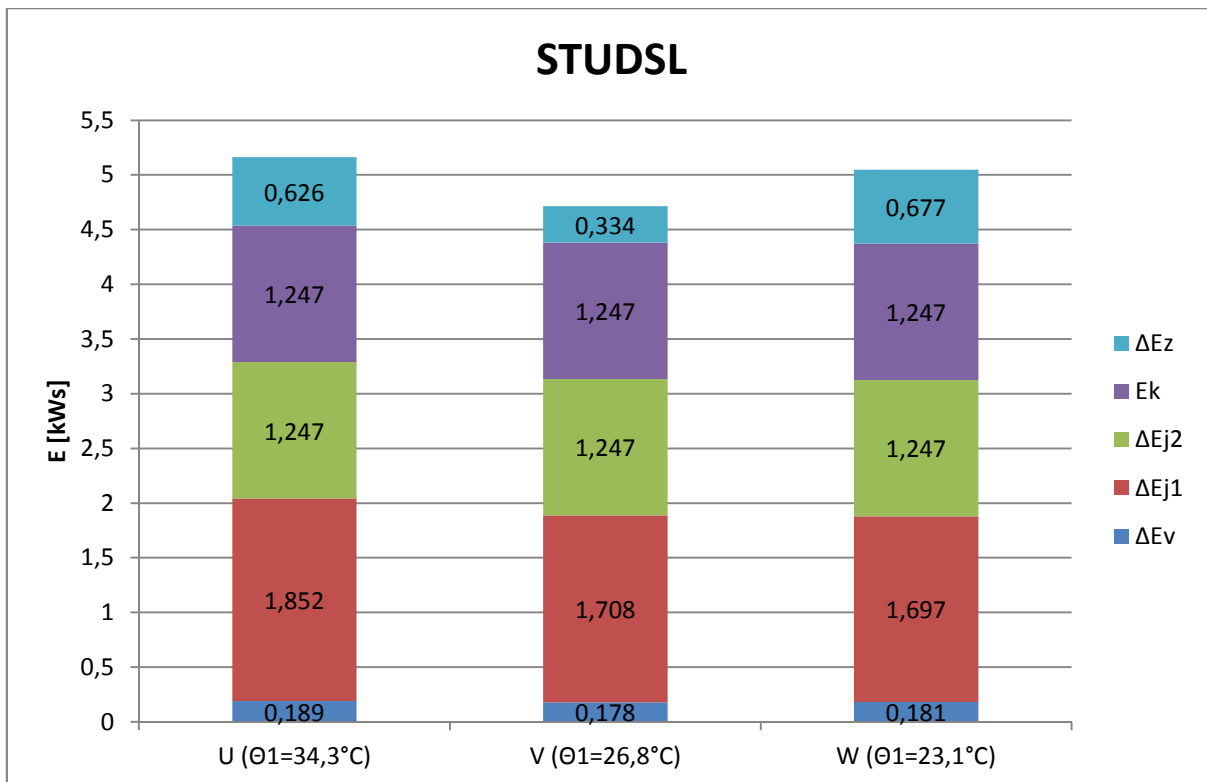
Příloha 1



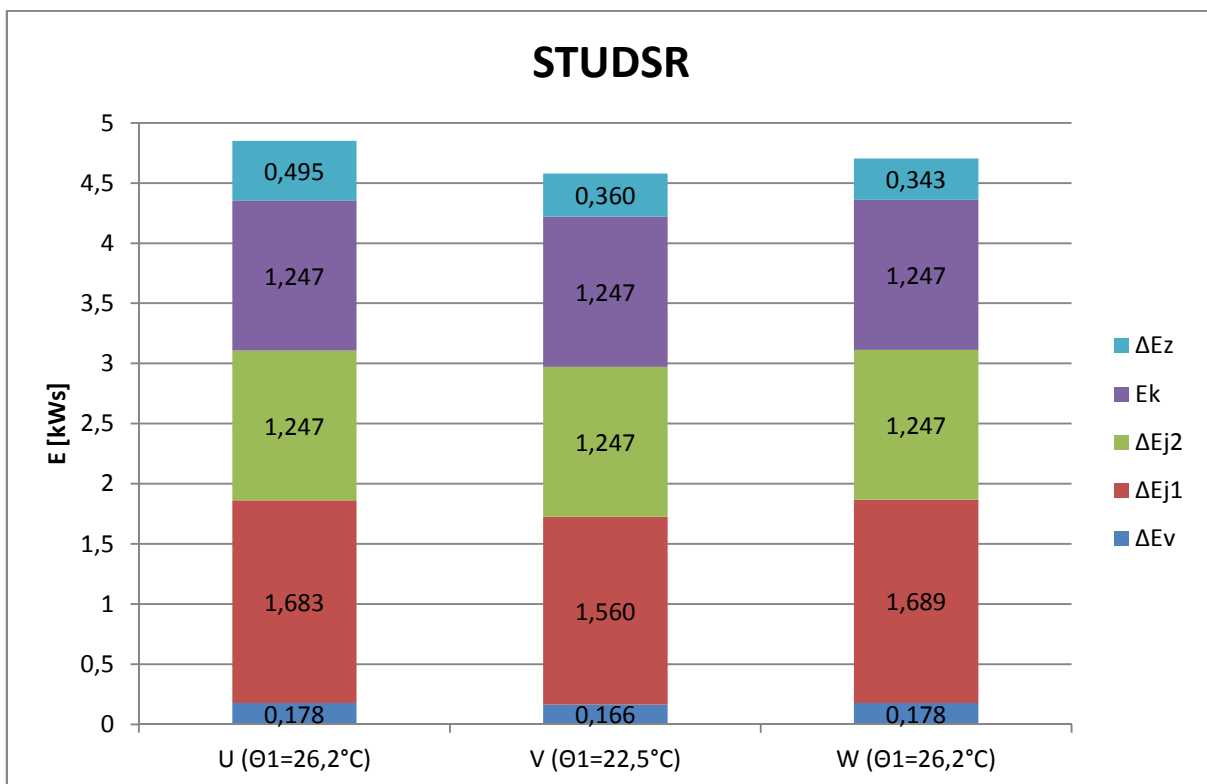
Obr. P1: Energie pro studený motor, bez setrvačnicku, levý chod



