

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA ELEKTROMECHANIKY A VÝKONOVÉ ELEKTRONIKY

Diplomová práce

Stanovení parametrů synchronního stroje

Bc. Jakub Štěpán

2015

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 Kůs, 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 uvedeném v obsahu diplomové práce.

Klíčová slova

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

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.

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.

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně pod vedením určeného vedoucího diplomové práce a 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.

Na diplomové práci jsem dle zadání spolupracoval se zpracovatelem dat z praktického měření a tím jsem získal některá základní data a parametry pro vstupy v mé diplomové práci.

.....

Poděkování

Úvodem mé diplomové práce pokládám za povinnost poděkovat všem vyučujícím Západočeské Univerzity v Plzni na Fakultě elektrotechnické, kteří mě po teoretické stránce připravili pro zdárné zvládnutí úkolu této diplomové práce. Zvláště bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce panu Doc. Ing. Bohumilovi Skalovi, Ph.D. za cenné rady, obětovaný čas a připomínky i metodického vedení práce.

Obsah

Úvod.....	- 1 -
Metoda stanovení parametrů při zkoušce klidové frekvenční odezvy stroje	- 3 -
Důvody modelování synchronního stroje	- 5 -
Vlastní popis metody za klidu stroje	- 7 -
Metodika výpočtů a algoritmů	- 14 -
Simulace v programu Matlab	- 23 -
Srovnání metody náhlého zkratu a klidové frekvenční metody	- 33 -
Závěr.....	- 41 -
Přílohy	I
Seznam zkratek	V
Zdroje	VIII

Úvod

Synchronní motory byly dříve využívány hlavně jako generátory a jako kompenzátory jalové energie v sítích průmyslových závodů využívajících elektrických motorů k výrobě produktů. V dnešní době je trend vracet se k těmto motorům pro provoz v motorickém režimu s tím rozdílem, že rotor stroje je tvořen permanentními magnety. Toto provedení je možné vidět například na podvozcích tramvají vyráběných ve Škoda Transportation a.s. Pro takto použité motory by se program vytvořený v rámci této diplomové práce musel upravit, dle náhradních schémat použitelných pro tento typ motorů.

Postupů proměření 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.

Téma této diplomové práce jsem si zvolil i s ohledem na zaměření mého studia. Metoda, jejíž téma je obsaženo v této práci, je relativně nová v rámci evropského kontinentu, proto ještě nebyla dostatečně zpracována a připravena pro průmyslové využití v obecném rozsahu.

Téma práce je rozděleno mezi 2 studenty, kdy část zaměřenou na praktické měření motoru, tedy získání základních dat pro mé vypracování, byla určena druhému studentovi. Cílem mé diplomové práce je zpracování 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].

Náplní mé diplomové práce je vytvoření programu zpracovávající naměřené hodnoty při testu klidové frekvenční odezvy synchronních strojů a následné řešení, jež výsledkem jsou základní hodnoty indukčností a odporů vinutí statoru a rotoru.

Vytváření algoritmů programu bylo náročné, ale ne nemožné. Jejich úpravy budou tématem dalších úprav pro minimalizaci chyby výpočtů a tedy i výsledků. Jedná se o přizpůsobení každé firmy pro své účely, jelikož každý konstruktér uvažuje výpočet s rozdílnou tolerancí intervalu parametrů jednotlivých prvků stroje. V mém programu jsem se

snažil, aby chyba se pohybovala v rámci maximálně jednotek procent, což je pro školní účely dostačující. To však neznamená jako dostačující předpoklad pro využití v komerční sféře průmyslové výroby.

V práci bude nejprve popsána samotná podoba elektrotechnické normy IEEE Guide for Test Procedures for Synchronous Machines [1]. Tato část bude zaměřena na jednotlivé měřené veličiny a jejich vlastní popis, rozměry a vzorec výpočtu s využitím naměřených dat.

Druhá část se týká návrhu výpočetního algoritmu a jeho implementace na danou problematiku. V textu je možno vidět i příklady grafických znázornění výsledných hodnot pro různé veličiny, grafické znázornění algoritmu a mnoho dalšího.

Třetí kapitola pojednává o simulaci programu a výpočtu reálných parametrů stroje z dat získaných měřením. Využití dat pro výpočet parametrů je následováno otestováním správnosti a určení výpočetní odchylky.

Poslední část práce pojednává o porovnání metody náhlého zkratu s klidovou frekvenční odezvou stroje. Je to srovnání postupů, jejichž uvedení do průmyslové sféry dělí časová prodleva několika generací. Nicméně technologický pokrok se dnes rozvíjí každým dnem a je potřeba neustále zdokonalovat měřicí techniky, přístroje a koneckonců i výsledné odchylky, které často rozhodují velmi významně o použití určité technologie pro aplikaci v provozu ve firmách, zdravotnických zařízeních, domácnostech a mnoha dalších prostředích.

Metoda stanovení parametrů při zkoušce klidové frekvenční odezvy stroje

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 ose přímé.

Rovnice popisující základní teorii frekvenční odezvy[3]:

$$\Delta\psi_d(s) = G(s)\Delta e_{fd}(s) - L_d(s) \times \Delta i_d(s) \quad (1)$$

$$\Delta\psi_q(s) = G(s)\Delta e_{fd}(s) - L_q(s) \times \Delta i_q(s) \quad (2)$$

kdy ψ_d a ψ_q jsou magnetické toky, 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 v 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.

Před vlastním popisem měřicí metody je potřeba pochopit vlastní problematiku synchronních strojů. Synchronní motor je elektrický pohon využívající pro chod výhod střídavého napětí a proudu.

Konstrukce pohonu jsou velice podobné s asynchronními a stejnosměrnými stroji. Základní části jsou stator, rotor a komutátor. Stator je nepohyblivá část pevně usazená na kostře stroje. Je tvořen vinutím o daném počtu drážek, paralelních větví a vrstev izolovaných vodičů v drážce. Z volby rozměrů měděných cívek jednotlivých fází určujeme proud nutný k nasycení vinutí a k vytvoření točivého magnetického pole nutného pro správný chod motoru.

Aby bylo možné vytvořit točivé magnetické pole harmonického 3-fázového symetrického příkonu, je nutné splnit několik základních podmínek. Je nutné, aby všechny fáze byly prostorově posunuté o $120^\circ/p$, kdy p je počet pól-párů stroje, a elektricky posunuté taktéž o 120° . Další podmínka se týká souměrného napájení, jelikož při nesouměrnosti by hrozilo, že stroj začne vibrovat a tím se naruší mechanická soudržnost kostry a celého obalu.

Při dalším pokračování by nastala situace, kdy by vinutí bylo doslova vytrženo z drážek a došlo by k totální destrukci motoru vlivem přitažení cívek statoru na rotor, což by poškodilo izolaci veškerého vinutí následováno vyzkratováním celého stroje. Z těchto důvodů se na vstupních svorkách (dnes je to celkem pravidlem) připojují přepětěvé a nadproudové ochrany.

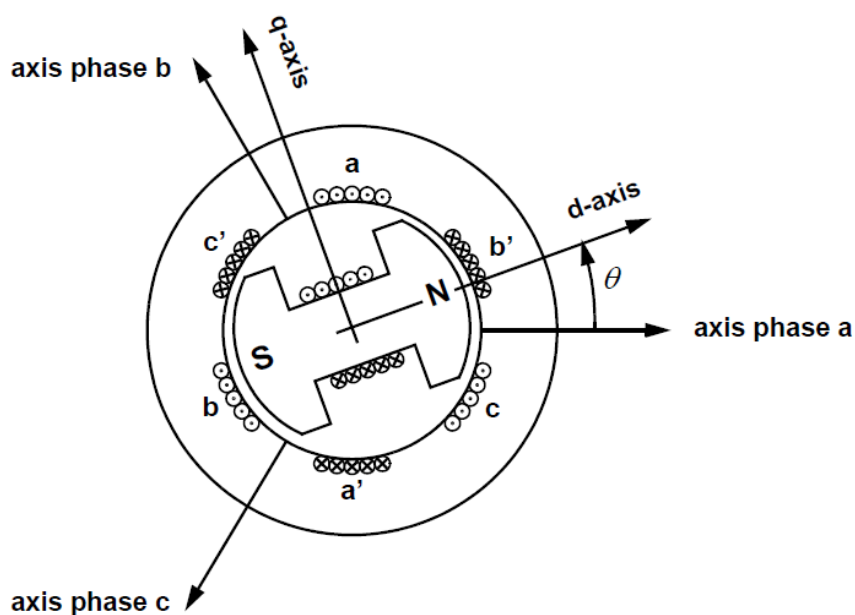
Přepětěvých ochran je dneska celá řada. Patří mezi ně například rychlozkratovače, které v případě poruchy vyzkratují přívod, vypínač odepne obvod. Rychlovypínače použitelné ve stejnosměrných obvodech, vybavují do několika milisekund, to znamená nižší napětěvé namáhání. Pro omezení nadproudů a tím zvýšené mechanické namáhání vyššími magnetickými silami, které vycházejí ze vztahu, označovaný též jako „Bilův zákon“:

$$F = BIl [N] \quad (3)$$

se použijí rychlé, až velmi rychlé diody nebo jističe. Možné jsou i kombinace obou zmíněných variant.

Regulací vstupního proudu a napětí je umožněno pracovat jak s otáčkami pohonu, tak s výsledným momentem, respektive využitím snižovacích pulzních a frekvenčních měničů je umožněna regulace otáček a momentu. Při změně frekvence se změna projeví na rychlosti otáčení točivého magnetického pole vyplývající ze vztahu:

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f [rad \cdot s^{-1}] \quad (4)$$



Obr.1: Schematické znázornění os fází oproti příčné a podélné ose synchronního motoru [1].

Při realizaci takovéto regulace je nutné brát na zřetel podmínku U/f . V této podmínce je zahrnuta závislost budícího napětí na frekvenci ve vinutí motoru. Při nesplnění podmínky se motor odbuzuje, je to důsledek ochrany izolace na vinutí, které je použitelné pouze do určité teploty dané výrobcem.

Synchronní motory pracující v režimu generátor lze dále rozdělit dle toho, jakou rychlostí se při jmenovitém stavu otáčí rotor. O všem zde rozhoduje místo použití, respektive jaké médium pohání rotor stroje. Je mnoho způsobů využití těchto generátorů elektrické energie. Mezi nejčastější možností nasazení nalezneme synchronní stroje v elektrárnách a to jak vodních, tepelných, větrných, či speciálních, myšleno v provedení diesel-agregátů pohánějících velká vozidla přepravující velmi těžké náklady. Pod tímto si můžeme představit velké nákladní vozy v amerických povrchových dolech či trolejbusy použité v americkém městě Boston, ve vodních elektrárnách vesměs zabudovaných v útrokách vodních přehrad a hrází. Tyto generátory, nazýváme též jako hydrogenerátory, jsou pomaloběžné a jejich rychlost otáčení se pohybuje v řádech desítek až stovek otáček za sekundu. Oproti tomu turbogenerátory používané v jaderných a tepelných elektrárnách jsou rychloběžné. Z důvodu vysokých otáček a z toho vycházejících odstředivých sil se rotory prodlužují a průměrem by neměly překročit jeden metr.

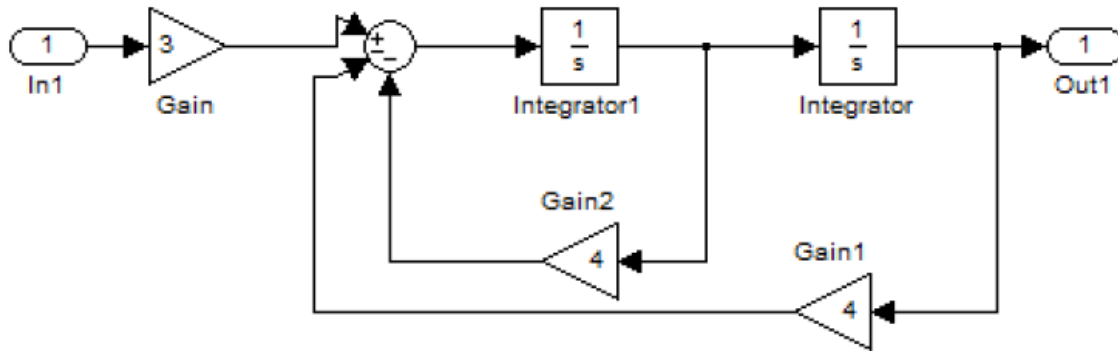
Důvody modelování synchronního stroje

Modelování elektrických pohonů a všeobecně navržených, či navrhovaných výrobků je dnes již nedílnou součástí praxe. Jedinečná přednost matematických modelů stroje je možnost ověření si správnost návrhů a otestování mezních parametrů stroje bez nebezpečí úrazu obsluhy, zkoušky a finančních ztrát zapříčiněné poškozením, zničením samotného výrobku. S tímto samozřejmě souvisí, že výrobek lze takto otestovat ještě před samotnou výrobou, což dává velký prostor konstruktérovi manipulovat s parametry a doladřovat návrh a ochránit pak samotný výrobek před nežádoucími stavy, které by mohly vést i k samotné destrukci finálního výrobku nasazeného do pracovního procesu.

V dnešní době je mnoho vývojových programů, kde lze vytvářet matematické modely, například modely elektrických pohonů vycházejících ze základních diferenciálních rovnic.

Jako příklad zde uvádím ukázkou metody snižování derivace a to rovnicí :

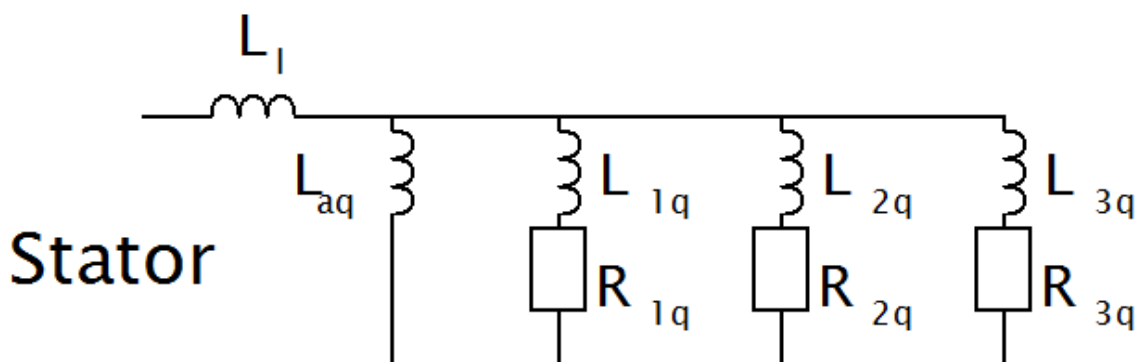
$$1 \cdot y'' + 4 \cdot y' + 4 \cdot y = 3 \cdot u$$



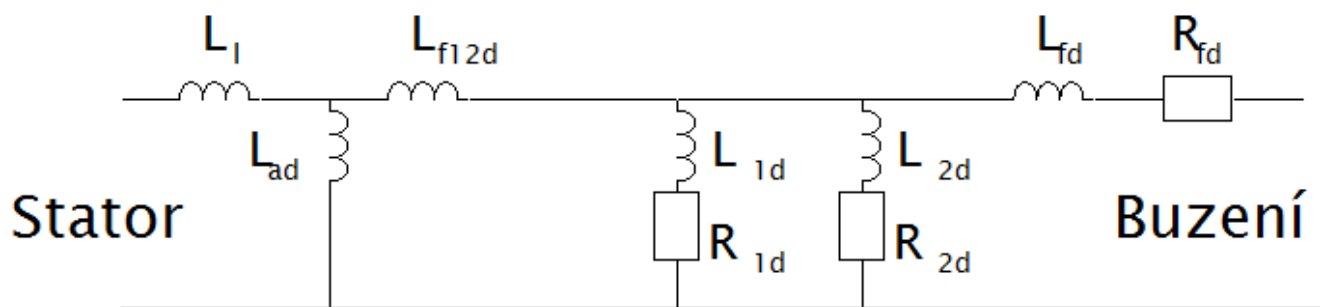
Obr.2: Znáznornění metody snižování řádu derivace

Toto simulační schéma jsem vytvořil v prostředí programu Matlab Simulink. Jedná se o nejjednodušší znázornění, které Simulink nabízí. S takovýmito modely lze simulovat chování stroje při proměnné zátěži, či náhlé změně napájení až po ověření přirozených charakteristik motoru.

Model stroje pro testování klidové frekvenční odezvy je tedy možný vytvořit mnoha způsoby. V našem případě to bude o sepsání skriptu, opět v programu Matlab, do kterého zahrneme náhradní schéma pro výpočet.



Obr.3: Náhradní schéma synchronního motoru pro příčný směr



Obr.4: Náhradní schéma synchronního motoru v podélném směru.

Z obrázků je vidět, že při výpočtech je nutno zahrnout do celkového výsledku 2 různá náhradní schémata. Toto se projeví při použití mého výpočetního programu jako sekundární výpočet příčného, či podélného směru po zadání příslušných naměřených hodnot. Tento postup je možný, jelikož počet a druh prvků náhradního schématu je totožný pro oba případy. Díky těmto zjednodušeným předpokladům je možno otestovat parametry synchronního stroje libovolného výkonu za podmínky, že jeho náhradní schémata jsou totožná jako je výše uvedené znázornění.

Vlastní popis metody za klidu stroje

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

Pro základní prezentaci indukčnosti v motoru lze užít jednoduchý vztah[3]:

$$L_{fd} = L_{f12d} - L_{ad} \quad (5)$$

kdy:

L_{f12d} je vzájemná indukčnost mezi státorem a rotorem, případně rotorovou klecí nakrátko, používanou jako tlumící vinutí a na rozběh z nulových otáček.

