

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A ELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING

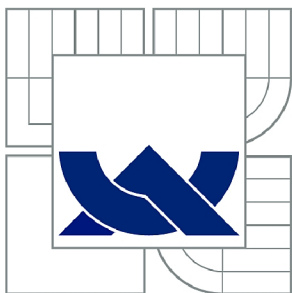
POMOCNÉ VINUTÍ PRO NAPÁJENÍ NAPĚŤOVÉHO REGULÁTORU
SYNCHRONNÍHO GENERÁTORU

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

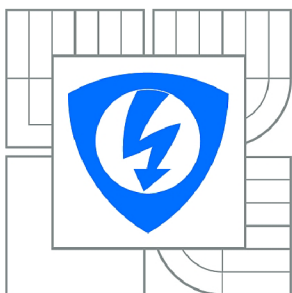
Bc. MICHAL HRTÁŇ

BRNO 2014



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A
ELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC
ENGINEERING

POMOČNÉ VINUTÍ PRO NAPÁJENÍ NAPĚŤOVÉHO REGULÁTORU SYNCHRONNÍHO GENERÁTORU

AUXILIARY WINDING SUPPLYING THE VOLTAGE REGULATOR OF SYNCHRONOUS
GENERATOR

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

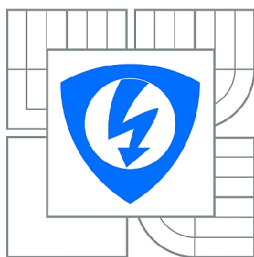
Bc. MICHAL HRTÁŇ

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. ONDŘEJ VÍTEK, Ph.D.

BRNO 2014



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Silnoproudá elektrotechnika a výkonová elektronika

Student: Bc. Michal Hrtáň

ID: 98496

Ročník: 2

Akademický rok: 2013/2014

NÁZEV TÉMATU:

Pomocné vinutí pro napájení napěťového regulátoru synchronního generátoru

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Seznamte se s konstrukčním provedením synchronních generátorů, nastudujte a popište možnosti napájení napěťového regulátoru generátoru s využitím pomocného vinutí.
2. Provedte návrh a realizaci pomocného vinutí u konkrétního stroje.
3. Ověřte vlastnosti navrženého řešení měření a vyhodnoťte výsledky.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] Časopisecké a konferenční články z databáze IEEE Xplore.

[2] Petrov, G.N. Elektrické stroje 2. Praha: Academia. 1982.

Dále dle pokynu vedoucího práce.

Termín zadání: 27.9.2013

Termín odevzdání: 28.5.2014

Vedoucí práce: Ing. Ondřej Vítek, Ph.D.

Konzultanti diplomové práce:

Ing. Ondřej Vítek, Ph.D.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt

Tématem této diplomové práce je návrh a ověření pomocného vinutí pro napájení napěťového regulátoru synchronního generátoru. Synchronní generátor, pro který je pomocné vinutí navrhováno, je třífázový, nízkonapěťový s dvouvrstevným vsypávaným statorovým vinutím. Buzení generátoru je bezkroužkové s pomocným rotujícím budičem. Pomocné vinutí je navrženo k uložení do statorových drážek spolu s hlavním vinutím. Dimenzování pomocného vinutí je odvozeno od požadavků na napájení napěťového regulátoru. Návrh vinutí je ověřen analytickým výpočtem a výpočtem metodou konečných prvků (MKP). Pomocné vinutí bylo realizováno při výrobě generátoru. Vlastnosti pomocného vinutí byly ověřeny měřeními na zkušebně elektrických strojů a výsledky měření jsou vyhodnoceny.

Abstract

The theme of this thesis is the design and verification of the auxiliary winding to supply the voltage regulator of the synchronous generator. The synchronous generator for which the auxiliary winding proposed is three-phase, low voltage with double layer random wound stator winding. The generator excitation is brushless with auxiliary rotating exciter. The auxiliary winding is designed for placement in the stator teeth, along with the main winding. The sizing of the auxiliary winding is derived from the power requirements the voltage regulator. Draft winding is validated analytical calculation and finite element method (FEM). The auxiliary winding has been implemented in the production of the generator. The Features of the auxiliary winding have been verified by measuring the by electrical testing room and the test results are evaluated.

Klíčová slova

AVR; bezkartáčový; bezkroužkový; buzení; elektrické; Femag; generátor; měření; MKP; napájení; naprázdno; nízké napětí, pomocné vinutí; regulátor; synchronní stroj; vinutí; zatížení

Keywords

auxiliary winding; AVR; brushless; electrical; excitation; Femag; FEM; generator; load; low voltage; no-load; no-slip ring; power supply; regulator; synchronous machine; test; windings;

Bibliografická citace

HRTÁŇ, M. *Pomocné vinutí pro napájení napěťového regulátoru synchronního generátoru*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2014. 79 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Ondřej Vitek, Ph.D..

Prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma *Pomocné vinutí pro napájení napětového regulátoru synchronního generátoru* jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne

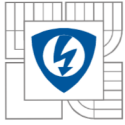
Podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Ondřeji Vítkovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce. Děkuji Ing. Jiřímu Bůbelovi za odbornou pomoc. Děkuji své ženě Markétě za bezmeznou podporu.

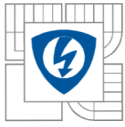
V Brně dne

Podpis autora



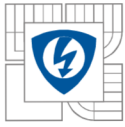
Obsah

SEZNAM OBRÁZKŮ.....	8
SEZNAM TABULEK	10
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	11
1 ÚVOD.....	15
1.1 SYNCHRONNÍ STROJ S BEZKARTÁČOVÝM BUZENÍM.....	16
1.2 POMOCNÉ VINUTÍ.....	18
1.3 AUTOMATICKÝ REGULÁTOR NAPĚTÍ (AVR).....	21
1.4 POŽADAVKY NA NAPÁJENÍ AVR.....	24
1.5 VINUTÍ STRÍDAVÝCH STROJŮ NA NÍZKÉ NAPĚTÍ.....	26
1.6 METODA VÝPOČTU POČTU ZÁVITŮ POMOCNÉHO VINUTÍ	32
2 NÁVRH POMOCNÉHO VINUTÍ.....	33
2.1 POPIS GENERÁTORU.....	34
2.2 VÝPOČET CHARAKTERISTIKY NAPRÁZDNO (HLAVNÍHO VINUTÍ)	36
2.3 POSTUP NÁVRHU POMOCNÉHO VINUTÍ.....	48
2.4 VÝPOČET POMOCNÉHO VINUTÍ.....	49
2.5 OVĚŘENÍ REALIZOVATELNOSTI VINUTÍ Z HLEDISKA PLNĚNÍ DRÁŽKY	50
2.6 SHRUTÍ NÁVRHU POMOCNÉHO VINUTÍ.....	53
2.7 OVĚŘENÍ NÁVRHU VÝPOČTEM METODOU KONEČNÝCH PRVKŮ (MKP).....	54
2.8 POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ VÝPOČTŮ CHARAKTERISTIKY NAPRÁZDNO	60
3 ZKOUŠENÍ.....	61
3.1 ÚČEL JEDNOTLIVÝCH ZKOUŠEK	61
3.2 METODY ZKOUŠEK.....	61
3.3 REALIZACE POMOCNÉHO VINUTÍ	64
3.4 PROVEDENÁ MĚŘENÍ.....	66
3.5 SROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ VÝPOČTŮ A MĚŘENÍ.....	71
4 ZÁVĚR.....	72
LITERATURA	74
PŘÍLOHY	75
P1 VÝSLEDKY VÝPOČTŮ	75
P2 VÝSLEDKY MĚŘENÍ.....	76
P3 MAGNETIZAČNÍ CHARAKTERISTIKY PLECHŮ PRO ELEKTROTECHNIKU	77
P4 ZAPOJENÍ CÍVEK POMOCNÉHO VINUTÍ	78
P5 PŘÍKLAD GRAFICKÉHO ZOBRAZENÍ VÝSLEDKŮ Z FEMAGU	79



SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1-1 Model rotoru hlavního stroje a rotoru budiče na společné hřídeli</i>	<i>16</i>
<i>Obr. 1-2 Principiální schéma generátoru s buzením s pomocným budičem a rotujícím usměrňovačem</i>	<i>17</i>
<i>Obr. 1-3 Konstrukční provedení magnetického obvodu stroje s rotujícím budičem</i>	<i>17</i>
<i>Obr. 1-4 Schematický popis systému generátoru spomocným budičem a napájením regulátoru z pomocného vinutí</i>	<i>18</i>
<i>Obr. 1-5 Schéma toku energií v systému generátoru s pomocným budičem a napájením regulátoru z pomocného vinutí</i>	<i>21</i>
<i>Obr. 1-6 PWM modulace</i>	<i>22</i>
<i>Obr. 1-7 Přebuzení tranzistorového měniče pro dosažení rychlejší odezvy budiče</i>	<i>22</i>
<i>Obr. 1-8 Základní schéma zapojení tranzistorové výkonové část</i>	<i>23</i>
<i>Obr. 1-9 Schéma zapojení generátoru s bezkroužkovým buzením a pomocným vinutím</i>	<i>25</i>
<i>Obr. 1-10 Pomocné vinutí uložené v horní části drážek pod drážkovými klíny</i>	<i>26</i>
<i>Obr. 1-11 K definici drážkové izolace</i>	<i>27</i>
<i>Obr. 1-12 Trojfázové jednovrstvé vinutí s pólpárovými cívkami stejného kroku</i>	<i>30</i>
<i>Obr. 2-1 Srovnání dvou příkladů průběhů charakteristik naprázdno</i>	<i>33</i>
<i>Obr. 2-2 Synchronní generátor TES řady GSH [10]</i>	<i>34</i>
<i>Obr. 2-3 Činitel pólového krytí $\alpha_{\delta} = f(\alpha)$ a činitel tvaru pole $k_B = f(\alpha)$</i>	<i>37</i>
<i>Obr. 2-4 Značení a rozměry rotorových drážek</i>	<i>38</i>
<i>Obr. 2-5 Statorová drážka typu L s rovnoběžnými zuby</i>	<i>39</i>
<i>Obr. 2-6 Závislost činitele ξ na indukci ve jhu</i>	<i>41</i>
<i>Obr. 2-7 Značení pro výpočet rozměrů drážek tlumícího vinutí</i>	<i>42</i>
<i>Obr. 2-8 BH magnetizační charakteristika plechů rozšířená o lineární oblasti hodnot</i>	<i>46</i>
<i>Obr. 2-9 K principu aproximace magnetizační charakteristiky</i>	<i>46</i>
<i>Obr. 2-10 Charakteristika naprázdno hlavního vinutí z výpočtů analytickým výpočtem</i>	<i>47</i>
<i>Obr. 2-11 Schéma postupu při návrhu pomocného vinutí v generátoru</i>	<i>48</i>
<i>Obr. 2-12 Rozměry statorové drážky návrhového generátoru</i>	<i>50</i>
<i>Obr. 2-13 Rozměry statorové drážky pro výpočet plochy drážkové izolace</i>	<i>52</i>
<i>Obr. 2-14 K popisu metody konečných prvků (MKP)</i>	<i>54</i>
<i>Obr. 2-15 Geometrie analyzovaného stroje s pomocným vinutím vytvořená ve Femagu</i>	<i>55</i>
<i>Obr. 2-16 Detail modelu Femag.</i>	<i>55</i>
<i>Obr. 2-17 Detail geometrie nodechains statorových drážek a jha</i>	<i>56</i>
<i>Obr. 2-18 Detail geometrie sítě mesh statorových drážek a jha</i>	<i>57</i>