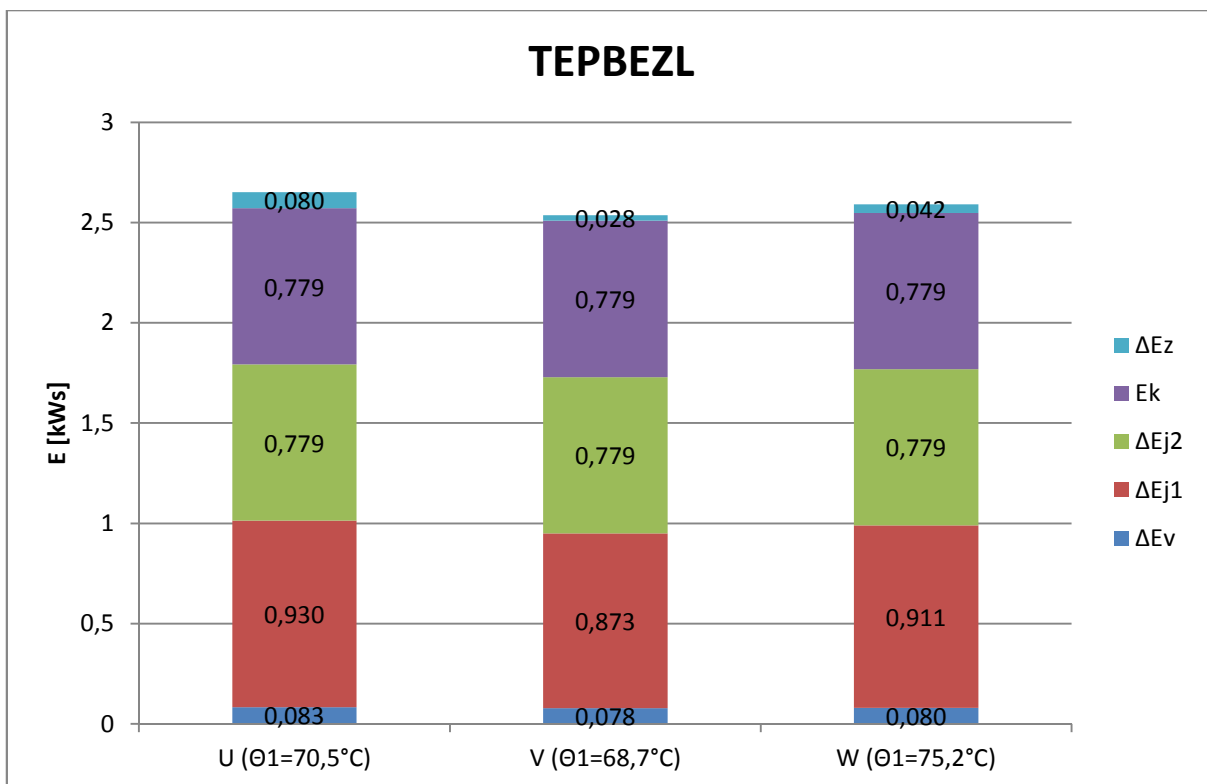
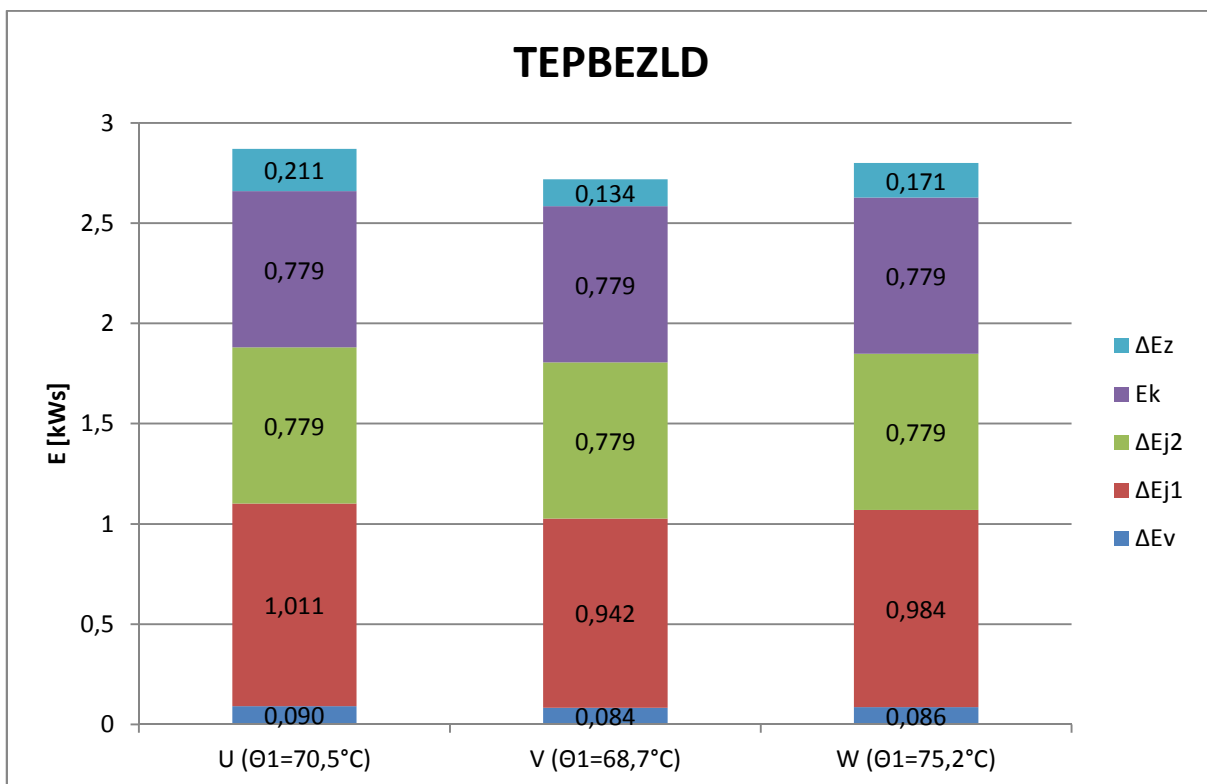
Obr. P2: Energie pro studený motor, bez setrvačnicku, pravý chod

