

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA ELEKTROENERGETIKY A EKOLOGIE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Vyšetření vlivu vzduchové mezery při kontrole
izolace rotoru za provozu stroje**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2015/2016

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Jiří LÁBADI**
Osobní číslo: **E14N0017K**
Studijní program: **N2644 Aplikovaná elektrotechnika**
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**
Název tématu: **Vyšetření vlivu vzduchové mezery při kontrole izolace rotoru za provozu stroje**
Zadávací katedra: **Katedra elektroenergetiky a ekologie**

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

1. Popište stručně princip měření při kontrole mezizávitového zkratu za chodu stroje. Uveďte a popište naměřené průběhy a vyhodnocení zkoušek.
2. Model řezu stroje použijte pro výpočet indukovaného napětí ve snímací cívce. Výpočet proveďte pomocí vhodného SW pro MKP metodu.
3. Rotor pro výpočtové účely natáčejte např. pomocí FEMM a LUA skriptu.
4. Porovnejte naměřené a vypočtené průběhy. Výsledky shrňte, porovnejte a okomentujte.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího
Rozsah kvalifikační práce: 40 - 60 stran
Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická
Seznam odborné literatury:


Student si vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího práce.

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

Datum zadání diplomové práce: **15. října 2015**
Termín odevzdání diplomové práce: **16. května 2016**


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




Doc. Ing. Karel Noháč, Ph.D.
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2015

Abstrakt

Tato diplomová práce popisuje vliv vzduchové mezery při kontrolách izolace rotoru hydrogenerátoru na přítomnost mezizávitových zkratů za provozu stroje. Jsou zde popsány způsoby měření mezizávitových zkratů v budícím vinutí rotorů synchronních generátorů za provozu stroje, jejich průběh a vyhodnocení. Dále je vypracován model řezu stroje s vyjádřenými póly, který je použit pro výpočet magnetického toku ve vzduchové mezeře metodou konečných prvků v programu FEMM. Ze simulovaných dat je stanovena závislost průběhu magnetického toku na velikosti vzduchové mezery. V závěru práce jsou diskutovány výsledky naměřených a simulovaných dat pro různé velikosti vzduchové mezery.

Klíčová slova

Synchronní generátor, rotor s vyniklými póly, mezizávitová izolace, mezizávitový zkrat, měřicí cívka, FEMM, lua skript, indukované napětí, magnetický indukční tok

Abstract

The aim of this thesis is to determine the impact of variability of the air gap above individual poles of the rotor of the synchronous machine. At first the diagnostic method of measuring interturn short on generator in operation is described. The waveform and evaluating is described too. Next the model of magnetic circuit is made to calculating of magnetic flux in the air gap by FEMM software. The waveform of induced voltage is calculated from magnetic flux. Finally the result of thesis are discuss.

Key words

Synchronous generator, rotor with salient poles, turn insulation, short-turn, measuring coil, FEMM, lua script, induced voltage

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této diplomové práce, je legální.

.....
Podpis

V Plzni dne 15.5.2016

Jiří Lábadi

Poděkování

Tímto bych velice rád poděkoval firmě 1.SERVIS-ENERGO, s.r.o. za pomoc při zpracování této diplomové práce, zvláště pak Ing. Z. Křelovcovi za připomínky a cenné rady. Dále děkuji vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Bohumilovi Skalovi, Ph.D. za profesionální rady a metodické vedení práce.

Obsah

ÚVOD	10
1 DIAGNOSTIKA MEZIZÁVITOVÉ IZOLACE ZA CHODU STROJE.....	11
1.1 PRINCIP DIAGNOSTIKY MEZIZÁVITOVÉ IZOLACE ZA CHODU STROJE	11
1.2 ZPRACOVÁNÍ NAMĚŘENÝCH DAT	12
1.2.1 Naměřená data na stroji s hladkým rotorem.....	12
1.2.2 Naměřená data na stroji s vyjádřenými póly	15
1.3 ZPŮSOB VYHODNOCENÍ MEZIZÁVITOVÝCH ZKRATŮ	16
1.3.1 Stroj s hladkým rotorem.....	16
1.3.2 Stroj s rotorem s vyjádřenými póly	19
2 MODEL STROJE PRO VYHODNOCENÍ MAGNETICKÉ INDUKCE VE VZDUCHOVÉ	
MEZEŘE.....	22
2.1 MODEL MAGNETICKÉHO OBVODU HYDROGENERÁTORU VTA 515/195x16.....	22
2.2 TVORBA MATEMATICKÉHO MODELU.....	22
3 VLIV VZDUCHOVÉ MEZERY NA MAGNETICKÝ TOK	26
3.1 PROVEDENÍ A VÝSLEDEK SIMULACE	26
3.2 SROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ SIMULACE.....	27
4 VALIDACE NAMĚŘENÝCH VÝSLEDKŮ.....	31
4.1 PŘÍPRAVA NAMĚŘENÝCH HODNOT PRO POROVNÁNÍ	31
4.2 POROVNÁNÍ NAMĚŘENÝCH A SIMULOVANÝCH HODNOT	33
4.3 NÁVRH ÚPRAVY VYHODNOCENÍ MEZIZÁVITOVÉ IZOLACE BEZ ZNALOSTI VZDUCHOVÉ MEZERY	37
ZÁVĚR	38
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	40
PŘÍLOHY	1

Seznam symbolů a zkratk

U_i	indukované napětí
mV.....	milivolt
ms	milisekunda
ϕ	magnetický indukční tok
Wb.....	Webber
T.....	Tesla
R_m	magnetický odpor
l	délka
S.....	plocha
μ_0	permeabilita vakua
μ_r	relativní permeabilita
H	Henry

Úvod

Předkládaná diplomová práce je zaměřena na vyšetření vlivu vzduchové mezery při diagnostice izolačního systému rotoru za provozu stroje. Navazuje na moji bakalářskou práci, která popisovala praktické měření mezizávitových zkratů rotoru za chodu stroje na elektrárně Lipno I pomocí navržené měřicí cívky.

Práce je členěna na čtyři části, kde první část popisuje princip měření při kontrole mezizávitového zkratu za chodu stroje. Je uveden a popsán naměřený průběh indukovaného napětí na měřicí cívce u stroje s dvoupólovým rotorem a u stroje s rotorem s vyniklými póly. Je vysvětleno zpracování průběhu pro vyhodnocení mezizávitových zkratů. Následně je předvedeno vyhodnocení naměřeného průběhu. V druhé části je představen model řezu stroje s vyniklými póly. Indukce ve vzduchové mezeře je na tomto modelu počítána metodou konečných prvků programem FEMM 4.2. Ve třetí části je pomocí LUA skriptu natáčen model rotoru tak, aby byl simulován průběh indukce ve vzduchové mezeře nad celým polem skutečného rotoru. V poslední části práce je popsáno zpracování naměřeného průběhu. Je provedeno srovnání magnetické indukce nad póly se známou velikostí vzduchové mezery a simulovanými póly. Dále je navržena úprava kritéria pro vyhodnocení mezizávitových zkratů.

1 Diagnostika mezizávitové izolace za chodu stroje

Diagnostika mezizávitových zkratů rotoru za chodu stroje patří mezi metody, které lze provádět on-line během provozu stroje. Data pro diagnostiku mezizávitové izolace jsou získávány ze sondy umístěné ve vzduchové mezeře. Signál ze snímací sondy může být připojen k monitorovacímu systému elektrárny a specializovaným programem trvale sledován a vyhodnocován. Častěji se však provádí on-line funkční diagnostika dle provozovatelem stanoveného časového harmonogramu, např. 1x ročně. Sledují se změny v naměřených hodnotách, ze kterých se dále posuzuje vznik nových nebo rozvoj stávajících mezizávitových zkratů v rotorovém vinutí. Z průběhu indukovaného napětí snímaného sondou lze určit počet mezizávitových zkratů a jejich umístění.

1.1 Princip diagnostiky mezizávitové izolace za chodu stroje

Sonda obsahuje cívku, která snímá změnu magnetického toku za čas ve vzduchové mezeře dle vztahu:

$$U_i = -\frac{d\Phi}{dt} \quad [V] \quad (1)$$

Nasnímané indukované napětí na cívce je derivací magnetického toku, který je vybuzen rotorovým proudem za chodu stroje a je úměrný počtu aktivních závitů rotorových cívek. V případě mezizávitového zkratu je vybuzen menší magnetický tok. Velikosti magnetických toků vybuzených jednotlivými cívkami se porovnají. Z procentuálních rozdílů velikosti toků lze posuzovat přítomnost a počet mezizávitových zkratů. Ideální provozní podmínky jsou při chodu stroje naprázdno s buzením na jmenovité hodnoty.

Sonda je vhodným způsobem přichycena na zub plechů, popř. na statorový klín. Konstrukce samotné sondy je dána především velikostí vzduchové mezery. Vzhledem k malé vzduchové mezeře u hydroalternátorů je kladen důraz na to, aby byla sonda co možná nejnižší. V opačném případě by mohlo dojít k poškození sondy při montáži rotoru. U hydroalternátorů nezáleží na tom, v jaké vzdálenosti od rotoru bude sonda umístěna, protože je snímán hlavní magnetický tok.

U turboalternátorů je situace odlišná. Vzhledem k uspořádání cívek není snímán hlavní, ale rozptylový magnetický tok nad jednotlivými cívkami. To spolu s velkou vzduchovou mezerou klade vyšší nároky na umístění sondy. Sonda musí být umístěna co nejbližší k tělu rotoru. Z tohoto důvodu jsou sondy pro turboalternátory vysoké. Popř. je jejich konstrukce řešena tak, aby je bylo možné sklápat během montáže a demontáže rotoru.

Průběh samotného měření je u turboalternátoru i hydroalternátoru obdobný. Propojovací vodič mezi vývody ze sondy a připojovací svorky pro osciloskop je veden tak, aby byl v bezpečné vzdálenosti od vinutí statoru a nedocházelo k elektrickému namáhání izolace vinutí. V případě velkého budícího proudu rotoru (u strojů nad 100 MW) vzniká na připojovacích svorkách indukované napětí v řádu desítek voltů. V těchto případech se v závislosti na použitém osciloskopu připojuje napěťový dělič. Velikost signálu se děličem nastavuje tak, aby byl co nejefektivněji využit zvolený rozsah napěťového vstupu osciloskopu. Galvanické oddělení se nepoužívá. Obvod mezi sondou a osciloskopem není nikde uzemněn a osciloskopy používané k tomuto měření bývají bateriové. Zaznamenaný průběh je zpracován vhodným softwarem.

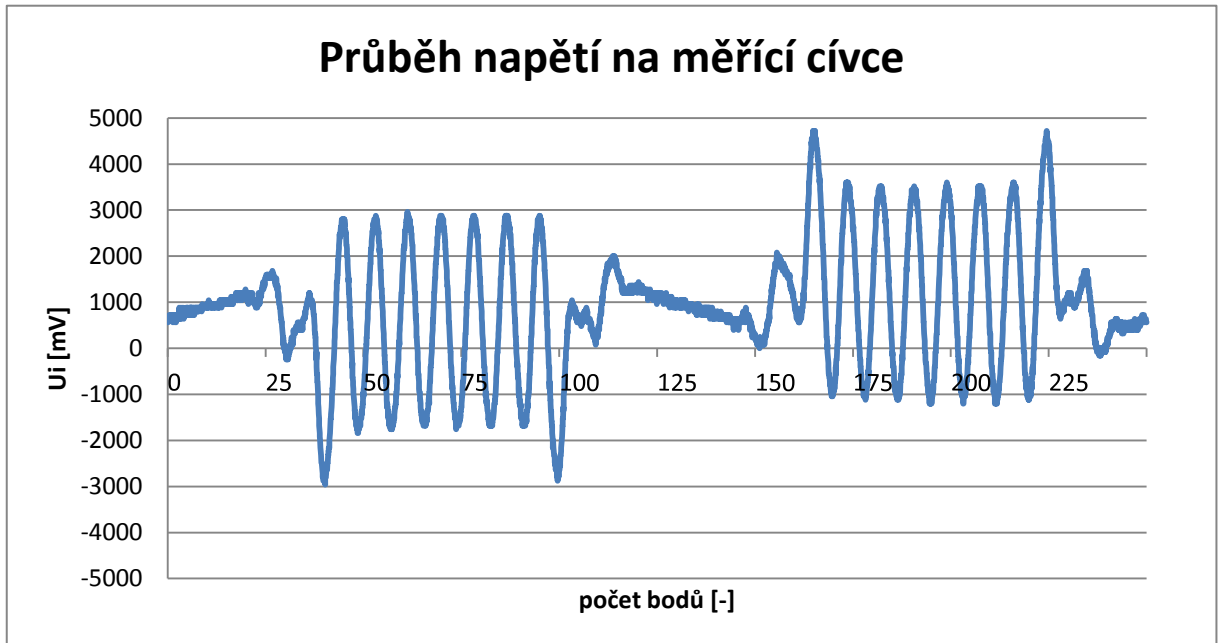
1.2 Zpracování naměřených dat

Součástí procesu vyhodnocení je příprava průběhu, kdy je mj. provedena rychlá Fourierova transformace pro zjištění, případně odstranění harmonických, které mohou pocházet z jiných zdrojů. Tvar průběhu indukovaného napětí u turboalternátoru a hydroalternátoru je značně rozdílný. Proto je každý průběh pro vyhodnocení zpracován odlišným postupem. Vyhodnocení u obou typů strojů probíhá obdobně. Avšak každý výrobce nástrojů pro diagnostiku mezizávitových zkratů používá jinou metodiku zpracování naměřených dat a jejich vyhodnocení.

