

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

**Způsoby určování proudu při rozběhu u asynchronního
stroje s kotvou nakrátko**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2019/2020

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Martin KOPSA**
Osobní číslo: **E17B0064P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektrotechnika a energetika**
Téma práce: **Způsoby určování proudu při rozběhu asynchronního stroje s kotvou nakrátko**
Zadávající katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

Zásady pro vypracování

Pro zvolený typ drážky určete průběh proudu při rozběhu stroje minimálně pomocí dvou níže popsaných metod a jejich průběhy porovnejte.

1. Seznamte se s problematikou speciálních tvarů drážek asynchronních strojů a vlivem na rozběh stroje.
2. Prostudujte v literatuře sestavení a výpočet parametrů hluboké drážky pomocí náhradního obvodu.
3. Využijte definici kružnicového diagramu pomocí kruhové inverze impedanční přímky a sestrojte „kružnicový“ diagram s uvažováním vlivu hluboké drážky.
4. Sestavte pomocí dodaných rovnic dynamický model asynchronního stroje v prostředí Simulink včetně modelu hluboké drážky.

Rozsah bakalářské práce:
Rozsah grafických prací:
Forma zpracování bakalářské práce:

30 – 40 stran
podle doporučení vedoucího
tištěná/elektronická

Seznam doporučené literatury:

1. Bartoš, Václav. Teorie elektrických strojů. 1. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2006. 230 s. ISBN 80-7043-509-7.
2. Kopylov, Igor Petrovič aj. Stavba elektrických strojů. 1. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1988. 685 s.

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Jan Laksar

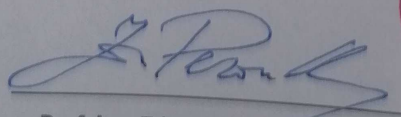
Regionální inovační centrum elektrotechniky

Datum zadání bakalářské práce:

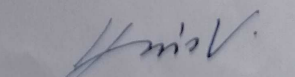
4. října 2019

Termín odevzdání bakalářské práce:

11. června 2020


Prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.
děkan




Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 4. října 2019

Abstrakt

Předkládaná bakalářská je zaměřena na řešení různých způsobů určování proudu při rozběhu asynchronního stroje s kotvou nakrátko

Klíčová slova

Rozběhový proud, 3-f asynchronní motor, skin efekt, kružnicový diagram, matematické modelování, Matlab, Simulink ...

Abstract

The bachelor thesis presents the solution of various methods of current determination during the start-up of an asynchronous machine with a squirrel-cage.

Key words

Starting current ,three-phase induction motor, skin effect, magnetic flux, mathematical modelling, Matlab, Simulink ...

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou 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 bakalářské práce, je legální.

.....

podpis

V Ústí nad Orlicí dne 10.6.2020

Martin Kopsa

Poděkování

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

Obsah

| | |
|---|----|
| Úvod | 9 |
| Seznam symbolů a zkratk | 10 |
| 1 Teoretická část | 11 |
| 1.1 Úvod do elektrických strojů..... | 11 |
| 1.2 Asynchronní stroj..... | 11 |
| 1.2.1 Asynchronní stroj s kotvou nakrátko..... | 11 |
| 1.2.2 Vznik točivého pole | 12 |
| 1.2.3 Náhradní schéma:..... | 13 |
| 1.2.4 Skinefekt..... | 13 |
| 1.2.5 Kružnicový diagram: | 17 |
| 1.3 Matematické modelování přechodných dějů | 18 |
| 1.3.1 Metoda prostorových fázorů..... | 19 |
| 2 Praktická část..... | 22 |
| 2.1 hluboká drážka zadaná vedoucím proukem: | 22 |
| 2.1.1 Parametry stroje..... | 22 |
| 2.1.2 Výpočet činitelů k_r , k_x hluboké drážky pomocí přibližné metody..... | 23 |
| 2.1.3 Výpočet činitelů k_r , k_x obecnou metodou..... | 23 |
| 2.1.4 Výstupy ze Simulink modelu stroje | 24 |
| 2.1.5 Kružnicový diagram | 26 |
| 2.2 Návrh nové drážky:..... | 28 |
| 2.2.1 Výpočet rozptylové indukčnosti $L\sigma_{21}$ pro novou drážku | 28 |
| 2.2.2 Výpočet činitelů k_r , k_x obecnou metodou..... | 29 |
| 2.2.3 Výstupy ze Simulink modelu stroje | 30 |
| 2.2.4 Kružnicový diagram | 31 |
| 3 Závěr | 33 |
| 4 Přílohy..... | 34 |
| 4.1 Program pro výpočet činitelů pro hlubokou drážku..... | 34 |
| 4.2 Program pro výpočet kružnicového diagramu | 35 |
| 4.3 Program pro simulaci přechodných dějů asynchronního stroje s kotvou nakrátko (Simulink) | 36 |
| 4.3.1 Blok transformace do α, β | 36 |
| 4.3.2 Blok transformace do tří fázového systému..... | 37 |
| Seznam literatury a informačních zdrojů | 38 |

Úvod

Předkládaná práce má za cíl přiblížit různé způsoby určování proudu při rozběhu asynchronního stroje s kotvou nakrátko.

Text je rozdělen do tří hlavních částí; první se, a to pouze pro úplnost, věnuje teorii elektrických strojů točivých-speciálně tedy asynchronních strojů, dále pak vysvětlení pojmu skinefekt, a jeho vlivu na rozběh těchto strojů a také vytváření jejich numerického modelu v softwaru MATLAB.

Druhá část je zaměřena na prezentaci výpočtů uvedených v teoretické části, jsou zde také uvedeny grafické výstupy z Matlab scriptů a prostředí Simulink. Nejdříve je uveden model hluboké drážky, a následně navržený model dvojité klece.

Poslední, přílohová, část demonstruje použité Matlab scripty a Simulink model asynchronního stroje, které byly vytvořené autorem tohoto dokumentu pro účely splnění zadání Bc. práce.

Seznam symbolů a zkratek

| | | |
|------------------|------------------------|--|
| s | [-] | skluz |
| n_s | [min ⁻¹] | rychlost otáčení magnetického pole statoru (synchronní otáčky) |
| n_1 | [min ⁻¹] | rychlost otáčení rotoru (mechanické otáčky) |
| p | [-] | počet pólových dvojic statoru |
| f | [Hz] | kmítočet napájecího napětí |
| R_1 | [Ω] | Odpor vinutí statoru |
| $X_{\sigma 1}$ | [Ω] | Rozptylová reaktance statoru |
| R_2' | [Ω] | Odpor vinutí rotoru $\sigma 1$ |
| $X_{\sigma 2}'$ | [Ω] | Rozptylová reaktance rotoru |
| k_x | [-] | koeficient snížení reaktance vlivem skin efektu |
| k_r | [-] | koeficient zvýšení odporu vlivem skin efektu |
| r_i | [Ω/m] | Odpor i-té elementární vrstvy |
| x_i | [Ω/m] | Reaktance i-té elementární vrstvy |
| γ_i | [S] | konduktivita |
| μ_0 | [H.m ⁻¹] | Permeabilita |
| $g_{i-element}$ | [S/m] | vodivost i-té elementární vrstvy |
| $b_{i-element}$ | [mm] | střední šířka i-té elementární vrstvy |
| $h_{i-element}$ | [mm] | výška i-té elementární vrstvy |
| h_t | [m] | výška tyče v drážce |
| $b_{t,}$ | [m] | šířka tyče v drážce |
| b_d | [m] | šířka drážky |
| f_2 | [Hz] | frekvence proudu v rotoru při uvažovaném skluzu (Hz) |
| $\rho_{t\theta}$ | [Ω.m] | rezistivita materiálu tyče při pracovní teplotě |
| ξ | [-] | redukovaná výška vodiče |
| $\rho_{t\theta}$ | [Ω.mm ² /m] | Odpor rotorové tyče |

1 Teoretická část

1.1 Úvod do elektrických strojů

Asynchronní stroje spadají do skupiny tzv. „elektrických strojů točivých“.

Pan Měřička jako definici elektrického stroje ve své knize [6] uvádí, že „to jsou takové stroje k přeměně energií, z nichž alespoň jedna je energie elektrická.“ (Měřička,1973,s.11)

Další autor p. Petrov [2] (s.32) uvádí, že přeměna elektrické energie probíhá v tzv „aktivních částech elektrického stroje“, z tohoto pohledu tedy lze stroj rozdělit na dvě části-elektrickou a magnetickou. Vinutí stroje jsou buď vzájemně nepohyblivá-transformátory, nebo se mohou pohybovat vůči sobě-v těchto případech hovoříme právě o točivých elektrických strojích. U těchto strojů dochází k elektromechanické přeměně energie, kdy prostředníkem této přeměny je energie magnetického pole.

Kromě asynchronních strojů, které jsou předmětem této práce, to jsou také stejnosměrné a synchronní stroje.

1.2 Asynchronní stroj

Asynchronní, indukční, stroj se stává ze dvou soustředných válců. Vnitřní válec (rotor) je upevněn na hřídeli a může se otáčet v ložiskách uvnitř vnějšího válce (stator). Stator a rotor jsou odděleny vzduchovou mezerou. Již výše zmiňovaný autor p. Petrov, ve své další publikaci [3] (s.146), píše, že velikost vzduchové mezery je závislá na výkonu stroje a pohybuje se řádově od zlomků mm do jednotek mm.

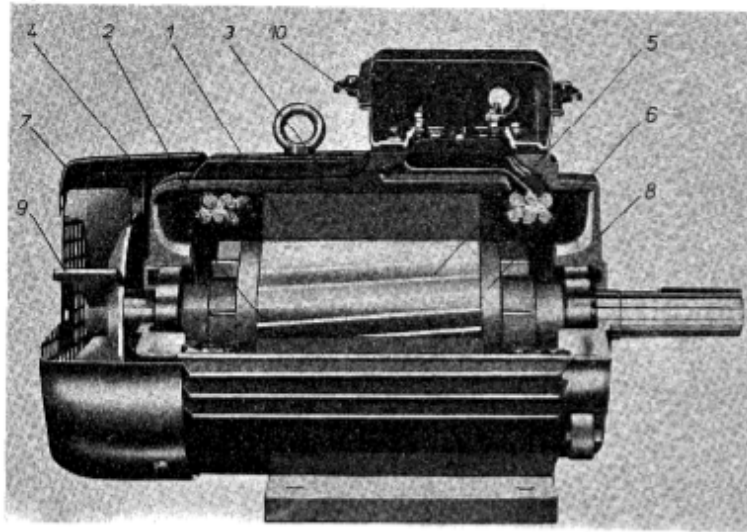
Vinutí statoru je rovnoměrně rozprostřeno po jeho obvodu, jeho fáze jsou vůči sobě posunuty o 120. Vinutí na rotoru je tří, popř. vícefázové, a to buď vyvedené přes kroužky a kartáče na rotorový spouštěč, nebo spojené do krátko, dnes nejčastější aplikace.

1.2.1 Asynchronní stroj s kotvou nakrátko

U asynchronních strojů s kotvou nakrátko tvoří statorový svazek mezikružní složené s dynamových plechů, jeho vnitřní obvod má drážky, ve kterých je uloženo trojfázové statorové vinutí, které po připojení na síť vybudí tzv. točivé magnetické pole. Statorový svazek je zalisován v litinové kostře, která dává motoru vnější tvar a umožňuje jeho připojení k základu.

Rotor („kotva“) tvoří válec složený rovněž z dynamových plechů, na vnějším obvodu má drážky vyplněné vodivými tyčemi. Tyče jsou po obou stranách spojeny vodivými kruhy a dohromady tvoří

tzv. rotorovou klec. Tyče i kruhy jsou nejčastěji z hliníku, který se nastříká do drážek a do zvláštních přiložených forem.