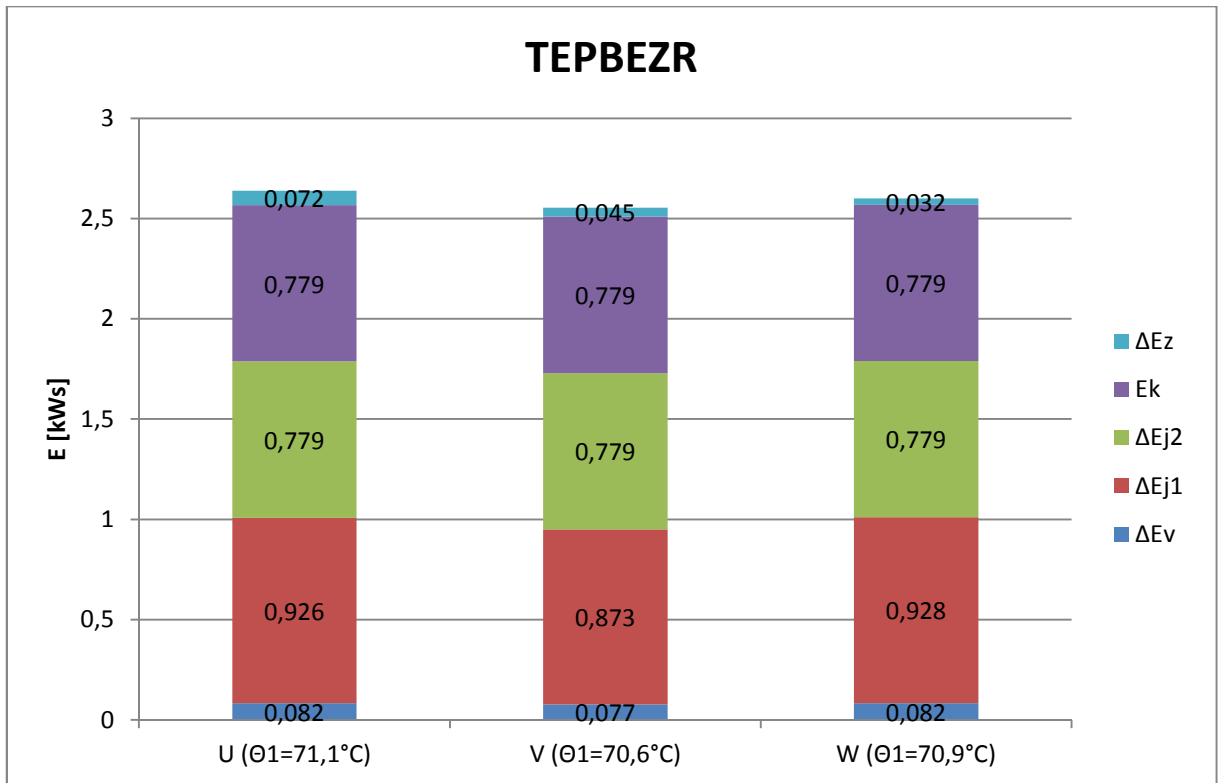


Obr. P3: Energie pro studený motor, se setrvačником, levý chod

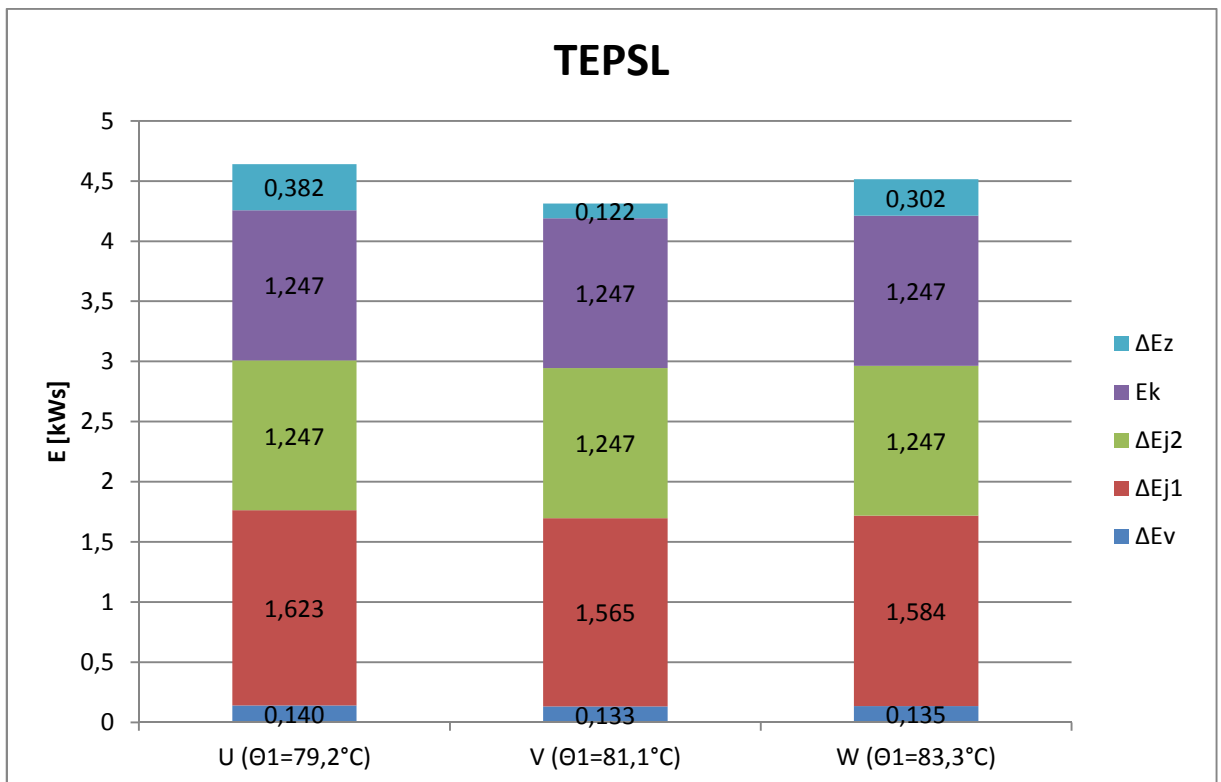


Obr. P4: Energie pro studený motor, se setrvačником, pravý chod

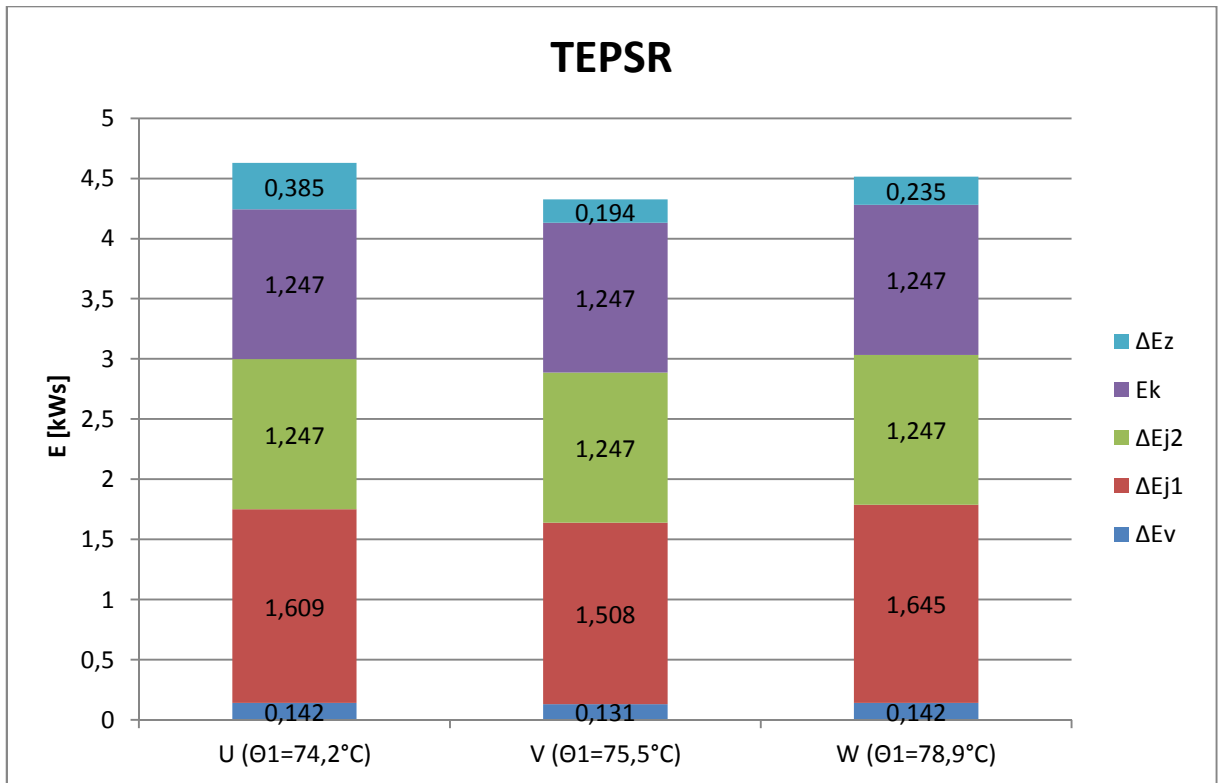
Obr. P5: Energie pro teplý motor, bez setrvačnicku, levý chod, $U_{EF}=87\text{V}$ Obr. P6: Energie pro teplý motor, bez setrvačnicku, levý chod, $U_{EF}=65\text{V}$