1.2.1 Naměřená data na stroji s hladkým rotorem

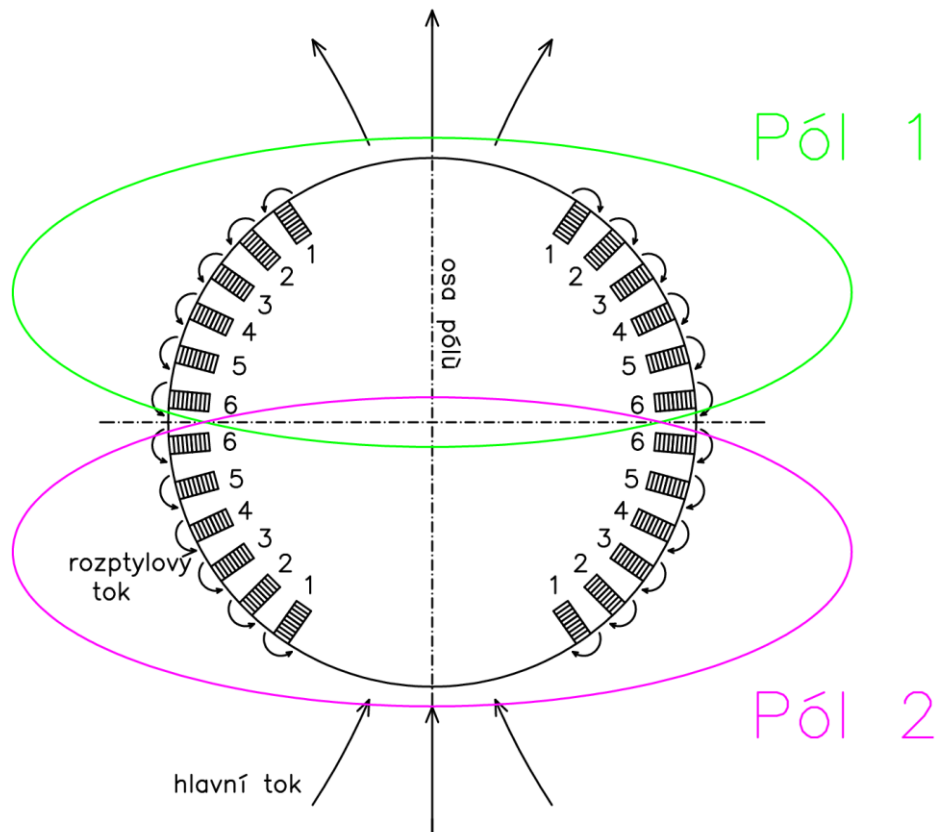
U stroje s hladkým rotorem je snímán rozptylový tok nad každou cívkou. Na grafu č. 1 je vidět celkem dvacet peaků rozdělených po deseti do dvou skupin. Každá skupina vyjadřuje jednu stranu cívky na jedné straně rotoru. Deset peaků tak odpovídá pěti celým cívkám. Nad první a poslední (pátou) cívkou je rozptylový tok

výrazně nižší (viz peaky u bodu 25, 100, 150 a 225). Tyto cívky jsou často zajištěny klíny z magneticky vodivého materiálu, ve kterém se uzavře velká část rozptylového toku. To významně ovlivňuje výsledky měření. V některých případech se proto takto zaklínované cívky nevyhodnocují.



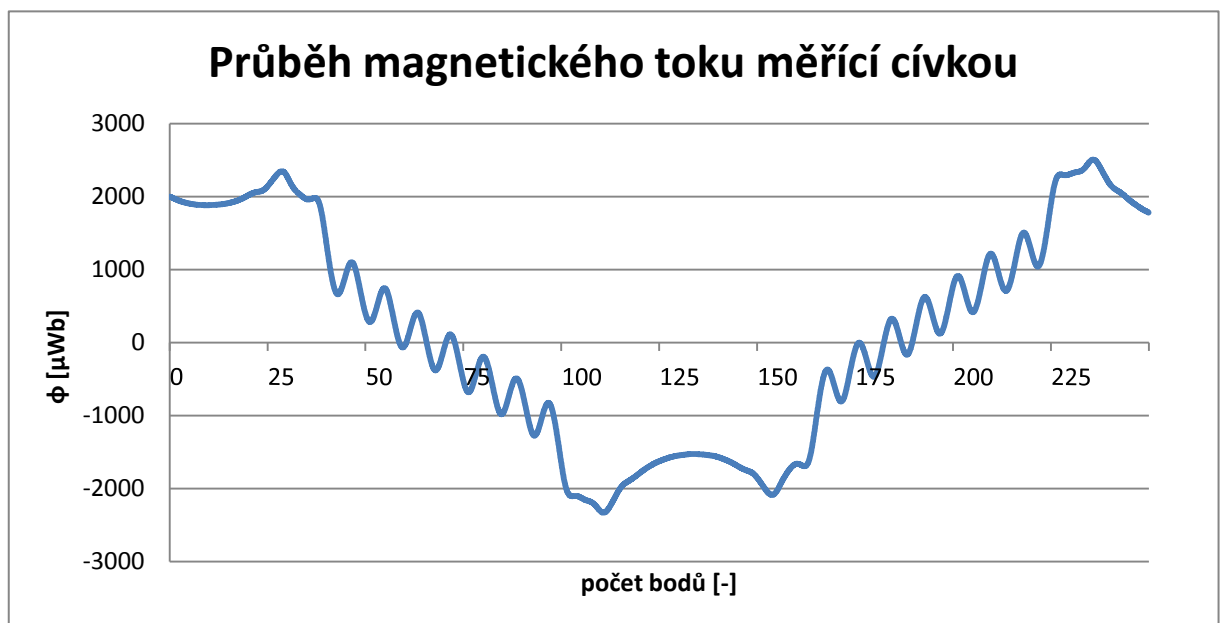
Graf č. 1: Průběh indukovaného napětí na sondě pro dvoupólový stroj

Před vyhodnocení dat jsou indikované skupiny peaků přiřazeny k pólu. Přestože je diagnostikovaný rotor jen dvoupólový, není zřejmé, která skupina peaků odpovídá pólu č. 1, a která pólu č. 2. Pro určení čísla pólu je průběh indukovaného napětí podle času integrován. Z orientace maximální hodnoty toku lze určit směr budícího proudu. Analogicky lze ze známého směru budícího proudu určit číslo zkoumaného pólu. V případě, že je na vývod cívky pólu č. 1 připojen kladný pól buzení a vývod cívky pólu č. 2 záporný, rotor vytvoří magnetický tok o známém směru, viz obrázek 1. Na grafu č. 2 jsou po integraci hodnoty kolem bodu 125 (± 50) záporné. Z toho lze usoudit, že pět cívky nalevo a pět cívky napravo od bodu 125 na grafu č. 1 odpovídá pólu č. 2.



Obrázek 1: Rozložení magnetických toků u hladkého rotoru

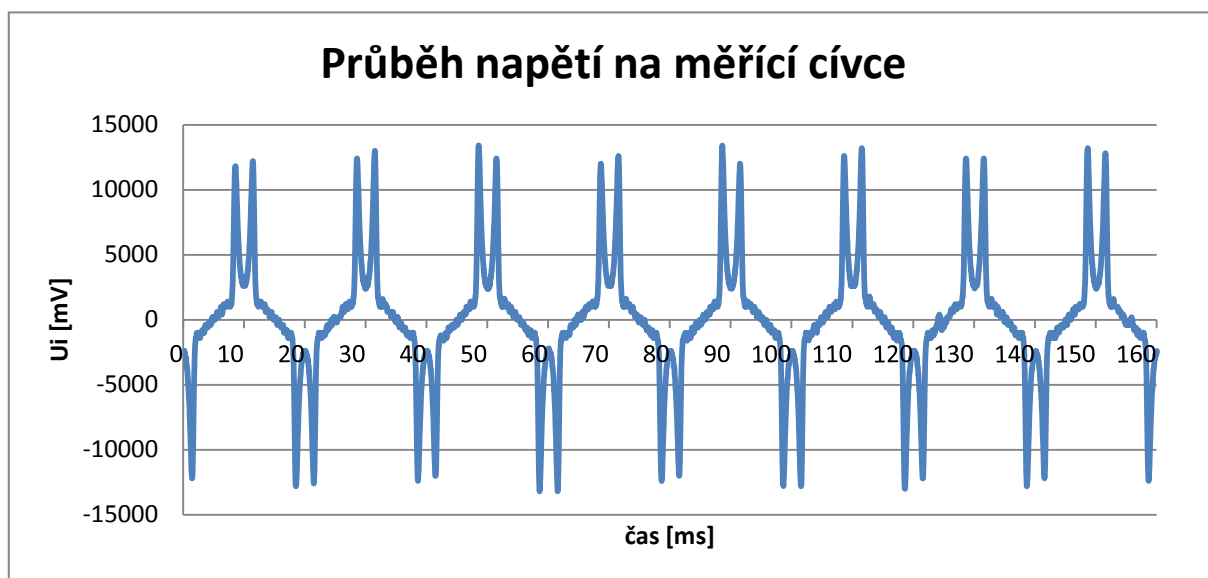
Při identifikaci mezizávitového zkratu je tak určena poškozená cívka i strana na které se zkrat vyskytuje. Během opravy rotoru se cívka s identifikovaným mezizávitovým zkratem důkladně prověří.



Graf č. 2: Průběh magnetického toku měřicí cívkou pro dvupólový stroj

1.2.2 Naměřená data na stroji s vyjádřenými póly

V grafu č. 3 je zobrazen průběh indukovaného napětí na měřící sondě pro 16-ti pólový rotor hydrogenerátoru.



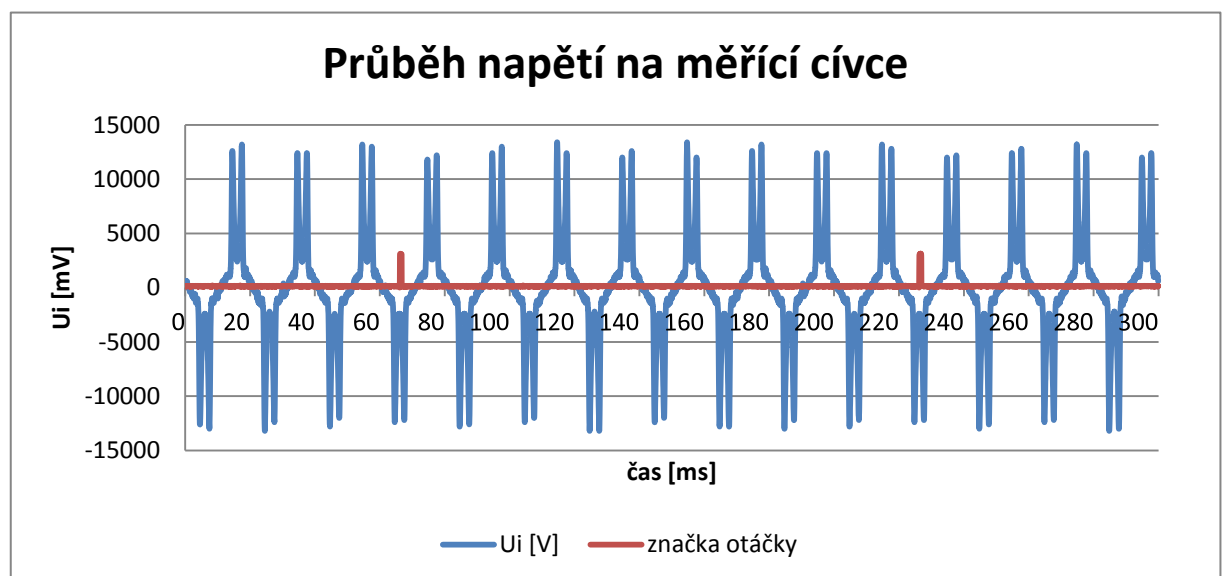
Graf č. 3: Průběh indukovaného napětí na sondě pro 16-ti pólový stroj

Na rozdíl od průběhu rozptylového magnetického toku u hladkého rotoru je zaznamenán převážně hlavní magnetický tok daný jednotlivými póly. Peaky u tohoto průběhu neodpovídají zcela rozptylovému toku rotoru. Značí největší změnu magnetického toku v okamžiku, kdy se hlava pólu začíná vzdalovat od měřící sondy. V té chvíli je napětí rovno součtu hlavního a rozptylového toku. Samotnému rozptylovému toku odpovídají hodnoty mezi peaky (např. mezi 7,5 a 12,5 ms). Průchod napětí nulou odpovídá středu pólu, kde je změna toku nejmenší (rovna nule). V čase mezi 2,5 až 7,5 ms je patrné zvlnění, které se periodicky opakuje po 10 ms. Zvlnění kopíruje tyče amortizéru na každém pólu. Je minimální, protože byl průběh zaznamenán při chodu naprázdno, kdy se do amortizéru neindukuje žádný proud. V těchto podmínkách amortizér nevytváří žádné magnetické pole, které by působilo na výsledky měření. Proto není měření při chodu naprázdno zatíženo chybou, která může nastat vlivem různých režimů chodu stroje.

Jak je patrné z grafu č. 4 u vícepólových strojů nelze ze zaznamenaného průběhu určit, v jaké poloze se rotor nacházel. Nelze tedy určit časové rozpětí, které připadá fyzicky prvnímu pólu. K určení polohy rotoru se využívá čidla polohy. Čidlo polohy

může být součástí měřicí sondy nebo se použije externí čidlo. Pokud je diagnostikovaný stroj vybavený čidlem měření otáček rotoru, může být signál z čidla připojen k záznamovému zařízení. Signál od čidla polohy se projeví jako jeden impulz za dobu jedné otáčky na druhém zaznamenaném průběhu, viz červený průběh na grafu č. 4. Časová osa na osciloskopu musí být nastavena tak, aby byly snímány dva peaky. Mezi těmito špičkami je zaznamenána jedna otáčka rotoru. Od známé polohy značky na rotoru je určeno číslo pólu, nad kterým je značka umístěna.

