

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

KATEDRA ELEKTROMECHANIKY A VÝKONOVÉ ELEKTRONIKY

Diplomová práce

Stanovení parametrů synchronního stroje

Bc. Jakub Štěpán

2017

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Jakub ŠTĚPÁN**
Osobní číslo: **E13N0112P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Průmyslová elektronika a elektromechanika**
Název tématu: **Stanovení parametrů synchronního stroje**
Zadávací katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

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

1. Popište princip metody pro určení parametrů synchronního stroje ze zkoušky za klidu stroje.
2. Uveďte metodiku výpočtu včetně příkladu výpočtu z dodaných naměřených dat.
3. Proveďte simulaci v MATLABu pro určení parametrů náhradního schéma synchronního stroje.
4. Shrňte dosažené výsledky a porovnejte metodu s metodou náhlého zkratu.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího
Rozsah pracovní zprávy: 30 - 40 stran
Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická
Seznam odborné literatury:

1. IEEE Std. 155-2009.
2. ČSN EN 60034-4 ed.2.
3. Canay, I. M., Determination of Model Parameters of Machines from the Reactance Operators $x_d(js)$, $x_q(js)$ and Modeling of Alternating-Current Machines Having Multiple Rotor Circuits, IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. EC-8, no. 2, pp. 272279 and pp. 280296, June 1993.
4. Jef Verbeeck: Standstill Frequency Response Measurement and Identification Methods for Synchronous Machine. Vrije Universiteit Brussel, 2000, pp.238.

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

Datum zadání diplomové práce: 15. října 2014
Termín odevzdání diplomové práce: 11. května 2015


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




Prof. Ing. Václav Kús, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2014

Anotace

Práce je zaměřena na ověřování parametrů synchronních strojů metodou klidové frekvenční odezvy stroje. Tato metoda je obsažena v programu uvedeného v obsahu diplomové práce.

Abstract

The work is focused on checking parameters of synchronous machine by standstill frequency test of a machine. This method is present in a program which is contained in the diploma thesis.

Klíčová slova

Synchronní stroj, metoda náhlého zkratu, metoda klidové frekvenční odezvy, Matlab, náhradní schéma.

Key words

Synchronous machine, method of sudden short circuit, standstill frequency test, Matlab, equivalent schematic circuit.

Prohlášení

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

Tuto diplomovou práci jsem vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce. Dále prohlašuji, že veškerý software použitý při řešení této diplomové práce je legální.

.....
podpis

V Plzni dne 10.5.2017

Jakub Štěpán

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce panu Doc. Ing. Bohumilovi Skalovi, Ph.D. za cenné rady a obětovaný čas, rady, připomínky a metodické vedení práce.

Obsah

1	Úvod.....	1
2	Synchronní stroje.....	4
2.1	Základní poznatky pro výpočty synchronních strojů	4
3	Měření parametrů na synchronních strojích.....	16
3.1	Metoda náhlého zkratu	16
3.2	Měření klidové frekvenční odezvy IEEE Std 115 TM -2009 (SSFR).....	20
3.2.1	Základní teoretické poznatky	20
3.2.2	Postup měření.....	23
4	Výpočetní algoritmus pro parametry stroje.....	30
4.1	Výpočetní algoritmus	31
4.2	Optimalizační výpočty	34
4.2.1	Inicializace výpočtů.....	36
4.2.2	Ladění parametrů.....	37
4.3	Korekční výpočty	38
4.4	Příklad výpočtů	41
5	Měření náhlého zkratu v porovnání s metodou SSFR.....	44
5.1	Řešení měření náhlého zkratu	44
5.2	Srovnání metody náhlého zkratu a SSFR.....	49
6	Závěr.....	52
7	Citace.....	I
8	Seznam symbolů	II
9	Příloha	VI
	Vypsání těla výpočetního algoritmu	VI

1 Úvod

Synchronní stroje jsou založeny na principu točivého magnetického pole. Tyto střídavé elektrické stroje se dělí dle funkce na synchronní generátory (alternátory), synchronní motory a synchronní kompenzátory, které se používají pro zlepšení účinníku v provozních sítích.

Výhodou i nevýhodou synchronních strojů je, že se musí pro jejich správnou funkci zachovat synchronní chod s frekvencí magnetického proudu, neboť jen tak se docílí správného účinníku. Podle konstrukčního provedení rotoru synchronních strojů jsou dva základní typy a to sice stroje s vyniklými póly a s hladkým rotorem. Pro generátory jsou v kostře upevněny plechy a v jejich drážkách je trojfázové vinutí, které bývá většinou připojeno přímo na kabely odběrových svorkovnic. Rotor stroje tvoří magnetické kolo, kde na každém pólu je magnetová cívka.

Dále se stroje dělí na pomaluběžné, poháněné dieslovými a plynovými motory. Mají velký průměr a osovou délkou. Rotor má velkou setrvačnost, což je výhodné pro vyrovnávání nesteromnosti chodu pístových motorů. Alternátory poháněné vodními turbinami mají obvykle svislý hřídel a rotor je spojen přímo s oběžným kolem turbíny. Stroje, které jsou poháněny parními turbinami, s převodem do pomala nebo rovnoběžnými vodními turbinami jsou konstruovány jako rychloběžné alternátory s vyniklými póly.

Synchronní alternátory s hladkým rotorem jsou vždy poháněny rychloběžnými turbinami. Proto se nazývají turboalternátory. Bývají dvoupólové s 3000 ot/min při kmitočtu 50 Hz. Proto je se zřetelem na vysoké otáčky volen průměr rotoru maximálně do 1,2 metru, ale osová délka stroje je velká. Na čela vinutí rotoru jsou nasazeny obruče z nemagnetické oceli, která drží vinutí zejména proti poškození odstředivou silou.

Synchronní stroje byly dříve využívány hlavně jako generátory a kompenzátory jalové energie v sítích průmyslových závodů využívající elektrických motorů k výrobě produktů. V dnešní době je trend vracet se k těmto strojům pro provoz v motorickém režimu s rotorem stroje tvořeným permanentními magnety. Toto provedení je možno například vidět na podvozcích tramvají 15T vyráběných ve Škoda Transportation a.s..

Postupů pro měření elektrických vlastností s ohledem na konstrukční provedení synchronních generátorů je celá řada. Mezi ně lze zařadit metodu skluzovou, měřením nulových složek impedance, měřením rázových reaktancí natáčivou metodou a v neposlední řadě náhlým zkratem na stroji. Všechny tyto metody jsou již dlouhou dobu využívány pro měření parametrů jak statických, tak i dynamických vlastností vinutí a celkové konstrukce elektrického synchronního stroje. Všechny tyto metody dávají obraz o stavu stroje. Výše uvedené metody měření jsou zaměřeny na parametry vinutí. Výsledky měření mohou být porovnávány s výrobními hodnotami a odhalit vady vzniklé při výrobě, stav izolace, či odchylky odlišné od návrhu, kdy se mohou projevit neočekávané jevy při chodu stroje. Pro svou diplomovou práci jsem si vybral použití metody „Měření klidové frekvenční odezvy – SSFR“. Tato metoda je v rámci evropského kontinentu relativně nová. To je příčinou toho, že ještě nebyla dostatečně zpracovaná a připravena pro průmyslové použití v obecném rozsahu.

První část práce bude zaměřena na základní teoretické poznatky začínající prvotní teorií vzniku elektromagnetického pole. Posléze jsou v textu poznamenány teoretické poznatky o vinutí elektrických synchronních strojů, která slouží ke zvýšení efektivity účinků působení magnetických polí statoru a rotoru. Následuje rozbor základních parametrů vinutí.

V druhé kapitole této práce jsem rozepsal jednotlivé metody měření parametrů synchronních motorů, začínající metodou náhlého zkratu a samotná podoba elektrotechnické normy IEEE Guide for Test Procedures for Synchronous Machines. Tato část bude zaměřena na jednotlivé měřené veličiny a jejich vlastní popis, rozměry a vzorec výpočtu s využitím naměřených dat.

Třetí kapitola bude pojednávat o samotném programu a výpočtu reálných parametrů stroje z dat získaných měřeními. Po výpočtu parametrů bude následovat otestování správnosti a určení výpočetní odchylky.

V poslední části práce budu porovnávat metodu náhlého zkratu s klidovou frekvenční odezvou stroje. Je to srovnávání postupů, jejichž uvedení do průmyslové sféry dělí časová prodleva několika generací. Jelikož vývoj technologií postupuje každým dnem kupředu, je potřeba neustále zdokonalovat měřicí techniky, přístroje a také postupně snižovat výsledné

odchylky. Výsledné hodnoty odchylek často významně rozhodují o použití pro aplikace strojů do provozu ve firmách, zdravotnických zařízeních, domácnostech a mnoha dalších využívaných prostředí.

2 Synchronní stroje

2.1 Základní poznatky pro výpočty synchronních strojů

Synchronní stroj je točivý stroj pracující na principu elektromagnetické indukce. Jeho princip je podobný konstrukci transformátoru. Tato podobnost je v magnetickém obvodu, který je přerušen vzduchovou mezerou, a tak umožňuje pohyb rotoru. Vzduchová mezera však představuje velký magnetický odpor, proto je snaha o její minimalizaci. Její velikostí je ovlivňován magnetizační proud a tím i dimenzování vinutí. Magnetický obvod statoru je skládán z plechů. Vzhledem k tomu, že jím protéká střídavý proud, dochází ke ztrátám vířivými proudy. Magnetický obvod rotoru může být vytvořen z masivního železa, díky průtoku stejnosměrného proudu. [2]

Základní teorie všech elektrických strojů vychází z Maxwellových rovnic, kdy nejzajímavější vztah pro elektrické stroje je první Maxwellova rovnice, zabývající se zákonem celkového proudu, vyobrazený na obrázku 1: [2]

$$\oint_c H \cdot dl = I + \frac{d\psi}{dt} \quad (1)$$

Tento zákon vypovídá o cirkulaci vektoru intenzity magnetického pole H po libovolné křivce c , který je roven součtu celkového proudu I a posuvného proudu $\frac{d\psi}{dt}$. Jinak řečeno, pokud vodičem protéká elektrický proud, vzniká kolem něj magnetické pole, to znamená, že toto pole je vírové. Tento jev popisuje Oerstedův - Ampérův jev. Pokud se elektrické pole změní, vzniká tak posuvný Maxwellův proud, který zároveň mění magnetické pole a to je možné měřit jako indukované napětí. Tuto vlastnost popisuje Maxwell taktéž ve svých rovnicích. Jedná se o zákon elektromagnetické indukce, tzv. Faradayův indukční zákon. Tento jev je popsán vztahem: [2]

$$U_i = \frac{d\phi}{dt} \quad (2)$$

Magnetický tok

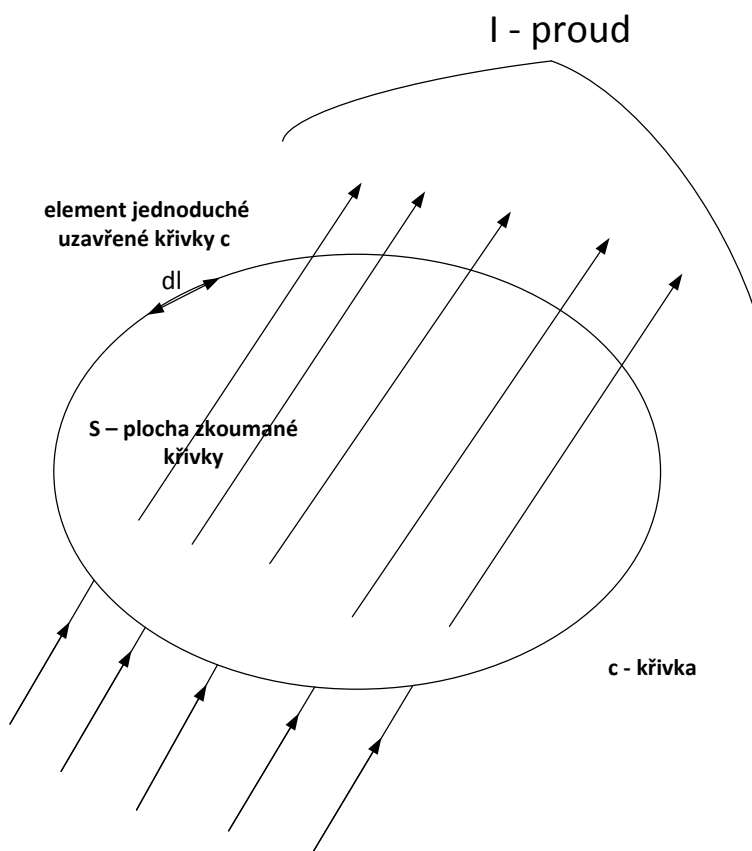
$$\phi = \int_s B \cdot dA \quad (3)$$

Veličiny H (intenzita magnetického pole) a B (magnetická indukce) jsou si navzájem úměrné a jejich závislost popisuje permeabilita :

$$\mu = \frac{B}{H} \quad (4)$$

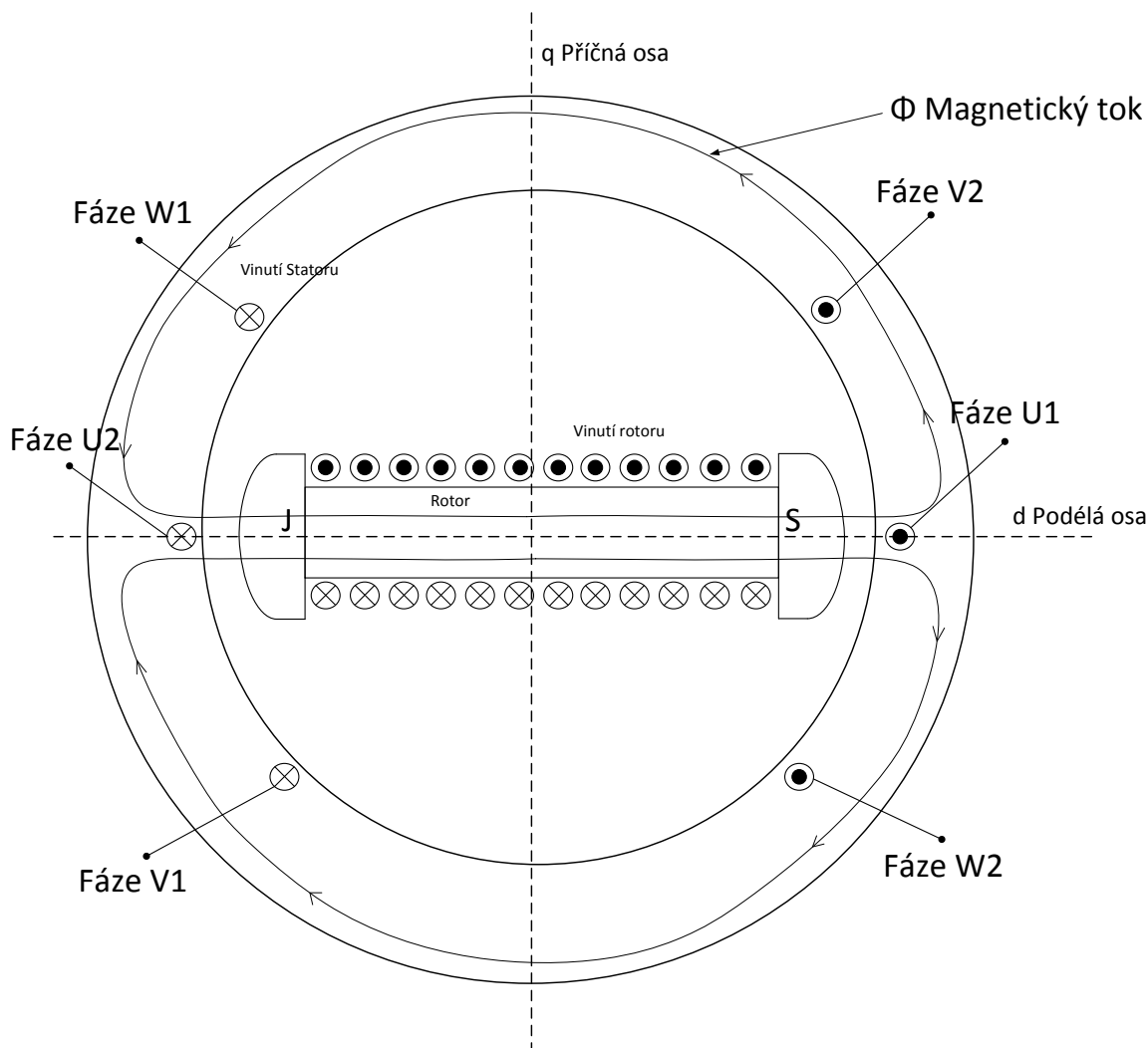
Jako reakce na již zmíněné indukované napětí vzniká ve vodiči opět proud, nyní však opačného smyslu, který působí proti změně, jež ho vyvolala.

Zákon celkového proudu je naznačena na obrázku 1.



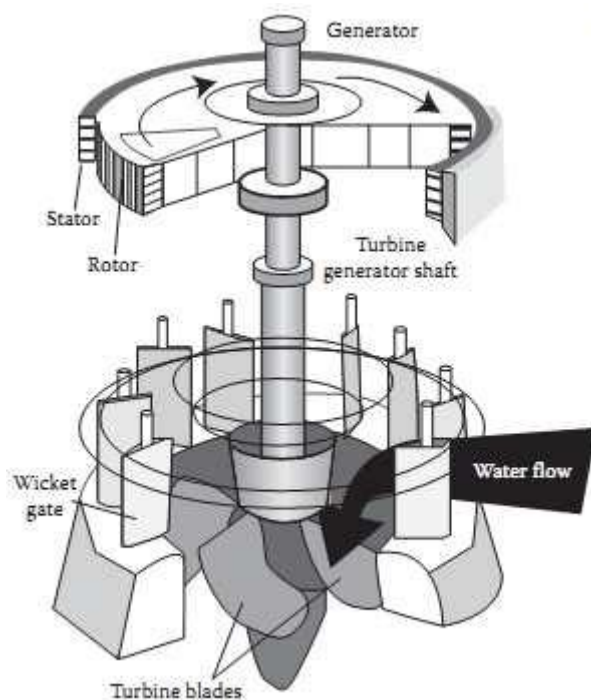
Obrázek 1: Vizualizace první Maxwellovy rovnice.

Díky těmto základním znalostem o vzniku magnetických polí a jejich vlastnostech je tedy již možné postoupit k pochopení elektrické přeměny v magnetické pole v samotném synchronním stroji, jak je znázorněno na obrázku 2. Na tomto znázornění je vyobrazen rotor, otáčivá část stroje, který je buzen, a stator, jeho pevná část vytvářející točivé magnetické pole. Zároveň jsou na obrázku 2 naznačeny d (podélná) a q (příčná) osa stroje.



Obrázek 2: Nákres rotoru i statoru synchronního stroje s pólovými nastavci .

Synchronní stroje rozdělujeme dle pracovního umístění. V provozu, kdy na hřídel stroje působí otáčivá síla přenesená z lopatek Peltonovy, Francisovy, či Kaplanovy turbíny, hovoříme o hydrogenerátorech. Tento typ synchronního generátoru se vyznačuje velkým průměrem D_1 a rotoru. Jsou to mnohápólové stroje, které se díky velkému počtu pólů otáčejí pomaleji, ale dosahují velkých výkonů. Umístění jejich závěsných ložisek se dělí podle polohy na vertikální nebo vodorovné. [1]



Obrázek 3: Konstrukční řešení hydrogenerátoru, převzato z [3]

Druhou možností je provedení synchronního generátoru s hladkým rotorem, který je vhodný k použití v tepelných či jaderných elektrárnách. Zde se využívá přetlakovaná pára, která při působení na lopatky turbíny roztočí hřídel na vysoké otáčky. Z tohoto důvodu je nutnost zmenšit průměr rotoru, aby vlivem odstředivých sil nedošlo k porušení mechanické pevnosti konstrukce. Rotory turbogenerátorů se proto navrhnou nejčastěji jako dvoupólové s průměrem do 1,3 metru. Pro generování vysokých výkonů se na úkor průměru prodlužuje délka stroje.