L_{fd} je indukčnost budícího vinutí působící na 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.[3]

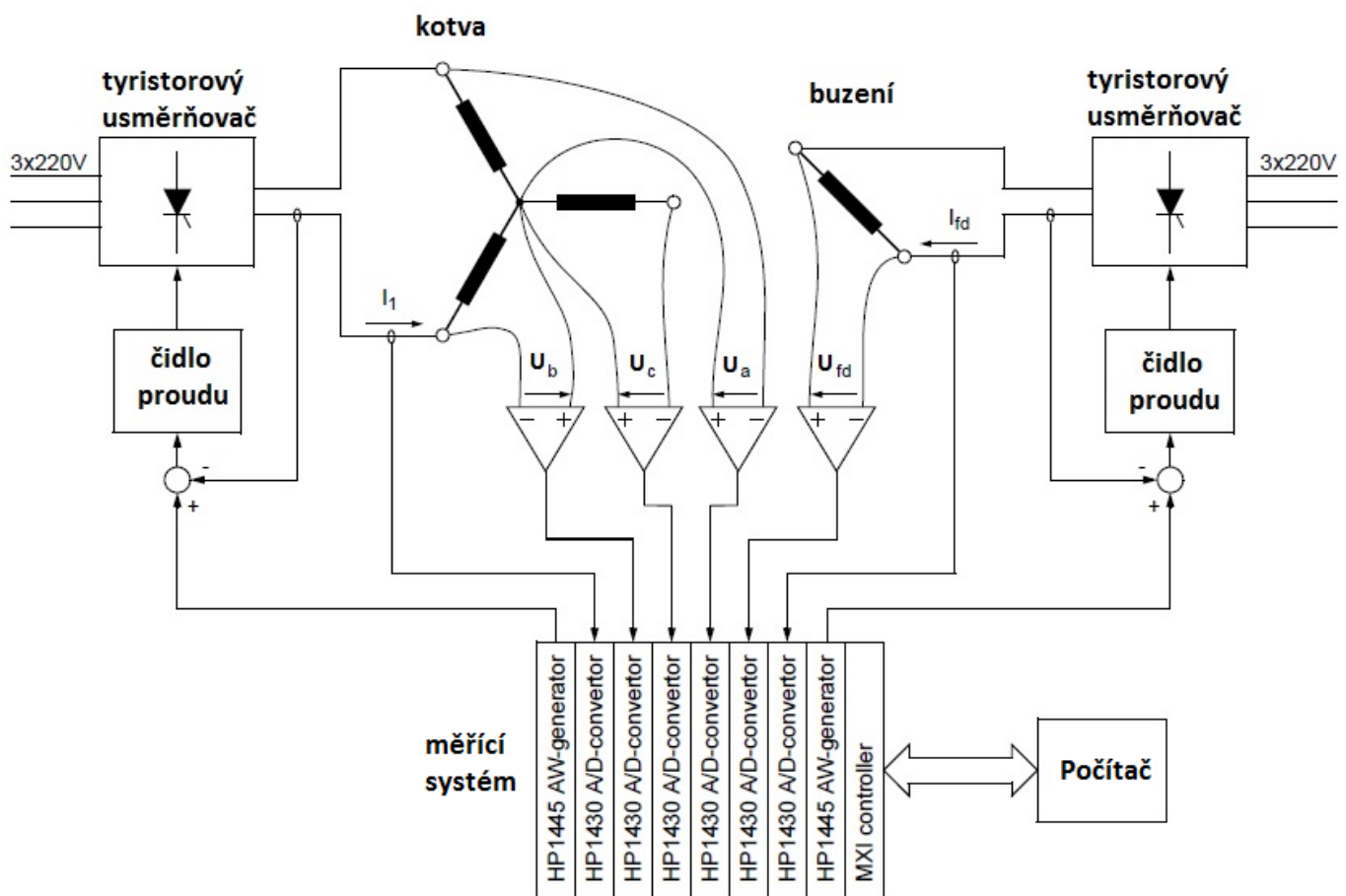
V případě, že pohon pracuje v režimu generátoru je hodnota L_{mfd} je vzájemná indukčnost mezi budícím vinutím a obvodem rotoru s tlumícími tyčemi kolem rotoru. L_{mfd} je výrazně větší než L_{ad} , a tak je pak celková indukčnost L_{fd} kladná. Pokud bychom tyto vlastnosti zjišťovali i u hydrogenerátorů, zjistili bychom, že jsou všechny hodnoty opačné, než u zbytku generátorů. Pro účely stanovení celkových parametrů stroje je nutno stanovit jednu velikost jak indukčností, které se s frekvencí mění, tak celkových odporů.

Pro samotné ověření parametrů stroje je důležité nalézt takové náhradní schéma, které by obsahovalo všechny potřebné veličiny a vztahy v dané ose obvodu. Náhradní schémata pro příčnou a podélnou osu jsou uvedena výše v obrázcích 3 a 4. Existuje velká spousta náhradních schémat, zaleží na tom, co jsme ochotni zanedbat pro zjednodušení výpočtů pro hledanou hodnotu.

Zaprvé celý motor odpojíme od napájení, což znamená odpojení svorek vinutí statoru a odtahování kartáčů na rotoru. Zadruhé zajistit, 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. Tato opatření je realizováno externím chlazením a nejčastějším chladivem je voda, tekutý dusík, olej či jiné chladivo. Je však zapotřebí, aby chladivo cirkulovala z důvodu zachování izolačních schopností izolace na vinutí. Dále je nutné zvolit si takový generátor vstupní energie, aby vydržel proudové, napěťové a tepelné namáhání.

Za měřicí techniku používanou pro měření magnetického a relativního fázového posunu je používáno osciloskopů a především spektrální analyzátoři. Při použití dvoukanalového spektrálního analyzátoři je možné měřit najednou magnetický a relativní fázový posuv. Tyto spektrální analyzátoři by měly být schopni vykreslit frekvenční křivky měřících komponentů i přes často neideální průběhy. Zároveň jejich citlivost 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 posun již při odchylce desetiny stupně při různých vstupních napětích.[3]

Při samotném měření je důležité respektovat několik zásad. Zprvė proud, který budí vinutí by neměl přesáhnout 1% ze jmenovitých hodnot. Důvod je praktický, při tomto proudu nedochází k ohřevu jak samotného vinutí, tak ostatních kovových částí motoru, jako je tlumící vinutí, kostra, konstrukční prvky jako je např. tělo rotoru, ložiska, hřídel apod. Při měření impedance je nutné brát na zřetel, že na začátku je činný odpor výrazně vyšší než reaktance cívek, což je způsobeno malou hodnotou $\omega = 2\pi f$, začátek měření lze tedy brát za minimum a konec za maximum, kdy frekvence by se měla zastavit na 200 Hz.



Obr.5: Schéma zapojení čidel na rotoru a statoru pro podélnou a příčnou osu [2].

Pro velmi přesné měření se proměřují jednotlivé části vinutí zvlášť. Dále měřicí čidla proudu by měla být připevněna přímo na izolovanou větev vinutí statoru, rotoru, či kompenzačního vinutí. Při velké chybě čidla, lze kontakt vylepšit pomazáním místa olejem, či jiným mazadlem. Dále čidla proudu nesmí zvyšovat impedanci a ohřev měřené větve.

Mezi měřené parametry se řadí[3]:

$$Z_d(s) = - \left. \frac{\Delta e_d(s)}{\Delta i_d(s)} \right|_{\Delta e_{fd}=0} [\Omega] \quad (6)$$

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

$$Z_d = R_a + j\omega L_d \quad (7)$$

Tato hodnota je platná při vinutí rotoru nakrátko, jak je to vyjádřeno ve výrazu (17).

Výpočet příčné impedance Z_q :

$$Z_q(s) = - \left. \frac{\Delta e_q(s)}{\Delta i_q(s)} \right|_{\Delta e_{fd}=0} [\Omega] \quad (8)$$

Přenosová veličina $G(s)$:

$$G(s) = \left. \frac{\Delta e_d(s)}{s\Delta e_{fd}(s)} \right|_{\Delta e_{fd}=0} \quad (9)$$

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

$$sG(s) = \left. \frac{\Delta i_{fd}(s)}{\Delta i_d(s)} \right|_{\Delta i_{fd}=0} \quad (10)$$

Ve výrazu (21) je podmínka, že rotorové vinutí musí být zapojené naprázdno.

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

$$Z_{af0} = \left. \frac{\Delta e_{fd}(s)}{\Delta i_d(s)} \right|_{\Delta i_{fd}=0} [\Omega] \quad (11)$$

Poslední impedance je nazývána přenosovou maticí vyjadřující přenos energie z pole do rotoru:

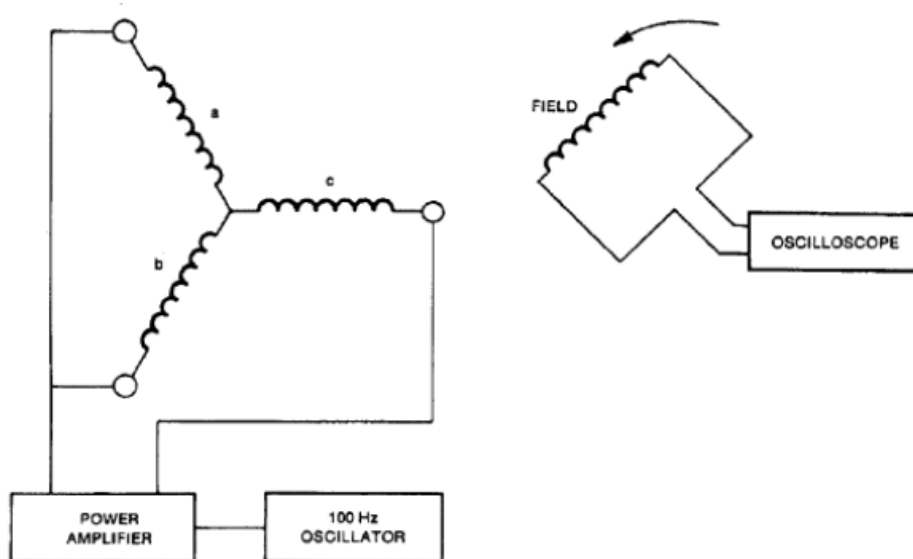
$$Z_{fao}(s) = \left. \frac{\Delta e_d(s)}{\Delta i_{fd}(s)} \right|_{\Delta i_d=0} [\Omega] \quad (12)$$

V rovnicích je odměřováno několik parametrů:

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

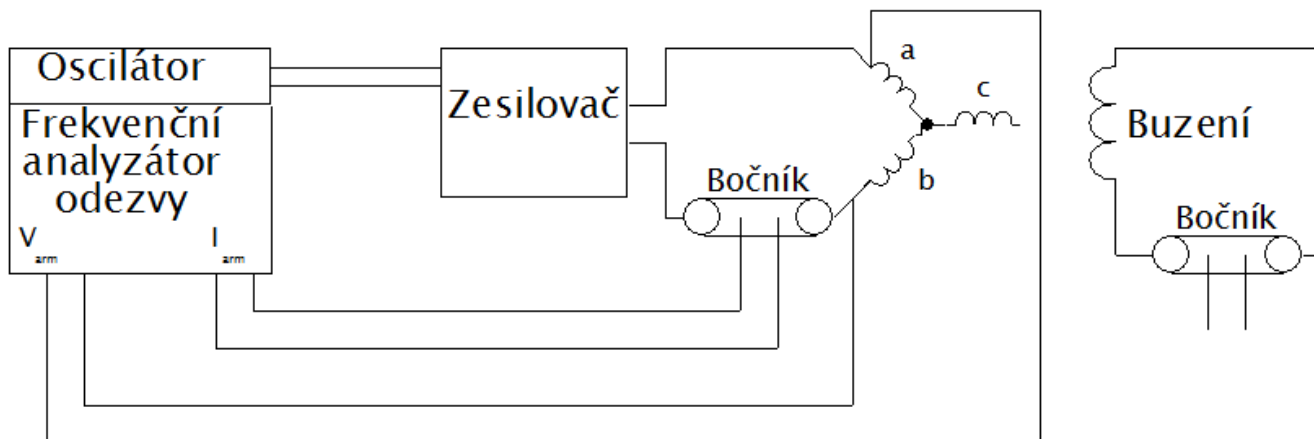
$\Delta i_{d,q,fd} \dots\dots$ proud v podélném, příčném směru a indukovaný v rotoru

Maximum frekvenčního rozsahu by se mělo pohybovat v rozmezí dvou až třinásobku jmenovité frekvence stroje.[3] Tento rozsah ještě dále dělíme do tzv. dekád, což 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 přístrojů.

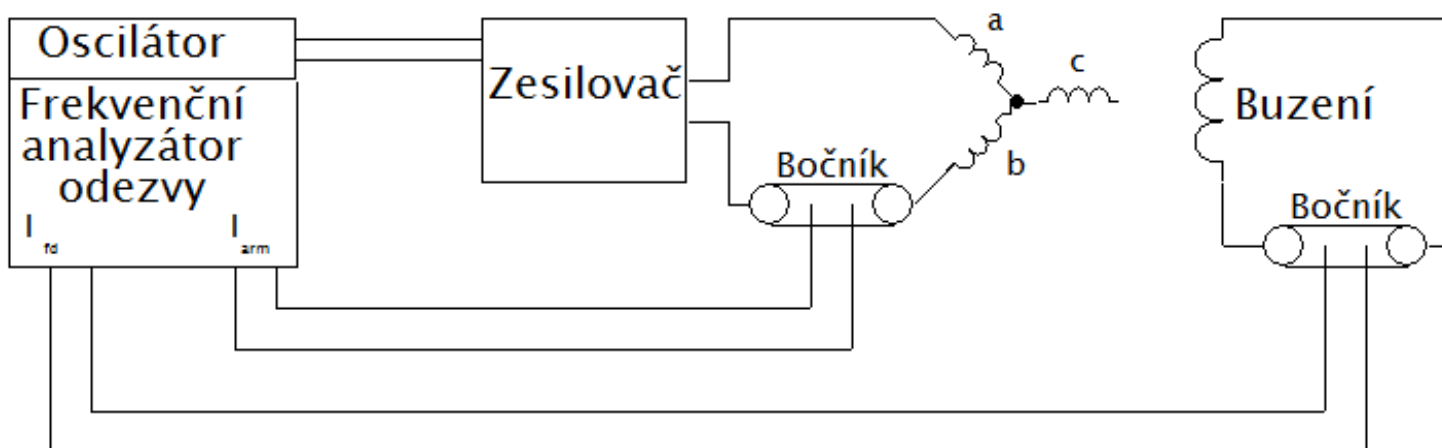


Obr.6: Znárodnění měřících přístrojů pro přizpůsobení stroje pro měření podélné osy.[3]

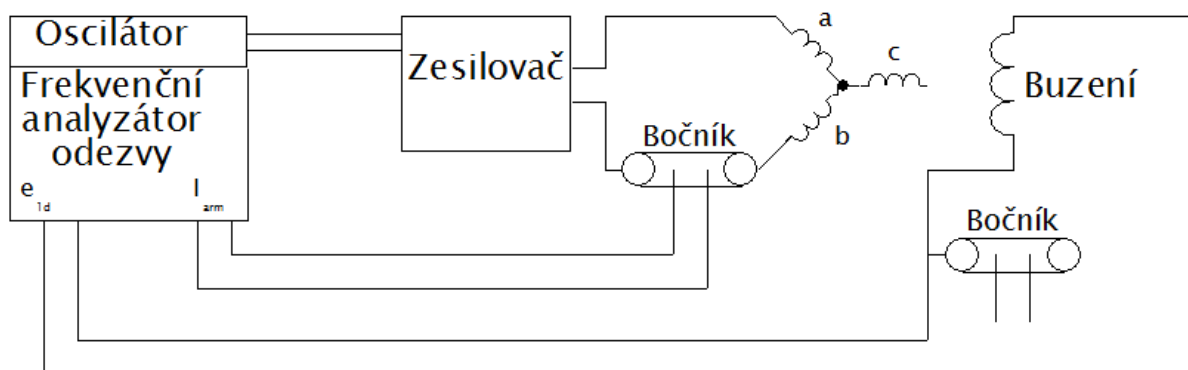
Pro přizpůsobení stroje a měřících přístrojů zapojíme do vinutí rotoru frekvenční generátor, který vytváří harmonický signál o frekvenci 100 Hz, a výkonový zesilovač. Poté pomalu otáčíme rotorem, dokud se na osciloskopu neobjeví nulové napětí. Tímto postupem se magnetické napětí ve větvích a a b vyrovná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



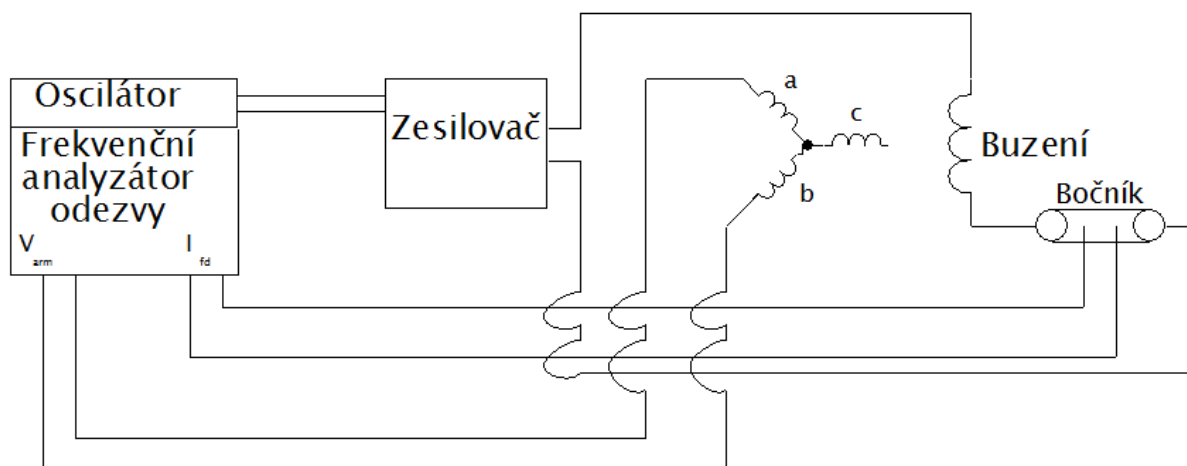
Obr.7: Schéma zapojení pro měření $Z_d(s)$ v podélné ose. [3]



Obr.8: Schéma zapojení pro měření i_{fd}/i_d . [3]



Obr.9: Schéma zapojení pro měření e_{1d}/i_{arm} . [3]



Obr.10: Schéma zapojení pro měření e_d/i_{fd} . [3]

Pro vyzkratování vinutí na rotoru je nutné se vypořádat s kartáči 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 dopočíst činný odpor kotvy [3]:

$$Z_{arm}(s) = \frac{\Delta v_{arm}(s)}{\Delta i_{arm}(s)} \quad [\Omega] \quad (13)$$

Odpor je měřen pro frekvence od 0,001 do 200 Hz. Další hodnoty jsou dopočteny dle následujících tvarů [3]:

$$Z_d(s) = \frac{1}{2} Z_{arm}(s) \quad [\Omega] \quad (14)$$

Z tohoto vztahu je možné zjistit odpor vinutí statoru [3]:

$$R_a = \frac{1}{2} \{ \lim_{s \rightarrow 0} [Z_{arm}(s)] \} \quad [\Omega] \quad (15)$$

Po zvyšování frekvence se v impedanci začíná projevovat indukčnost vinutí. Tento fakt je velmi pěkně vidět ve vzorci [3]:

$$L_d(s) = \frac{Z_d(s) - R_a}{s} \quad [H] \quad (16)$$

Zároveň jak bylo řečeno při těchto měření se zjišťuje i přenosový parametr $sG(s)$ [3]:

$$sG(s) = \frac{\Delta i_{fd}(s)}{\Delta i_d} = \sqrt{\frac{3}{4} \frac{\Delta i_{fd}(s)}{\Delta i_{arm}(s)}} \quad (17)$$

Schéma zapojení měřících přístrojů je znázorněno dříve na uvedených obrázcích, kdy se proměřují podíly proudů v kotvě a energie indukovaného proudu. Další parametr, kterým je Z_{af0} je jednoduše dopočten z naměřených hodnot.