Průběh na grafu č. 4 byl naměřen na elektrárně Lipno I. Vzhledem ke konstrukčnímu uspořádání stroje bylo, jako čidlo polohy, použito externí laserové čidlo. Reflexní značka byla umístěna na sběracím kroužku v místě odpovídající středu mezi hlavami pólů č. 1 a 2.



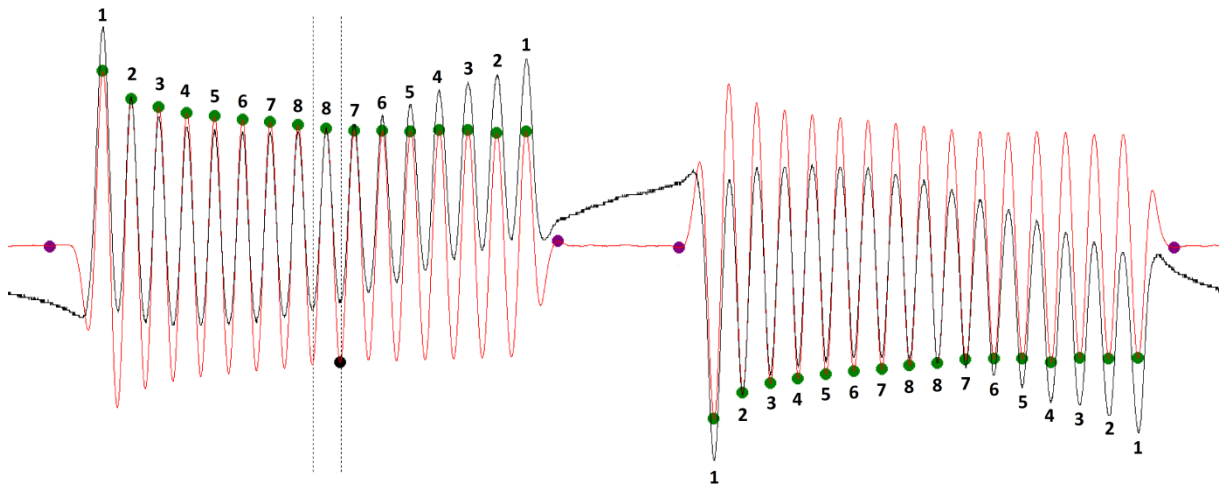
Graf č. 4: Průběh indukovaného napětí na sondě pro šestnáctipólový stroj

1.3 Způsob vyhodnocení mezizávitových zkratů

1.3.1 Stroj s hladkým rotorem

Rozptylový magnetický tok nad každou rotorovou cívkou vybudí v měřicí sondě indukované napětí. Toto indukované napětí je přímo úměrné počtu aktivních závitů dané cívky. Maximální hodnoty napětí nad stejnými cívkami se porovnají a vypočtou se jejich procentní rozdíly (porovnává se první cívka pólu 1 a první cívka pólu 2). Pro zjištění maximálních hodnot se určí lokální extrémů naměřeného průběhu. Počet extrémů musí být roven počtu vyhodnocovaných pólů. Od nalezených extrémů

se postupuje na obě strany po stejných intervalech (interval je dán šířkou naměřeného průběhu). Nalezené extrémy jsou přiřazeny číslům drážek a následně se provede srovnání cívek.

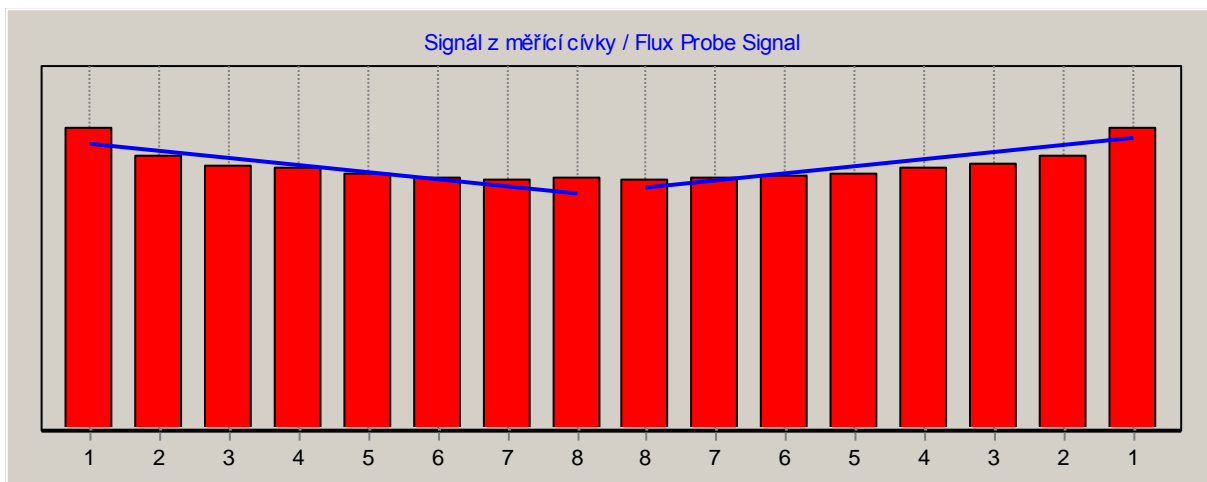


Obrázek 2: Vybrané extrémy napětí na měřicí cívce

Na obrázku 2 je zpracovaný průběh s určenými extrémy z programu pro vyhodnocení mezizávitových zkratů GenTest – 1.SERVIS-ENERGO, s.r.o. Černý průběh je zaznamenaný. Deformace tvaru je dána hlavním magnetickým tokem. Místo, kde se mění orientace hlavního toku (prochází nulou) je, v případě chodu stroje naprázdno, přesně mezi cívkami č. 8. Se změnou zatížení stroje (od nulového po maximální výkon) se průchod toku nulou pohybuje podél časové osy od osmé cívky k první. To ve výsledku ohýbá průběh obdobně jako je na obrázku 2. Stejně účinky má na tvar průběhu charakter zátěže. Induktivní charakter zátěže posune průchod toku nulou stejně jako zvyšování výkonu (od osmé k první cívce), kapacitní charakter k ose rotoru. Změnou buzení se mohou snadno simulovat stejné provozní podmínky při každém měření. [1]

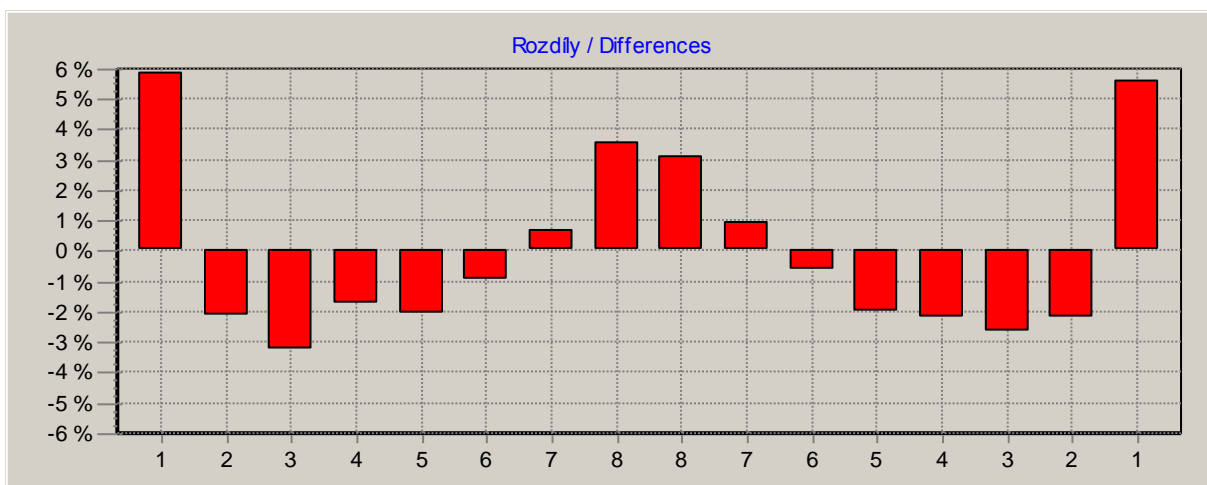
Černý bod značí průchod magnetického toku nulou. Ideální poloha černého bodu je mezi cívkami č. 8. Červenou barvou je vykreslen průběh po tom, co je odstraněn posun magnetického toku způsobený provozním stavem. Následně jsou na základě znalostí dělení rotorových drážek určeny maxima (extrémy funkce) jednotlivých toků pro vyhodnocení (zelené body). Minima (fialové body) slouží ke kontrole, zda

program našel správné meze pro určení maxim. V případě že program neoznačí správné extrémů, musí být označeny ručně.



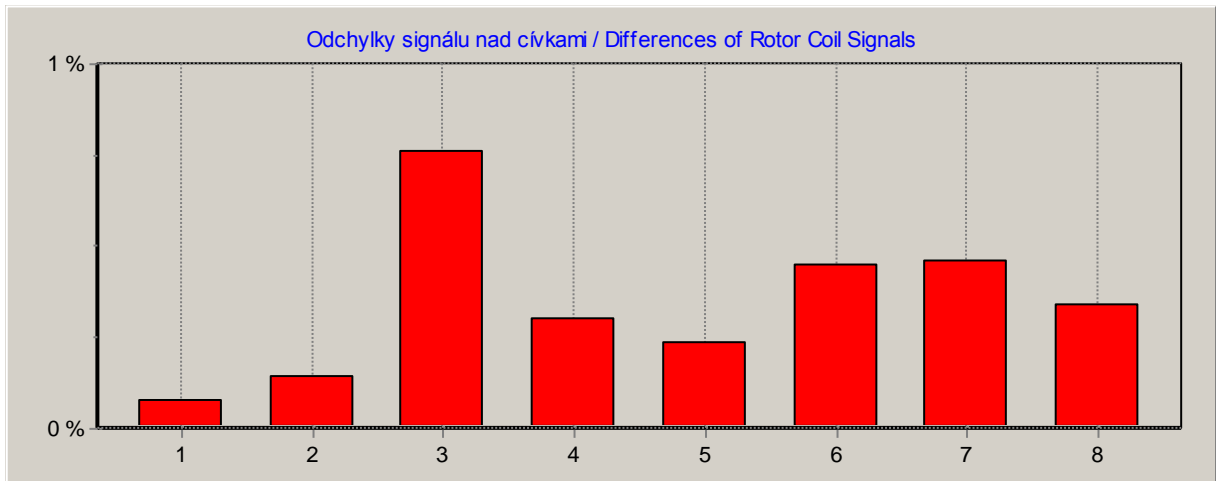
Obrázek 3: Nalezené extrémů funkce s proložením

Obrázek 3 ukazuje velikosti označených extrémů na jedné cívce. Rozdíly velikosti nalezených extrémů na první a druhé cívce jsou porovnávány mezi sebou.



Obrázek 4: Rozdíly mezi cívkami pólů

Rozdíly porovnávaných cívek jsou zobrazeny na obrázku 4. Zde je vidět větší rozptylový tok nad krajními cívkami. Dále jsou v procentech vyjádřeny odchylky signálu mezi vyhodnocovanými cívkami, viz obrázek 5.



Obrázek 5: Procentní rozdíly mezi jednotlivými cívkami

Kritérium pro vyhovující výsledek bylo stanoveno na 4,35%. Rozdíl cívek u žádné nepřekračuje stanovené kritérium. Rotor je bez mezizávitového zkratů.

Stanovení kritéria vyhodnocení

Z počtu závitů jedné cívky se stanoví kritérium – procentní podíl jednoho závitů. Pokud je procentní rozdíl ve velikosti změřeného indukovaného napětí vyšší než vypočtené kritérium, na cívce s nižším magnetickým tokem je mezizávitový zkrat. Vztah pro určení kritéria:

$$k = \frac{100 \%}{\text{počet závitů}} = \frac{100}{23} = 4,35\% \quad (2)$$

Zmíněný způsob měření a vyhodnocení mezizávitových zkratů neodhalí symetricky umístěný zkrat. Při symetricky umístěném mezizávitovém zkratu je rozdíl v indukovaném napětí u stejných cívek obou pólů minimální. To je zásadní nevýhoda tohoto způsobu diagnostiky. Pro eliminaci této chyby se doporučuje porovnat aktuální výsledky testu s výsledky strojů stejného typu (popř. stejných parametrů a provedení).

