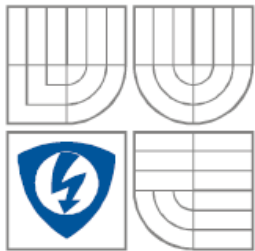




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNologiÍ**
**ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY
A ELEKTRONIKY**
FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC
ENGINEERING

OPTIMALIZACE PARAMETRŮ ASYNCHRONNÍHO MOTORU

OPTIMIZATION OF PARAMETERS OF ASYNCHRONOUS MOTOR

ZKRÁCENÁ VERZE PH.D. THESIS

DOCTORAL THESIS

AUTOR PRÁCE: Msc.Ing. Mohammed Hussein Mohammed

AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE: Doc. Ing. Ondrůšek Čestmír, Csc
SUPERVISOR

Brno 2012

OBSAH

1. ÚVOD	3
2. SHRUTÍ SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ V OBORU.....	4
3. MOTIVACE, FORMULACE PROBLÉMU A CÍLŮ JEHO ŘEŠENÍ	6
3.1 Motivace k řešení dané problematiky	6
3.2 Cíle disertace	6
4. ZVOLENÉ METODY ŘEŠENÍ DISERTAČNÍ PRÁCE	7
4. 1 Diferenciální evoluce	7
4. 2 Princip algoritmu diferenciální evoluce	7
4. 3 Matematický model asynchronního motoru	9
5. DOSAŽENÉ VÝSLEDKY	11
5.1 Simulace motoru	11
5.2 Aplikace modelu	12
5. 2. 1 Ekvivalentní obvod	12
5. 2. 2 Simulační výsledky	14
5.3 Optimalizace statických parametrů motoru použitím algoritmu umělé inteligence	20
5. 3. 1 Ekvivalentní obvod	20
5. 3. 2 Simulační výsledky	27
5.4 Optimalizace dynamických parametrů motoru použitím algoritmu umělé inteligence	30
5. 4. 1 Stručný technický popis optimalizační metody	30
5. 4. 2 Odhad parametrů motoru v laboratoři	30
5. 4. 3 Proces optimalizace	31
6. PŘÍNOSY DISERTAČNÍ PRÁCE	35
7. ZÁVĚR	35
8. LITERATURA.....	36

1. ÚVOD

Asynchronní motor je v současné průmyslové praxi nejčastěji používaným typem pohonné jednotky. Nejčastějším druhem asynchronního motoru je třífázový asynchronní motor, který pracuje na principu silového působení statorového a rotorového proudu (indukovaného ve vinutí spojeném nakrátko). Motor nakrátko má dobré vlastnosti, je z funkčního i konstrukčního hlediska jednoduchý, levný, snadno se spouští, je bezpečný, má poměrně dobrý záběrný moment a velkou přetížitelnost, jeho otáčky jsou téměř stejné při proměnlivém zatížení a potřebuje pouze jednoduchou obsluhu. Vyrábí se v širokém rozsahu výkonů: od několika wattů až do 15 MW. Dále je vhodný tam, kde je potřeba velkého záběrného momentu, používá se také v nejrůznějších aplikacích, od zcela jednoduchých až po takové, které jsou z pohledu výrobního procesu kritické. Může však dojít k jeho nečekanému selhání, které může být příčinou velkých materiálních ztrát i ohrožení zdraví a životů lidí. Jak vyplývá z mnoha rozsáhlých výzkumů a šetření, asynchronní motor je celkem robustní zařízení, které pokud pracuje v ideálních podmínkách, tak je spolehlivé a nenáročné na údržbu. Avšak pracují-li asynchronní motory v průmyslovém prostředí, kde jsou jejich pracovní podmínky často velmi vzdáleny těm ideálním, dochází k jejich nečekaným poruchám.

Věda dokázala, že složitost problémů reálného světa s mnoha vazbami mezi objekty se neustále zvětšuje, a je potřeba se s ní vyrovnat adekvátními postupy. Jedním z nich je využití metod umělé inteligence. V současné době probíhá rychlý vývoj těchto metod. Otázka je taková – jak tyto metody můžeme využít k řešení vytčených cílů v technické praxi?. V oblasti elektrických strojů se dnes řeší různé problémy. Na některých pracovištích je velká pozornost věnována otázkám technické diagnostiky. Jako hlavní metodu k řešení problematiky této disertační práce používám jednu ze známých metod umělé inteligence, která řeší problematiku optimálního nalezení parametrů náhradního obvodu asynchronního motoru pro výpočet jeho statických a dynamických charakteristik s velkou přesností. Z důvodů jednoduchosti programování, rychlosti řešení a velké přesnosti jsem používal metodu diferenciální evoluce, která je jednou z moderních metod umělé inteligence.

2. SHRnutí SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ V OBORU

Zde uvádím přehled vědeckých publikací a konferenčních příspěvků, které se zabývají podobnou problematikou, metodami řešení této problematiky a dosaženými výsledky. Čísla odkazům vztahují k seznamu použité literatury.

- [1] Článek ukazuje použití metod umělé inteligence pro adaptaci parametrů simulačního modelu, který se během simulace mění.
- [2] Autor se věnoval optimalizaci asynchronního stroje s cílem dosažení jeho maximální účinnosti.
- [3] Článek se zabývá popisem metod bezsenzorového řízení rychlosti asynchronních motorů a obsahuje též krátký popis řízení rychlosti asynchronních motorů klasickými metodami (skalární a vektorové řízení).
- [4] Práce pojednává o asynchronních motorech, dává pohled na jejich konstrukci, princip činnosti, vlastností, použití a stručně popisuje návrh třífázového indukčního motoru.
- [5] Tato práce popisuje vytvoření zpřesněného matematického modelu trakčního pohonu s asynchronním motorem malého jmenovitého napětí (28 V), který je napájen z akumulátoru.
- [6] Tato práce se zabývá identifikací elektrických parametrů indukčních motorů. Používá se metoda genetických algoritmů (GA) jako identifikační metoda.
- [7] Příspěvek se zabývá chováním vektorově řízeného pohonu s asynchronním motorem za mezních podmínek, je-li uvažována nelinearita magnetizační indukčnosti asynchronního motoru.
- [8] Práce popisuje následné modelování s implementací identifikačních metod asynchronního motoru, jejichž výpočetní algoritmus je vypočten pomocí MATLAB/Simulink.
- [9] Tento článek se zabývá analýzou ztrát chování indukčního stroje pro obě činnosti stroje (motor/generátor).
- [10] Cílem této práce je měření, simulace (modelování) a verifikace přechodového stavu asynchronního stroje.
- [11] Tato práce popisuje dynamické vlastnosti asynchronního motoru napájeného z frekvenčního měniče.
- [12] Článek je psán v době, kdy složité transistorové či tyristorové měniče vládou světu regulační techniky v oblasti řízení rychlosti asynchronních motorů, zdá se skoro rouháním tvrzení, že asynchronní stroj lze řídit, bez ohledu na jeho technické parametry či provedení.
- [13] Článek se zabývá popisem a vytvořením modelů magnetických obvodů elektrických strojů (točivých i netočivých), včetně výpočtu rozložení magnetického pole v daných typech elektrických strojů pomocí metody konečných prvků v programu ANSYS.
- [14] V tomto příspěvku je popsán systém pro řízení asynchronního motoru bez použití čidla polohy či otáček rotoru. V článku je také řídicí systém na principu tzv. přirozeného řízení (Natural Field Orientation – NFO).

- [15] Příspěvek se zabývá problematikou uplatnění části oblasti umělé inteligence, do které spadá i fuzzy logika, v oblasti řízení střídavých regulačních pohonů.
- [16] Tato práce se věnuje zkoumání řešení zmíněných problémů v dnešní době. Metoda je založena na ekvivalentním obvodu modelu. Cílem této práce je také porovnání metody konečných prvků a ekvivalentního modelu magnetických obvodů.
- [17] Práce se zaměřuje na popis negativních účinků napájení z měniče frekvence na asynchronní motor a jeho klíčové uzly.
- [18] Tato práce dává pohled na dosavadní řešení vysokorychlostních asynchronních motorů. V textu byly uvedeny možnosti použití lištěného a masivního rotoru.

Z uvedeného přehledu plyne, že problematika stanovení skutečných parametrů prvků náhradního schématu asynchronního motoru, především v režimech, kdy motor pracuje v nelineární oblasti magnetizační křivky magnetického obvodu, není zcela vyřešena.

Z hlediska aplikace asynchronních motorů v řízených pohonech s požadavky na vysokou dynamiku je proto žádoucí se danou problematikou podrobněji zabývat.

3 MOTIVACE, FORMULACE PROBLÉMU A CÍLŮ JEHO ŘEŠENÍ

3. 1 Motivace k řešení dané problematiky

Z přehledu současného stavu poznání v oboru plyne, že pro optimální využití vlastností asynchronních motorů, především v jejich využití v řízených pohonech, je důležité znát co nejpřesněji parametry jejich náhradního schématu, a to jak v ustálených, tak v dynamických elektromechanických stavech. Ukazuje se totiž, že právě v přechodových stavech (rozběh, brzdění) nejsou některé parametry (především indukčnosti) v důsledku nasycení magnetického obvodu motoru konstantní.

Pro řešení problematiky optimálního nalezení parametrů motoru jsem použil algoritmus diferenciální evoluce v kombinaci s vhodným matematickým modelem, který v potřebné míře popisuje vlastnosti stanoveného motoru. Pro řešení matematického modelu jsem zvolil simulační prostředí Matlab/Simulink.

3. 2 Cíle disertace

Koncepčním cílem práce je vytvoření metodiky pro nalezení skutečných parametrů prvků náhradního obvodu asynchronního motoru, odpovídajících reálnému chování motoru v ustáleném stavu i v přechodových stavech (např. při rozběhu). Konkrétními cíli pak bylo nalezení parametrů těchto prvků pro stroj s normálním typem drážek a pro stroj s hlubokými drážkami a ověření použitého přístupu porovnáním výsledků simulačního modelování a experimentu provedeného na dvou konkrétních strojích.

Tyto cíle byly řešeny postupně formulováním a postupným plněním následujících dílčích cílů:

1. Při optimalizaci parametrů náhradního obvodu asynchronního motoru pro výpočet charakteristik v ustáleném stavu:

- optimalizace náhradního obvodu pro stroj s normálním typem drážek,
- optimalizace náhradního obvodu pro stroj s hlubokými drážkami,
- simulace vybraných charakteristik a porovnání s naměřenými hodnotami.

2. Při optimalizaci parametrů pro výpočet charakteristik asynchronního motoru v přechodových stavech:

- simulace vybraných charakteristik a porovnání s naměřenými hodnotami.

4. ZVOLENÉ METODY ŘEŠENÍ DISERTAČNÍ PRÁCE

Jak již bylo řečeno výše, pro řešení problematiky optimálního nalezení parametrů motoru byl použit algoritmus diferenciální evoluce v kombinaci s vhodným matematickým modelem v simulačním prostředí Matlab/Simulink.

4.1 Diferenciální evoluce[24]

Diferenciální evoluci řadíme k poměrně novým typům algoritmů umělé inteligence. Schéma tohoto algoritmu má jistou podobu s algoritmy genetickými. Některé rysy má společné, avšak oproti genetickým algoritmům má i jisté výhody, především jednoduchost, nesčetné možnosti kombinace čísel, rychlost, možnost více možných řešení atd.

4.2 Princip algoritmu diferenciální evoluce

Princip diferenciální evoluce je možno znázornit na příkladu, uvedeném v Tab. 4.2-1. Zde vidíme, že se algoritmus v cyklech opakuje. Jedná se o tzv. generace, kdy jedna generace znamená jeden cyklus. Dále se pracuje s tzv. populacemi. Populaci je možné si představit jako matici $N \times M$, a každý sloupcový vektor je tzv. jedinec. V Tab. 3.2-1. máme tedy populaci, jež je tvořena šesti jedinci. Jednotliví jedinci jsou složeni z konečného počtu prvků. Tyto pak s hodnotou účelové funkce dávají dimenzi probíhající konkrétní evoluce. Účelová funkce je funkcí, jež chceme minimalizovat a nalézt náležitější extrém.

Celý cyklus se člení do následujících činností:

1. Základní parametry – jsou ty parametry, jež budou určovat celý průběh evoluce. Zejména se jedná o parametry F – mutační konstanta (0-2), CR – práh křížení (0-1), NP – velikost populace (počet jedinců) - (nejvíce se využívá metody $NP=D*10$), D – Počet dimenzí (rozměr jedince) – (základní argumenty HUF). Dalším ze základních parametrů je definice toho, z jakých čísel se budou skládat jedinci. Např. $\{\text{Real}, -10, 15\}$, $\{\text{Integer}, -1, 1\}$. V našem případě byl jedinec dvourozměrný o dvou prvcích a jeho první prvek je Real etc.

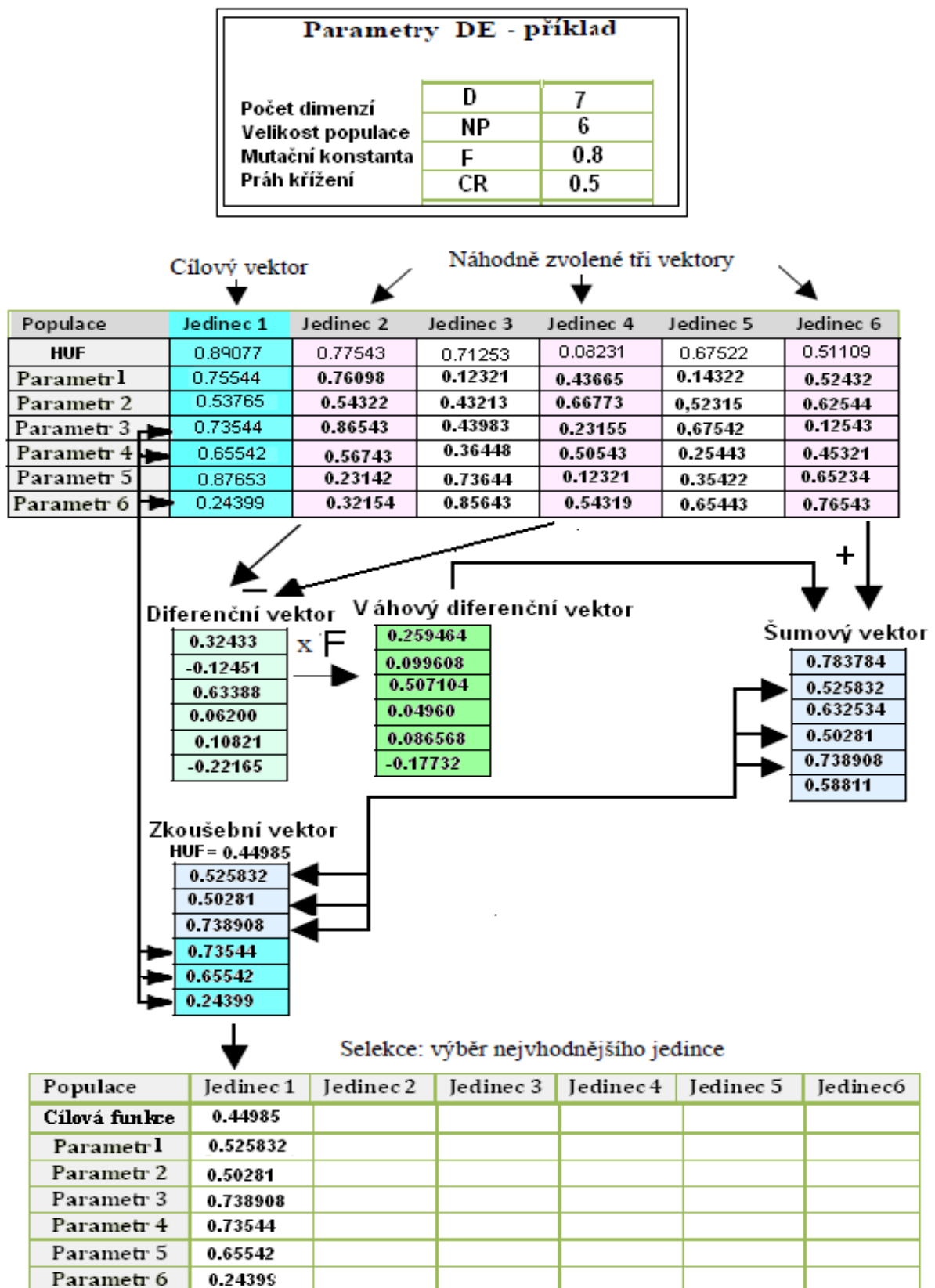
2. Vytvoření populace – tvorba populace se provádí generováním množiny jedinců dle prototypového vektoru. Je třeba nezapomenout pracovat s prvkem navíc u každého jedince – hodnota účelové funkce, dále jen jako HUF.