Princip činnosti synchronního stroje je velmi podobný strojům asynchronním, kde největší rozdíl je v otáčivé rychlosti rotoru vůči statoru. U asynchronních strojů je otáčivá rychlost rotoru zpožděna za rychlostí magnetického pole statoru a vzniká tím skluz:

$$S = \frac{\omega_1 - \omega}{\omega_1} = \frac{n_1 - n}{n_1} \quad (5)$$

Hodnota skluzu u asynchronních strojů je důležitá, protože jen při jeho nenulové velikosti se do rotoru indukují napětí a vytváří se moment, tudíž frekvence rotoru je menší než statorová. Pokud by se otáčky rotoru dostaly na úroveň otáček statoru, indukované napětí by nevznikalo a tím by zanikl i moment. U synchronních strojů se rotor otáčí shodnou rychlostí jako magnetické pole statoru. Tady vidíme rozdíl mezi synchronními a asynchronními stroji, kde u synchronních strojů, na rozdíl od asynchronních, je jiná konstrukce rotoru, který je také napájen. Výjimku představují stroje s permanentními magnety na rotoru, kde je magnetické pole rotoru tvořeno pomocí magnetů a není nutno ho budit. Tato odchylka v konstrukci předurčuje synchronní stroje pro generátorický režim, kdy budícím proudem a rychlostí otáčení rotoru ovlivňujeme indukované napětí ve statoru dle vztahu: [5]

$$U_i = 4,44Nk_v\phi f \text{ [V]} \quad (6)$$

Napětí v jednotlivých cívkách se sčítá geometricky, tento jev respektuje činitel vinutí k_v [4]:

$$k_v = k_r k_y < 1 \quad (7)$$

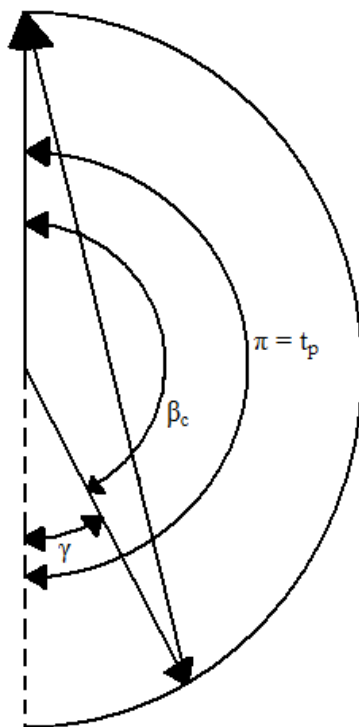
z toho činitel kroku pro základní a harmonickou a vyšší harmonické[4]:

$$k_y = \sin\left(\frac{\beta_c}{2}\right) = \cos\left(\frac{\beta_c}{2}\right) \text{ a pro } v\text{-tou harmonickou} \rightarrow k_{yv} = \sin\left(v\frac{\beta_c}{2}\right) \quad (8)$$

Synchronní rychlost, kterou se stroj za normálního režimu otáčí lze stanovit ze vztahu:

$$\omega_s = \frac{\omega_1}{p} \quad (9)$$

$$\text{kdy } \omega_1 = 2\pi f_1 \quad (10)$$



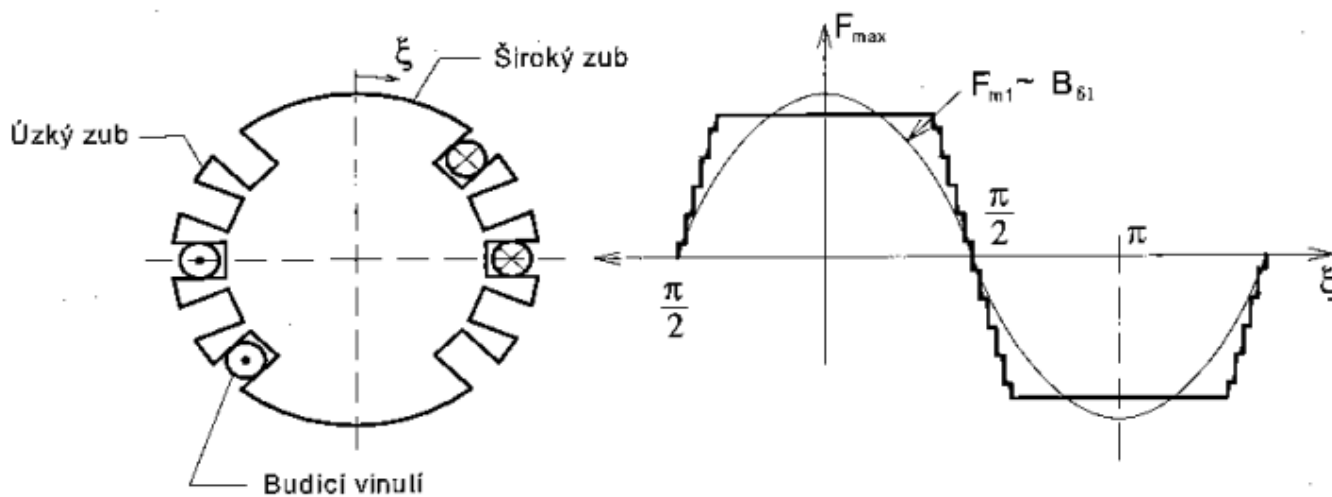
Obrázek 4: Zkrácení kroku cívky a odpovídající úhly.[4]

Pro potlačení proudů vyšších harmonických, které se indukují ve vinutí stroje a ruší jeho chod, se dosahuje úpravou vinutí a vhodným zkrácením kroku cívek, naznačeném na obrázku 4. Nejvhodnější hodnoty se pohybují v rozmezí 0,8 až 0,9, kdy dochází k potlačení páté a sedmé harmonické, které se indukují a narušují sinusový průběh magnetického pole. [10]

Pro určení činitele rozlohy se nebudou magnetická napětí sčítat algebraicky, ale geometricky, proto vztah pro výpočet jejich velikosti:

Činitel kroku. [4]

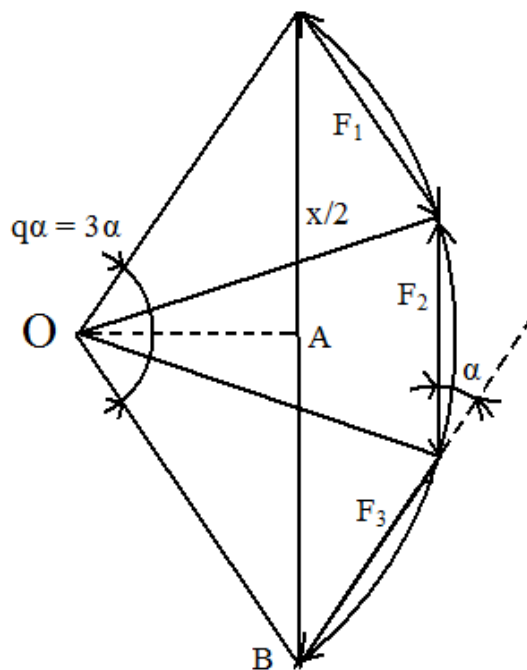
$$k_r = \frac{\Sigma \text{geometrický}}{\Sigma \text{algebraický}} = \frac{\sin\left(q\frac{\alpha}{2}\right)}{q\sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)} \quad (11)$$



Obrázek 5: Průběh magnetického napětí a porovnání ideálního od reálného průběhu.[4]

Magnetické napětí. [4]

$$F_1 = 2 \sin \left(\frac{\alpha}{2} \right) \tag{12}$$



Obrázek 6: Odvození činitele rozlohy.[4]

Pro určení magnetizačního proudu synchronního stroje existuje, podobně jako u transformátorů, relace mezi budícím, satorovým a magnetizačním proudem. [4]

Magnetizačním proud. [4]

$$I_{\mu} = gI + I_b \text{ [A]} \quad (13)$$

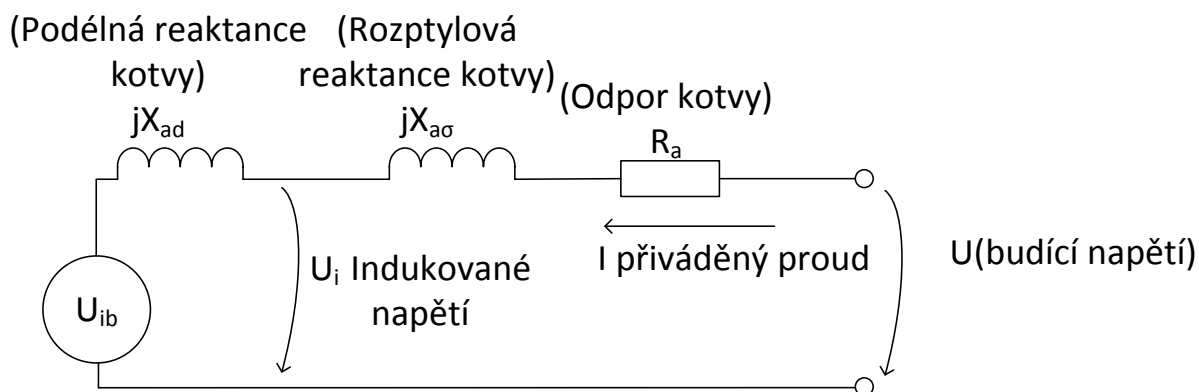
kdy činitel převodu

$$g = \frac{mN_s k_v}{\sqrt{2}N_b k_{vb}} \quad (14)$$

kde:

- m počet fází
- N_s počet závitů satorového vinutí
- N_b počet závitů budícího vinutí
- k_v činitel vinutí

Pro ukázání dalších vlastností stroje je dobré nakreslit si náhradní schéma, které je zobrazeno na obrázku 7, a fázorový diagram, znázorněný na obrázku 8. Bude uvažován stroj s rotorem s vyniklými póly.



Obrázek 7: Náhradní schéma.[4]

Z náhradního schématu (obrázek 10) lze přímo odvodit impedanci:

Podélná impedance

$$Z_d = R_a + jX_{ad} + jX_{a\sigma} = R_a + jX_d \quad (15)$$

Indukované napětí

$$U_{ib} = U - R_a I - jX_d I \quad (16)$$

z toho je proud

$$I = \frac{U - U_{ib}}{Z_d} \quad (17)$$

Pro impedance X_{ad} a $X_{a\sigma}$ prakticky vždy platí, že $X_{ad} > X_{a\sigma}$. Díky znalosti velikosti I_μ lze kreslit fázorový diagram (obrázek 11), kde již jsou zavedeny osy d (podélná) a q (příčná), které jsou vázány na rotor. [4]

Z náhradního schématu vychází:

Celkové budící napětí

$$U = U_d + U_q \quad (18)$$

Celkové napájecí proud

$$I = I_d + I_q \quad (19)$$

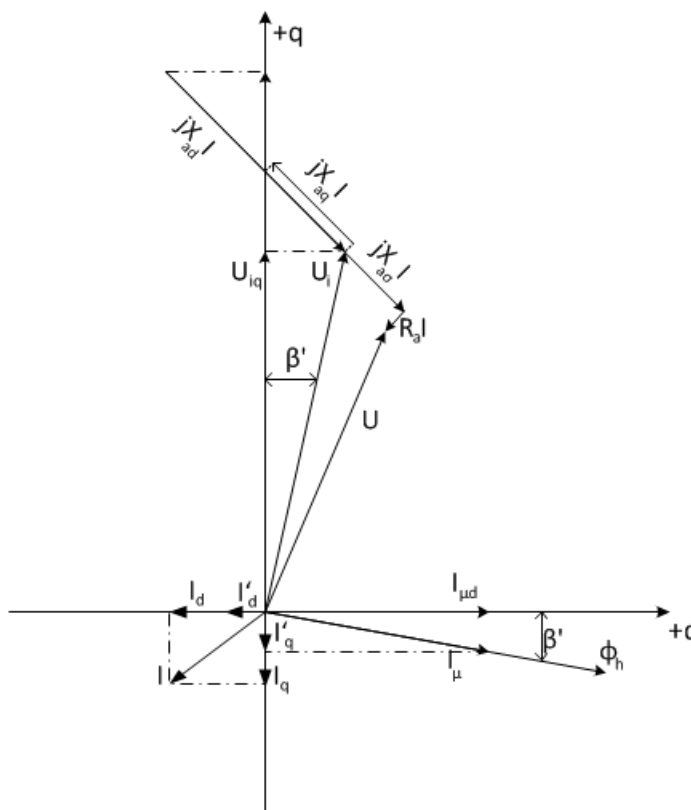
Důležitá je také charakteristika naprázdno a nakrátko stroje, kdy tyto dva režimy jsou velmi podobné těmto stavům u transformátoru. Ve stavu naprázdno je stroj nasycený a projevuje se efekt sycení a ve stavu nakrátko je stroj nenasyčený. Velikost proudu nakrátko je dána vztahem: [5]

$$I_k = \frac{U_{ib}}{X_d} = \frac{X_{ad} I_b}{X_d} \quad (20)$$

a podélná reaktance nesyčená a syčená [5]

$$X_{dnes} = \frac{U_N}{I_{k\delta}} \quad \text{a} \quad X_{dsyc} = \frac{U_N}{I_{ko}} \quad (21)$$

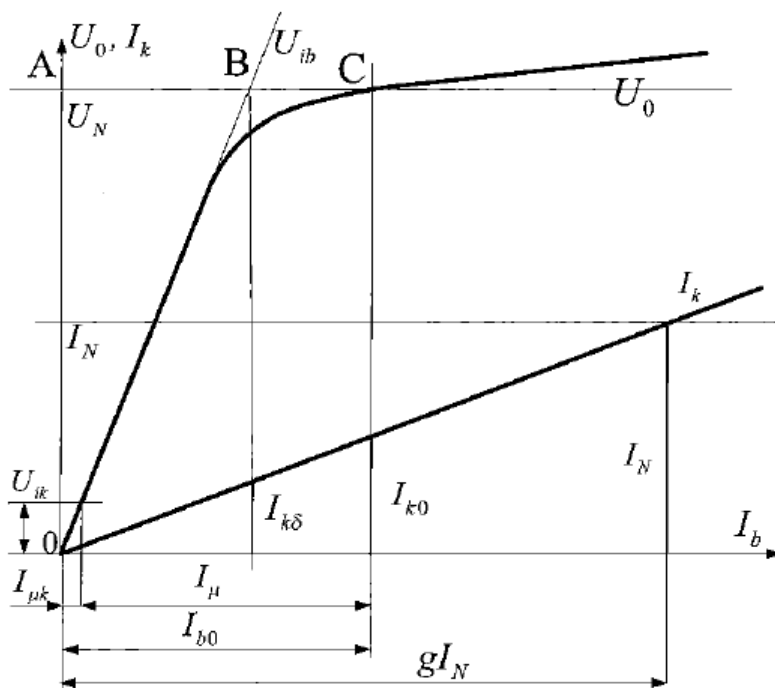
přičemž platí, že $X_{dsyc} < X_{dnes}$.



Obrázek 8: Fázorový diagram stroje s rotorem s vyniklými póly, převzato z [4]

Při zkratu se magnetické poměry ve stroji změní. Zkratový proud je v prvním okamžiku největší, neboť je omezen jen impedancí vinutí, kdy budící vinutí zůstává stálé. Protože činný odpor vinutí je proti reaktanci zpravidla malý, je zkratový proud téměř čistě jalový a jeho reakce

je působící síla v ose pólů proti původnímu magnetickému poli, které postupně slábne, až nastane nová rovnováha ustáleného proudu nakrátko a výsledným magnetickým tokem indukovaným malou elektromagnetickou silou. Ustálený proud nakrátko je poměrně malý, proto je charakteristika přímková, protože i sycení magnetického obvodu je malé.

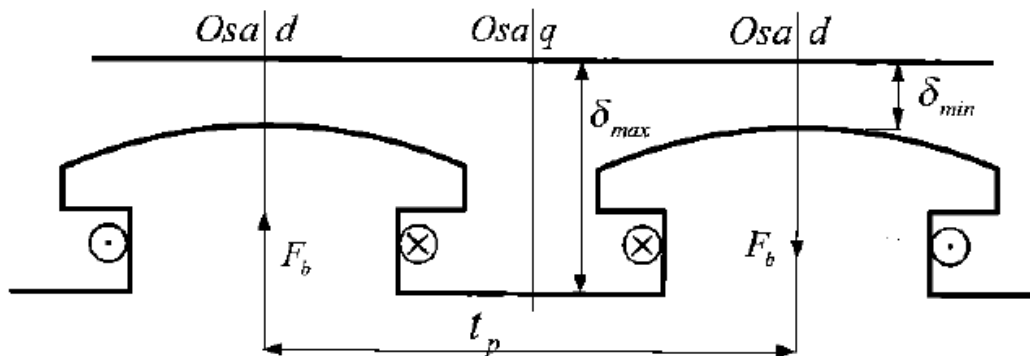


Obrázek 9: Charakteristika naprázdno a nakrátko synchronního stroje, převzato z [5]

Na obrázku jsou vyznačené veličiny:

- I_n, U_n jmenovité hodnoty proudu a napětí
- I_b budící proud
- U_0 napětí naprázdno
- U_{ib} indukované napětí
- I_μ magnetizační proud
- I_{b0} budící proud při chodu naprázdno
- $I_{\mu k}$ magnetizační proud při chodu nakrátko
- I_k proud nakrátko
- $I_{k\delta}$ proud nakrátko ve vzduchové mezeře

- I_{k0} zkratový proud při chodu naprázdno

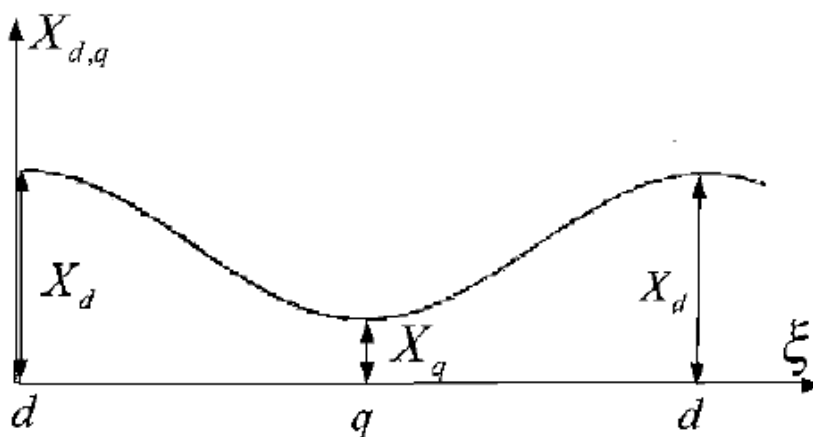


Obrázek 10: Naznačení os u stroje s vyniklými póly, převzato z [5]

Na obrázku jsou vyznačené veličiny:

- F_b magnetické napětí v podélné ose
- t_p pólová rozteč
- δ_{max} maximální velikost vzduchové mezery
- δ_{min} minimální velikost vzduchové mezery

Na obrázku 11 je znázorněn průběh podélné a příčné reaktance, kdy je vidět změna velikosti X_q , kde je δ_{max} oproti ose d s δ_{min} .

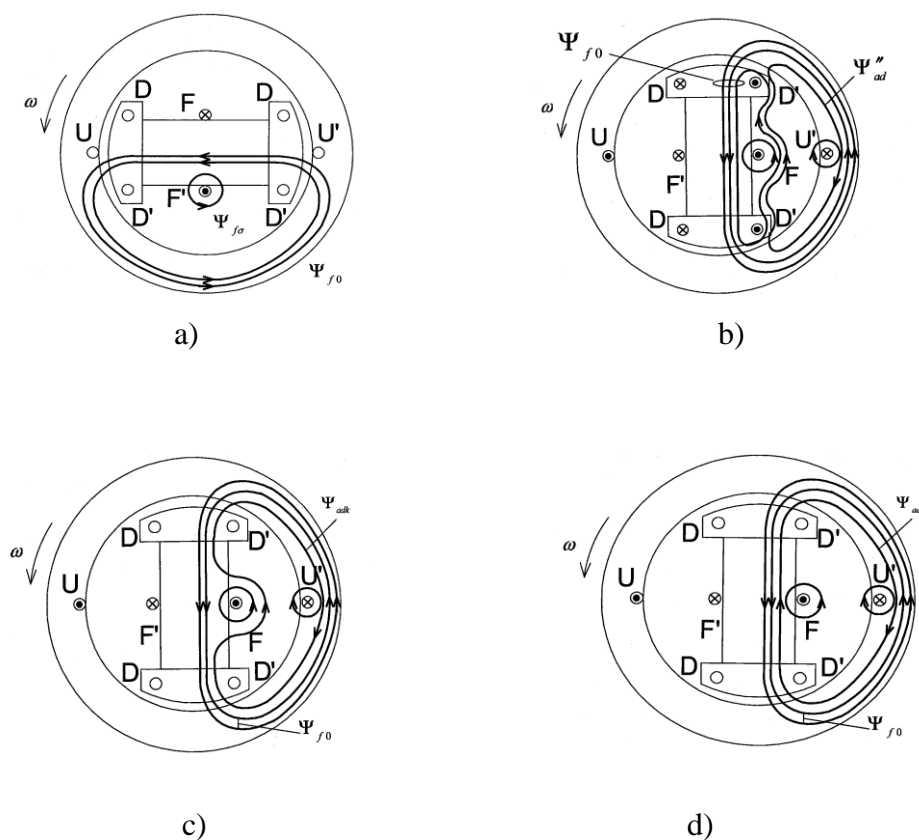


Obrázek 11: Průběh podélné a příčné reaktance při změně úhlu natočení rotoru ξ , převzato z [5]

3 Měření parametrů na synchronních strojích

3.1 Metoda náhlého zkratu

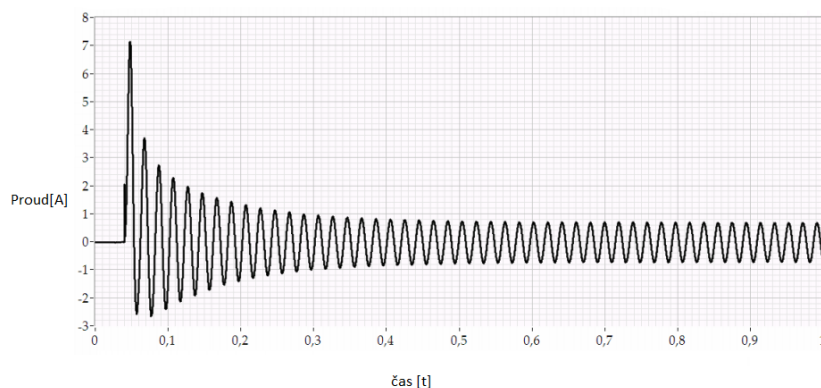
V průběhu tohoto měření je měřen zkratový proud stroje. Při zkratu proběhne přechodový jev, kdy zkratový proud je velmi nebezpečný pro izolaci a mechanickou pevnost jak vinutí, tak kostry. Je nutné mít nabuzený stroj na snížené napětí, aby ani první amplituda zkratového proudu nepřesáhla jeho jmenovitou hodnotu pro ustálený chod. [6]



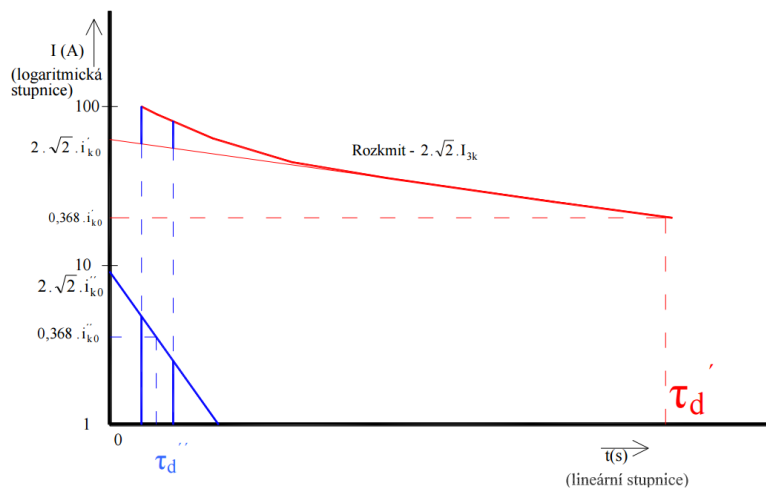
Obrázek 12: Průběh magnetického toku při zkratovém proudu (a) na začátku, (b) po první čtvrtperiodě I_k , (c) po zániku proudu v tlumiči, (d) v ustáleném stavu, převzato z [6]

Pokud je stroj ve stavu naprázdno, rotor se otáčí. V okamžiku zkratu začne do zkratované cívky vnikat budící tok. Dle principu konstantního toku musí zůstat tok nulový. Proto tedy cívkou začne protékat proud, který kompenzuje budící tok vnikající do cívky. Průběh magnetického toku je znázorněn na obrázku 12. Díky transformační vazbě roste proud v tlumiči i budící proud. Tok budícího pole musí zůstat konstantní, a proto se uzavírá vzduchovou mezerou. Vlivem činných odporů dojde k postupnému exponenciálnímu tlumení naindukovaných proudů a nastává nová rovnováha mezi ustáleným proudem nakrátko a výsledným magnetickým tokem.