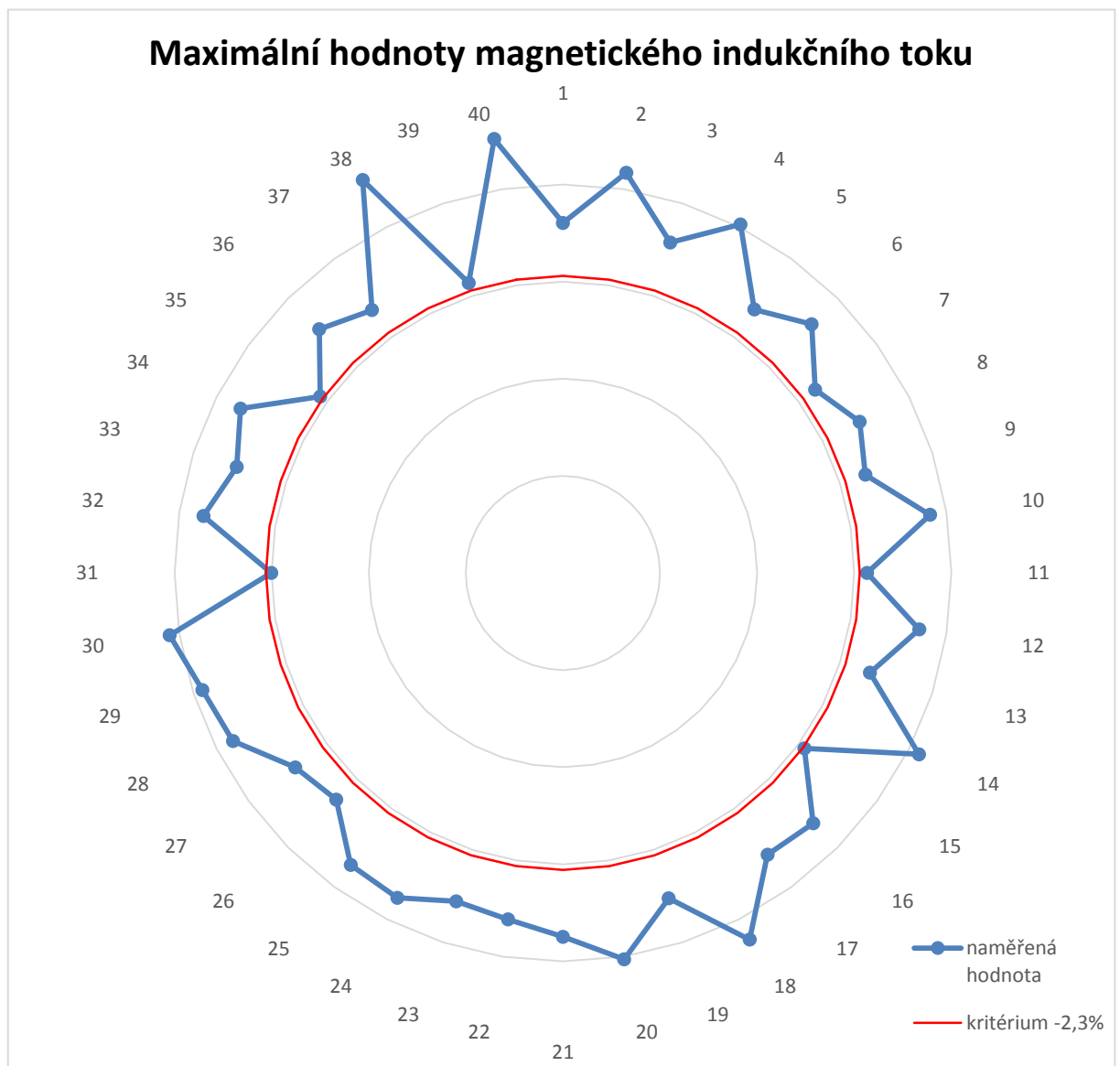
1.3.2 Stroj s rotorem s vyjádřenými póly

Počet mezizávitových zkratů na pólu se vyhodnocuje na základě velikosti vybuzeného magnetického toku. Celý průběh magnetického toku ve vzduchové mezeře je rozdělen dle počtu pólů rotoru. Ke každému průběhu toku je přiřazeno

odpovídající číslo pólu. Z maxim toků jednotlivých pólu se vypočte střední hodnota, od které je odečteno kritérium pro vyhodnocení. Kritérium je stanoveno stejně jako u strojů s hladkým rotorem.

Pro elektrárnu Kamýk (průběh na grafu č. 5) vychází kritérium jednoho závitu 2,3%. Žádná z naměřených hodnot by neměla klesnout pod tuto stanovenou mez.

$$k = \frac{100 \%}{\text{počet závitů}} = \frac{100}{43} = 2,3\% \quad (3)$$



Graf č. 5: Velikosti magnetického toku nad jednotlivými póly

Srovnáním velkého počtu pólů se eliminuje chyba vyhodnocení, která může nastat v případě symetrického zkratu u turborotoru. Vzhledem ke skutečnosti, že každá vodní elektrárna je osazena jedinečným typem hydrogenerátoru je důležité srovnávat nově získané hodnoty s předešlými a sledovat trend změn v čase. Pro sledování trendu v čase je vhodné, pokud to provozní podmínky dovolí, měřit vždy při stejných provozních podmínkách stroje.

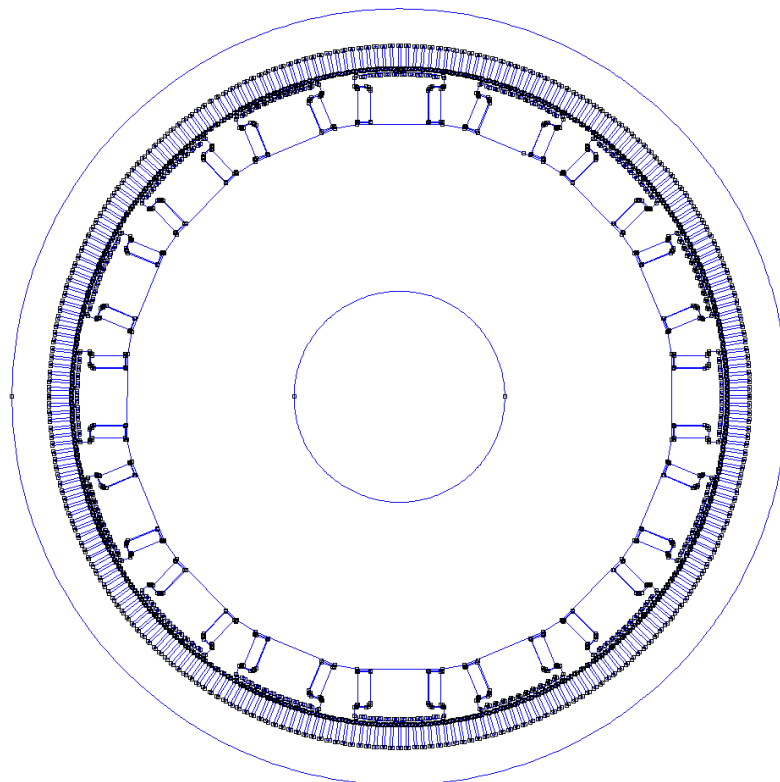
2 Model stroje pro vyhodnocení magnetické indukce ve vzduchové mezeře

2.1 Model magnetického obvodu hydrogenerátoru VTA 515/195x16

Pro výpočet průběhu indukovaného napětí v měřicí cívce byl vytvořen model magnetického obvodu stroje typu VTA 515/195 x 16, výrobce ČKD Energo. Dva stroje tohoto typu pracují na elektrárně Lipno I. Na stroji č. 2 byla v minulosti instalována cívka pro měření mezizávitových zkratů rotorového vinutí. Po dokončení generální opravy bude zprovozněno měření mezizávitových zkratů i na stroji č. 1. Vzhledem k již provedeným měřením budou simulované výsledky využity pro pozdější porovnání, popř. verifikaci naměřených dat.

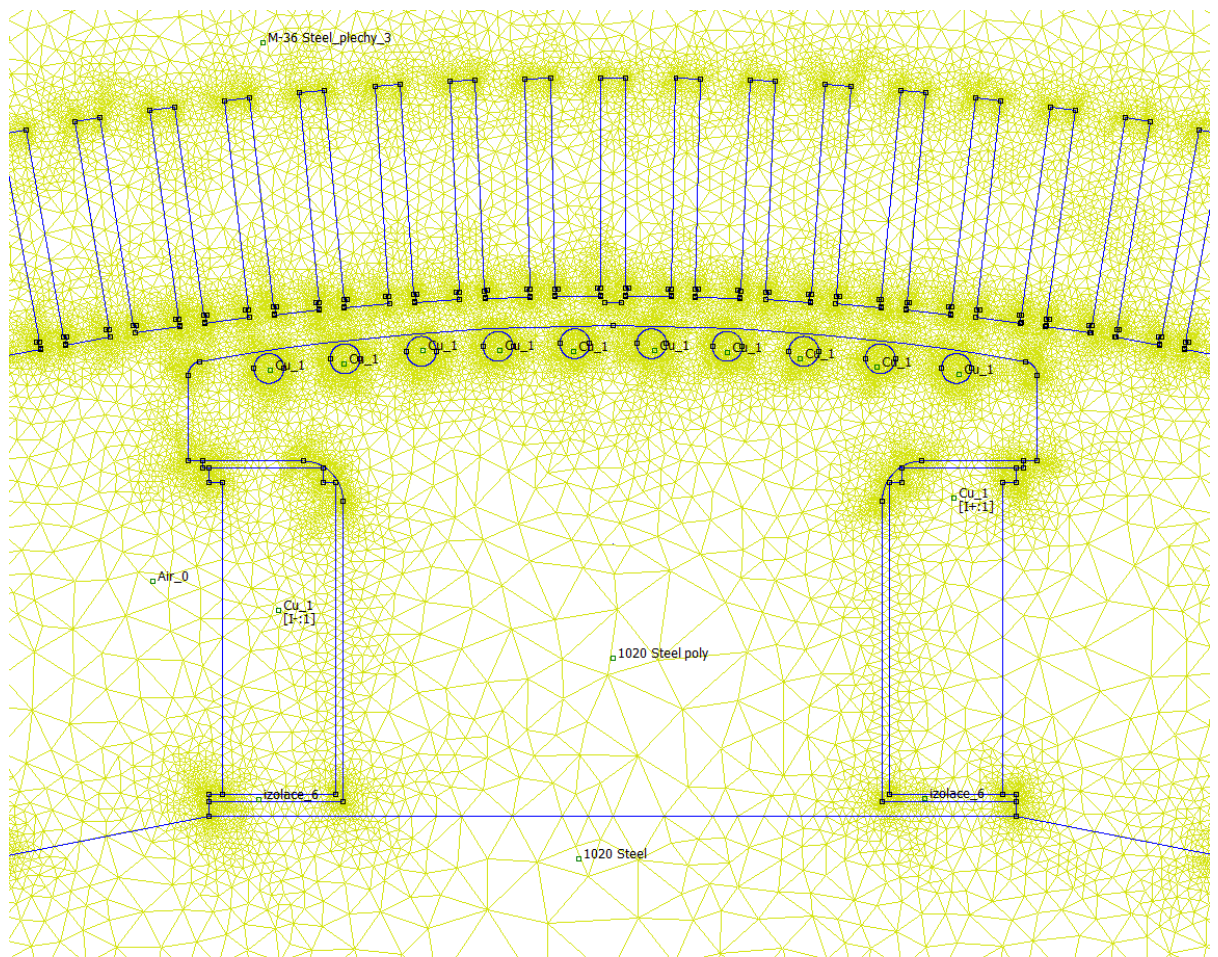
2.2 Tvorba matematického modelu

S cílem co nejpřesnějších výsledků byl dle dostupné technické dokumentace a skutečných rozměrů vypracován 2D model magnetického obvodu. Konstrukce modelu byla vytvořena v programu AutoCAD Lt a ve formátu dxf naimportována do programu FEMM 4.2.



Obrázek 6: Základní geometrie magnetického modelu

Po importu modelu byl zadán materiál pro jednotlivé díly magnetického obvodu. Materiál statorových plechů byl vybrán z databáze FEMM. Byl zvolen materiál M-36 – Silicon Steel. Skutečně použité plechy jsou typu M350 – 50A. Dostupná B-H charakteristika plechů M350 – 50A byla po 0,1 T pouze do 1,5 T. Charakteristika zvoleného materiálu byla s krokem 0,05 T až do hodnoty 2,3 T. Intenzita magnetického pole byla v bodech známých indukci u obou charakteristik víceméně shodná. Lišila se maximálně o jednotky procent. Tloušťka plechů byla zadána dle skutečnosti, 0,5 mm. Materiál plechů rotoru byl zvolen s obdobnými vlastnostmi, jako mají konstrukční oceli používané pro tyto aplikace. Síla rotorových plechů byla nastavena na 1 mm. Do modelu byla zahrnuta izolace rotorového vinutí a měděné tyče amortizéru.