3. Počátek cyklu – v průběhu každé generace probíhá ještě cyklus, zabezpečující postupné evoluční šlechtění každého jedince. Postupně se tedy vybírá jeden jedinec za dalším až do konce populace, a tedy generace. Pro každého z nich je prováděn evoluční cyklus.

4. Cyklus evoluce – nejprve se zvolí náhodně tři jedinci z populace. Odečtením prvních dvou od sebe vzniká diferenční vektor. Po jeho vynásobení mutační konstantou se získá váhovaný diferenční vektor. Jeho přičtením k třetímu jedinci dostaneme šumový vektor. Dále je třeba připravit zkušební vektor. Z cílového a šumového vektoru se potom bere jeden prvek za druhým, např. první z obou, druhý z obou apod., dále se každé takové dvojici generuje náhodné číslo v rozsahu 0-1 a porovnává se s konstantou CR . V případě, že je CR vyšší než toto číslo, se do pozice ve zkušebním vektoru vloží prvek z vektoru šumového. Pokud je to naopak, tak z vektoru cílového. Dále po získání zkušebního vektoru porovnáme jeho HUF s HUF cílového vektoru. Do pozice cílového vektoru v nové populaci vybereme takového jedince, jehož HUF je lepší. V tabulce 3.2-1. jsme hledali minimum, takže na místě cílového vektoru je vektor zkušební, což dokazuje, že do nové generace se dostanou lepší jedinci. Potom se vybere druhý jedinec, cílový vektor, a celý cyklus je opakován, dokud se nevyčerpá populace a nevznikne tedy nová generace jedinců.

5. Zhodnocení – Pokud se nevyčerpá přednastavený počet generací či HUF nedosáhne zadané hodnoty, tak se cyklus stále opakuje. V průběhu všech generací se uchovává HUF nejlepšího jedince do vektoru historie. Vektor historie potom slouží pro znázornění průběhu celého evolučního procesu.

Tab. 4.2-1: Princip algoritmu diferenciální evoluce[24]



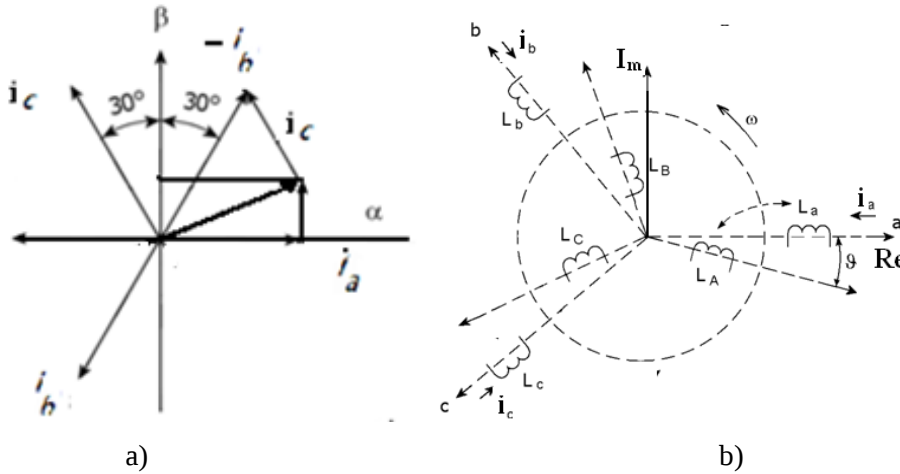
4. 3. Matematický model asynchronního motoru [19]

Odvození matematického modelu asynchronního motoru je založeno na náhradě trojfázového proudu ve statorových vinutích motoru jedním prostorovým vektorem proudu $\vec{i}_1$ a jeho rozložením do dvou na sobě kolmých složek (souřadnice α , β – pevně spojené se státorem, d, q – otáčející se synchronní rychlostí, nebo k, l – pevně spojené s rotorem).

Pro potřeby této práce budeme pracovat s modelem motoru v souřadnicích α , β , tedy v souřadnicích, pevně spojených se státorem. Odvození prostorových vektorů je provedeno pro dvoupólový stroj a pro zjednodušení vycházíme z následujících předpokladů:

- Symetrické harmonické napájení,
- Rotorové veličiny jsou přepočítané na stator,
- ztráty v železe jsou zanedbány.

Vinutí motoru je třífázové s prostorovým posunem ($\frac{2\pi}{3} = 120^\circ$), jak je uvedeno na obrázku (4. 1a) a (4. 1b). Statorové veličiny jsou indexovány malými písmeny (a, b, c) a rotorové veličiny velkými písmeny (A, B, C).



Obr. 4. 1a. Třífázové statorové proudy v souřadnicích α , β pevně spojenými se státorem

Obr. 4. 1b. Třífázové vinutí statorové a rotorové

Statorové proudy můžeme nahradit prostorovým vektorem, definovaným následující rovnicí:

$$\vec{i}_1 = \left(i_{1a} + i_{1b} \cdot e^{j\frac{2\pi}{3}} + i_{1c} \cdot e^{-j\frac{2\pi}{3}} \right) \quad (4. 1)$$

Rovnici (4. 1) rozdělíme na reálnou a imaginární část, tedy

$$\begin{aligned} \vec{i}_1 &= \left[i_{1a} + i_{1b} \left(\cos \frac{2\pi}{3} + j \sin \frac{2\pi}{3} \right) + i_{1c} \left(\cos \frac{2\pi}{3} - j \sin \frac{2\pi}{3} \right) \right] = \\ &= \frac{2}{3} \left[i_{1a} + (i_{1b} + i_{1c}) \cdot \cos \frac{2\pi}{3} + j (i_{1b} - i_{1c}) \cdot \sin \frac{2\pi}{3} \right] \end{aligned} \quad (4.2)$$

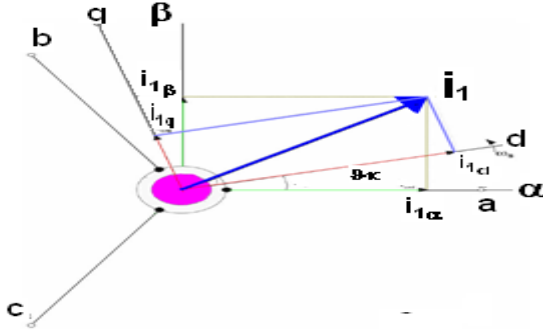
$$i_{1a} + i_{1b} + i_{1c} = 0 \quad (4.3)$$

$$\vec{i}_1 = \frac{2}{3} \left[i_{1a} \left(1 + \frac{1}{2} \right) + j (+i_{1b} - i_{1c}) \frac{\sqrt{3}}{2} \right] \quad (4. 4)$$

Transformace ze souřadnic a, b, c , do souřadnic α, β , pevně spojených se statorem platí, že

$$i_{1\alpha} = i_{1a} \quad (4.5)$$

$$i_{1\beta} = \frac{1}{\sqrt{3}}i_{1b} - \frac{1}{\sqrt{3}}i_{1c} \quad (4.6)$$



(a)

(b)

Obr. 4. 2a) Reálná a imaginární část satorového proudu v souřadnicích α, β pevně spojených se statorem

Obr. 4. 2b) Prostorový vektor satorového proudu a jeho složky v různých souřadnicích

Rovnice pro napětí satorového vinutí v soustavě α, β , pevně spojené se statorem bude:

$$\bar{u}_1 = R_1 \cdot \bar{i}_1 + \frac{d\bar{\psi}_1}{dt} \quad (4.7)$$

Po vhodných matematických úpravách a odvození rovnice pro moment motoru dostaneme **známý matematický model** v souřadnicích α, β , pevně spojených se statorem, který popisuje vlastnosti asynchronního motoru, ve tvaru:

$$\frac{d\bar{i}_{1\alpha}}{dt} = \frac{L_2}{L_1 \cdot L_2 - L_h^2} \left[- \left(R_1 + R_2 \frac{L_1}{L_2} \right) \cdot i_{1\alpha} + \frac{R_2}{L_2} \psi_{1\alpha} - j\omega \cdot \psi_{1\beta} + u_{1\alpha} \right] - j\omega \cdot i_{1\beta} \quad (4.8)$$

$$\frac{d\bar{i}_{1\beta}}{dt} = \frac{L_2}{L_1 \cdot L_2 - L_h^2} \left[- \left(R_1 + R_2 \frac{L_1}{L_2} \right) \cdot i_{1\beta} + \frac{R_2}{L_2} \psi_{1\beta} - j\omega \cdot \psi_{1\alpha} + u_{1\beta} \right] - j\omega \cdot i_{1\alpha} \quad (4.9)$$

$$\frac{d\psi_{1\alpha}}{dt} = -R_1 \cdot i_{1\alpha} + u_{1\alpha} \quad (4.10)$$

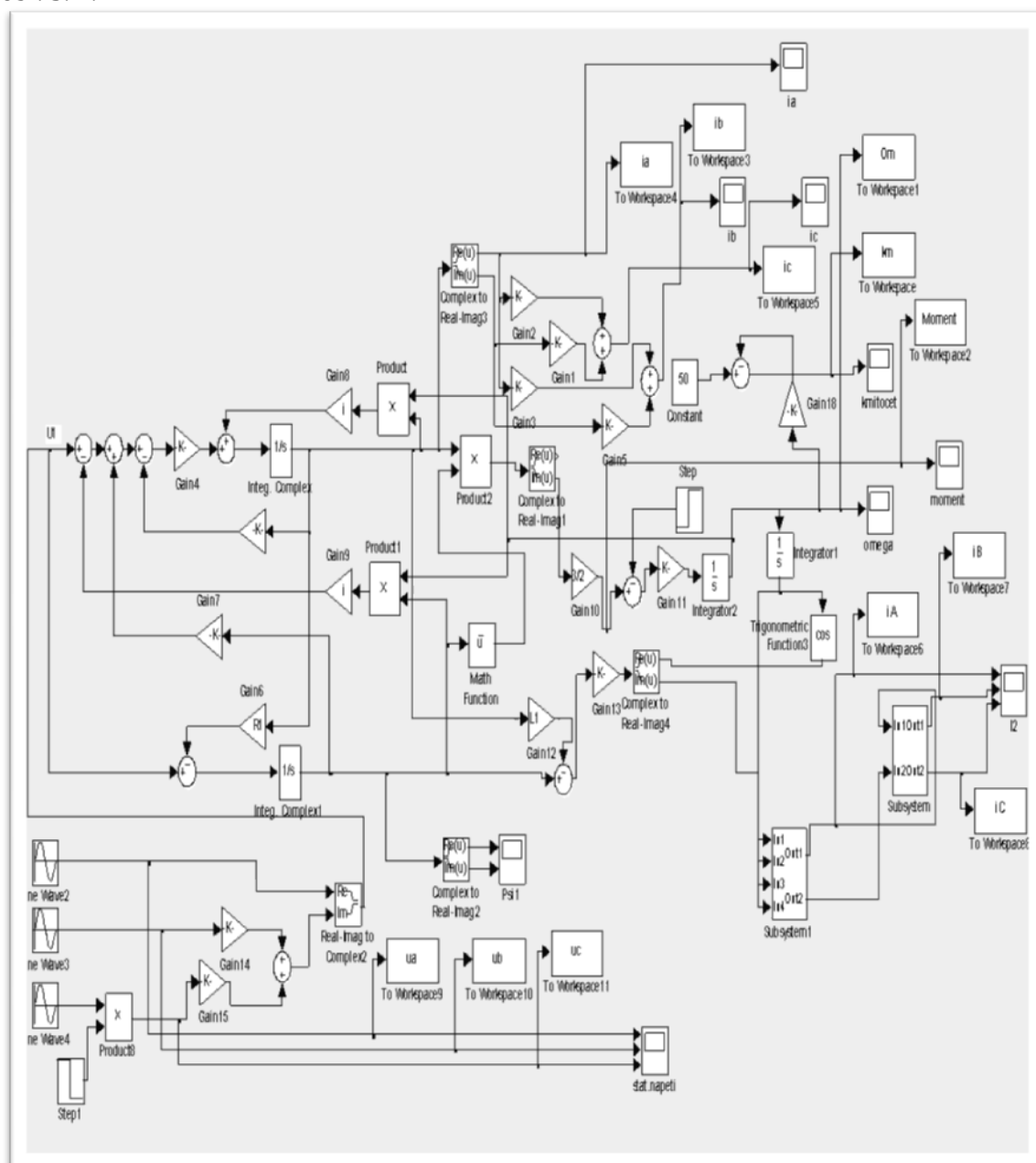
$$\frac{d\psi_{1\beta}}{dt} = -R_1 \cdot i_{1\beta} + u_{1\beta} \quad (4.11)$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{p_p}{J} \left[\frac{3}{2} \cdot p_p (i_{1\beta} \cdot \psi_{1\alpha} - i_{1\alpha} \cdot \psi_{1\beta}) - m_z \right] \quad (4.12)$$

5. DOSAŽENÉ VÝSLEDKY

5.1. Simulace motoru

Matematický model asynchronního motoru – viz rovnice (4. 9) až (4. 13) byl implementován do simulačního prostředí Matlab/Simulink, aby byly vytvořeny předpoklady pro jádro řešení problematiky disertační práce. Vytvořený model asynchronního motoru v tomto prostředí je uveden na obr. 5. 1.



Obr. 5.1 Model asynchronního motoru v prostředí Matlab/Simulink

V první části práce jsem v tomto prostředí řešil parametry motoru graficky podle různých podmínek režimu práce motoru

5. 2. Aplikace modelu

Asynchronní motor typu AOM160M2:

$P_n = 12 \text{ kW}$, $n_n = 2930 \text{ min}^{-1}$, $p_p = 1$, $f_n = 50 \text{ Hz}$, $M_n = 39.2 \text{ Nm}$, $J_m = 0,0433 \text{ kgm}^2$,

$U_{sn} = 380/220\text{V}$ efektivní hodnota – motor zapojen do hvězdy,

$I_{sn} = 21 \text{ A}$ efektivní hodnota jmenovitého fázového proudu,

$R_s = 0,22 \Omega$ odpor fáze statoru,

$R_r = 0,22 \Omega$ odpor rotorové fáze,

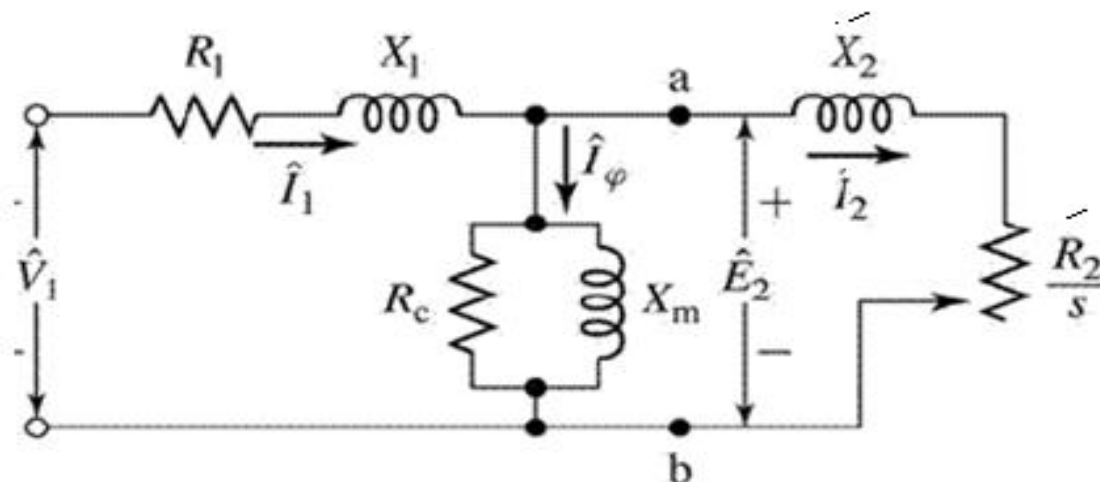
$L_h = 0,109 \text{ H}$ hlavní (magnetizační) indukčnost,

$L_{s\sigma} = L_1 = 1.646 \text{ mH}$ rozptylová indukčnost fáze statoru,

$L_{r\sigma} = L_2 = 3.78 \text{ mH}$ rozptylová indukčnost fáze rotoru.