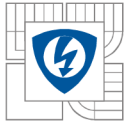


<i>Obr. 2-19 Detail vinutí v modelu Femag.</i>	<i>57</i>
<i>Obr. 2-20 Průběhy okamžitých hodnot napětí</i>	<i>58</i>
<i>Obr. 2-21 Varianta modelu s pomocným vinutím umístěným pod klínem drážky a detail.</i>	<i>59</i>
<i>Obr. 2-22 Charakteristika naprázdno z výsledků výpočtů hlavního a pomocného vinutí metodou konečných prvků</i>	<i>60</i>
<i>Obr. 2-23 Porovnání výsledků výpočtů charakteristiky naprázdno hlavního vinutí metodou konečných prvků a analytickým výpočtem.....</i>	<i>60</i>
<i>Obr. 3-1 K definici charakteristiky naprázdno synchronního generátoru</i>	<i>62</i>
<i>Obr. 3-2 Pomocné vinutí navinuté ve statorových drážkách.</i>	<i>64</i>
<i>Obr. 3-3 Pomocné vinutí je umístěno na dně drážek</i>	<i>64</i>
<i>Obr. 3-4 Provizorní zajištění pomocného vinutí v drážkách.....</i>	<i>65</i>
<i>Obr. 3-5 Vzájemné zajištění čel závitů pomocného vinutí izolační páskou.....</i>	<i>65</i>
<i>Obr. 3-6 Vyrobený generátor připravený k přesunu na zkušebnu</i>	<i>66</i>
<i>Obr. 3-7 Charakteristika naprázdno - naměřené hodnoty</i>	<i>67</i>
<i>Obr. 3-8 Závislost napětí pomocného vinutí na napětí hlavního vinutí</i>	<i>68</i>
<i>Obr. 3-9 Zatěžovací charakteristika pomocného vinutí</i>	<i>69</i>
<i>Obr. 3-10 Závislost napětí pomocného vinutí na zátěži pomocného vinutí.....</i>	<i>70</i>
<i>Obr. 3-11 Závislost napětí naprázdno pomocného vinutí na zatížení generátoru</i>	<i>70</i>
<i>Obr. 3-12 Charakteristika naprázdno - srovnání výsledků výpočtů a měření</i>	<i>71</i>
<i>Obr. P-1 Rozvinuté schéma zapojení pomocného vinutí ve statoru</i>	<i>78</i>
<i>Obr. P-2 Příklad grafického výstupu výsledků výpočtů naprázdno v programu FEMAG.....</i>	<i>79</i>



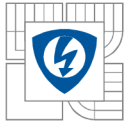
SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 2-1 Vlastnosti měděných lakovaných vodičů dle EN 60317-0-1</i>	<i>51</i>
<i>Tab. 2-2 Srovnání výsledků FEM-výpočtů 2 variant umístění pomocného vinutí.....</i>	<i>59</i>
<i>Tab. 3-1 Parametry generátoru při měření zatížení pomocného vinutí.....</i>	<i>69</i>
<i>Tab. P-1: Charakteristika naprázdno hlavního vinutí vypočtená analyticky.....</i>	<i>75</i>
<i>Tab. P-2: Charakteristika naprázdno hlavního a pomocného vinutí vypočtená FEM</i>	<i>75</i>
<i>Tab. P-3: Charakteristika naprázdno - naměřené hodnoty</i>	<i>76</i>
<i>Tab. P-4: Zatěžovací charakteristika pomocného vinutí - naměřené hodnoty.....</i>	<i>76</i>
<i>Tab. P-5: Měření pomocného vinutí naprázdno při proudovém zatížení generátoru.....</i>	<i>76</i>
<i>Tab. P-6: Magnetizační charakteristika plechů M400-50A, pro zuby střídavých strojů</i>	<i>77</i>
<i>Tab. P-7: Magnetizační charakteristika plechů M400-50A, pro jha střídavých strojů</i>	<i>77</i>



SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

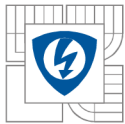
a	počet paralelních větví
B_{j1}	magnetické indukce ve jhu statoru, T
B_{j2}	magnetické indukce ve jhu rotoru, T
B_p	magnetické indukce v jádře pólu, T
B_{z1}	magnetické indukce v zubu statoru, T
B_{z2}	magnetické indukce v zubu rotoru, T
B_δ	indukce ve vzduchové mezeře, B
b_{01}	šířka otevření drážky statoru, m
b_{02}	šířka otevření drážky rotoru, m
b_1	šířka drážky, m
b_p	šířka pólu, m
b_{pn}	šířka pólového nástavce, m
b_{vk}	šířka ventilačních kanálů
b_{z1}	šířka zubu statoru, m
b_{z2}	šířka zubu rotoru, m
b_{zt}	šířka zubu rotoru mezi drážkami pro tlumící vinutí, m
D	vnitřní průměr statoru, m
D_e	vnější průměr statoru, m
D_i	vnitřní průměr rotoru, m
D_r	vnější průměr rotoru, m
d_d	průměr drážky tlumícího vinutí, m
F_{b0}	magnetomotorické napětí naprázdno, A
F_m	magnetomotorické napětí, A
f	frekvence, Hz
H_{j1}	intenzita magnetického pole ve jhu statoru, A.m ⁻¹
H_{j2}	intenzita magnetického pole ve jhu rotoru, A.m ⁻¹
H_p	intenzita magnetického pole v pólu při jeho základně, A.m ⁻¹
H_{ps}	střední hodnota intenzity magnetického pole v pólu, A.m ⁻¹
H_{z1}	intenzita magnetického pole v zubu statoru, A.m ⁻¹
H_{z2}	intenzita magnetického pole v zubu rotoru, A.m ⁻¹
h_0	výška otevření drážky, m
h_{d1}	hloubka statorové drážky, m



h_{d2}	hloubka rotorové drážky, m
h_{j1}	hloubka statorového jha, m
h_{j2}	hloubka rotorového jha, m
h_p	výška pólu, m
h_{pn}	výška pólového nástavce, m
I	proud, A
I_b	budicí proud, A
I_{b0}	budicí proud naprázdno, A
I_{Eb}	budicí proud budiče, A
k_B	činitel tvaru pole
k_c	Carterův činitel
k_{c1}	Carterův činitel statoru
k_{c2}	Carterův činitel rotoru
k_{Fe}	činitel plnění železa
k_{Fe2}	činitel plnění železa rotoru
k_r	činitel rozlohy
k_{v1}	činitel statorového vinutí
k_y	činitel zkrácení kroku
l_1	délka statorového paketu, m
l_2	aktivní délka rotorového paketu, m
l_{Fe}	aktivní délka statorového paketu, m
l_i	ideální délka statoru, m
l_{j1}	délka indukční čáry ve jhu statoru, m
l_{j2}	délka indukční čáry ve jhu rotoru, m
m	počet fází
N_1	počet závitů zapojených v sérii (hlavního statorového vinutí)
N_{1pom}	počet závitů zapojených v sérii (pomocného statorového vinutí)
N_b	počet závitů zapojených v sérii budicího vinutí (rotorové vinutí)
n	otáčky, min^{-1}
n_{vk}	počet ventilačních kanálů
P	výkon činný, W
P_1	příkon, W
p	počet pólových dvojic
Q_1	počet drážek statoru



Q_2	počet drážek rotoru
Q_b	počet vyražených drážek rotoru
Q_p	pólová rozteč v počtu drážek (mj. počet drážek na pól)
q	počet drážek na pól a fázi
q_b	počet vyražených drážek rotoru na 1 pól
S	zdánlivý výkon, VA
s_d	plocha drážky, m ²
s_{iz}	plocha drážkové izolace, m ²
s_v	průřez vodiče (hlavního vinutí), m ²
s_{vp}	průřez vodiče pomocného vinutí, m ²
t_{d1}	drážková rozteč statoru, m
t_{d2}	drážková rozteč rotoru, m
t_p	pólová rozteč, m
t_{p2}	pólová rozteč rotoru, m
U	napětí, V
U_0	napětí naprázdno, V
U_i	indukované napětí, V
U_{j1}	magnetické napětí jha statoru, A.m ⁻¹
U_{j2}	magnetické napětí jha rotoru, A.m ⁻¹
U_p	magnetické napětí pólu, A.m ⁻¹
U_r	napětí remanentní, V
U_{z1}	magnetické napětí zubů statoru, A.m ⁻¹
U_{z2}	magnetické napětí zubů rotoru, A.m ⁻¹
y	krok vinutí
y_d	krok vinutí v počtu drážek
α	pólové krytí
α_δ	výpočtový činitel pólového krytí
β	zkrácení kroku
δ	velikost vzduchové mezery, m
λ_{pl}	poměrná rozptylová vodivost mezi vnitřními (bočními) povrchy jader pólů
λ_{pnl}	poměrná rozptylová vodivost mezi bočními povrchy pólových nástavců
$\lambda_{p\sigma}$	poměrná magnetická vodivost pro rozptylový tok na jednu stranu pólu
$\lambda_{p\sigma}$	poměrná vodivost mezi bočními povrchy pólových nástavců
μ_0	permeabilita vakua, H.m ⁻¹



ξ	činitel respektující nerovnoměrné rozložení magnetické indukce v příčném průřezu jha statoru
Φ	magnetický tok, Wb
Φ_{σ}	rozptylový tok, Wb
σ	proudová hustota, A.m ⁻²

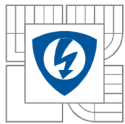
Poznámka: v seznamu symbolů jsou uvedeny základní jednotky daných veličin.