Obr.1: Řez asynchronním strojem s kotvou nakrátko. MRAVEC, Rudolf. Elektrické stroje a přístroje I [4]

1-statorový svazek, 2-statorové vinutí, 3-žebrovaná kostra, 4-rotor s klecí, 5-tyče klece, 6-kruhy klece, 7-přední ložiskový štít, 8-zadní ložiskový štít, 9-vnější ventilátor, 10-statorová svorkovnice

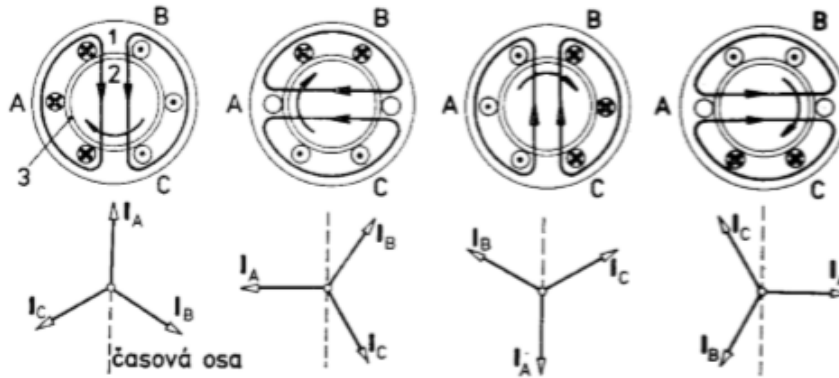
1.2.2 Vznik točivého pole

Po připojení statoru ke zdroji třífázového proudu, proud protékající vinutím vytvoří magnetické pole, jehož osa se bude v prostoru otáčet. Toto točivé magnetické pole bude ve vinutí rotoru indukovat napětí, které v uzavřeném vinutí vyvolá proudy. Tyto proudy spolu s točivým magnetickým polem vytvoří elektromagnetické síly, které budou otáčet rotorem ve směru otáčení magnetického pole. Rotor motoru fungujícího podle tohoto principu se bude vždy otáčet pomaleji než pole-za těchto podmínek se může ve vinutí rotoru indukovat ems a budou jím procházet proudy. Zpoždování rotoru proti poli se nazývá skluz

$$s = \frac{n_s - n_2}{n_s} \quad (1.1)$$

kde

$$n_s = \frac{60 \cdot f}{p} \quad (1.2)$$

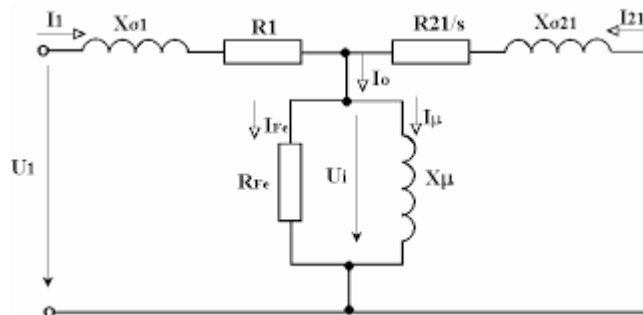


Obr. 2: Princip vzniku točivého magnetického pole. PETROV, G.N. Elektrické stroje, Část 1., Úvod – transformátory [2]

1.2.3 Náhradní schéma:

Dle několika autorů náhradní schéma asynchronního stroje vychází z náhradního schématu transformátoru. Již na úvod této práce bylo zmíněno, že elektrické stroje jsou tvořeny mj., magnetickou vazbou mezi vstupním a výstupním vinutím. Odlišnost točivých strojů od transformátoru spočívá právě v tom, že jejich výstupní vinutí se otáčí, takže vodiče se v magnetickém poli pohybují.

Pan Petrov ve výše zmíněné publikaci [3] (s.147-161) provádí důkaz aplikaci teorie transformátoru na asynchronní stroj, nicméně pro účely této práce bude stačit výsledná podoba náhradního schématu ve tvaru t-čláčku:



Obr. 3: Převodění dějů točícího se stroje na stroj stojící

1.2.4 Skinefekt

Jak bylo uvedeno výše, v praktických aplikacích převažují stroje s kotvou nakrátko, i přes jejich nečinnost, jako je menší záběrný moment a velké rozběhové proudy. Tyto problémy řeší použití kotev s drážkami speciálních tvarů (vírové a dvojité klece), které využívají tzv „skinefekt“.

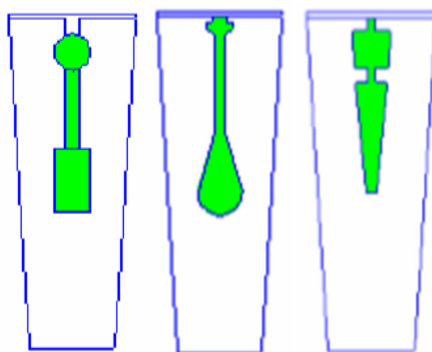
Podle definice z webu wikipedia [8], která je shodná i s ostatními elektronickými zdroji, platí, že

„Je to fyzikální děj, při kterém dochází k vytlačování elektrického proudu k povrchu vodiče. Elektrický střídavý proud procházející vodičem uzavírá kolem sebe siločáry magnetického (indukčního) toku (těž toku magnetické indukce). Část tohoto toku prochází i tím samým vodičem a indukuje v něm uzavřené

vířivé proudy. Tyto vířivé proudy mají blíže ke středu vodiče opačný směr než původní elektrický proud a odečítají se od něj, kdežto blíže k povrchu jsou směry souhlasné a proudy se sčítají.“

Jinými slovy, důsledek skin efektu tedy je, že výsledné proudové pole, proudová hustota, je vytlačena k povrchu proudovodiče-odpor se se zvyšujícím se kmitočtem zvětšuje až na mnohonásobek odporu pro stejnosměrný proud a jeho reaktance klesá

Pokud je tato definice aplikována na asynchronní stroje, tak zvětšení skluzu v motorech s rotory nakrátko vede k zvětšenému působení povrchového jevu, což vyvolává změnu odporů a reaktancí rotoru R'_2 a X'_2 . Při výpočtu pracovních režimů stroje v rozmezí změny skluzu od chodu naprázdno do chodu jmenovitého jsou tyto změny zanedbatelné a obvykle se neuvažují, ale naopak při výpočtu rozběhu, kdy proudy stroje násobně převyšují proudy jmenovité, je nutné uvažovat poměrné změny parametrů odporů a reaktancí vlivem vytlačení proudů vlivem povrchového jevu-pro tento účel je nutno parametry R'_2 a X'_2 přenásobit činiteli k_r a k_x .



Obr.4: Příklad drážek zvláštních tvarů

Činitel k_r ukazuje, kolikrát se zvětšil odpor drážkové části tyče $R_{t\xi}$ při nerovnoměrném rozložení hustoty proudu ve srovnání s odporem bez působení povrchového jevu R .

$$k_r = \frac{R_{t\xi}}{R} \quad (1.3)$$

Činitel k_x ukazuje, jak se změnil činitel magnetické vodivosti $\lambda'_{d\xi}$ části drážky obsazené vodičem s procházejícím proudem při působení povrchového jevu ve srovnání s činitelem magnetické vodivosti λ'_d téže části při rovnoměrném rozložení proudu hustoty v tyči

$$k_x = \frac{\lambda'_{d\xi}}{\lambda'_d} \quad (1.4)$$

1.2.4.1 Přibližná metoda výpočtu u hlubokých drážek

Pro obdélníkové tyče, za předpokladu, že rezistivita materiálu tyče je na celé ploše příčného řezu konstantní, že permeabilita železa je nekonečně veliká a magnetické indukční rozptylové čáry v drážce jsou přímkové, jsou činitelé k_r a k_x analyticky vyjádřeny takto:

$$k_r = \xi \frac{\sinh 2\xi + \sin 2\xi}{\cosh 2\xi - \cos 2\xi} \quad (1.5)$$

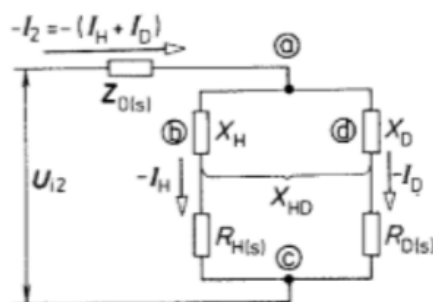
$$k_x = \frac{3}{2\xi} \frac{\sinh 2\xi - \sin 2\xi}{\cosh 2\xi - \cos 2\xi} \quad (1.6)$$

kde

$$\xi = 2\pi h_t \sqrt{\frac{b_t f_2}{b_d \rho_{t\theta}}} 10^{-7} \quad (1.7)$$

1.2.4.2 Přibližná metoda výpočtu u drážek zvláštních tvarů

V náhradním schématu pro výpočet činitelů u dvojité klece rotoru jsou impedance pracovní a rozběhové klece zapojeny paralelně. Tento způsob výpočtu autor práce uvádí pouze pro úplnost, v další části práce nebude uvažován.



Obr.5: Náhradní schéma drážky zvláštního tvaru (dvouklecového rotoru)

1.2.4.3 Obecná metoda výpočtu u drážky libovolného tvaru

Jak bylo uvedeno výše, v rotorech současných asynchronních strojů se převážně používají drážky zvláštního tvaru, jejichž pole má značně složitější strukturu, než u obyčejných drážek obdélníkového průřezu.

Pan Kopylov dále uvádí, že výše popsaná „ruční“ metoda výpočtu činitelů k_x, k_r je pro složitější drážky nepřesná, protože neúplně respektuje indukční vazby části tyče na různých výškách. Proto bylo vyvinuto několik účinnějších metod jejich výpočtu.

Například ve 30. letech minulého století byla publikována tzv. Kramerova grafická metoda.

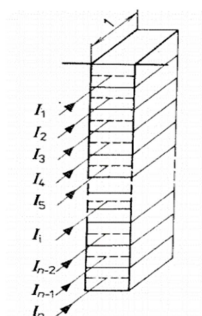
Jedná se o metodu grafické konstrukce komplexních amplitud $\bar{I} = \bar{I}(z, j\omega)$ proudu $i = i(z, t)$ a komplexních amplitud $\bar{U} = \bar{U}(z, j\omega)$ napětí $u = u(z, j)$ tyče v drážce. Rotorovou tyč popisujeme elektrickým náhradním schématem tyče tak, aby soustava rovnic pro proudy a napětí v tyči

$$\frac{\partial i}{\partial z} = g(z)u \quad (1.8)$$

$$\frac{\partial u}{\partial z} = l(z) \frac{\partial i}{\partial t} \quad (1.9)$$

byla aproximována soustavou rovnic pro proudy a napětí v náhradním RL obvodu.

Jestliže pokládáme tvar magnetických indukčních čar rozptylového toku v drážce za známý, je možné si představit tyč rotorového klecového vinutí rozdělenou na velký počet elementárních vodičů navzájem izolovaných nekonečně tenkou vrstvou izolace.



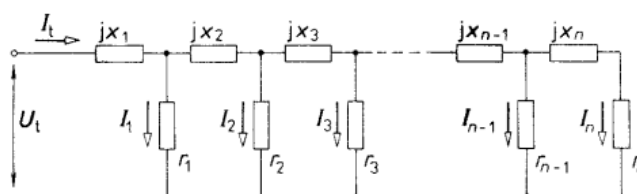
Obr.6. Rozdělení masivní tyče na elementární vrstvy. V: KOPYLOV, Igor Petrovič. Stavba elektrických strojů: Učebnice pro elektrotechnické fakulty. [1]

Pro konečný počet elementárních vrstev tyče můžeme soustavu 1.8 a 1.9 přepsat do tvaru

$$\Delta I = h_{element} g_{element} \cdot (U + \Delta U) \quad (1.10)$$

$$\Delta U = j * \omega * h_{element} \cdot I_{element} \cdot l \quad (1.11)$$

Vytvoříme tedy elektrické náhradní schéma rotorové tyče složené z článků, kdy každý článek bude odpovídat jedné elementární vrstvě tyče.