5. 2. 1 Ekvivalentní obvod

Ekvivalentní obvod se obvykle zobrazuje způsobem podle obr.5.2.



Obr. 5. 2 Ekvivalentní obvod motoru

Test nakrátko: $U_K = 230\text{V}$, $P_K = 71\text{W}$, $I_K = 16.4\text{A}$, $\cos\varphi_K = 0.881$

Test naprázdno $U_O = 230\text{V}$, $P_O = 68\text{W}$, $I_O = 1.52\text{A}$, $\cos\varphi_O = 0.881$

Řešíme z testu nakrátko:

$$Z_k = \frac{U_k}{I_k} = \frac{230}{16.4} = 14.02 \Omega \quad (5.1)$$

$$R_{ekv} = Z_k \cdot \cos\varphi_k = 14.02 \cdot 0.881 = 12.35 \Omega \quad (5.2)$$

$$R_s = R_r = \frac{R_{ekv}}{2} = \frac{12.35}{2} = 6.17 \Omega \quad (5.3)$$

$$X_{ekv} = Z_k \cdot \sin\varphi_k = 14.02 \cdot 0.4731 = 6.62 \Omega \quad (5.4)$$

$$X_s = X_r' = \frac{X_{ekv}}{2} = \frac{6.62}{2} = 3.31 \, \Omega \quad (5.5)$$

Řešíme z testu naprázdno

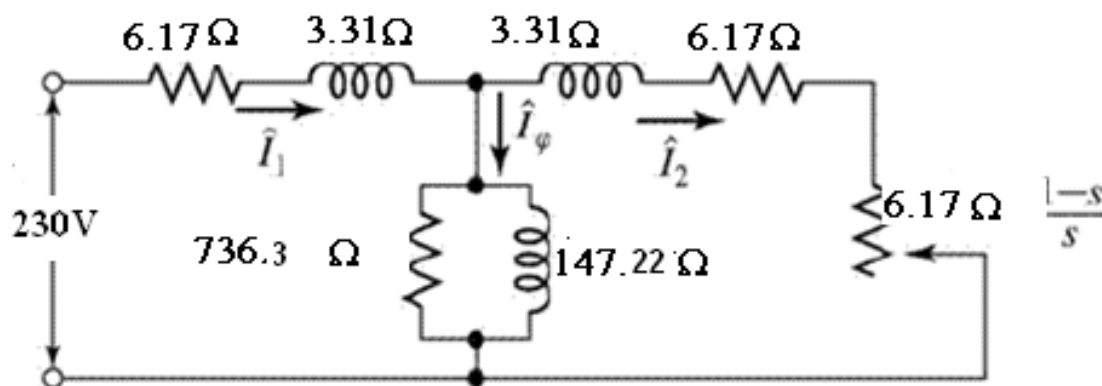
$$Z_s = \sqrt{R_s^2 + X_s^2} = \sqrt{6.175^2 + 3.3^2} = 7 \, \Omega \quad (5.6)$$

$$I_c = I_0 \cdot \cos \varphi_0 = 1.52 \cdot 0.196 \, \text{A} \quad (5.7)$$

$$R_c = \frac{U_0 - Z_s \cdot I_0}{I_c} = \frac{230 - 7 \cdot 1.52}{0.298} = 736.3 \, \Omega \quad (5.8)$$

$$I_m = I_0 \cdot \sin \varphi_0 = 1.52 \cdot 0.9806 = 1.49 \, \text{A} \quad (5.9)$$

$$X_m = \frac{U_0 - Z_s \cdot I_0}{I_m} = \frac{230 - 7 \cdot 1.52}{1.49} = 147.22 \, \Omega \quad (5.10)$$



Obrázek. 5. 3 Ekvivalentní obvod motoru typu AOM160M2 s konkrétními daty

Asynchronní motor typu: 1LA7083-2AA:

Výrobce: SIEMENS Elektromotoren s.r.o.

$P_n = 1100 \text{ W}$, $n_n = 2845 \text{ ot./min}$, $p_p = 1$, $f_n = 50 \text{ Hz}$, $M_n = 3,6905 \text{ Nm}$,

$J_m = 0,017 \text{ kgm}^2$

$U_{sn} = 400 \text{ V}$ efektivní hodnota – motor zapojen do hvězdy,

$I_{sn} = 2,4 \text{ A}$ efektivní hodnota jmenovitého fázového proudu,

$R_s = 6,18 \, \Omega$ odpor fáze statoru

$R_r = 6,18 \, \Omega$ odpor fáze rotoru,

$L_h = 0,47 \text{ H}$ hlavní (magnetizační) indukčnost,

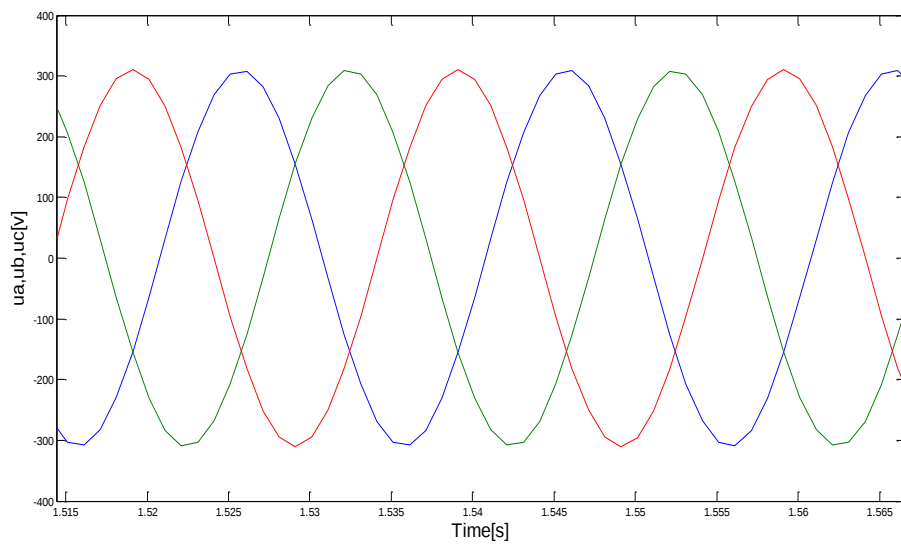
$L_{s\sigma} = 0,011 \text{ H}$ rozptylová indukčnost fáze statoru,

$L_{r\sigma} = 0,011 \text{ H}$ rozptylová indukčnost rotoru.

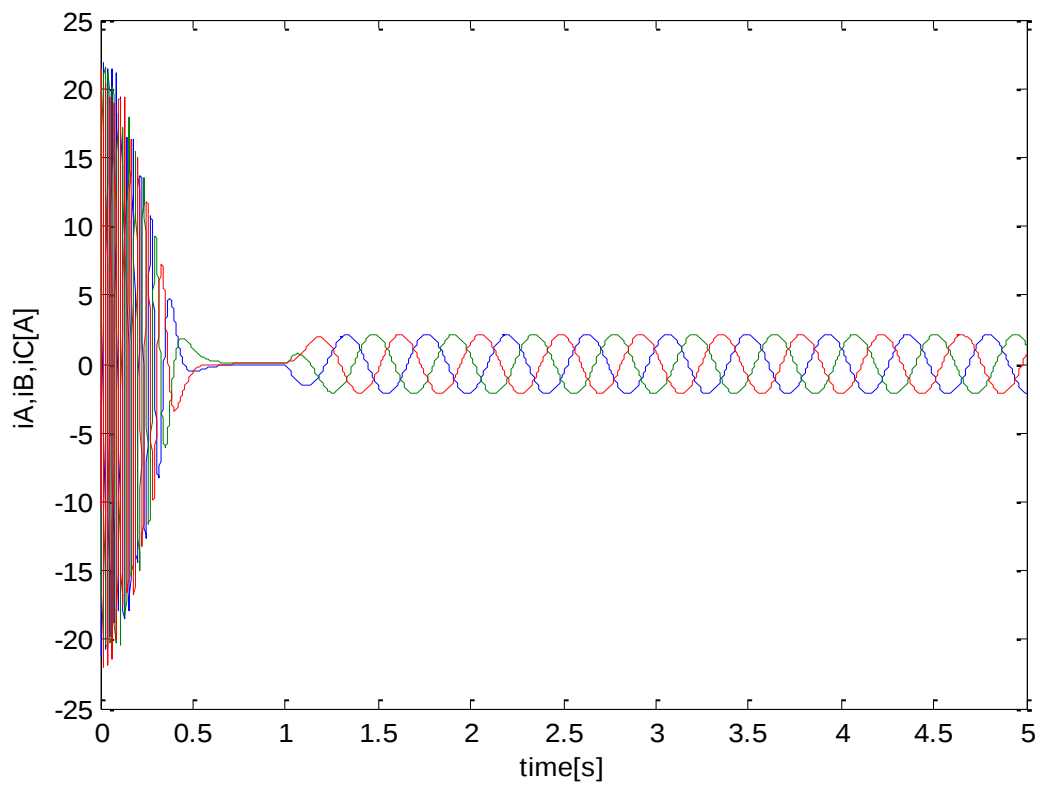
5. 2. 2 Simulační výsledky

Připojení nezatíženého motoru 1LA7083-2AA na síť, následně zatížení momentem 3 N.m

Optimalizace parametrů asynchronního motoru

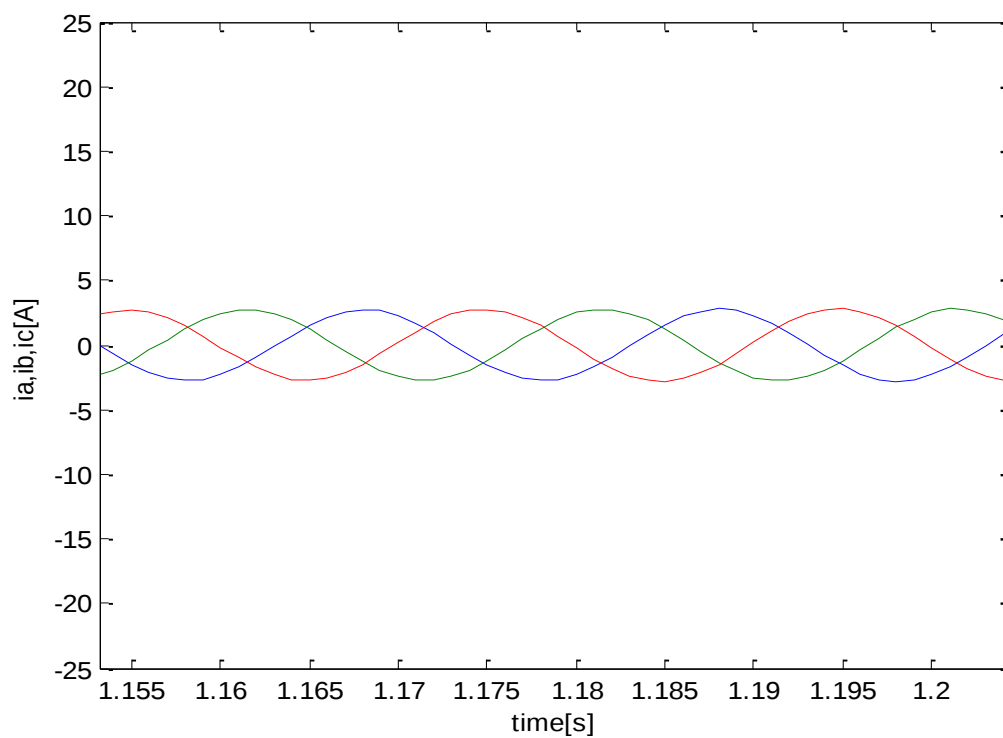


Obr. 5. 4 Statorové napětí při momentu 3N.m

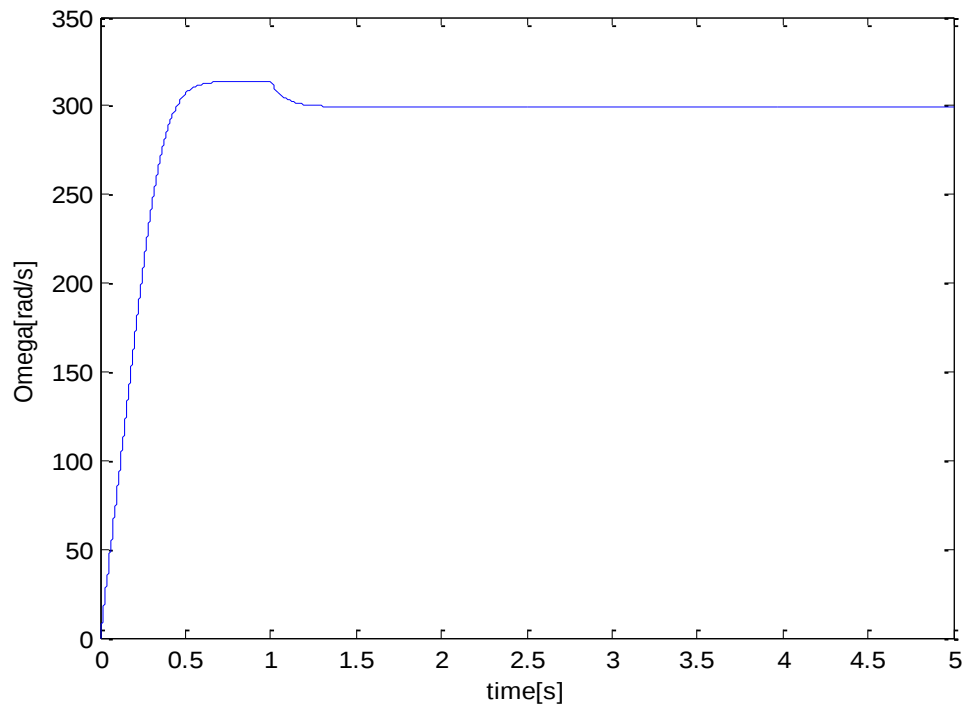


Obr. 5. 5 Rotorové proudy motoru, moment 3N.m přiveden v 1 s

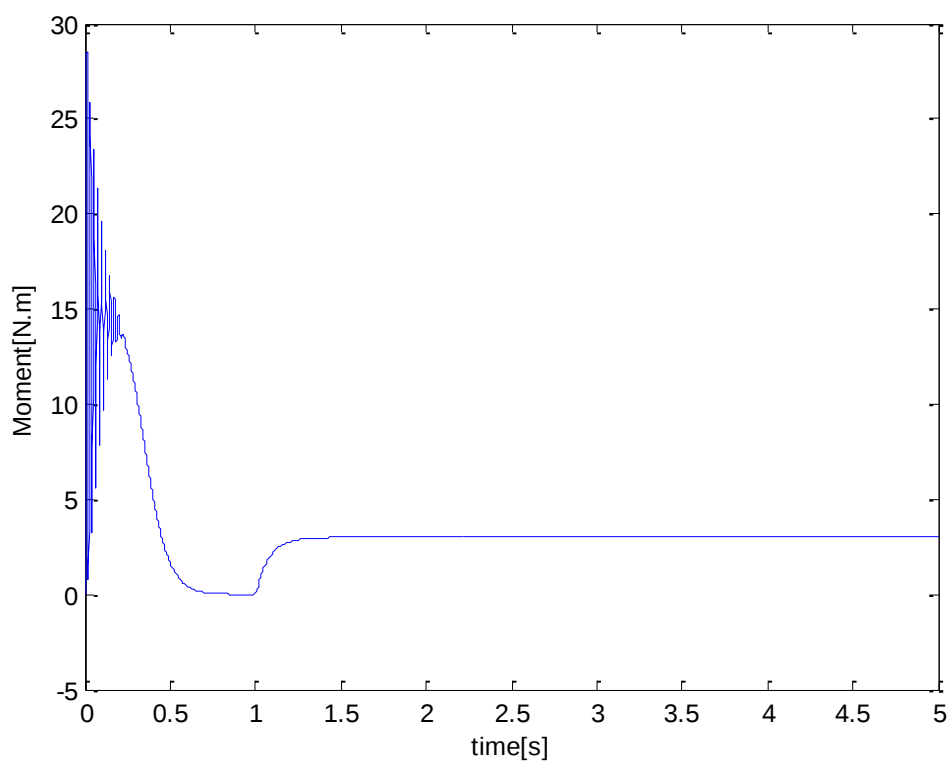
Optimalizace parametrů asynchronního motoru