Při měření příčné osy je potřeba upravit schéma zapojení pro měření podélné osy a to v pár krocích. Zaprvé odstraníme zkratování pro měření proudů. Zadruhé oscilátorem nastavíme frekvenci 100 Hz a natáčíme rotor do té polohy, kdy se na obrazovce osciloskopu objeví 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° , při 4 pólech je to jen 45° . Měření parametrů a pozdější výpočet je totožný pro podélnou osu, kdy zjišťujeme pouze 3 parametry a to Z_q R_a a L_q . [3]

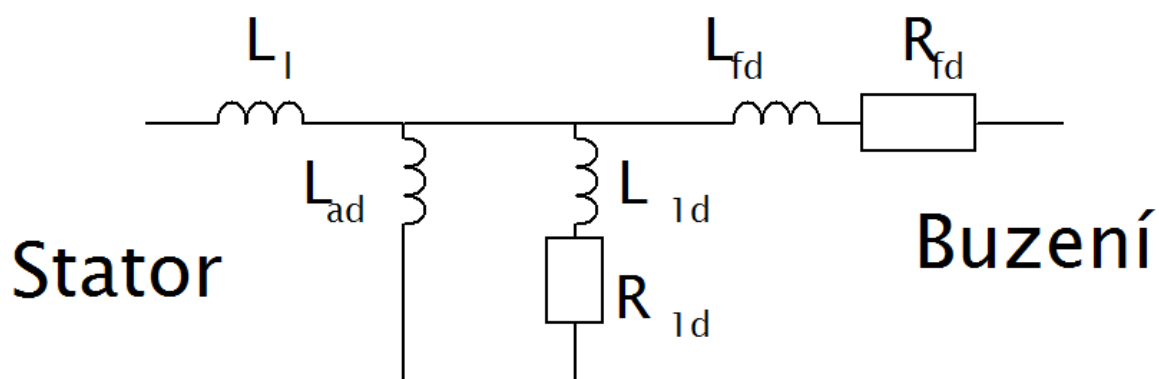
Metodika výpočtů a algoritmů

Před samotným začátkem návrhu algoritmů je nutné určit si metody řešení náhradních schémat příčné a podélné osy. Další kroky řešení obnášely sepsání rovnic, které se vztahují pro daná schémata. Pro vypracování diplomové práce jsem zvolil náhradní schémata o šesti prvcích, ze kterých byly dva činné odpory a zbylé čtyři představovaly indukčnosti. Pro řešení těchto obvodů existuje mnoho metod výpočtu. Mezi základní se řadí Kirhoffovy zákony, uzlová napětí a smyčkové proudy. Změřená data avšak nabízejí hodnoty výstupní příčné a podélné osy. Je nutno zpětně dopočítávat všechny členy náhradního obvodu.

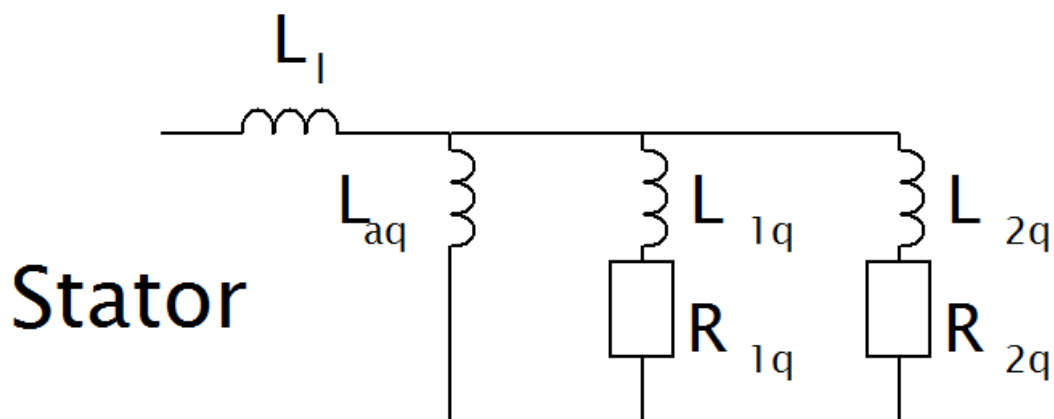
Existuje mnoho metod stanovení parametrů paralelních kombinací prvků. Pro řešení diplomové práce bylo vybráno náhradní schéma o sudém počtu prvků obvodu. Tento postup vede ke zjednodušení předpokladů dynamických vlastností stroje a ke vzniku nepřesností výpočtů. Tímto postupem budou vyřešeny hlavní parametry jak příčné, tak podélné osy. Po určení velikosti těchto prvků zvláště indukčností je nadále možné odvození dynamických vlastností celého stroje. Určující vlastností přechodových charakteristik dynamiky jsou časové konstanty přechodových dějů jednotlivých indukčností. Časové konstanty je možné určit numericky řešením lineárních diferenciálních rovnic obvodů. Numerický postup avšak naznačuje, že výsledné parametry mohou obsahovat chyby výpočtů dané zaokrouhlováním či zanedbáním vzájemných indukčností v celém stroji. Tyto jevy je možné předpokládat pro každou cívku vinutí jak statoru, tak i rotoru. Tato myšlenka je podložena mnoha pokusy ve

školních laboratořích při experimentech nízkofrekvenčního rušení, kde bylo dokázáno vzájemné působení cívek. Tento jev vysvětluje první Maxwellova rovnice popisující magnetickou intenzitu kolem vodiče protékaného proudem. Jelikož magnetická intenzita a magnetická indukčnost jsou vlastnosti jedinečné

pro každý typ materiálu. Proto je výběr materiálu důležitý pro samotný návrh stroje nebo naopak, informace o typu materiálu je velmi podstatná při rozboru a to pro ověření správnosti analýzy.



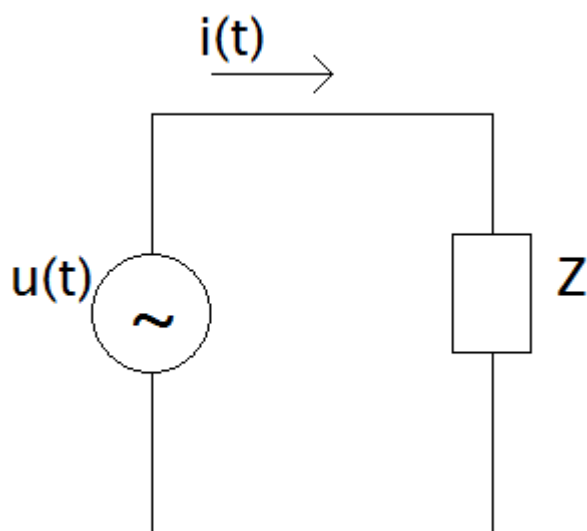
Obr.11: Náhradní schéma podélné osy řešené v rámci výpočetního algoritmu.[3]



Obr.12: Náhradní schéma příčné osy řešené v rámci výpočetního algoritmu.[3]

Po sestavení příslušných algoritmů výpočtu bylo experimentálně zjištěno, že přesnost výpočtu se pohybuje v rozmezí až 20%, což je pro studijní účely více než dostačující. Avšak pro průmyslové aplikace je tato chyba stále velmi vysoká, jelikož na velikosti činných odporů jsou závislé tepelné ztráty ve stroji a z toho se dále odvozuje chlazení na pokrytí ztrát. Tato chyba by se nejvíce projevila při nepřetržitém provozu stroje, kdy by teplota narůstala až do ustálené hodnoty a tedy maximální velikosti pro dané zatížení. Naopak chyba vypočtené hodnoty je zanedbatelná při často přerušovaném provozu, kdy je stroj zatěžován jen na krátké časové úseky. V tomto případě tepelná setrvačnost celého kovového těla nedovolí k rychlému oteplení jak kostry, tak vinutí. Tento předpoklad je vhodný z ekonomického hlediska, kdy pro krátké časové úseky je možné stroj přetěžovat vyššími pracovními proudy z důvodu vyššího zatížení. Pokud nebudou překročeny kritické parametry stroje je možné nasadit motor nižšího výkonu a přitom nehrozí degradace izolace, vinutí či dalších částí stroje jako jsou drážkové klíny, pryžové tlumiče na kostře a ložisek.

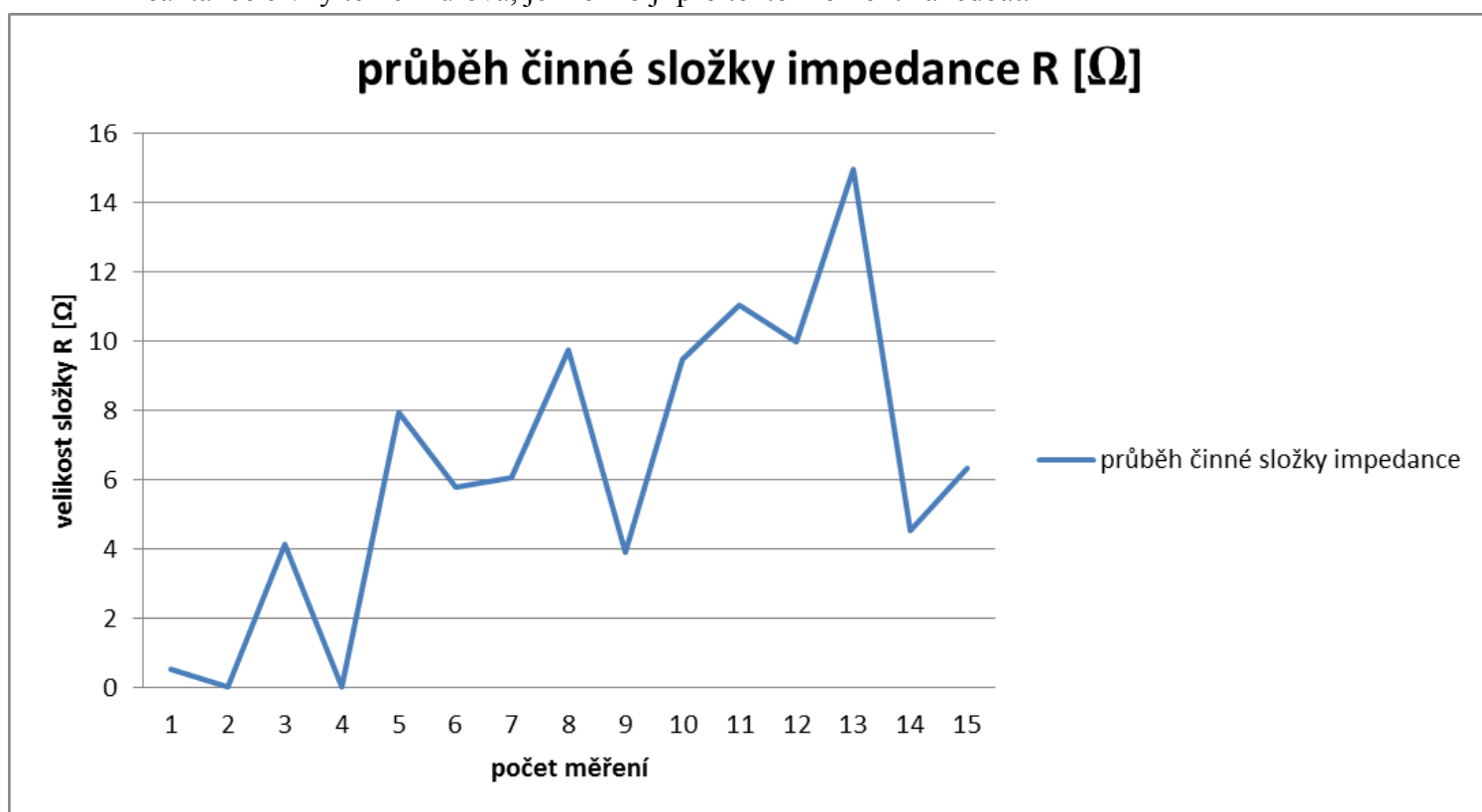
Návrh algoritmu v prvním kroku spočíval v sestavení prvotní sekvenci výpočtů. Jinak řečeno ze změřených hodnot, jako jsou napětí, proud, frekvence a fázový posuv bylo nutné vyjádřit z těchto vztahů celkovou impedanci ve fázorovém tvaru. Pro vyjádření celkové impedance bylo využito Ohmova zákona, který byl vhodně pozměněn k výpočtu odporu. Jelikož synchronní stroje pracují s harmonickým napájením, přejde výše zmíněný tvar do symbolicko komplexní metody, tedy pro komplexní impedanci. Uspořádání obvodu pro prvotní výpočet je znázorněn na obrázku 13.



Obr.13: Schéma pro prvotní výpočty.

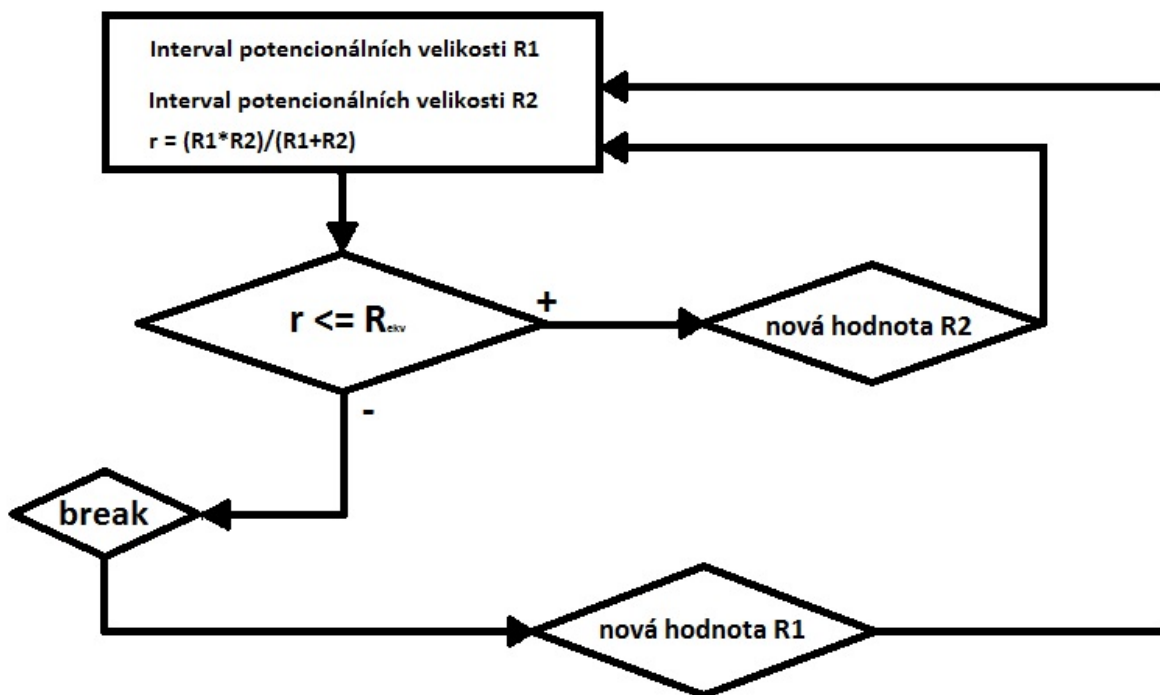
Tyto výpočty se provedly pro jednotlivé napětí a proudy odměřené v každé dekádě měření na stroji. Po provedení prvního kroku byla známa celková velikost impedance pro jednotlivé napětí a proudy. Nyní se přikročilo k samotnému rozdělení celkové impedance na složku činnou a jalovou. Informace dostačující k adekvátnímu rozdělení poskytuje velikost fázového posunu napětí a proudu. Protože fázový posuv byl opět odměřen pro každou dekádu testování motoru, je možné velmi přesně rozdělit impedanci na dvě složky, činnou a jalovou. Tento výpočet byl opět proveden pro jednotlivá napětí a proudy.

Jelikož klasický dopočet všech složek náhradních schémat by byl zdlouhavý a náročný pro výpočet, naskytla se úvaha vedoucí k výraznému zrychlení řešení. V rámci úvahy bylo přihlédnuto k tomu, že za nulové, či téměř nulové frekvenci se v impedanci stroje projeví pouze činná složka. Na vztahu $X_L = \omega \cdot L$ je evidentní, že při kmitočtech blížící se k nule je reaktance cívky téměř nulová, je možno ji pro tento moment zanedbat.



Obr.14: Charakteristika velikosti činného odporu pro každou změřenou hodnotu (osa y odpovídá velikosti celkového R a osa x vyjadřuje počet měření).

Tedy činný odpor, který odpovídá měření v prvních dekádách, představuje reálnou část impedance vinutí a lze ho brát jako finální a nejpresnější velikost. Dá se tedy předpokládat, že vliv reaktance ovlivní hodnotu činného odporu. Z těchto důvodů je nutná korekce výsledků. Ta byla provedena vyhodnocením globálního maxima a minima činného odporu pro výsledky prvního kroku. Následně v intervalu minima a maxima byl nalezen střed intervalu a tato hodnota lze brát za skutečnou hodnotu odporu. Obdobou získání činné části impedance byla poté dopočtena i reaktance indukčností, ze kterých se vyjádřila ekvivalentní indukčnost. Na základě úvahy uvedené dříve je dále řešen algoritmus výpočtu. Pokud je určena celková velikost činného odporu. Další kroky je rozdělení jalové složky pro nalezení kombinace 4 hodnot indukčností ve správných poměrech. Po zpětném dopočtu celkové impedance se hodnota vypočítaná rovnala naměřenému zdánlivému výkonu pohonu. Dalším krokem algoritmu bylo sepsání skupiny příkazů pro výpočet paralelních kombinací. V této fázi vývoje je nutné obsáhnout všechny podmínky pro prvky obvodů z hlediska vzájemné velikosti a celkové velikosti prvků. Jako první věc, potřebná pro výpočet je určení intervalů, pro oba či více prvků, ze kterých se vybírají data, která jsou následně porovnávána. Je nutné odhadnout velikosti hledaných odporů správně, neboť při dalším hledání je velké riziko toho, že algoritmus nenalezne shodu a výpočet končí. Pokud by tato situace nastala, je možné



Obr.15: Schéma logiky algoritmu pro výpočet velikostí 2 činných odporů.

zkontrolovat interval dle velikosti celkového činného odporu. Odhad příslušných intervalů je možné díky informaci, která říká, že vzájemný poměr obou prvků je téměř totožný pro příčnou osu. Pro podélnou osu je poměr činných odporů desetkrát menší. Díky tomu jsme schopni říci, že intervaly obou rezistorů v obvodu jsou přibližně dvakrát vyšší než celková činná složka impedance. Tento předpoklad se ukázal jako správný. Prokázaly to zkoušky algoritmu, při zadání hodnot známého obvodu a následný dopočet parametrů dosahoval chyby maximálně 15 %. Velikost chyby byla znovu ověřena pro měřené veličiny a výsledná celková velikost odporů a ekvivalentní indukčnosti se porovnála se zdánlivým výkonem stroje. Rozdíl obou výkonů byl malý, a proto je možné brát výpočet algoritmu za správný.

Dále v programu řešící parametry synchronního stroje je postup řešení paralelní kombinace odporů aplikován i na indukčnosti. V této části se předpokládá, že jejich vzájemné velikosti jsou totožné a proto se liší od výsledných indukčností. Opět zkušební ověření velikosti ukázalo, že vypočtené hodnoty paralelní kombinace odpovídají požadované hodnotě celkové indukčnosti.

Vzájemné poměry jednotlivých prvků jsou uvedeny v elektrotechnické normě IEEE Guide for Test Procedures for Synchronous Machines [1]. Tyto poměry jsou uvedeny pro vzorový příklad výpočtu parametrů stroje. Poměry byly vypočteny z výsledků poměrných jednotek výsledných velikostí prvků. Pro vypracování algoritmu a zařazení těchto poměrů byla zvolena pro indukčnost vyhlazovací tlumivky konstanta 1. Další parametry prvků jsou vztaženy k této vyhlazovací tlumivce. Poměry indukčností v podélné a příčné ose jsou uvedeny v následující tabulce.

Díky znalosti poměrů lze dále postupovat ve výpočtech velikostí prvků. Nastává ovšem problém s rozdělením více jak dvou indukčností. Protože algoritmus pro paralelní kombinaci dvou prvků prokazatelně dává přijatelné výsledky, je vhodné tento algoritmus upravit. Základní podmínkou je opět zachování poměrů jednotlivých prvků.