Doplňující indexy:

0	naprázdno
1	statorový
2	rotorový
D	v zapojení do trojúhelníka
b	budicí
E	budiče
h	hlavního vinutí
iz	izolace
n	jmenovitý
pom	pomocného vinutí
Y	v zapojení do hvězdy

Zkratky

AC	střídavý proud
AVR	automatický regulátor napětí (Automatic Voltage Regulator)
DC	stejnoseměrný proud
DECS	digitální regulátor napětí (Digital Excitation Control System)
FEM	MKP - metoda konečných prvků (Finite Element Method)
GSH	Generátor Synchronní s Hladkým rotorem
PMG	generátor s permanentními magnety (Permanent Magnet Generator)
PWM	pulzně šířková modulace (Pulse Width Modulation)



1 ÚVOD

Synchronní generátory tvoří páteř produkce elektrické energie. Synchronní stroje dodávající energii do distribuční nebo rozvodné sítě potřebují ke své činnosti regulaci buzení. Tu zajišťují automatické napěťové regulátory (AVR). Napěťový regulátor ovládá buzení generátoru tak, aby generátor pracoval dle nastavených parametrů. A to jak při statických stavech, tak při přechodných dějích. Regulátor napětí může regulovat $\cos \phi$ nebo množství jalové energie a zlepšovat tak účinnost v síti. Regulátor napětí potřebuje energii pro buzení stroje. Napájení AVR je možno zajišťovat z pomocného generátoru s permanentními magnety, ze sítě, z odbočky ze svorek generátoru nebo z pomocného vinutí. Každý ze způsobů napájení má své přednosti i nedostatky.

Tato práce se zaměřuje na napájení napěťového regulátoru z pomocného vinutí.

Cílem práce je návrh a ověření řešení napájení napěťového regulátoru z pomocného vinutí pro vybraný synchronní generátor výrobce generátorů pro malé vodní elektrárny TES Vsetín. Pro buzení daného synchronního generátoru je přiřazen konkrétní typ automatického regulátoru napětí a další typ je uvažován jako alternativní. Stanoví se požadavky pro napájení daných regulátorů a na základě těchto požadavků bude navrhováno pomocné vinutí.

Provede se rozbor vlastností pomocného vinutí a regulátoru napětí. Bude vysvětleno uspořádání a princip systému synchronního stroje s bezkroužkovým buzením. Práce poskytne teoretický podklad pro návrh vinutí.

Pomocné vinutí bude navrženo pro konkrétní stroj – horizontální třífázový nízkonapěťový synchronní generátor osové výšky 450 mm. Vinutí statoru generátoru je dvouvrstvé, vsypávané.

Analyticky se vypočítá napětí získané z pomocného vinutí. Správnost analytického výpočtu se ověří výpočtem metodou konečných prvků (MKP).

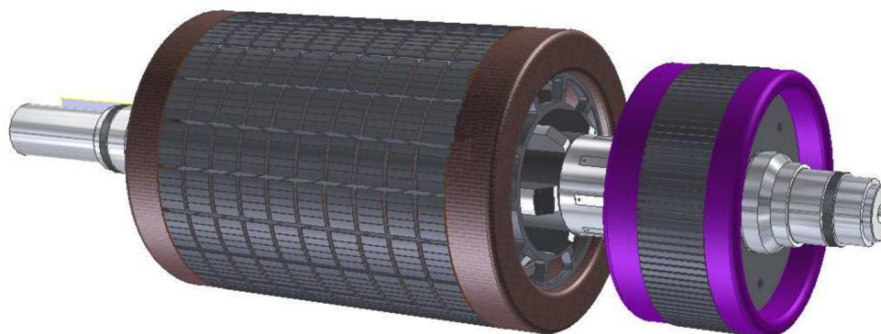
Pomocné vinutí bude realizováno při výrobě generátoru. Vlastnosti pomocného vinutí budou ověřeny měřením na zkušebně elektrických strojů.

Práce je realizována ve spolupráci s průmyslovou výrobní společností TES Vsetín.

1.1 Synchronní stroj s bezkartáčovým buzením

Bezkartáčové (nebo také bezkroužkové) buzení neobsahuje kluzné kontakty. Absencí kroužků a kartáčů je synchronní stroj zbaven možného zdroje poruch a elektromagnetického rušení. Přínosem je zvýšená spolehlivost stroje a snížené nároky na údržbu. Odpadá zde nutnost pravidelné výměny opotřebených kartáčů a ve stroji nedochází k oslabování izolačního systému vinutí vlivem ulpívání uhlíkového prachu uvolněného z kartáčů.

Stroj s bezkartáčovým buzením se sestává ze systému hlavního stroje, stroje synchronního budiče a polovodičového usměrňovače. Celek stroje je tak tvořen dvěma synchronními stroji na společné hřídeli.



Obr. 1-1 Model rotoru hlavního stroje a rotoru budiče na společné hřídeli

Budič nahrazuje kluzné kontakty a slouží k bezkontaktnímu přenosu energie na rotor stroje.

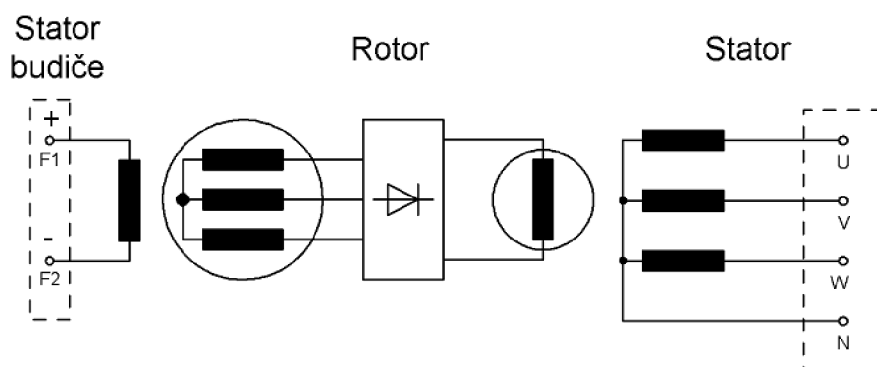
Stator budiče a rotor hlavního stroje je napájen stejnosměrným proudem, v rotoru budiče a statoru hlavního stroje se generuje 3fázový střídavý proud.

Polovodičový usměrňovač je zpravidla můstkový 6pulsní s 6 diodami (viz Obr. 1-8).

Budič je samostatným generátorem uvnitř celku stroje, jemuž je dodávána energie elektrická (stejnosemřný budicí proud) a mechanická – z hřídele stroje. Z toho vyplývá, že stroje s budiči vyžadují méně elektrické energie k buzení.

Při srovnání synchronních generátorů stejných výkonů – kroužkového a bezkroužkového – bude mít bezkroužkový generátor přibližně o řád nižší budicí proud. Velikost celého systému buzení s kluznými kontakty bývá větší a nákladnější. [2]

Z hlediska regulace synchronního stroje je pak bezkroužkový stroj oproti kroužkovému složitějším systémem a má delší časovou odezvu na regulaci.



Obr. 1-2 Principiální schéma generátoru s buzením s pomocným budičem a rotujícím usměrňovačem

Popišme si jednotlivé úlohy hlavních částí stroje v generátorickém režimu:

Stator budiče – přivedením stejnosměrného budičeho proudu se produkuje magnetické pole ve vzduchové mezeře budiče.

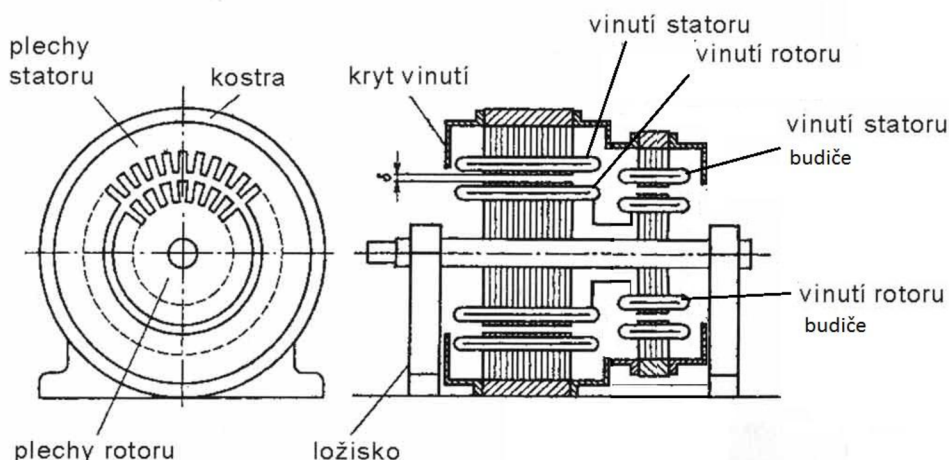
Rotor budiče – zde dochází přeměně energie magnetického pole na 3fázový střídavý elektrický proud.