Obr. 5. 6. Výřez obrázku statorových proudů při momentu 3N.m

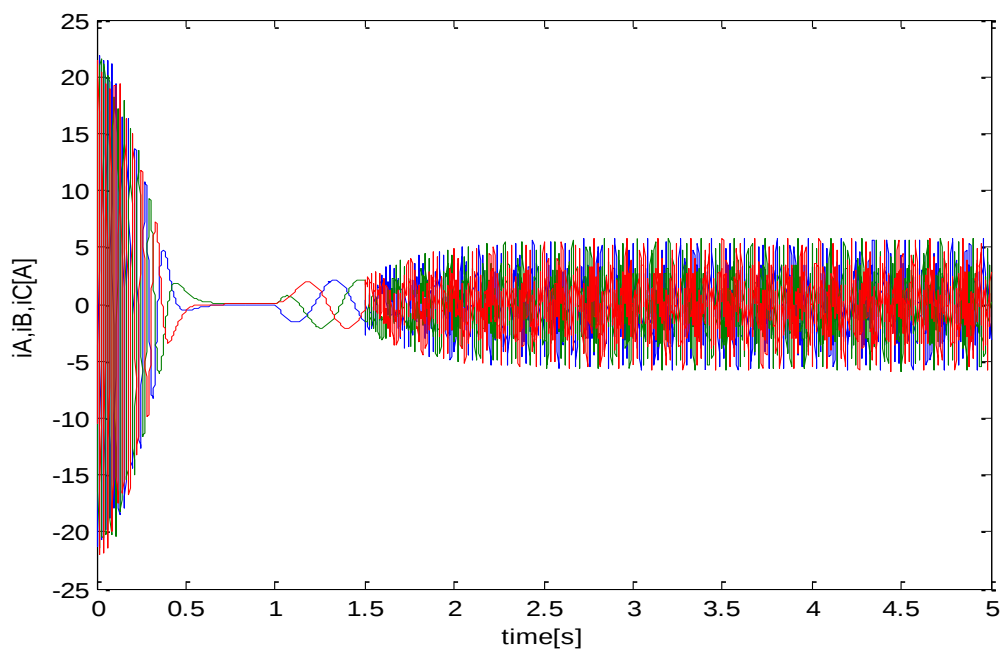


Obr. 5. 7. Rychlost motoru, moment 3N.m přiveden v čase cca 1 s



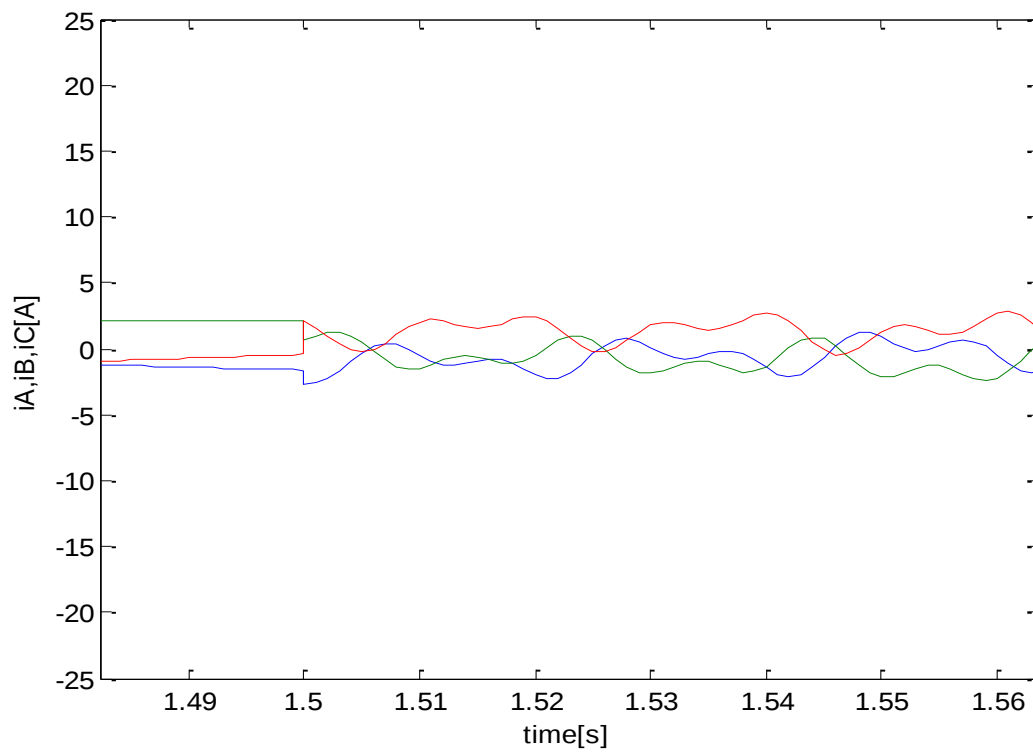
Obr. 5. 8 Průběh momentu motoru, moment 3N.m přiveden v čase cca 1 s

Přerušení jedné fáze statoru v čase 1.5s

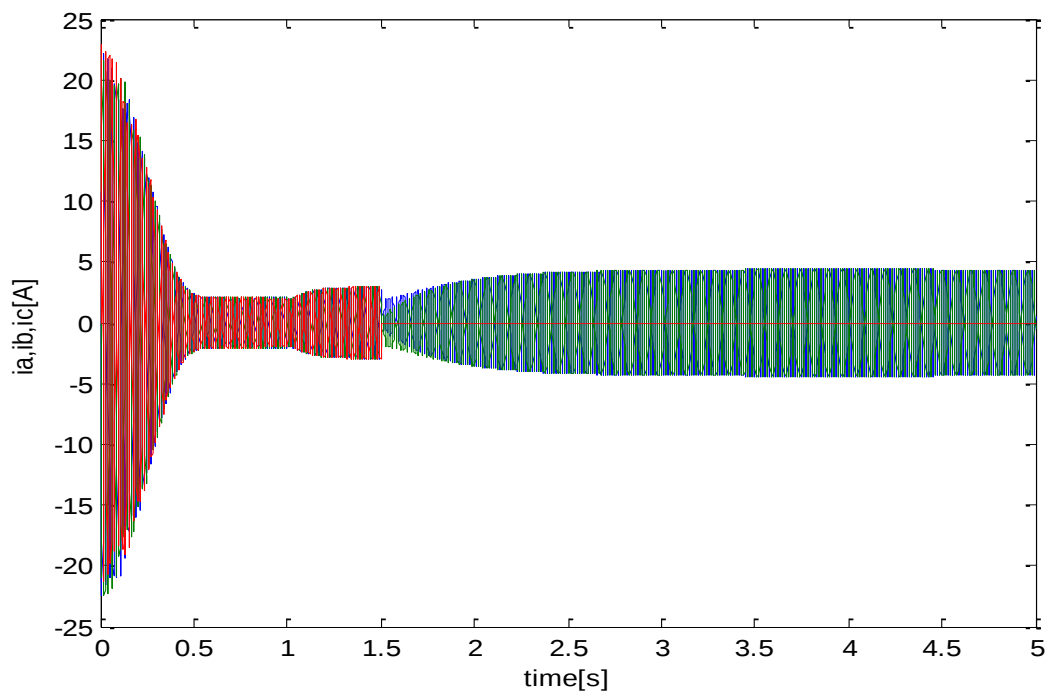


Obr. 5.11 Rotorové proudy při přerušení napájení jedné fáze statoru

Optimalizace parametrů asynchronního motoru

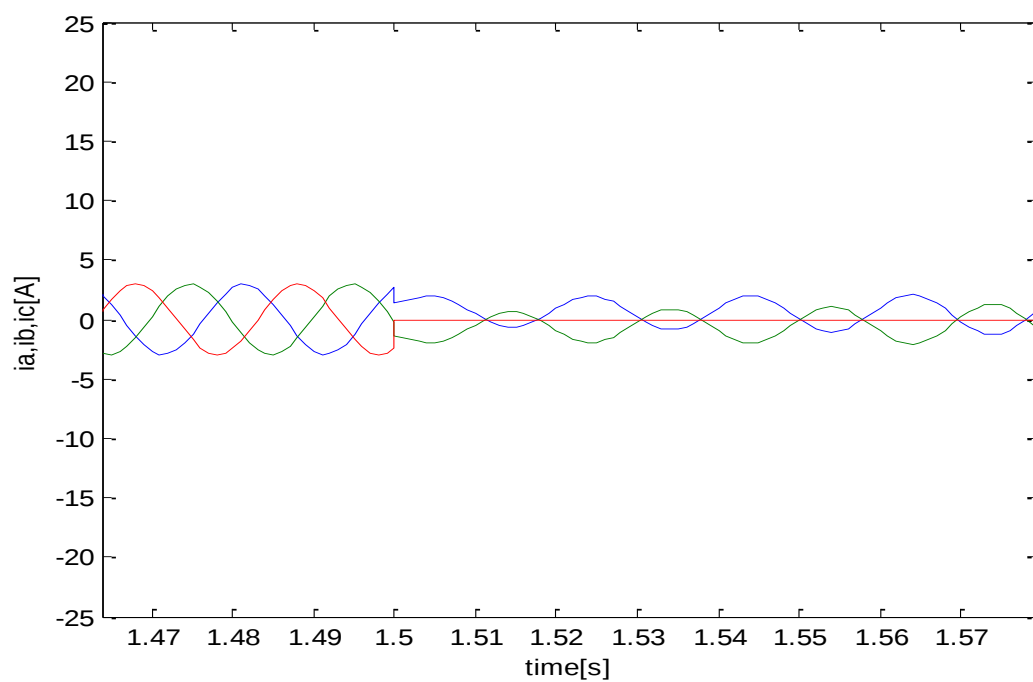


Obr. 5.10 Výřez rotorových proudů při přerušení napájení jedné fáze statoru

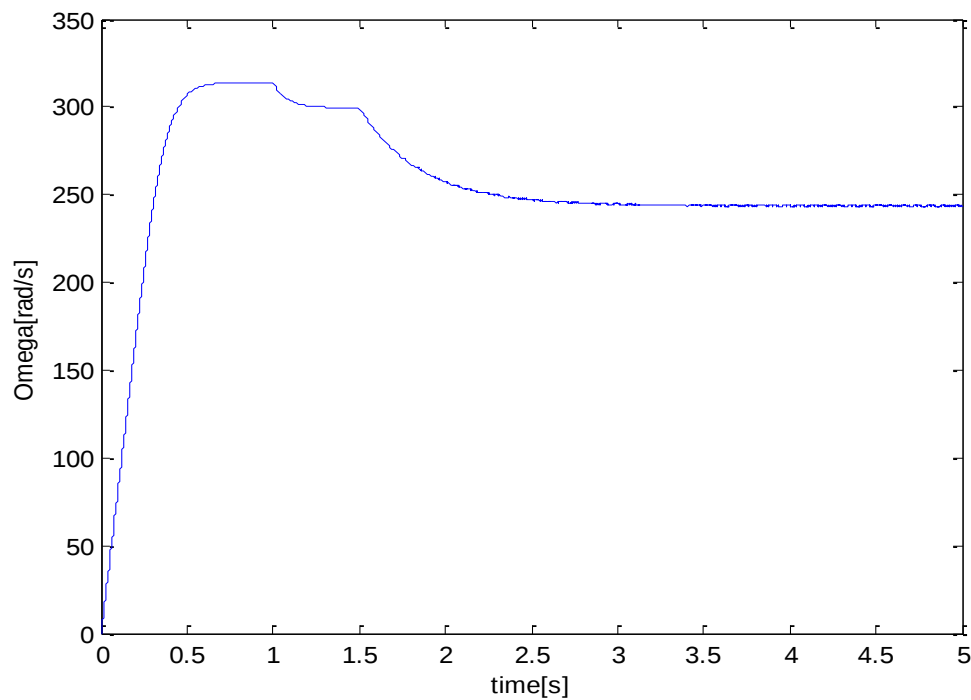


Obr. 5.11 Statorové proudy při přerušení napájení jedné fáze statoru

Optimalizace parametrů asynchronního motoru

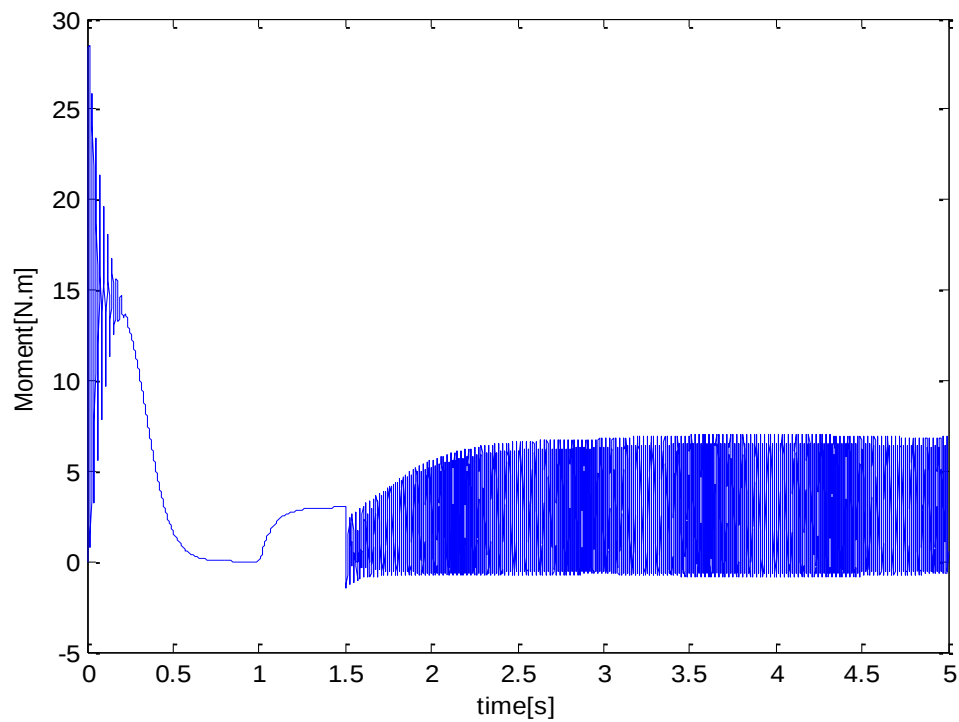


Obr. 5. 12. Výřez obrázku satorových proudů při přerušení napájení jedné fáze statoru