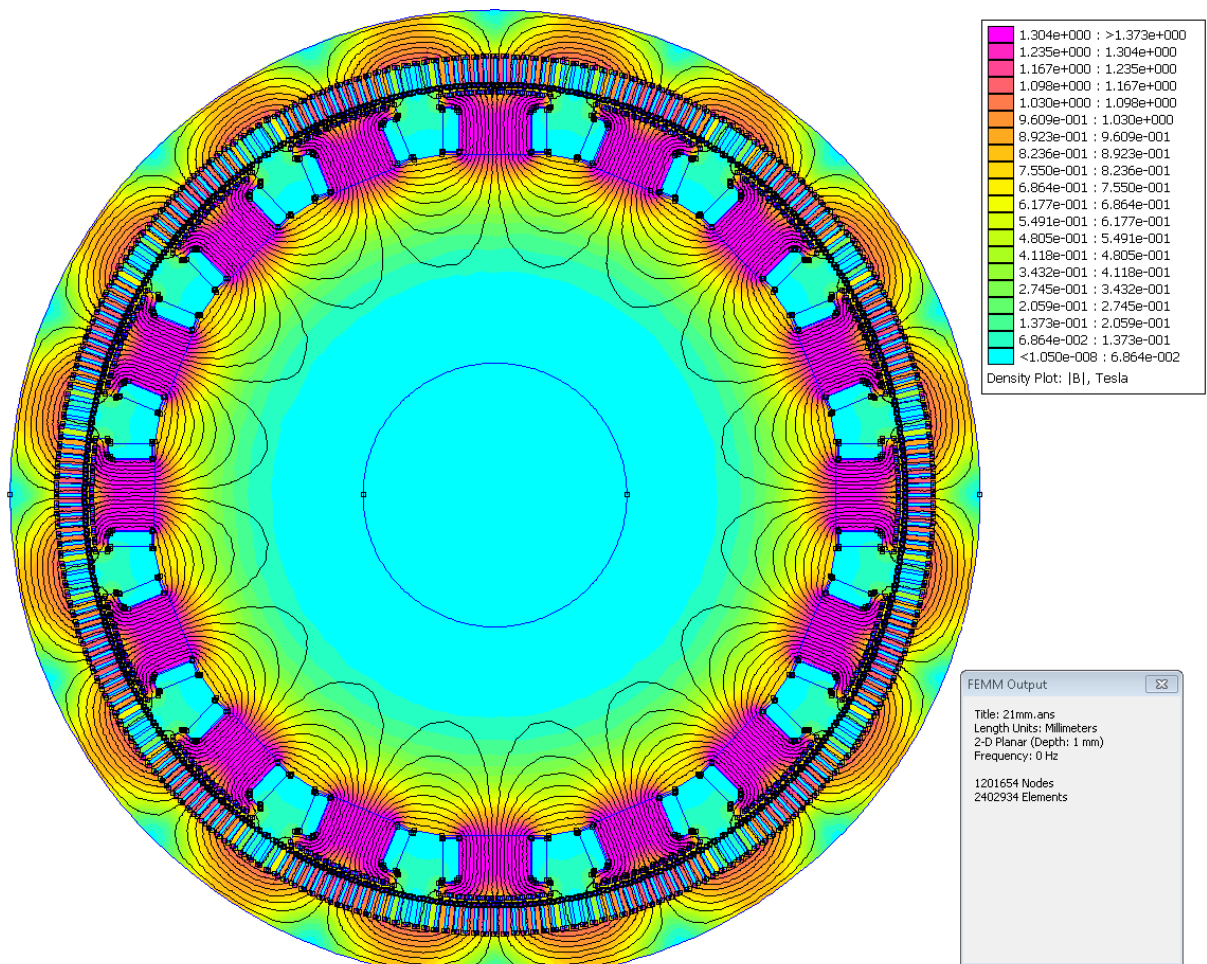
Obrázek 7: Zobrazení rozložení sítě s uvedenými materiály

Dle dostupného výpočtu stroje byla ověřena velikost magnetického toku, indukce v pólu rotoru a ve vzduchové mezeře, viz tabulka 1. Při výpočtu je uvažovaná velikost vzduchové mezery 22 mm.

	Magnetická indukce v pólu rotoru [T]	Magnetická indukce ve vzduchové mezeře [T]	Magnetický indukční tok [Wb]
Vypočtená	1,471	1,021	0,8994
Simulovaná	1,382	0,976	0,9174

Tabulka 1: Porovnání simulovaných a vypočtených hodnot

Porovnáním simulovaných hodnot s hodnotami z výpočtu stroje bylo ověřeno, že parametry zadané simulace odpovídají teoretickým parametrům stroje.



Obrázek 8: Zobrazení magnetického toku

Pro zjednodušení modelu nebyl při simulaci uvažován vliv reakce kotvy. Model při výpočtu odpovídal stroji v chodu naprázdno. Ve stejném režimu chodu bylo také

prováděno fyzické měření. Ze změřené charakteristiky naprázdno byl odečten budící proud 315,63 A při jmenovitém napětí statoru 15 000 V. Hodnota proudu naprázdno dle výpočtu stroje je 342,92 A. Model počítal s jedním závitěm na pólu, skutečný počet závitů je 46. Budící proud naprázdno byl pro zadávání do modelu přepočten na ampéřzávity.

$$U_m = N \cdot I = 46 \cdot 315,63 = 14\,519 \text{ Az} \quad (4)$$

Přesnost řešitele byla nastavena na hodnotu $1 \cdot 10^{-8}$. Minimální úhel pro řešení sítě byl nastaven 30° .

3 Vliv vzduchové mezery na magnetický tok

Vzhledem ke konstrukčním a montážním možnostem nejsou póly na jhu rotoru namontovány identicky. Tento fakt ovlivňuje velikost výsledné vzduchové mezery ve stroji. Magnetický tok vybuzený různě usazeným pólem vytvoří v měřicí cívce různé veliké indukované napětí. Při vyhodnocení mezizávitových zkratů pak může vzniknout rozdíl mezi porovnávanými toky, který není způsobený vadou na vinutí rotoru, ale právě nepravidelnou velikostí vzduchové mezery.

Vycházelo se z teoretického předpokladu Hopkinsonova zákona, že s rostoucí velikostí vzduchové mezery poroste magnetický odpor a bude klesat magnetický tok, dle vztahu [2]:

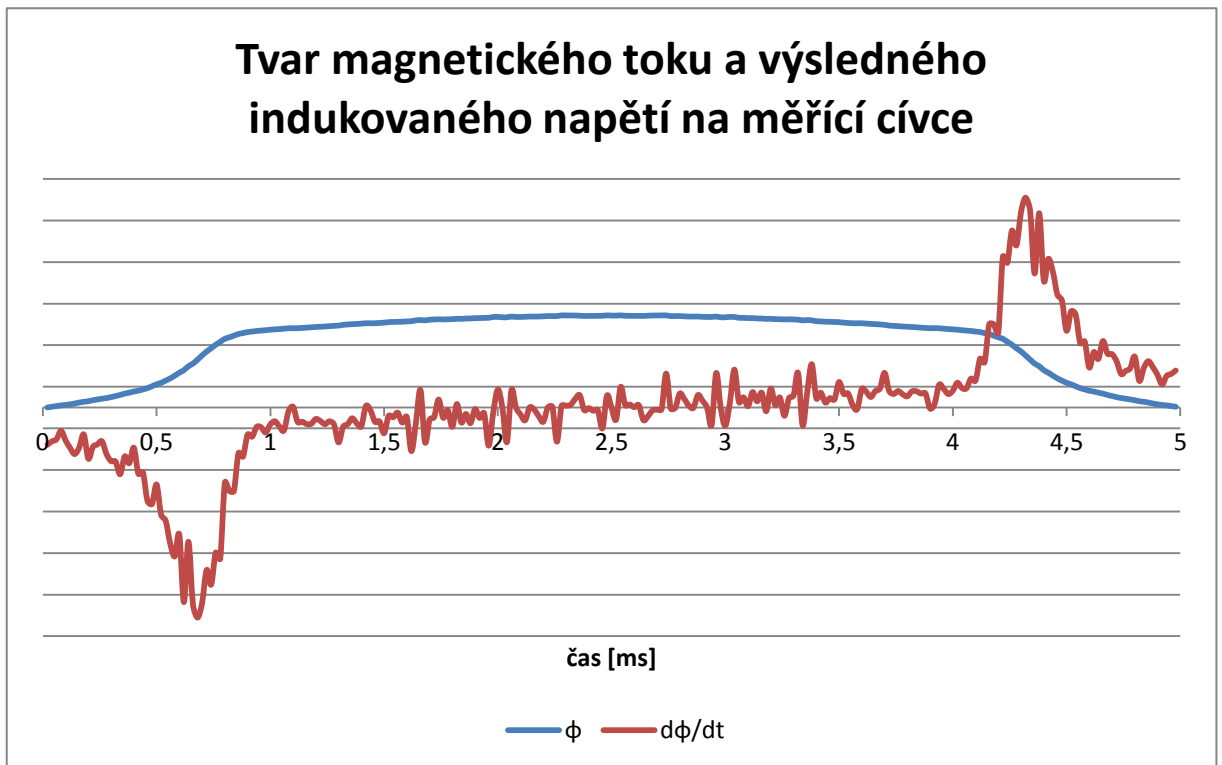
$$R_m = \frac{1}{\mu_0 \cdot \mu_r} \cdot \frac{l}{S} [H^{-1}] \quad (5)$$

Způsobem jak ověřit vliv vzduchové mezery na výsledný magnetický tok, bylo vytvořit několik modelů s různou velikostí vzduchové mezery.

3.1 Provedení a výsledek simulace

V modelu byl vytvořen blok součástí zahrnující všechny reálně rotující díly. Pro simulaci skutečného otáčení rotoru byl blok natáčen pomocí lua skriptu, viz příloha A. V místě klínu (2170 mm od osy rotoru) byla vytvořena kontura o délce 12 mm. Hloubka modelu byla nastavena na 60 mm. Rozměry odpovídají výšce a šířce jádra skutečné měřicí cívky. Na začátku je zvolen krok, o který se rotor otočí. Krok byl zvolen tak, aby odpovídal počtu naměřených hodnot osciloskopem při reálném měření. Dále skript vytvoří 4 výstupní soubory pro hodnotu magnetické indukce, magnetického toku, plochy odpovídající ploše skutečné cívky a hodnotu posunu. Pro každý krok byla provedena analýza a zápis požadovaných hodnot. Při provádění simulace skript uložil do každého souboru 250 hodnot pro jeden pól. Průběh simulovaného magnetického toku vybuzeného jedním pólem je zobrazen na grafu č. 6. Dále je zobrazeno teoretické indukované napětí na jednom závitě měřicí cívky. Indukované napětí bylo vypočteno derivací simulovaného průběhu magnetického

toku podle času. Průběh simulovaného napětí odpovídá průběhu napětí zaznamenaného osciloskopem.



Graf č. 6: Průběh simulovaného toku a derivace toku podle času

Po provedení derivace magnetického toku vychází špičky napětí na jeden závit měřící cívky 0,38 V. po vynásobení počtem závitů instalované měřící cívky má výsledná špička hodnotu napětí 15,2 V. Tato hodnota odpovídá skutečně naměřenému napětí, které je 13,8 V. Velikost derivovaného toku na grafu č. 6 byla pro ilustraci upravena.

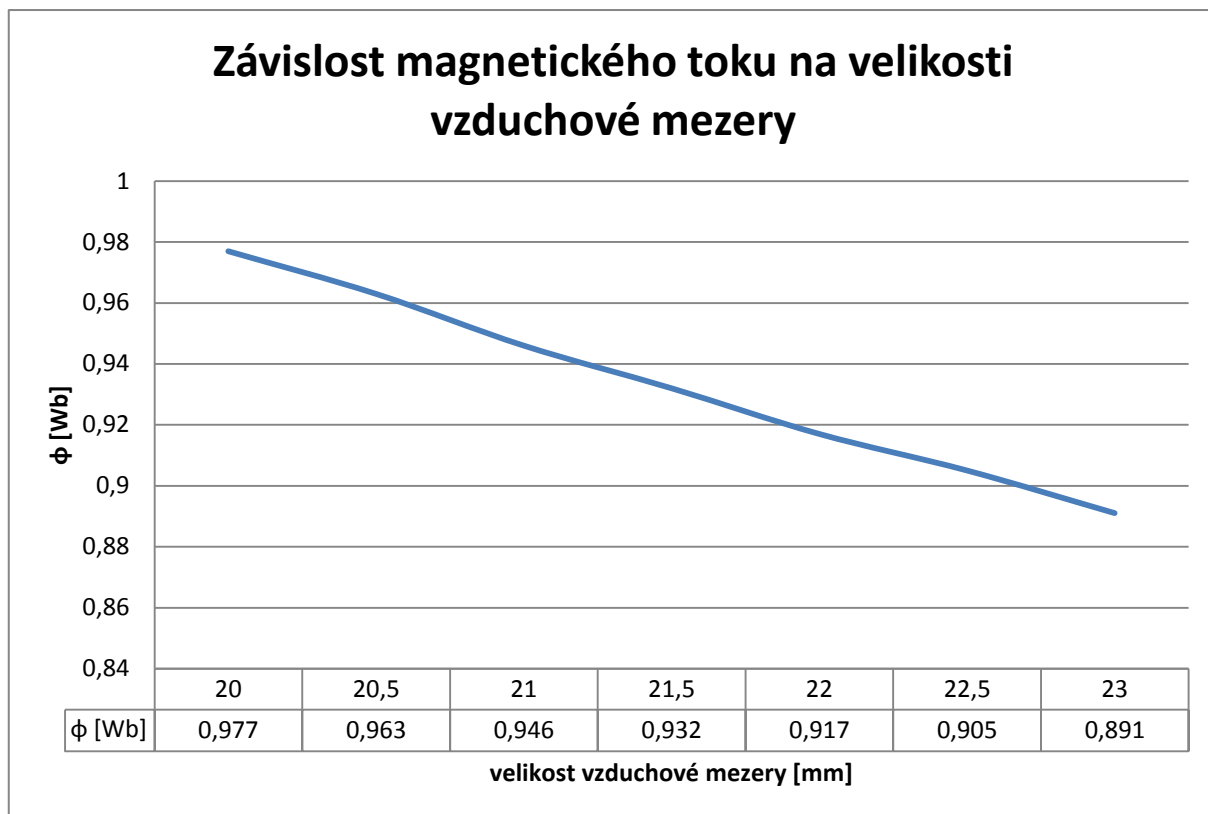
3.2 Srovnání výsledků simulace

Vyšetření závislosti magnetického toku na velikosti vzduchové mezery bylo provedeno na deseti případech. Bylo vytvořeno 10 shodných modelů, kde jedinou proměnou hodnotou byla velikost vzduchové mezery. Dle výpočtového listu je jmenovitá velikost mezery ve středu hlavy pólu 22 mm. Skutečně naměřené hodnoty jsou v rozsahu 20,00 – 21,4 mm.