[6]



Obrázek 13: Průběh zkratového proudu v jedné fázi od počátku do ustálení zkratu, převzato z [7]



Obrázek 14: Znárodnění semilogaritmických souřadnic a zobrazení přechodové a rázové složky na jedné fázi v závislosti na čase, převzato z [7].

Vlastní vyhodnocení zkratového proudu má následující postup. Nejprve je důležité vytvořit obálku zkratového proudu, kdy horní obálka, dle obr. 15, bude označena jako i_1 a spodní jako i_2 . Z těchto dat je možné dále určit aperiodickou a střídavou složku proudu, kdy:

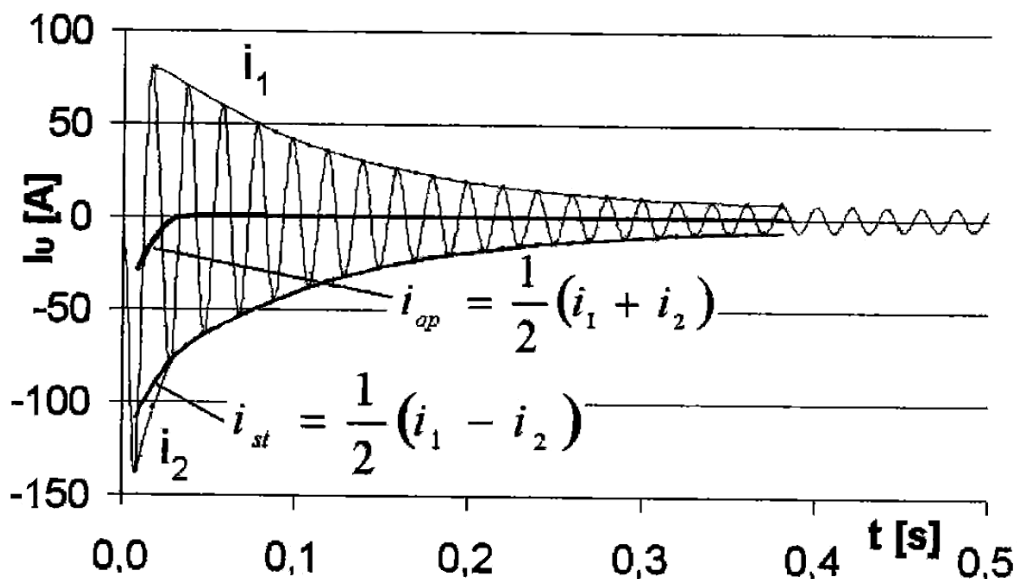
Aperiodická složka zkratového proudu [6]

$$i_{ap} = \frac{1}{2}(i_1 + i_2) \text{ [A]} \quad (22)$$

Periodická složka proudu [6]

$$i_{st} = \frac{1}{2}(i_1 - i_2) \text{ [A]} \quad (23)$$

Výsledné průběhy obou složek zkratového proudu se následně zanesou do grafu, jako je tomu na obr. 15.



Obrázek 15: Průběh zkratu s obálkou a složkami aperiodické a střídavé složky na fázi U, převzato z [6].

Poté se od střídavé složky proudu odečte hodnota ustáleného zkratového proudu. Velikost této hodnoty se musí shodovat ve všech třech fázích. Pokud se velikosti liší, uvažuje se jejich střední hodnota. V dalších krocích je vyhodnocení v semilogaritmických souřadnicích, kde se na

lineární stupnici vynáší časa na logaritmické se nachází součet obou přechodových složek proudu: [6]

$$\frac{1}{2}(i_1 - i_2) - I_k = \Delta i_k'' + \Delta i_k' \quad (24)$$

Grafické vyjádření je na obrázku 14, toto zobrazení je pouze ilustrativní. Z grafu je patrné, že součet obou přechodových složek proudu, se od určitého okamžiku mění lineárně. Tuto přímkovou část extrapolujeme až do počátku souřadnic pro $t = 0$ a $i = 0$, kdy se tímto krokem oddělí od součtu složek proudu exponenciální část i_k' a zároveň byly nalezeny hodnoty $\Delta i_{k0}'$, $\Delta i_{k0}''$, a to pro $t = 0$. Další postup je zjištění velikosti obou složek proudu v polovině periody a zároveň časové konstanty obou exponenciálních průběhů T_d' a T_d'' , kdy v těchto časových okamžicích klesne hodnota veličiny na 36,8% své počáteční hodnoty. [6]

Po vyřešení předchozích bodů lze přistoupit k výpočtu rázové, přechodné a podélné synchronní reaktance. Jednotlivé velikosti jsou určeny se znalostí amplitudy ustáleného proudu nakrátko dle vztahů:

Pro podélnou reaktanci

$$X_d = \frac{\sqrt{2}U}{\sqrt{3}I_k} \quad (25)$$

Přechodnou reaktanci

$$X_d' = \frac{\sqrt{2}U}{\sqrt{3}(I_k + \Delta i_{k0}')}$$
(26)

Rázovou reaktanci

$$X_d'' = \frac{\sqrt{2}U}{\sqrt{3}(I_k + \Delta i_{k0}' + \Delta i_{k0}'')} \quad (27)$$

Jako poslední krok vyhodnocení metody náhlého zkratu je určení maximální velikosti zkratového proudu. Před samotným výpočtem je nutné určit, v jakém časovém okamžiku se bude uvažovat počátek zkratu. Je mnoho variant, ale nejhorší okamžik nastává, pokud je začátek

zkratu právě v momentu, kdy proud na jedné z fází prochází nulou. Neindukuje se elektromotirická síla ve vinutí fáze. V tomto případě nastává maximum zkratového proudu ve čtvrtině periody, z tohoto důvodu je uvažován právě tento okamžik. Vztah pro výpočet [6]:

$$i_{kmax} = I_k + \Delta i'_{k\frac{1}{2}} + \Delta i''_{k\frac{1}{2}} + i_{apmax\frac{1}{2}} \quad (28)$$

Výpočtem je zjištěna maximální hodnota pouze za podmínky, že hodnota napětí nakrátko $u_k=1$, jelikož výsledek je závislý na sycení stroje. Pokud by bylo menší, je výsledná reaktance větší a maximální zkratový proud menší, než je tomu u nasyceného magnetického obvodu. [6]

3.2 Měření klidové frekvenční odezvy IEEE Std 115™-2009 (SSFR)

3.2.1 Základní teoretické poznatky

První základní teorie o této metodě se datují do roku 1980. V této základní teorii byl objasněn popis stroje vzhledem k operačnímu přístupu při měření jeho dynamických charakteristik. Tento přístup je zaměřen na frekvenční odezvu stroje a především na malé odchylky u pracovních bodů, které odpovídají přenosové funkci. Přenosová funkce je popsána v přímé ose. [8]

Rovnice popisující základní teorii frekvenční odezvy:

Magnetický tok v podélné ose

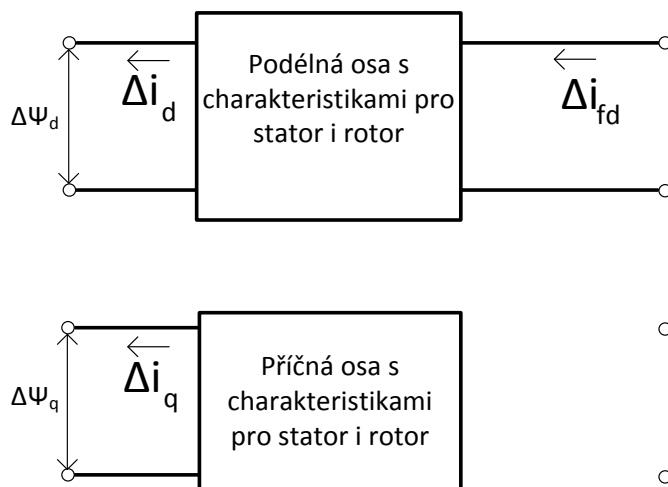
$$\Delta\psi_d(s) = G(s)\Delta e_{fd}(s) - L_d(s) \times \Delta i_d(s) \quad (29)$$

Magnetický tok v příčné ose

$$\Delta\psi_q(s) = G(s)\Delta e_{fd}(s) - L_q(s) \times \Delta i_q(s) \quad (30)$$

kdy ψ_d a ψ_q jsou magnetické toky v příslušné ose stroje, e_{fd} je napětí pole, i_d a i_q proudy v příslušných směrech. Označení parametrů přidáním symbolu Δ naznačuje, že právě u tohoto měřeného bodu vzniká odchylka. Veličina $G(s)$ vyjadřuje přenosovou funkci toku kotvy ve tvaru po Laplaceově transformaci. L_d je indukčnost vyjádřená jako poměr Laplaceových obrazů kotevního magnetického toku na podélné ose a pole kotevního vinutí při zapojení nakrátko.

L_q je indukčnost v příčném směru, opět vyjádřená jako poměr Laplaceových obrazů magnetického toku kotvy v příčném směru v tom samém smyslu i proudů. Rovnice (36), (37), které vyjadřují model vedení obvodu, s dvěma porty pro podélnou osu a jedním pro příčnou naznačeno na obrázku 16. [8]



Obrázek 16: Model pro vizualizaci rovnic (36), (37) synchronního stroje, převzato z [8]

Mezi výhody testování klidové frekvenční odezvy patří relativně menší náklady pro testování. Testy probíhají buď ve výrobě, nebo na pracovním umístění stroje. Nevýhodou jsou modely, kde musí probíhat úpravy při nízkých magnetizačních proudech, které se v provozu nebo během testu často vyskytují. Test je vhodné doplnit o měření náhlého zkratu, jehož výsledky poskytující přesnější informace o dynamických vlastnostech a také umožňují lépe předvídat chování stroje, především u turbínových generátorů. [8]

V elektrických synchronních strojích je nejvýznamnější veličina indukčnost. Tento parametr dává stroji téměř všechny vlastnosti, mezi které řadíme hlavně dynamiku pohonu a celkovou impedanci.

Pro základní prezentaci indukčnosti v motoru lze užít jednoduchý vztah [8]:

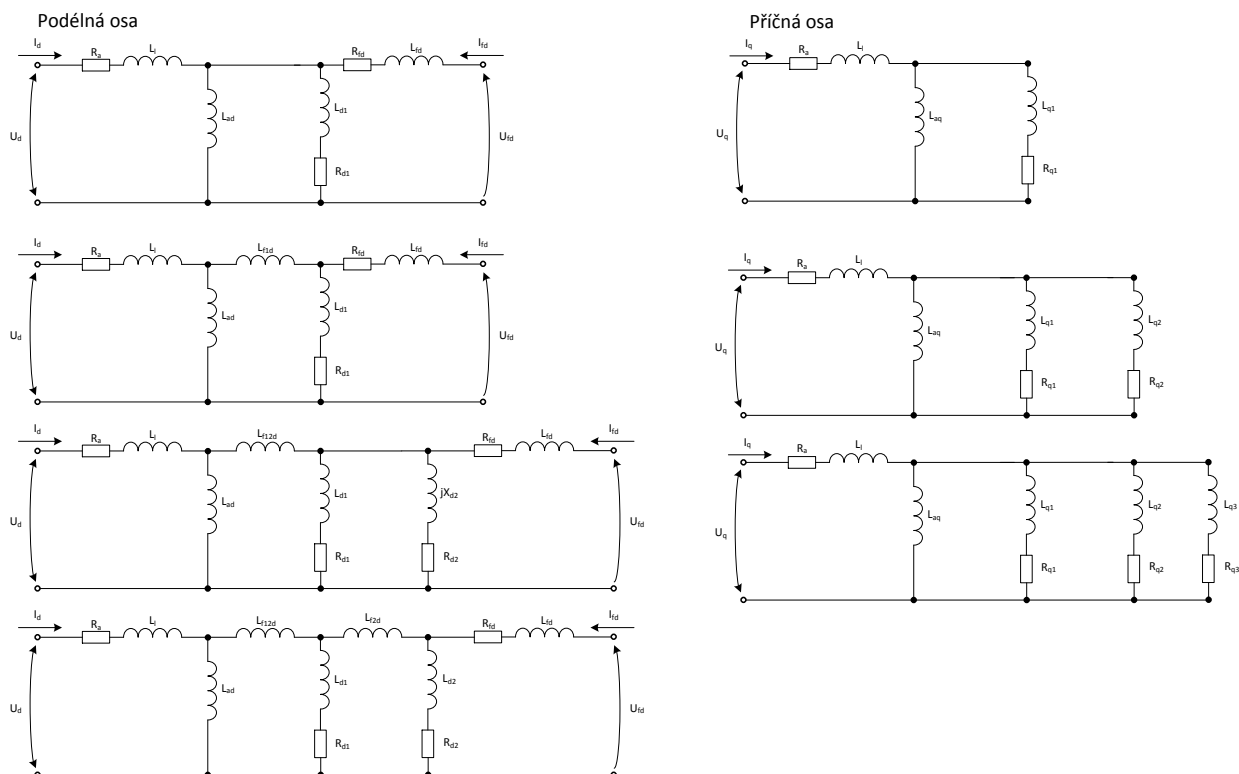
$$L_{fd} = L_{f12d} - L_{ad} \quad (31)$$

kdy:

L_{f12d} je vzájemná indukčnost mezi státorem a rotorem, případně rotorovou klecí nakrátko, používanou k rozběhu z nulových otáček.

L_{fd} je indukčnost budícího vinutí působící na magnetické pole statoru.

L_{ad} je vzájemná indukčnost mezi státorem a budícím vinutím, jedná se o zpětný účinek indukovaných napětí a proudů, proto je tato hodnota záporná.



Obrázek 17: Náhradní chémata pro podélnou a příčnou osu a možné stavy v průběhu měření. [8]

V případě, že pohon pracuje v režimu generátoru, označuje hodnota L_{mf1d} vzájemnou indukčnost mezi budícím vinutím a obvodem rotoru, kolem kterého jsou tlumící tyče. L_{mf1d} je výrazně větší než L_{ad} , a tak je celková indukčnost L_{fd} kladná. Pokud bychom tyto vlastnosti zjišťovali i u hydrogenerátorů, dozvěděli bychom se, že jsou všechny hodnoty opačné, než u zbytku generátorů. Abychom mohli stanovit celkové parametry stroje, je nutné stanovit velikost indukčností, které se s frekvencí mění, a také velikost celkových odporů. [8]

Pro samotné ověření parametrů stroje je důležité nalézt takové náhradní schéma, které by obsahovalo všechny potřebné veličiny a vztahy v dané ose obvodu. Náhradní schéma pro příčnou a podélnou osu jsou uvedena výše v obrázku 17. Existuje velká spousta náhradních schémat, zaleží na tom, co jsme ochotni zanedbat pro zjednodušení výpočtů pro hledanou hodnotu. [8]

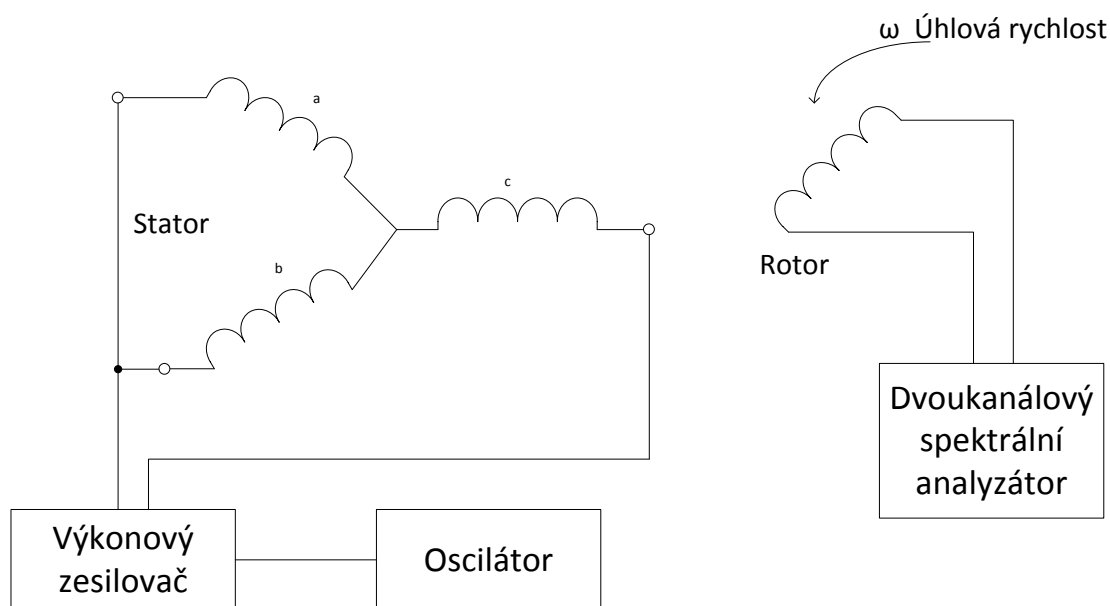
3.2.2 Postup měření

Nejprve celý motor odpojíme od napájení, což znamená odpojení svorek vinutí statoru a odtažení kartáčů na rotoru. Zadrugé zajistíme, aby se teplota jak vinutí, tak celého stroje neměnila během měření. Důvodem by byl zvyšující se činný odpor vinutí, který je závislý na teplotě vodiče. Toto opatření je realizováno externím chlazením a nejčastějším chladivem je voda, olej či jiné chladivo. Je důležité, aby chladivo cirkulovalo, aby byly zachovány izolační schopnosti zejména izolace, která je umístěna na vinutí. Dále je nutné zvolit si takový zdroj vstupní energie, aby vydržel proudové, napěťové a tepelné namáhání. [8]

Za měřicí techniku použitou při měření fázového posunu, bylo použito spektrálních analyzátorů zobrazených na obrázku 18. Při použití dvoukanálového spektrálního analyzátoru je možné měřit najednou magnetický a relativní fázový posuv. Tyto spektrální analyzátory jsou schopny vykreslit frekvenční křivky měřících komponentů i přes často neideální průběhy vzniklé rušivými vlivy. Citlivost použitých přístrojů musí začínat na nižších hodnotách frekvence, v rozmezí setin až tisícín Hz s horní měřicí hranicí až 1 kHz. Při měření fázového posunu je nutné zaznamenat fázový posun již při odchylce desetiny stupně při různých vstupních napětích. [8]

Při samotném měření je důležité respektovat několik zásad. Zaprvé proud, který budí vinutí by neměl přesáhnout 1% jmenovitých hodnot vinutí stroje. Zadruhé je měření prováděno za sníženého napětí. Důvod je praktický, při tomto proudu nedochází k ohřevu jak samotného vinutí, tak ostatních kovových částí stroje, jako je tlumící vinutí, kostra a konstrukční prvky mezi které patří např. tělo rotoru, ložiska, hřídel apod. Při měření impedance je nutné si uvědomit, že na začátku je činný odpor výrazně vyšší než reaktance cívek, což je způsobeno malou hodnotou

úhlové frekvence $\omega = 2\pi f$, závislých na této velikosti veličiny. Začátek měření lze tedy brát za minimum a konec za maximum, kdy by se frekvence měla zastavit na 200 Hz. [8]



Obrázek 18: Znázornění měřících přístrojů pro přizpůsobení stroje pro měření podélné osy[8].

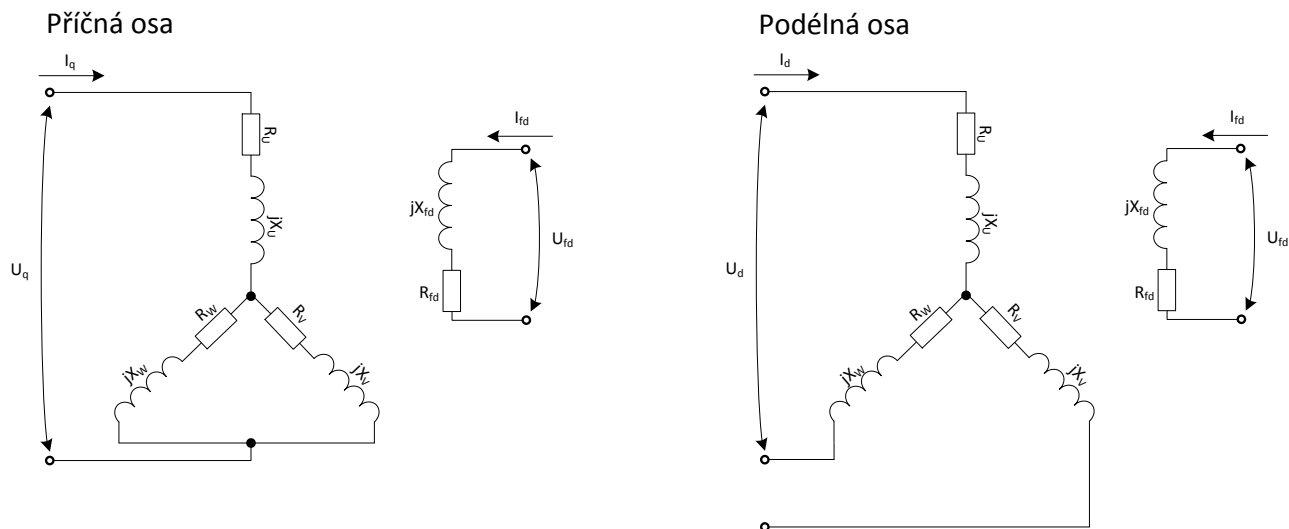
Maximum frekvenčního rozsahu by se mělo pohybovat v rozmezí dvou až trojnásobku jmenovité frekvence stroje. [1] Tento rozsah ještě dále dělíme do tzv. dekád, to jsou skupiny frekvencí, na kterých se provádí měření. Jedná se o rovnoměrné rozdělení intervalu frekvence, kdy záleží na požadované přesnosti měření či na proměření určité hodnoty pracovní frekvence. Zároveň je důležité zvolit dostatečný počet měřících kroků při nižších frekvencích, myšleno od setin či tisícín Hz až po jednotky Hz. Hlavním důvodem je riziko velkého rušení z okolí, střídačem nebo okolních měřících zařízení. [8]

Pro velmi přesné měření se proměřují jednotlivé části vinutí statoru a rotoru zvlášť. Dále by měla být měřící čidla proudu připevněna přímo na izolovanou větev vinutí statoru, rotoru či kompenzačního vinutí. Čidla proudu nesmí zvyšovat impedanci a ohřev měřené větve.