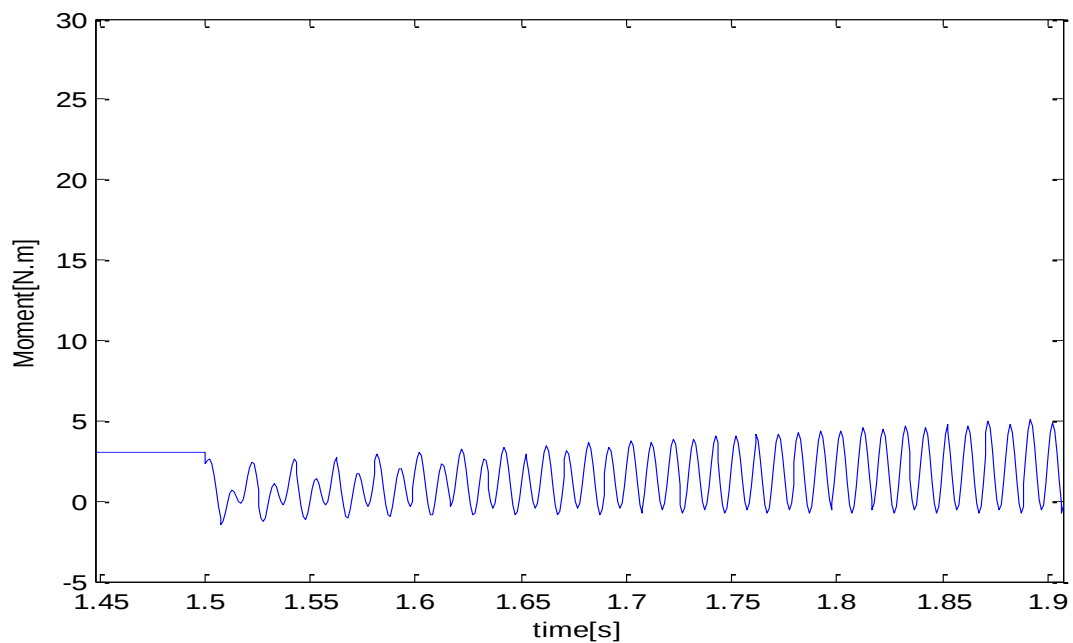


Obr. 5. 13: Rychlost motoru při přerušení napájení jedné fáze statoru

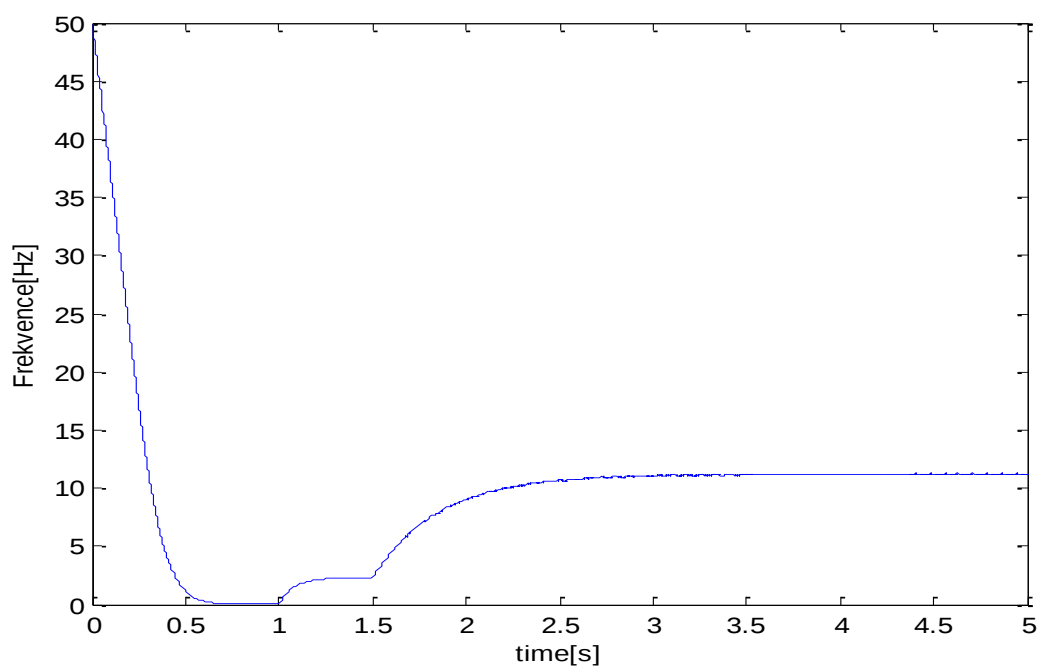
Optimalizace parametrů asynchronního motoru



Obr. 5. 14 Moment motoru při přerušení napájení jedné fáze statoru



Obr. 5. 15 – výřez obr. 5. 14 – moment motoru při přerušení napájení jedné fáze statoru



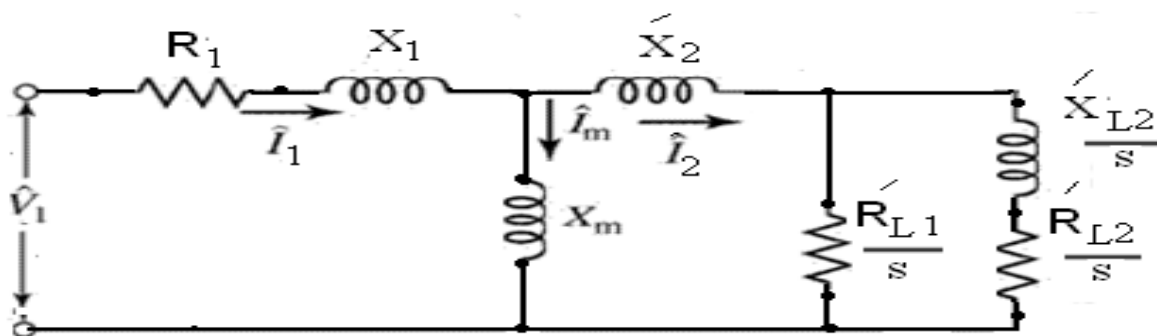
Obr. 5. 16: Frekvence napětí rotoru při přerušení napájení jedné fáze statoru

5. 3 Optimalizace statických parametrů motoru použitím algoritmu umělé inteligence

Optimalizace parametrů prvků náhradního schématu motoru byla provedena pro schéma (A) – motor s hlubokou drážkou a pro jednoduché schéma(B)- normální rotorová klec, za účelem vysvětlení rozdílu mezi nimi tak, aby bylo vidět rozdíly jak v matematikém, tak i grafickém řešení.

5. 3. 1. Ekvivalentní schéma motoru

1) Schéma(A)s hlubokou drážkou, naměřené hodnoty motoru jsou uvedeny v Tab. 5. 3. 1.



Obr. 5. 17 Schema motoru(A) - hluboká drážka

Optimalizace parametrů asynchronního motoru

Tab. 5. 3-1: Naměřené hodnoty motoru

Č.	Rychlost [Otáč/min]	Moment [Nm]	Skluz	Proud [A]	Cos Fi	Účinnost %	Napětí [V]
1	2399	7,848	20,03333	6,047	0,9385	0,505434	398,49
2	2580,4	7,3575	13,98667	5,078	0,9341	0,608979	398,79
3	2655,6	6,867	11,48	4,598	0,9294	0,649261	398,57
4	2702,6	6,3765	9,913333	4,208	0,9249	0,672523	399,46
5	2743,3	5,886	8,556667	3,822	0,919	0,698466	399,35
6	2773,6	5,3955	7,546667	3,502	0,9119	0,712557	398,79
7	2803,7	4,905	6,543333	3,205	0,9016	0,722409	399,64
8	2831,7	4,4145	5,61	2,911	0,8874	0,733035	400,47
9	2854,7	3,924	4,843333	2,638	0,8705	0,739491	400,11
10	2876,4	3,4335	4,12	2,386	0,8467	0,741167	400,11
11	2897,2	2,943	3,426667	2,161	0,8162	0,733319	399,88
12	2916,4	2,4525	2,786667	1,936	0,7722	0,725499	400,03
13	2932,9	1,962	2,236667	1,752	0,7129	0,697932	400,42
14	2953,2	1,4715	1,56	1,571	0,6159	0,679519	400,72
15	2967,8	0,981	1,073333	1,453	0,5111	0,593041	400,97
16	2996,5	0,0981	0,116667	1,333	0,2286	0,145891	401

Pro tuto úpravu tohoto schématu motoru byl v prostředí Matlab/Simulink aplikován Théveninův teorém a podle něho platíplatí pro řešení parametrů motoru následující rovnice:

$$U_t = \frac{jX_m}{jX_m + jX_1 + R_1} \cdot U_{av} \quad (5. 11)$$

$$Z_t = \frac{jX_m \cdot (R_1 + jX_1)}{jX_m + jX_1 + R_1} \cdot U_{av} \quad (5. 12)$$

$$Z_s = \frac{\left[\left(\frac{R_{L1}}{s} + jX_{L2}' \right) \cdot \left(R_{L2}' + \frac{R_{L2}}{s} + jX_2' \right) \right]}{\left[\left(\frac{R_{L1}}{s} + jX_{L2}' \right) + \left(R_{L2}' + \frac{R_{L2}}{s} + jX_2' \right) \right]} \cdot U_{av} \quad (5. 13)$$

$$Z_{eval} = |Z_s + Z_t| \quad (5. 14)$$

$$I_{comp} = \frac{U}{Z_{eval}} \quad (5. 15)$$

$$I_2' = \frac{U_t}{\left(R_{L2}' + \frac{R_{L2}}{s} + jX_2' \right)} \quad (5. 16)$$

$$Z_{eval} = (R_1 + jX_1) + \frac{jX_m \cdot Z_s}{jX_m + Z_s} \quad (5. 17)$$

$$P_{2eval} = \left| 3I_2'^2 \cdot (1-s) \frac{R_{L2}'^2}{s} \right| \quad (5. 18)$$

$$M_{eval} = \frac{60}{2\pi n} \cdot P_{2eval} \quad (5. 19)$$

$$\eta_{eval} = \left| \frac{3I_2'^2 \cdot (1-s) \frac{R_{L2}'^2}{s}}{3U \cdot I \cdot \cos \varphi} \right| \quad (5. 20),$$

kde:

U_t "Theveninovo" napětí,

U_{av} střední hodnota napětí,

Z_t "Theveninova" impedance,

Z_{eval} celková vypočítaná impedance,

I_{copm} je komplexní složka proudu statoru,

I_2' rotorový proud přepočítaný na stator,

P_{2eval} výstupní vypočítaný výkon motoru,

M_{eval} výstupní vypočítaný moment motoru,

η_{eval} vypočítaná účinnost motoru.

Cílová funkce je standardně použita z prostředí Matlab/Simulink a koeficienty cílové funkce jsou následující:

$K1=45$, $K2=25$, $K3=50$.

Pak

$$F_{obj} = K1 \cdot \sum \left(\frac{I}{I_{mod}} - 1 \right)^2 + K2 \cdot \sum \left(\frac{\cos \varphi_{eval}}{\cos \varphi} - 1 \right)^2 + K3 \cdot \sum \left(\frac{\eta_{eval}}{\eta} - 1 \right)^2 \quad (5. 21).$$

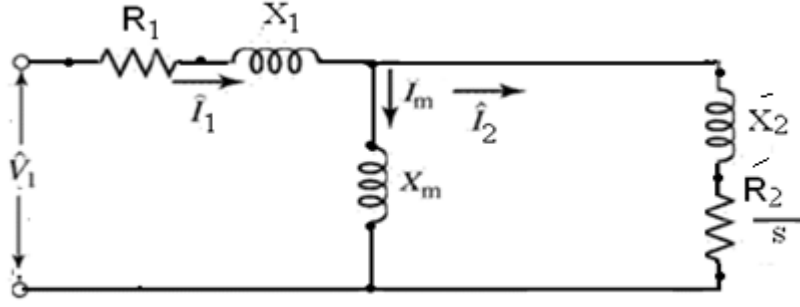
Průběhy změn jednotlivých parametrů podle metody diferenciální evoluce jsou uvedeny v Tab. 5. 3-2.

Optimalizace parametrů asynchronního motoru

Tab. 5. 3-2: Průběhy změn parametrů motoru podle diferenciální evoluce pro schéma [A] v závislosti na čase.

	Čas.interval[S]	R_1 [Ω]	$\hat{R}_{L1}$ [Ω]	x_1 [Ω]	x_{L1} [Ω]	x_2 [Ω]	x_{L2} [Ω]	x_m [Ω]
1	0.0001102	2	2	2	2	2	2	125
2	0.0002204	15.36	21.18	11.63	21.08	16.04	2.31	175.2
3	0.0003306	22.57	11.3	5.79	8.27	15.53	22.85	205.1
4	0.0004408	2.35	23.56	5.16	17.18	8.87	13.86	157
5	0.000551	16.94	6.15	4.75	17.33	24.15	16.61	213.1
6	0.0006612	9.56	24.86	5.75	11.29	19.88	57.5	159.2
7	0.0007714	13.48	25	6.04	1	27.02	21.12	159.6
8	0.0008816	19.39	10.03	5.24	5.84	30	35.96	172.4
9	0.0009918	14.85	17.1	5.02	2.11	28	14.76	152.1
10	0.001102	22.65	10.03	5.38	1	28	22.72	166.4
11	0.0012122	13.15	19.86	5.46	1	28	17.35	195.1
12	0.0013224	12.81	20.17	5.12	1	26.94	20.09	159.3
13	0.0014326	13.13	19.59	5.48	1	28	10.06	173.5
14	0.0015428	12.65	20.15	5.47	1	24.1	25	171.5
15	0.001653	16.12	17.65	5.2	1	28	24.59	169
16	0.0017632	13.48	16.94	5.62	1	24.1	25	181.7
17	0.0018734	15.08	17.93	5.38	1	27.22	25	172.8
18	0.0019836	13.83	18.4	5.41	1	26.58	23.51	169.9
19	0.0020938	11.91	17.79	5.49	1	24.59	15.52	176.5
20	0.002204	13.66	16.59	5.37	1	25.46	16.71	175.3
21	0.0023142	14.17	16.62	5.39	1	26.13	9.4	174.8
22	0.0024244	14.03	16.73	5.37	1	26.49	10.48	176.1
23	0.0025346	14.24	15.8	5.36	1	26.36	3.71	176.9
24	0.0026448	13.6	16.56	5.38	1	25.32	11.3	175.4
25	0.002755	13.21	17.09	5.36	1	26.09	1	174.8
26	0.0028652	13.45	16.39	5.4	1	25.49	1	175.5
27	0.0029754	13.24	16.38	5.39	1	25.33	1	176.1
28	0.0030856	13.64	16.52	5.36	1	26.32	2.32	175.9
29	0.0031958	13.69	16.32	5.36	1	25.98	5.91	176.3
30	0.003306	13.28	16.81	5.39	1	25.7	1	175.2
31	0.0034162	13.21	16.35	3.38	1	25.66	1	176.6
32	0.0035264	13.45	16.42	5.39	1	25.83	1	175.5
33	0.003639	13.31	16.51	5.37	1	25.71	1	176.1
34	0.0037468	13.35	16.59	5.37	1	25.99	1	175.8
35	0.003857	13.28	16.61	5.38	1	25.74	1	175.8
36	0.0039672	13.31	16.53	5.38	1	25.86	1	176.1
37	0.0040774	13.29	16.62	5.38	1	25.81	1	175.8
38	0.0041876	13.37	16.5	5.38	1	25.83	1	175.8
39	0.0042978	13.38	16.46	5.38	1	25.81	1	176.1
40	0.004408	13.34	16.5	5.38	1	25.83	1	176.1
41	0.0045182	13.34	16.52	5.38	1	25.81	1	176.1
42	0.0046284	13.34	16.52	5.38	1	25.82	1	176.1
43	0.0047386	13.34	16.52	5.38	1	25.82	1	176.1
44	0.0048488	13.33	16.53	5.38	1	25.82	1	176.1
45	0.004959	13.33	16.53	5.38	1	25.82	1	176.1

2) Schéma(B) normální rotorová klec:



Obr. 5. 18 Schéma motorus normální rotorovou klecí (B)

Pro toto schéma motoru platí dle Théveninova teorému nasledující rovnice k řešení parametrů motoru:

$$Z_{eval} = \frac{(R_1 + jX_1) + \left[jX_m \cdot \left(\frac{R'_2}{s} + jX'_2 \right) \right]}{jX_m + \frac{R'_2}{s} + jX'_2} \quad (5. 22)$$

$$I_{cp1xeval} = \frac{U_{av}}{Z_{eval}} \quad (5. 23)$$

$$I_{eval} = |I_{cp1xeval}| \quad (5. 24)$$

$$\cos \varphi_{eval} = \frac{\text{Re}(Z_{eval})}{|Z_{eval}|} \quad (5. 25)$$

$$\sin \varphi_{eval} = \frac{\text{Im}(Z_{eval})}{|Z_{eval}|} \quad (5. 26)$$

$$I_{Re_{eval}} = \text{Re}(I_{cp1xeval}) \quad (5. 27)$$

$$I_{Im_{eval}} = \text{Im}(I_{cp1xeval}) \quad (5. 28)$$

$$P_{1_{eval}} = \text{Re}(3 \cdot U_{av} \cdot I_{Re_{eval}}) \quad (5. 29)$$

$$\varphi_{eval} = \frac{180}{\pi} \cdot \tan^{-1} \frac{I_{Im_{eval}}}{I_{Re_{eval}}} \quad (5. 30)$$

$$U_t = \frac{jX_m}{jX_m + jX_1 + R_1} \cdot U_{av} \quad (5. 31)$$

$$Z_t = \frac{jX_m \cdot (R_1 + jX_1)}{jX_m + jX_1 + R_1} \cdot U_{av} \quad (5. 32)$$

$$I_2' = \frac{U_t}{\left(R_2' + \frac{R_2'}{s} + jX_2' \right)} \quad (5.33)$$

$$P_{2eval} = \left| 3I_2'^2 \cdot (1-s) \frac{R_2'^2}{s} \right| \quad (6.34)$$

$$M_{eval} = \frac{60}{2\pi n} \cdot P_{2eval} \quad (5.35)$$

$$I_{eval} = \frac{U}{Z_{eval}} \quad (5.36)$$

$$\eta_{eval} = \left| \frac{3I_2'^2 \cdot (1-s) \frac{R_2'^2}{s}}{3U \cdot I \cdot \cos \varphi} \right|, \quad (5.37)$$

kde:

U_t "Theveninovo" napětí,

U_{av} střední hodnota napětí,

Z_t "Theveninova" impedance,

Z_{eval} celková vypočítaná impedance,

I_{cplx} komplexní hodnota proudu statoru,

I_2' rotorový proud přepočítaný na stator,

P_{2eval} výstupní vypočítaný výkon motoru,

M_{eval} výstupní vypočítaný moment motoru,

η_{eval} vypočítaná účinnost motoru,

I_{eval} vypočítaná hodnota statorového proudu,

$I_{Re_{eval}}$ reálná vypočítaná složka proudu statoru,

$I_{Im_{eval}}$ imaginární vypočítaná složka proudu statoru.