Obr. P7: Energie pro teplý motor, bez setrvačnicku, pravý chod

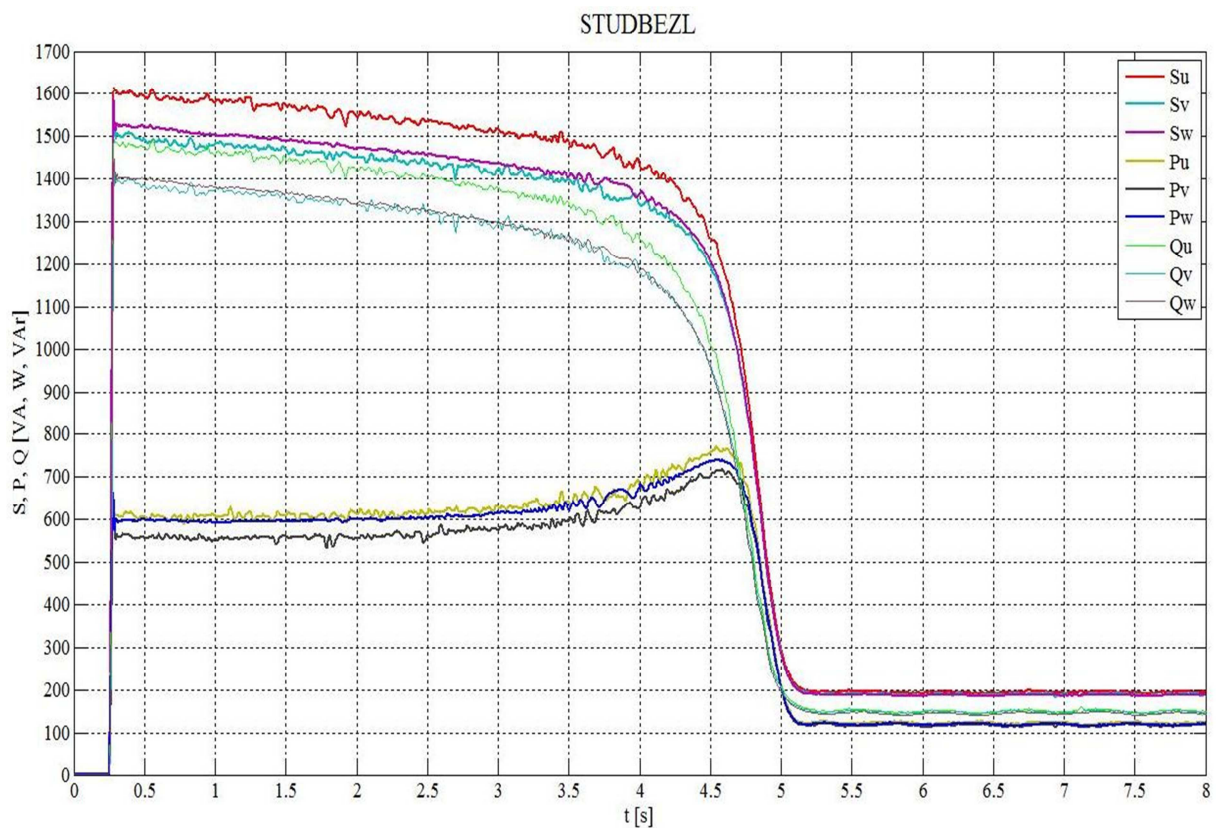


Obr. P8: Energie pro teplý motor, se setrvačnickem, levý chod