Velikosti vzduchové mezery pro simulaci byly zvoleny následující: 20,00; 20,22; 20,50; 20,80; 21,00; 21,40; 21,50; 22,00; 22,50; 23,00 mm

Velikosti vzduchové mezery naměřené na skutečném rotoru: 20,04; 20,22; 20,24; 20,80; 21,00; 21,40 mm

Maximální hodnoty magnetického toku s rostoucí velikostí vzduchové mezery klesají lineárně, viz tab. 2.



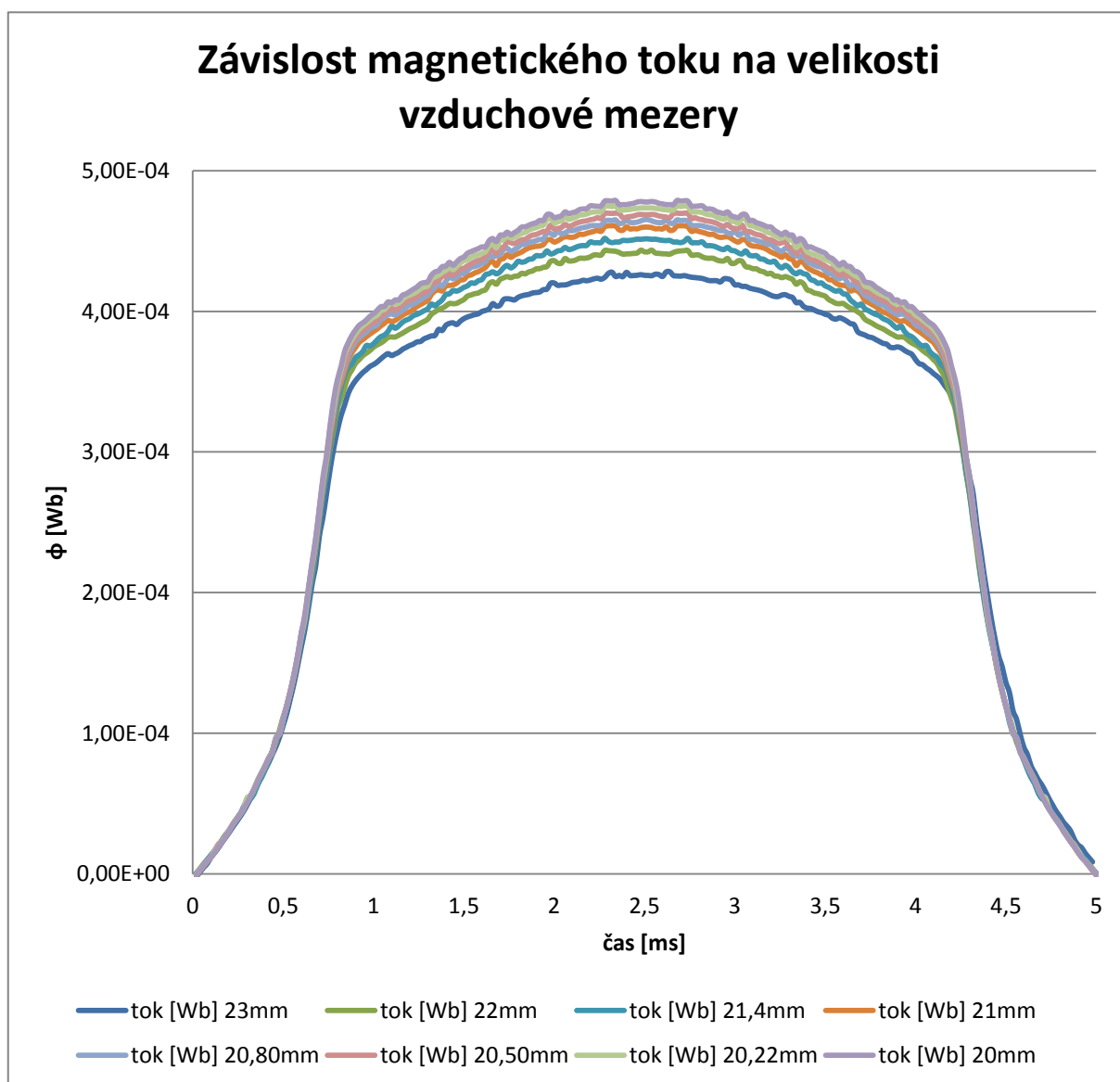
Graf č. 7: Závislost magnetického toku na velikosti vzduchové mezery

Vliv vzduchové mezery byl vyhodnocován stejně jako v případě vyhodnocení mezizávitového zkratu. Bylo určeno maximum magnetického toku buzeného pólem. Z nalezených maxim byla určena procentuální odchylka. V tabulce č. 3 jsou vypsány procentuální rozdíly mezi jednotlivými maximy v závislosti na velikosti vzduchové mezery. V případě rozdílu vzduchové mezery o 0,5 mm vychází rozdíl toků v rozmezí od 1,7 do 1,8%. Rozdíl mezi jmenovitou hodnotou vzduchové mezery (22,00 mm) a nejmenší simulovanou hodnotou (20,00 mm) je 6,8%.

Porovnávané vzduchové mezery	Rozdíl
20,00 – 20,50 mm	1,657 %
20,50 – 21,00 mm	1,763 %
21,00 – 21,50 mm	1,710%
21,50 – 22,00 mm	1,542 %
22,00 – 20,00 mm	6,672 %

Tabulka 2: Srovnání rozdílů magnetického toku v závislosti na vzduchové mezeře

Dále byly porovnány rozdíly ploch pod křivkou toku jednotlivých vzduchových mezer. Výsledek z rozdílů ploch a z rozdílů maxim nebyl významný, proto je v tabulce 3 uveden rozdíl maxim a dále bude počítáno jen s maximy.



Graf č. 8: Průběh magnetického toku v závislosti na vzduchové mezeře

Na grafu č. 8 je zobrazeno osm simulovaných průběhů s různou velikostí vzduchové mezery (pro ilustraci bez průběhu s mezerou 22,5 a 21,5 mm).

Vliv vzduchové mezery je na výsledný tok velmi zásadní. Dle vztahu **(3)** vychází pro stroj VTA 515/195 x 16 ekvivalent jednoho závitů jako 2,2 %. Proto, bude-li výsledek srovnání dvou pólů např. 5%, nemusí se jednat o vadu (resp. o dva mezizávitové zkratky na pólu s nižším magnetickým tokem). Naopak, dva póly o shodných hodnotách toku mohou mít minimálně jeden mezizávitový zkrat. U stanovení kritéria pro určení přítomnosti mezizávitových zkratů, proto musí být brán zřetel i na montáž pólů rotoru. Pokud není známa velikost vzduchové mezery, musí být adekvátně upraveno kritérium.

4 Validace naměřených výsledků

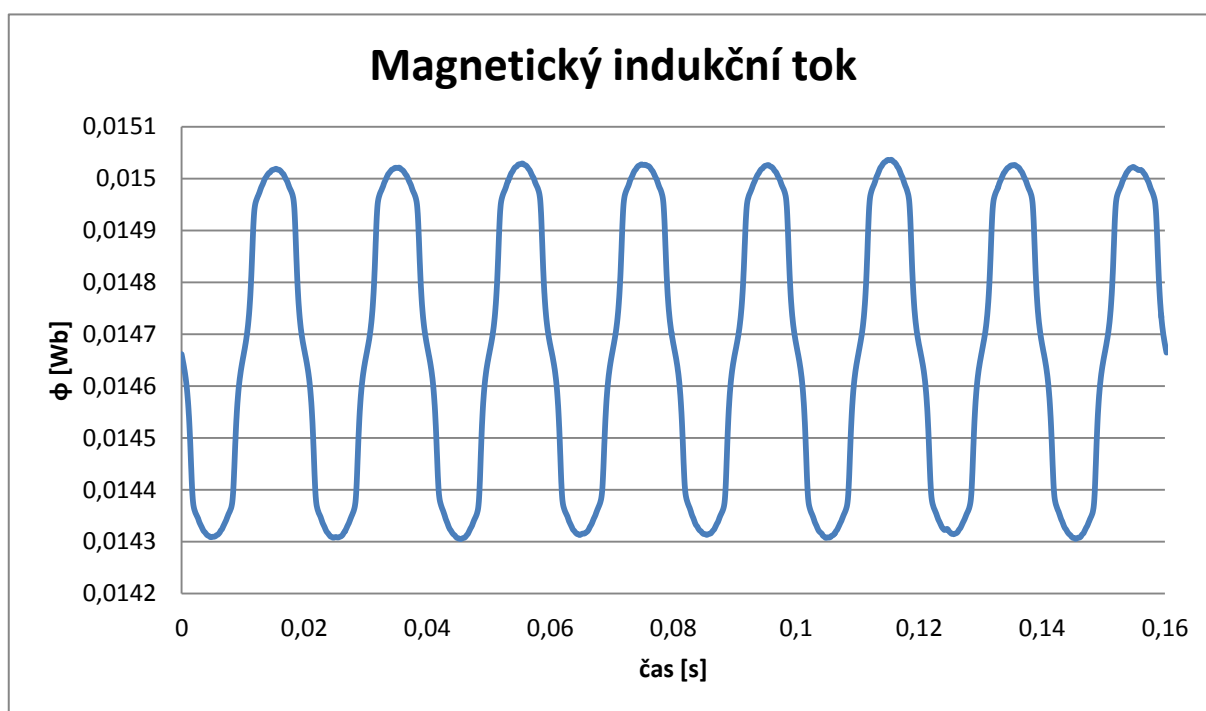
Po provedení simulace za účelem zjištění vlivu vzduchové mezery byly porovnány výsledky simulace s výsledky naměřenými na elektrárně Lipno I. Do porovnání byly zahrnuty póly, u kterých bylo možné změřit vzduchovou mezeru. Vzduchová mezera byla měřena před prvním najetím stroje, protože na elektrárně není instalován systém měření vzduchové mezery za chodu stroje. Změřeno bylo 6 pólů. Konstrukce soustrojí nedovoluje změřit mezeru u všech pólů. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v tabulce 4. Zaznamenána je nejmenší vzdálenost mezi hlavou pólu a statorovými plechy.

číslo pólu	1	2	3	4	5	6	7	8
Vzduch. mezera	-	21,4	-	-	20,97	-	20,04	-
číslo pólu	9	10	11	12	13	14	15	16
Vzduch. mezera	-	20,80	-	-	20,22	-	20,24	-

Tabulka 3: Naměřené hodnoty vzduchové mezery

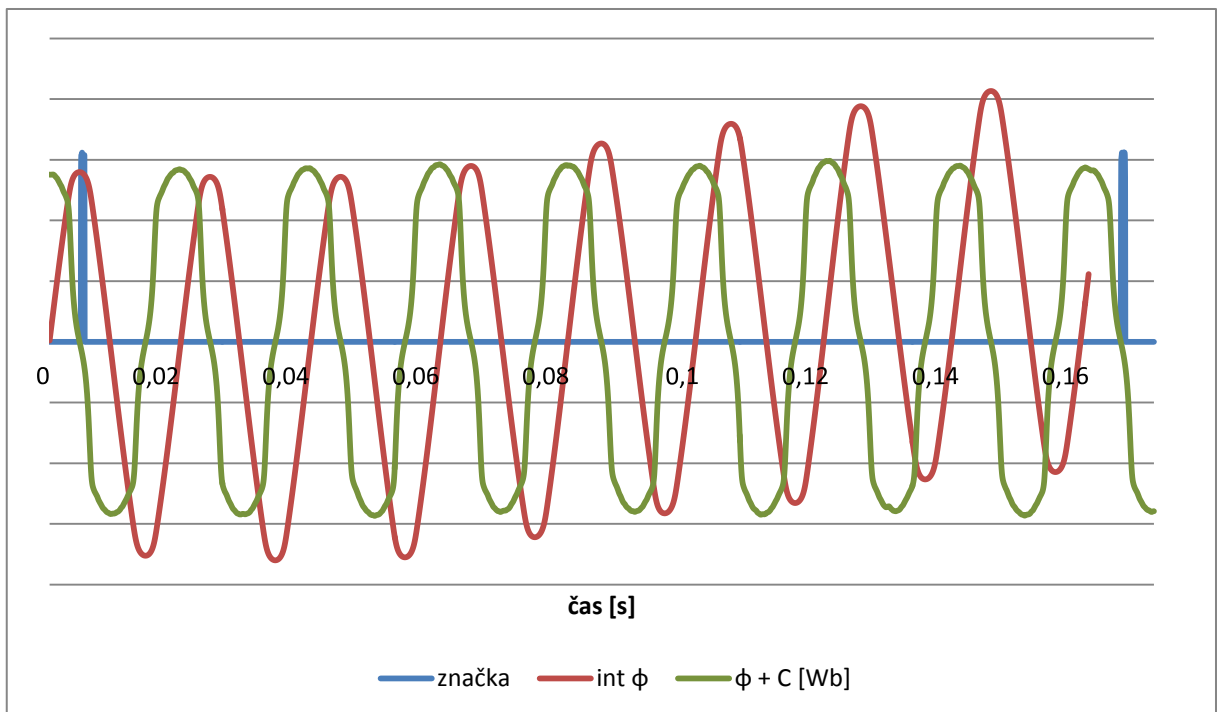
4.1 Příprava naměřených hodnot pro porovnání

Průběh zaznamenaného indukovaného napětí na měřicí cívice je zobrazen na grafu č. 3. Dále byla provedena integrace tohoto průběhu, viz modrý průběh na grafu č. 8.