Cílová funkce s koeficienty $K1=10$, $K2=30$, $K3=15$, je:

$$F_{obj} = K1 \cdot \sum \left(\frac{I}{I_{mod}} - 1 \right)^2 + K2 \cdot \sum \left(\frac{\cos \varphi_{eval}}{\cos \varphi} - 1 \right)^2 + K3 \cdot \sum \left(\frac{\eta_{eval}}{\eta} - 1 \right)^2 \quad (5.38).$$

Optimalizace parametrů asynchronního motoru

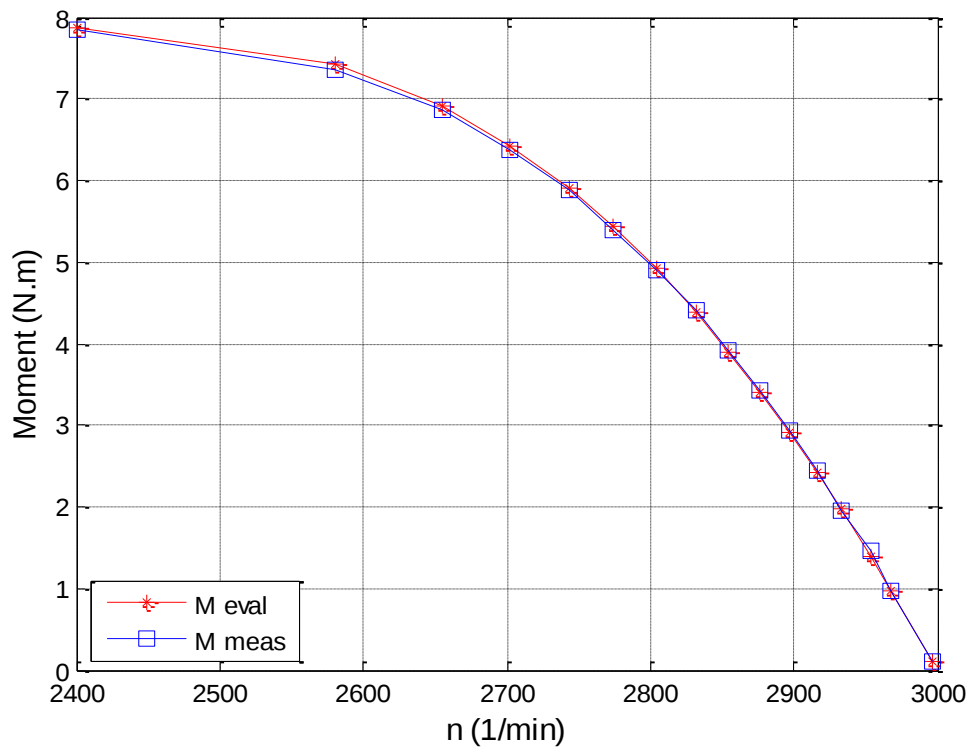
Průběhy změn jednotlivých parametrů motoru získané metodou diferenciální evoluce jsou uvedeny v Tab. 5.1-3.

Tab. 5. 3-3: Průběhy změn parametrů motoru podle diferenciální evoluce pro schéma [B] v závislosti na čase.

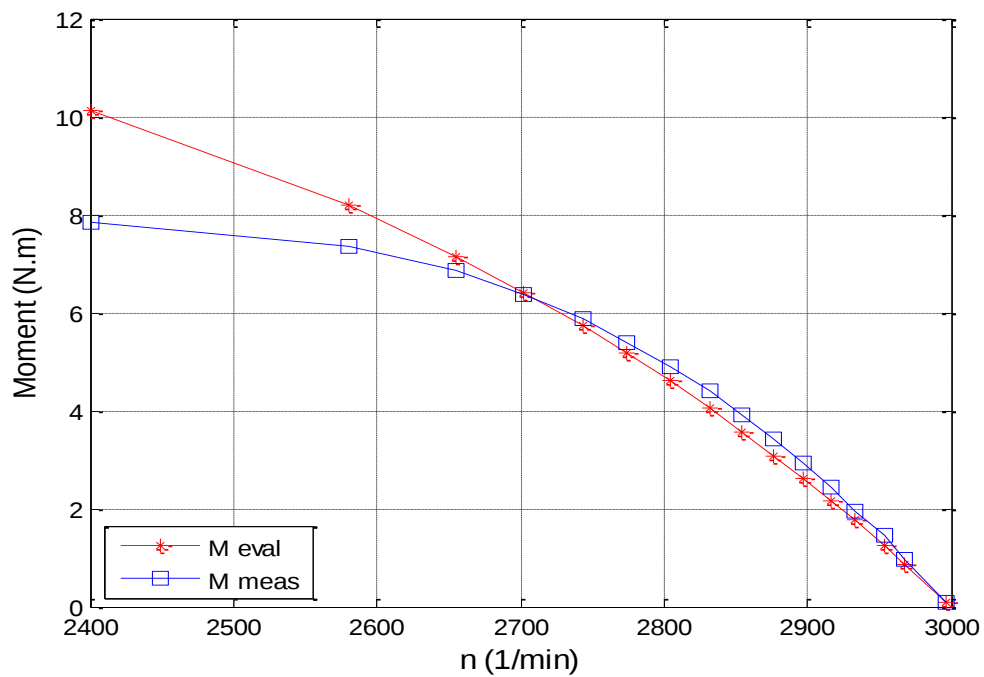
	Čas.interval [s]	r_1 [Ω]	r_2 [Ω]	x_1 [Ω]	x_2 [Ω]	x_m [Ω]
1	0.0001102	2	2	2	2	101
2	0.0002204	1	3	7.56	1	100
3	0.0003306	21.59	5.56	1	1	293.3
4	0.0004408	9.63	7.84	11.75	1	300
5	0.000551	11.1	6.07	4.47	7.03	300
6	0.0006612	9.63	5.35	4.47	3.95	274.6
7	0.0007714	9.63	5.15	1	6.97	274.6
8	0.0008816	2.65	5.55	1	4.56	206.7
9	0.0009918	3.44	5.08	1	1	177.1
10	0.001102	4.54	4.4	3.26	6.69	210.3
11	0.0012122	6.06	4.72	6.07	4.22	228.3
12	0.0013224	6.06	4.61	6.05	4.66	232.3
13	0.0014326	5.66	4.56	3.08	3.98	205.5
14	0.0015428	6.34	4.72	5.33	1.18	209
15	0.001653	6.42	4.64	6.65	1.14	216.4
16	0.0017632	5.87	4.73	2.29	1.18	197.7
17	0.0018734	6.68	4.51	4.24	1	204.7
18	0.0019836	6.34	4.65	6.43	1	212.5
19	0.0020938	6.96	4.66	1.87	1.11	203
20	0.002204	6.96	4.76	1	1	200.9
21	0.0023142	5.7	4.71	5.51	1	206.6
22	0.0024244	5.8	4.67	4.86	1	203.8
23	0.0025346	5.99	4.64	5.98	1	208.2
24	0.0026448	5.95	4.61	5.03	1	202.5
25	0.002755	6.16	4.65	4.87	1	204.7
26	0.0028652	6.16	4.65	4.87	1	204.7

Výsledky řešení charakteristik motoru získané metodou diferenciální evoluce jsou graficky kreslené takovým způsobem, aby byl vidět rozdíl mezi naměřenými (meas) a vypočítanými hodnotami (eval).

5.3.2 Simulační výsledky

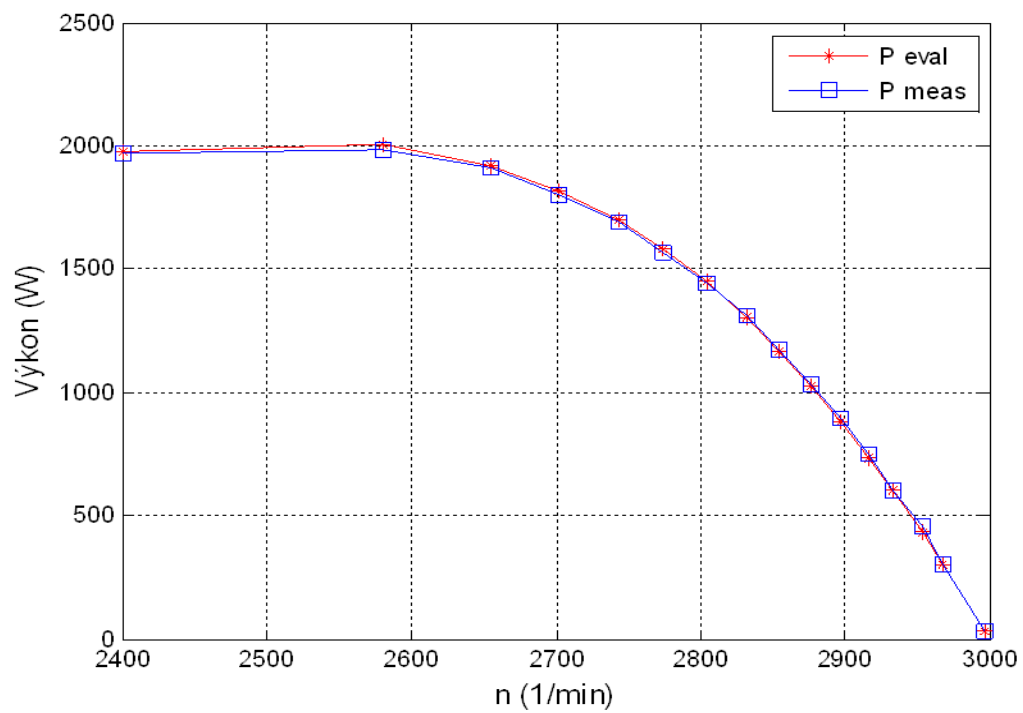


Obr. 5. 19 Moment motoru – schéma A

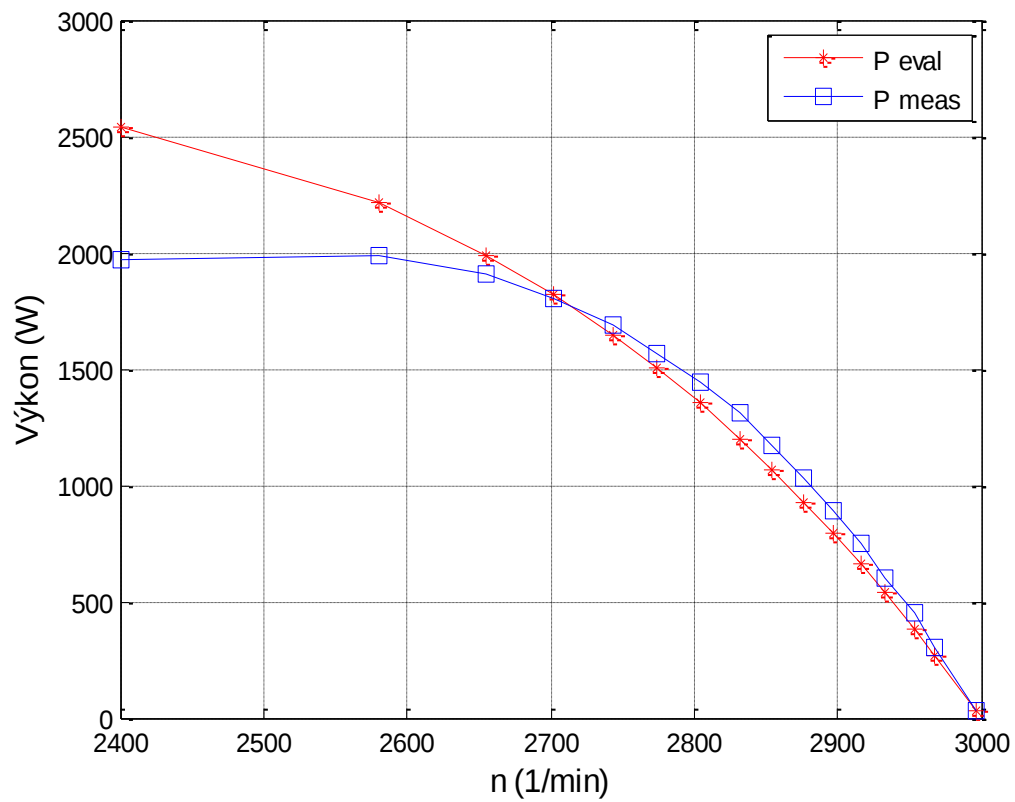


Obr. 5. 20 Moment motoru – scéma B

Optimalizace parametrů asynchronního motoru

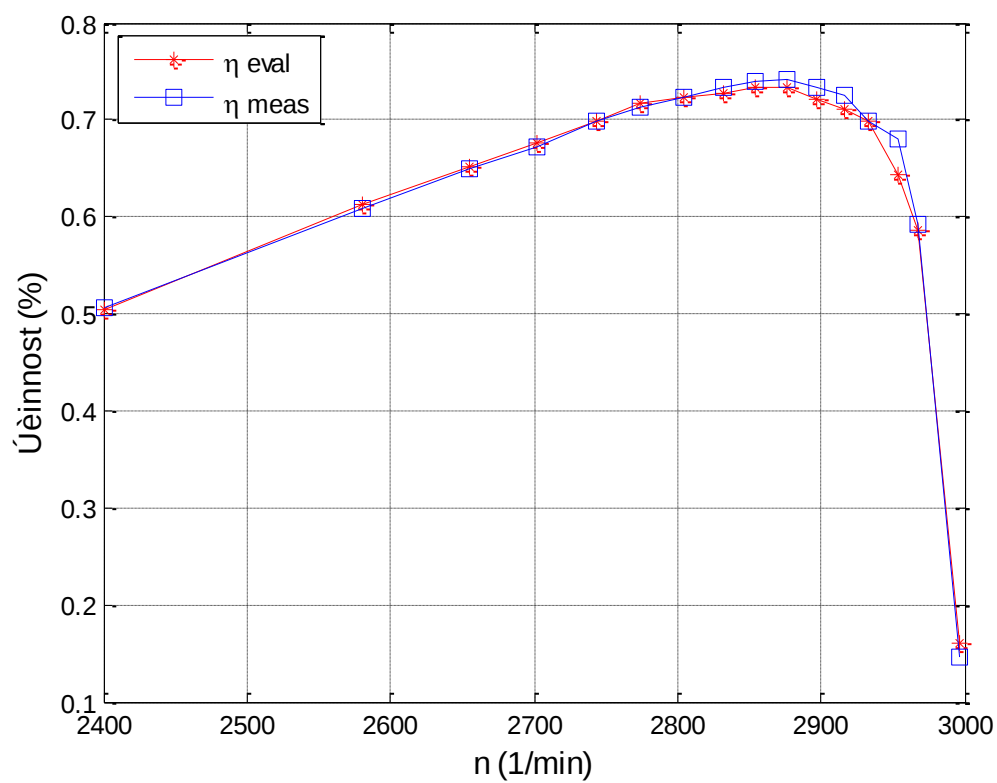


Obr. 5. 21 Výkon motoru – schéma A

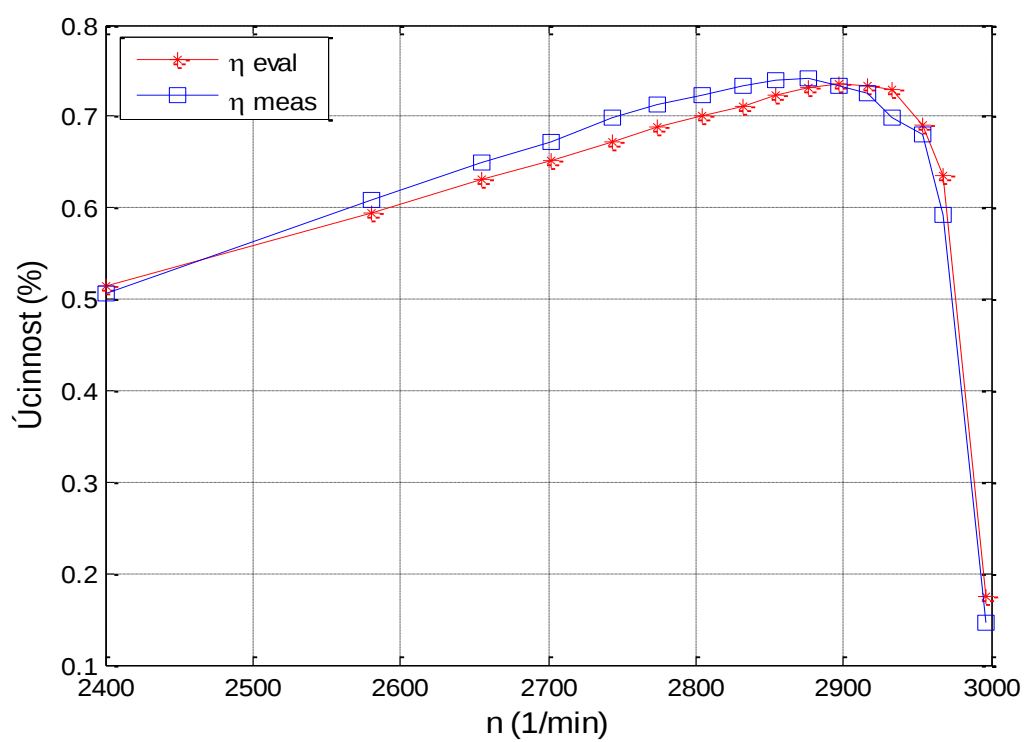


Obr. 5. 22 Výkon motoru – schéma B

Optimalizace parametrů asynchronního motoru



Obr.5. 23 Účinnost motoru – schéma A



Obr. 5. 24 Účinnost motoru – schéma B

5. 4 Optimalizace dynamických parametrů motoru použitím algoritmu umělé inteligence