Usměrňovač – přeměňuje střídavý proud vygenerovaný v rotoru budiče na proud stejnosměrný potřebný k buzení hlavního stroje.

Hřídel stroje – na hřídel je přenášena mechanická energie, otáčivý moment síly, typicky turbínou, motorem nebo převodem. Na hřídeli je usazen rotor hlavního stroje, rotor budiče a usměrňovač.

Rotor hlavního stroje – slouží k vytvoření magnetického pole ve vzduchové mezeře hlavního stroje.

Stator hlavního stroje – zde dochází přeměně energie magnetického pole na 3fázový střídavý elektrický proud, který z generátoru odebíráme.

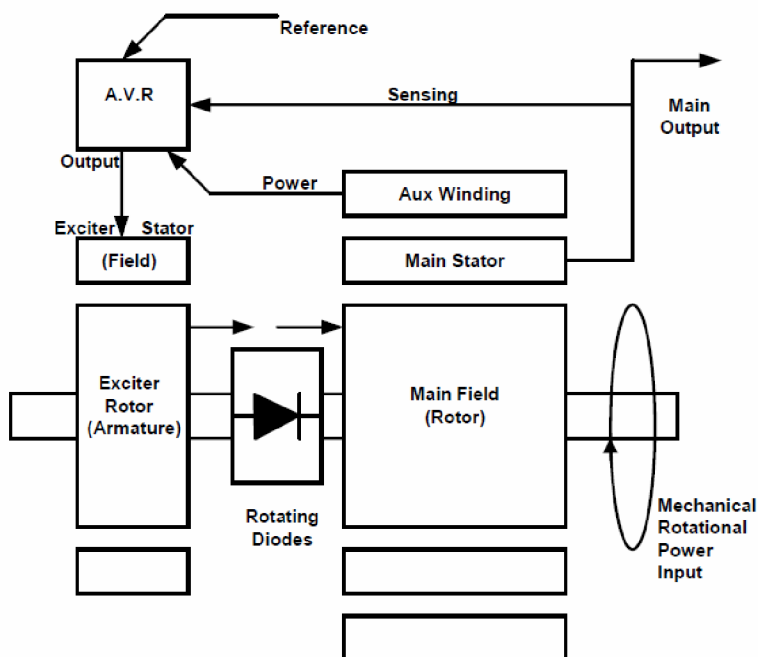


Obr. 1-3 Konstrukční provedení magnetického obvodu stroje s rotujícím budičem[1]

1.2 Pomocné vinutí

Pomocné vinutí (pomocná fáze) představuje samostatný systém vinutí, jehož vodiče jsou uloženy v drážkách spolu s hlavním vinutím statoru.

Stejným způsobem, jako se vlivem magnetického toku ve vzduchové mezeře stroje indukují napětí v hlavním statorovém vinutí, indukují se napětí i v pomocném vinutí.

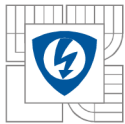


Obr. 1-4 Schematický popis systému generátoru pomocným budičem a napájením regulátoru z pomocného vinutí [3]

1.2.1 Pomocné vinutí pro napájení regulátoru napětí

Indukované napětí pomocného vinutí odpovídá magnetickému toku v magnetickém obvodu statoru. Z toho vyplývají následující vlastnosti pomocného vinutí:

- Jmenovitou hodnotu svorkového napětí pomocného vinutí lze určit při návrhu stroje volbou počtu závitů pomocného vinutí;
- Při přechodných dějích za provozu generátoru se v pomocném vinutí tyto děje projevují;
- Pro start regulátoru a generátoru (nabuzení na jmenovité napětí) je nezbytné dostatečné remanentní napětí generátoru.



1.2.2 Posouzení užití pomocného vinutí pro napájení regulátoru napětí

Porovnejme systém s pomocným vinutím s jinými běžnými způsoby napájení regulátorů napětí synchronních generátorů:

Napájení z generátoru s permanentními magnety (PMG):

Výhody:

- Jistá úroveň výstupního napětí – napětí výstupu PMG je dáno otáčkami stroje, proto při jmenovitých otáčkách je napětí rovněž jmenovité (=dostatečné).

Nevýhody:

- Cena – PM Generátor je relativně velmi nákladný prvek.
- Zvětšení stroje – pro PMG je potřeba místo na hřídeli, která tak musí být delší a i délka, hmotnost a složitost (=cena) celého stroje tak narůstá.
- Riziková manipulace s rotorem – hrozí “přísátí” kovových předmětů permanentními magnety, nebo rotoru ke kovovým částem = nebezpečí úrazů u pracovníků.
- Omezená výkonová kapacita
- Napětí v přetáčkách (tzn. zvýšených otáčkách u turbín) – u aplikací alternátorů pro malé vodní elektrárny mohou průběžné otáčky turbíny po náhlém odpojení zatíženého generátoru od sítě dosahovat i 2,5násobku jmenovitých otáček. To vzhledem k charakteru PMG, u kterého se zvyšujícími se otáčkami se lineárně zvyšuje indukované napětí, znamená nárůst napětí na 2,5násobek jmenovité hodnoty – pro napájecí vstup regulátoru nepřípustné.

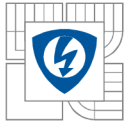
Napájení ze svorek generátoru:

Výhody:

- Náklady – u alternátoru se jmenovitým napětím shodným se vstupním napětím regulátoru napětí je možné napájet regulátor bez jakýchkoliv přídavných opatření.

Nevýhody:

- Náklady na transformaci napětí – v případě, že je nominální napětí generátoru mimo dovolený napěťový rozsah vstupu regulátoru, musí být pro převod napětí použit výkonový transformátor – náklady srovnatelné s realizací pomocného vinutí, navíc potřeba nemalého prostoru pro vlastní transformátor ve svorkovnici generátoru.
- napájení při zkratu – pokud na síti dojde ke zkratu, na svorkách generátoru bude napětí blížící se nule a stejně tak na vstupu regulátoru napětí, který tak nebude schopen s dostatečnou intenzitou regulovat buzení. Generátor v takovém případě nemá zajištěnu schopnost dodávat dostatečný zkratový proud (požaduje se minimálně $3x I_n$) pro zapůsobení zkratových ochran.
- napětí v přetáčkách – po náhlém odpojení zatíženého generátoru od sítě se na svorkách generátoru objevuje přepětí, které může být pro napájecí vstup regulátoru nebezpečné.
- závislost na remanentním napětí – pokud generátor nemá dostatečné remanentní napětí, regulátor napětí generátor nenabudí.



Napájení ze sítě:

Výhody:

- Náklady – nejsou žádné, případně pouze na ochranný modul proti nabíjecímu proudovému rázu pro napájecí vstup regulátoru napětí.
- Nezávislost napětí na přetáčkách

Nevýhody:

- Nepoužitelné pro ostrovní provoz.
- Neschopnost startu generátoru “do tmy” – regulátor nemá z čeho brát energii.
- Napájení při zkratu – pokud na síti dojde ke zkratu, na vstupu regulátoru napětí bude nulové napětí a regulátor přestane budit.

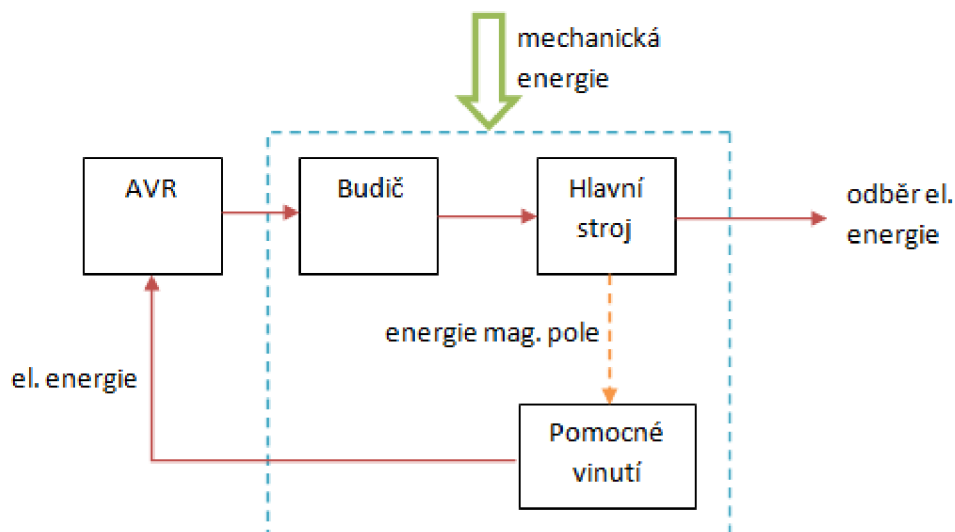
Shrnutí vlastností napájení regulátoru z pomocného vinutí:

Výhody:

- Náklady jsou nízké, není potřeba výrazných zásahů do celku stroje, nenavýšují se hmotnost a rozměry stroje.
- Schopnost dostatečného napájení regulátoru napětí i v případě zkratu na síti. [4]

Nevýhody:

- Vyšší náročnost a pracnost při navíjení statorového vinutí.
- Při poškození pomocného vinutí po impregnaci není možná jeho oprava nebo výměna.
- mírně snížená výkonová kapacita stroje – pomocné vinutí ve statorových drážkách zabírá místo, které by jinak vyplňovalo hlavní vinutí.
- Napětí v přetáčkách – po náhlém odpojení zatíženého generátoru od sítě se ve statorových vinutích generátoru objevují přepětí, která mohou být pro napájecí vstup regulátoru nebezpečná.
- Závislost na remanentním napětí – pokud generátor nemá dostatečné remanentní napětí, regulátor napětí generátor nenabudí.