V rovnicích je odměřováno několik parametrů:

$\Delta e_{d,q,fd}$ napětí v podélném, příčném směru a indukované v rotoru

$\Delta i_{d,q,fd}$ proud v podélném, příčném směru a indukovaný v rotoru



Obrázek 19: Zapojení vinutí pro měření podélné a příčné osy při metodě SSFR. [9]

Mezi měřené parametry se řadí výpočet podélné impedance, který je znázorněn na obrázku 20: [8]

$$Z_d(s) = - \left. \frac{\Delta e_d(s)}{\Delta i_d(s)} \right|_{\Delta e_{fd}=0} \quad [\Omega] \quad (32)$$

Tato hodnota je platná při vinutí rotoru nakrátko.

Z_d je podélná impedance, kdy při rozkladu na složky nám vznikne tvar:

$$Z_d = R_a + j\omega L_d \quad (33)$$

Výpočet příčné impedance: [8]

$$Z_q(s) = - \left. \frac{\Delta e_q(s)}{\Delta i_q(s)} \right|_{\Delta e_{fd}=0} \quad [\Omega] \quad (34)$$

Přenosová veličina $G(s)$: [8]

$$G(s) = \left. \frac{\Delta e_d(s)}{s \Delta e_{fd}(s)} \right|_{\Delta e_{fd}=0} \quad (35)$$

Nebo jeho alternativa, která je měřena zároveň se $Z_d(s)$: [8]

$$sG(s) = \frac{\Delta i_{fd}(s)}{\Delta i_d(s)} \Big|_{\Delta i_{fd}=0} \quad (36)$$

Impedance Z_{af0} je parametr přenosu energie z rotoru přes vzduchovou mezeru: [8]

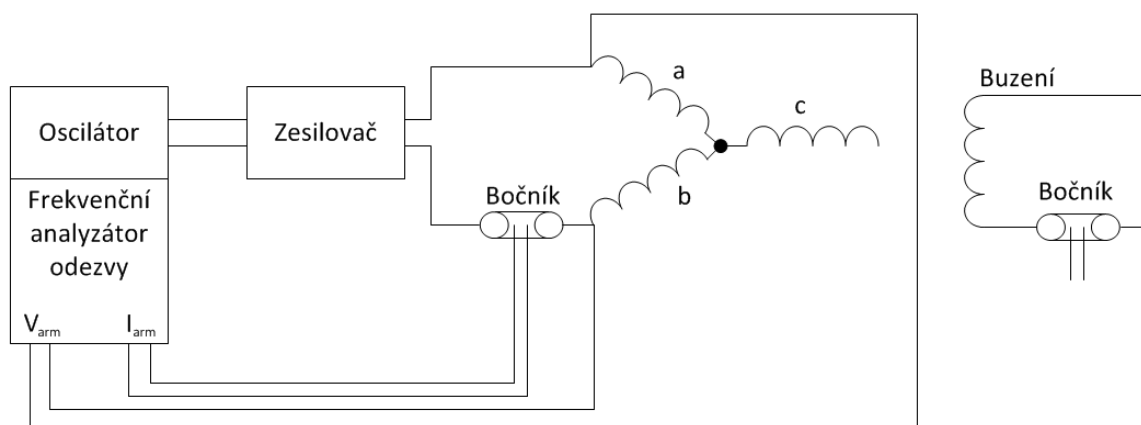
$$Z_{af0} = \frac{\Delta e_{fd}(s)}{\Delta i_d(s)} \Big|_{\Delta i_{fd}=0} \quad [\Omega] \quad (37)$$

Poslední impedance je nazývána přenosovou maticí vyjadřující přenos energie z pole do rotoru, který je znázorněn na obrázku 22: [8]

$$Z_{fao}(s) = \frac{\Delta e_d(s)}{\Delta i_{fd}(s)} \Big|_{\Delta i_d=0} = \sqrt{\frac{3}{4}} \frac{\Delta e_{fd}(s)}{\Delta i_{arm}(s)} \quad [\Omega] \quad (38)$$

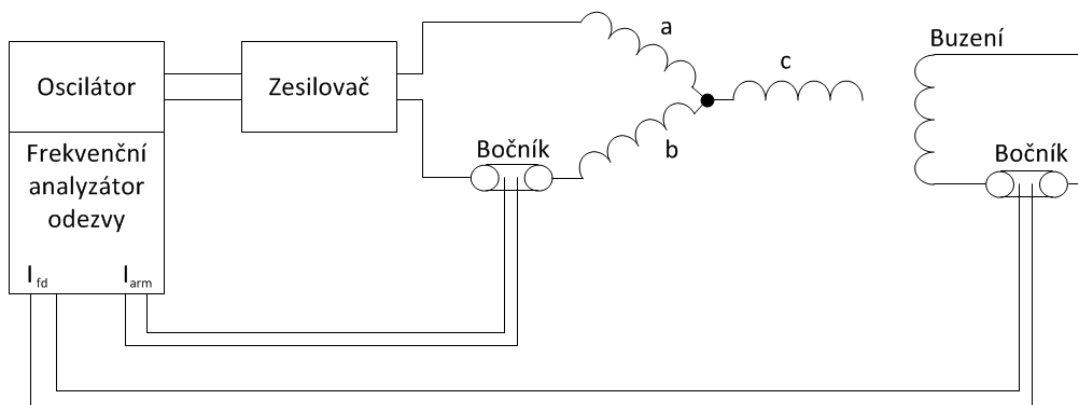
Pro přizpůsobení stroje a měřicích přístrojů zapojíme do vinutí rotoru frekvenční generátor, který vytváří harmonický signál o frekvenci 100 Hz a výkonový zesilovač. Poté pomalu otáčíme rotorem, dokud se na osciloskopu neobjeví nulové napětí. Tímto postupem se magnetické napětí ve větvích „a“ a „b“ vyrovná a je možno provést měření. [8]

Měření jednotlivých impedancí a přenosových veličin je znázorněno na následujících schématech:

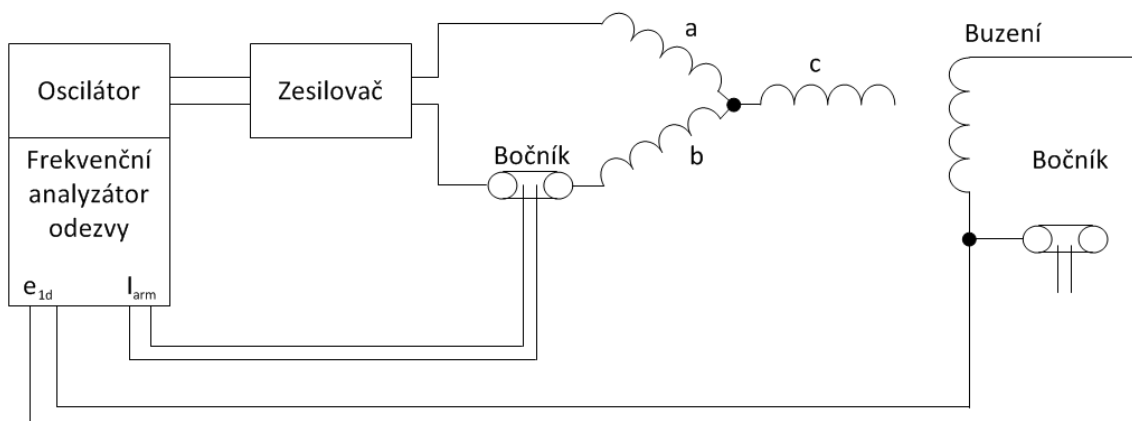


Obrázek 20: Schéma zapojení pro měření $Z_d(s)$ v podélné ose. [8]

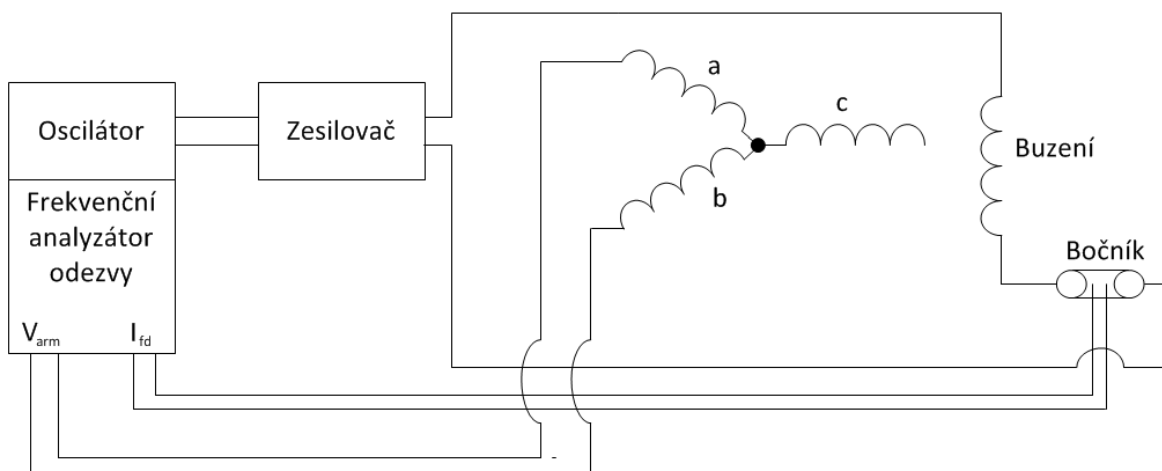
Následující schéma, na obrázku 21, znázorňuje zapojení přístrojů, které slouží pro měření podílu proudů v kotvě a energie indukovaného proudu.



Obrázek 21: Schéma zapojení pro měření $\Delta i_{fd}/\Delta i_{arm}$. [8]



Obrázek 22: Schéma zapojení pro měření $\Delta e_{1d}/\Delta i_{arm}$. [8]

Obrázek 23: Schéma zapojení pro měření $\Delta v_{arm}/\Delta i_{fd}$. [8]

Pro vyzkratování vinutí na rotoru je nutné vyřešit i ošetřit kartáče přenášející elektrickou energii. Kartáče se vyzkratují tak, že je celé zabalíme do vodivé měděné fólie. Po změření Δv_{arm} a Δi_{arm} je možné jednoduše dopočítat činný odpor kotvy, jehož měření z vyobrazeno na obrázku 23: [8]

$$Z_{arm}(s) = \frac{\Delta v_{arm}(s)}{\Delta i_{arm}(s)} \quad [\Omega] \quad (39)$$

Odpor je měřen pro frekvence od 0,001 do 200 Hz. Další hodnoty jsou dopočteny dle následujících tvarů: [7]

$$Z_d(s) = \frac{1}{2} Z_{arm}(s) \quad [\Omega] \quad (40)$$

Z tohoto vztahu je možné zjistit odpor vinutí statoru: [7]

$$R_a = \frac{1}{2} \{ \lim_{s \rightarrow 0} [Z_{arm}(s)] \} \quad [\Omega] \quad (41)$$

Po zvyšování frekvence se v impedanci začíná projevovat indukčnost vinutí. Tento fakt je vidět ve vzorci: [7]

$$L_d(s) = \frac{Z_s(s) - R_a}{s} \quad [H] \quad (42)$$

Při tomto měření se zjišťuje i přenosový parametr $sG(s)$, jehož zapojení měřícího obvodu je na obrázku 20: [7]

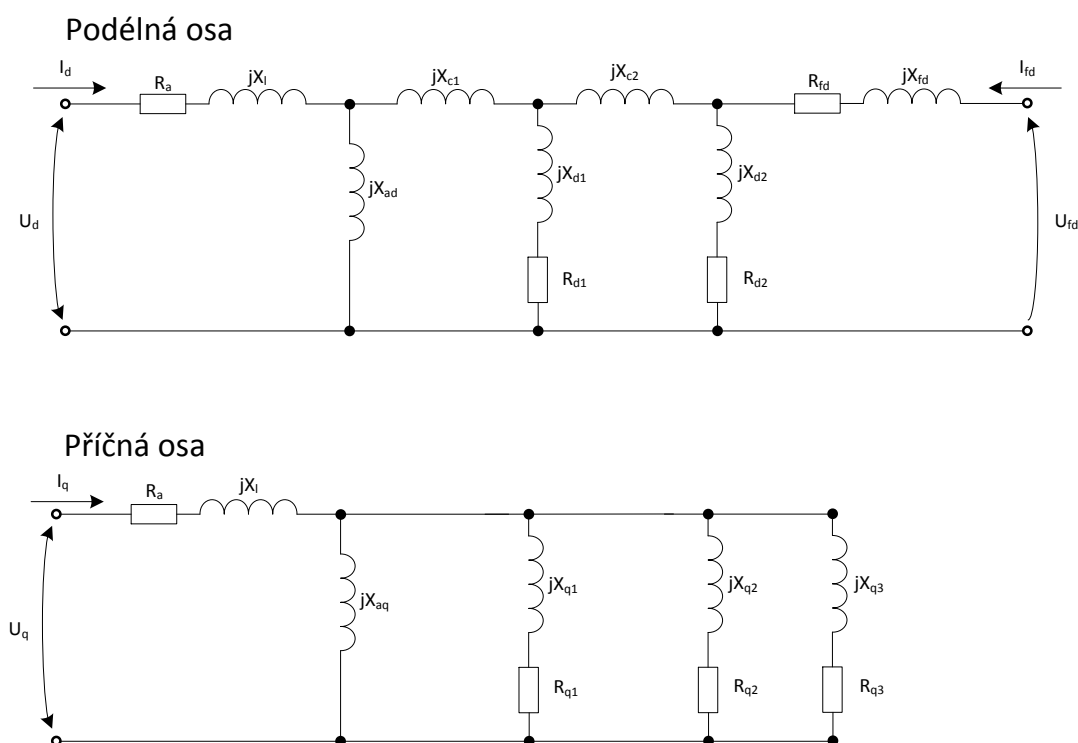
$$sG(s) = \frac{\Delta i_{fa}(s)}{\Delta i_a} = \sqrt{\frac{3}{4}} \frac{\Delta i_{fa}(s)}{\Delta i_{arm}(s)} \quad (43)$$

Schéma zapojení měřících přístrojů je znázorněno na dříve uvedených obrázcích, kdy se proměřují podíly proudů v kotvě a energie indukovaného proudu. Další parametr, kterým je Z_{afo} je jednoduše dopočten z naměřených hodnot. [8]

Při měření příčné osy je potřeba upravit schéma zapojení pro měření podélné osy a to v několika krocích. Nejprve odstraníme zkratování pro měření proudů. Poté oscilátorem nastavíme frekvenci 100 Hz a natáčíme rotor do takové polohy, dokud se na obrazovce osciloskopu neobjeví nulové indukované napětí. Tím máme připraven rotor pro příčnou polohu. V průběhu měření natáčíme rotor do různě natočených poloh dle počtu pólů stroje. U 2-pólového je to 90° , u 4-pólového je to jen 45° . Měření parametrů a pozdější výpočet je totožný pro podélnou osu, kdy zjišťujeme pouze tři parametry a to Z_q , R_a a L_q . [8]

4 Výpočetní algoritmus pro parametry stroje

Jak bylo popsáno v předchozí kapitole, metoda měření klidové frekvenční odezvy přináší mnoho výhod, oproti jiným metodám pro stanovení parametrů vinutí a dynamických vlastností stroje. Pro správnou výpočtovou analýzu a vyhodnocení výpočtů je důležité nastavení odpovídajícího algoritmu, jehož postupná logika bude popsána v následujícím textu. Počítačová simulace je v dnešní době nedílnou součástí modelování či testování správnosti konstrukčního návrhu elektrických strojů nebo přístrojů. V současnosti se metodě klidové frekvenční odezvy věnuje velká pozornost, jelikož je to prostředek pro identifikaci dynamických charakteristik rotorů s chladičem, a to hlavně v průmyslovém odvětví. Metody byly vyvinuty s cílem stanovit ekvivalentní obvody pro podélnou a příčnou osu synchronních strojů.



Obrázek 24: Náhradní schémata synchronního stroje podélné a příčné osy použité při tvorbě algoritmu. [9]

Nastavení výpočetního algoritmu je velmi odborné a obtížné, proto jeho realizace byla inspirována prací pana Behrooze Vahidiho PhD. ve spolupráci s Mohammadem Reza Bank Tavakolim PhD.. Oba působí na Department of Electrical Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran. Doprovodný text k dané metodě, který jsem použil, je určen pro postgraduální studenty a byl vypracován pro program Microsoft Excel. Avšak pro absenci podrobnějších kroků jsem zvolil naprogramování algoritmu pro výpočet v softwaru Matlab, ve kterém je ladění jednotlivých kroků méně náročné a více přehledné.

4.1 Výpočetní algoritmus

Celý výpočet jsem začal analýzou naměřených dat, kdy hodnoty byly naměřeny pro různou úroveň zesílení. Proto správný výpočet je tedy žádoucí počítat jen s hodnotami naměřenými pro stejnou úroveň zesílení. Inicializační výpočty, které uvádí norma IEEE Std 115TM-2009 (SSFR) se týkají rovnic (33) až (43), kromě výpočtu impedance kotvy, kterou dále již nepoužijeme.

Dalším krokem vývojového algoritmu je výpočet základních veličin, pro které jsou uvedeny rovnice (44) až (51). Dle znázorněného postupu celý výpočet začíná několika startovacími výpočty, které norma IEEE Std 115TM-2009 (SSFR) uvádí. Tyto výpočty se nachází ve výpočetním algoritmu na řádcích 117 až 130. Jedná se o již uvedené vztahy [9]:

Činný odpor v podélné ose:

$$R_d = \lim_{s \rightarrow 0} Z_d(s) \quad (44)$$

Činný odpor v příčné ose:

$$R_q = \lim_{s \rightarrow 0} Z_q(s) \quad (45)$$

Impedance vinutí v podélné ose:

$$L_d = \frac{Z_d(s) - R_d}{s} \quad (46)$$

Impedance vinutí v příčném směru:

$$L_q = \frac{Z_q(s) - R_q}{s} \quad (47)$$

Extrapolace průběhu impedance vinutí v podélné ose pro hodnotu v počátku měření:

$$L_d(0) = \lim_{s \rightarrow 0} L_d(s) \quad (48)$$

Extrapolace průběhu impedance vinutí v příčné ose pro hodnotu v počátku měření:

$$L_q(0) = \lim_{s \rightarrow 0} L_q(s) \quad (49)$$

Impedance reakce kotvy v podélném směru:

$$L_{ad} = L_d(0) - L_l \quad (50)$$

Impedance reakce kotvy v příčném směru:

$$L_{aq} = L_q(0) - L_l \quad (51)$$

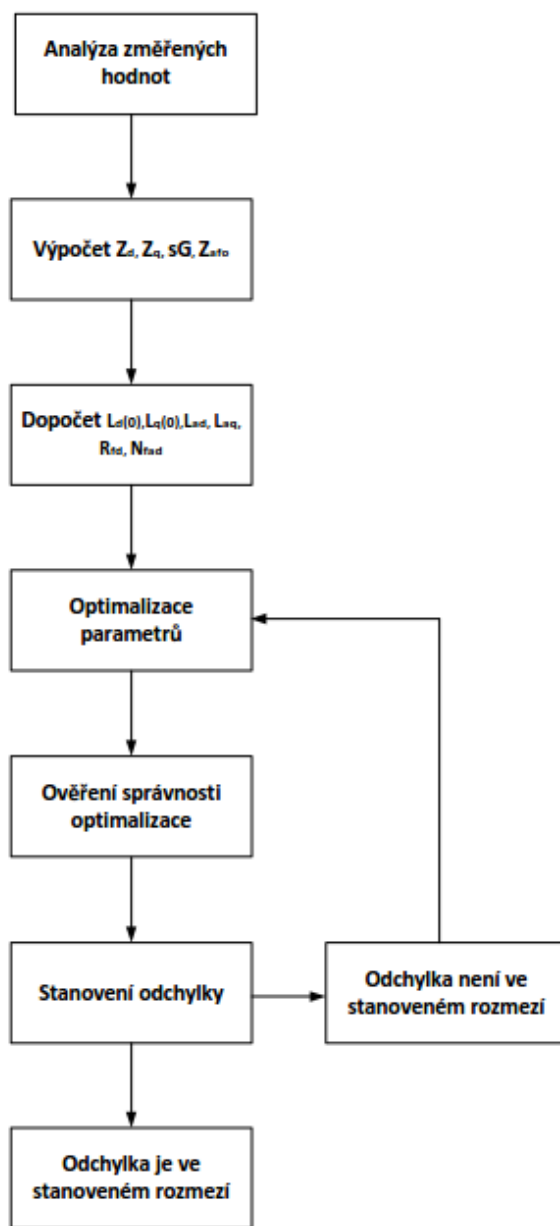
Výše uvedené rovnice se nachází ve výpočetním algoritmu na řádcích 91 až 100, kdy korekční výpočty nalezneme na řádcích 137 až 140.

Pro určení hodnot pro podélnou a příčnou reakci kotvy je nutná znalost rozptylové reaktance. Tato hodnota je většinou dána od výrobce, ale informace o hodnotě indukčnosti může být nedohledatelná, a proto je nutné si ji před samotnou optimalizací dopočítat a využít tak některých vztahů pro synchronní stroj. Určení velikosti je otázka kompilace několika vztahů, ze kterých se postupně vyjádří veličiny použitelné v následujících krocích.

Vychází se z náhradního schématu dle obrázku 8: [9]

Pro impedanci v podélné ose:

$$Z_{da} = \frac{U_a}{I_a} = R_a + jX_d = R_a + jX_{ad} + jX_{a\sigma} \quad (52)$$



Obrázek 25: Znázornění vývojového diagramu pro tvorbu algoritmu. [9]

Reaktance v podélné ose:

$$X_d = Z_d - R_a \quad (53)$$

A pro budící napětí: [5]

$$U_{ib} = U_a - I_a Z_{da} \quad (54)$$

Transformací vztahu pro proud nakrátko a úpravou pro vyjádření podélné reaktance kotvy [5]:

$$X_{ad} = \frac{U_{ib}}{I_b} \quad (55)$$

Tento vztah má omezenou platnost pouze na oblast při nízkých otáčkách, kdy se projevuje vliv odporu kotvy R_a . V dalším kroku zbývá konečné určení rozptylové reaktance. Její velikost lze odhadnout na 10% hodnoty reaktance hlavního toku X_{ad} .