5. 4. 1 Stručný technický popis optimalizační metody

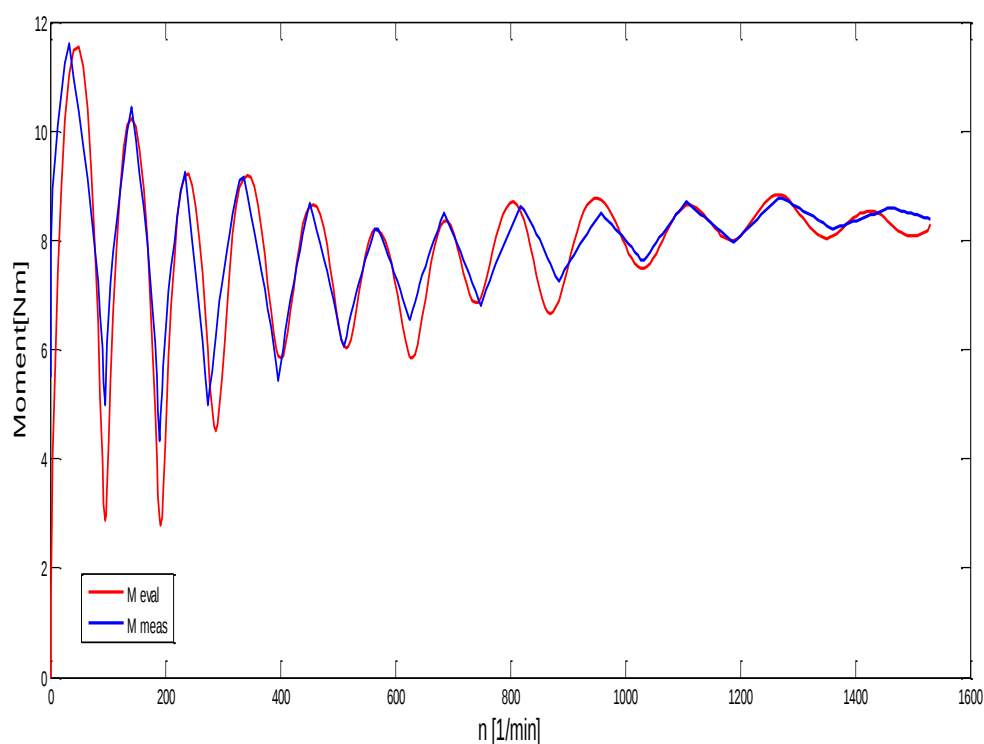
Začátkem této práce jsem uvedl výhody použití asynchronního motoru v průmyslu. Motor se nejčastěji používá jako pohonná jednotka, protože má velkou spolehlivost, je málo poruchový a ve srovnání s ostatními pohony je levnější. Kvůli těmto vlastnostem začaly práce pro zlepšení jeho vlastností. Tyto práce se dělají proto, aby se zmenšila cena motoru nebo zvýšil moment motoru nebo pro zmenšení elektrického příkonu, který motor spotřebuje. Totéž platí pro zlepšení jeho dynamických vlastností, atd., a také proto, aby motor mohl pracovat spolehlivě v různých těžkých provozních podmínkách.

5. 4. 2 Odhad parametrů motoru v laboratoři

Při odhadu následné optimalizací jsme dopěli k závěru, že konstantní hodnoty parametrů náhradního schématu motoru odpovídají pouze ustálenému stavu. Pro přechodné elektromechanické děje, jako je rozběh motoru, je nutné uvažovat parametry proměnné v čase. Na základě toho jsem odhadl proměnné hodnoty parametrů ve vybraných časových úsecích přechodného děje (rozběh motoru). Výsledky jsou uvedeny v Tab. (5. 4-1).

Tab. 5. 4-1: Parametry motoru

Čas.interval[s]	$x_1[\Omega]$	$x_2[\Omega]$	$x_m[\Omega]$	$R_1[\Omega]$	$R_2[\Omega]$
0.0109	5.1496	7.0964	133.9524	12.6	5
0.0219	3.2342	4.8670	131.2520	11.2	3.6
0.032	3.3912	3.9878	131.0008	8.5	5.2
0.042	3.3912	4.4902	133.0104	12	4.7
0.053	3.7052	4.3018	129.6820	12	4.2
0.06	3.3912	3.7994	132.0056	12	4.1
0.0737	3.1714	3.2656	145.2250	11	4.6
0.085	3.3912	2.0096	134.0152	12.2	3.4
0.096	2.9516	2.3550	136.4330	10	4
0.1068	3.3912	2.7004	138.0030	11.8	3.8
0.1185	3.5796	3.2028	140.7976	10	4.9
0.1298	3.8308	3.2342	139.5730	12.6	4.7
0.142	3.3912	3.4540	129.9960	12	4
0.154	3.3912	2.7004	132.0056	11.5	4.8
0.1663	3.3912	2.1980	140.9860	11.9	4.3
0.179	3.3912	1.7898	142.9956	12	4.6
0.192	3.1400	1.6642	139.2590	12.7	4.95
0.2048	3.3912	2.0096	138.0030	12	4.7
0.218	3.3912	2.2922	134.9886	12	4.9
0.232	3.3912	2.5120	132.0056	12	5.2
0.2455	3.3912	2.0096	136.9982	12	5.3
0.261	3.4854	1.7898	138.9136	12.5	5.4
0.278	3.8308	2.3550	139.5730	12.4	5.2
0.295	3.3912	1.4130	141.9908	12.7	5.3

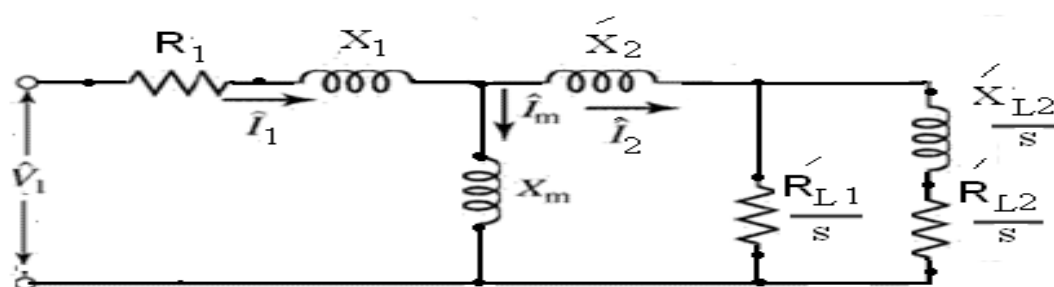


Obr. 5. 25 Rozběh motoru – simulace v prostředí Matlab/Simulink

5. 4. 3 Proces optimalizace

V této kapitole byla pro optimalizaci dynamických parametrů použita stejná metoda, jako pro optimalizaci parametrů v ustálených režimech práce, tedy metoda diferenciální evoluce. Pro vypočítání parametrů motoru bylo použito následující schéma motoru s hlubokou drážkou, uvedené na obr. 5. 26.

Výše bylo prokázáno, že lepší parametry má motor s hlubokou drážkou, z toho důvodu byla optimalizace dynamických parametrů provedena pro tento typ motoru.



Obr. 5. 26 Schéma motoru použité pro optimalizaci parametrů

Optimalizace parametrů asynchronního motoru

Zde:

- R_1 statorový činný odpor,
- X_1 statorová reaktance,
- X_m hlavní (magnetizační) reaktance,
- R_{L2} rotorový odpor,
- R_{L1} rotorový odpor,
- X_2 rotorová reaktance,
- X_{L2} rotorová reaktance,
- s skluz.

Naměřené hodnoty pro tohoto schéma jsou uvedeny v Tab. 5. 4-2.

Tab. 5. 4-2: Naměřené hodnoty optimalizovaného motoru.

Č.	Rychlost [min ⁻¹]	Moment [Nm]	Skluz [%]	Napětí [V]
1	12.82	6	099.57	398,49
2	25.64	7	099.15	398,79
3	38.64	9	098.71	398,57
4	70.51	11.7	097.65	399,46
5	115.38	8	096.15	399,35
6	121.79	6	95.94	398,79
7	134.61	4.9	095.51	399,64
8	160.25	7	094.66	400,47
9	166.66	10	094.44	400,11
10	173.07	10.5.	094.23	400,11
11	205.12	5.6	93.16	399,88
12	217.94	4.3	092.74	400,03
13	224.35	6.5	092.52	400,42
14	249.99	9.3	091.67	400,72
15	294.86	4.9	090.17	400,97
16	307.68	7	089.74	401
17	320.5	9.3	089.32	401
18	358.96	5.4	088.03	401
19	397.42	9.8	086.75	401
20	448.7	5.8	085.04	401
21	467.93	8.5	084.40	401
22	516.8	6.1	082.77	401
23	538	8.3	082.07	401
24	576	6.5	080.80	401
25	615	8.5	079.50	401
26	653	6.8	078.23	401
27	679.46	8.7	077.35	401
28	743	7.1	075.23	401
29	782.12	8.4	073.93	401
30	833.3	7.6	072.22	401
31	858.94	8.65	071.37	401
32	910.22	7.8	069.66	401
33	961.5	8.7	067.95	401
34	999.96	8.2	066.67	401
35	1051.24	8.8	064.96	401
36	1089.7	8.4	063.68	401
37	1140.98	8.8	061.97	401
38	1500	9.3	050.00	401
39	1750	9.7	041.66	401
40	2000	9.55	033.33	401
41	2250	9	25	401
42	2500	7.4	016.67	401
43	2750	4	8.3	401
44	2923.33	0	2.56	401

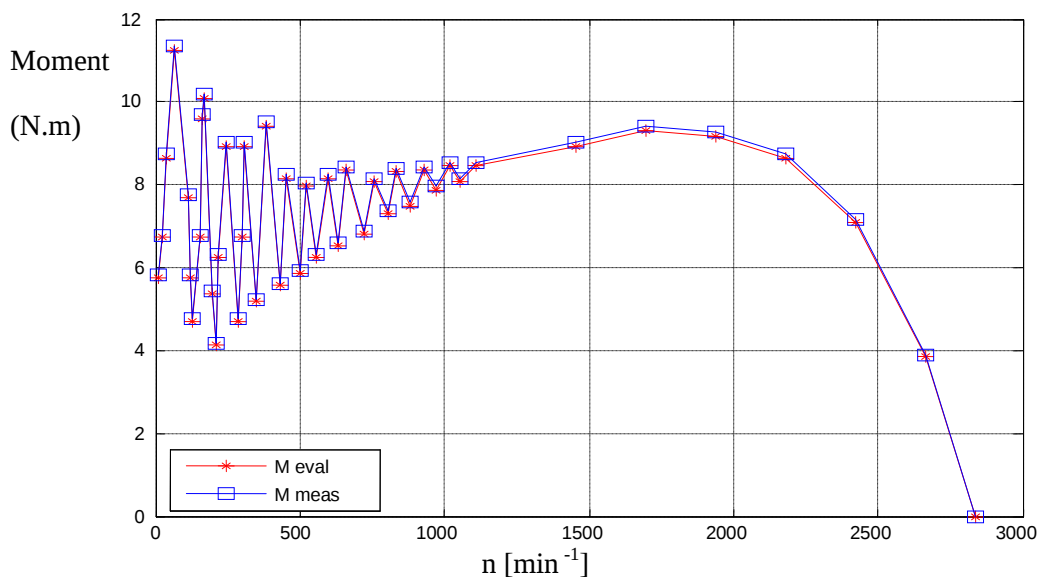
Optimalizace parametrů asynchronního motoru

Optimalizace metodou diferenciální evoluce probíhala v tolika cyklech, kdy již nedocházelo k malým změnám dosažených hodnot parametrů prvků náhradního schématu motoru. Tyto změny jsou hodnoceny v následujícím jako „přesnost“. Výsledky optimalizace jsou v tabulkách a graficky znázorněny podle přesnosti, např. přesnost 99% znamená, že změny parametrů v následujícím cyklu jsou menší, než 1%.

Výsledky jednotlivých optimalizací jsou uvedeny v Tab. 5. 4-3 a Tab. 5. 4-4 a na obr. 5. 27 až 5. 30.