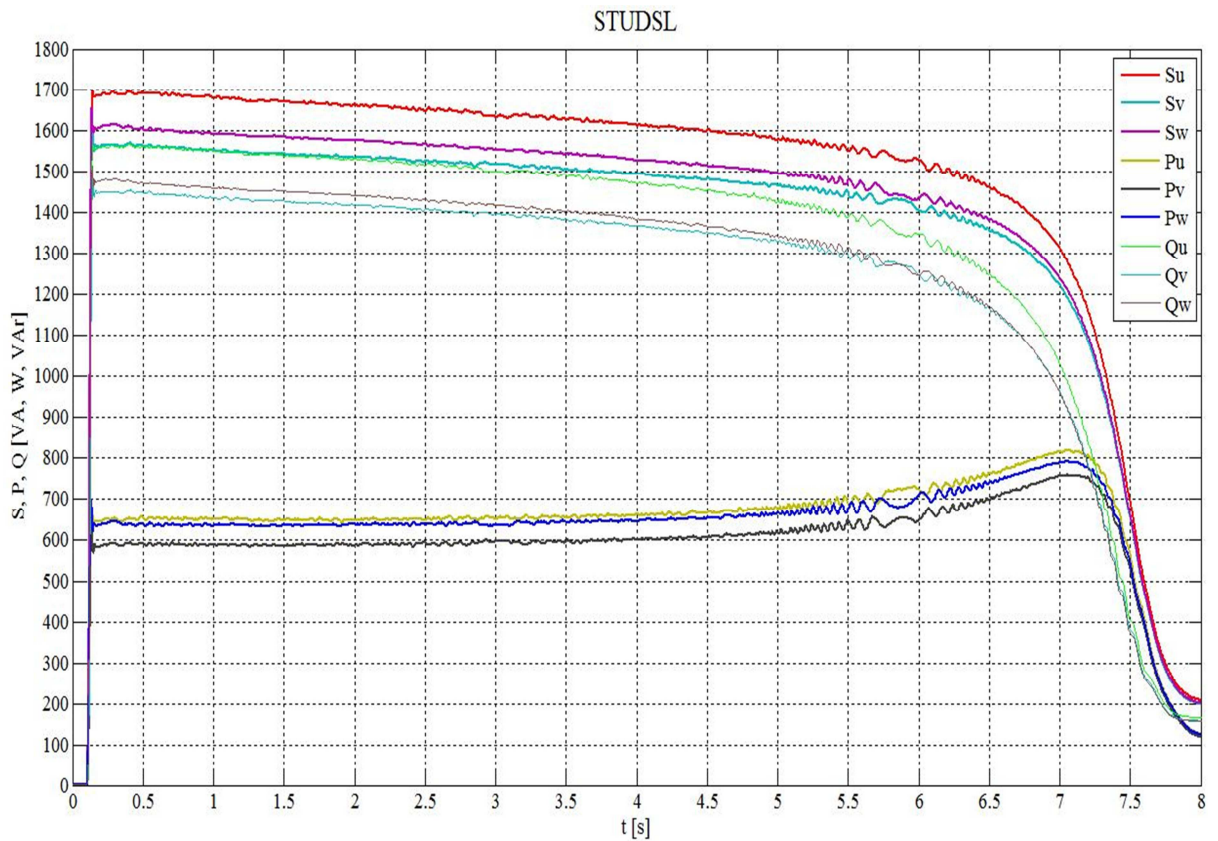


Obr. P9: Energie pro teplý motor, se setrvačником, pravý chod

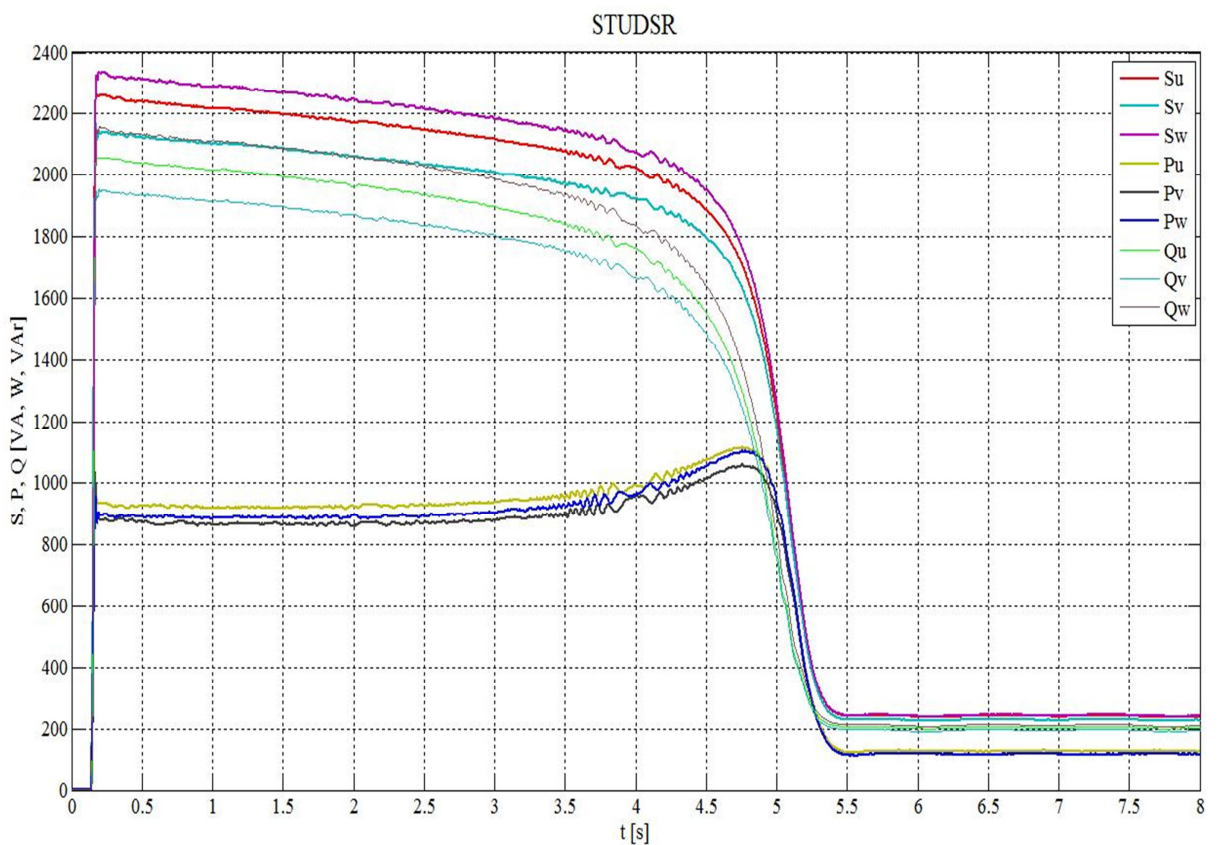