Obr. 1-5 Schéma toku energií v systému generátoru s pomocným budičem a napájením regulátoru z pomocného vinutí.

Potřebný výstupní proud z AVR je zhruba o řád nižší, než v případě systému bez pomocného budiče (buzení s kluznými kontakty).

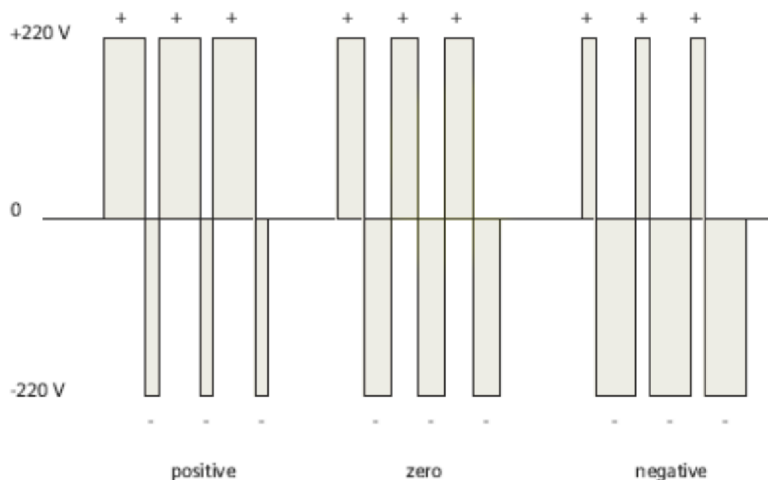
1.3 Automatický regulátor napětí (AVR)

Regulátor napětí je potřebný k regulaci napětí a jalové energie synchronního generátoru. Automatické regulátory napětí mají hlavní funkci v řízení napětí v ustáleném provozu, při přechodných dějích a poruchách. AVR synchronních generátorů pracujících při paralelním provozu s tvrdou sítí zpravidla pracují v režimu kompenzace jalové energie.

AVR synchronních generátorů pracujících v ostrovním provozu (nebo na měkké síti) pracují v režimu napěťové regulace.

1.3.1 Způsob činnosti regulace

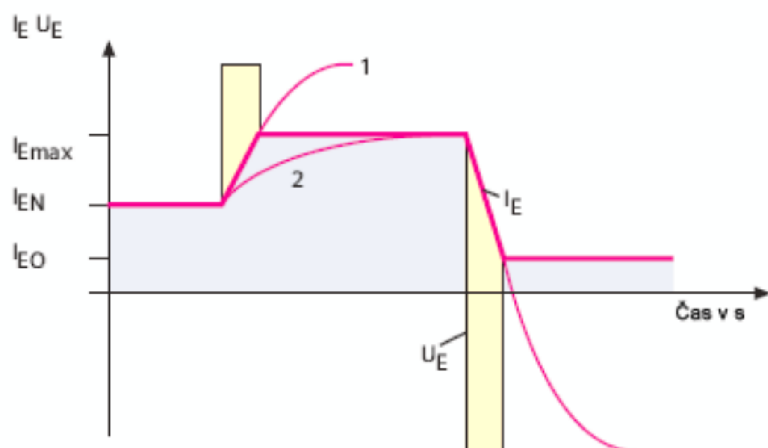
V automatickém regulátoru napětí se skutečná hodnota napětí generátoru porovná s nastavenou referenční hodnotou. Po porovnání s výstupní hodnotou omezovače buzení se signál přivede na vstup PI regulátoru napětí. PI regulátor napětí s nastavitelným zesílením (ziskem) a časovou odezvou vydá výstupní signál, který se jako I_{ref} přivede do sekundárního regulačního budicího proudu. V závislosti na výstupu regulátoru proudu se pak mění generování frekvenčně modulovaných spínacích signálů pro výkonové tranzistory. Základní frekvence je 2,5 kHz. [5]



Obr. 1-6 PWM modulace [5]

Přebuzení a omezovač nárazového buzení

Při nastavení na maximální hodnotu poskytuje měnič vyšší napětí než je nutné pro vybudení na stropní proud. Tato napěťová přeregulace budicího vinutí zkracuje čas nutný k dosažení stropního proudu a zkracuje tak vyregulování odchylek nastavených hodnot napětí na svorkách generátoru. Výstupní proud měniče pro ruční regulaci je omezován maximální hodnotou nastavení. Výstupní proud měniče pro automatickou regulaci je ovlivňován omezením nastavené hodnoty PI regulátoru napětí. Tato referenční hodnota odpovídá napětí požadovaného budicího proudu. [5]



Obr. 1-7 Přebuzení tranzistorového měniče pro dosažení rychlejší odezvy budiče [5]

U_E = výstupní napětí měniče odpovídá budicímu napětí

I_E = výstupní proud měniče odpovídá budicímu proudu

I_{E0} = výstupní proud pro chod naprázdno

I_{EN} = výstupní proud pro jmenovité zatížení

$I_{E_{max}}$ = stropní proud

1 = průběh výstupního proudu bez limitace nárazového buzení

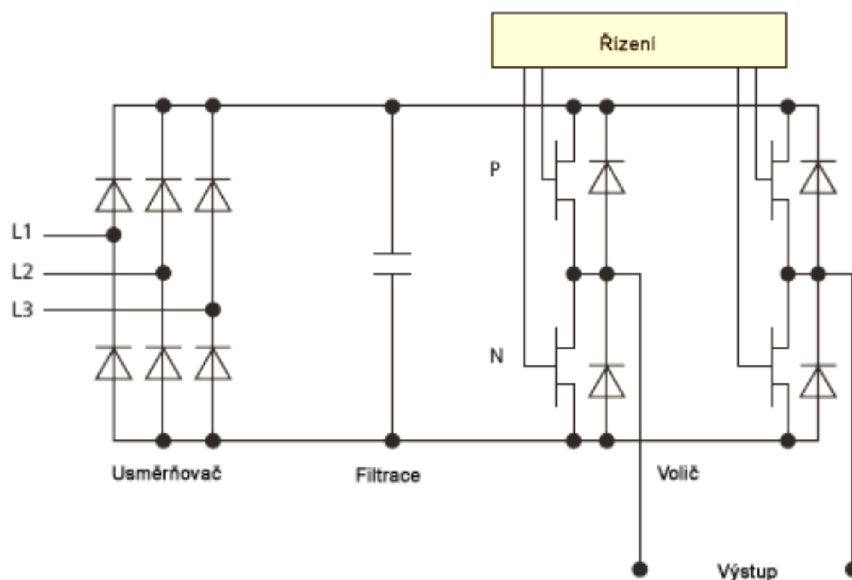
2 = průběh výstupního proudu bez přebuzení

Odbuzení

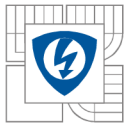
Při odstavení synchronního generátoru nebo při zapůsobení jeho ochran nebo ochran blokového transformátoru se generátor musí odbudit. Na základ povelu k odbuzení se měnič zablokuje. Přes diody v měniči se magnetická energie pole vrátí zpět do meziobvodu. Odbuzení se tak provede velmi rychle. Výkonový obvod se ještě vypínačem buzení odpojí od napájení. [5]

1.3.2 Výkonový obvod

Ve výkonovém obvodu jsou použity tranzistorové měniče, které přes DC meziobvod poskytují potřebný budicí výkon, to znamená, že koncové stupně tranzistorového měniče odebírají energii z DC meziobvodu. Budicí napětí se nastavuje pomocí změny poměru impuls/mezera a přes budicí odpor se mění budicí proud. Budicí proud se měří v koncovém stupni a uzpůsobuje se pro sekundární regulaci budicího proudu.



Obr. 1-8 Základní schéma zapojení tranzistorové výkonové části [5]



1.4 Požadavky na napájení AVR

Při napájení regulátoru AVR z pomocného vinutí je smysluplné umístění regulátoru ve svorkovnici generátoru. Tato kapitola uvádí parametry dvou automatických napěťových regulátorů Basler. Kritérii pro výběr právě těchto modelů bylo: 1) Jsou primárně určeny k montáži přímo do svorkovnice generátoru (mají vysokou mechanickou odolnost) a 2) mají vlastní výkonový stupeň a tak lze předem stanovit potřebné napájecí parametry.

1.4.1 DECS-100

System digitální regulace buzení amerického výrobce Basler (DECS-100) je elektronické plně polovodičové řídicí zařízení využívající mikroprocesoru. Regulátor je vhodný pro bezkartáčové buzení synchronních generátoru do výkonu 5 MW. DECS-100 reguluje výstupní napětí bezkartáčového alternátoru tak, že ovládá velikost proudu budícím vinutím alternátoru. Vstupní výkonové napájení pro DECS-100 se může odebírat z vícepólového generátoru s permanentním magnetem (PMG) dávajícím napětí o vysokém kmitočtu nebo z výstupu generátoru, kdy se použije jako klasický derivační budicí systém. DECS-100 vyhovuje požadavkům na buzení generátoru až do 7 Adc trvale při 63 Vdc PWM výstupu.