Tab. 5. 4-3 Průběhy změn jednotlivých parametrů motoru s přesností 99%

	Čas.interval[s]	R_1 [Ω]	R_{L1} [Ω]	R_{L2} [Ω]	x_1 [Ω]	x_2 [Ω]	x_{L2} [Ω]	x_m [Ω]
1	0.0002724375	2	2	2	2	2	2	125
2	0.000544875	11.99;	11.93	11.63	8.53	5.67	1.53	122.6
3	0.0008157312	13.49	6.58	5.79	3.73	5.84	22.85	131.5
4	0.00108975	13.47	13.49	6.58	3.47	5.59	7.09	121.7
5	0.0013621875	12.03	11.96	5.07	3.14	8.72	17.75	146.7
6	0.0016346125	10.68	11.9	5.75	1	10	24.92	142.8
7	0.0019070625	11.32	14	3.4	6.26	10	2 5	119.7
8	0.0021795	11.62	14	4.5	6.13	9.07	5.88	145.9
9	0.0024519375	10.5	14	4.32	7.71	9.07	1	160
10	0.0002724375	10.36	14	3.82	5.15	9.4	20.2	129.1
11	0.0029968125	11.35	14	2.39	10	9.81	24.06	119.1
12	0.00326925	12.33	14	2.71	10	9.76	25	133.5
13	0.0035416875	9	14	2.18	10	9.73	14.96	113.6
14	0.003814125	9	11.43	2.64	10	9.64	10.57	141
15	0.0040865625	11.7	12.54	5.35	1	10	23.9	110.7
16	0.004359	9	10.49	4.79	1	10	25	100

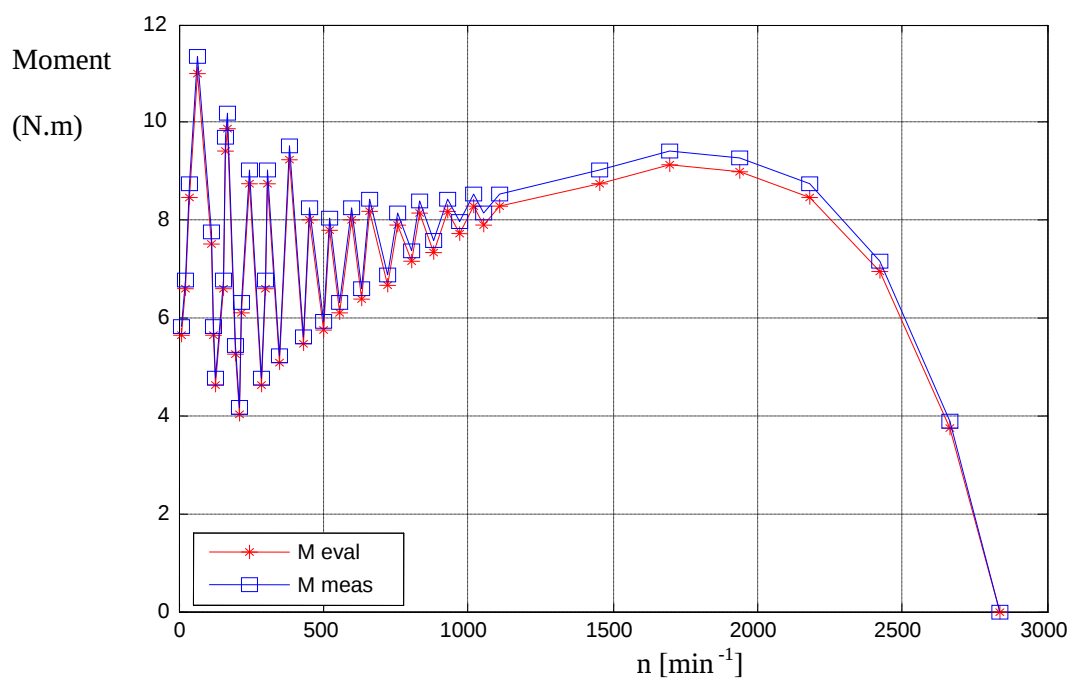


Obr. 5. 27 Moment optimalizovaného motoru s přesností 99%

Optimalizace parametrů asynchronního motoru

Tab. 5. 4-4 Průběhy změn jednotlivých parametrů motoru s přesností 97%

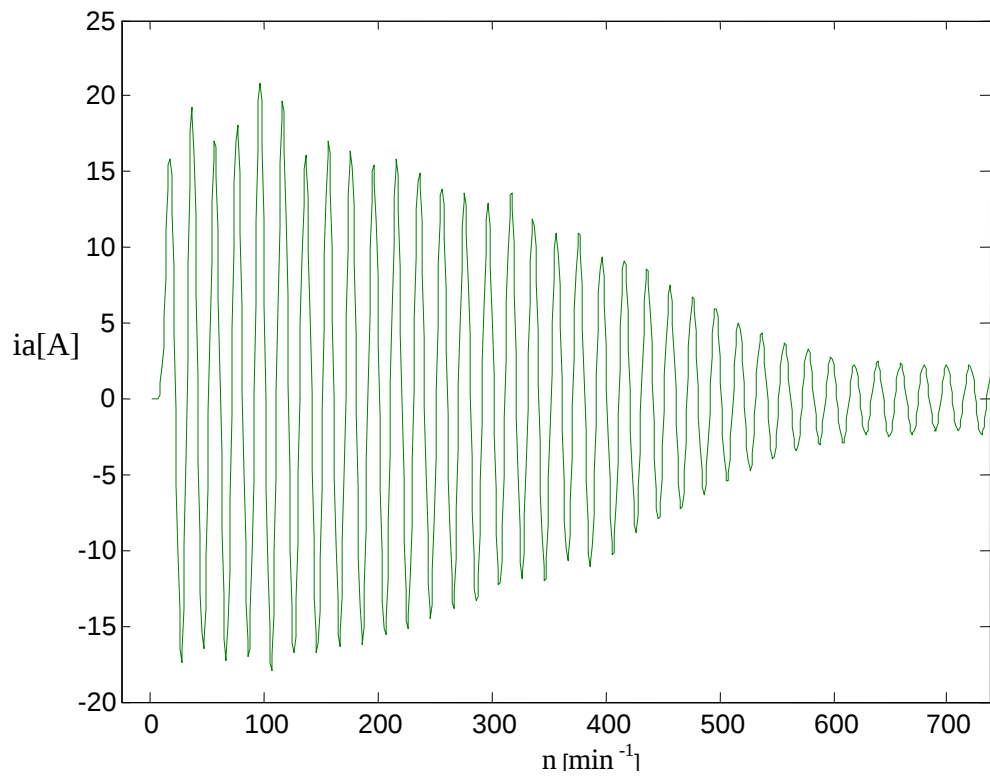
	Čas.interval[s]	R_1 [Ω]	R_{L1} [Ω]	R_{L2} [Ω]	x_1 [Ω]	x_2 [Ω]	x_{L2} [Ω]	x_m [Ω]
1	0.0001102	2	2	2	2	2	2	125
2	0.0002204	11.99;	11.93	11.63	8.53	5.67	1.53	122.6
3	0.0003306	13.49	6.58	5.79	3.73	5.84	22.85	131.5
4	0.0004408	13.47	12.7	23.54	3.47	5.59	7.09	121.7
5	0.000551	12.03	11.96	5.07	3.14	8.72	17.75	146.7
6	0.0006612	11.53	8.66	3.43	4.6	7.17	14.43	112.3
7	0.0007714	10.68	11.9	5.75	1	10	24.92	142.8
8	0.0008816	9.6	10.48	4.83	1.91	8.84	25	140.8
9	0.0009918	10.53	14	5.82	1.47	10	25	160
10	0.001102	12.06	14	6.79	1	9.94	15.97	160
11	0.0012122	11.59	14	8.63	1	9.4	3.4	159.6
12	0.0012122	11.59	14	8.63	1	9.4	3.4	159.6



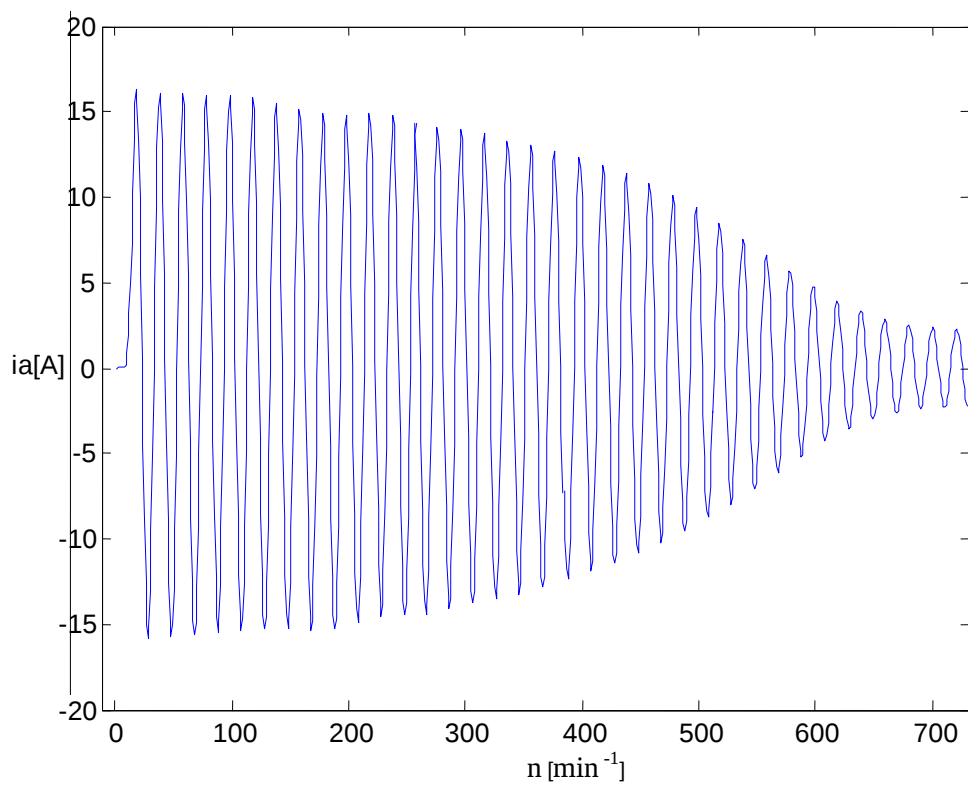
Obr. 5. 28 Moment optimalizovaného motoru s přesností 97%

Na obr. 5. 29 a 5. 30 je pak vidět, že proud se v případě proměnných parametrů také oproti proudu motoru s konstantními hodnotami parametrů prvků náhradního schématu.

Optimalizace parametrů asynchronního motoru



Obr. 5. 29 Proud jedné fáze motoru s proměnnými parametry prvků náhradního schématu motoru v závislosti na otáčkách



Obr. 5. 30 Proud jedné fáze motoru s konstantními parametry v závislosti na otáčkách

6. PŘÍNOSY DISERTAČNÍ PRÁCE

Pro zlepšování vlastností asynchronních motorů v konkrétních technických aplikacích, zejména v řízených pohonech, je důležité znát skutečné parametry prvků náhradního schématu motoru. Jedním z moderních prostředků, jak tyto hodnoty získat z neúplných experimentálních dat, je využití metod umělé inteligence.

Obecně se má za to, že metoda diferenciální evoluce je jedním z nejlepších typů genetických algoritmů pro řešení problémů se skutečnou hodnotou proměnné. Podstatnými výhodami diferenciální evoluce je jednoduchá struktura, snadné použití, rychlost a robustnost.

Předložená disertační práce prokázala možnost využití algoritmu diferenciální evoluce pro nalezení nejpravděpodobnějších hodnot parametrů prvků náhradního schématu skutečného stroje.

Hlavní teoretické přínosy disertační práce je možno shrnout do následujících bodů:

- vytvoření metodiky pro identifikaci neznámých parametrů elektrických strojů z běžně dostupných dat, založené na aplikaci algoritmu diferenciální evoluce,
- ověření hypotézy o nekonstantních parametrech prvků náhradního schématu asynchronního motoru v dynamických režimech jeho práce,

Přínosy disertační práce pro technickou praxi je možno shrnout do následujících bodů:

- vytvoření simulačního modelu asynchronního motoru v prostředí Matlab/Simulink a ověření jeho funkčnosti,
- získání „know-how“ v oblasti aplikace algoritmu diferenciální evoluce na stanovené problémy konstrukce a provozu asynchronních motorů.

V oblasti pedagogické pak výsledky práce představují přínos využitelný ve všech stupních studia konstrukčních studijních oborů vysokých škol technického zaměření, především pak v možnostech implementace nových metod umělé inteligence na řešení technických problémů.

7. ZÁVĚR

Cílem disertační práce byla nalezení optimalizační metody pro stanovení skutečných parametrů prvků náhradního schématu asynchronního motoru. Pro tento účel byl odvozen matematický model asynchronního motoru. Tento matematický model byl odvozen takovým způsobem, aby přesně popisoval chování motoru a byl posléze aplikován v prostředí Matlab/Simulink. Provedené simulace potom umožnily získat grafické znázornění parametrů motoru, které popisují chování motoru v určitých podmínkách. Jako optimalizační metodu jsem zvolil a používal algoritmus diferenciální evoluce. Tato volba byla učiněna s vědomím mnoha pozitiv, jež přinesla. Algoritmus diferenciální evoluce patří časově rozhodně k nejnovějším typům algoritmů. Její obecný princip je již vyjádřen v jejím názvu, tedy ve slovu evoluční. Díky principu evoluce v případě tohoto algoritmu, kde rodiče plodí potomky, ti to podléhají mutaci a dále se cyklicky zbavují rodičů a nevhodných potomků, a pouze lepší potomci jsou dále rodiči, je možno dosáhnout kýženého cíle a dost zásadních výhod. Mezi ty nejzásadnější patří jednoduchost programování, rychlost dané metody, velmi přesné výsledky a kupříkladu i schopnost se vypořádat s některými patologickými jevy některých funkcí. Proto můžeme algoritmus diferenciální evoluce zařadit k umělé inteligenci.

8. LITERATURA

- [1] STRÁDAL, O. *Adaptace parametrů simulačního modelu asynchronního stroje*. Pardubice: Univerzita Pardubice, 2008. 291 pages.
- [2] SAMEŠ, Miroslav. *Multikriteriální optimalizace asynchronního stroje*. Ostrava: VŠB - TU , 2002. 15 pages.
- [3] GAJDÚŠEK ,Pavel. *Přehled metod řízení asynchronního motoru*. Brno: FEKT, VUT, 2005. 17 pages.
- [4] PAŘÍZEK, J. *Analýza a optimalizace energetických parametrů asynchronních strojů malého výkonu*. Brno: FEKT , VUT , 2011. 73 pages.
- [5] [MATUCHA, Tomáš. *Nezávislý nízkonapěťový trakční asynchronní pohon*. Brno: FEKT ,VUT ,2008. 93 pages.
- [6] BAJREKTAREVIČ, Edina. *Parameters identification of induction motor using a genetic algorithm* . Morgantown -West Virginia: West Virginia University, 2002. 112 pages.
- [7] LETTL, Jiří., RATZ, Robert. *Príspevek k vektorovému řízení s uvažováním nelinearit systému*. Praha: ČVUT Fakulta elektrotechnická, In *Sborník celostátní konference EPVE* 2006. 6 pages.
- [8] JANUŠKA, Jiří. *Implementace identifikačních algoritmů v signálovém procesoru*. Brno: FEKT ,VUT, 2008. 73 pages.
- [9] SKALKA, Miroslav., SCHRIER, Luděk., JANDA, Marcel., ČESTMÍR, Ondrůšek . *Induction machine operation mode type effect onto the losses*. Brno: UVEE FEEC BUT, 2009. 8 pages. ISBN: 978-80-214-3975- 7.
- [10] SKALA, Bohumil. *Simulace a měření na asynchronním stroji v přechodovém stavu*. Plzeň: FEL, ZČU 2006. 33 pages.
- [11] KUBÍN, Jiří. *Způsoby frekvenčního řízení asynchronního motoru z hlediska dynamiky*. Liberec: Fakulta mechatroniky a mezioborových inženýrských studií, 2006. 33 pages.
- [12] GARTNER, Jiří., HALÁMKA, Zdeněk. *Regulace rychlosti asynchronního stroje změnou napětí* .Praha: ČVUT FEL, 2000. 6 pages.
- [13] SKALKA, Miroslav, BOK, Roman., ČESTMÍR, Ondrůšek. *Rozložení magnetického pole v elektrických strojích-ČÁST 1*. Brno: FEKT ,VUT, 2007. 13 pages. ISSN 1213-1539.
- [14] KADANÍK, Petr. *Řízení otáček asynchronního motoru bez použití čidla rychlosti*. Praha: ČVUT FEL, In *Sborník celostátní konference Brno* 1998. 6 pages.
- [15] ŠTĚPANEK, Libor. *Optimalizace účinnosti elektrického pohonu s AM pomocí fuzzy logiky*. Ostrava: FEI, VŠB, 2003. 6 pages.
- [16] SABAN, Mohammed. *Analýza elektrických strojů používání soustředěného parametrického modelu*. Brno: FEKT , VUT, 2008. 112 pages.
- [17] BERNAT, Petr. *Negativní vlivy měničů frekvence na asynchronní motor*. Ostrava: FEI, VŠB-TU , 2006. 42 pages.

- [18] KLUÁČEK, J. *Návrh a analýza vysokorychlostního asynchronního motoru*. Brno: FEKT, VUT, 2011. 73 pages.
- [19] ŠUBRT, J. *Elektrické regulační pohony II*. Brno: VUT, 1987. 180 pages. ISBN 55-582-87.
- [20] JAVŮREK, Jiří. *Regulace moderních elektrických pohonů*. Praha: Grada Publishing, a. s., 2003. 264 pages. ISBN:80-247:0507-9
- [21] RYDLO, Pavel. *Moderní regulované elektrické pohony a servopohony*. Liberec: Technická univerzita, 2006. 36pages.
- [22] MATIJA, Sokola. *Vector control of induction machines using improved motor models*. Liverpool: John Moores university, 1998. 6 pages.
- [23] CHEE-Mun, Ong. *Dynamic simulation of electric machinery using MATLAB/Simulink*. West Lafayette: Purdue University, 1998. 615 pages. ISBN: 0-13-723785-5.
- [24] ZELINKA, Ivan. *Úvod do fraktální geometrie, buněčných automatů*. Zlín: Aplikovaná informatika, 1999. 189 pages.