Obr.7: Náhradní schéma tyče klecového vinutí rotoru pro přesnější výpočet odporů a reaktancí. V: KOPYLOV, Igor Petrovič. Stavba elektrických strojů.[1]

$$r_i = \frac{1}{g_{i-element}} = \frac{1}{\gamma_i * b_{i-element} * h_{i-element}} \quad (1.12)$$

$$x_i = 2 * \pi * f_{tyč} * \mu_0 * \frac{h_{i-element}}{b_{i-element}} \quad (1.13)$$

Pak řešíme soustavu rovnic popisující náhradní obvodové schéma rotorové tyče.

$$\begin{bmatrix} r_1 + jx_1 & jx_1 & jx_1 & \dots & jx_1 & jx_1 \\ jx_1 & r_1 + j\sum_1^2 x_i & j\sum_1^2 x_i & \dots & j\sum_1^2 x_i & j\sum_1^2 x_i \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ jx_1 & j\sum_1^2 x_i & j\sum_1^3 x_i & \dots & r_{n-1} + j\sum_1^{n-1} x_i & j\sum_1^{n-1} x_i \\ jx_1 & j\sum_1^2 x_i & j\sum_1^3 x_i & \dots & j\sum_1^{n-1} x_i & r_n + j\sum_1^n x_i \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \bar{I}_1 \\ \bar{I}_2 \\ \dots \\ \bar{I}_{n-1} \\ \bar{I}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{U}_{tyč} \\ \bar{U}_{tyč} \\ \dots \\ \bar{U}_{tyč} \\ \bar{U}_{tyč} \end{bmatrix} \quad (1.14)$$

Rovnice pro proud v tyči:

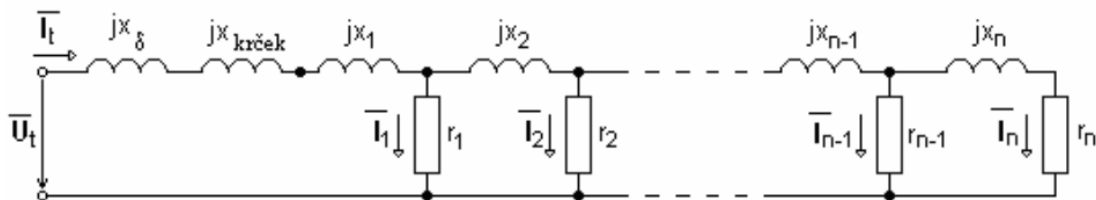
$$\bar{I}_1 + \bar{I}_2 + \dots + \bar{I}_{n-1} + \bar{I}_n = \bar{I}_{tyč} \quad (1.15)$$

A vztahy pro výpočet činitelů

$$k_r = \frac{R \cdot I_{tyč}^2}{R = I_{tyč}^2} = \frac{\sum_{i=1}^n (r_i I_i^2)}{r_{tyč} I_{tyč}^2} \quad (1.16)$$

$$k_x = \frac{\lambda_{d\xi}}{\lambda_d} = \frac{\frac{\sum_{i=1}^n (\lambda_{i-element} * |\sum_{k=n}^i \bar{I}_k|^2)}{|\bar{I}_{tyč}|^2}}{\frac{\sum_{i=1}^n [\lambda_{i-element} * (\sum_{k=n}^i g_{i-element})^2]}{(\sum_{i=1}^n g_{i-element})^2}} \quad (1.17)$$

Výše uvedené náhradní schéma (obr. 7) je pro situaci, kdy se rozptylové pole rotoru uzavírá pouze skrze vlastní tyč, avšak rozptylové pole se uzavírá nejen skrze vlastní tyč, ale i přes krček v ústí drážky a vzduchovou mezeru asynchronního stroje. Tuto část rozptylového toku je nutno brát v úvahu a zahrnout ji do náhradního obvodového schématu rotorové tyče (viz obr. 8). Učiníme tak přidáním sériových reaktancí $X_{krček}$ a X_δ ke článku náhradního schématu tyče



Obr.8: Elektrické náhradní schéma rotorové tyče v drážce obecného tvaru, se započítáním rozptylového magnetického toku uzavírajícího se v krčku a ve vzduchové mezeře. V: KOHOUT, Jiří, Ing. Metody matematického modelování elektrických strojů. [5]

Doplnění obvodového schématu o sériové reaktance, bude znamenat, že činitel změny reaktance k_x bude mít méně klesající trend v závislosti na rozměrech krčku a vzduchové mezery.

1.2.5 Kružnicový diagram:

Pan Bartoš ve svých skriptech [7] uvádí, že kružnicový diagram asynchronního stroje je „zobrazením polohy koncového vektoru proudu do komplexní roviny při různé velikosti skluzu stroje.“ ((Bartoš, 2006)

Existuje několik metod výpočtu, pro tuto práci byla použita metoda kruhové inverze impedanční přímky v komplexní rovině podle výše uvedených skript. Pan Hruška na svém webu [9] uvádí, že tato

metoda konstrukce kružnicového diagramu je nejpřesnější a zároveň, že platí pouze pro jednoduché hluboké drážky, pro složitější tvary drážek (tedy např. kotvy s dvojitou klecí) kružnice přechází na obecnější tvar křivky.

Vztah pro impedanční přímku:

$$Z_2(s) = c_1[R_1 + j \cdot (X_{1\sigma} + c_1 \cdot X_{21\sigma})] + c_1 \frac{R_2'}{s} \quad (1.18)$$

Kde c_1 je komplexní činitel, který zohledňuje převedení T-článku na Γ -tvar

$$c_1 = \frac{z_1}{z_{1h}} = \frac{Z_{1h} + R_1 + jX_{1\sigma}}{Z_{1h}} = 1 + \frac{R_1 + jX_{1\sigma}}{Z_{1h}} \quad (1.19)$$

Kde Z_{1h} odpovídá paralelnímu spojení X_{1h} a R_{fe} pro T-článek

$$Z_{1h} = \frac{jX_{\mu}R_{fe}}{R_{fe} + jX_{\mu}} \quad (1.20)$$

Odtud vztah pro admitanční kružnici:

$$Y = \frac{1}{Z_2(s)} \quad (1.21)$$

Vztah pro proud naprázdno

$$I_0 = \frac{U_1}{Z_1} = \frac{U_1}{Z_1} e^{j\varphi_0} \quad (1.22)$$

Vztah pro statorový proud

$$I_1 = I_0 + \frac{I_2'}{c_1} \quad (1.23)$$

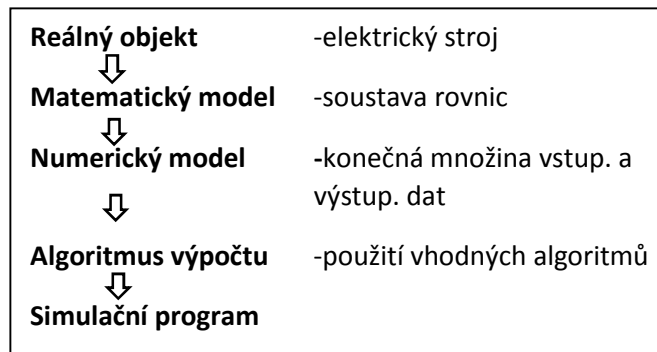
Vztah pro rotorový proud

$$I_2' = U_1 \cdot Y \quad (1.24)$$

1.3 Matematické modelování přechodných dějů

Pan Kohout ve své disertační práci [5] uvádí, že vlastnosti fyzikálních systémů lze zkoumat dvěma způsoby: výpočty, tak jak bylo dokázáno v předchozích částech této práce, anebo experimentálně, jak bude popsáno dále. Ideální je kombinace obou přístupů.

V případě matematického modelování je reálný objekt nahrazen matematickým modelem, který popisuje pro chování systému rozhodující fyzikální jevy a jejich interakce (viz obr. 9).



Obr. 9: Postup při matematickém modelování. V: KOHOUT, Jiří, Ing. Metody matematického modelování elektrických strojů. [5]

Reálný fyzikální model je tedy možné popsat soustavou matematických rovnic na základě známých fyzikálních zákonů. Matematický zápis fyzikálního modelu již umožňuje jeho řešení, které je možné uskutečnit buď přímo analyticky, nebo užitím nějaké vhodné numerické metody umožňující nasazení výpočetní techniky.

System MATLAB (z anglického Matrix Laboratory), je interaktivní programové prostředí a skriptovací programovací jazyk určený pro vědecké a inženýrské výpočty a vizualizaci dat. Program je vyvíjen od roku 1984 společností The Mathworks, Inc. v USA, původně jako jazyk určen pro matematické účely, ale časem byl upraven, byly přidány nové funkce a rozšíření, rozrostl se různými směry a dnes je využitelný v široké paletě aplikací.

Nadstavbové prostředí Simulink slouží k modelování a simulaci dynamických systémů s využitím grafických možností operačního systému Windows. Uživatelé totiž poskytují možnost vytvářet modely ve formě blokových schémat, takže jeho ovládání je jednodušší a intuitivnější. Hierarchická struktura modelů umožňuje vytvářet i velmi složité systémy, jejichž jednotlivé části lze zahrnout do jednotlivých subsystémů a to prakticky bez omezení počtu bloků.

Matematickými modely elektrických strojů je obvykle soustava nelineárních diferenciálních rovnic, které mohou navíc obsahovat časově proměnné koeficienty. Uplatnění v oblasti modelování točivých elektrických strojů našla metoda prostorových fázorů. Výhoda použití této metody, je transformace proměnných koeficientů diferenciální rovnice v koeficienty konstantní.

1.3.1 Metoda prostorových fázorů

$$\overline{u}_s = R_s \overline{i}_s + \frac{d\overline{\psi}_s}{dt} \quad (1.25)$$

$$\overline{u}_r = R_r \overline{i}_r + \frac{d\overline{\psi}_r}{dt} \quad (1.26)$$

Transformace z rotorového souřadného systému do statorového souřadného systému

$$\overline{u}_r^s * e^{-j\theta} = R_r \overline{i}_r^s * e^{-j\theta} + \frac{d}{dt} (\overline{\psi}_r^s * e^{-j\theta}) \quad (1.27)$$

$$\overline{u_r^s} * e^{-j\vartheta} = R_r \overline{i_r^s} * e^{-j\vartheta} + \frac{d\overline{\psi_r^s}}{dt} e^{-j\vartheta} - j \frac{d\overline{\vartheta}}{dt} e^{-j\vartheta} \overline{\psi_r^s} \quad (1.28)$$

$$\overline{u_r^s} = R_r \overline{i_r^s} + \frac{d\overline{\psi_r^s}}{dt} - j\omega_{el} \overline{\psi_r^s} \quad (1.29)$$

Transformace do α, β souřadnic (spojených se statorem)

$$\overline{u_{s\alpha}} = R_s i_{s\alpha} + \frac{d\psi_{s\alpha}}{dt} \quad (1.30)$$

$$\overline{u_{s\beta}} = R_s i_{s\beta} + \frac{d\psi_{s\beta}}{dt} \quad (1.31)$$

$$\overline{u_{r\alpha}} = R_R i_{r\alpha} + \frac{d\psi_{R\alpha}}{dt} + \omega_{el} \psi_{R\alpha} \quad (1.32)$$

Transformace do ABC

$$I_{SA} = \operatorname{Re}\{I_s\} = I_{s\alpha} \quad (1.33)$$

$$I_{SB} = -\frac{1}{2} \operatorname{Re}\{I_s\} + \frac{\sqrt{3}}{2} \operatorname{Im}\{I_s\}, \text{ kde } \operatorname{Re}\{I_s\} = I_{s\alpha}, \operatorname{Im}\{I_s\} = I_{s\beta} \quad (1.34)$$

$$I_{SC} = \frac{1}{2} \operatorname{Re}\{I_s\} - \frac{\sqrt{3}}{2} \operatorname{Im}\{I_s\} \quad (1.35)$$