Rozptylová reaktance hlavního toku:

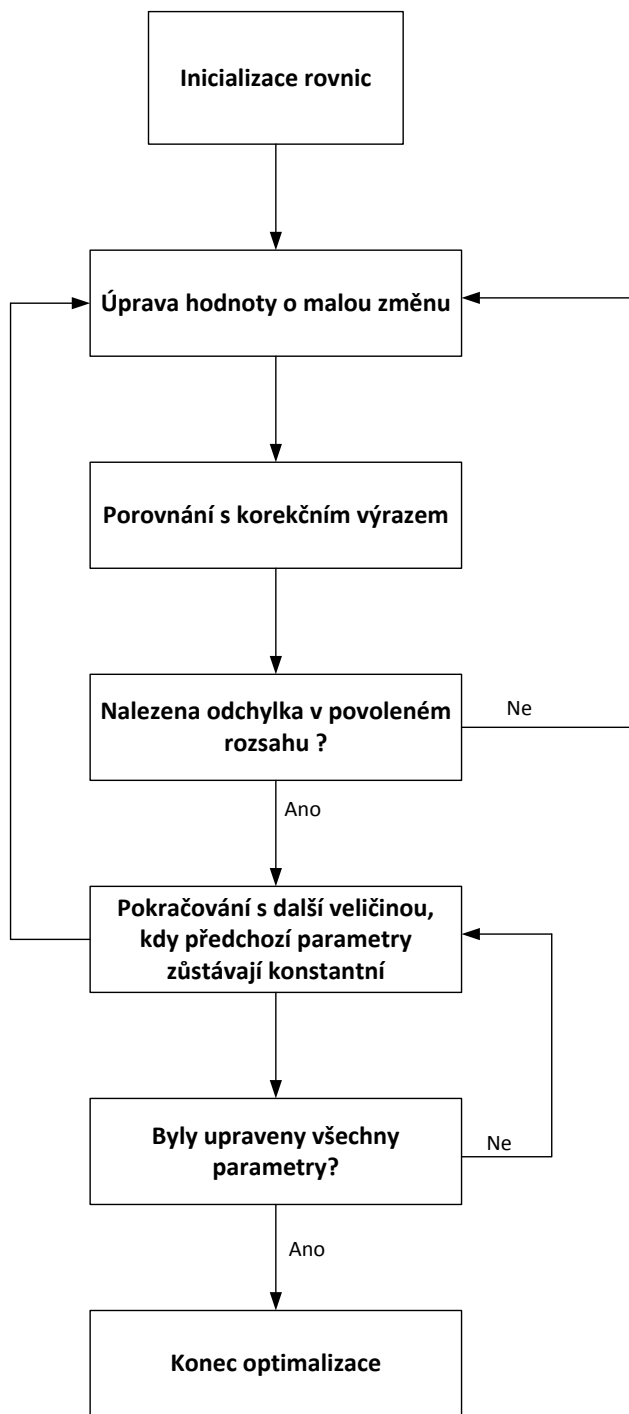
$$X_l = 10\% * X_{ad} = X_{a\sigma} \quad (56)$$

Rozptylová impedance hlavního toku:

$$L_l = \frac{X_l}{2\pi f} \quad (57)$$

4.2 Optimalizační výpočty

Celý optimalizační výpočet začíná nastavením inicializačních hodnot pro následující postup algoritmu. Jelikož nejsou známy výsledky, pouze lze teoreticky tušit, že hodnoty $X'_d > X''_d > X'''_d$ pro podélnou osu a pro příčnou osu $X'_q > X''_q > X'''_q$ budou postupně klesat, proto inicializační hodnoty se postupně snižují o polovinu hodnoty předchozího prvku. Dále je ještě nezbytné nastavit počet iterací, kdy počet cyklů je pro použitý algoritmus zvolena velikost 10 000. Tato vysoká hodnota je z důvodu zpřesnění výsledků. Pro rychlejší průběh vyhodnocení je možno snížit počet iteračních cyklů. [9]



Obrázek 26: Vývojový diagram optimalizace pro korekce a porovnání vypočtených hodnot vypsané ve výpočetním algoritmu na řádcích 412 až 599 pro příčnou osu a řádky 177 až 353 pro podélnou osu. [9]

4.2.1 Inicializace výpočtů

Postup pro použití optimalizace je ukázán na vývojovém grafu, tvořeným jednotlivými kroky pro konečné stanovení hodnot i pro jejich vyhledávání. Vyhledávací proces byl vytvořen z použitých hodnot velmi obecně, aby bylo možno tento algoritmus použít i na případné další využití v praxi.

Aby bylo možné začít se samotným laděním jednotlivých parametrů, je potřeba odhadnout přibližnou hodnotu velikostí jednotlivých veličin. Z informací vyplývajících z výše uvedeného textu, je nastavení hodnot parametrů provedeno ve stejném duchu. Za účelem získání proveditelných počátečních hodnot parametrů, lze předpokládat, že hodnoty Canayových reaktancí X_{c1} a X_{c2} jsou nulové. Po vyřešení rovnic (58) až (68) získáme počáteční hodnoty parametrů. [9]

Reaktance buzení:

$$X_{fd} = \frac{(X_d - X_l)(X'_d - X_l)}{X_d - X'_d} \quad (58)$$

Přechodová reaktance vinutí v podélné ose:

$$X_{d1} = \frac{(X'_d - X_l)(X''_d - X_l)}{X'_d - X''_d} \quad (59)$$

Rázová reaktance vinutí v podélné ose:

$$X_{d2} = \frac{(X''_d - X_l)(X'''_d - X_l)}{X''_d - X'''_d} \quad (60)$$

Přechodový odpor vinutí v podélné ose:

$$R_{d1} = \frac{1}{2\pi f T'_d} \cdot \frac{X''_d}{X'_d} \cdot \frac{(X'_d - X_l)^2}{(X'_d - X''_d)} \quad (61)$$

Rázový odpor vinutí v podélné ose:

$$R_{d2} = \frac{1}{2\pi f T''_d} \cdot \frac{X'''_d}{X''_d} \cdot \frac{(X''_d - X_l)^2}{(X''_d - X'''_d)} \quad (62)$$

Přechodová reaktance vinutí v příčné ose:

$$X_{q1} = \frac{(X_q - X_l)(X'_q - X_l)}{X_q - X'_q} \quad (63)$$

Rázová reaktance vinutí v příčné ose:

$$X_{q2} = \frac{(X'_q - X_l)(X''_q - X_l)}{X'_q - X''_q} \quad (64)$$

Reaktance tlumiče v příčné ose:

$$X_{q3} = \frac{(X''_q - X_l)(X'''_q - X_l)}{X''_q - X'''_q} \quad (65)$$

Přechodový odpor vinutí v příčné ose:

$$R_{q1} = \frac{1}{2\pi f T'_q} \cdot \frac{X'_q}{X_q} \cdot \frac{(X_q - X_l)^2}{(X_q - X'_q)} \quad (66)$$

Rázový odpor vinutí v příčné ose:

$$R_{q2} = \frac{1}{2\pi f T''_q} \cdot \frac{X''_q}{X'_q} \cdot \frac{(X'_q - X_l)^2}{(X'_q - X''_q)} \quad (67)$$

Odpor tlumiče v příčné ose:

$$R_{q3} = \frac{1}{2\pi f T'''_q} \cdot \frac{X'''_q}{X''_q} \cdot \frac{(X''_q - X_l)^2}{(X''_q - X'''_q)} \quad (68)$$

4.2.2 Ladění parametrů

Získané hodnoty se dále použijí dosazením do korekčních rovnic, které následně porovnáme s výsledky optimalizačních výpočtů. Maximální odchylka jednotlivých parametrů je $\pm 10\%$, jejich velikost je pro téma této diplomové práce dostačující. Pokud se poměr jednotlivých veličin pohybuje pod hranicí 90%, je hodnota daného parametru zvětšena o 0,25% její momentální velikosti. V opačném případě je parametr zmenšen o 0,25%.

Pokud je tímto krokem splněna podmínka, postoupí se na následující parametr. Pro správný výpočet parametrů je důležité, aby jednotlivé veličiny byly upraveny postupně, tedy až poté, co předchozí parametr odpovídá podmínkám nastaveným v rámci algoritmu.

4.3 Korekční výpočty

Po dosažení hodnot a výsledků ladění z výše uvedených rovnic musí po vyhodnocení projít korekcí. Tento krok je důležitý pro ověření, jestli je jejich velikost správná a zda se hodnoty nastavené inicializací shodují s hodnotami, kterých se dosáhne po dosažení do rovnic vypsanych níže. Vzájemné porovnání shody je provedeno procentuálně, kdy maximální dovolená odchylka je až na výjimku 100%. Jediná rozdílná veličina se neshoduje o 4 %, což vzhledem k její velikosti je difference nepatrná, pohybující se v řádech jednotek tisícín.

Protože se ve výpočetních vztazích pro jednotlivé iterace vždy vyskytují hodnoty předchozích veličin, je docíleno vysoké přesnosti ladění jejich velikostí. Pro zrychlení výpočtů spolu se zachováním přesnosti výpočtů v rámci algoritmu byly hodnoty pro příčnou s podélnou osou řešeny odděleně.

Dále dle vývojového diagramu se přejde na další krok. Korekce hodnot získaných předchozími výpočty inicializace je provedena dle níže uvedených rovnic (70) až (83), které jsou ve výpočetním algoritmu na řádcích 184 až 192 pro podélnou osu a řádky 421 až 428 pro příčnou osu. [9]

Reaktance vinutí v podélné ose:

$$X_d = X_l + X_{ad} \quad (69)$$

Přechodová reaktance vinutí v podélné ose:

$$X'_d = X_l + X_{ad} \parallel X_{fd} \quad (70)$$

Rázová reaktance vinutí v podélné ose:

$$X''_d = X_l + X_{ad} \parallel \{X_{c1} + X_{d1} \parallel X_{fd}\} \quad (71)$$

Reaktance tlumiče v podélné ose:

$$X_d''' = X_l + X_{ad} \parallel \{X_{c1} + X_{d1} \parallel [X_{c2} + X_{d2} \parallel X_{fd}]\} \quad (72)$$

Reaktance vinutí v příčné ose:

$$X_q = X_l + X_{aq} \quad (73)$$

Přechodová reaktance vinutí v příčné ose:

$$X_q' = X_l + X_{aq} \parallel X_{q1} \quad (74)$$

Rázová reaktance vinutí v příčné ose:

$$X_q'' = X_l + X_{aq} \parallel X_{q1} \parallel X_{q2} \quad (75)$$

Reaktance tlumiče v příčné ose:

$$X_q''' = X_l + X_{aq} \parallel X_{q1} \parallel X_{q2} \parallel X_{q3} \quad (76)$$

Časová konstanta přechodové reaktance vinutí v příčné ose:

$$T_d' = \frac{X_{fd} + X_l \parallel X_{ad}}{2\pi f r_{fd}} \quad (77)$$

Časová konstanta rázové reaktance vinutí v příčné ose:

$$T_d'' = \frac{X_{fd} \parallel (X_{c1} + X_l \parallel X_{ad}) + X_{d1}}{2\pi f r_{d1}} \quad (78)$$

Časová konstanta reaktance tlumiče v příčné ose:

$$T_d''' = \frac{X_{fd} \parallel [X_{c2} + X_{d1} \parallel (X_{c1} + X_l \parallel X_{ad})] + X_{d2}}{2\pi f r_{d2}} \quad (79)$$

Časová konstanta přechodové reaktance vinutí v příčné ose:

$$T_q' = \frac{X_l \parallel X_{aq} + X_{q1}}{2\pi f r_{q1}} \quad (80)$$

Časová konstanta rázové reaktance vinutí v příčné ose:

$$T_q'' = \frac{X_l \| X_{aq} \| X_{q1} + X_{q2}}{2\pi f r_{q2}} \quad (81)$$

Časová konstanta reaktance tlumiče v příčné ose:

$$T_q''' = \frac{X_l \| X_{aq} \| X_{q1} \| X_{q2} + X_{q3}}{2\pi f r_{q3}} \quad (82)$$

Optimalizace je ukončena po stanovení velikosti všech parametrů, které splňují omezující podmínky. Postupnou úpravou inicializačních hodnot je možno docílit vyšší přesnosti a snížení počtu iterací.

Podélná osa	Příčná osa
$X_{1d} = 29,8451 \Omega$	$X_{1q} = 17,2788 \Omega$
$X_{2d} = 4,7124 \Omega$	$X_{2q} = 1,5708 \Omega$
$X_{3d} = 2,3562 \Omega$	$X_{3q} = 1,7261 \Omega$
$T_{1d} = 0,2154 \text{ s}$	$T_{1q} = 0,2 \text{ s}$
$T_{2d} = 0,05 \text{ s}$	$T_{2q} = 0,03 \text{ s}$
$T_{3d} = 0,0247 \text{ s}$	$T_{3q} = 0,005 \text{ s}$
$R_{1d} = 0,3146 \Omega$	$R_{1q} = 0,1392 \Omega$
$R_{2d} = 0,2295 \Omega$	$R_{2q} = 0,1472 \Omega$
	$R_{3q} = 0,2304 \Omega$

Tabulka 1: Výsledné hodnoty výpočetního algoritmu.

4.4 Příklad výpočtů

Po dokončení algoritmu a spuštění výpočtů jsem obdržel následující výsledky:

$$R_d = \lim_{s \rightarrow 0} Z_d(s) = 0,9765 \Omega \quad (83)$$

$$R_q = \lim_{s \rightarrow 0} Z_q(s) = 3,3234 \Omega \quad (84)$$

$$L_d = \frac{Z_d(s) - R_d}{s} = \frac{9,6526 - 0,9765}{1256,6} = 0,2623 H \quad (85)$$

$$L_q = \frac{Z_q(s) - R_q}{s} = \frac{17,9018 - 3,3234}{1256,6} = 0,2772 H \quad (86)$$

$$L_d(0) = \lim_{s \rightarrow 0} L_d(s) = -0,0271 H \quad (87)$$

$$L_q(0) = \lim_{s \rightarrow 0} L_q(s) = -0,0138 H \quad (88)$$

$$L_{ad} = L_d(0) - L_l = -0,0271 - 0,0057 = -28,5 mH \quad (89)$$

$$L_{aq} = L_q(0) - L_l = -13,8 - 0,0057 = -15,2 mH \quad (90)$$

$$Z_{da} = \frac{U_a}{I_a} = \frac{0,766}{0,124} = 3,0887 \Omega \quad (91)$$

$$U_{ib} = U_a + I_a Z_{da} = 0,766 + 0,124 \cdot 3,0887 = 0,383 V \quad (92)$$

$$X_{ad} = \frac{U_{ib}}{I_b} = \frac{0,383}{0,0213} = 17,9812 V \quad (93)$$

$$X_l = 10\% * X_{ad} = 0,1 \cdot 17,9812 = 1,7981 \Omega \quad (94)$$

$$L_l = \frac{X_{ad}}{2\pi f} = \frac{1,7981}{1256,6} = 1,4 mH \quad (95)$$

$$X_{fd} = \frac{(X_d - X_l) - (X'_d - X_l)}{X_d - X'_d} = \frac{(19,1042 - 0,0014) - (119,38 - 1,7981)}{19,1042 - 119,38} = -21,23 \Omega \quad (96)$$

$$X_{d1} = \frac{(X'_d - X_l)(X''_d - X_l)}{X'_d - X''_d} = \frac{(119,38 - 0,0014) - (18,8496 - 1,7981)}{119,38 - 18,8496} = 19,9436 \Omega \quad (97)$$

$$X_{d2} = \frac{(X''_d - X_l) - (X'''_d - X_l)}{X''_d - X'''_d} = \frac{(18,8496 - 0,0014) - (9,4248 - 1,7981)}{18,496 - 9,4248} = 13,7982 \Omega \quad (98)$$

$$R_{d1} = \frac{1}{2\pi f T_d'''} \cdot \frac{X_d''}{X_d'} \cdot \frac{(X_d' - X_l)^2}{(X_d' - X_d'')} = \frac{1}{2\pi \cdot 200 \cdot 0,05} \cdot \frac{18,8496}{119,38} \cdot \frac{(119,38 - 1,7981)^2}{(119,38 - 18,8496)} = 0,3456 \Omega \quad (99)$$

$$R_{d2} = \frac{1}{2\pi f T_d'''} \cdot \frac{X_d'''}{X_d''} \cdot \frac{(X_d'' - X_l)^2}{(X_d'' - X_d''')} = \frac{1}{2\pi \cdot 200 \cdot 0,025} \cdot \frac{9,4248}{18,8496} \cdot \frac{(18,8496 - 1,7981)^2}{(18,8496 - 9,4248)} = 0,491 \Omega \quad (100)$$

$$X_{q1} = \frac{(X_q - X_l)(X_q' - X_l)}{X_q - X_q'} = \frac{(20,9023 - 0,0014)(69,115 - 1,7981)}{20,9023 - 69,115} = -26,6742 \Omega \quad (101)$$

$$X_{q2} = \frac{(X_q' - X_l)(X_q'' - X_l)}{X_q' - X_q''} = \frac{(69,115 - 0,0033)(6,2832 - 1,7981)}{69,115 - 6,2832} = 4,8052 \Omega \quad (102)$$

$$X_{q3} = \frac{(X_q'' - X_l)(X_q''' - X_l)}{X_q'' - X_q'''} = \frac{(6,2832 - 0,0033)(6,9115 - 1,7981)}{6,2832 - 7,1411} = -36,5003 \Omega \quad (103)$$

$$R_{q1} = \frac{1}{2\pi f T_q'} \cdot \frac{X_q'}{X_q} \cdot \frac{(X_q - X_l)^2}{(X_q - X_q')} = \frac{1}{2\pi \cdot 200 \cdot 0,2} \cdot \frac{69,115}{20,9023} \cdot \frac{(20,9023 - 1,7981)^2}{(20,9023 - 69,115)} = 0,0996 \Omega \quad (104)$$

$$R_{q2} = \frac{1}{2\pi f T_q'''} \cdot \frac{X_q''}{X_q'} \cdot \frac{(X_q' - X_l)^2}{(X_q' - X_q'')} = \frac{1}{2\pi \cdot 200 \cdot 0,03} \cdot \frac{6,2832}{69,115} \cdot \frac{(69,115 - 1,7981)^2}{(69,115 - 6,2832)} = 0,1739 \Omega \quad (105)$$

$$R_{q3} = \frac{1}{2\pi f T_q'''} \cdot \frac{X_q'''}{X_q''} \cdot \frac{(X_q'' - X_l)^2}{(X_q'' - X_q''')} = \frac{1}{2\pi \cdot 200 \cdot 0,005} \cdot \frac{7,1411}{6,2832} \cdot \frac{(6,2832 - 1,7981)^2}{(6,2832 - 7,1411)} = 5,6049 \Omega \quad (106)$$

$$X_d = X_l + X_{ad} = 1,7981 + 17,9812 = 19,1042 \Omega \quad (107)$$

$$X_d' = X_l + X_{ad} \parallel X_{fd} = 1,7981 + 17,9812 \parallel -21,23 = 94,2478 \Omega \quad (108)$$

$$\begin{aligned} X_d'' &= X_l + X_{ad} \parallel \{X_{c1} + X_{d1} \parallel X_{fd}\} = \\ &= 1,7981 + 17,9812 \parallel \{0 + 19,9436 \parallel -21,23\} = 18,8496 \Omega \end{aligned} \quad (109)$$

$$\begin{aligned} X_d''' &= X_l + X_{ad} \parallel \{X_{c1} + X_{d1} \parallel [X_{c2} + X_{d2} \parallel X_{fd}]\} = \\ &= 1,7981 + 17,9812 \parallel \{0 + 19,9436 \parallel [0 + 13,7982 \parallel -21,23]\} = 9,4248 \Omega \end{aligned} \quad (110)$$

$$X_q = X_l + X_{aq} = 1,7981 + 19,1042 = 20,9023 \Omega \quad (111)$$

$$X_q' = X_l + X_{aq} \parallel X_{q1} = 1,7981 + 19,1042 \parallel -26,6742 = 7,3288 \Omega \quad (112)$$

$$X_q'' = X_l + X_{aq} \parallel X_{q1} \parallel X_{q2} = 1,7981 + 19,1042 \parallel -26,6742 \parallel 4,8052 = 6,2832 \Omega \quad (113)$$

$$\begin{aligned} X_q''' &= X_l + X_{aq} \parallel X_{q1} \parallel X_{q2} \parallel X_{q3} = \\ &= 1,7981 + 19,1042 \parallel -26,6742 \parallel 4,8052 \parallel -36,5003 = 7,1411 \Omega \end{aligned} \quad (114)$$

$$T_d' = \frac{X_{fd} + X_l \parallel X_{ad}}{2\pi f r_{fd}} = \frac{-21,23 + 1,7981 \parallel 17,9812}{2\pi \cdot 200 \cdot 0,0281} = 0,1 \text{ s} \quad (115)$$

$$T_d'' = \frac{X_{fd} \parallel (X_{c1} + X_l \parallel X_{ad}) + X_{d1}}{2\pi f r_{d1}} = \frac{-21,23 \parallel (0 + 1,7981 \parallel 17,9812) + 19,9436}{2\pi \cdot 200 \cdot 0,0996} = 0,05 \text{ s} \quad (116)$$

$$\begin{aligned} T_d''' &= \frac{X_{fd} \parallel [X_{c2} + X_{d1} \parallel (X_{c1} + X_l \parallel X_{ad})] + X_{d2}}{2\pi f r_{d2}} = \\ &= \frac{-21,23 \parallel [0 + 19,9436 \parallel (0 + 1,7981 \parallel 17,9812)] + 13,7982}{2\pi \cdot 200 \cdot 0,1739} = 0,025 \Omega \end{aligned} \quad (117)$$

$$T_q' = \frac{X_l \parallel X_{aq} + X_{q1}}{2\pi f r_{q1}} = \frac{1,7981 \parallel 19,1042 - 26,6742}{2\pi \cdot 200 \cdot 0,0919} = 0,2 \text{ s} \quad (118)$$

$$T_q'' = \frac{X_l \parallel X_{aq} \parallel X_{q1} + X_{q2}}{2\pi f r_{q2}} = \frac{1,7981 \parallel 19,1042 \parallel -26,6742 + 4,8052}{2\pi \cdot 200 \cdot 0,1833} = 0,025 \text{ s} \quad (119)$$

$$T_q''' = \frac{X_l \parallel X_{aq} \parallel X_{q1} \parallel X_{q2} + X_{q3}}{2\pi f r_{q3}} = \frac{1,7981 \parallel 19,1042 \parallel -26,6742 \parallel 4,8052 - 36,5003}{2\pi \cdot 200 \cdot 5,6049} = 0,005 \text{ s} \quad (120)$$

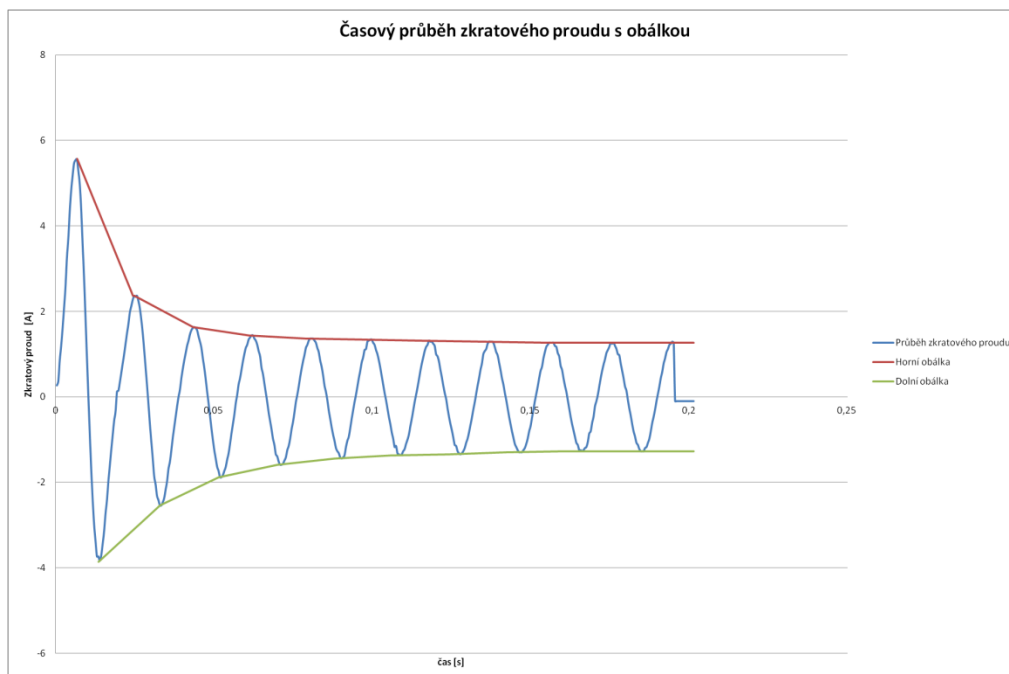
5 Měření náhlého zkratu v porovnání s metodou SSFR

5.1 Řešení měření náhlého zkratu

V předchozích kapitolách byla popsána metoda náhlého zkratu i s jejím řešením. Když poté upravíme data z osciloskopu, je možné přejít k jednotlivým výpočtům. V měřených datech je nutné rozlišovat zkratové proudy jednotlivých fází a čas měření. Celý proces je popsán a řešen v programu Matlab a algoritmus je umístěn pod řešení metody SSFR.