Provozní napájení DECS-100

Napětí: 88 až 250 Vac, jednofázové nebo trojfázové (L-L)

Kmitočet: 50 až 400 Hz

Zatížení: 650 VA

Vzrůst napětí: ≥ 6 Vac

DC výstup:

trvalé napětí: 63 Vdc

trvalý proud: 7 Adc

Desetisekundové přibuzení

Výkonový přívod 200 VAC: 135 Vdc, 15 Adc

Výkonový přívod 110 VAC: 90 Vdc, 10 Adc (budič 9 Ω)

75 Vdc, 15 Adc (budič 5 Ω)

[6]

1.4.2 AVC125-10

Analogový regulátor napětí AVC je kompletně vybaven polovodičovými součástkami. Regulátor je vhodný pro bezkartáčové buzení synchronních generátoru do výkonu 5 MW. Vstupní výkonové napájení pro AVC-125 se může odebírat z vícepólového generátoru s permanentním magnetem (PMG) dávajícím napětí o vysokém kmitočtu nebo z výstupu generátoru, kdy se použije jako klasický derivační budicí systém. AVC-125 vyhovuje požadavkům na buzení generátoru až do 10 Adc trvale při 125 Vdc PWM výstupu.

Provozní napájení AVC125-10

Napětí: 180 až 264 Vac, jednofázové nebo trojfázové (L-L)

Kmitočet: 50 až 400Hz

Zatížení: 1750 VA

Vzrůst napětí: ≥ 12 Vac

DC výstup:

trvalé napětí: 125 Vdc

trvalý proud: 10 Adc

Desetisekundové přibuzení – napětí: 250 Vdc,

Desetisekundové přibuzení – proud: 20 Adc.

[6]

1.4.3 Zhodnocení požadavků na napájení

Při průniku množin napěťových rozsahů zkoumaných regulátorů získáváme:

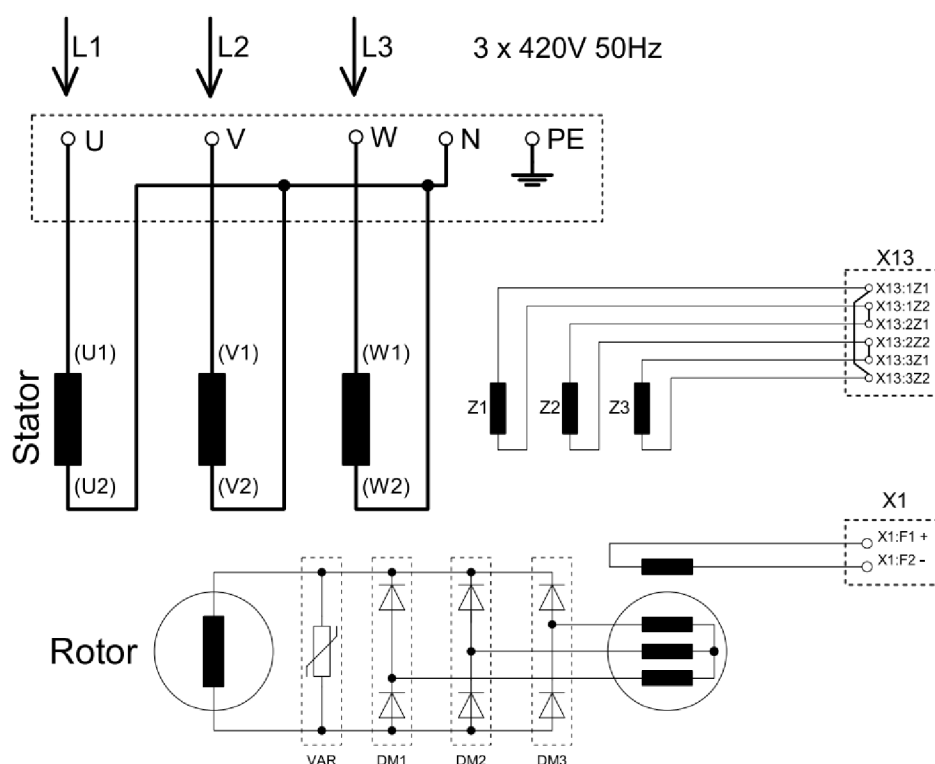
Stanovený napěťový rozsah: 180 – 250 Vac

Zatížení (nebude vyšší než): 1750 VA

Potřebné remanentní napětí generátoru: 12 Vac

V zájmu symetričnosti celého vinutí bude pomocné vinutí trojfázové.

Vzhledem ke stavbě regulátoru, který obsahuje stejnosměrný meziobvod ve výkonovém stupni, nelze předpokládat citlivost regulátoru na harmonické zkreslení vstupního proudu.



Obr. 1-9 Schéma zapojení generátoru s bezkroužkovým buzením a pomocným vinutím

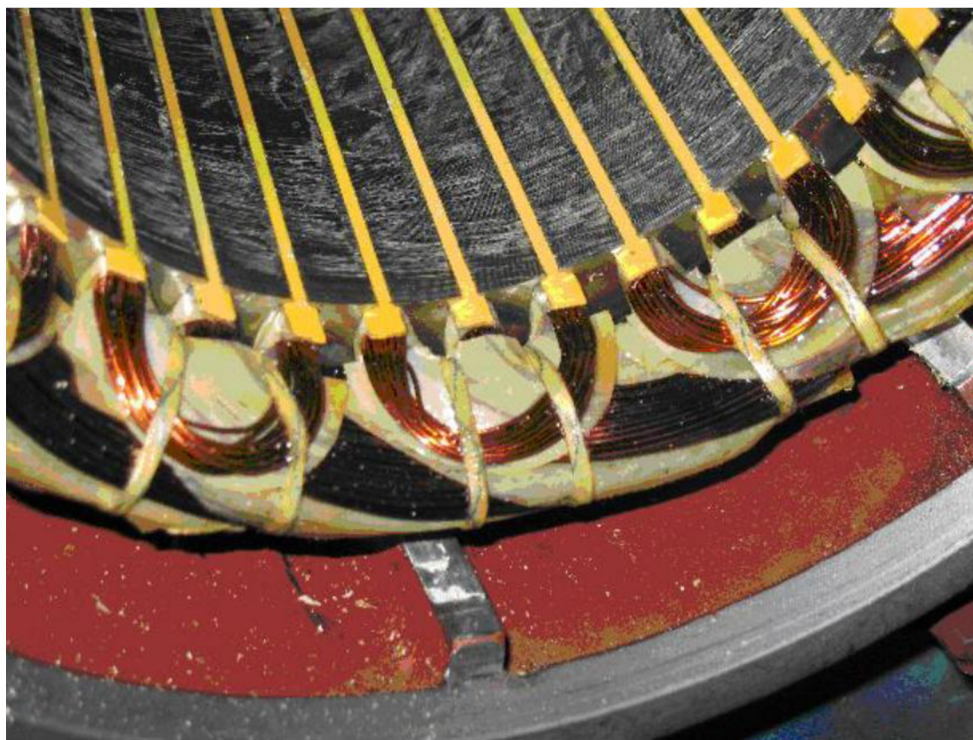
1.5 Vinutí střídavých strojů na nízké napětí

Vsypávané vinutí

Vsypávané vinutí se ukládá do polozavřených drážek s úzkým otevřením, kterým se postupně jednotlivé vodiče zavádějí („vsypávají“) do drážky (odtud i název vinutí).

Při strojním navíjení se podle typu navíjecích strojů buď každý závit bezprostředně navíjí do drážky bez předchozího navíjení cívkových polotovarů, nebo se předem navinou skupiny cívek, které se potom vtahují do potřebných drážek. Navíjí se na automatických nebo poloautomatických navíjecích strojích. Největší průměr drátu používaný u vsypávaných vinutí nepřevyšuje zpravidla 1,8 mm, neboť vodiče většího průměru jsou příliš tuhé, špatně se upevňují v drážkách a mimoto činitel plnění drážky není příliš velký. Potřebného průřezu vodiče se dosahuje použitím několika dílčích, paralelních vodičů.

Při návrhu stroje se pro snížení počtu paralelních vodičů volí vinutí s několika paralelními větvemi.[7]



Obr. 1-10 Pomocné vinutí uložené v horní části drážek pod drážkovými klíny[2]

Při návrhu čel vinutí elektrických strojů je nutné uvažovat vzdálenosti mezi čely jednotlivých cívek, zaručujících spolehlivost izolace a průchod chladičoho vzduchu. Rovněž musí být zaručeny minimální přípustné izolační vzdálenosti mezi čely a okolními kovovými částmi stroje (ložiskovými štíty, kostrou apod.) a mezi čely a skupinovými spojkami, které se izolují až po založení cívek do drážek a v důsledku toho mají obvykle menší izolační pevnost než vlastní cívky.

Jedním z nejzranitelnějších míst izolace vinutí jsou části při výstupu cívky z drážky v čelních prostorech stroje, kde se intenzita elektrického pole zvětšuje a zároveň je izolace cívek zeslabena v důsledku ohybu čel. Aby byla zajištěna nutná elektrická pevnost místa ohybu čel, není ohyb přímo u výstupu z drážky, ale přímá část cívky se zhotoví poněkud delší, takže ohyb je pak v jisté vzdálenosti od výstupu. Tato vzdálenost závisí na jmenovitém napětí stroje a je nutné ji brát

v úvahu při výpočtu délky čela a střední délky závitů. Pro zvýšení pevnosti tohoto místa se vsypávají a polotuhých vinutí zesiluje izolace v prostoru výstupu cívek vinutí z drážek. [7]

Izolace vinutí střídavých strojů

Během izolování a zakládání vinutí do drážek stroje je izolace vystavena působení různých mechanických vlivů a při práci stroje pak ještě i působení elektrického pole, oteplení, vlivu vlhkosti okolního prostředí, prachu, olejových výparů, plynů, a podobně. Neexistuje jednotný druh elektroizolačního materiálu, který by zajistil absolutní spolehlivost izolace elektrického stroje při působení všech zmíněných vlivů.