Rovnice pro elektromagnetický moment

$$M_{elmag} = \frac{3}{2} p L_h \operatorname{Re}\{j \overline{i_r^s} i_s^*\} \quad (1.36)$$

$$M_{elmag} = \frac{3}{2} p L_h (i_{s\beta} i_{R\alpha} - i_{s\alpha} i_{R\beta}) \quad (1.37)$$

$$(M_{elmag} - M_z) = J \frac{d\omega_{mech}}{dt} \quad (1.38)$$

$$M_{elmag} - M_z = \frac{J}{p} \frac{d\omega_{el}}{dt} \quad (1.40)$$

$$\omega_{mech} = \frac{d\omega_{el}}{p} \quad (1.41)$$

Doplňkové rovnice

$$\psi_{s\alpha} = L_s i_{s\alpha} + L_h i_{R\alpha} \quad (1.42)$$

$$\psi_{s\beta} = L_s i_{s\beta} + L_h i_{R\beta} \quad (1.43)$$

$$\psi_{R\alpha} = L_R i_{R\alpha} + L_h i_{s\alpha} \quad (1.44)$$

$$\psi_{R\beta} = L_R i_{R\beta} + L_h i_{s\beta} \quad (1.45)$$

Vstupní napětí

$$\overline{u_s} = \frac{2}{3} (u_a + a \cdot u_b + a^2 \cdot u_c) \quad (1.46)$$

$$u_{s\alpha} = \operatorname{Re}\{u_s\}; \text{ kde } a = e^{j\frac{2\pi}{3}}, a^2 = e^{j\frac{4\pi}{3}} \quad (1.47)$$

$$u_{s\beta} = \operatorname{Im}\{u_s\} \quad (1.48)$$

Úprava rovnic pro použití v metodě snižování řádu derivace

$$u_{S\alpha} = R_S i_{S\alpha} + L_S \frac{di_{S\alpha}}{dt} + L_h \frac{di_{r\alpha}}{dt} \quad (1.49)$$

$$\frac{di_{S\alpha}}{dt} = \frac{1}{L_S} \left[u_{S\alpha} - R_S i_{S\alpha} - L_h \frac{di_{r\alpha}}{dt} \right] \quad (1.50)$$

$$u_{S\beta} = R_S i_{S\beta} + L_S \frac{di_{S\beta}}{dt} + L_h \frac{di_{r\beta}}{dt} \quad (1.51)$$

$$\frac{di_{S\beta}}{dt} = \frac{1}{L_S} \left[u_{S\beta} - R_S i_{S\beta} - L_h \frac{di_{r\beta}}{dt} \right] \quad (1.52)$$

$$u_{r\alpha} = R_r i_{r\alpha} + L_r \frac{di_{r\alpha}}{dt} + L_h \frac{di_{S\alpha}}{dt} + \omega_{el} (L_r i_{r\beta} + L_h i_{S\beta}) \quad (1.53)$$

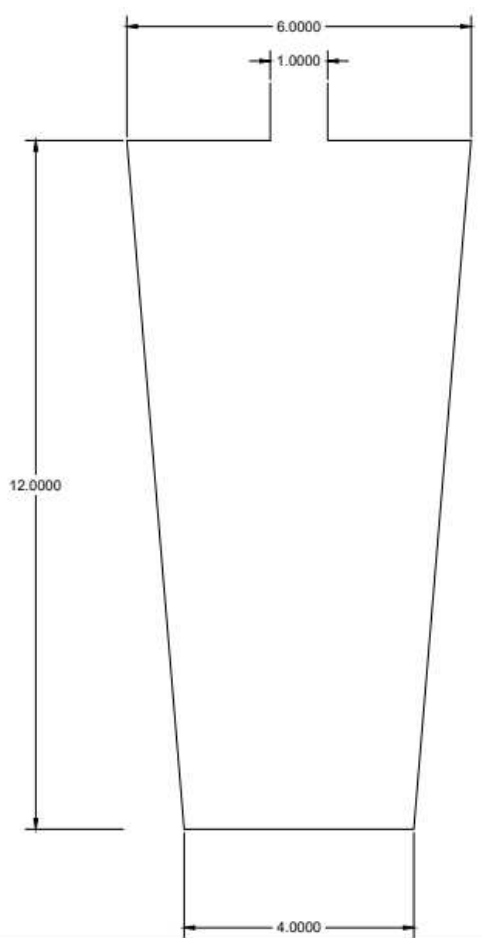
$$\frac{di_{r\alpha}}{dt} = \frac{1}{L_r} \left[u_{r\alpha} - R_r i_{r\alpha} - L_h \frac{di_{S\alpha}}{dt} - \omega_{el} L_r i_{r\beta} - \omega_{el} L_h i_{S\beta} \right] \quad (1.54)$$

$$u_{r\beta} = R_r i_{r\beta} + L_r \frac{di_{r\beta}}{dt} + L_h \frac{di_{S\beta}}{dt} - \omega_{el} (L_r i_{r\alpha} + L_h i_{S\alpha}) \quad (1.55)$$

$$\frac{di_{r\beta}}{dt} = \frac{1}{L_r} \left[u_{r\beta} - R_r i_{r\beta} - L_h \frac{di_{S\beta}}{dt} + \omega_{el} L_r i_{r\alpha} + \omega_{el} L_h i_{S\alpha} \right] \quad (1.56)$$

2 Praktická část

2.1 hluboká drážka zadaná vedoucím práce:



Obr.10: Geometrie původní zadané drážky (mm)

Otevření drážky, respektuje uzavření rozptylového toku skrz ústí drážky a vzduchovou mezeru (viz teoretická část a následně obr.8).

2.1.1 Parametry stroje

| | |
|---|------------|
| Stator Resistance R1 (ohm): | 1.52939 |
| Stator Resistance at 20C (ohm): | 1.25805 |
| Stator Leakage Reactance X1 (ohm): | 3.28005 |
| Slot Leakage Reactance Xs1 (ohm): | 1.68465 |
| End Leakage Reactance Xe1 (ohm): | 0.414994 |
| Harmonic Leakage Reactance Xd1 (ohm): | 1.18041 |
| Rotor Resistance R2 (ohm): | 1.35437 |
| Rotor Leakage Reactance X2 (ohm): | 3.97165 |
| Resistance Corresponding to Iron-Core Loss Rfe (ohm): | 5.0379e+07 |

Magnetizing Reactance X_m (ohm):

67.7398

2.1.2 Výpočet činitelů k_r , k_x hluboké drážky pomocí přibližné metody

Níže následují výpočty vzorců dle 1.5-1.7, tedy výpočty činitelů dle ruční a méně přesné metody. Dosazeny tyto hodnoty: $f_2 = 25 \text{ Hz}$, $\rho_{t\theta} = 2.63158 \cdot 10^{-8} \text{ } \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ to odpovídá materiálu rotorových tyčí-hliník.

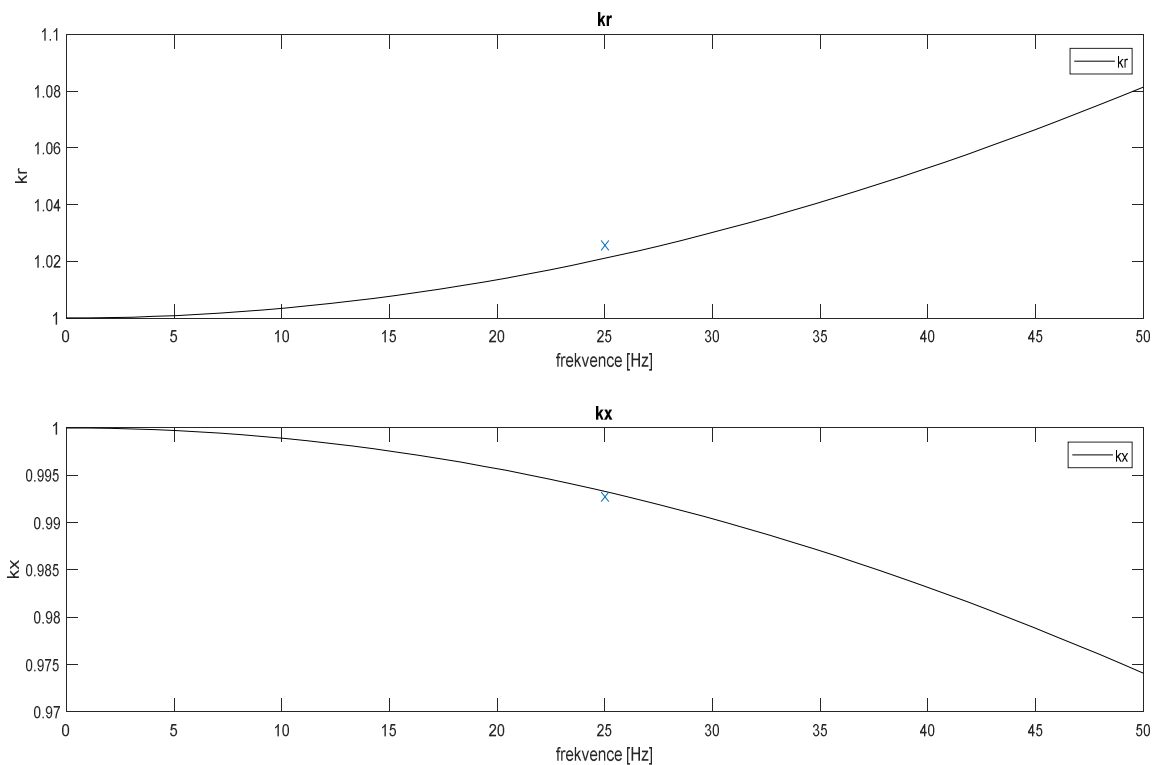
$$\xi = 2 \cdot \pi \cdot h_t \sqrt{\frac{b_t}{b_d} \frac{f_2}{\rho_{t\theta}}} 10^{-7} = 2 \cdot \pi \cdot 0,012 \cdot \sqrt{\frac{25}{2,63158 \cdot 10^{-8}}} \cdot 10^{-7} = 0.7349$$

$$k_r = \xi \cdot \frac{\sinh 2\xi + \sin 2\xi}{\cosh 2\xi - \cos 2\xi} = 0.7349 \cdot \frac{\sinh(2 \cdot 0.7349) + \sin(2 \cdot 0.7349)}{\cosh(2 \cdot 0.7349) - \cos(2 \cdot 0.7349)} = 1,0256$$

$$k_x = \frac{3 \sinh 2\xi - \sin 2\xi}{2\xi \cosh 2\xi - \cos 2\xi} = \frac{3 \sinh(2 \cdot 0.7349) - \sin(2 \cdot 0.7349)}{2 \cdot 0,7349 \cosh(2 \cdot 0.7349) - \cos(2 \cdot 0.7349)} = 0,9927$$

2.1.3 Výpočet činitelů k_r , k_x obecnou metodou

V této části bude věnován prostor výsledkům, které byly získány popsáním stroje náhradním schématem (viz obr. 7 a 8 a rovnice 1.12 a 1.13) a vyřešením rovnic 1.14 až 1.17. Pro tento účel byl vytvořen script v programu Matlab. Samotný script je k dispozici v přílohové části v kapitole 4.1.



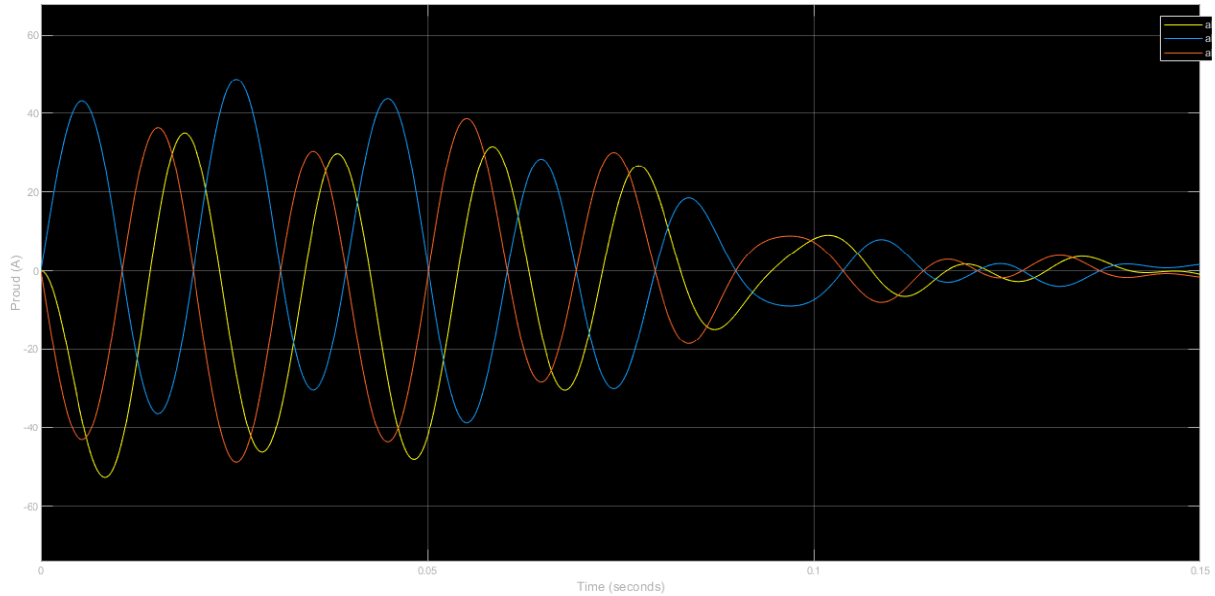
Obr.11: Závislost činitelů na frekvenci rotoru

Křížkem jsou označeny výsledky výpočtu přibližnou metodou pro rotorovou frekvenci $f_2 = 25 \text{ Hz}$. Pro tuto frekvenci, při obecné metodě, zde vychází $k_r = 1.0210$ a $k_x = 0.9933$.