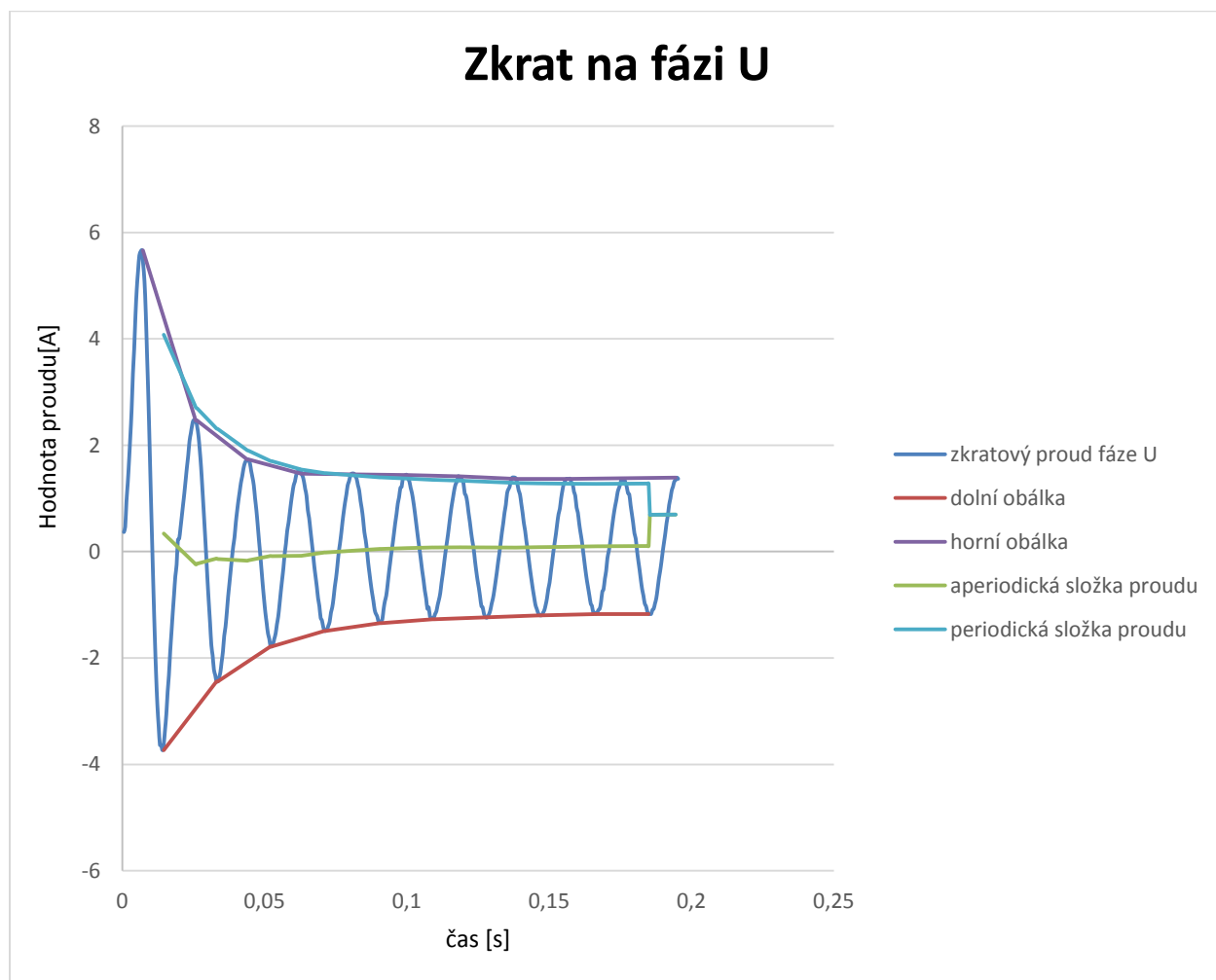
Celé měření začíná přípravou, kdy buzení je realizováno z baterie či dynama a osciloskopem pro zápis naměřených hodnot. Po nabuzení vinutí stroje se roztočí rotor na synchronní otáčky při chodu naprázdno. Avšak napětí musí být značně sníženo, aby následný zkratový proud, především v první půlperiodě, nepřesáhl jmenovitou hodnotu stroje. Pro realizované měření bylo použito napětí pro buzení 20-25 V. Zapisování hodnot se provede až do ustálení zkratového proudu s určitou rezervou.

V dalším kroku je nutné vytvořit obálkovou funkci, která začíná určením lokálních špičkových hodnot zkratového proudu, jak pro kladnou, tak pro zápornou část křivky průběhu.

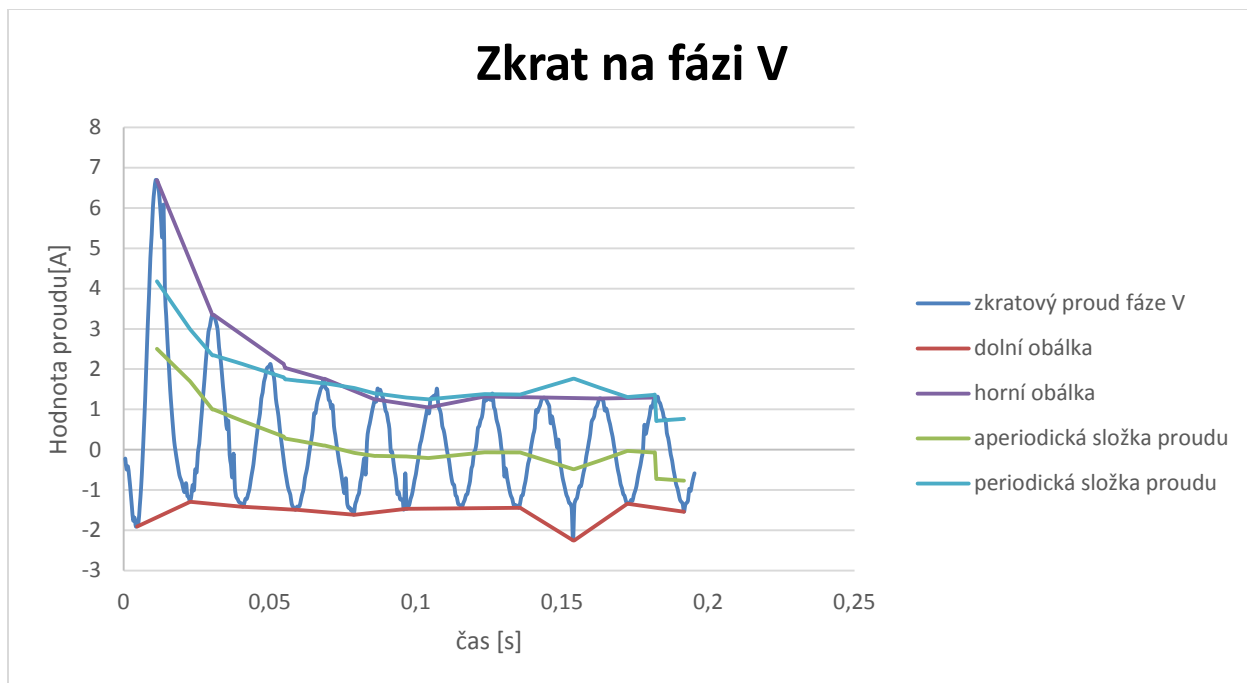


Obrázek 27: Zobrazení průběhu zkratového proudu spolu s obálkou průběhu.

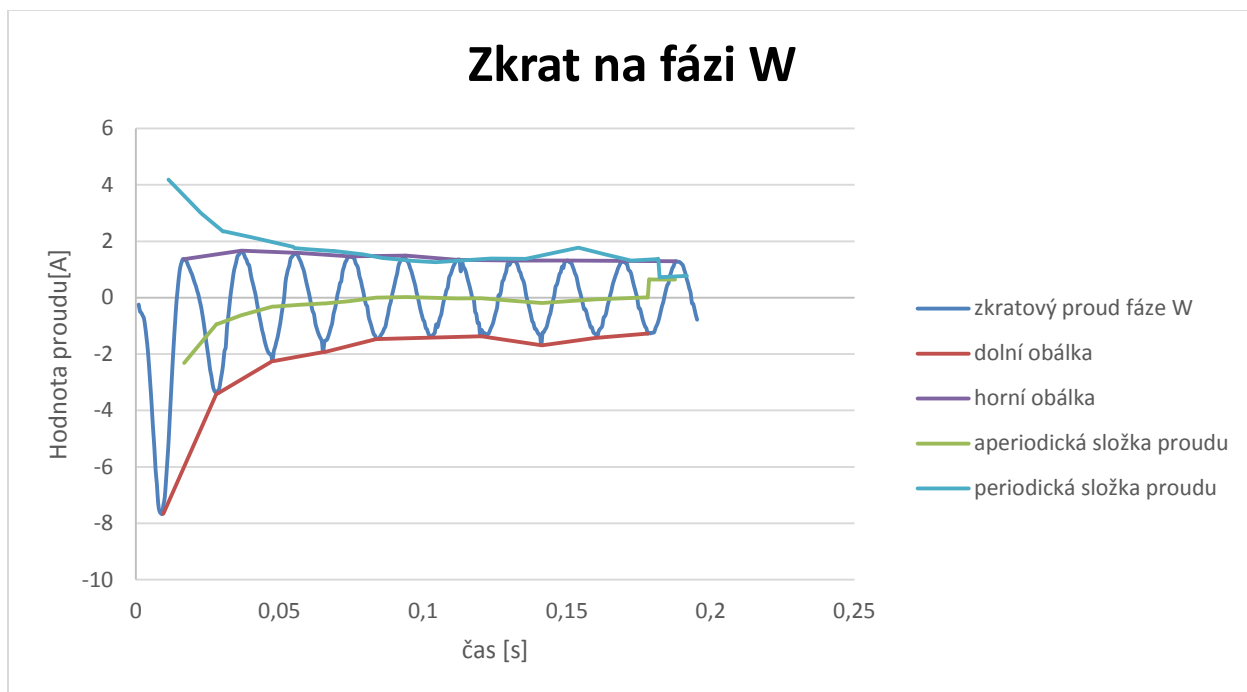
V následujícím postupu se pomocí odečtení časových intervalů, či počtu naměřených hodnot mezi jednotlivými špičkovými hodnotami vytvoří přímkové vektory, které po dokončení a zobrazení dají obálkovou funkci, kdy horní obálková čára je označena i_1 a spodní obálková čára jako i_2 . Tento postup se aplikuje pro všechny tři fáze. Znalost obálkových funkcí dává prostor pro pokračování výpočtů v analýze měřené úlohy. Nyní lze určit periodické a aperiodické složky zkratových proudů. Vztahy pro měření v podélné a příčné ose (29) a (30) pro jejich vypočet jsou uvedeny v dříve uvedeném textu. Obě křivky vyneseme opět do grafů s průběhy zkratových proudů.



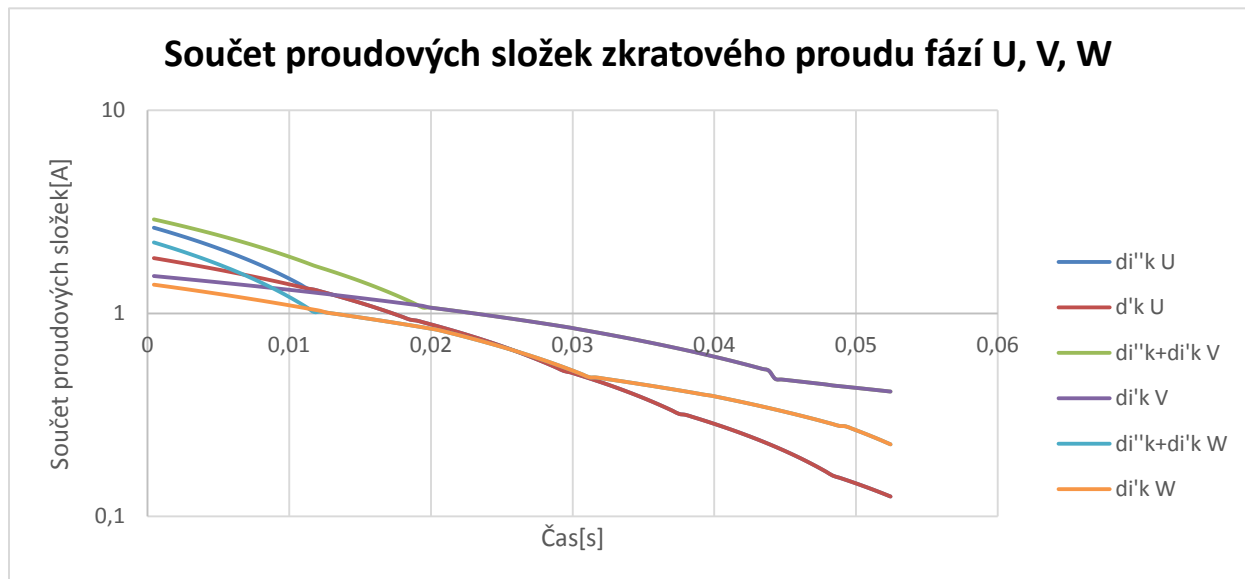
Obrázek 28: Zobrazení průběhu zkratového proudu fáze U spolu s obálkou průběhu.



Obrázek 29: Zobrazení průběhu zkratového proudu fáze V spolu s obálkou průběhu.



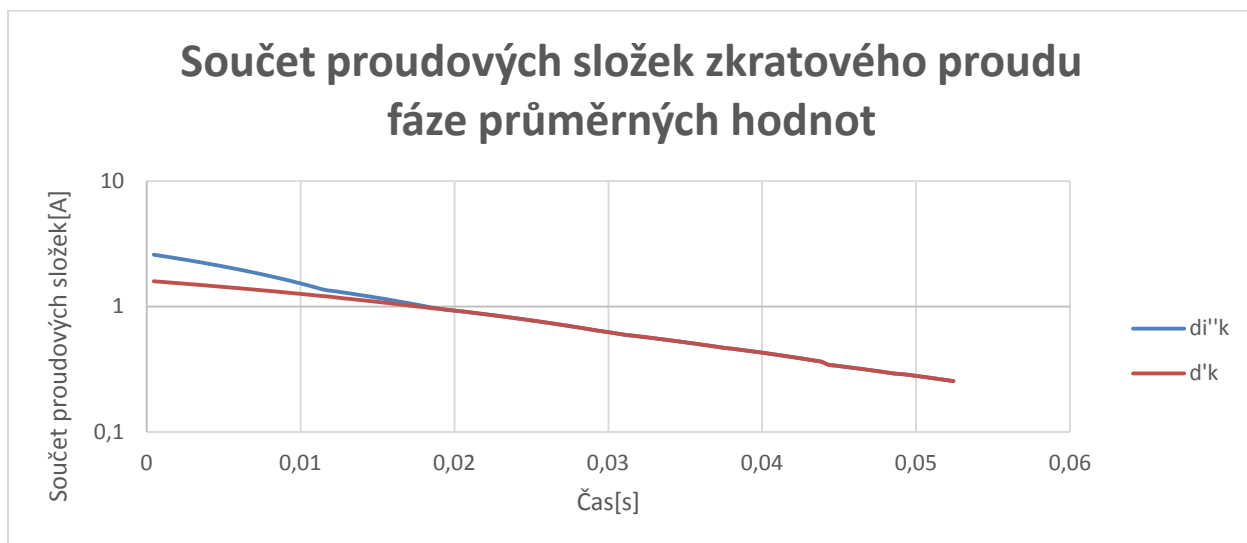
Obrázek 30: Zobrazení průběhu zkratového proudu fáze W spolu s obálkou průběhu.



Obrázek 31: Zobrazení průběhu zkratových složek proudů.

Obě složky zkratových proudů se od sebe navzájem liší. Důvodem je moment vzniku zkratu na jednotlivých fázích, kdy jednotlivé fáze jsou navzájem posunuty o 120° . Z této příčiny jsou aperiodické a periodické složky proudů navzájem vizuálně odlišné. Avšak v dalším postupu se od periodické složky proudu odečte hodnota ustálené hodnoty zkratového proudu a obdrží se tak součet obou přechodových složek, což se provede pro všechny tři fáze. Tento postup je zanesen ve vztahu (31). Je důležité, aby velikost periodické složky byla pro všechny fáze stejná. Pokud se velikosti přechodových složek liší, uvažuje se její střední hodnota. Výsledné hodnoty se vynesou do grafů v semilogaritmických souřadnicích, kdy na osu x je vynesena čas a na ose y jsou vynášeny hodnoty proudu v logaritmických souřadnicích. Průběh součtu obou přechodových složek od určitého času připomíná přímku. Tato přímka se extrapoluje až do počátku a tím se oddělí od součtu exponenciála rázové složky zkratového proudu $\Delta i_k''$, která má v semilogaritmických souřadnicích přímkový průběh a bude vynesena znovu a může být opět extrapoloována do počátku souřadnic. Extrapolace složek u časových průběhů je velmi obtížná. Aby bylo tento průběh možné naměřit, muselo by dojít k sepnutí zkratu v přesném okamžiku poloviny periody, kdy je možné výpočet aperiodické a periodické složky navzájem od sebe sečíst

i odečíst. Proto je postup popsany výše dostupnější i snažší nalezení v tomto případě fiktivních hodnot přechodových složek zkratových proudů $\Delta i''_{k0}$ a $\Delta i'_{k0}$ pro $t=0$.



Obrázek 32: Zobrazení průběhu zkratových složek proudů z průměrných hodnot.

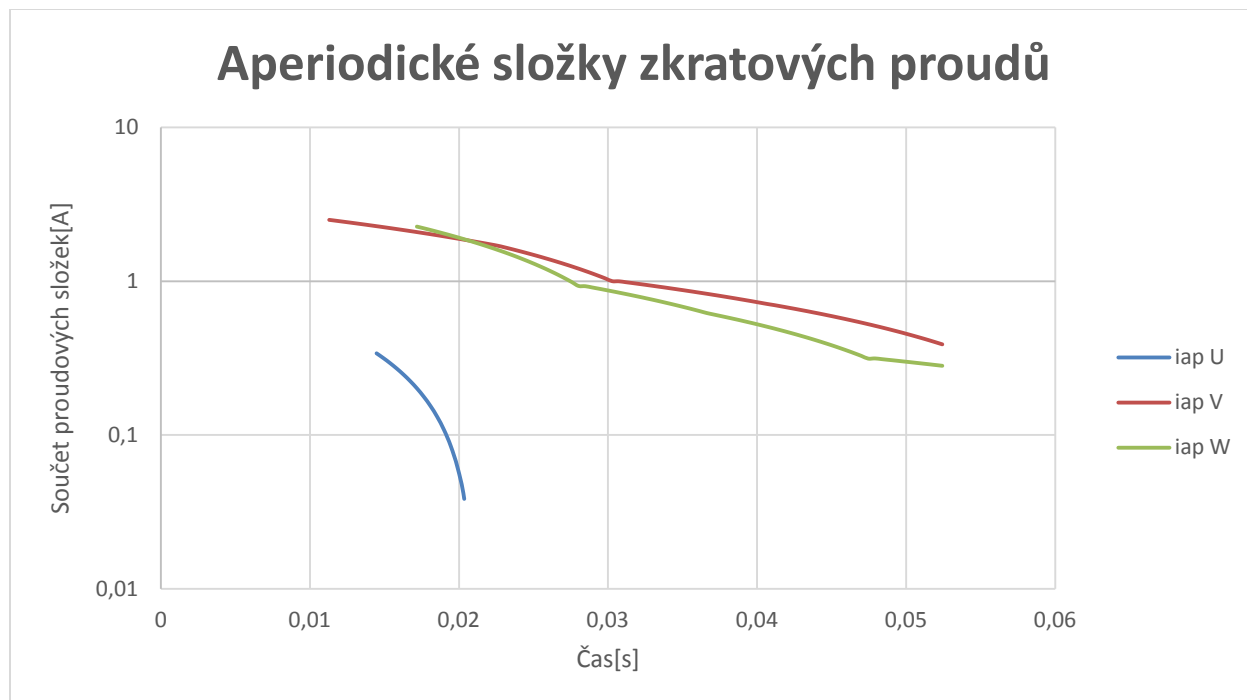
V následujícím postupu se pro výpočet určí hodnoty $\Delta i''_k$ a $\Delta i'_k$ v první půlperiodě a jejich časové konstanty. Znamená to moment, kdy hodnoty veličin klesnou na 36,8% své počáteční hodnoty. Tato analýza bude provedena pro všechny tři fáze, protože jejich hodnoty budou pokaždé jiné. Vzniknou tak tři různé průběhy s různými časovými konstantami.