$L_1 : L_{aq}$	1:10,34
$L_1 : L_{1q}$	1:7,6
$L_1 : L_{2q}$	1:0,93
$L_1 : R_{1q}$	1:0,00804
$L_1 : R_{2q}$	1: 0,00905
$L_1 : L_{1d}$	1 : 8,7542
$L_1 : L_{ad}$	1 : 9,8968
$L_1 : L_{fd}$	1 : 0,7568
$L_1 : R_{1d}$	1: 0,0156
$L_1 : R_{fd}$	1: 0,00165

Tabulka 1: Poměry jednotlivých indukčností v příčné a podélné ose.

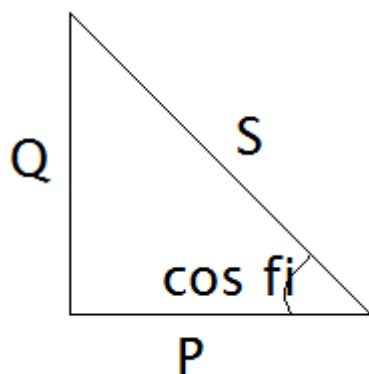
Problém výpočtu parametrů paralelní kombinace čtyř prvků byl vyřešen následujícím způsobem. V prvním kroku jsem určil poměry jednotlivých dvojic prvků. Toho bylo docíleno úvahou, kdy jsem poměr v poměrných jednotkách jednotlivých indukčností použil jako jejich velikost, v případě, že se základní hodnota vyhlazovací tlumivky je rovna právě jedné. Z tohoto dále vyplývají hodnoty následujících prvků náhradního schématu. Poměr paralelních dvojic indukčností je brán výpočtem velikostí paralelně zapojených cívek. Při kalkulaci paralelních dvojic jsou sjednocené cívky s nižší a vyšší hodnotou indukčnosti. Tento krok je důvodem ve zmenšení případné chyby. Pokud bychom kombinovali prvky, které by se velikostí velmi lišily, následující interval při konečném dopočtu jednotlivých velikostí by byl velmi rozsáhlý, a proto nalezené paralelní kombinace by byly rozdílné od skutečných hodnot a tudíž by se i chyba výpočtu zvyšovala. Jednotlivé intervaly určuje samotný poměr prvku k vyhlazovací tlumivce, které je manuálně zadáván interval, jenž má obsahovat řešení. Pokud je dopočtena hodnota paralelních kombinací dvojic cívek, je možné vypočítat vzájemnou velikost oproti ekvivalentní hodnotě indukčnosti L_{ekv} . Postup výpočtu je obdobný předchozím

řešením algoritmů. Hodnota určená poměrem je pouze jedno číslo, které s velkou pravděpodobností neodpovídá skutečné velikosti. Tomuto předpokladu je nutné předejít, a proto je číslo dané poměrem roznásobeno $\pm 20 \%$, což vede opět k vytvoření intervalu hodnot.

Po výpočtu vzájemné velikosti dvojic je možné přistoupit k pokračování dělení dvojic na jednotlivé parametry. V okamžiku kdy známe velikost jednotlivých dvojic, je nutné vytvořit zpětně intervaly k příslušným prvkům. Ty se opět týkají prvotních hodnot vyhlazovací indukčnosti a následných poměrů mezi prvky. Výpočetní algoritmus opět postupuje dle následujícího postupu. Zaprvé určili jsme velikost intervalu, zadruhé byl vytvořen cyklus for, který prošel celým intervalem většího prvku. V rámci celého algoritmu bylo nutné rozhodnout se, jakým způsobem bude zkoumán interval menšího prvku z dvojice. Existuje mnoho variant procházení intervalu neboli jednořádkové matice. Jako nejjednodušší je opět cyklus for, následován cyklem while, ovšem netušíme, kolik kroků výpočtu proběhne, než se cyklus ukončí. Další možností je vytvoření skupiny podmínek, které vedou ke složité struktuře algoritmu, výrazně roste možnost výskytu chyby, jenž degraduje algoritmus jak o správnost řešení, tak celkové funkčnosti výpočtů a podmínek. Byla tedy přijata první varianta, tedy cyklus for. Při tomto postupu je předem znám počet jednotlivých výpočtů a tedy hledání případné chyby je mnohem snadnější a rychlejší. Proces hledání paralelních kombinací je následující. První cyklus for načte postupně jednotlivé hodnoty prvního prvku. Po přiřazení hodnoty naskakuje druhý cyklus for pro druhou hodnotu. V tomto procesu se vždy prochází celý interval druhé cívky, té menší. Velikosti indukčnosti druhého prvku je po každé nové hodnotě ověřován, zdali paralelní kombinace s prvním, větším, prvkem nepřesahuje velikost paralelní kombinace příslušné dvojice cívek. Tímto způsobem vzniká skupina hodnot představujících řešení, avšak požadované a správné řešení je pouze jedno. Experimentem bylo zjištěno, že vždy poslední dvojice prvků, vyřešených algoritmem odpovídají všem zadaným podmínkám a to jak vzájemným poměrem, tak i velikostmi.

Konec algoritmu je vždy zakončen testem pro ověření správnosti a hlavně přesnosti výpočtů. Jelikož parametry prvků náhradního schématu jsou neznámé, je možné je pouze odhadovat. Informacemi postačujícími pro co nejpřesnější otestování výsledných parametrů jsou energie měřené na výstupu z motoru, čili odečtené z rotoru. Zásadní veličinou je zdánlivý výkon, jenž je lehce dopočitatelný z naměřeného napětí a proudu. Dále z jednotlivých prvků náhradního schématu opět zdánlivý výkon je součet výkonů jak činného, tak jalového

Pythagorovou větou. Tato skutečnost je možná, jelikož všechny jmenované výkony jsou součástí takzvaného výkonového trojúhelníku.



Obr.16: Znáornění výkonového trojúhelníku.

Výsledné porovnání výkonu odečteného při měření a vypočteného je součástí výstupu algoritmu. Na grafech, uvedených dále v práci, je zřejmé, že odchylky výpočtů jsou velmi malé a pro celkový výpočet dostačující.

Simulace v programu Matlab

Teoretické shrnutí algoritmů výpočtů, jako základní pilíř pro návrh výpočtů, byl vysvětlen v předchozí kapitole. Reálné zhotovení programu bude postupovat dle teoretického postupu. Jako první krok bude vyřešení základní velikosti celkové impedance pro všechny frekvence, proudy a napětí.

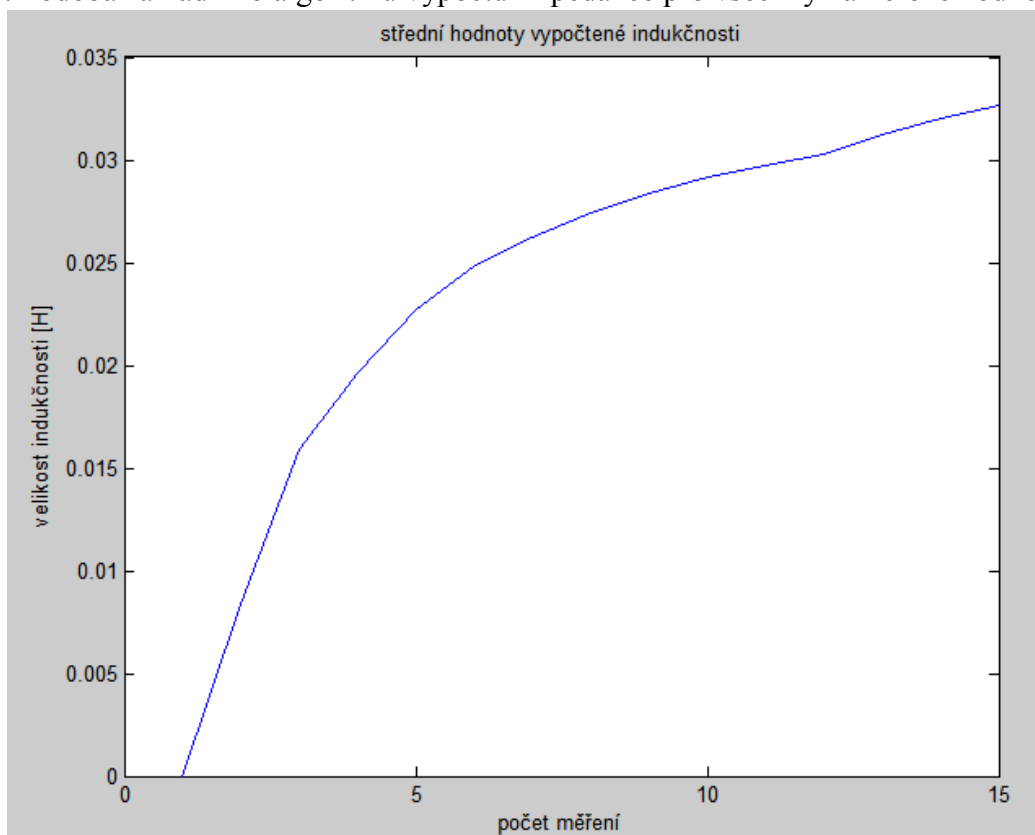
```
while (Iref(1,krok) - I)~= 0

    I = U(1,krok)/r;
    r = r + 0.001;
    p = p + 1;

    proud(krok,p) = I;
    deltaI(krok,p) = I - Iref(1,krok);
    deltaR(krok,p) = (U(1,krok)/I) - Rref(1,krok);

    if I <= Iref(1,krok)
        break
    end
```

Obr.17: Podoba základního algoritmu výpočtu impedance pro všechny naměřené hodnoty



Obr.18: Vypočtené hodnoty střední indukčnosti impedance příčné osy pro všechny naměřené veličiny.

Zobrazení hodnot impedance pro příčnou osu byl prvním krokem. Následný postup spočívá v rozdělení této veličiny na dvě části, reálnou a imaginární. Toto rozdělení se provede využitím goniometrických funkcí sinus, pro velikost imaginární části, a cosinus, ke zjištění hodnoty činného odporu. Jelikož se velikosti pro jednotlivé změřené hodnoty liší, bylo potřeba zjistit takovou hodnotu, aby při konečné kontrole výsledků vypočtený zdánlivý výkon odpovídal skutečnému změřenému.

```

    A(1,krok) = I;
    Z(1,krok) = r;
    krok12 = krok12 +1;
    if num == 4
        tak = tak + 1;
        krok12 = 1;
        num = 1;

    Xl(tak,krok12) =abs(Z(1,krok)*sin(fi2(1,krok)));
    R(tak,krok12) = abs(Z(1,krok)*cos(fi2(1,krok)));

    Xl12(1,krok12) = abs(Z(1,krok)*sin(fi2(1,krok)));
    Xlekv(1,tak) = mean(Xl12);
    Xlc = mean(Xlekv);
    R12(1,krok12) = abs(Z(1,krok)*cos(fi2(1,krok)));
    Rekv(1,tak) = mean(R12);
    Rc = mean(Rekv);

    Rmin(1,krok) = min(R);
    Rmax(1,krok) = max(R);

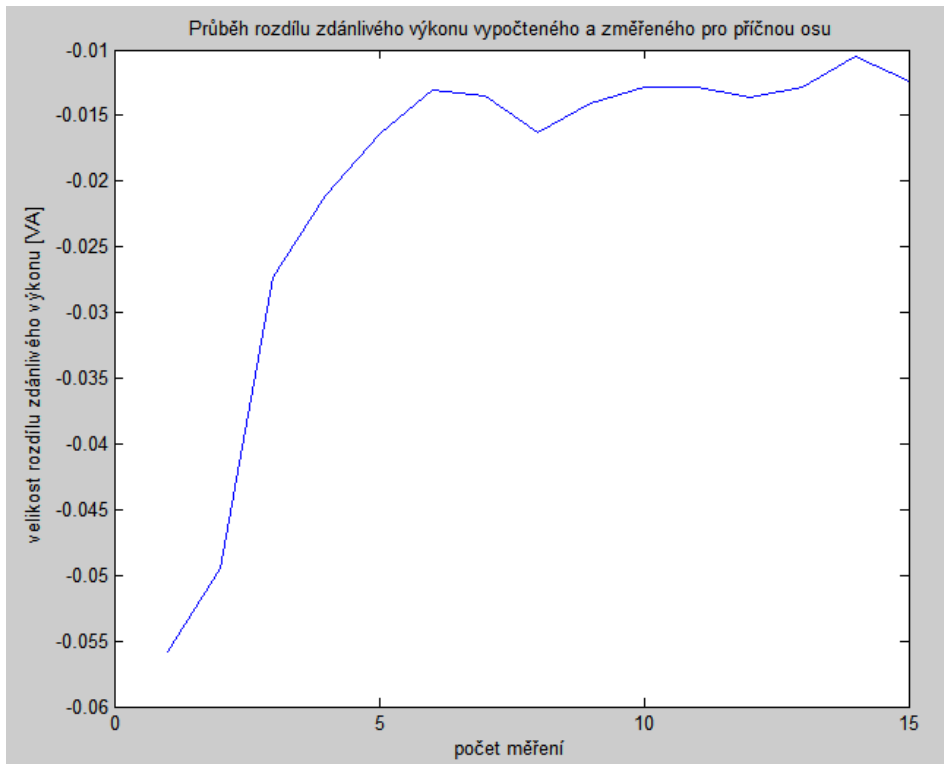
    Rminstr = mean(Rmin);
    Rmaxstr = mean(Rmax);

    Rstred(1,krok) = Rmaxstr - Rminstr;
    Rekv = Rmaxstr - (Rstred(1,krok)/2);

```

Obr.19: Algoritmus pro výpočet střední hodnoty velikostí prvků potřebné pro další postup programu.

Tento postup získání optimální střední velikosti hodnot činných odporů a indukčností byl opět ověřen s využitím zdánlivého výkonu.



Obr.20: Průběh rozdílu zdánlivého výkonu vypočteného a změřeného pro příčnou osu.

Pokud rozdíl mezi oběma zdánlivými výkony je minimální, dá se předpokládat, že určená celková jalová a činná část impedance je správná a lze postoupit k dalšímu kroku, který spočívá v rozdělení těchto částí na jednotlivé složky. Tento krok s přihlédnutím na základní myšlenku náhradního obvodu, kdy se při nabuzování vinutí nejdříve projeví činné ztráty a při zvyšování frekvence dochází k nárůstu jalové složky, rozdělit jednotlivé části impedance separátně.

Algoritmus rozdělení jednotlivých částí je naznačen v algoritmu pracující na jednoduchém principu, kdy jeho hlavní částí je vytvoření intervalů, které budou prohledávány, a výsledkem je poslední adekvátní kombinace všech složek určující celkovou velikost jedné z částí impedance.

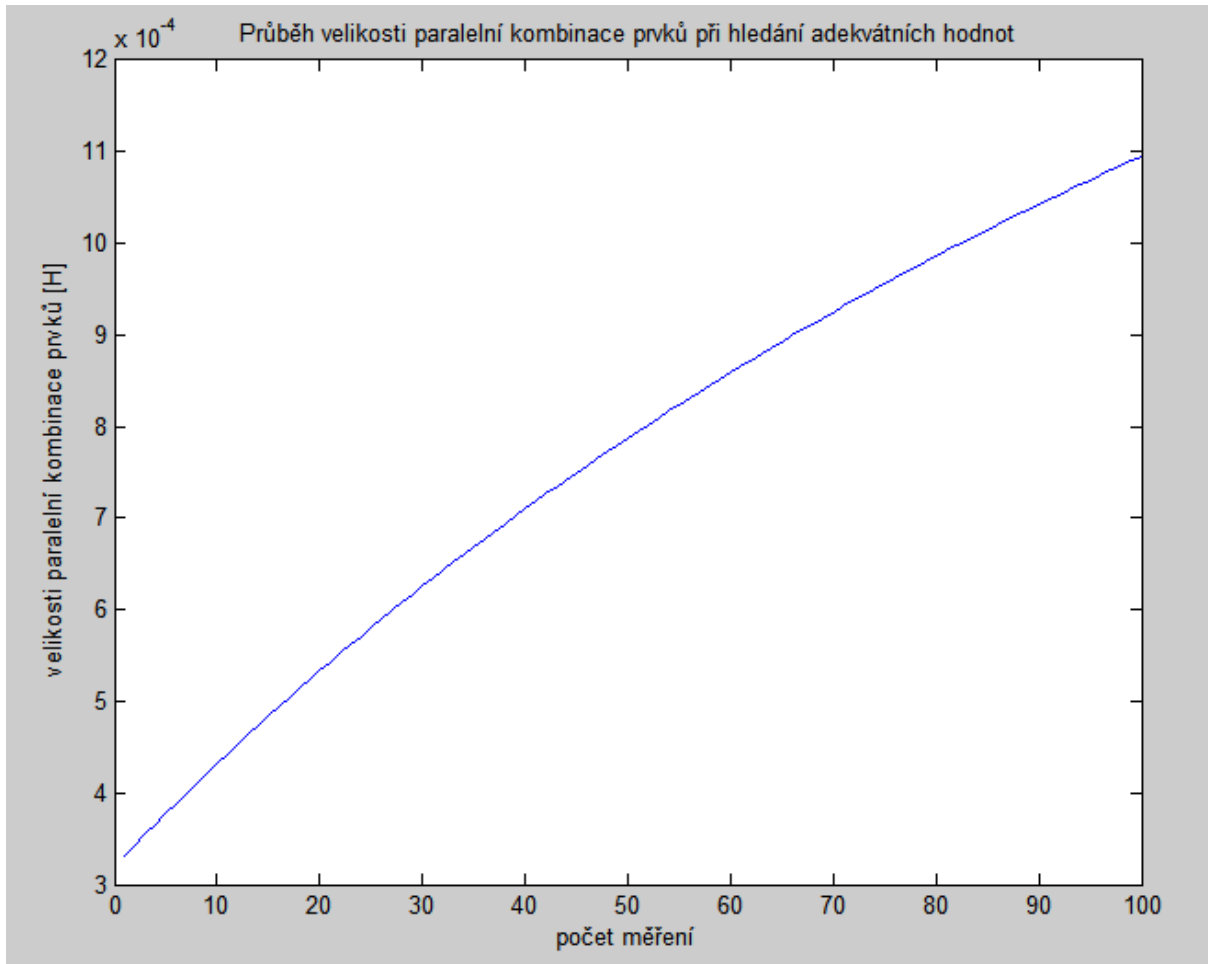
```

l1min = mez11(1,1);
l1max = mez11(1,2);
l2min = mez12(1,1);
l2max = mez12(1,2);
lmin = Lekv*0.9001;
lmax = Lekv*1.01;
l1 = linspace(l1min,l1max);
l2 = linspace(l2min,l2max);

```

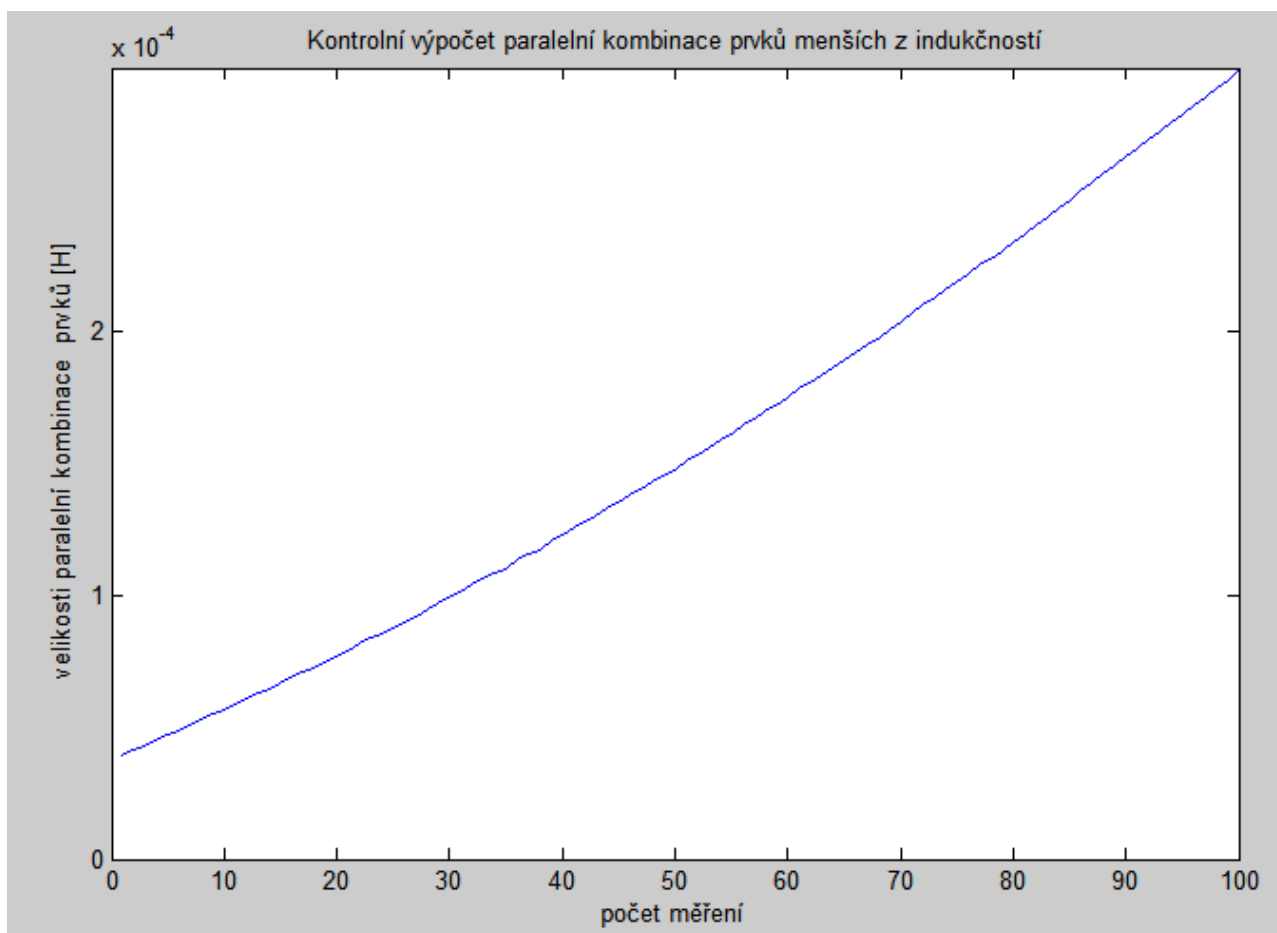
Obr.21: Určení intervalů pro jednotlivé členy z jedné části z celkové impedance.