Graf č. 9: Průběh magnetického toku po integraci indukovaného napětí

Výsledný magnetický indukční tok je posunut o kladnou integrační konstantu. Proto byla po výpočtu integrační konstanta C od průběhu toku odečtena. Pro výpočet konstanty byla provedena ještě jedna integrace průběhu magnetického toku podle času. Výsledný průběh je nakláněn právě o velikost integrační konstanty, viz červený průběh grafu č. 9. Za předpokladu, že je tento průběh s každou otáčkou rotoru stejný, musí procházet v místě před značkou další otáčky (modrý průběh) opět nulou. Doba jedné otáčky rotoru je 0,16 s. Od průběhu integrálu toku (červený) byla odečítána konstanta do té doby, než byla konečná hodnota v čase 0,16 s rovna hodnotě v čase 0 s. Po provedení všech matematických operací je výsledná hodnota integrační konstanty -0,01466.



Graf č. 10: Průběh výpočtu integrační konstanty¹

Po odečtení integrační konstanty od průběhu magnetického toku po integraci indukovaného napětí je výsledkem reálný magnetický tok ve vzduchové mezeře (zelený průběh).

¹ Pro ilustraci je hodnota integrálu magnetického toku 80x zmenšena

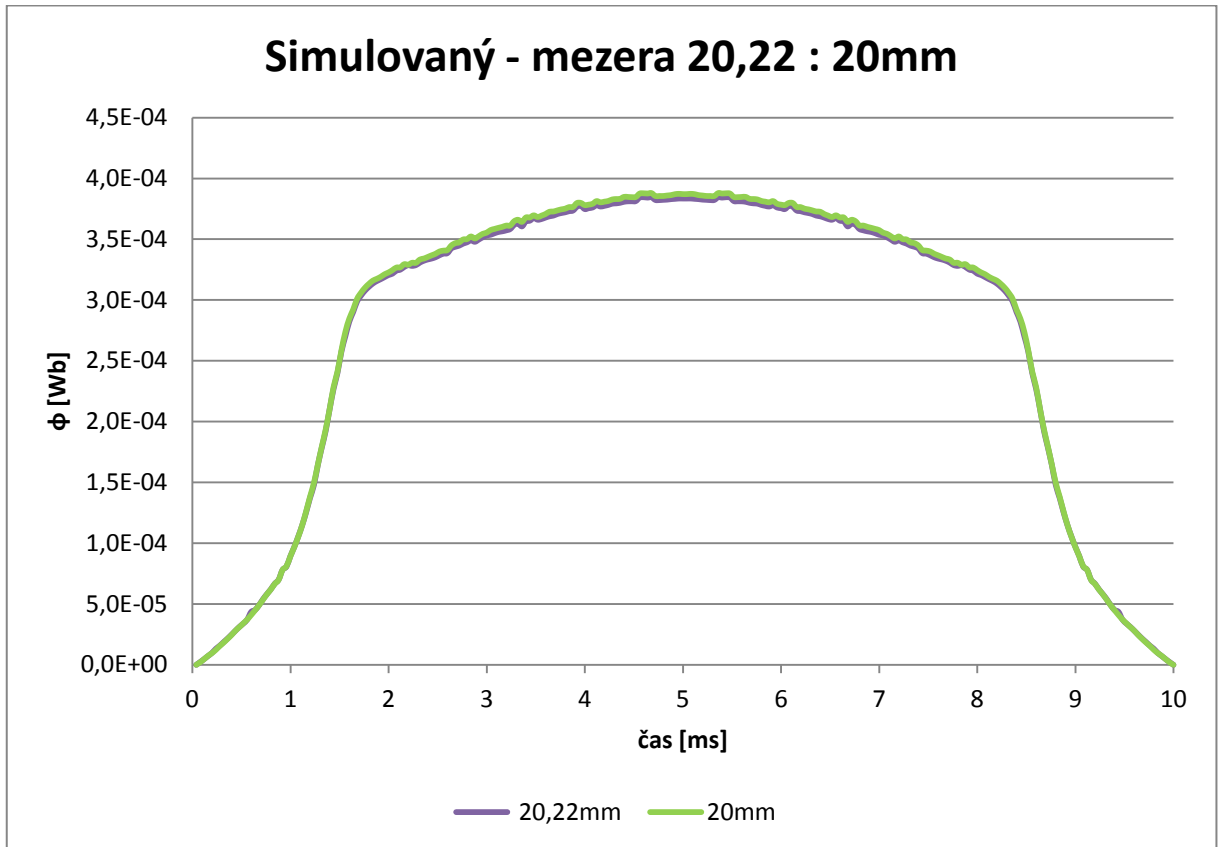
4.2 Porovnání naměřených a simulovaných hodnot

Z naměřeného (vypočítaného) průběhu magnetického toku ve vzduchové mezeře byly odečteny hodnoty toku nad póly č. 2, 5, 7, 10, 13 a 15. Pro tyto póly je změřena velikost vzduchové mezery. Proto je možné srovnání skutečných hodnot magnetického toku uvedených pólů s hodnotami simulovanými.

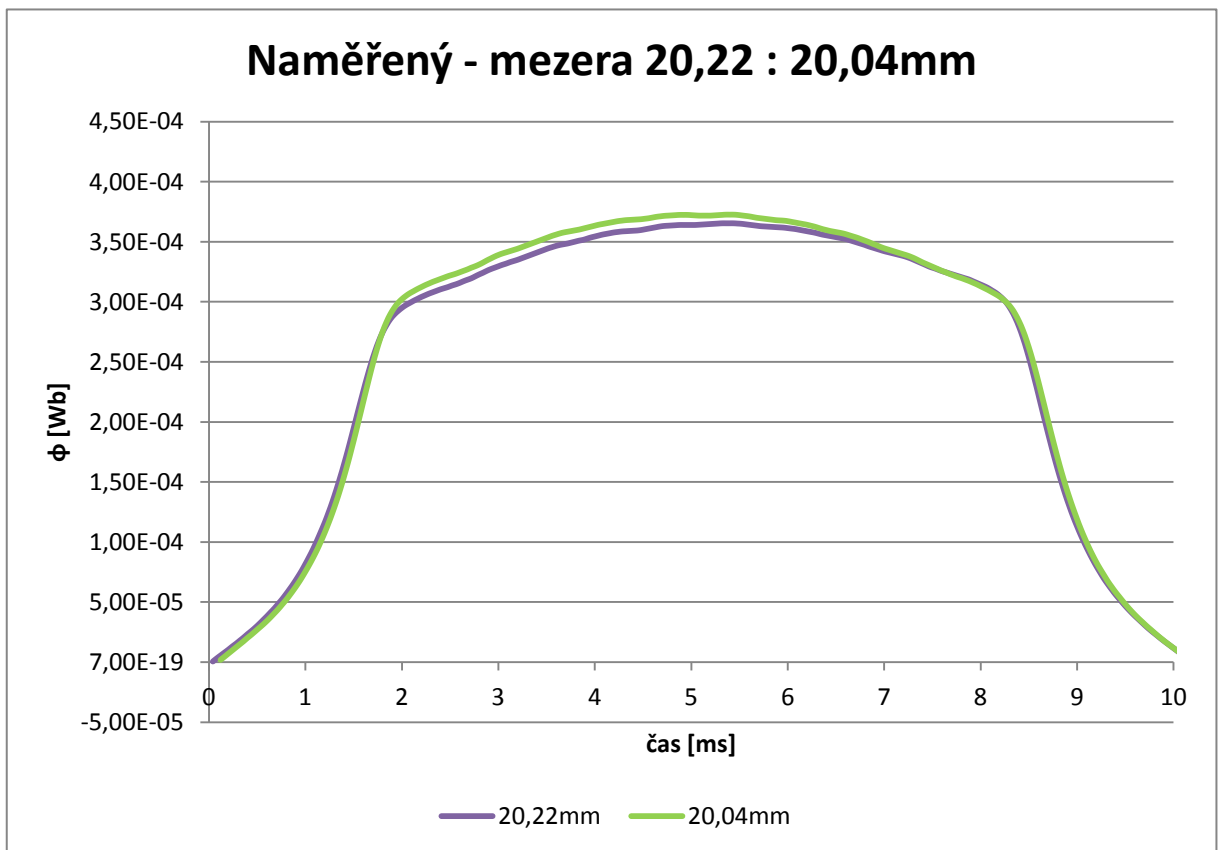
Na grafu č. 11 a 12 je srovnání pólů č. 7 a 13. Rozdíl maximálních hodnot simulovaných průběhů je 0,79%. Rozdíl maximálních hodnot naměřených průběhů je 1,38%. Průběh u sedmého pólu je od středu na levou stranu zdeformovaný. Což může značit šikmo nasazený pól nebo obdobnou konstrukční odchylku. Další porovnávané průběhy jsou z pólů č. 2 a 7 s nejmenší a největší naměřenou vzduchovou mezerou – graf č. 13 a 14. Rozdíl maximálních hodnot u těchto grafů byl, jak pro simulované průběhy, tak i pro naměřené 5%. Srovnání dalších pólů se známou vzduchovou mezerou je uvedeno v tabulce 4.

Vz. mezera [mm]	21,4 : 20,97	20,97 : 20,8	20,8 : 20,24
Simulované h. [%]	1,29	0,97	1,85
Naměřené h. [%]	0,77	-2,05	3,53
Vz. mezera [mm]	20,24 : 20,22	20,22 : 20,04	21,4 : 20,04
Simulované h. [%]	-	0,79	5,02
Naměřené h. [%]	0,77	1,97	5,00

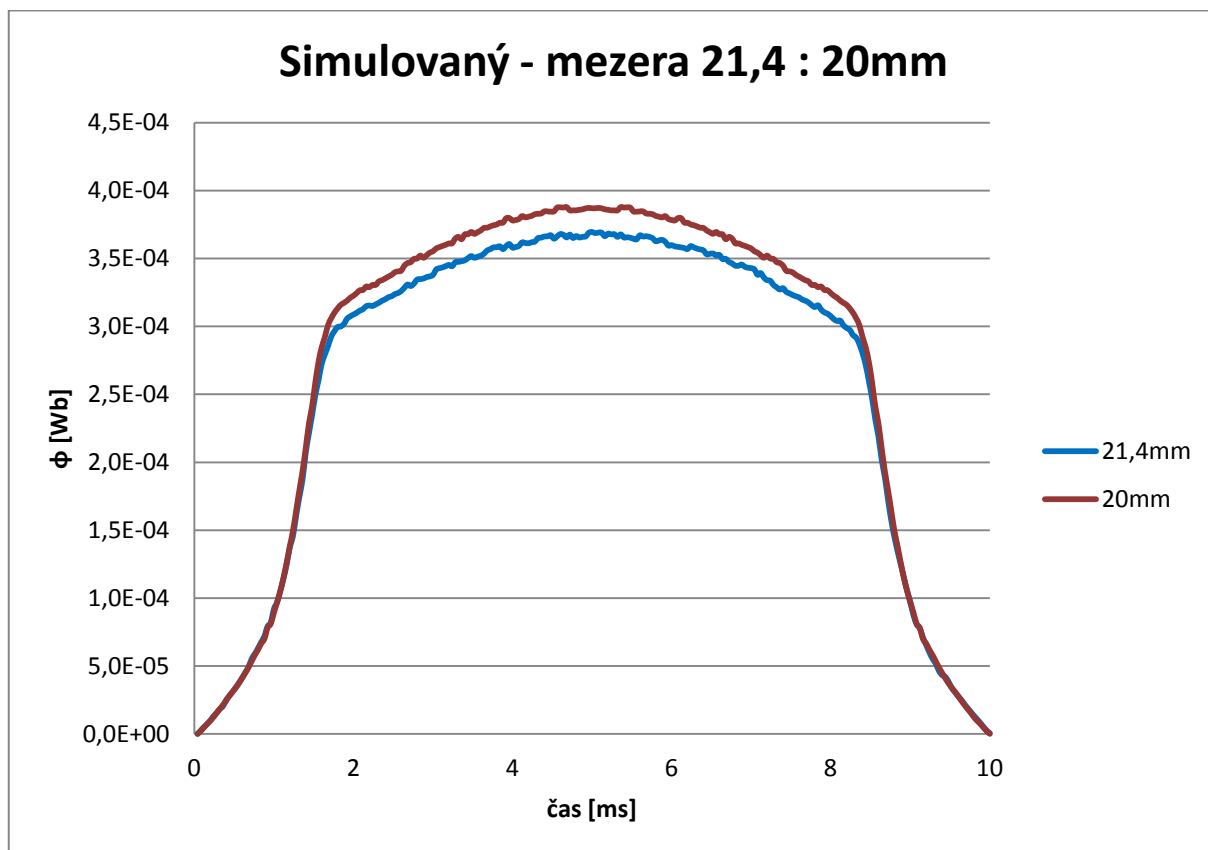
Tabulka 4: Porovnání naměřených a simulovaných hodnot