Výpočet reaktancí stroje metodou náhlého zkratu:

$$X_d = \frac{\frac{\sqrt{2}U_{sdr}}{\sqrt{3}}}{\sqrt{3}I_k} = \frac{\frac{\sqrt{2} \cdot 37}{\sqrt{3}}}{\sqrt{3} \cdot 1,26955} = 13,7387 \Omega \quad (121)$$

$$X'_d = \frac{\frac{\sqrt{2}U_{sdr}}{\sqrt{3}}}{\sqrt{3}(I_k + \Delta i'_{k0})} = \frac{\frac{\sqrt{2} \cdot 37}{\sqrt{3}}}{\sqrt{3}(1,26955 + 1,995)} = 5,40912 \Omega \quad (122)$$

$$X''_d = \frac{\frac{\sqrt{2}U_{sdr}}{\sqrt{3}}}{\sqrt{3}(I_k + \Delta i'_{k0} + \Delta i''_{k0})} = \frac{\frac{\sqrt{2} \cdot 37}{\sqrt{3}}}{\sqrt{3}(1,26955 + 1,995 + 2,83)} = 2,8616 \Omega \quad (123)$$



Obrázek 33: Zobrazení průběhu aperiodických složek zkratových proudů.

5.2 Srovnání metody náhlého zkratu a SSFR

Jak již bylo řečeno v úvodu, obě metody podávají informace o hodnotách statických a dynamických vlastností jednotlivých parametrů stroje. Slouží k ověření výpočtů návrhu a diagnostice stavu vinutí stroje v provozu. Metodu klidové frekvenční odezvy je možné provést i na pracovním umístění stroje, protože je méně náročné na vybavení pro měření.

Při metodě náhlého zkratu je buzení stroje realizováno z baterie, nebo dynama s cizím buzením, protože nelze použít derivačního budiče, který při derivačním zapojení odbuzuje indukované proudy v rotoru. Proto se metoda náhlého zkratu provádí při výstupní kontrole nově vyrobeného stroje či po repasi vinutí.

Metoda náhlého zkratu představuje také vyšší riziko pro měřený stroj v podobě proudového rázu v prvních momentech zkratu. Proto je měření prováděno za snížených hodnot. Podává přesnější obraz o dynamických vlastnostech zkoušeného stroje. S měřením klidové

frekvenční odezvy odpadá potřeba dalších speciálních zkratových či nízkonapětových zkoušek. Tato výhoda eliminuje odchylky výsledků pro nízké hodnoty magnetizačních proudů.

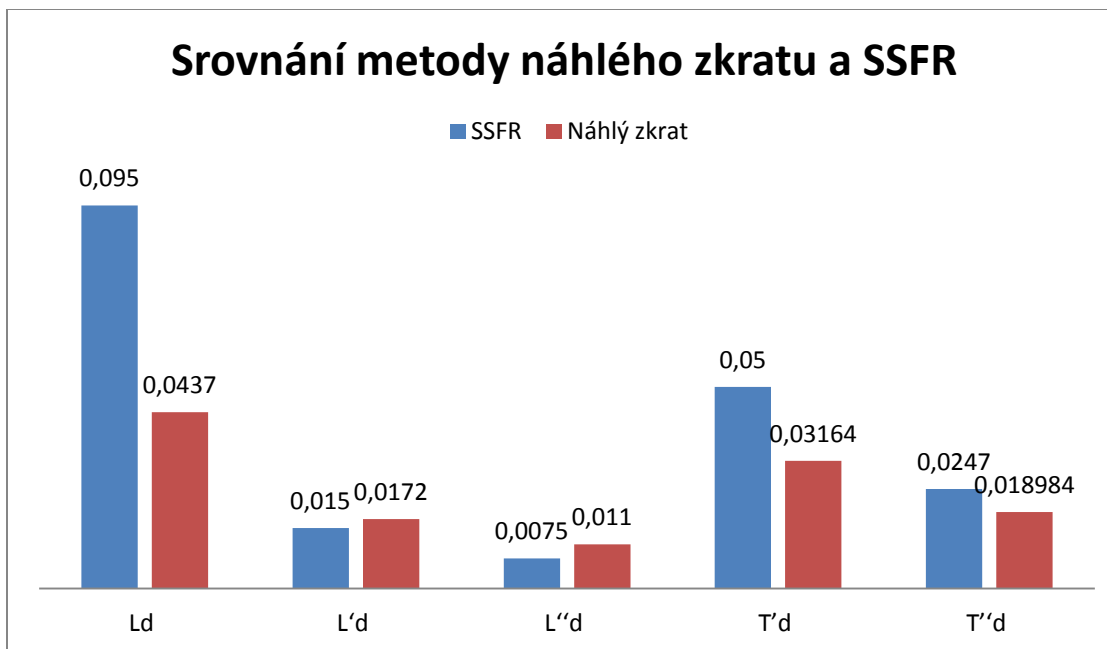
Z hlediska časové náročnosti měření je metoda náhlého zkratu rychlejší. Zkrat odezní během několika milisekund až sekund v závislosti na velikosti stroje. Metoda klidové frekvenční odezvy vyžaduje časové prodlevy při změně frekvence. Důvodem je zachování teploty vinutí, aby tak nedocházelo k navýšení teploty vinutí vlivem přechodů frekvence na vyšší hodnotu. Je tedy nutné nechat odeznít elektrický i tepelný přechodový jev.

Při celkovém vyhodnocení obou metod je menší časová náročnost u klidové frekvenční odezvy, kdy po separaci jedné úrovně zesílení je možné přejít přímo na výpočetní algoritmus. U metody náhlého zkratu je časově náročné vytvoření obálek funkcí, které jsou pro vyhodnocení výpočtů nezbytné. Z hlediska časové náročnosti přípravy stroje vychází lépe opět SSFR, kdy se jedná pouze o zapojení napájení spektrálního analyzátoru odezvy či bočniku.

Výsledné hodnoty získané naměřením a vyřešení dle postupů uvedených u jednotlivých metod jsou uvedeny v tabulce 2 numericky a vizuálně na obrázku 34, v tomto sloupcovém grafu jsou porovnány pouze společné hodnoty určené danými metodami měření.

Výpočetní algoritmus SSFR		Metoda náhlého zkratu
$L_d = 95 \text{ mH}$	$R_{d1} = 0,3146 \Omega$	$L_d = 43,7 \text{ mH}$
$L_d = 15 \text{ mH}$	$R_{d2} = 0,2295 \Omega$	$L_d = 17,2 \text{ mH}$
$L_d = 7,5 \text{ mH}$	$R_{fd} = 0,5412 \Omega$	$L_d = 9,1 \text{ mH}$
$T_d = 50 \text{ ms}$		$T_d = 31,64 \text{ ms}$
$T_d = 24,7 \text{ s}$		$T_d = 18,984 \text{ ms}$

Tabulka 2: Srovnávací tabulka výsledků metody náhlého zkratu a SSFR.



Obrázek 34: Zobrazení srovnání metody náhlého zkratu a SSFR.

Mezi uvedenými velikostmi parametrů jsou zjevné rozdíly, které se pohybují kolem 30%. Tyto odchylky mohou být způsobené chybou měřících přístrojů či jejich nastavením. Také v řešení měření náhlého zkratu je možné vidět v grafech průběhů zkratového proudu nesinusové průběhy v oblastech maximálních hodnot amplitud ve fázích V a W a ty snižují jeho efektivní a maximální hodnotu. Při srovnávání proudových složek proudů jednotlivých fází byly odhaleny rozdíly. Dle popisu metody náhlého zkratu se v tomto případě zprůměrovaly jednotlivé složky zkratových proudů všech tří fází, tímto krokem byla vytvořena chyba, která má značný vliv na konečné výsledky. Další příčinou takto velké odchylky je nedostatek informací o měřeném stroji. Především zde chybí informace o rozpytlové reaktanci, která se na začátku optimalizačního výpočtu odhaduje. Pokud by tato informace byla k dispozici, výpočet by byl výrazně přesnější.

6 Závěr

Problematika synchronních strojů je velice široká. Měření konstrukčních parametrů stroje a jeho vinutí doprovází celá řada parazitních jevů, indukují se například další elektromotorické síly a proudy vyšších kmitočtů (vyšší harmonické, vířivé proudy,..). Tyto proudy působí negativně na jmenovitý chod, na životnost i na izolační schopnosti.

Téma práce bylo rozděleno mezi dva studenty, kdy část zaměřenou na praktické měření motoru, tedy získání základních dat pro mé vypracování, byla určena druhému studentovi. Cílem mé diplomové práce bylo zpracování jím odměřených dat a použití těchto měření v programu, který dopočítává základní parametry vinutí synchronního motoru dle náhradních schémat uvedených v elektrotechnické normě IEEE Guide for Test Procedures for Synchronous Machines. [1]

V první kapitole jsem popisoval základní poznatky o synchronních strojích. V textu je vybrána hlavně teorie, která vysvětluje vznik elektromagnetického pole kolem proudovodiče. Tento jev byl popsán Maxwellovou rovnicí o "celkovém proudu".

Další část diplomové práce byla zaměřena na měření hlavních parametrů synchronních strojů. Byly zde vyjmenovány metody vedoucí ke zjištění parametrů vinutí. Jako první byla uvedena metoda náhlého zkratu, která je v závěrečné kapitole porovnávána s hlavním tématem mé diplomové práce metodou klidové frekvenční odezvy. Posledním způsobem zjištění parametrů synchronního stroje byla metoda klidové frekvenční odezvy, která byla popsána normou IEEE Std 115™-2009 (SSFR).

Ve čtvrté kapitole jsem se zaměřil na novější metody výpočtů, které spočívají v analýze algoritmu měřených dat. Získávání technických parametrů z algoritmu bylo velice obtížné, jelikož dostupných materiálů v technické literatuře, které by naznačovaly metodiku výpočtu, je velice málo. Proto jsem se musel obrátit také na zahraniční publikace, ve kterých jsem našel informace o použitých metodách. Nejvíce zdrojů jsem získal z university v Íránu, kde se problematikou metody klidové frekvenční odezvy zabývají a postupně jí zdokonalují. Pro inspiraci pro výpočty v diplomové práci jsem si vybral článek od pana Behrooze Vahidiho PhD. ve spolupráci s Mohammadem Reza Bank Tavakolim PhD.. Tento článek byl napsán pro

studenty postgraduálního studia s řešením v prostředí Microsoft Excel pomocí maker. Pro nedostatek znalostí a zkušeností s programováním maker bylo zvoleno prostředí Matlab, kdy díky výuce byla dosažena dostatečná schopnost pro sepsání algoritmu výpočtů. Výpočetní algoritmy byly uvedeny v třetí kapitole textu. Jednotlivé kroky v samotném programu korespondovaly s postupnými kroky výpočtů. Výsledné odchylky řešených hodnot se v závěru schodovaly až na rázovou časovou konstantu. Vzhledem k tomuto faktu shledávám měření velice úspěšným a použitelným pro další využití.

Poslední část diplomové práce bylo uvedeno řešení měření náhlého zkratu. Postup analýzy se shodoval se skriptem Měření na elektrických strojích. 2. Vydání od Prof. Bartoše. Základní výpočty byly zpracovány v programovém prostředí Matlab, ale výsledné grafy byly dopracovány pro jednoduchost vyobrazení v programu Excel. Výsledné hodnoty impedancí byly uvedeny v tabulce pod řešením měření.

Výsledky mé diplomové práce slouží k vytvoření programu zpracovávající naměřené hodnoty při testu klidové frekvenční odezvy synchronních strojů a následné řešení, jehož výsledkem jsou základní hodnoty indukčnosti a odporů vinutí statoru a rotoru.

Vytváření algoritmu programu je náročné, ale ne nemožné. Vývoj algoritmu bude tématem pro další úpravy, které by měly minimalizovat chyby výpočtů a zpřesňovat výsledky. Pak už je na každé firmě, jak si program přizpůsobí pro své účely, jelikož každý konstruktér uvažuje výpočet s rozdílnou tolerancí intervalu parametrů jednotlivých prvků stroje. V mém programu jsem se tedy snažil, aby se výsledková chyba pohybovala v rámci maximálně jednotek procent, což je pro studijní účely dostačující. To neznamená, že je dostačující i pro využití v komerční sféře průmyslové výroby.

Zpracování mé diplomové práce bylo dost obtížné. Hlavním důvodem bylo velice málo literatury, která se zabývá popisem metody klidové frekvenční odezvy v praktickém využití. Abych dosáhl tohoto výsledku, musel jsem pracovat s malým množstvím literatury, která byla, jak jsem již psal, především zahraniční. I když se zpočátku zdálo, že nedosáhnu výsledku a nesplním stanovený cíl, postupem času, kdy jsem získával další informace a nabýval další

zkušenosti, narůstala i má chuť ke studování dalších materiálů a k dalšímu ověřování naměřených výsledků. To vedlo podle mého názoru k úspěšnému vyřešení daného úkolu.

7 Citace

- [1] PETROV, G. N. Elektrické stroje 1. Praha : Academia, 1980. 388 s.
- [2] *Encyklopedie fyziky: Maxwellovy rovnice* [online]. [cit. 2017-01-26]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/368-maxwellovy-rovnice>
- [3] Hydrocity power [online]. 2013 [cit. 2013-05-25]. Photogallery.
Dostupné z WWW: < http://www.industrial-electronics.com/images/elec_pwr_3e_4-11.jpg >.
- [4] HRUŠKA, Karel. *Teorie elektrických strojů 2: Vinutí elektrických strojů* [online]. Plzeň [cit. 2017-01-26]. Skriptum. ZČU Plzeň.
- [5] *PROF.ING.BARTOŠ CSC., Václav. Teorie elektrických strojů. Plzeň: ZČU Plzeň, 2009.*
- [6] *PROF.ING.BARTOŠ CSC., Václav a Bohumil ING. SKALA PH.D. Měření na elektrických strojích. 2. vydání. Plzeň: ZČU Plzeň, 2006.*
- [7] *Měření reaktancí, odporů a časových konstant synchronního stroje: Náhlý zkrat* [online]. [cit. 2017-01-26]. Dostupné z: http://fei1.vsb.cz/kat410/studium/studijni_materialy/pves/mereni_SY%20konstanty.pdf
- [8] *IEEE Guide for Test Procedures for Synchronous Machines: Test Procedures and Parameter Determination for Dynamic Analysis.* New York: The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. 3 Park Avenue, New York, NY 10016-5997, USA, 2010. ISBN 978-0-7381-6135-8.
- [9] VAHIDI, Behrooz a Mohammad Reza Bank TAVAKOLI. *Standstill Frequency Response Test Analyzer by Using Excel Macros for Educational Purposes.* , 10.
- [10] *Stavba elektrických strojů* [online]. Plzeň, 2016 [cit. 2017-05-08]. Skriptum. ZČU. Vedoucí práce Doc. Ing. Josef Červený.

8 Seznam symbolů

H	Intenzita magnetického pole [A/m]	β_c	Zkrácený krok [-]
Ψ	Spřažený magnetický tok [Wb]	F	Magnetické napětí [A]
l	Délka [m]	I_μ	Magnetizační proud [A]
U_i	Indukované napětí [V]	I_b	Budící proud [A]
Φ	Magnetický tok [Wb]	g	Činitel převodu [-]
t	Čas [s]	N_s	Počet závitů statorového vinutí [-]
B	Magnetická indukce [T]	N_b	Počet závitů budícího vinutí [-]
A	Elektrický proud [A]	m	Počet fází [-]
μ	Permeabilita [Hm ⁻¹]	Z_d	Podélná impedance [Ω]
s	Skluz [%]	R_a	Činný odpor kotvy [Ω]
ω	Úhlová rychlost [rad·s ⁻¹]	X_{ad}	Podélná reaktance kotvy [Ω]
n	Počet otáček [min ⁻¹]	$X_{a\sigma}$	Podélná rozptylová reaktance kotvy [Ω]
k_v	Činitel vinutí [-]	X_d	Podélná reaktance [Ω]
k_y	Činitel kroku [-]	U_{ib}	Indukované napětí buzení [V]
k_r	Činitel rozlohy [-]	U_d	Napětí v podélném směru [V]
f	Frekvence [Hz]	U_q	Napětí v příčném směru [V]
p	Počet pólů [-]	I_d	Proud v podélném směru [A]
v	Vyšší harmonická [-]	I_q	Proud v příčném směru [A]
X_{dnes}	Podélná nesyčená reaktance [Ω]	I_k	Proud nakrátko [A]

X_{dsyc}	Podélná sycená reaktance [Ω]	i_{ap}	Aperiodická složka proudu [A]
$I_{k\delta}$	Proud nakrátko [A]	i_{st}	Periodická složka proudu [A]
I_{k0}	Proud naprázdno [A]	i_1	Horní obálka zkratového proudu [A]
U_N	Jmenovitá hodnota napětí [V]	i_2	Spodní obálka zkratového proudu [A]
δ_{max}	Maximální vzduchová mezera [mm]	$\Delta i_k'$	Přechodná složka zkratového proudu [A]
δ_{min}	Minimální vzduchová mezera [mm]	$\Delta i_k''$	Rázová složka zkratového proudu [A]
X_d''	Rázová reaktance v podélném směru [Ω]	U	Elektrické napětí [V]
X_q''	Rázová reaktance v příčném směru [Ω]	Z_d'	Přechodná složka podélné impedance [Ω]
$\cos\varphi_d$	Účinník v podélném směru [-]	Z_d''	Rázová složka podélné impedance [Ω]
$\cos\varphi_q$	Účinník v příčném směru [-]	$\Delta i_{k1/2}'$	Přechodná složka zkratového proudu v polovině periody [A]
P_d	Činný výkon v podélném směru [W]	$\Delta i_{k1/2}''$	Rázová složka zkratového proudu v polovině periody [A]
P_q	Činný výkon v příčném směru [W]	i_{apmax}	Maximální složka zkratového proudu [A]
X_d'	Přechodná reaktance v podélném směru [Ω]	$i_{apmax1/2}$	Maximální složka zkratového proudu v polovině periody [A]
X_q'	Přechodná reaktance v příčném směru [Ω]	$\Delta \Psi_d(s)$	Magnetický tok v podélném směru v závislosti na úhlové frekvenci [Wb]

I_k	Ustálená složka zkratového proudu [A]	$\Delta \Psi_q(s)$	Magnetický tok v příčném směru v závislosti na úhlové frekvenci [Wb]
U_{max}	Maximální napětí [V]	$G(s)$	Přenosová funkce toku kotvy ve tvaru po Laplaceově transformaci
U_{min}	Minimální napětí [V]	$\Delta e_{fd}(s)$	Napětí pole v závislosti na úhlové frekvenci [V]
Z_{fao}	Impedance představující parametr přenosu energie z pole do rotoru [Ω]	$L_d(s)$	Indukčnost podélné osy v závislosti na úhlové frekvenci [H]
$Z_{arm}(s)$	Impedance kotvy v závislosti na úhlové frekvenci [Ω]	$L_q(s)$	Indukčnost příčné osy v závislosti na úhlové frekvenci [H]
X_{fd}	Reaktance pole [Ω]	$\Delta i_d(s)$	Proud podélné osy v závislosti na úhlové frekvenci [A]
X_{d1}	Parametr podélné reaktance [Ω]	$\Delta i_q(s)$	Proud příčné osy v závislosti na úhlové frekvenci [A]
X_{d2}	Parametr podélné reaktance [Ω]	L_{fd}	Indukčnost budícího vinutí působící na pole statoru [H]
X_{q1}	Parametr příčné reaktance [Ω]	L_{f12d}	Vzájemná indukčnost mezi státorem a rotorem, případně rotorovou klecí nakrátko, používanou jako tlumící vinutí při rozběhu z nulových otáček [H]
X_{q1}	Parametr příčné reaktance [Ω]	Δe_d	Napětí v podélném směru osy v závislosti na úhlové frekvenci [V]

X_{q3}	Parametr příčné reaktance [Ω]	Δe_q	Napětí v příčném směru osy v závislosti na úhlové frekvenci [V]
R_{d1}	Parametr podélného odporu [Ω]	Z_{af0}	Impedance představující parametr přenosu energie z rotoru přes vzduchovou mezeru [Ω]
R_{d2}	Parametr podélného odporu [Ω]	T_d'''	Časová konstanta impedance tlumiče v podélné ose [s]
R_{q1}	Parametr příčného odporu [Ω]	T_q'	Časová konstanta přechodné impedance v příčné ose [s]
R_{q2}	Parametr příčného odporu [Ω]	T_q''	Časová konstanta rázové impedance v příčné ose [s]
R_{q3}	Parametr příčného odporu [Ω]	T_q'''	Časová konstanta impedance tlumiče v příčné ose [s]
X_d'''	Reaktance tlumiče v podélné ose [Ω]		
X_q'''	Reaktance tlumiče v příčné ose [Ω]		
T_d'	Časová konstanta přechodné impedance v podélné ose [s]		
T_d''	Časová konstanta rázové impedance v podélné ose [s]		