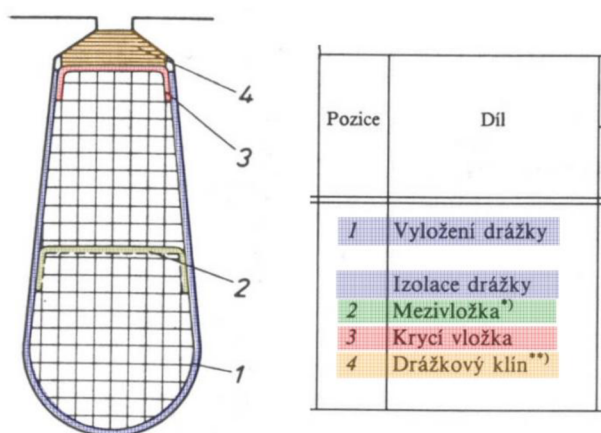
Izolační materiály s velkým izolačním odporem obvykle nevykazují dostatečnou mechanickou pevnost a nevydrží mechanická namáhání při izolování a ukládání do drážek, mechanicky odolné materiály zase obvykle nemají dostatečnou elektrickou pevnost. Proto při konstrukci elektrické izolace se používá nikoliv jeden, ale několik různých materiálů, jejichž vlastnosti se vzájemně doplňují. Mimo elektrickou pevnost musí izolace mít i dostatečnou tepelnou vodivost, aby teplo vznikající ve vodičích při práci elektrického stroje mohlo být odvedeno bez přílišného zvýšení teploty.

Hlavními požadavky, které jsou kladeny na izolaci elektrických strojů, jsou tedy velká elektrická pevnost a dobrá tepelná vodivost. Ostatní požadavky (mechanická pevnost, odolnost proti vlhkosti, tepelná stálost, odolnost proti chemickým vlivům apod.) jsou kladeny na izolaci pouze z hlediska její schopnosti zachovat elektrickou pevnost při jejím technologickém zpracování a při dlouhodobé činnosti elektrických strojů při určeném druhu zatížení při působení okolního prostředí.

Podle své funkce se izolace dělí na drážkovou, závitovou a izolaci vodičů.

Izolace vodičů – je izolace, jíž je opatřen vodič, ze kterého se vinutí vyrábí.

Drážková izolace – se umísťuje buď přímo na cívky vinutí (průběžná či kombinovaná izolace), nebo se zakládá do drážek stroje před uložení vinutí (stroje na nízké napětí se vsypávaným vinutím či s dělenými cívkami. [7]



Obr. 1-11 K definici drážkové izolace [8]

Do drážek elektrických strojů se umísťuje několik typů vložek obvykle z vrstveného materiálu, které mají různé funkce. Podložky pod klín mají chránit vinutí před poškozením při

zakládání drážkových klínů a mimoto se volbou různého počtu podložek s různými tloušťkami doplňuje vůle vinutí na výšku drážky, aby cívky byly v drážkách dostatečně upevněny.

Podložky mezi vrstvami vsypávaných a dělených vinutí tvoří izolační mezivrstvu mezi vodiči horní a dolní vrstvy.

Impregnuje se až po navinutí stroje. Vinutí se impregnuje tak, že se celý navinutý svazek namáčí do impregnačního laku za tepla. Namáčení je obvykle doplněno vakuovým nebo tlakově-vakuovým cyklem.

Drážková izolace se provádí z několika vrstev izolační fólie jako vyložení drážky. Po vytvarování se závity dílčích cívek zajistí proti rozsypaní lakem a ovinutím páskou, která musí odpovídat teplotní třídě izolace.

U dvouvrstevných vsypávaných vinutí se nutně vkládají izolační vložky oddělující obě vrstvy vinutí, strany různých cívek v jedné drážce (Obr. 1-11). Tyto vložky musí mít stejnou elektrickou pevnost jako drážková izolace, neboť při zkrácení kroku se v některých drážkách nacházejí strany cívek, patřících k různým fázím. Napětí mezi vodiči různých cívek v jedné drážce je pak srovnatelné se síťovým napětím (závisí na poloze cívek ve schématu vinutí).

Doplňková izolace v čelních částech vyspávaných vinutí se dává pouze mezi cívky různých fází, tj. mezi krajní cívky různých cívkových skupin. [7]

1.5.1 Činitel plnění drážky

Zuby jsou po magnetické stránce nejvíce zatíženým místem magnetického obvodu, a proto je při návrhu elektrických strojů snaha volit takové rozměry drážek, které umožňují umístění nutného počtu vodičů vinutí a izolace v co nejmenším prostoru. Využití prostoru drážky pro umístění vodičů se vyjadřuje činitelem plnění drážky k_{dr} , který udává poměr celkového průřezu všech vodičů v drážce k ploše drážky S_d .

$$k_{dr} = \frac{S_v V_d n_p}{S_d} \quad (1)$$

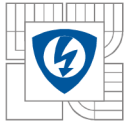
kde S_v je průřez dílčího vodiče,

V_d počet vodičů v drážce (efektivních),

n_p počet paralelních vodičů (drátů) tvořících jeden vodič (efektivní).

Činitel k_{dr} závisí na celkovém množství izolace v drážce, tj. na tloušťce drážkové a cívkové izolace a izolace vodičů, a na tloušťce různých izolačních vložek. Je nutné brát v úvahu i tzv. mrtvý prostor nezaplňný ani izolací, ani vodiči. Při nárůstu tloušťky izolace, např. u strojů na vysoké jmenovité napětí, nebo při použití méně kvalitních izolačních materiálů se činitel plnění drážky zmenšuje. To vede k horšímu využití plochy, a tudíž i celé zubové zóny stroje.

Ve strojích, jejichž vinutí je vyrobeno z pásů obdélníkového průřezu, může být činitel vypočítán dostatečně přesně, protože při návrhu je přesně určena poloha každého vodiče v drážce. U vsypávaných vinutí z drátů není možné předem přesně určit polohu vodičů v drážce. Mimoto hustota rozmístění vodičů v drážce není konstantní. Závisí na síle, kterou navíječ vyvine při ukládání vinutí do drážky. Ze zkušenosti je známo, že při přílišné hustotě uložení vodičů kruhového průřezu (drátů) v drážce pracnost navíjení neúměrně vzrůstá a spolehlivost vinutí se prudce snižuje v důsledku mechanických poškození izolace vodičů. [7]



1.5.2 Části vinutí střídavých strojů

Základní částí vinutí elektrických strojů je závit. Několik závitů, které jsou zapojeny do série a umístěny ve stejných drážkách, opatřených společnou celkovou cívkovou izolací, tvoří cívku vinutí. Každá aktivní strana cívky je umístěna v jedné drážce. Jestliže je celá drážka zaplněna aktivní stranou pouze jedné cívky (aktivní strany jsou v jedné vrstvě), nazývá se vinutí jednovrstvé. Jestliže jsou v každé drážce umístěny aktivní strany dvou cívek nad sebou, jde o vinutí dvouvrstvé.

Několik za sebou spojených cívek, uložených v sousedních drážkách, tvoří cívkovou skupinu, která představuje vinutí na jeden pól nebo jednu pólovou dvojici jedné z fází stroje. Počet cívek v cívkové skupině se značí q . Protože q cívek je umístěno v sousedních drážkách, aktivní strany přední nebo zadní zaujímají q drážek, a proto se q nazývá počet drážek na pól a fázi, tj. počet drážek, ve kterých leží strany cívek, tvořících vinutí jedné fáze na jeden pól stroje.

V rozsahu jedné cívkové skupiny mohou být všechny cívky zapojeny pouze do série, protože fázory indukovaného napětí cívek nacházejících se v různých drážkách jsou vzájemně pootočený o drážkový úhel a při paralelním spojení by vznikaly velké vyrovnávací proudy. Paralelní spojení v rámci jedné cívkové skupiny se používá pouze v některých zvláštních vinutích velkých dvoupólových turboalternátorů.

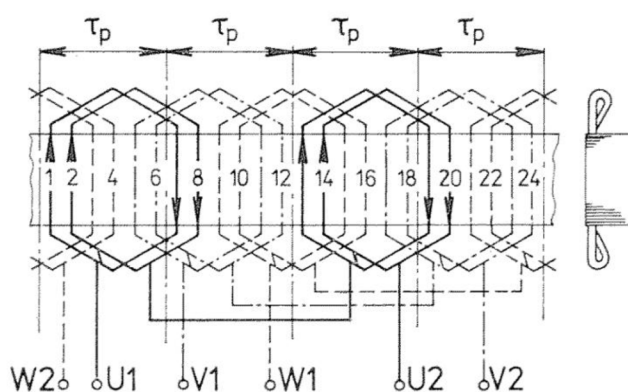
Několik cívkových skupin navzájem spojených tvoří fázi vinutí. Cívkové skupiny ve fázi je možné spojovat sériově nebo paralelně. Počet cívkových skupin v každé fázi závisí na počtu pólů stroje a na typu vinutí. Počet paralelních větví při spojování cívkových skupin se určuje při výpočtu vinutí.

Konce fází se ve většině případů nespojují uvnitř elektrického stroje, nýbrž se ke svorkám svorkovnice vyvádějí všechny začátky a konce fází, což umožňuje připojovat stroje na dvě síťová napětí spojením fází do hvězdy nebo do trojúhelníka. Napětí připadající na jednu fázi statorového vinutí se přitom nemění. [7]

Schéma vinutí

Spojení jednotlivých cívek, cívkových skupin a fází vinutí se zadává v technické dokumentaci ve formě schematického výkresu, který se nazývá schéma vinutí. Při kreslení schémat vinutí platí řada konvencí. Výkres schématu vinutí nerespektuje rozměrová měřítko, tzn., nevyjadřuje žádné rozměrové vzájemné vztahy ve stroji nebo ve vinutí a jeho částech. Každá cívka se ve schématu kreslí jednoduchou čarou nezávisle na počtu závitů a dílčích vodičů v každém závitě. Všechny cívky se zobrazují v jedné rovině. Dohodnutých pravidel pro kreslení schémat vinutí je celá řada.