V dalších krocích stanovení paralelních kombinací prvků jsou ze stanovených intervalů vybrány hodnoty. Tyto hodnoty jsou poté testem ozkoušeny, zdali jejich paralelní kombinace odpovídá zadané. Pokud test odhalí překročení dané meze, je cyklus zastaven a hledání začne s novými hodnotami.



Obr.22: Charakteristika velikosti paralelní kombinace prvků při hledání adekvátních hodnot (osa y – velikost paralelní kombinace prvků, osa x – počet prvků v intervalu).

Při vyhodnocení výsledku jako dostačující kombinaci pro splnění všech podmínek jsou konečné hodnoty jednotlivých prvků uloženy pro konečné testování.



Obr.23: Grafické znázornění průběhu hledání hodnoty menší z indukčností pro paralelní kombinaci.

Naleznutí nejpřesnějších hodnot prvků je otázkou nastavení velmi přesných podmínek pro výpočet. Nastavení podmínek znamená určení přesných a správných poměrů mezi jednotlivými prvky, dále určení maximální možné chyby paralelní kombinace. Tato chyba určuje maximální překročení paralelní kombinace prvků, kterou byla ve výpočetním algoritmu nastavena na velmi malou hodnotu 0,01%. Tato velikost odchylky dovoluje zapsání hodnot kombinací takových, které by se do stanovené hodnoty celkové indukčnosti, či rezistence nevešly z důvodu zaokrouhlování v rámci výpočtů.

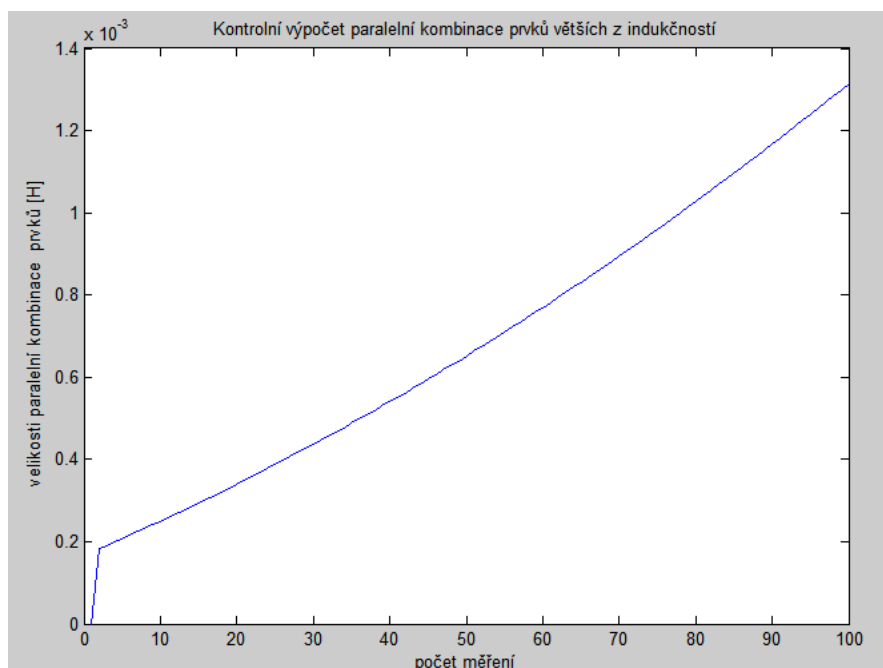
Poměry velikostí prvků uvedené v tabulce odpovídají hodnotám indukčností a činných odporů. Ty se z hlediska vzájemného porovnání liší jen velmi málo, a proto nejsou uváděny jejich vzájemné poměry. Důvodem zanedbání podmínek stanovujících velikost odporu vinutí je také ten, že při ustáleném chodu stroje jsou činné složky odporu mědi zanedbatelné a čím vyšší frekvence dodávaná předřadným měničem kmitočtu, či střídačem, tím jalová část celkové impedance převažuje nad její druhou činnou složkou.

Posledním krokem výpočtů prvků náhradního schématu použitého pro synchronní stroj je dopočet 4 paralelních indukčností. Algoritmus postupu se velmi podobá krokům uvedených v předchozích příkladech. Nyní však je nutno splnit dvě podmínky. První podmínka zahrnuje rozdělení ekvivalentní části na 2, které opět splňují poměr obou dvojic paralelních kombinací prvků. Velikost dvojice je určen paralelní kombinací 2 indukčností, u kterých je zadán poměr vůči vyhlazovací vstupní tlumivce. Hodnotu paralelního poměru je získán za předpokladu, že vyhlazovací tlumivka má velikost rovno 1, pak výpočet paralelní kombinace odpovídá poměru dvojice vůči dalším prvkům.

```
pomerL12 = 10.34;  
pomerL13 = 7.6;  
pomerL14 = 0.93;  
pomerL23 = pomerL12/pomerL13;  
sumapom = (pomerL12*pomerL13) / (pomerL12+pomerL13);
```

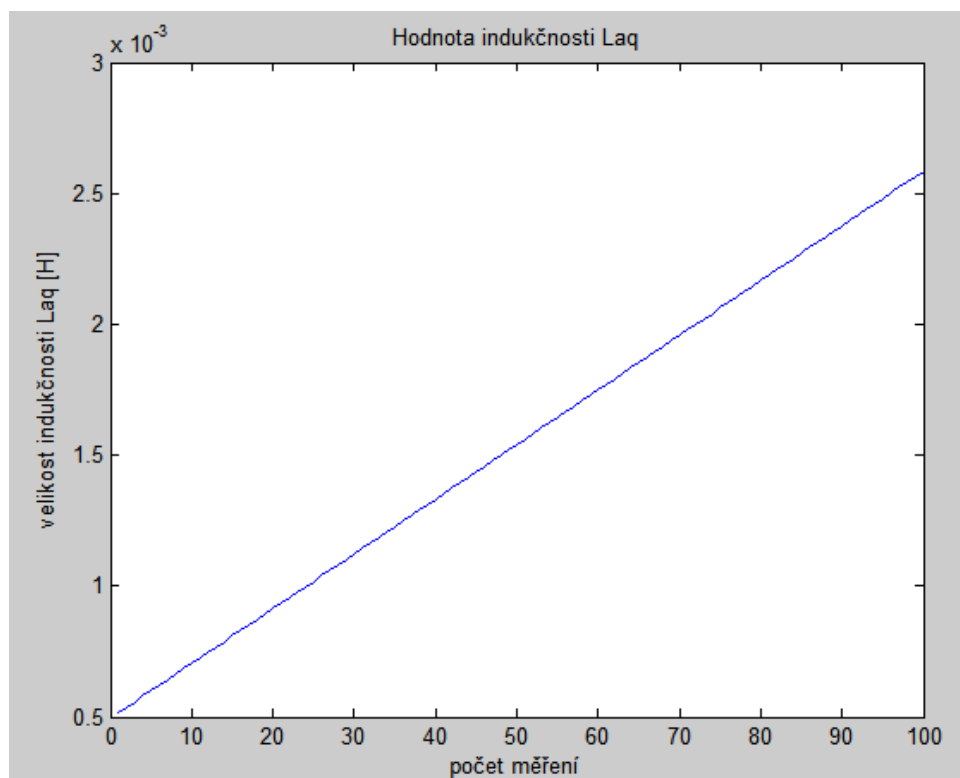
Obr.24: Výpočet poměru dvojic paralelních prvků

Pro výpočet hodnot dvojic prvků byly zvoleny kombinace 2 prvků s vyšším poměrem vůči vstupní tlumivce a dvojice indukčností s nižším poměrem. Důvodem je dosažení menší odchylky výsledných hodnot od skutečných.

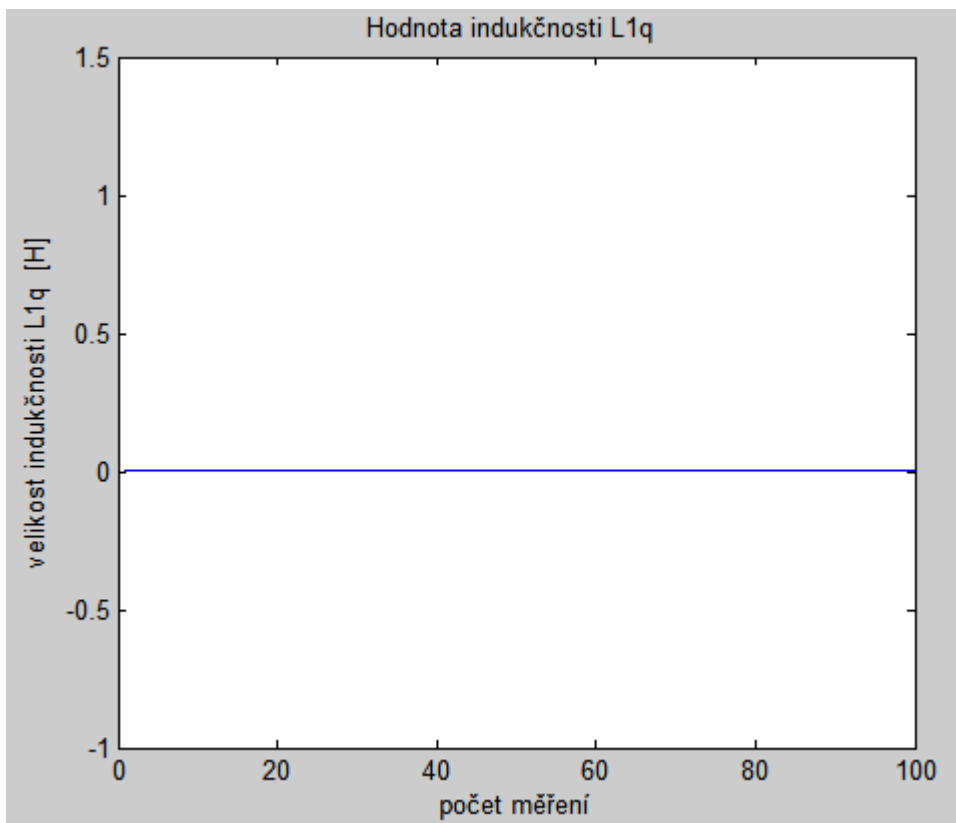


Obr.25: Výpočet dvojice vyšších indukčností (osa y – velikost, osa x – počet prvků).

Další rozdělení dvojic prvků na dílčí indukčnosti je obdobou předchozího postupu dělení dvojic. V jednoduchosti to lze popsat v pár krocích. Zprvce jsou vytvořeny intervaly hodnot k příslušným indukčnostem. Poté je algoritmus navržen tak, že postupně jsou vybrány hodnoty větší z indukčností pokračující projetím intervalu menšího z prvků. Pokud je nalezena shoda, z hlediska velikosti paralelní kombinace, jsou hodnoty prvků zapsány a program pokračuje dále v jednotlivých intervalech.

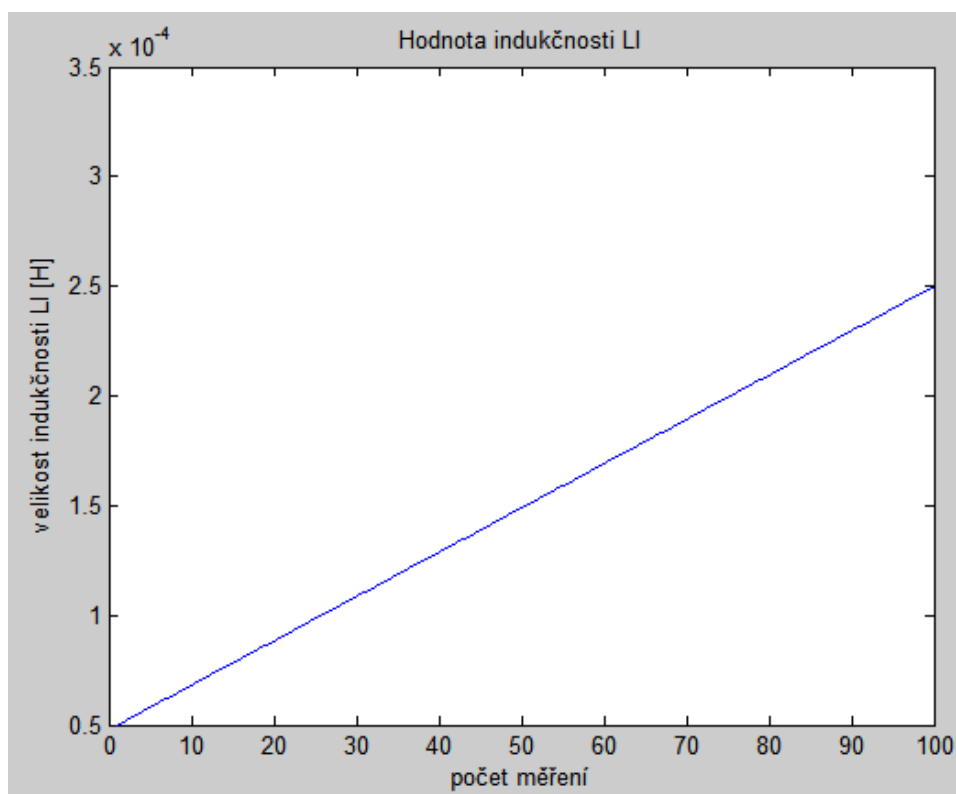


Obr.26: Výsledné hodnoty indukčnosti L_{aq} .

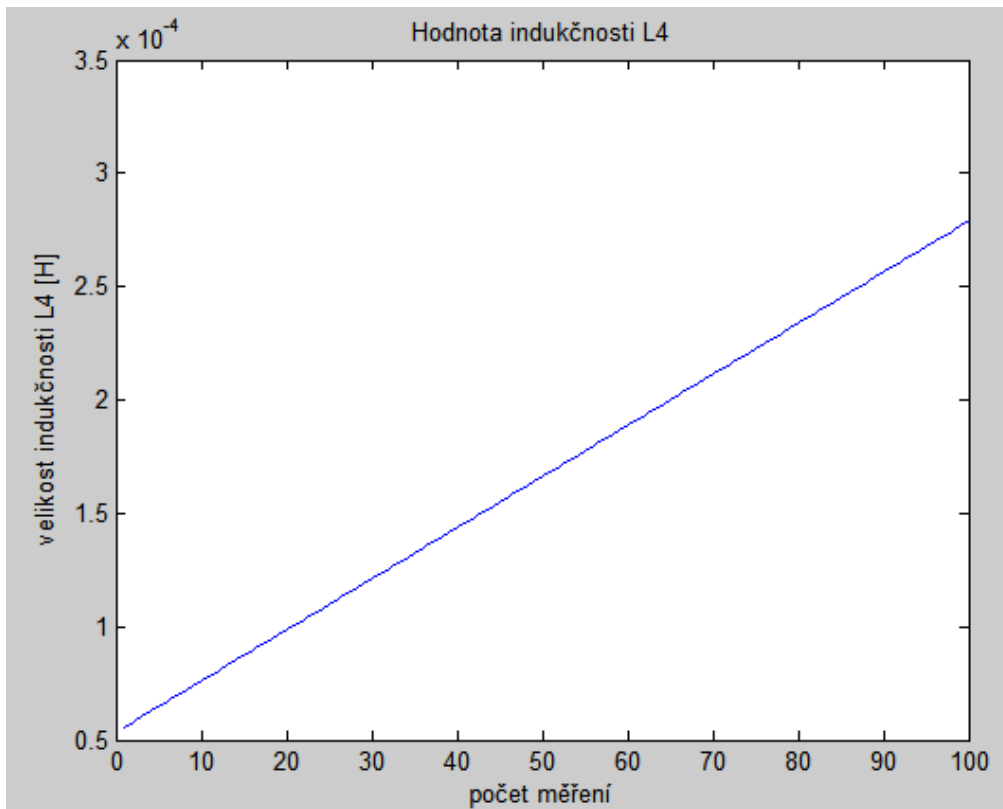


Obr.27: Výsledné hodnoty indukčnosti L_{1q} .

Stejným postupem je dosaženo hodnot indukčností L_{2q} a L_l .