9 Příloha

Vypsání těla výpočetního algoritmu

```

clc
clear

% Namerene a prepoctene hodnoty velicin

% Podelna osa: zadani pro -25 dB.

% Mereni

Uapuv1=[762    787    802    799    801    805    801    804    804
        782    777    802];
Ua1=[0.762    0.787    0.802    0.799    0.801    0.805    0.801    0.804    0.804
     0.782    0.777    0.802];
Iapuv1=[155    180    67.6    57.6    51    39.4    35.5    31.6    28.3
        25.8    23.3    22.4];
Ia1=[0.155    0.18    0.0676    0.0576    0.051    0.0394    0.0355    0.0316    0.0283
     0.0258    0.0233    0.0224];
fipuv1=[6.2    5.8    4    3    2.64    2.08    1.76    1.48    1.36
        1.08    1    0.8];
fi1=[0.0062    0.0058    0.004    0.003    0.00264    0.00208    0.00176    0.00148    0.00136
     0.00108    0.001    0.0008];
stupnel=[0.389557489    0.728849496    1.005309649    0.942477796
          0.995256553    1.045522035    1.105840614    1.115893711
          1.196318482    1.085734421    1.130973355    1.005309649];
f1=[10    20    40    50    60    80    100    120    140    160
     180    200];
T1=[ 0.1    0.05    0.025    0.02    0.016666667    0.0125    0.01
     0.008333333    0.007142857    0.00625    0.005555556    0.005];

% Podelna osa: zadani pro -25 dB.

% Mereni

Uapuv2=[726    759    777    766    779    773    782    730    769
        768    744    778];
Ua2=[0.726    0.759    0.777    0.766    0.779    0.773    0.782    0.73    0.769
     0.768    0.744    0.778];
Iapuv2=[262    225    153    124    109    83.7    70.1    64    54
        49.6    45.5    40.3];
Ia2=[0.262    0.225    0.153    0.124    0.109    0.0837    0.0701    0.064    0.054
     0.0496    0.0455    0.0403];
Ibpv2=[46.3    39.9    26.3    21.3    18.5    14.1    11.7    10.5    8.79
        8.11    7.31    6.44];
Ib2=[0.0463    0.0399    0.0263    0.0213    0.0185    0.0141    0.0117    0.0105    0.00879
     0.00811    0.00731    0.00644];
fia2=[0.7    4.6    3.6    3.2    3    2.4    1.84    1.64    1.4
        1.28    1    0.92];
fiaprepocet2=[0.0007    0.0046    0.0036    0.0032    0.003    0.0024    0.00184    0.00164
              0.0014    0.00128    0.001    0.00092];

```

```

fia2=[0.043982297      0.578053048      0.904778684      1.005309649
       1.130973355      1.206371579      1.156106097      1.236530868
       1.23150432       1.286796351      1.130973355      1.156106097];
fibpuv2=[49.2  25.4  12.9  9.9  8.68  6.3  5.12  4.4  3.38
         3.32  3      2.76];
fibprep2=[0.0492      0.0254  0.0129  0.0099  0.00868  0.0063  0.00512  0.0044
          0.00338  0.00332  0.003  0.00276];
fib2=[3.091327171      3.191858136      3.242123619      3.110176727
       3.272282908      3.166725395      3.216990877      3.317521842
       2.973203287      3.337628035      3.392920066      3.46831829];
f2=[10  20  40  50  60  80  100  120  140  160
    180  200];

```

```
% Mereni
```

```

Uapuv3=[778  817  820  820  818  824  824  826  820
        823  819  826];
Ua3=[0.778  0.817  0.82  0.82  0.818  0.824  0.824  0.826  0.82
     0.823  0.819  0.826];
Iapuv3=[174  152  107  98.8  83.4  73.8  58.6  49.6  44.6
        41.7  38.5  35.1];
Ia3=[0.174  0.152  0.107  0.0988  0.0834  0.0738  0.0586  0.0496  0.0446
     0.0417  0.0385  0.0351];
Ubpuv3=[175  182  166  162  152  145  134  120  118
        119  115  108];
Ub3=[0.175  0.182  0.166  0.162  0.152  0.145  0.134  0.12  0.118
     0.119  0.115  0.108];
fiapuv3=[3.2  4  3  2.88  2.48  2.08  1.68  1.44  1.24
         1.14  1.04  0.91];
fiaprep3=[0.0032      0.004  0.003  0.00288  0.00248  0.00208  0.00168  0.00144
          0.00124  0.00114  0.00104  0.00091];
fia3=[0.20106193      0.502654825      0.753982237      0.904778684
       0.934937974      1.045522035      1.055575132      1.085734421
       1.090760969      1.146053      1.17621229      1.143539726];
f3=[10  20  40  50  60  80  100  120  140  160
    180  200];

```

```

%-----
%-----

```

```
% Metoda dle VAHIDI AND TAVAKOLI.
```

```
% Kontrola vstupnich dat
```

```

n=1;
[ualin,ualout] = size(Ua1);
[ialin,ialout] = size(Ia1);
[fialin,fialout] = size(fia1);
[f1in,f1out] = size(f1);

[ua2in,ua2out] = size(Ua2);
[ia2in,ia2out] = size(Ia2);
[fia2in,fia2out] = size(fia2);
[f2in,f2out] = size(f2);
[fib2in,fib2out] = size(fib2);

```

```

[ib2in,ib2out] = size(Ib2);

[ua3in,ua3out] = size(Ua3);
[ia3in,ia3out] = size(Ia3);
[fia3in,fia3out] = size(fia3);
[f3in,f3out] = size(f3);
[ub3in,ub3out] = size(Ub3);

n=ub3out;

if n ~= ualout || n ~= ialout || n ~= fialout || n ~= flout || n ~= ua2out ||
n ~= ia2out || n ~= fia2out || n ~= f2out || n ~= fib2out || n ~= ib2out || n
~= ua3out || n ~= ia3out || n ~= fia3out || n ~= f3out
    disp('nestejný počet vstupních parametrů')

    break
else n = ualout;

Zd(1,1) = 0.976484601;
end

for frek = 4:4:flout

    % Rozptylova indukčnost

    Zda = Ua2(1,4)/(2*Ia2(1,4));
    xad = sqrt( (Zda - Zd(1,1)) );
    Uib = Ua2(1,4)-(Zda*Ia2(1,4));

    Xad = Uib/Ib2(1,4);
    Zd = Ua2(1,4)/(2*Ia2(1,4));
    Xd = sqrt((Zd^2)-(Zd(1,1)^2));
    Xao = Xd - Xad;

    Xl = abs(0.1*Xad);
    Ll = Xl/(2*pi*f1(1,frek))

% Vypocet zakladnich parametru

    for d1 = 1:1:n

s = 2*pi*f2(1,d1);
Zd(1,(d1+1)) = Ua2(1,d1)/(2*Ia2(1,d1));

Zq(1,(d1+1)) = Ua1(1,d1)/(2*Ia1(1,d1));
Zq(1,1) = 3.3233688;
wG(1,(d1+1)) = ((sqrt(3)/2)*(Ib2(1,d1)/Ia2(1,d1)));

Zaf0(1,(d1+1)) = ((sqrt(3)/2)*(Ub3(1,d1)/Ia3(1,d1)));
Zaf0(1,1) = 0.926763205;
Rd = Zd(1,1);
Rq = Zq(1,1);
Ldw(1,d1) = (Zd(1,(1+d1)) - Rd) / s;

```

```
Lqw(1,d1) = (Zq(1,(1+d1)) - Rq) / s;  
Ldniz_frek = Ldw(1,1);  
Lqniz_frek = Lqw(1,1);  
Lad = Ldniz_frek - L1;  
Laq = Lqniz_frek - L1;  
Zaf0w(1,d1) = (Zaf0(1,(d1+1)))/s);  
Nfda = ((1/Lad)*0.926763205);  
wGw(1,d1) = (wG(1,(d1+1)))/s);  
Rfd = (Lad/((2/3)*Nfda*(wGw(1,1))));  
  
end  
  
poc_iteraci_d = 1;  
  
% Generace zakladnich hodnot pro lazeni krivek  
  
% Vypocet podelne osy  
  
% Inicializacni hodnoty pro vypocet  
xd = X1 + Xad  
Ld = xd/(2*pi*frek)  
x1d = 0.095*2*pi*f1(1,frek);  
x2d = 0.015*2*pi*f1(1,frek);  
x3d = 0.0075*2*pi*f1(1,frek);  
t1d = 0.1;  
t2d = 0.05;  
t3d = 0.025;  
Xc1 = 0;  
Xc2 = 0;  
  
Xd = 0;  
X1d = 0;  
X2d = 0;  
X3d = 0;  
T1d = 0;  
T2d = 0;  
T3d = 0;  
  
x1 = 0;  
x2 = 0;  
x3 = 0;  
x4 = 0;  
x5 = 0;  
x6 = 0;  
  
% Vyhledavaci interval  
for poc_iteraci_d = 1:1:1000  
  
% Rovnice pro lazeni parametru  
xfd = (((xd-X1)*(x1d-X1))/(xd-x1d));  
xd1 = (((x1d-X1)*(x2d-X1))/(x1d-x2d));  
xd2 = (((x2d-X1)*(x3d-X1))/(x2d-x3d));  
rd1 = (1/(2*pi*f1(1,frek)*t2d))*(x2d/x1d)*(((x1d-X1)^2)/(x1d-x2d));  
rd2 = (1/(2*pi*f1(1,frek)*t3d))*(x3d/x2d)*(((x2d-X1)^2)/(x2d-x3d));
```

```

% Kontrolni rovnice pro korekci velikosti dilcich parametru
Xd(1,frek) = Xl + Xad;
X1d = Xl + ((Xad*xfd)/(Xad+xfd));
X2d = Xl + ((Xad*(Xc1 + ((xd1*xfd)/(xd1+xfd)))/(Xad+(Xc1 +
((xd1*xfd)/(xd1+xfd))))));
X3d = Xl + ((Xad*(Xc1+((xd1*(Xc2 + ((xd2*xfd)/(xd2+xfd)))/(xd1+(Xc2 +
((xd2*xfd)/(xd2+xfd)))))))/(Xad+(Xc1+((xd1*(Xc2 +
((xd2*xfd)/(xd2+xfd)))/(xd1+(Xc2 + ((xd2*xfd)/(xd2+xfd))))))));

T1d = abs(((xfd + ((Xl*Xad)/(Xl+Xad)))/(2*pi*f1(1,frek)*Rfd));
T2d = abs((((xfd*(Xc1 + ((Xl*Xad)/(Xl+Xad)))/(xfd+(Xc1 +
((Xl*Xad)/(Xl+Xad)))) + xd1)/(2*pi*f1(1,frek)*rd1));
T3d = abs((((xfd*(Xc2 + ((xd1*((Xc1 + (Xl*Xad)/(Xl+Xad)))/(xd1+((Xc1 +
(Xl*Xad)/(Xl+Xad)))))))/(xfd*(Xc2 + ((xd1+((Xc1 +
(Xl*Xad)/(Xl+Xad)))/(xd1+((Xc1 +
(Xl*Xad)/(Xl+Xad)))))))+xd2)/(2*pi*f1(1,frek)*rd2));

% Pomerna velikost obou parametru vyjadrena v procentech [%]
pomer_xd = (xd/Xd(1,frek));
pomer_x1d = (x1d/X1d);
pomer_x2d = (x2d/X2d);
pomer_x3d = (x3d/X3d);
pomer_t1d = (t1d/T1d);
pomer_t2d = (t2d/T2d);
pomer_t3d = (t3d/T3d);

% Rozdil laznych a korekcnych parametru
r1(1,poc_iteraci_d) = x1d - X1d;
r2(1,poc_iteraci_d) = x2d - X2d;
r3(1,poc_iteraci_d) = x3d - X3d;
r4(1,poc_iteraci_d) = t1d - T1d;
r5(1,poc_iteraci_d) = t2d - T2d;
r6(1,poc_iteraci_d) = t3d - T3d;

% Ladici algoritmus

% Podminka, pri niz se velikost zapise a tento krok se jiz preskoci
if x1 < 1
    if pomer_x1d > 0.9 & pomer_x1d < 1.1
        Hx1d(1,poc_iteraci_d) = x1d;
        disp('Prvni parametr vyresen')
        % Zastaveni vypoctu prvku a pokracovani k dalsimu parametru
        x1 = 1;
    continue
end

% Prepoce, pokud lazna velikost parametru prekracuje omezujici
% podminky
if pomer_x1d > 1.1

x1d = x1d - (x1d*0.0025);

```



```
elseif pomer_x1d < 0.9

x1d = x1d + (x1d*0.0025);

end
end

if x1 > 0
if x2 < 1

    if pomer_x2d > 0.9 & pomer_x2d < 1.1
    if x1d > x2d
        Hx2d(1,poc_iteraci_d) = x2d;
        disp('Druhy parametr vyresen')
        x2 = 1;
    continue
    end
    end

if pomer_x2d > 1.1

x2d = x2d - ( x2d*0.0025);

elseif pomer_x2d < 0.9

x2d = x2d + ( x2d*0.0025);

end
end
end

if x2 > 0
if x3 < 1

    if pomer_x3d > 0.9 & pomer_x3d < 1.1
    if x2d > x3d
        Hx3d(1,poc_iteraci_d) = x3d ;
        disp('Treti parametr vyresen')
        x3 = 1;
    continue
    end

if pomer_x3d < 0.9

x3d = x3d + ( x3d*0.0025);

elseif pomer_x3d > 1.1

x3d = x3d - ( x3d*0.0025);
end

end
```

```
end

if x3 > 0
    if x5 < 1

        if pomer_t2d > 0.9 & pomer_t2d < 1.1
            if t1d > t2d
                Ht2d(1,poc_iteraci_d) = t2d ;
                disp('Ctvrty parametr vyresen')
            end
            x5 = 1;
            continue
        end

        if pomer_t2d > 1.1

t2d = t2d - ( t2d*0.025 );

elseif pomer_t2d < 0.9

t2d = t2d + ( t2d*0.025);
end

end

end

if x5 > 0
    if x6 < 1

        if pomer_t3d > 0.9 & pomer_t3d < 1.1
            if t2d > t3d
                Ht3d(1,poc_iteraci_d) = t3d;
                disp('Paty parametr vyresen')
            end
            x6 = 1;
            continue
        end

        if pomer_t3d > 1.1

t3d = t3d - ( t3d*0.025);

elseif pomer_t3d < 0.9

t3d = t3d + ( t3d*0.025 );
end

end

end

% Zapsani pomeru vzajemnych velikosti v procentech
r11(1,poc_iteraci_d) = pomer_x1d;
r12(1,poc_iteraci_d) = pomer_x2d;
r13(1,poc_iteraci_d) = pomer_x3d;
r14(1,poc_iteraci_d) = pomer_t1d;
```

```
    r15(1,poc_iteraci_d) = pomer_t2d;
    r16(1,poc_iteraci_d) = pomer_t3d;
    %r17(1,poc_iteraci_d) = pomer_R;

    end
end

disp('Vypocetene hodnoty velicin pro podelnou osu ')
X1d
L1d(1,frek) = X1d/(2*pi*f1(1,frek))
X2d
L2d(1,frek) = X2d/(2*pi*f1(1,frek))
X3d
L3d(1,frek) = X3d/(2*pi*f1(1,frek))
T1d
T2d
T3d
Rd1(1,frek) = abs(rd1)
Rd2(1,frek) = abs(rd2)
Lfd = xfd/(2*pi*f1(1,frek))

% Vypocet pricne osy

% Inicializacni hodnoty pro vypocet
Xaq = abs((2*pi*f1(1,frek)*Laq));
xq = abs(Xl + Xaq);
%xq = Xl + Xad;
Lq = xq/(2*pi*frek);
x1q = 0.055*2*pi*f1(1,frek);
x2q = 0.005*2*pi*f1(1,frek);
x3q = 0.0055*2*pi*f1(1,frek);
t1q = 0.05*4;
t2q = 0.015*2;
t3q = 0.005;
rq1 = 0;
rq2 = 0;
rq3 = 0;
Xc1 = 0;
Xc2 = 0;

Xq = 0;
X1q = 0;
X2q = 0;
X3q = 0;
T1q = 0;
T2q = 0;
T3q = 0;

q1 = 0;
q2 = 0;
q3 = 0;
q4 = 0;
q5 = 0;
q6 = 0;
```

```

%Ladici cyklus
for poc_iteraci_q = 1:1:1000

    % Rovnice pro lazene parametry
    xq1 = (((xq - Xl)*(x1q - Xl))/(xq - x1q));
    xq2 = (((x1q - Xl)*(x2q - Xl))/(x1q - x2q));
    xq3 = (((x2q - Xl)*(x3q - Xl))/(x2q - x3q));
    rq1 = (1/(2*pi*f1(1,frek)*t1q))*(x1q/xq)*(((xq - Xl)^2)/(xq - x1q));
    rq2 = (1/(2*pi*f1(1,frek)*t2q))*(x2q/x1q)*(((x1q - Xl)^2)/(x1q - x2q));
    rq3 = (1/(2*pi*f1(1,frek)*t3q))*(x3q/x2q)*(((x2q - Xl)^2)/(x2q - x3q));

    % Korekčni rovnice
    xq = Xl + Xaq;
    X1q = Xl + ((Xaq * xq1)/(Xaq + xq1));
    X2q = Xl + ((Xaq*((xq1 * xq2)/(xq1+xq2)))/(Xaq+((xq1 *
xq2)/(xq1+xq2))));
    X3q = Xl + ((Xaq*((xq1 * ((xq2*xq3)/(xq2 + xq3)))/(xq1+((xq2*xq3)/(xq2
+ xq3)))))/(Xaq+((xq1 * xq2)/(xq1+xq2))));

    T1q = (((Xl*Xaq)/(Xl + Xaq)) + xq1)/(2*pi*f1(1,frek)*rq1);
    T2q = (((Xl*((Xaq*xq1)/(Xaq+xq1)))/(Xl + ((Xaq*xq1)/(Xaq+xq1)))) +
xq2)/(2*pi*f1(1,frek)*rq2);
    T3q = (((Xl*((Xaq*((xq1*xq2)/(xq1 + xq2)))/(Xaq + ((xq1*xq2)/(xq1 +
xq2)))))/(Xl+((Xaq*((xq1*xq2)/(xq1 + xq2)))/(Xaq + ((xq1*xq2)/(xq1 +
xq2)))))))+xq3)/(2*pi*f1(1,frek)*rq3);

    % Pomerna velikost obou parametru vyjadrena v procentech [%]
    pomer_x1q = (x1q/X1q);
    pomer_x2q = (x2q/X2q);
    pomer_x3q = (x3q/X3q);
    pomer_t1q = (t1q/T1q);
    pomer_t2q = (t2q/T2q);
    pomer_t3q = (t3q/T3q);

    % Podminka pro vypocet
    if q1 < 1
        % Podminka spravnosti velikosti prvku
        if pomer_x1q > 0.9 & pomer_x1q < 1.1
            Hx1q(1,poc_iteraci_q) = x1q;
            disp('Prvni parametr vyresen')
            q1 = 1;
            continue
        end
    % Ladici algoritmus pri prekroceni mezi pomeru prvku
    if pomer_x1q > 1.1

        x1q = x1q - (x1q*0.000015);

        elseif pomer_x1q < 0.9

            x1q = x1q + (x1q*0.000015);

    end
end

```

```
end

if q1 > 0
if q2 < 1

    if pomer_x2q > 0.9 & pomer_x2q < 1.1
    if x2q < x1q
        Hx2q(1,poc_iteraci_q) = x2q;
        disp('Druhý parametr vyresen')
    q2 = 1;
continue
end
end

if pomer_x2q > 1.1

x2q = x2q - ( x2q*0.0025);

elseif pomer_x2q < 0.9

x2q = x2q + ( x2q*0.0025);

end
end

if q2 > 0
    if q3 < 1

        if pomer_x3q > 0.9 & pomer_x3q < 1.1

            Hx3q(1,poc_iteraci_q) = x3q ;
            disp('Tretí parametr vyresen')
            q3 = 1;
continue
end

if pomer_x3q < 0.95

x3q = x3q + ( x3q*0.00025);

elseif pomer_x3d > 1.1

x3q = x3q - ( x3q*0.00025);
end
end

if q3 > 0
    if q4 < 1

        if pomer_t1q > 0.9 & pomer_t1q < 1.1
            Ht1q(1,poc_iteraci_q) = t1q ;
```

```
        disp('Ctvrty parametr vyresen')
        q4 = 1;
    continue
    end

    if pomer_t1q > 1.1
        t1q = t1q - ( t1q*0.025);
    elseif pomer_t1q < 0.9
        t1q = t1q + ( t1q*0.025);
    end
    end
    end

    if q4 > 0
        if q5 < 1

            if pomer_t2q > 0.9 & pomer_t2q < 1.1
                if t2q < t1q
                    Ht2q(1,poc_iteraci_q) = t2q ;
                    disp('Paty parametr vyresen')
                end
            end
            q5 = 1;
        continue
        end
            end
            if pomer_t2q > 1.1

                t2q = t2q - ( t2q*0.0025 );
            elseif pomer_t2q < 0.9
                t2q = t2q + ( t2q*0.025);
            end

        end
        end

        if q5 > 0
            if q6 < 1

                if pomer_t3q > 0.95 & pomer_t3q < 1.05
                    if t2q > t3q
                        Ht3q(1,poc_iteraci_q) = t3q;
                        disp('Sesty parametr vyresen')
                    end
                end
                q6 = 1;
            continue
            end
            end
        end
    end
```

```
    if pomer_t3q > 1.1

        t3q = t3q - ( t3q*0.025);

    elseif pomer_t3q < 0.9

        t3q = t3q + ( t3q*0.025 );
    end

end

end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Prubehy hodnot pocitanych velicin vuci korekci z druhe sady rovnic
    q11(1,poc_iteraci_q) = pomer_x1q;
    q12(1,poc_iteraci_q) = pomer_x2q;
    q13(1,poc_iteraci_q) = pomer_x3q;
    q14(1,poc_iteraci_q) = pomer_t1q;
    q15(1,poc_iteraci_q) = pomer_t2q;
    q16(1,poc_iteraci_q) = pomer_t3q;
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

end

disp('Vypocetene hodnoty velicin pro pricnou osu ')
X1q
L1q(1,frek) = X1q/(2*pi*f1(1,frek))
X2q
L2q(1,frek) = X2q/(2*pi*f1(1,frek))
X3q
L3q(1,frek) = X3q/(2*pi*f1(1,frek))
T1q
T2q
T3q
Rq1(1,frek) = abs(rq1)
Rq2(1,frek) = abs(rq2)
Rq3(1,frek) = abs(rq3)

end
```