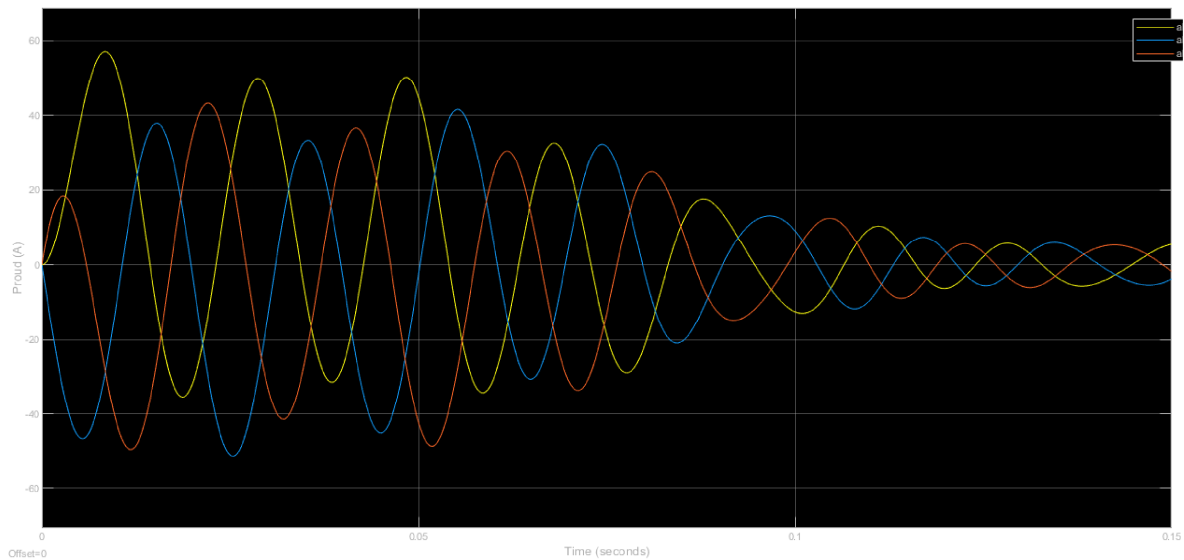
2.1.4 Výstupy ze Simulink modelu stroje

Stroj popsáný metodou prostorových fázorů dle vzorců 1.25 až 1.56. Činitelé, kteří vyšli z obecné metody, byli do Simulink prostředí vloženy formou tabulky. Rozběh stroje uvažován 0-50 Hz. Náhled programu je v přílohouvé části v kapitole 4.3 včetně subsystémů.