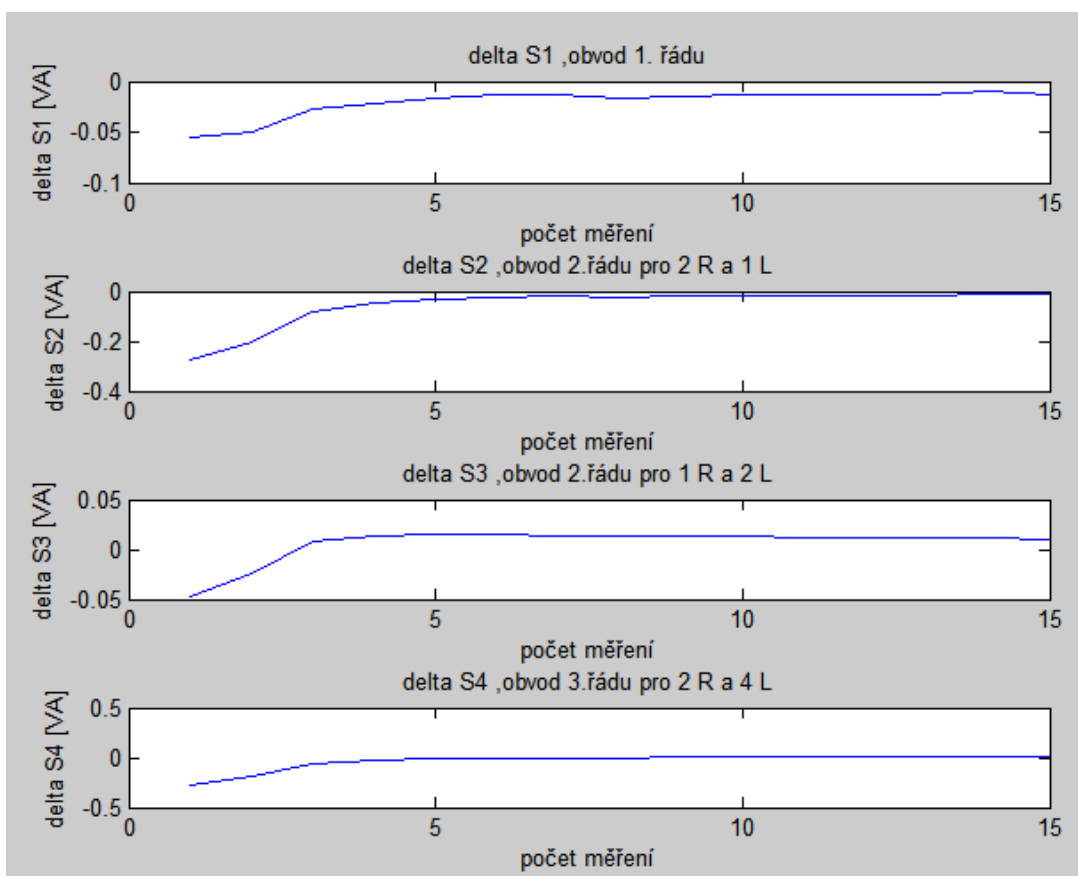


Obr.28: Výsledné hodnoty indukčnosti L_l .



Obr.29: Výsledné hodnoty indukčnosti L_{2q} .

Po zakončení celého algoritmu je potřeba ověřit jeho správnost. Jako veličiny, které jsou porovnávány, byly zvoleny zdánlivé výkony, jakožto celkové energie celého stroje.



Obr.30: Grafy odchylek zdánlivých výkonů jednotlivých variant výpočtů.

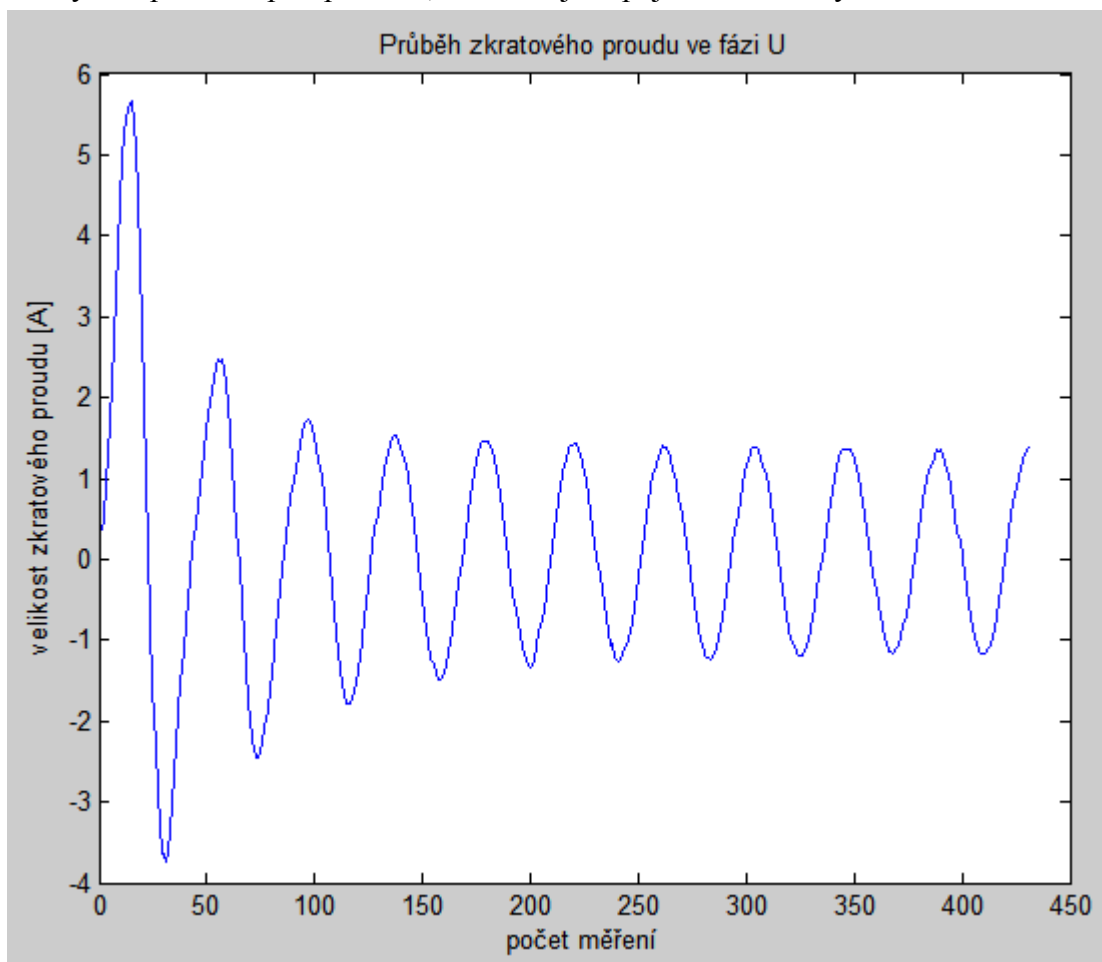
Z výsledných grafů je evidentní, že delta S3, což je příklad výpočtů, kdy nejsou zadány poměry vůči jednotlivým prvkům. Avšak při přihlédnutí na velikost chyby je vidět, že výsledná odchylka se pohybuje v rozmezí setin volt-ampéru, čili pár procent z celkového výkonu. Nejpřesnější výsledky poskytuje poslední z grafů, kde již jsou zadány všechny podmínky potřebné pro výpočet všech prvků náhradního schématu. Tudíž lze strukturu algoritmu považovat za správný a velmi přesný.

Srovnání metody náhlého zkratu a klidové frekvenční metody

Metod pro ověřování parametrů elektrických pohonů je dnes celá řada. Každá uživatel má své postupy a typy zkoušek, kdy se většinou provádí pouze testování předem zvolených parametrů. Tyto zkoušky jsou dnes již pouhým ověřením navržených a nasimulovaných návrhů motorů v simulačních programech jak na elektrickou, tak mechanickou metodu návrhu.

Postup analýzy dat dle [3]:

Měření ohmického odporu vinutí lze odhadnout z jednoduchého proměření stroje, kdy generátor napájíme stejnosměrným proudem. Pokud by se jednalo o vícefázové stroje, je možno odhadnout odpor jedné fáze jako aritmetický průměr odporů mezi jednotlivými fázemi vinutí, zatím co u třífázových strojů je odpor jedné fáze pouze polovinou tohoto napětí, tedy mezifázovým napětím za předpokladu, že vinutí je zapojeno do hvězdy.



Obr.31: Zkratový proud procházející jednou z fází statorového vinutí pro zkoušku náhlého zkratu.

Pro získání dalších znalostí o charakteristice stroje je nutné znát i jeho dynamické chování při nežádoucích stavech, jako je například zkrat při provozu pohonu.

Tento typ zkoušek zkoumá dynamické vlastnosti stroje. Tato zkouška se provádí dle normy ČSN IEC 34-4, kdy se generátor napřed rozběhne na synchronní otáčky. Dále se před zkratem změří budící proudy a napětí na statoru. Samotný zkrat se provádí na vinutí statoru, všechny tři fáze se v jednom okamžiku spojí do krátka a vznikne tak symetrický 3fázový zkrat, toto platí pouze pro generátor. Po tomto kroku se v každé fázi vinutí měří průchozí statorový proud. Typický průběh tohoto proudu je znázorněn na obrázku. Dynamické parametry vinutí se poté odečítají z obalových křivek průběhu proudu a příslušných časových konstant jednotlivých obálek.

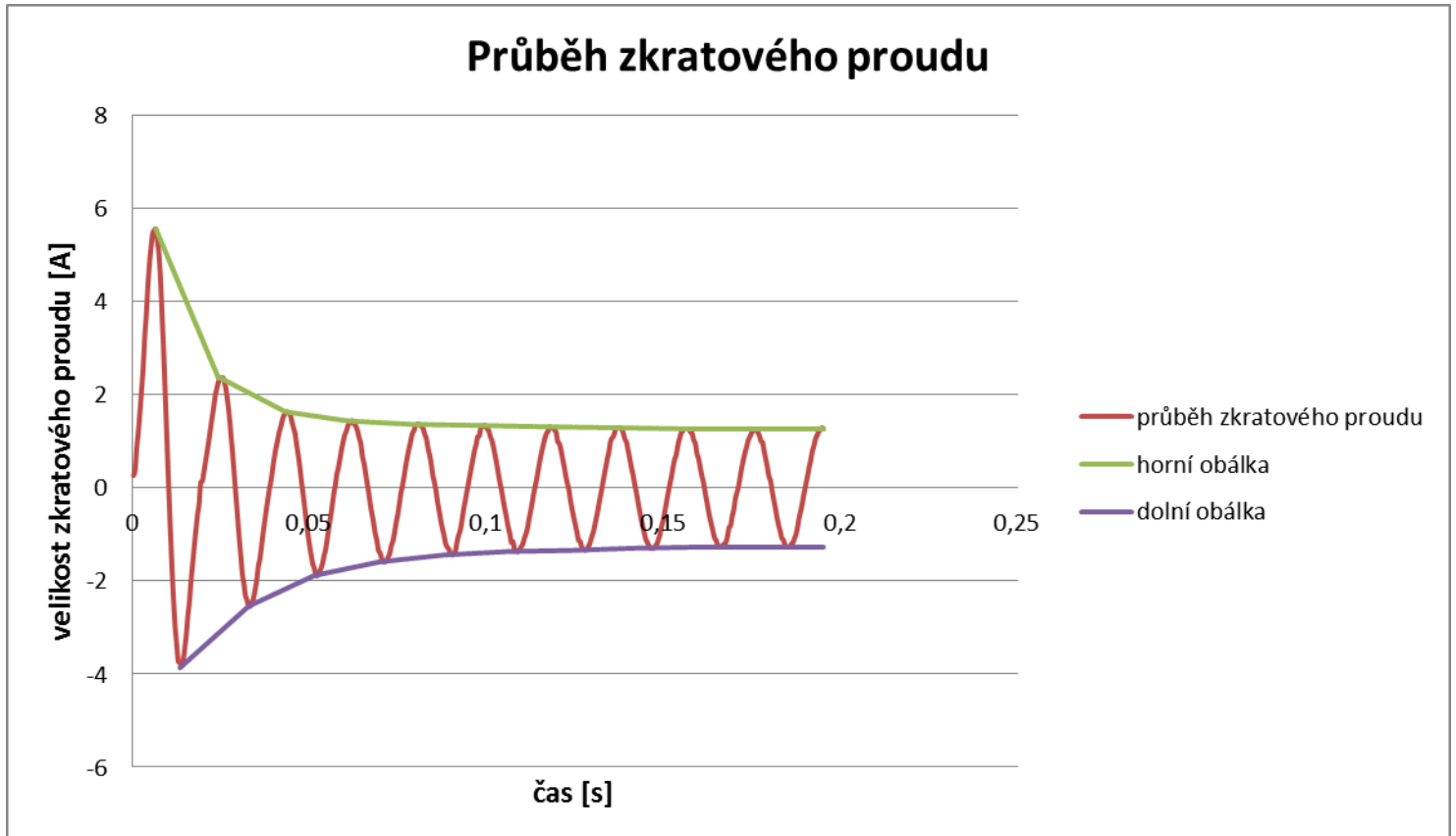
Z důvodu srovnání metody náhlého zkratu a klidové frekvenční metody, byly obě zkoušky provedeny na stejném synchronním stroji. Předpoklad před konečným srovnáním je takový, že metoda klidové frekvenční metody bude přesnější na celkové velikosti parametrů jalové části impedance. Podkladem pro tuto domněnku je předpoklad postupného navyšování frekvence a tím pomalejší nabuzování cívek v celém stroji vedoucí k menším přechodovým dějům a tím i zmenšení chyby určení celkových parametrů.

Naproti tomu metoda náhlého zkratu má velmi nežádoucí vliv na celkovou konstrukci kostry, tak i na uložení vinutí. Příčinou tohoto namáhání jsou zkratové proudy, které při jmenovitých hodnotách provozu motoru, dosahují vysokých hodnot. Zkratový proud protékající vinutím v prvotní fázi vytváří velké silové namáhání vinutí statoru a rotoru. Tento zvýšený magnetický tah negativně působí v namáhání uloženého vinutí statoru, rotoru a dále na ložiska. Druhotný projev zkratového namáhání je tepelné zatížení, kdy dochází k lokálním ohřevům na kostře konstrukce stroje a oteplení v mědi vinutí. První případ je projev superpozice rozptylových toků z vinutí se spojením s povrchovými proudy unikajícími izolací při jejich povrchu. Ohřevy na konstrukci i samotného vinutí působí velmi negativně na izolaci vinutí a tím ke snížení životnosti celého stroje.

Před samotným srovnáním obou metod určení parametrů bude napřed rozebráno měření stroje metodou náhlého zkratu. Jak již bylo výše zmíněno, měření bylo provedeno na stejném stroji. Základní předpoklady před samotným měřením je nutno podotknout, že zkrat ve vinutí stroje byl proveden za sníženého napájecího napětí a to 37 V. Tímto krokem je

snížené riziko poničení izolace, či mechanické stránky konstrukce kostry či upevnění vinutí. Tento předpoklad vede k menším velikostem zkratových proudů.

Prvním krokem bylo vybrání jedné z třech fází, na které byl průběh zkratového proudu nejvhodnější k analýze. Data průběhů dále použitá ke zpracování jsou zaznamenána pomocí osciloskopu. Byla vybrána fáze U. Charakteristika průběhu proudu je vyobrazena na obrázku 31. V dalším postupu bylo nutné vytvořit obálky tohoto průběhu. Ta byla vypočtena jako intervaly mezi jednotlivými maximy a minimy.



Obr.32: Průběh zkratového proudu a jeho obálky.

Díky vypočtení obálek je možné dalších kroků a to stanovení aperiodické a periodické složky. Výpočty jednotlivých složek jsou následující:

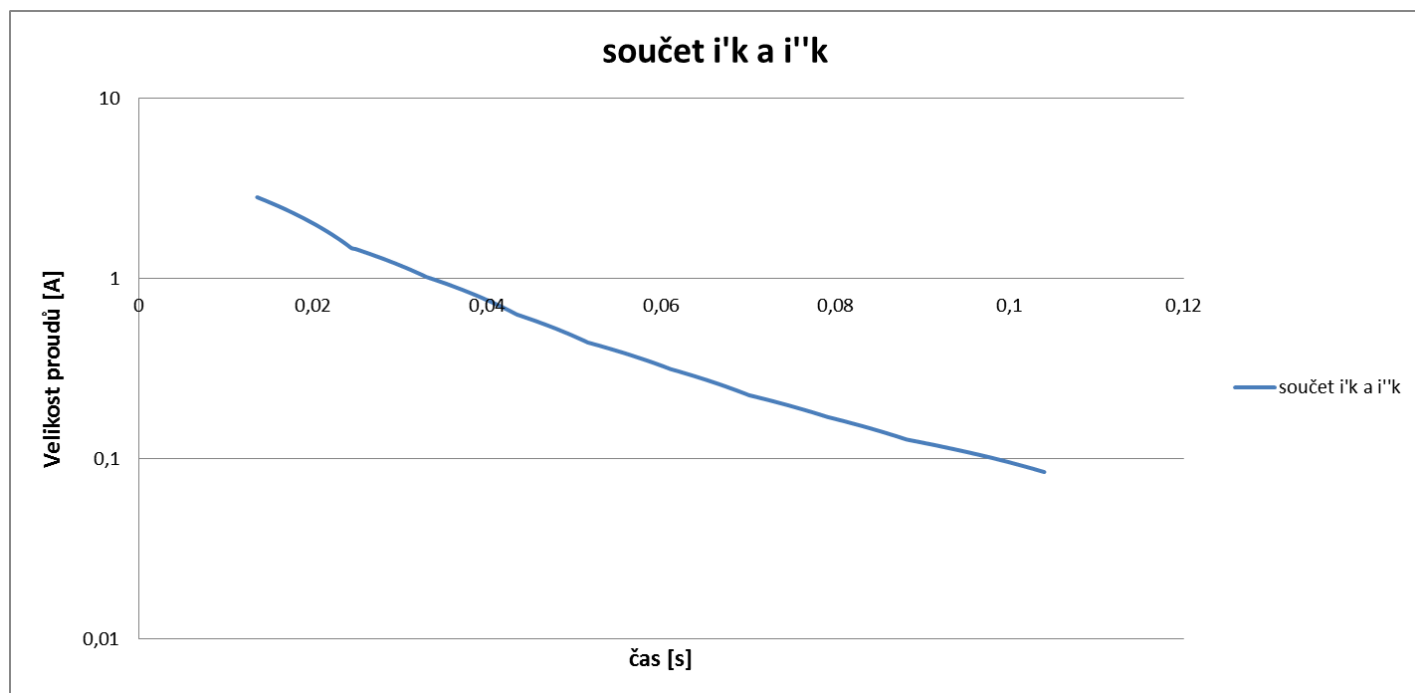
Aperiodická složka

$$i_{ap} = \frac{1}{2}(i_1 + i_2) \quad (29)$$

a periodická složka

$$i_{st} = \frac{1}{2}(i_1 - i_2) \quad (30)$$

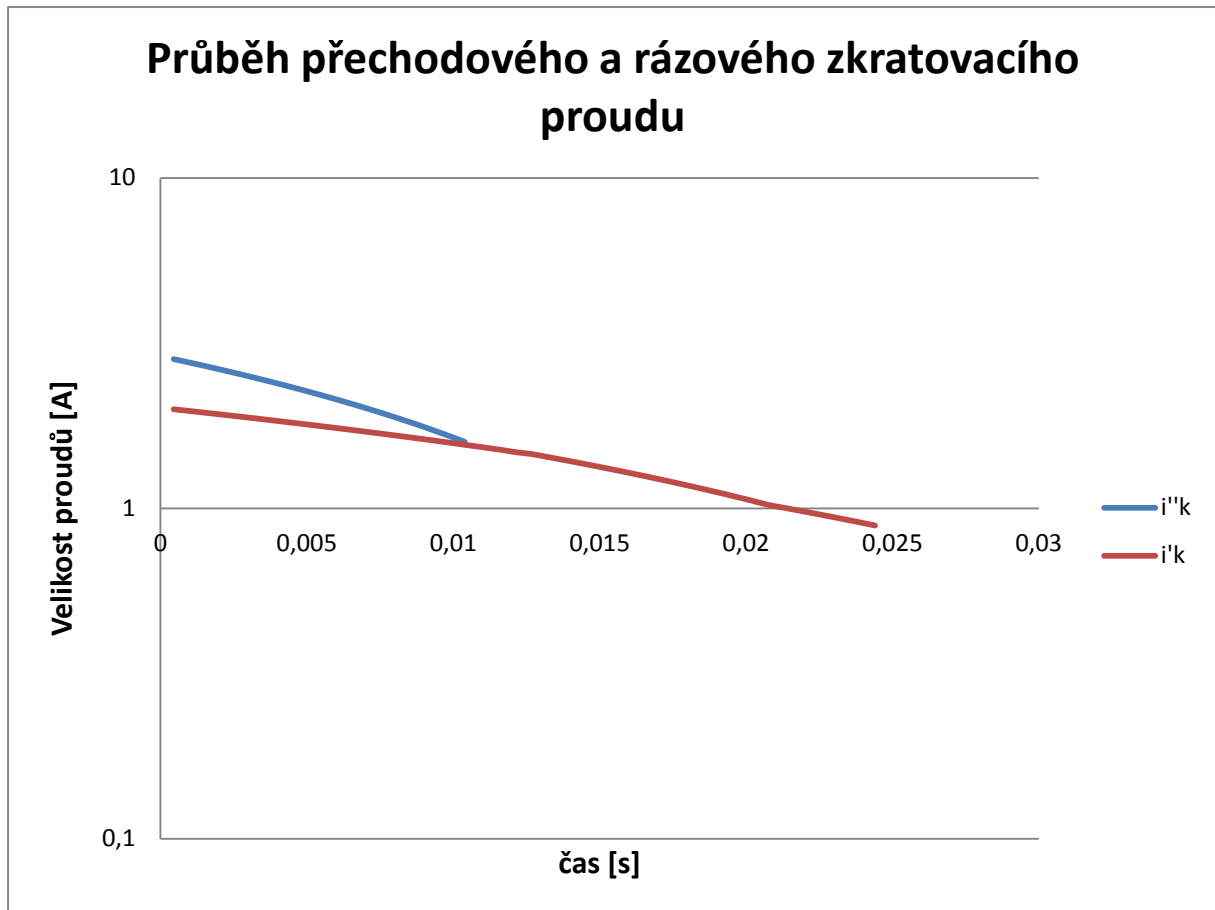
V další analýze bude využito periodické složky. V grafu je vyobrazení průběhu periodické složky. První fáze představuje součet obou přechodových složek zkratových proudů. V charakteristice jsou logaritmicky vynášeny hodnoty proudů a lineárně čas.