Příloha 2



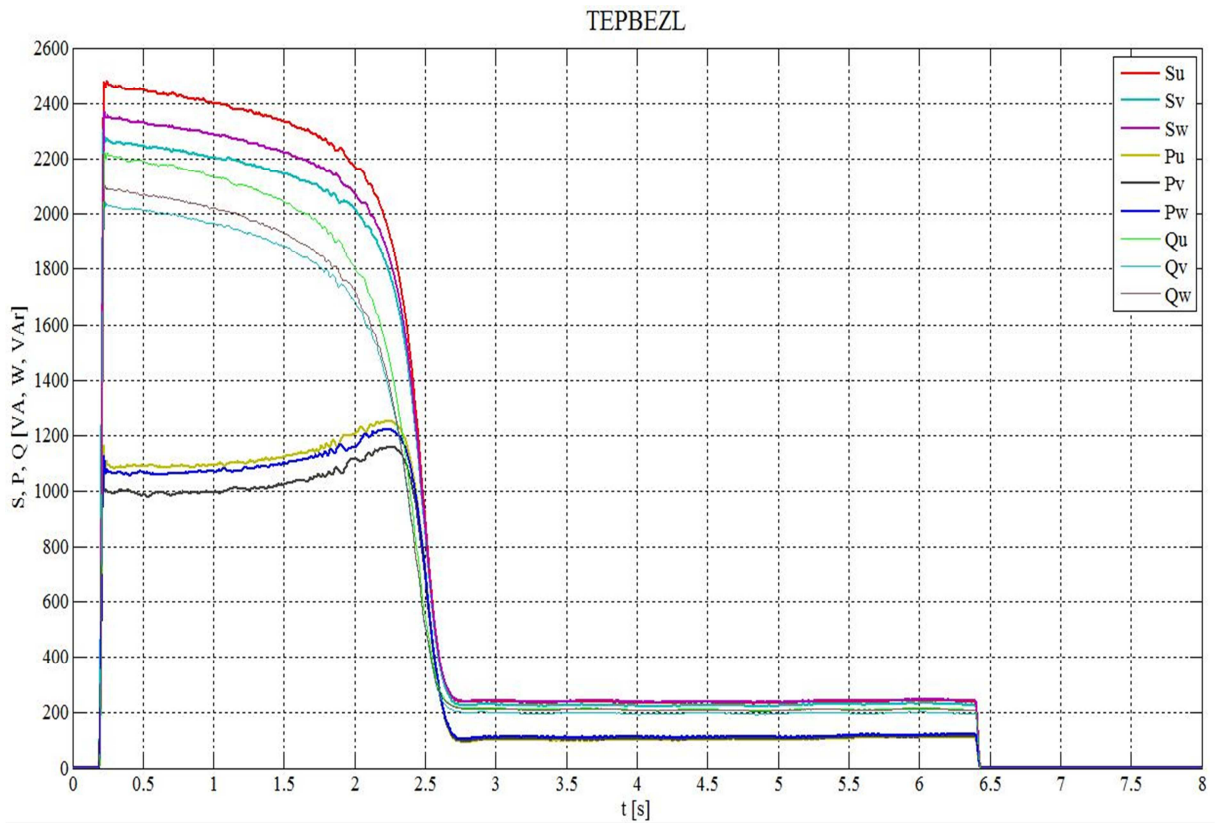
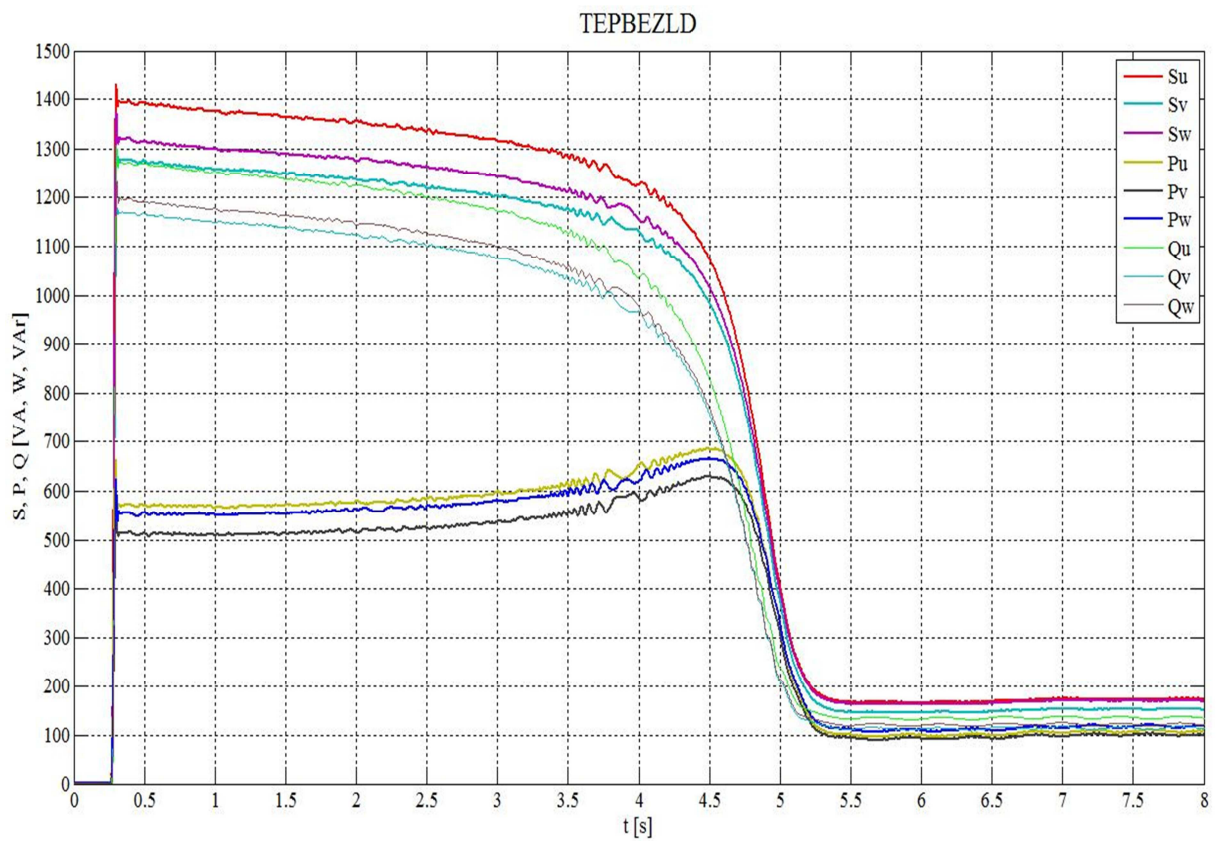
Obr. P10: Průběhy výkonů pro studený motor, bez setrvačniku, levý chod