2.1.4.1 Bez uvažování skin efektu

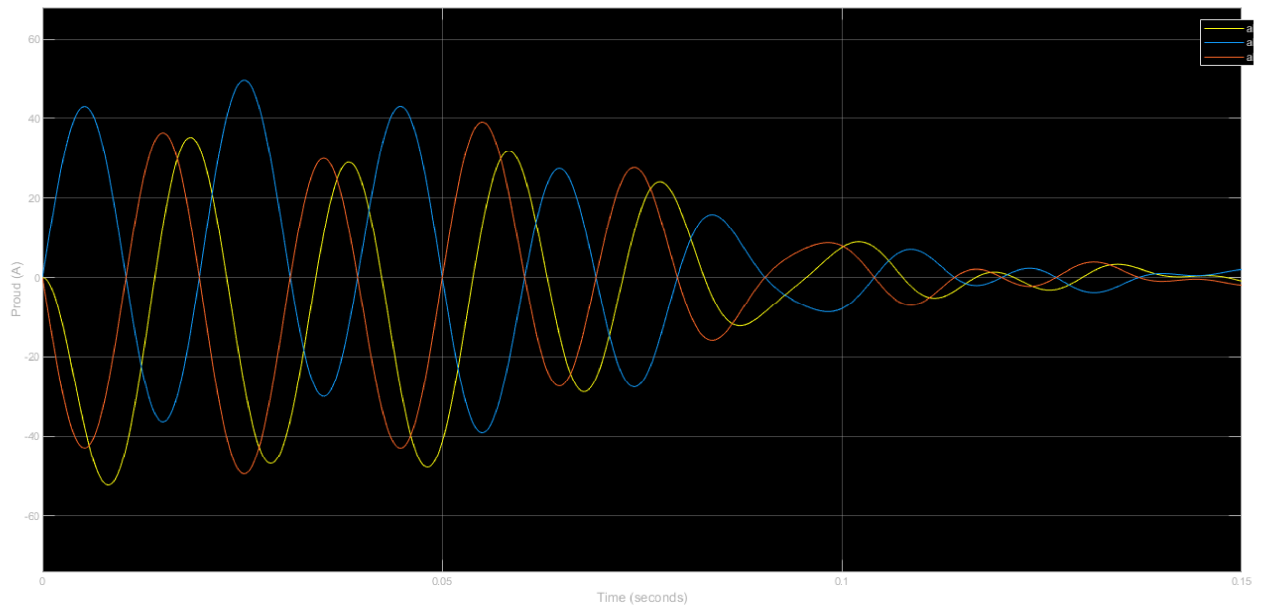


Obr.12: Časový průběh rotorového proudu při rozběhu asynchronního stroje

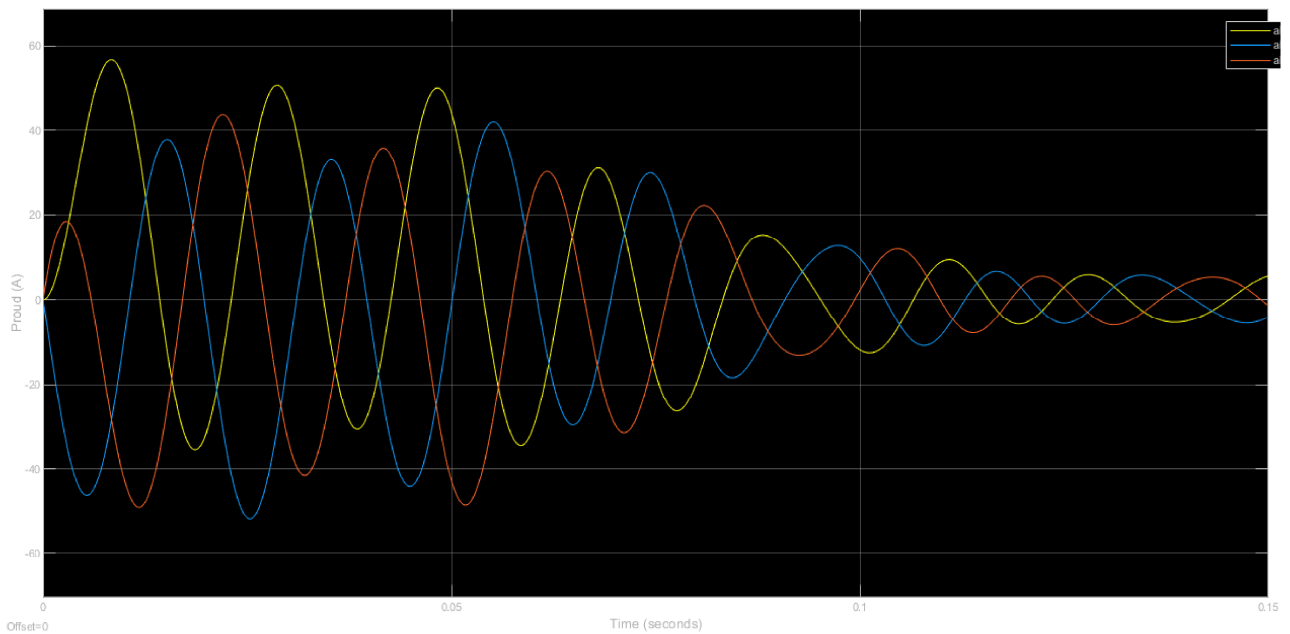


Obr.13: Časový průběh statorového proudu při rozběhu asynchronního stroje

2.1.4.2 S uvažováním skin efektu stroje

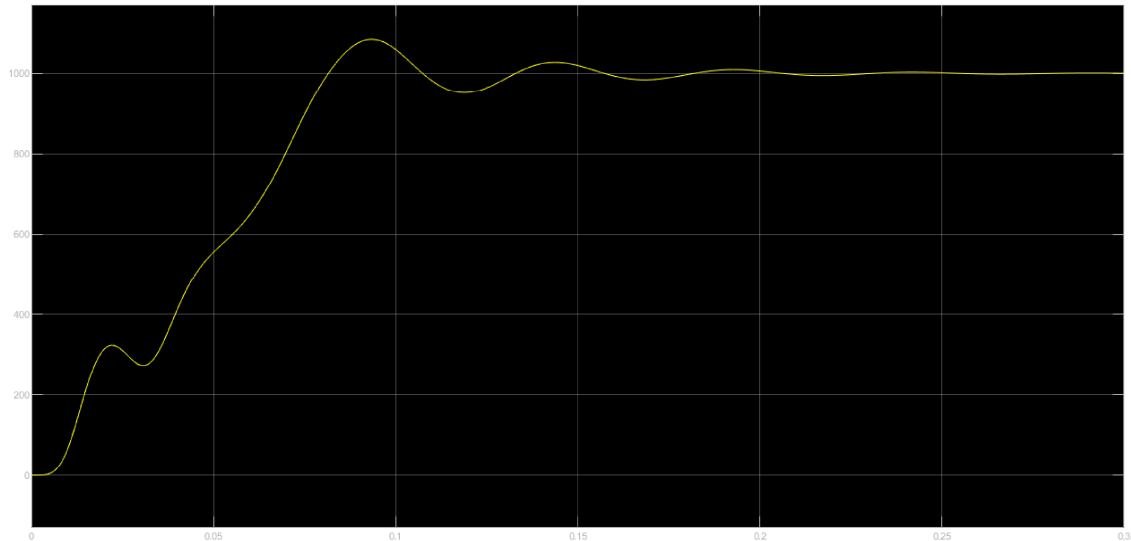


Obr.14: Časový průběh rotorového proudu při rozběhu asynchronního stroje



Obr.15: Časový průběh statorového proudu při rozběhu asynchronního stroje

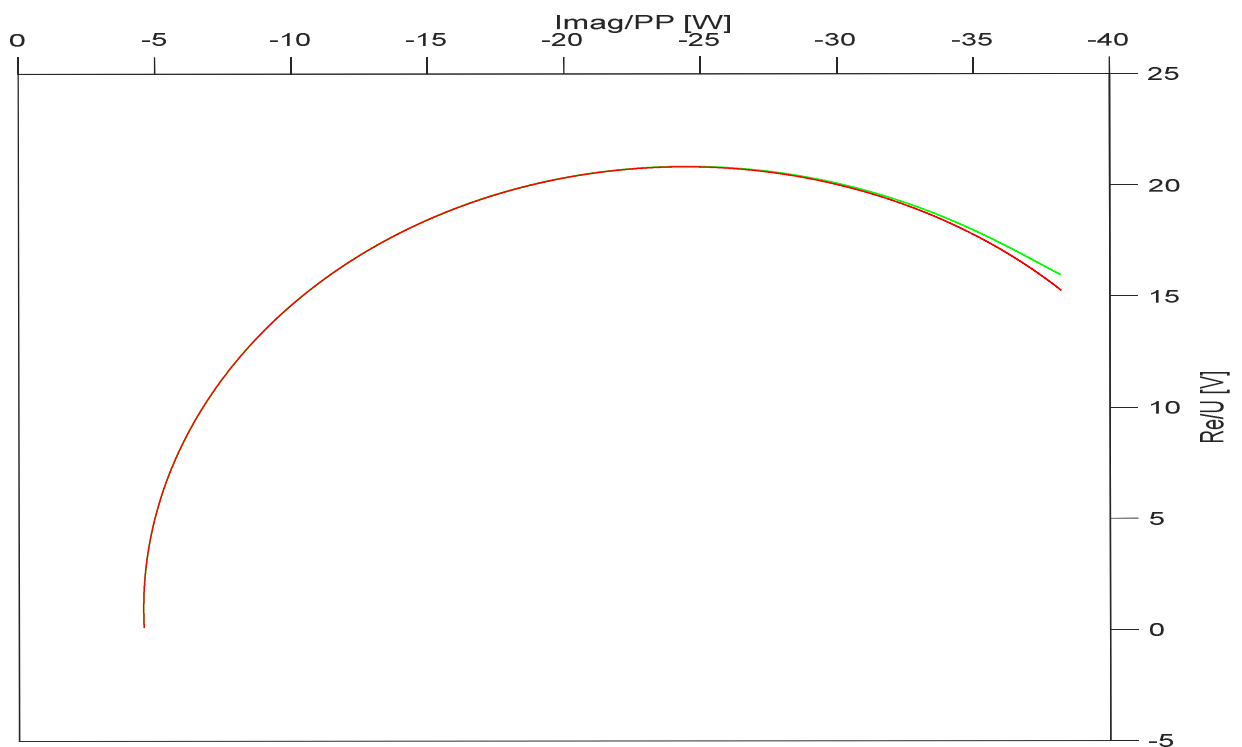
Jak je patrné z průběhů proudů bez a s vlivem skin efektu na obrázcích 12-15, vliv skin efektu u jednoduché hluboké drážky není tolik výrazný. To také vyplývá z hodnot, které nabývají činitelé, například pro $f = 50\text{Hz}$ odpovídá $k_x = 0,9741$ a $k_r = 1,0814$.



Obr.16: Časový průběh mechanických otáček rotoru

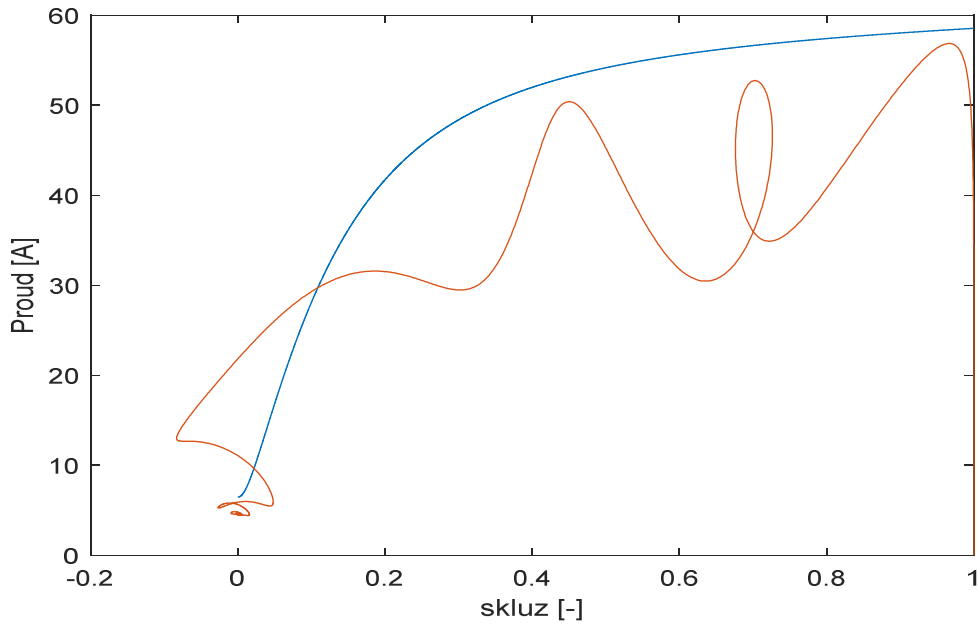
2.1.5 Kružnicový diagram

Následují výstupy dle vzorců 1.18 až 1.24. Script ze softwaru Matlab je k dispozici v přílohové části v kapitole 4.2. Vypočítáno pro frekvence 0-50 Hz.



Obr.17: Kružnicový diagram statorového proudu

Na obr. 17 jsou vykresleny dva průběhy - červený a zelený. Zelený je varianta s uvažováním vlivu skin efektu, červený naopak bez (tedy $k_r, k_x=1$). Jak je patrné, oba průběhy se téměř překrývají, i to je další důkaz pro tvrzení, že vliv skin efektu u hluboké drážky není výrazný.



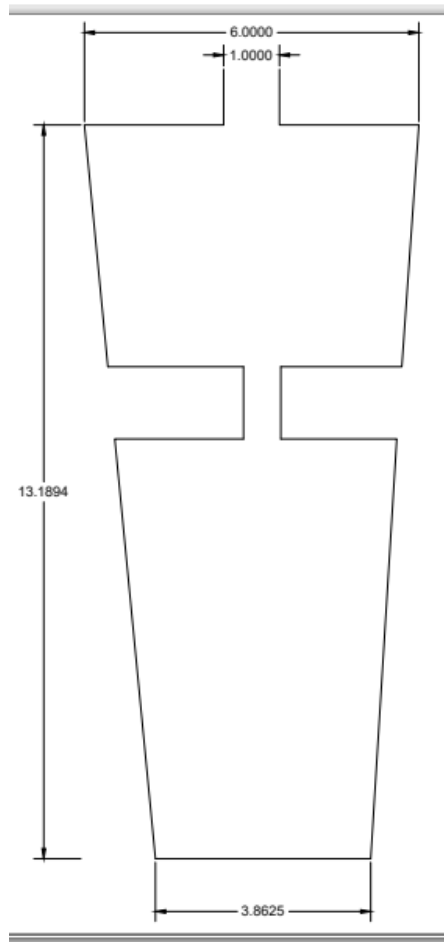
Obr.18: Závislost statorového proudu na skluzu

Oba průběhy na obr. jsou zobrazením statorového proudu. U červené varianty jde o hodnoty získané simulací v prostředí Simulink. Takový proud je závislý na dynamickém stavu motoru, popř. počátečních podmínkách, tomu také odpovídají záškuby v jeho průběhu.

Na druhé straně modrý průběh je vykreslením proudu z admitanční kružnice. Jak bylo uvedeno v teorii, takový proud je *zobrazením polohy koncového vektoru proudu*, jedná se tedy o ustálený stav, který zde tvoří obálku červenému průběhu.

2.2 Návrh nové drážky:

Jak bylo uvedeno dříve, vliv skin efektu pro hlubokou drážku není tolik výrazný (viz výsledky v předcházející kapitole 2.1, zejména porovnání proudů s a bez vlivu skin efektu), proto byla navržnuta geometrie dvojité klece.



Obr.19: Geometrie a rozměry (v mm) nové drážky

Drážka byla zvolena s ohledem na požadavek stejné aktivní plochy v porovnání s původní drážkou. Byla zachována konstantní šířka a průřez. Materiál je totožný s původní drážkou. Šířka krčku zvolena 0,3 mm a uvažována vyplněna vodičem.

2.2.1 Výpočet rozptylové indukčnosti $L_{\sigma 21}$ pro novou drážku

$$\lambda_d = \frac{\sum_{i=1}^n [\lambda_{i-element} * (\sum_{k=n}^i g_{i-element})^2]}{(\sum_{i=1}^n g_{i-element})^2}$$

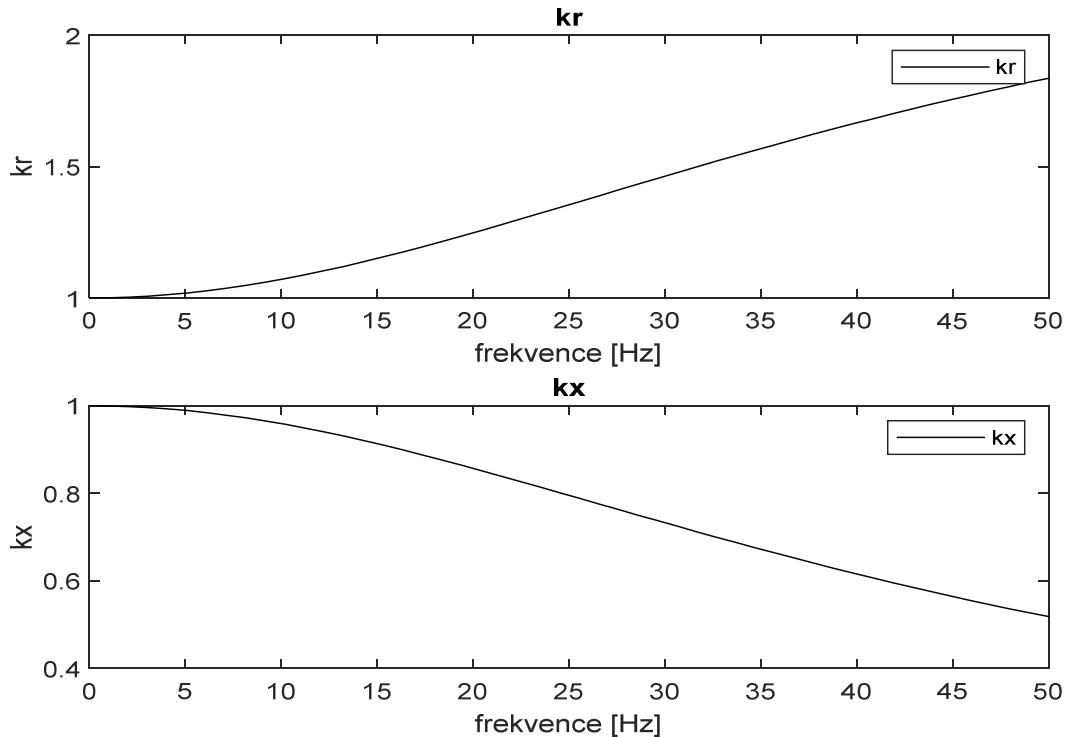
Pro původní drážku: $\lambda_d = 0.7153$

Pro novou drážku $\lambda_{d1} = 2.1745$

$$L'_{\sigma 21} = L_{\sigma 21} \cdot \frac{\lambda_{d1}}{\lambda_d} = 0.01264 \cdot 3.039 = 0.03842 H$$