Obr.33: Průběh přechodové a rázové složky proudu v semilogaritmických souřadnicích.

Od periodické složky proudu odečteme hodnotu ustálené velikosti zkratového proudu a díky tomuto kroku vznikne výsledná charakteristika vyobrazená na obrázku 33.

Extrapolovaná přímka je velmi důležitá pro oddělení rázové složky proudu od přechodné. Tuto přímku protáhneme až do počátku a tím je umožněno oddělení obou složek proudu. Charakteristika rázové složky je znovu vynesena graficky a opět s logaritmicky vynášenými hodnotami proudu a lineárně čas.



Obr.34: Průběh rázové složky a přechodové složky proudu v semilogaritmických souřadnicích.

Následné rovnice popisující zkratový proud a z toho odpovídající vztah pro výpočet impedancí. Při měření byl motor nabuzen na sdružené napětí 37 V.

$$X_d = \frac{\frac{U_{sdr}}{\sqrt{3}}}{\frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3} \cdot I_k}} = \frac{\frac{37}{\sqrt{3}}}{\frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3} \cdot 1,26955}} = 6,86935 \Omega \quad (31)$$

$$X'_d = \frac{\frac{U_{sdr}}{\sqrt{3}}}{\frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3} \cdot (I_k + \Delta i'_k)}} = \frac{\frac{37}{\sqrt{3}}}{\frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3} \cdot (1,26955 + 1,995)}} = 3,175539 \Omega \quad (32)$$

$$X''_d = \frac{\frac{U_{sdr}}{\sqrt{3}}}{\frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3} \cdot (I_k + \Delta i'_k + \Delta i''_k)}} = \frac{\frac{37}{\sqrt{3}}}{\frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3} \cdot (1,26955 + 1,995 + 2,830539)}} = 1,563786 \Omega \quad (33)$$

Pro porovnání obou metod je potřeba informace o výsledných parametrech stroje analyzované metodou klidové frekvenční odezvy.

Jednotlivé parametry:

a) Příčná osa

$$L_1 = 0,0023 [H]$$

$$L_{aq} = 0,9751 [H]$$

$$L_{1q} = 0,7167 [H]$$

$$L_{2q} = 0,6083 [H]$$

$$R_{1q} = 0,7581 [\Omega]$$

$$R_{2q} = 0,50554 [\Omega]$$

b) Podélná osa

$$L_1 = 0,0021 [H]$$

$$L_{ad} = 0,0175 [H]$$

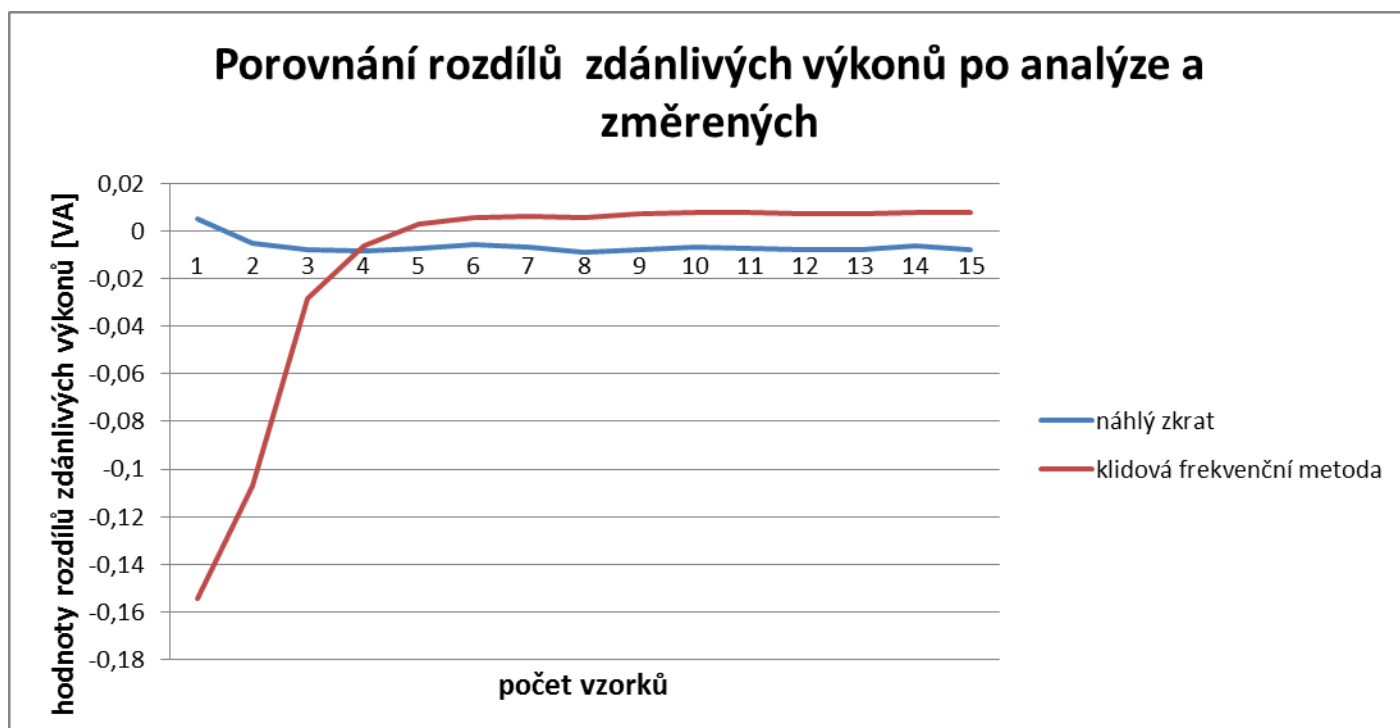
$$L_{1d} = 0,0128 [H]$$

$$L_{fd} = 0,0126 [H]$$

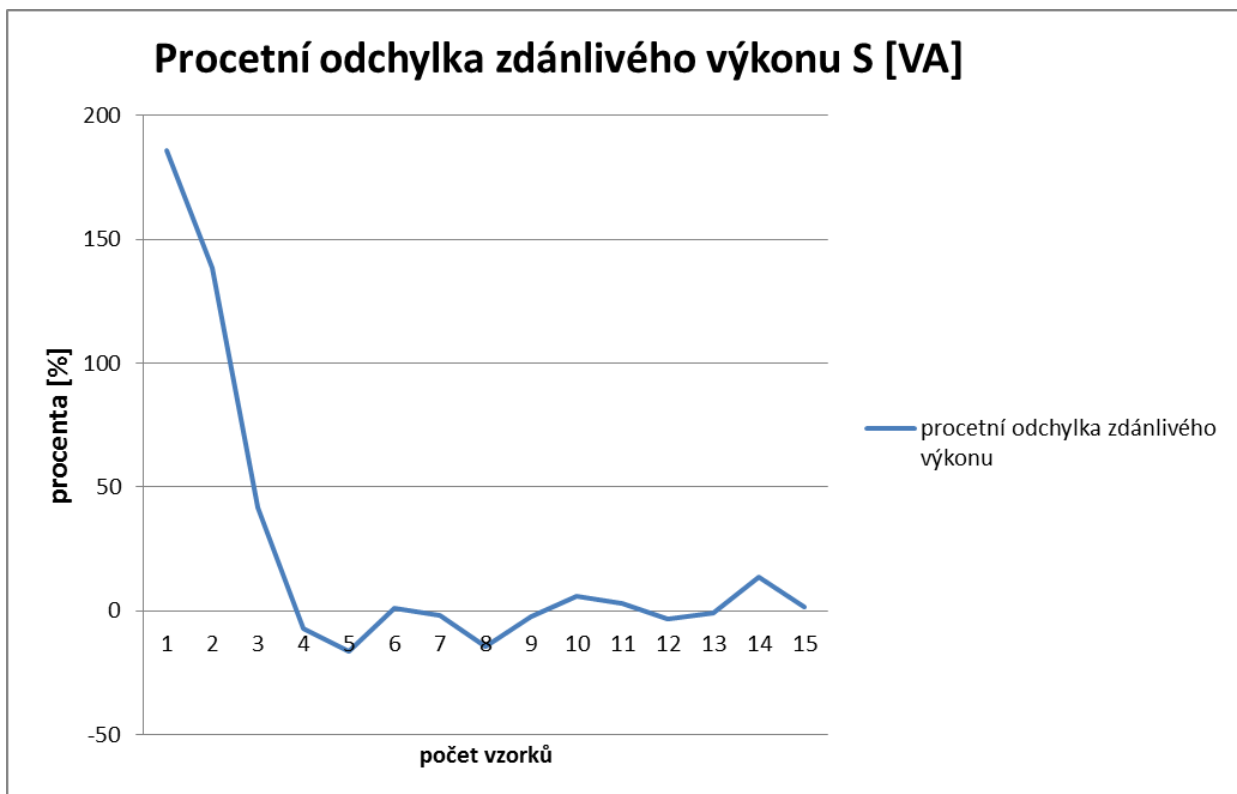
$$R_{1d} = 0,7581 [\Omega]$$

$$R_{2d} = 0,5054 [\Omega]$$

Jalová část impedance určená výpočetním algoritmem má velikost $X = 7,736088 [H]$. Odchylka mezi oběma metodami je 0,866738 VA a vzhledem k celkovému změřenému zdánlivému výkonu se tato chyba pohybuje v jednotkách procent.



Obr.35: Grafické vyjádření odchylek zdánlivých výkonů vypočtených a změřených.



Obr.36: Procentní porovnání obou metod pro analýzu parametrů motoru.

Srovnáním obou metod bylo zjištěno, že klidová frekvenční odezva se od náhlého zkratu liší jen o velmi malé hodnoty. Z grafické podoby průběhů odchylek zdánlivých výkonů je evidentní, že obě chyby se pohybují v podobném rozsahu hodnot. Rozdíl mezi těmito dvojicemi jalových impedancí může být způsoben několika způsoby. Jedním z nich je dán rychlou změnou zkratového proudu až do ustálené hodnoty, čili vyšší zkratové proudy indukují v kovových částech stroje vyšší napětí. Toto indukované napětí působí negativně na samotnou indukčnost vinutí. Indukované napětí ve vodivých částech stroje také vytváří lokální ohřevy. Naproti tomu klidová frekvenční metoda pracuje s malými změnami, a tudíž přechodové jevy jsou nevýznamné oproti náhlému zkratu. Avšak chyba určení parametrů je nezanedbatelná. Bylo by zapotřebí detailnější metody rozkladu celkové impedance na jednotlivé parametry a následné určení neoptimálnějších velikostí jalové a činné části.

Pro ověření správnosti výpočtu algoritmu, byl program použit pro vyhodnocení parametrů na dvou dalších synchronních strojích společností Škoda Electric a.s.

1) Příčná osa pro motor X1

$$L_1 = 0,0058[H]$$

$$L_{aq} = 0,0685[H]$$

$$L_{lq} = 0,0504[H]$$

$$L_{2q} = 0,0359[H]$$

$$R_{lq} = 0,1240[\Omega]$$

$$R_{2q} = 0,1265[\Omega]$$

2) Příčná osa pro motor X2

$$L_1 = 0,0081[H]$$

$$L_{ad} = 0,1009[H]$$

$$L_{ld} = 0,0741[H]$$

$$L_{fd} = 0,0504[H]$$

$$R_{ld} = 0,758061[\Omega]$$

$$R_{2d} = 1,010581[\Omega]$$

Velikosti výkonů obou strojů zatajena z důvodu ochrany firemního tajemství. Jediná informace o motorech naznačuje, že stroj X1 má několik desítek až stovek watt vyšší výkon než motor X2.

Závěr

V úvodním textu k této diplomové práci byl naznačen obsah jednotlivých kapitol. Problematika ověřování parametrů synchronních strojů, respektive synchronních generátorů, je velmi obsáhlé téma, které by vydalo na další pokračování. Je třeba zhodnotit každou situaci a jednotlivé typy generátorů z hlediska velikosti, výkonu, typem zátěže, rychlostí otáčení rotoru a mnoho dalších hledisek.

V rámci diplomové práce byl proměřován pouze jeden pohon. Pro představu o nastavení jednotlivých poměrů parametrů vinutí statoru a rotoru, bylo by potřeba zahrnout v rámci výpočtu další upřesňující parametry, které by významně dokreslovaly celkovou analýzu. Dále by bylo možno lépe utvořit představy o chování synchronního stroje v různých situacích, které by mohly nastat při provozu a tím případným rizikům předcházet.

V první části práce byla popsána metoda klidové frekvenční odezvy velmi podrobně. Vycházel jsem z originálu normy IEEE Guide for Test Procedures for Synchronous Machines [1], která je velmi rozsáhlá a popisuje velké množství různých podob proměření synchronních motorů. Byly tedy vybrány pouze pasáže týkající se dané problematiky.

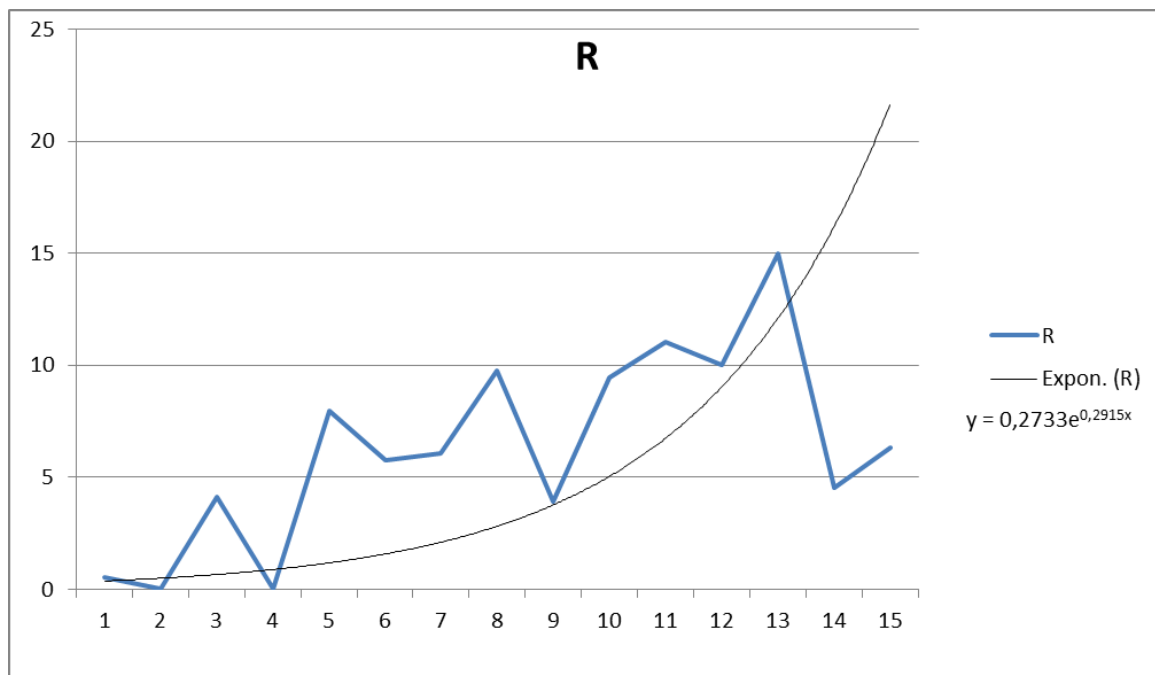
V druhé kapitole byl představen návrh algoritmu použitý pro samotné řešení parametrů stroje. Byla snaha, aby princip výpočtů byl snadno pochopitelný i pro osoby, které zcela nepronikly do oblasti elektrických pohonů a programování. Algoritmus je navržen jako prototyp, na kterém je potřeba dále pracovat a zdokonalovat. Tyto vylepšení závisí na spolupráci a zkušenostech pracovníků zkušeben elektrických pohonů, kteří by přinesli poznatky z praxe.

Simulace programu uvedená ve třetí kapitole potvrzuje, že program počítá parametry generátoru s velmi malou odchylkou. Test správnosti výpočtu je proveden na zdánlivém výkonu odměřeném přímo na stroji, tudíž následný dopočet výkonu generátoru z parametrů odhaluje určité nedokonalosti výsledků. Chyba pro pět prvních měření se vyznačuje ustálením hodnot. Z dalšího průběhu odchylek zdánlivých výkonů je evidentní, že i přechodový děj chyby se ustálil a výpočty jsou správné.