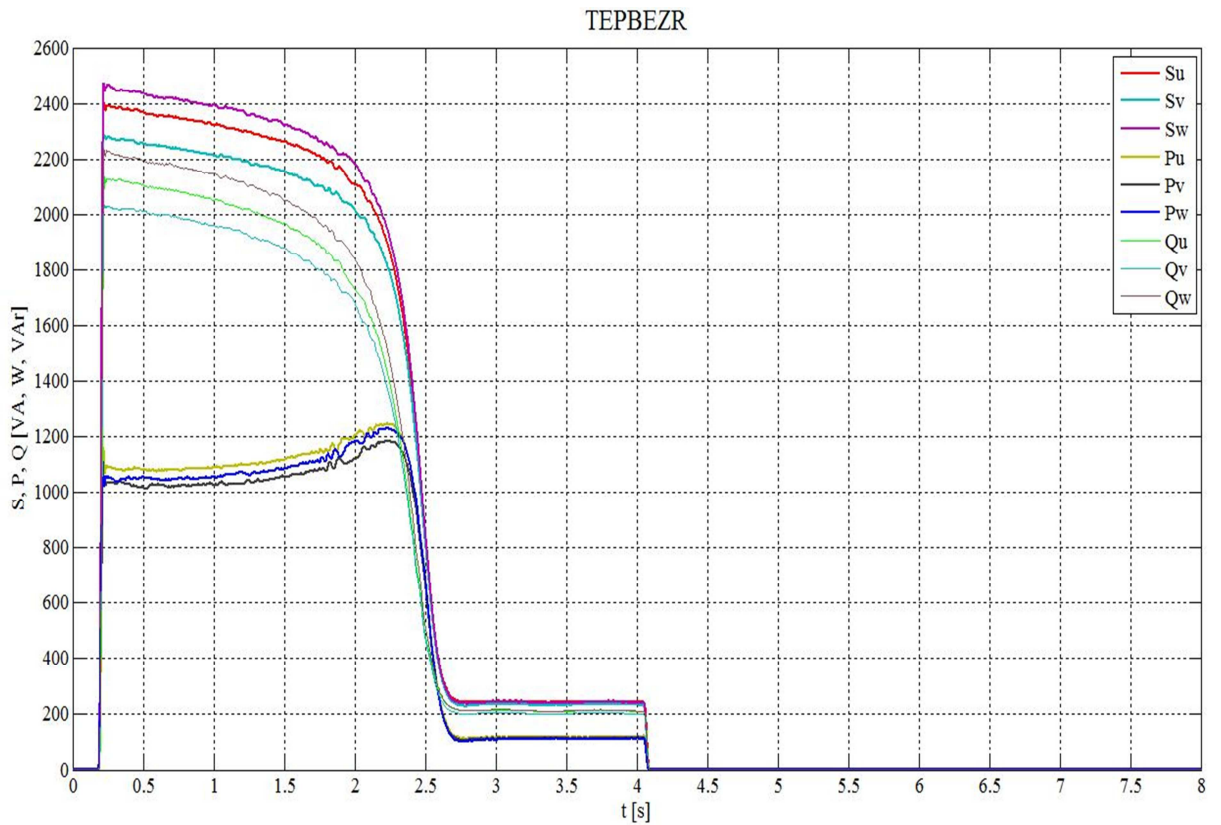


Obr. P11: Průběhy výkonů pro studený motor, se setrvačником, levý chod

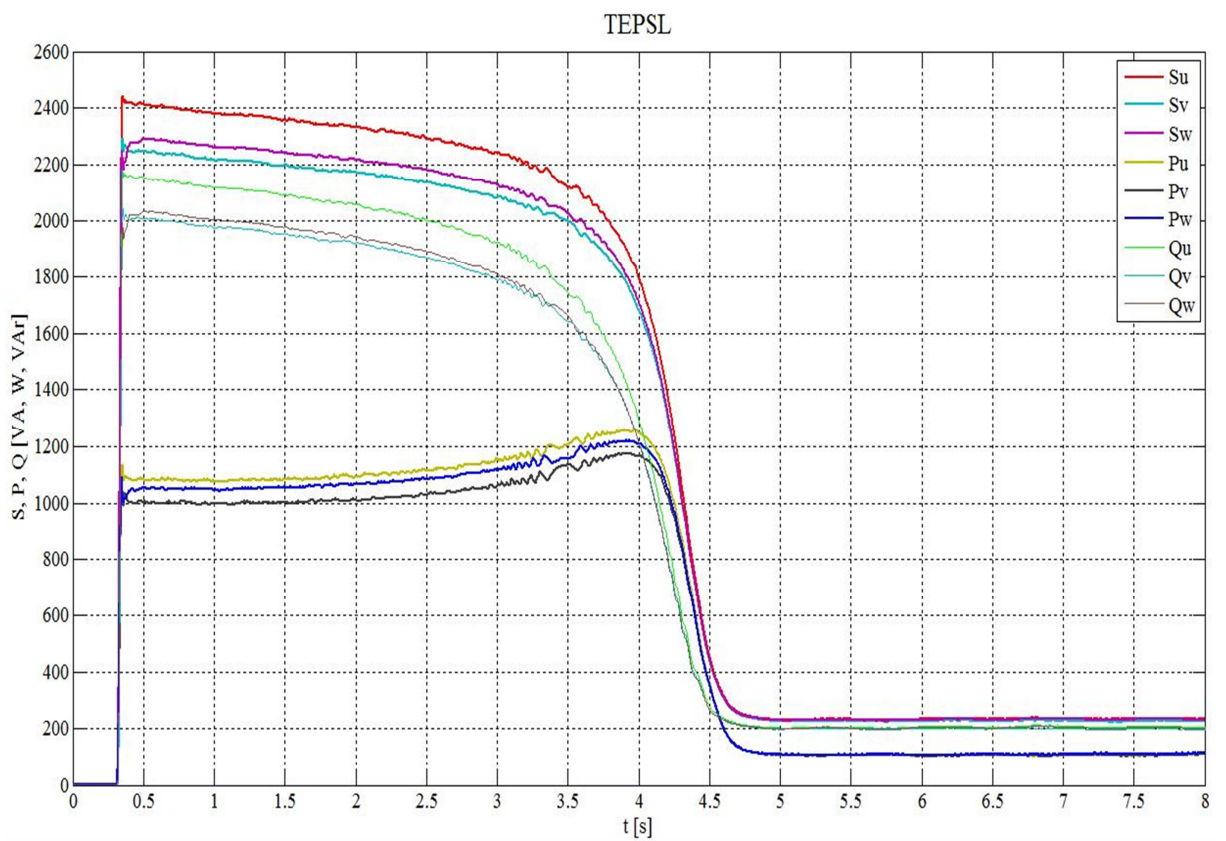


Obr. P12: Průběhy výkonů pro studený motor, se setrvačником, pravý chod

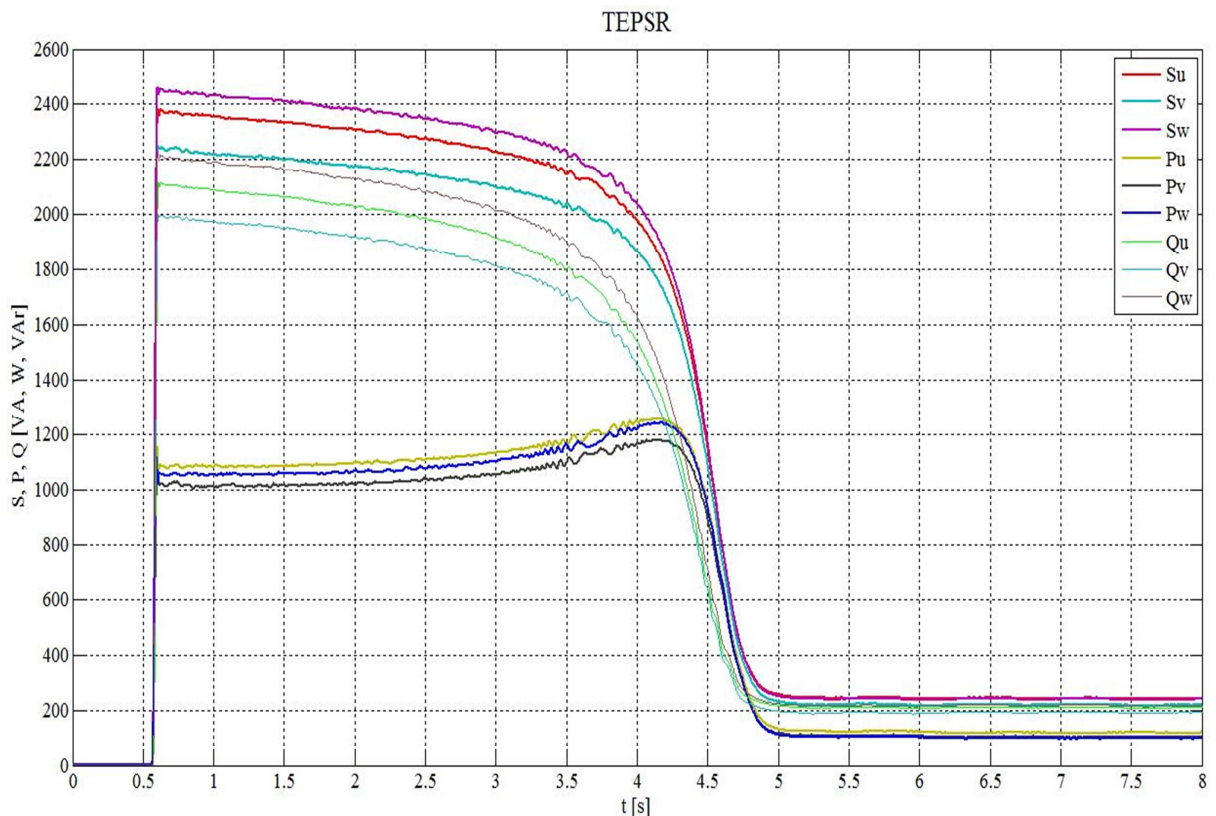
Obr. P13: Průběhy výkonů pro teplý motor, bez setrvačnicku, levý chod, $U_{EF}=87V$ Obr. P14: Průběhy výkonů pro teplý motor, bez setrvačnicku, levý chod, $U_{EF}=65V$



Obr. P15: Průběhy výkonů pro teplý motor, bez setrvačnicku, pravý chod



Obr. P16: Průběhy výkonů pro teplý motor, se setrvačnickem, levý chod



Obr. P17: Průběhy výkonů pro teplý motor, se setrvačником, pravý chod

Příloha 3

`%konstanty`

`Rv=0.0405;%[ohm]`

`%výběr momentu setrvačnosti`

`J=0.23;% bez setrvačnicku`

`J=0.35;% se setrvačnickem`

`%výběr souboru`

`soubor=STUDBEZL_RMS; start=502; konec=10424; R1=[0.38 0.378 0.376];%[ohm]`

`soubor=STUDBEZR_RMS; start=956; konec=10711; R1=[0.38 0.378 0.376];%[ohm]`

`soubor=STUDSL_RMS; start=207; konec=16261; R1=[0.396 0.388 0.38];%[ohm]`