2.2.2 Výpočet činitelů k_r , k_x obecnou metodou

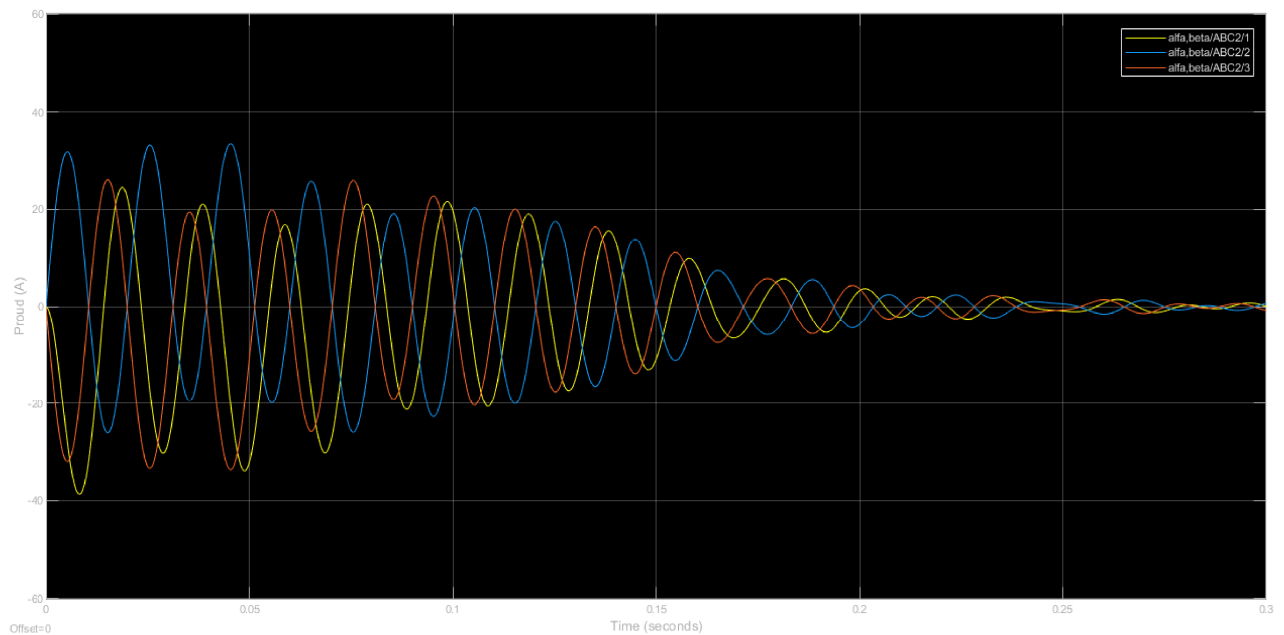
Matlab script k této drážce není součástí přílohy, je však obdobný jako u výpočtu předchozí drážky. Liší se pouze ve způsobu počítání vrstev drážky- u předchozí varianty byla hranice drážky popsána rovnicí přímky, zde byla drážka navrhuta v softwaru CAD a šířka jednotlivých vrstev ručně odměřena.



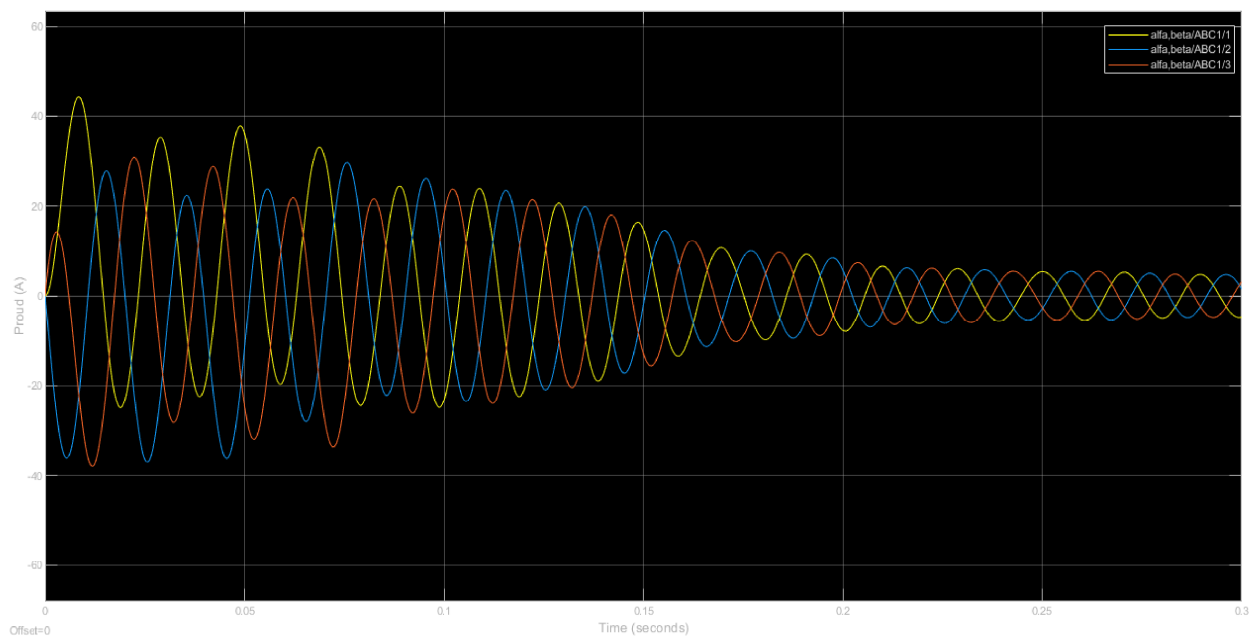
Obr.20: Závislost činitelů na frekvenci rotoru

Z výsledků činitelů je patrný nárůst jejich hodnot, v podstatě až na dvojnásobek v porovnání s hlubokou drážkou (obr.: 11). Tím lze konstatovat, že byla úspěšně ověřena teorie ohledně skinefektu u těchto typů drážek.

2.2.3 Výstupy ze Simulink modelu stroje

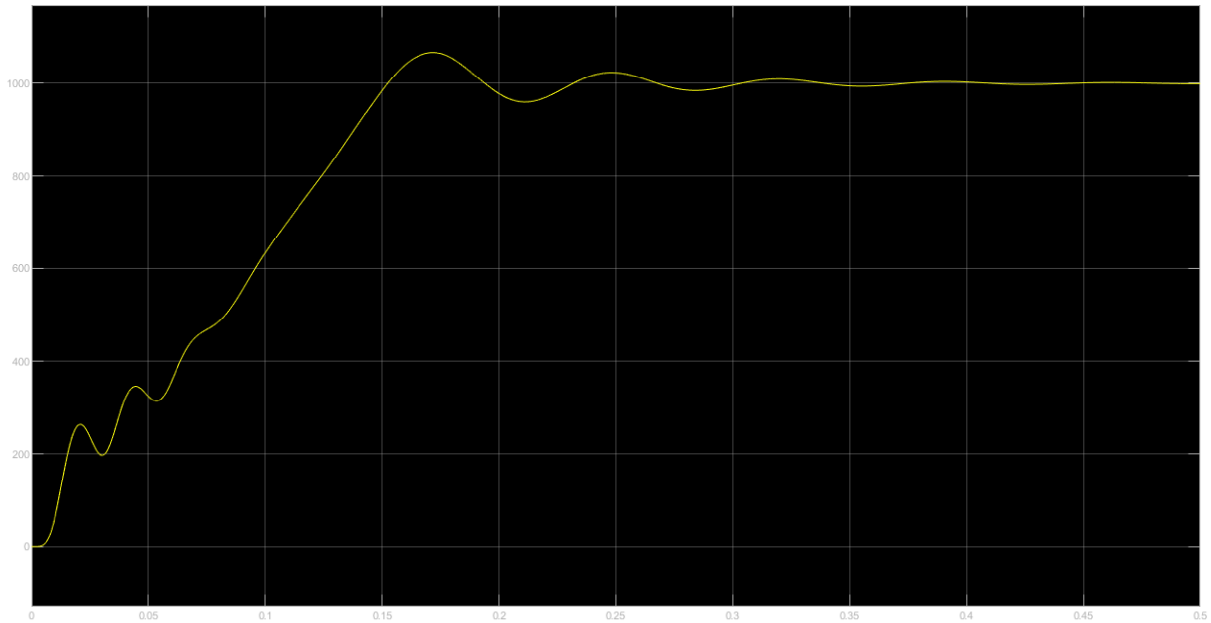


Obr.21: Průběh rotorového proudu



Obr.22: Průběh statorového proudu

V průbězích na obr.21 a 22, se vliv skin efektu projevuje v menší amplitudě statorového a rotorového proudu.

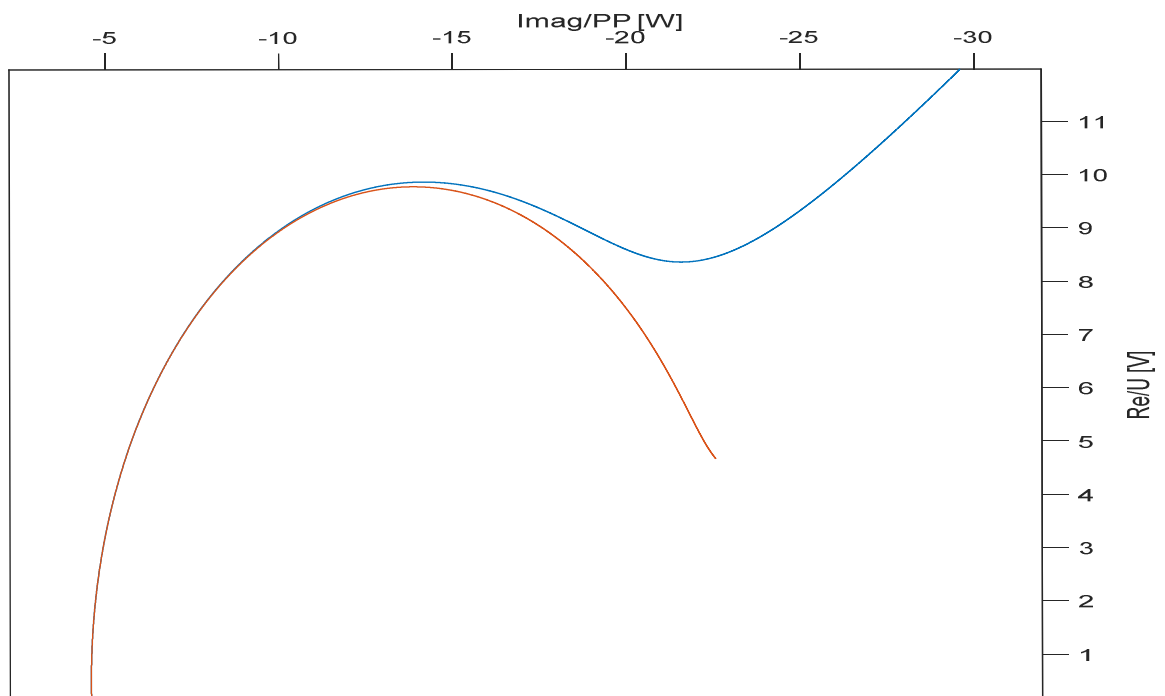


Obr.23: Časový průběh mechanických otáček rotoru

V porovnání s hlubokou drážkou obr.:16 je zde patrný pozdní čas ustálení děje. U hluboké drážky nastal v čase cca 0.2 s, zde v čase 0.3 s.

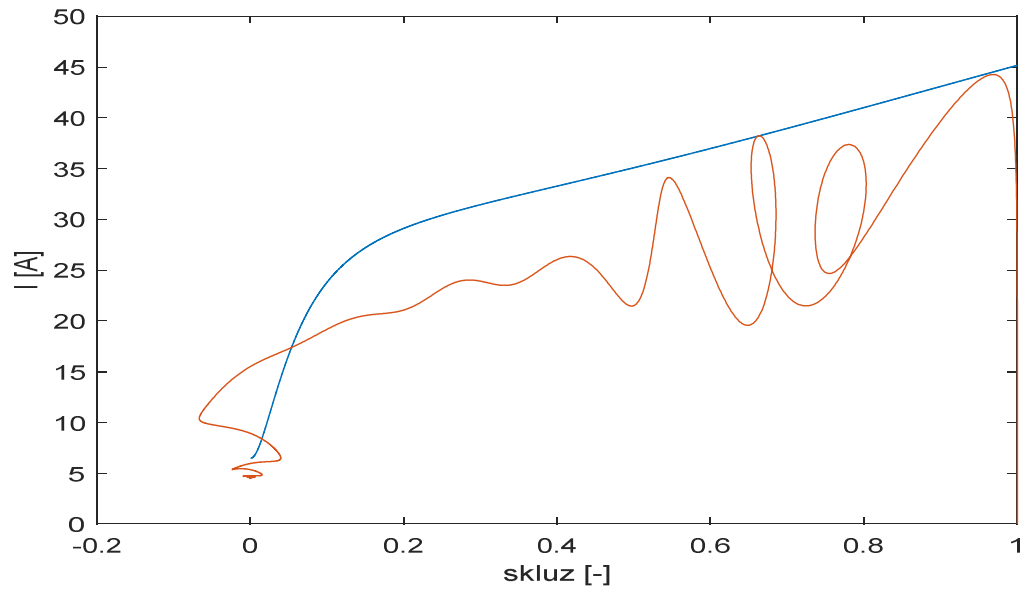
2.2.4 Kružnicový diagram

Vypočítáno pro frekvence 0-50 Hz



Obr.24: Kružnicový diagram statorového proudu

Červený průběh je kružnicový diagram hluboké drážky, modrý průběh pak diagram nově navrhnuté drážky. I zde byla ověřena teorie- kružnicový diagram u dvojité klece přechází na křivku vyššího řádu.