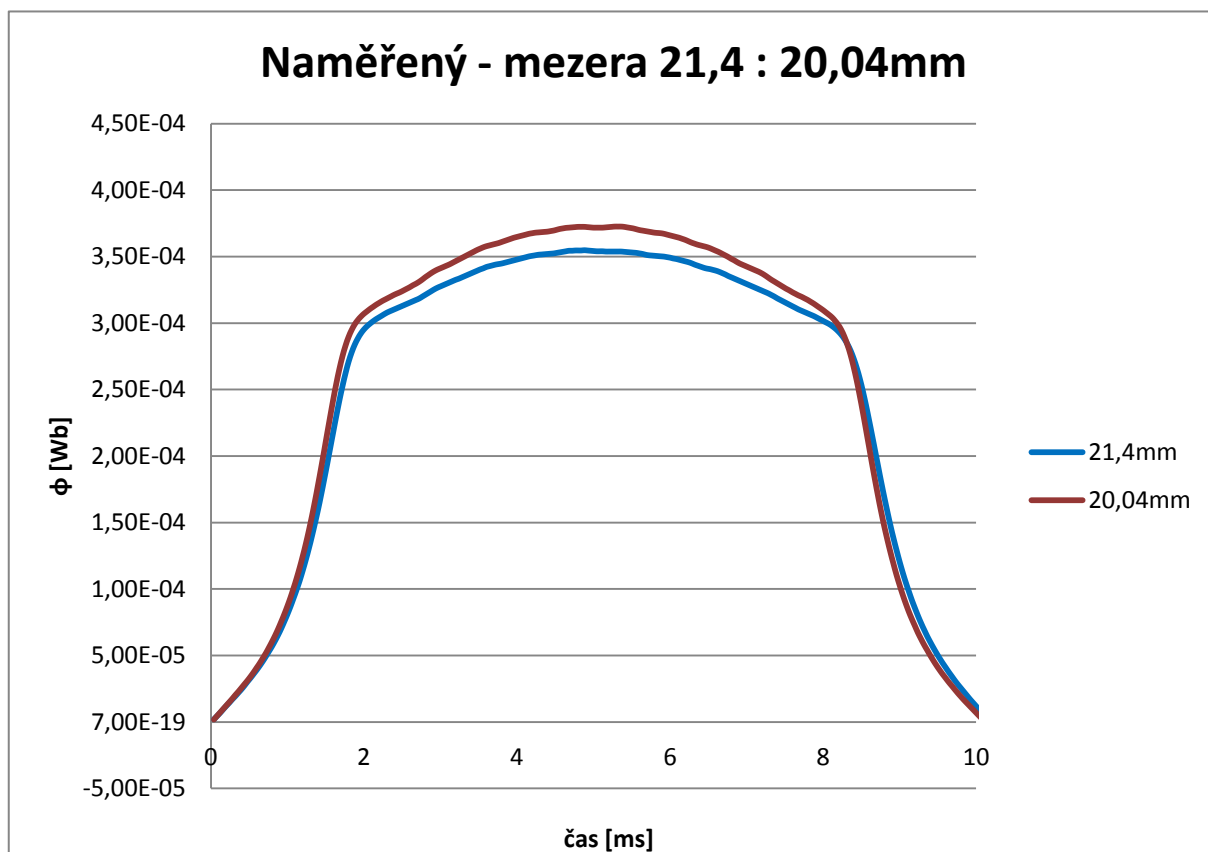
Graf č. 11: Simulované hodnoty magnetického toku pólů 7 a 13



Graf č. 12: Vypočtené hodnoty magnetického toku pólů 7 a 13

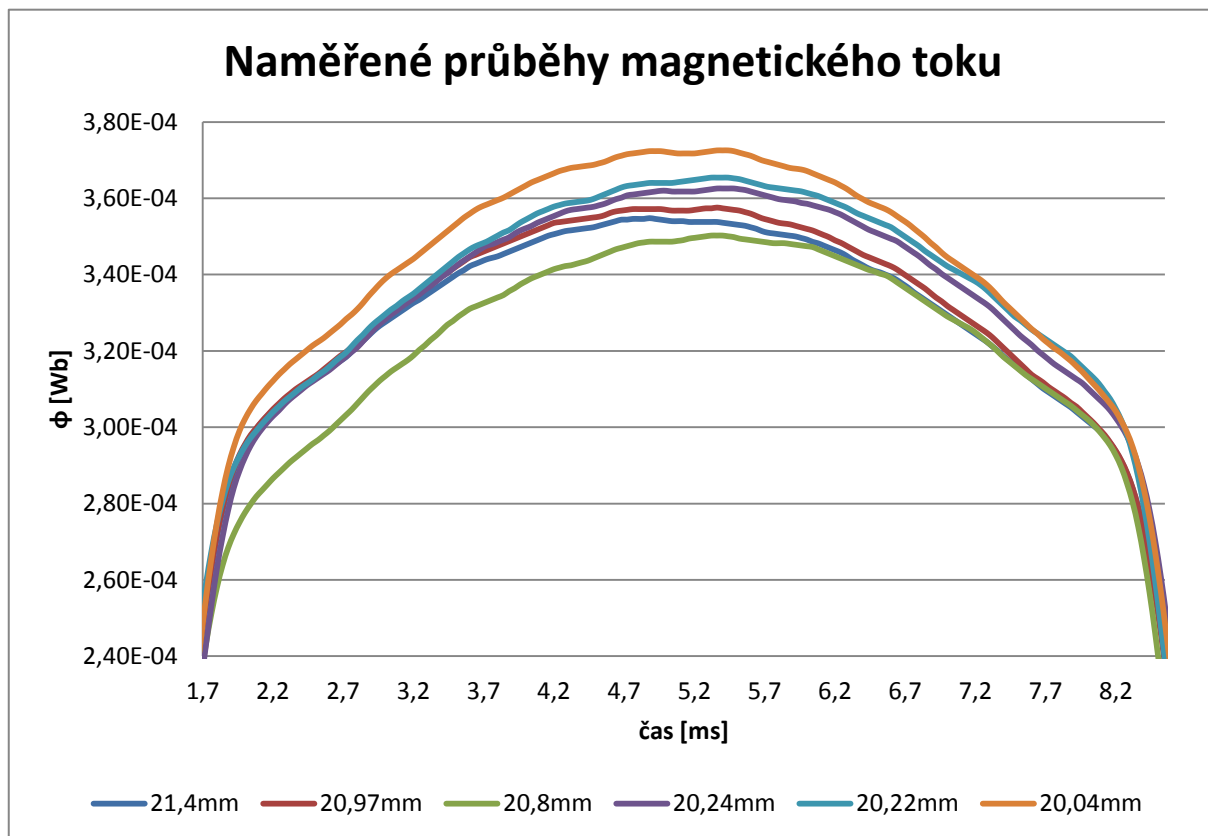


Graf č. 13: Simulované hodnoty magnetického toku pólů 2 a 7



Graf č. 14: Vypočtené hodnoty magnetického toku pólů 2 a 7

Vzhledem k zanedbatelnému rozdílu je vzduchová mezera 20,97 mm (pól č. 5) porovnávána se simulovanou mezerou 21 mm, mezera 20,04 (pól č. 7) se simulovanou mezerou 20,00 mm a mezera 20,24 mm (pól č. 15) s mezerou 20,22 mm.



Graf č. 15: Srovnání naměřených průběhů magnetického toku

Číslo pólu	2	5	10	15	13	7
vz. mezera [mm]	21,4	20,97	20,8	20,24	20,22	20,04
φ [μWb]	354,817	357,583	350,217	362,583	365,383	372,583

Tabulka 5: Magnetický indukční tok vybuzený jednotlivými póly

Ze srovnání naměřených hodnot toků je patrný velký úbytek magnetického toku nad pólem č. 10 (vzduchová mezera 20,8 mm). Průběh má velmi nesymetrický tvar. Přesto je maximální hodnota pólu č. 10 dle standardního vyhodnocovacího kritéria vyhovující.

Případ pólu č. 10 vypovídá o zásadním vlivu vzduchové mezery. Zaznamenaná maximální hodnota magnetického toku nad pólem č. 10 je 350,217 μWb. Dle teoretického předpokladu by v ideálním případě maximální hodnota ležela mezi 357

a 362 μWb . Při předpokládané lineární charakteristice vlivu vzduchové mezery by maximální hodnota měla odpovídat 359 μWb . Tento předpoklad platí pouze v případě, že na vinutí pólu nevznikl mezizávitový zkrat. Procentní rozdíl velikosti teoretického magnetického toku pólu č. 10 (359 μWb) a naměřeného toku (350,2 μWb) je 2,5 %. Dle kap. 3.2 je procentní vyjádření jednoho závitů 2,2 %. Po zahrnutí vlivu vzduchové mezery nelze vyloučit jeden mezizávitový zkrat na pólu č. 10.

4.3 Návrh úpravy vyhodnocení mezizávitové izolace bez znalosti vzduchové mezery

Z výše zmíněných skutečností vyplývá, že vyhodnocení na základě jednoho kritéria nemusí mít vždy správnou vypovídající hodnotu. Stanovené kritérium pro jeden mezizávitový zkrat je platné pro všechny diagnostikované stroje. Změna velikosti kritéria je proto nežádoucí. Jako řešení se nabízí rozšířit stávající způsob vyhodnocení o další dva způsoby. V případě, že by naměřené rozdíly v maximech magnetických toků vyhověli dvěma ze tří kritérií, diagnostikovaný pól by byl prohlášen za vyhovující.

Ke stávajícímu výpočtu rozdílu jednotlivých maxim od střední hodnoty se přidá srovnání sousedních pólů a srovnání pólů se stejnou polaritou. Na části průběhu grafu č. 5 lze pozorovat možný vliv polarity na vyhodnocovaná maxima toku. Naproti tomu jsou v jiné části grafu maxima obdobná. Toto kritérium je navrženo na základě dostupných dat. Následně je nutné provést ověření kritéria v praxi na rozsáhlejším souboru dat.

Závěr

Diplomová práce pojednává o diagnostice mezizávitové izolace rotoru synchronních strojů. V první části je popsán způsob provádění diagnostiky u hladkých rotorů a rotorů s vyniklými póly za provozu stroje. Je popsáno zaznamenání, zpracování a posouzení dat. Dále je vysvětleno stanovení kritéria pro vyhodnocení mezizávitových zkratů. Kritérium je aplikováno na reálném případě.

V druhé části je popsána tvorba matematického modelu stroje VTA 515/195 x 16. Model byl využit k výpočtu průběhu magnetického toku ve vzduchové mezeře pomocí metody konečných prvků. Model zahrnuje prvek simulující sondu pro měření mezizávitových zkratů. Za použití lua skriptu byla simulovanou měřicí sondou snímána velikost magnetického indukčního toku ve vzduchové mezeře. Hodnoty simulovaného indukovaného napětí na měřicí sondě odpovídaly hodnotám naměřeným na skutečném stroji.

Pro analyzovaný stroj bylo, ve třetí části práce, simulováno 10 průběhů. Každý průběh byl simulovaný pro jinou velikost vzduchové mezery. Z provedených simulací vychází pro rozdíl velikosti vzduchové mezery 0,5 mm rozdíl maximálních hodnot magnetického toku 1,7 %. Obecně je u rotorů hydrogenerátorů malé procentní zastoupení jednoho závitů (pro analyzovaný stroj 2,2 %). Vliv velikosti vzduchové mezery při kontrole izolace rotoru je proto zásadní.

V poslední části práce je zpracován naměřený průběh na elektrárně Lipno I. Maxima toku pólů, u nichž byla změřena velikost vzduchové mezery, byly porovnány se simulovanými. Maximum jednoho ze šesti pólů neodpovídá teoretickým předpokladům. Po zahrnutí vlivu vzduchové mezery je na pólu pravděpodobně jeden mezizávitový zkrat.

Z provedených analýz se ukazuje, že nejdůležitějším prvkem je správné určení velikosti vzduchové mezery. I malá odchylka může vést k velkému zkreslení výsledků. Proto by bylo výhodné kombinovat diagnostiku mezizávitové izolace s online měřením velikosti vzduchové mezery. Dále je uveden návrh pro vyhodnocení mezizávitové izolace bez znalosti vzduchové mezery. Až na základě

statisticky významného souboru dat je možné posoudit přínos navrženého vyhodnocení kontroly mezizávitové izolace. Nejdůležitějším prvkem vyhodnocení stále zůstává srovnání aktuálně naměřených hodnot s hodnotami získanými z předešlých kontrol a sledování trendu jejich změn.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] GENERATOR FIELD WINDING SHORTED TURN DETECTION TECHNOLOGY. In: GENERATOR FIELD WINDING SHORTED TURN DETECTION TECHNOLOGY [online]. [cit. 2014-03-08]. Dostupné z: http://www.marubun.jp/product/measurement/electric/qgc18e000002i86k-att/generatortech_200702.pdf
- [2] MAYER, Daniel. *Teorie elektromagnetického pole*. 3. vyd.-přepřac. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2001. ISBN 80-7082-826-9.

Přílohy

Příloha A – Syntaxe lua skriptu

```

showconsole ()
open ("22mm.FEM")

---ZADANI
kroku= 250
polu= 16

--- priprava vystupniho souboru
vystup1=openfile ("r.txt", "w")
vystup2=openfile ("vys_tok.txt", "w")
vystup3=openfile ("vys_indukce.txt", "w")
vystup4=openfile ("vys_plocha.txt", "w")

--- skript
roztec=360/polu
dr=roztec/kroku

for n=1,kroku do
  r=(n-1)*dr

  mi_saveas (format ("22mm_%1$d.fem",n-1))
  mi_analyze ()
  mi_loadsolution ()

  mo_seteditmode ("contour")
  mo_addcontour (-6,2170)
  mo_addcontour (6,2170)

  tok, indukce=mo_lineintegral (0)
  plocha=mo_lineintegral (2)

  mo_clearcontour ()

  write (vystup1,r, "\n")
  write (vystup2,tok, "\n")
  write (vystup3,indukce, "\n")
  write (vystup4,plocha, "\n")

  mo_close ()

  mi_seteditmode ("group")
  mi_selectgroup (1)
  mi_moverotate (0,0,dr)

end

closefile (vystup1)
closefile (vystup2)
closefile (vystup3)
closefile (vystup4)

mi_close ()

```