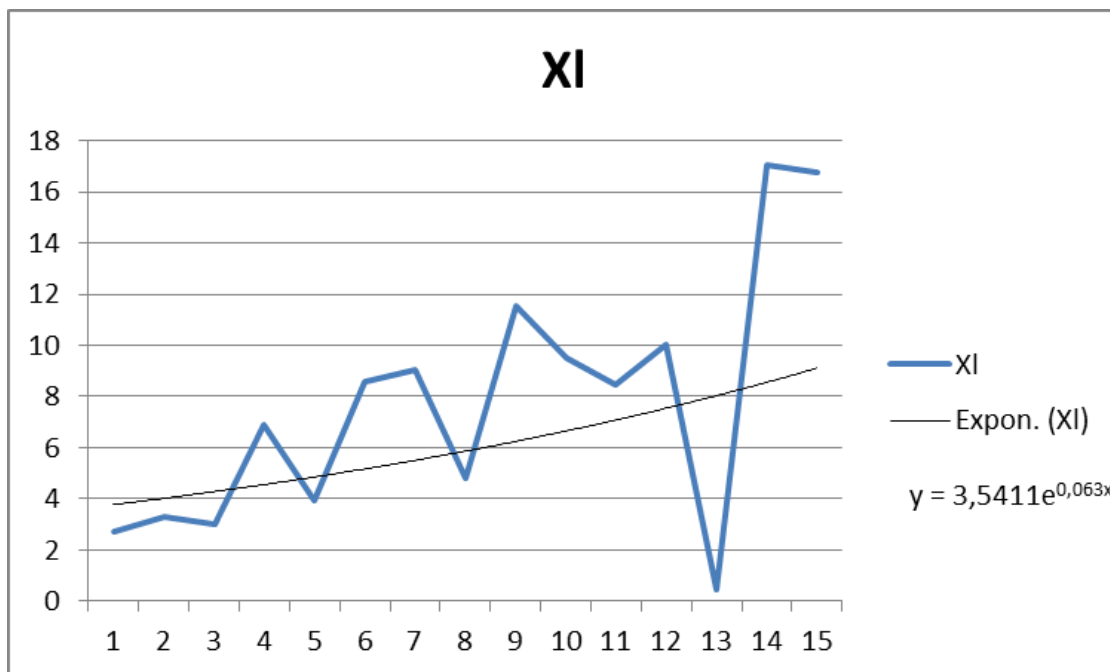
Poslední díl diplomové práce spočíval v porovnání dvou rozdílných metod analýzy parametrů pohonu. Pro co nejefektivnější srovnání probíhala měření na stejném synchronním generátoru. Metoda náhlého zkratu je rozebrána v poslední kapitole, avšak kompletní řešení nebylo potřeba, jelikož k určení hodnoty celkové jalové části impedance lze přihlídnout

k ustálené velikosti zkratového proudu v jedné fázi vinutí. Konečné chyby a rozdíly obou metod se pohybovaly v rozmezí jednotek procent. Tento výsledek předčil všechna očekávání a předpoklady. S přihlédnutím ke srovnání metod lze říci, že algoritmus pracuje správně a reálné parametry synchronního generátoru jsou v intervalu výsledných hodnot s rozmezím několika procent. Za viníkem nedokonalostí výsledků jsou vnitřní vzájemné indukčnosti kostry, vinutí, těla rotoru, přívody napájení statoru a rotoru a mnoho dalších faktorů následováno samotným výpočtem v rámci programu. Odstranění by vyžadovalo nasazením vhodnější metody rozkladu veličin, či upřesnění vstupních dat. Zároveň je zde aplikace navrženého algoritmu na náhodné dvojici synchronních strojů s výkony několik stovek wattů. Z grafu odchylek na obrázku v příloze 7 je evidentní, že při vyšším počtu vstupních dat se počáteční chyba eliminovala a její přechodový děj se výrazně zkrátil.

Přílohy



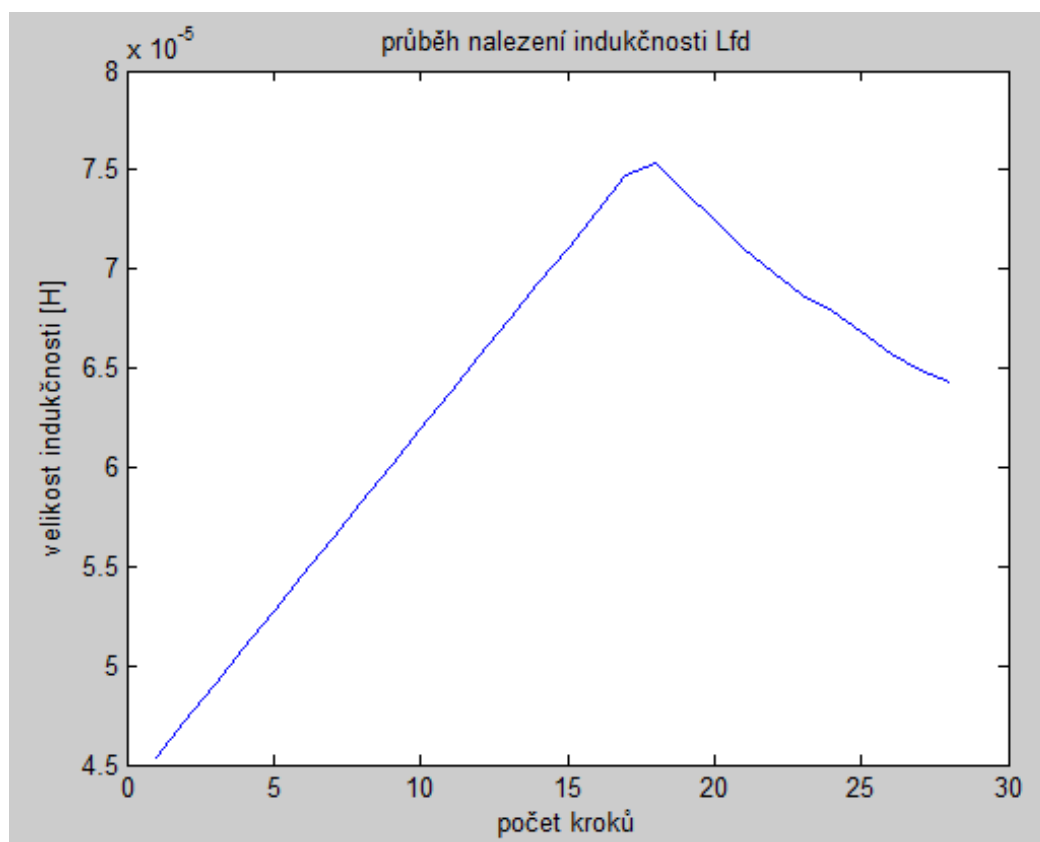
Příloha 1: Průběh nalezení hodnoty činného odporu po aproximaci.



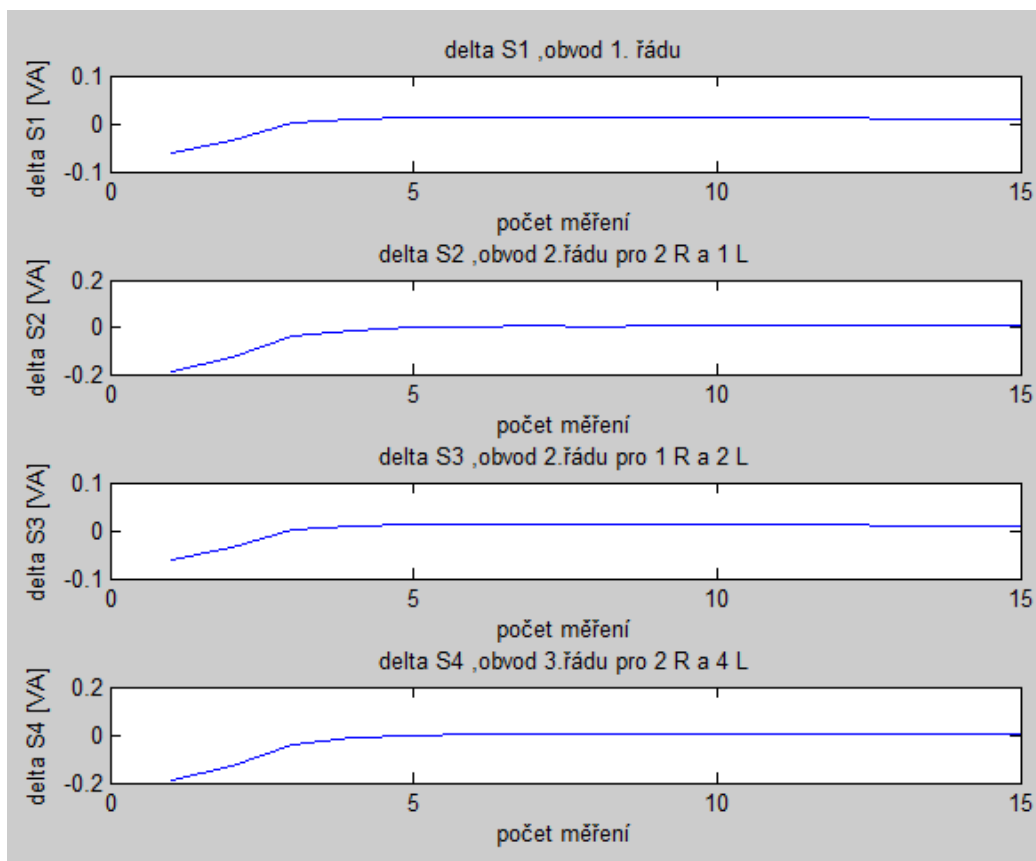
Příloha 2: Křivka jalové části impedance před a po aproximaci.



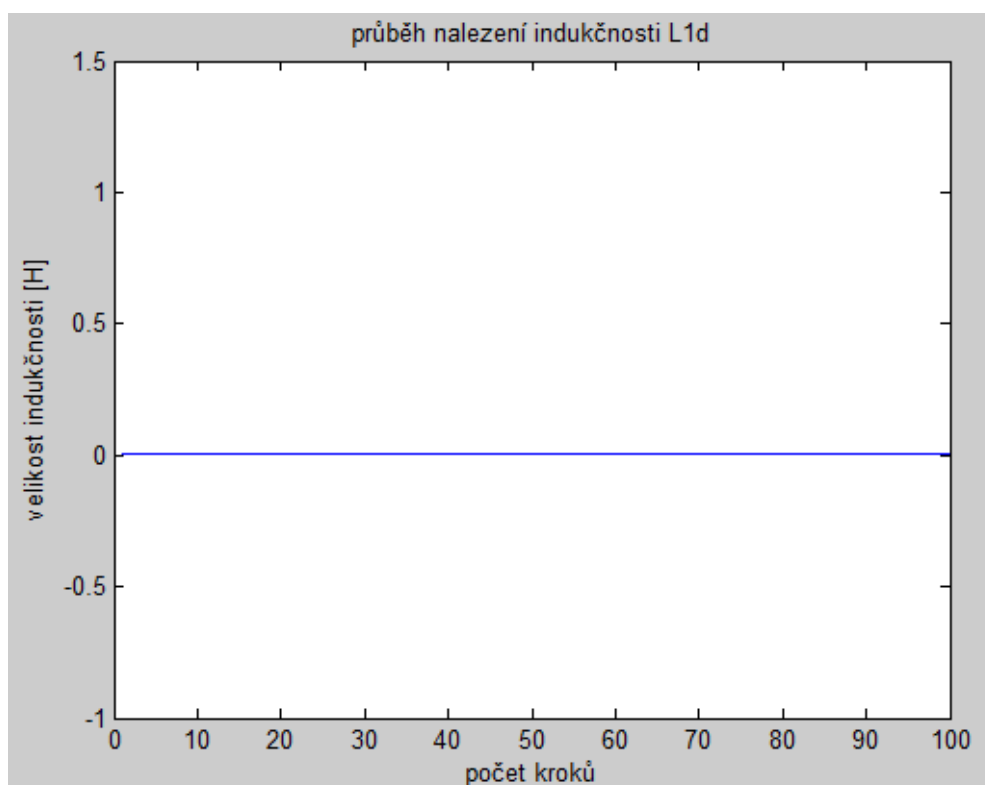
Příloha 3: Průběh nalezení střední hodnoty jalové části impedance.



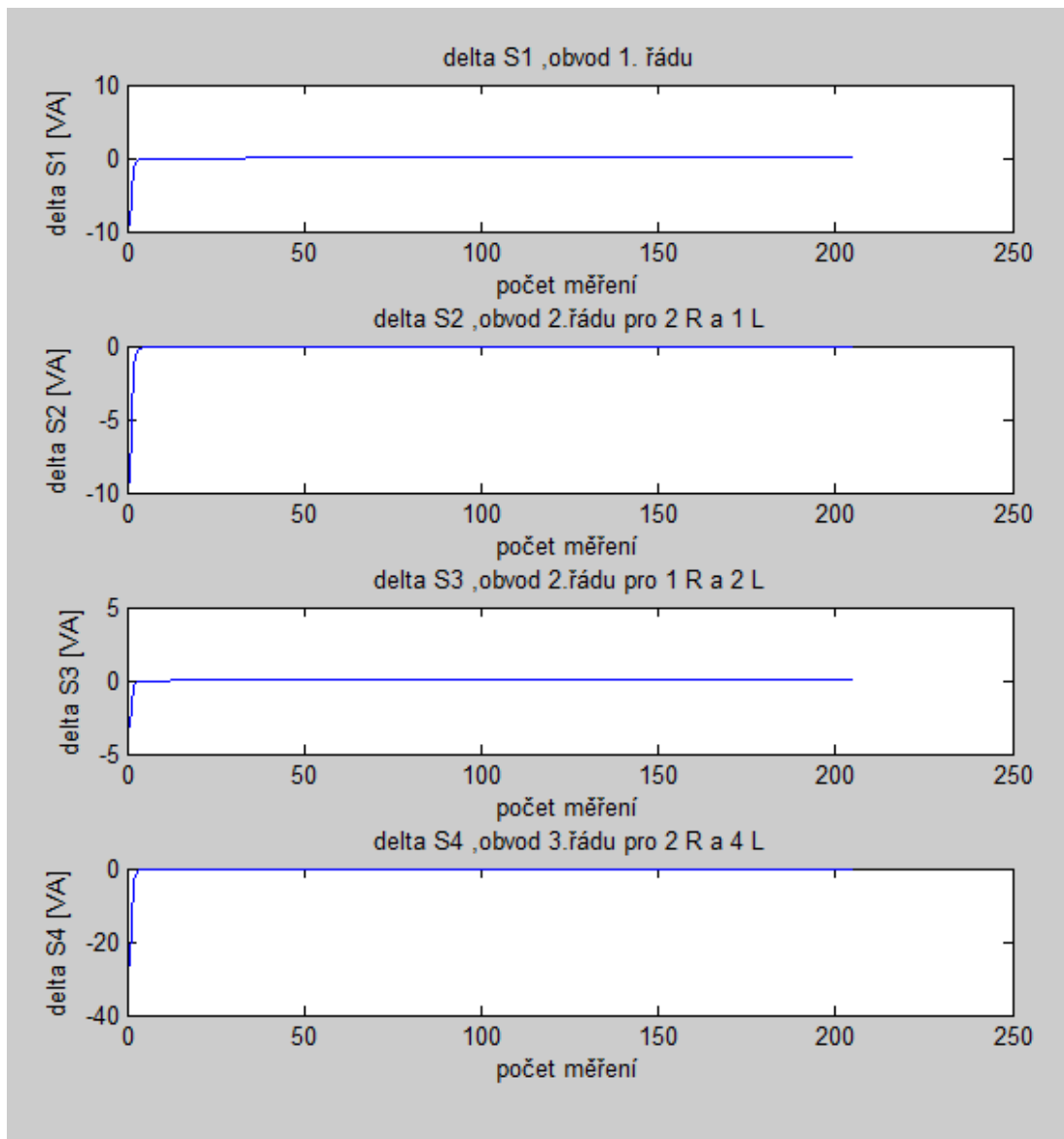
Příloha 4: Průběh nalezení indukčnosti L_{fd} .



Příloha 5: Průběhy odchylek zdánlivých výkonů pro různé varianty algoritmu.



Příloha 6: Průběhy hledání hodnoty indukčnosti L_{1d} .



Příloha 7: Průběhy odchylek zdánlivých výkonů pro různé varianty algoritmu aplikovaného na stroji X2.

Seznam zkratek

$\Delta\psi_d(s) [Wb]$	Magnetický sprážený tok podélné osy jako funkce frekvence.
$\Delta\psi_q(s) [Wb]$	Magnetický sprážený tok podélné osy jako funkce frekvence.
$G(s)$	Přenosová funkce magnetického toku po Laplaceově transformaci.
$\Delta e_{fd} [V]$	Elektrické napětí buzení.
$L_d [H]$	Indukčnost vyjádřená jako poměr Laplaceových obrazů kotevního magnetického toku na podélné ose a pole kotevního vinutí při zapojení nakrátko.
$\Delta i_{d,q} [A]$	Proudy v podélném, příčném směru.
$F [N]$	Síla magnetického pole.
$\omega [rad \cdot s^{-1}]$	Úhlová rychlost.
$L_{fd} [H]$	Indukčnost budícího vinutí.
$L_{f12d} [H]$	Vzájemná indukčnost mezi statorem a rotorem, případně rotorovou klecí nakrátko, používanou jako tlumící vinutí a na rozběh z nulových otáček.
$L_{ad} [H]$	Vzájemná indukčnost mezi statorem a budícím vinutím v podélné ose, jedná se o zpětný účinek indukovaných napětí a

	proudů, proto je tato hodnota záporná.
$L_{mfd} [H]$	Vzájemná indukčnost mezi budícím vinutím a obvodem rotoru a tlumících tyčí kolem rotoru.
$Z_d(s) [\Omega]$	Podélná impedance jako funkce frekvence.
$R_a [\Omega]$	Odpor statoru.
$Z_q(s) [\Omega]$	Příčná impedance jako funkce frekvence.
$s [Hz]$	Frekvence.
$Z_{af0} [\Omega]$	Impedance přenosu energie na rotor přes vzduchovou mezeru.
$Z_{fao} [\Omega]$	Přenosová matice impedance pro přenos energie do rotoru přes vzduchovou mezeru.
$Z_{arm} [\Omega]$	Impedance kotvy.
$L_l [H]$	Indukčnost vstupní tlumivky.
$L_{aq} [H]$	Vzájemná indukčnost mezi státorem a budícím vinutím v podélné ose, jedná se o zpětný účinek indukovaných napětí a proudů, proto je tato hodnota záporná.
$L_{1q} [H]$	Indukčnost stroje příčné osy náhradního schéma.
$L_{2q} [H]$	Indukčnost stroje příčné osy náhradního schéma.

$R_{1q} [\Omega]$	Činný odpor stroje příčné osy náhradního schéma.
$R_{2q} [\Omega]$	Činný odpor stroje příčné osy náhradního schéma.
$L_{1d} [H]$	Indukčnost stroje podélné osy náhradního schéma.
$L_{fd} [H]$	Indukčnost budícího vinutí.
$R_{1d} [\Omega]$	Činný odpor stroje podélné osy náhradního schéma.
$R_{fd} [\Omega]$	Činný odpor budícího vinutí stroje podélné osy.
$Q [VAr]$	Jalový výkon.
$P [W]$	Činný výkon.
$S [VA]$	Zdánlivý výkon.
$\cos\varphi [-]$	Účinnost.

Zdroje

- [1] *Norma IEEE Guide for Test Procedures for Synchronous Machines*. New York: IEEE, 2009.
- [2] VERBEECK, Jef. *STANDSTILL FREQUENCY RESPONSE MEASUREMENT AND IDENTIFICATION METHODS FOR SYNCHRONOUS MACHINES*. VRIJE UNIVERSITEIT BRUSSEL FACULTEIT TOEGEPASTE WETENSCHAPPEN Dienst Algemene Electriciteit & Instrumentatie (ELEC) Brussels Belgium, 2008.
- [3] PROF. ING. BARTOŠ, CSC., Václav a Bohumil DOC. ING. SKALA, PH.D. *Měření na elektrických strojích*. Plzeň: Západočeská univerzita, 2006.