Obr.25: Závislost statorového proudu na skluzu

3 Závěr

Předkládaná práce měla přiblížit způsoby určování proudu při rozběhu asynchronního stroje s kotvou nakrátko a rovněž ukázat s tím související vliv skin efektu na rozběh těchto strojů.

Pokud se týče způsobů určování proudu při rozběhu stroje, byly v této práci použity dvě metody- kružnicový diagram a vytvoření modelu stroje v prostředí Simulink. V tomto místě autor práce odkazuje na část tohoto dokumentu 1.3 Matematické modelování přechodných dějů, kde bylo v prvním odstavci zmíněno, že pro zkoumání fyzikálních systémů je ideální kombinace analytického přístupu (metoda kružnicového diagramu) a experimentálního přístupu (Simulink model stroje). V tomto ohledu lze konstatovat, že autor práce, těmto požadavkům úspěšně dostal /srovnej výsledky získané oběma metodami-například shodné hodnoty amplitud statorového proudu na obr. 15 a 18 u jednoduché drážky, a také 22 a 25 u dvojité klece/

Autor práce dále pro přehlednost připomíná, že při rozběhu stroje se uplatňuje vliv skin efektu, kdy parametry náhradního schématu R'_2 a X'_2 (viz obr. 3) je nutno přenásobit činiteli k_r a k_x . U hluboké drážky autor práce opět demonstroval analytický (přibližná metoda výpočtu činitelů) a experimentální (obecná metoda) přístup. Vedoucím práce tedy byla zadána geometrie hluboké drážky, u které se potvrdil teoretický předpoklad, totiž že vliv skin efektu není tolik výrazný /srovnej téměř totožné výsledky bez skin efektu na obr. 12,13 a s jeho vlivem na obr. 14,15/. Pro účely této práce byla tedy navržena geometrie dvojité klece. Již z průběhu činitelů k_r a k_x na obr. 20 byl vidět nárůst jejich hodnot /srovnej s hlubokou drážkou na obr.11/. Analogicky, průběhy proudů vzešlé z experimentální a analytické metody pro tuto drážku dále potvrdily oprávněnost rozšíření drážek speciálních tvarů v dnešních rotorech- hodnoty amplitud proudů jsou téměř o třetinu menší, než u hluboké drážky.

Analytické a experimentální přístupy k řešení fyzikálních systémů mají zřejmě nezastupitelné místo nejen při návrhu elektrických strojů. Nástup moderní výpočetní techniky řešení těchto problémů značně usnadnil.

4 Přílohy

4.1 Program pro výpočet činitelů pro hlubokou drážku

```

p=20; %počet vrstev
U=zeros(p,1); %připravený vektor U
h_el=0.012/p; %vyska jedne vrstvy
b=zeros(1,p); %připravený vektor b
y=37999984.80; %vodivost tyče
u0=4*pi*10^(-7); %permeabilita
f= linspace(50,0,10009);%vektor frekvencí
a=size(f);%velikost vektoru f
t=a(1,2); %počet testovacích frekvencí
kr= zeros(1,t); %připravený vektor kr
kx= zeros(1,t); %připravený vektor kx
r= zeros(1,p); %připravený vektor r
x= zeros(1,p); %připravený vektor x
matice=rand(p,p)+i*rand(p,p); %připravený vektor dle disertace 2.34
ri_Ii=zeros(1,p); %připravený vektor dle disertace 2.36
Le_I=zeros(1,p);% dle disertace 2.37
Le_Ge=zeros(1,p);% dle disertace 2.37
Ge=zeros(1,p);% dle disertace 2.37

for z = 1:p % naplnění vektoru U
    U(z,1)=200;
end

zz=0;
for z = 1:p % naplnění vektoru b
    h1=zz+(h_el/2);
    y1=2*((-0.0833)*h1)+0.003;
    b(1,z)=y1;
    zz=zz+h_el;
end

d=1;
while d<=t
    z=1;
    while z<=p
        r1=1/(y*b(1,z)*h_el);
        x1=(2*pi*f(1,d)*u0*h_el)/b(1,z);
        r(1,z)=r1;
        x(1,z)=x1;
        z=z+1;
    end
    z=1; %
    zz=2;%
    while z<=p % matice 2.34
        x1_c=complex(0,(sum(x(1,1:z))));
        matice(z,z)=r(1,z)+x1_c; %pozice na diagonale
        matice(z,zz:p)=x1_c; %pozice na z řádku zz sloupci
        matice(zz:p,z)=x1_c;
        z=z+1; %
        zz=zz+1;%
    end
    I_c=matice\U; %vektor proudu
    Ityc = abs(sum(I_c));
    I=(abs(I_c));

```

```

z=1;
%   zz=p;
while z<=p %pomocný výpočty k 2.36 a 2.37
ri_Ii(1,z)=((r(z))*((I(z))^2));
Le_I(1,z)=(h_el/b(1,z))*abs(sum(I_c(z:end)))^2;
Le_Ge(1,z)=(h_el/b(1,z))*(sum(1./r(z:end)))^2;
Ge(1,z)=(y*b(1,z)*h_el);
z=z+1;
%   zz=zz-1;
end
kr(1,d)=sum(ri_Ii)/(1/(sum(1./r))*(Ityc^2));
kx(1,d)= (sum(Le_I)/((Ityc^2)))/(sum(Le_Ge)/(sum(Ge)^2));
d=d+1;
end

figure(1);
subplot(2,1,1); plot(f,kr,'k'), title('kr')
xlabel('frekvence [Hz]'); ylabel('kr'); legend('kr');
subplot(2,1,2); plot(f,kx,'k'), title('kx')
xlabel('frekvence [Hz]'); ylabel('kx'); legend('kx');

```

4.2 Program pro výpočet kružnicového diagramu

```

U1=230*sqrt(2);
r1=1.52939;
x1=3.28005 ;
r2=1.35437;
x2=3.97165;
xh=67.7398;
rfe=5.0379e+07;
zlh=(j*xh*rfe)/(rfe+j*xh);
c1=1+((r1+j*x1)/zlh);
p=10009; %počet skluzů
s=linspace(1,0,p); %připravený vektor s
z2=zeros (1,p);
z1=r1+j*x1+zlh;
ot=[0;1.26785119142155e-31;4.05712389215202e-30;.....]

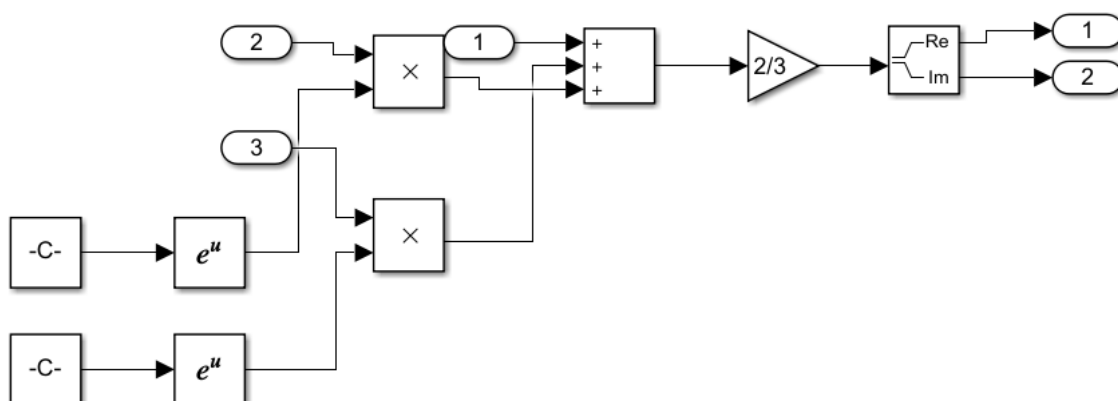
skluz=zeros (1,p);

for a= 1:p %vypocet skluzu z otacek

    skluz(1,a)=(1000-ot(1,a))/1000;

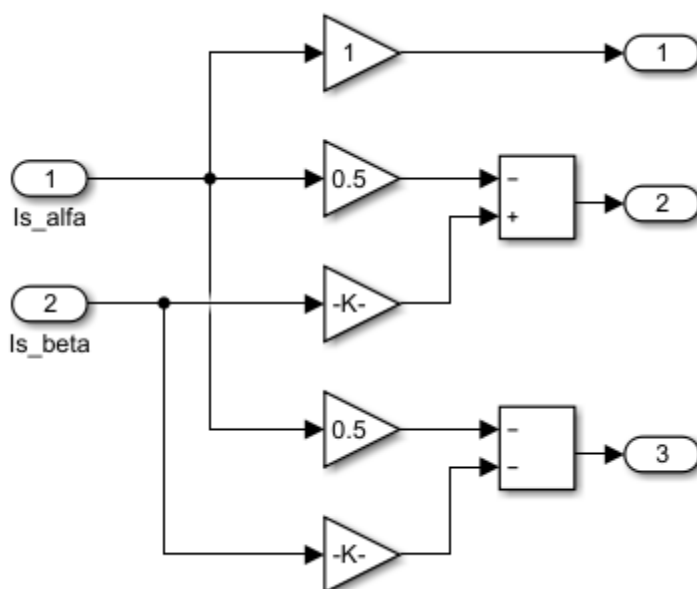
end
for a = 1:p % vypocet z2
    z2(1,a)=c1*(r1+j*(x1+c1*kx(1,a)*x2))+c1*(kr(1,a)*r2/s(1,a));
end
y=1./z2;
I2=y*U1;
I0=U1/z1;
I1=I0+(I2/c1);
%h=plot(I1)
%rotate (h,[0 0 1],90);
I1a= abs(I1);
I1am=I1a*sqrt(2);
h=plot (s,I1am);

```

4.3.2 Blok transformace do tří fázového systému

Blok pro zpětnou transformaci souřadnic α, β na souřadnice A,B,C, tak aby byly vhodné pro měření.



Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] KOPYLOV, Igor Petrovič. *Stavba elektrických strojů: Učebnice pro elektrotechnické fakulty*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1980.
- [2] PETROV, G.N. *Elektrické stroje: vysokoškolská příručka pro vysoké školy technického směru*. Praha: Academia, 1980, **Část 1., Úvod – transformátory**.
- [3] PETROV, G.N. *Elektrické stroje: vysokoškolská příručka pro vysoké školy technického směru*. Praha: Academia, 1982, **Část 2., Asynchronní stroje – synchronní stroje**.
- [4] MRAVEC, Rudolf. *Elektrické stroje a přístroje I*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1979.
- [5] KOHOUT, Jiří, Ing. *Metody matematického modelování elektrických strojů*. Plzeň, 2007. Disertační práce. Západočeská univerzita v Plzni. Fakulta elektrotechnická.
- [6] MĚŘIČKA, Jiří. *Obecná teorie elektrického stroje*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1973.
- [7] BARTOŠ, V.: *Teorie elektrických strojů*. Skripta ZČU, Plzeň, 2006. ISBN 80-7043-509-7
- [8] *Wikipedia.cz*. *Skin efekt.*, editováno 5.10.2017 [online]. [Cit.16.5.2020]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Skin_efekt
- [9] *Karel Hruška*. *Kružnicový diagram*, Home.zcu.cz [online]. [Cit. 16.5.2020]. Dostupné z: <http://home.zcu.cz/~khruska/cz/diagram.html>.