`soubor=STUDSR_RMS; start=274; konec=11063; R1=[0.383 0.381 0.385];%[ohm]`

`soubor=TEPBEZL_RMS; start=381; konec=5427; R1=[0.454 0.456 0.464];%[ohm]`

`soubor=TEPBEZLD_RMS; start=541; konec=10957; R1=[0.454 0.456 0.464];%[ohm]`

`soubor=TEPBEZR_RMS; start=373; konec=5489; R1=[0.455 0.459 0.457];%[ohm]`

`soubor=TEPSL_RMS; start=635; konec=9554; R1=[0.468 0.476 0.477];%[ohm]`

`soubor=TEPSR_RMS; start=1150; konec=9947; R1=[0.46 0.467 0.47];%[ohm]`

`%načtení souboru`

`tr=8/16384*(konec-start);% výpočet doby rozběhu`

`t=T(start:konec);% výběr dat z vektoru od start do konec`

`delka=length(t);% délka vektoru`

`I2=[soubor(start:konec,3) soubor(start:konec,5) soubor(start:konec,7)].^2;`

`P=[soubor(start:konec,11) soubor(start:konec,12) soubor(start:konec,13)];`

`%suma kvadrátu proudu`

`I2_sum=sum(I2);`

`Ej=(tr/delka)*I2_sum;`

```
%suma přivedené energie
P_sum=sum(P);
Ep=(tr/delka)*P_sum

%energie ztracená na vedení
Ev=Rv*Ej

%Jouleova energie ztracená ve statoru
Ej1=R1.*Ej

%energie ztracená v rotoru
Ej2=0,5*J*(pi*1493/30)^2
Ek=0,5*J*(pi*1493/30)^2
Ez=Ep-Ev-Ej1-Ej2-Ek
```