Je známo několik způsobů zobrazení schémat vinutí, z nichž nejrozšířenější je tzv. rozvinuté schéma. Rozvinuté schéma zobrazuje vinutí statoru nebo rotoru rozvinuté do roviny a dovoluje ukázat všechna spojení mezi částmi vinutí (Obr. 1-12). [7]



Obr. 1-12 Trojfázové jednovrstvé vinutí s pól párovými cívkami stejného kroku [9]

$$(q = 2, y = t_p, y_d = Q_p)$$

1.5.3 Činitel vinutí

Činitel vinutí k_v uvažuje zmenšení napětí indukovaného ve fázi vinutí elektrického stroje, uloženého v drážkách ve srovnání s napětím, které by se indukovalo ve vinutí s týmž počtem závitů, ale s plným krokem, rovným pólové rozteči, a jež by bylo soustředěno do jedné cívky. Činitel vinutí je dán vztahem

$$k_v = k_y k_r \quad (2)$$

kde k_y je činitel zkrácení kroku, uvažující zmenšení napětí indukovaného v závitě vlivem zkrácení kroku,

k_r činitel rozlohy, uvažující zmenšení indukovaného napětí vlivem rozložení do více drážek.

Činitel zkrácení kroku

Poměr skutečného kroku vinutí y k velikosti pólové rozteče t_p se nazývá zkrácení kroku. Krok y i pólová rozteč t_p musí být udány ve stejných jednotkách, obvykle délkových nebo úhlových. Jestliže vyjádříme krok v počtu drážek, můžeme jej označit y_d a pólovou rozteč (počet drážek na pól) v počtu drážek $Q_p = Q/2p$. Zkrácení kroku je tedy $y/t_p = y_d/Q_p$ a někdy se označuje písmenem β .

Poměr geometrického součtu napětí indukovaného ve dvou aktivních stranách téhož závitu k jejich aritmetickému součtu se nazývá činitel zkrácení kroku k_y .

Činitel zkrácení kroku pro první harmonickou

$$k_y = \sin\left(\frac{y}{t_p} \cdot \frac{\pi}{2}\right) = \sin\left(\frac{y_d}{Q_p} \cdot \frac{\pi}{2}\right) \quad (3)$$

a obecně pro libovolnou v tu harmonickou

$$k_{yv} = \sin v \left(\frac{y}{t_p} \cdot \frac{\pi}{2}\right) = \sin v \left(\frac{y_d}{Q_p} \cdot \frac{\pi}{2}\right) \quad (4)$$

Nejčastěji používaná oblast zkrácení kroku ve střídavých elektrických strojích je $y / t_p = 0,79$ až $0,833$. Při takovémto zkrácení kroku jsou nejvíce potlačeny vyšší harmonické (pátá a sedmá) při poměrně nepatrném zmenšení napětí první harmonické. Téměř všechny stroje s dvouvrstvým vinutím, až na stroje malých výkonů, mají krok zkrácený.

Ve zvláštních případech se krok zkracuje až na $\frac{2}{3}t_p$ nebo na $\frac{1}{2}t_p$, např. u velkých dvoupólových turboalternátorů i asynchronních motorů. Takovéto zkrácení kroku má dva důvody. Jednak se tím zkracuje vyložení, tj. axiální vzdálenost konce čela od výstupu z drážky, a tím se zlepšuje poměr aktivní délky k délce čel vinutí. Druhým důvodem je technologie výroby.

Činitel rozlohy

Činitel rozlohy pro první harmonickou trojfázových vinutí

$$k_r = \frac{\sin\left(\frac{q}{Q_p} \cdot \frac{\pi}{2}\right)}{q \sin\left(\frac{1}{Q_p} \cdot \frac{\pi}{2}\right)} = \frac{\sin \frac{\pi}{2m}}{q \sin \frac{\pi}{2mq}} = \frac{0,5}{q \sin \frac{30^\circ}{q}} \quad (5)$$

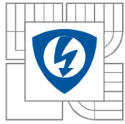
Pro vyšší harmonické elektrický úhel dvou drážek α závisí na řádu harmonické podle vztahu

$$\alpha_r = \frac{2\pi p}{Q} v = \frac{\pi}{mq} v \quad (6)$$

proto činitel rozlohy je obecně pro celé číslo q pro libovolnou harmonickou dán vztahem

$$k_r = \frac{\sin \frac{\pi}{2m v}}{q \sin \frac{\pi}{2mq v}} \quad (7)$$

[7]



1.6 Metoda výpočtu počtu závitů pomocného vinutí

Při návrhu pomocného vinutí se určí počet vodičů odvozením ze známého vztahu pro magnetický tok Φ

$$\Phi = \frac{U_i}{4 k_B f N_1 k_{v1}} \quad (8)$$

kde N_1 je počet závitů zapojených v sérii

k_{v1} činitel statorového vinutí

f je frekvence

k_B činitel tvaru pole, což je poměr efektivní hodnoty indukce ke střední hodnotě.

Má-li magnetická indukce ve vzduchové mezeře stroje sinusový průběh, je činitel tvaru pole $k_B = 1,11$. [7]

Předběžně se získá počet závitů v sérii jedné fáze úpravou rovnice (8)

$$N_1 = \frac{U_i}{4 k_B f \Phi k_{v1}} \quad (9)$$

Skutečný počet závitů musí být číslem celým. Při volbě počtu závitů se musí zohlednit počet drážek statoru a požadavek na rovnoměrné rozvržení závitů mezi statorovými drážkami. Snaha je o co nejjednodušší provedení vinutí (náklady na materiál, pracnost navíjení, eliminace možných chyb), výhodný je tak co nejmenší počet cívek a v nich co nejmenší počet závitů. Není nutné využívat všechny drážky, uplatní se např. $\frac{1}{2}$ drážek, $\frac{1}{3}$ atd., což se odvozuje od počtu drážek na pól a fázi q hlavního stroje.

Ověření správnosti zvoleného počtu závitů:

Kontrola výstupního napětí na svorkách pomocného vinutí

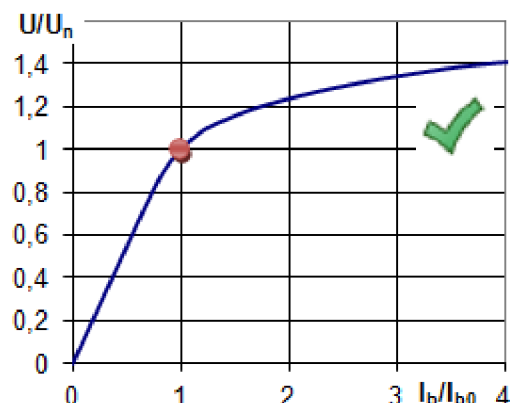
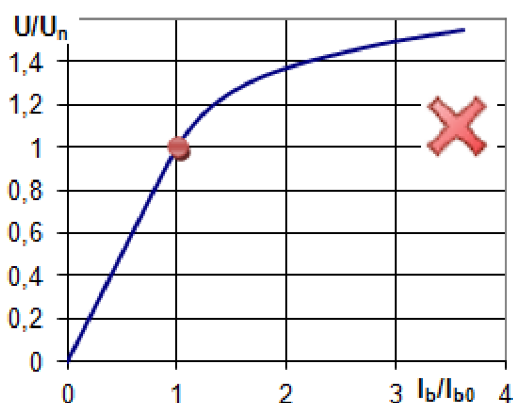
$$U_i = 4 k_b f N_1 \Phi k_{v1} \quad (10)$$

Výsledné napětí musí ležet ve stanoveném rozsahu napájecího napětí pro regulátor.

2 NÁVRH POMOCNÉHO VINUTÍ

Pomocné vinutí se navrhuje pro předběžně navržený synchronní generátor, u něhož je splněn předpoklad mírně snížené hodnoty plnění statorové drážky. Snížením plnění drážek je snížena výkonová kapacita generátoru o cca 1 %.

Pomocné vinutí bude muset být navrženo tak, aby splňovalo požadavky kapitoly 1.4.3 na základní napěťový rozsah a proudové zatížení; navíc musí umožnit start regulátoru z remanentního napětí generátoru a při stavu přebuzení nesmí být jeho napětí nebezpečně vysoké pro napájecí vstup regulátoru. Poslední dva požadavky jdou, co do dimenzování pomocného vinutí, částečně proti sobě. Pokud by se předpokládalo remanentní napětí generátoru malé (až nedostatečné), zdálo by se vhodné, jednoduše navrhnout pomocné vinutí na, ze stanoveného rozsahu, vyšší jmenovité napětí. To by však mohlo být rizikové pro stav přebuzení (viz Obr. 2-1). Z těchto důvodů bude jmenovité napětí pomocného vinutí voleno ve středu stanového rozsahu. K tomu budou provedeny výpočty: co do výpočtu velikosti remanence je nejistota počítaných parametrů vysoká a pak rozdíl mezi počítanými a skutečnými hodnotami remanentního napětí bývá příliš velký na to, aby bylo možné z těchto výpočtů vycházet. Naopak stav generátoru v přebuzení spočítat lze, i když pro vlastní vyhodnocení “bezpečně” úroveň přepětí pro regulátor nejsou výrobcem regulátoru stanoveny hodnoty. Tuto úroveň lze pouze tušit, na základě dimenzování součástek užitých v daném regulátoru napětí. Proto pro návrh a přesné stanovení vlastností pomocného vinutí bude zapotřebí propočítat vlastnosti magnetického obvodu generátoru.



Obr. 2-1 Srovnání dvou příkladů průběhů charakteristik naprázdno

vlevo: stroj se jmenovitým bodem položeným „nizko pod kolenem“ magnetizační křivky

vpravo: stroj se jmenovitým bodem položeným „na koleni“ magnetizační křivky

Za tímto účelem bude analyticky vypočtena charakteristika naprázdno. Takto vypočtená charakteristika bude ověřena výpočtem metodou konečných prvků.

Přidáním pomocného vinutí do drážek k hlavnímu vinutí v drážkách ubude prostoru, což bude nutno prověřit výpočtem realizovatelnosti vinutí z hlediska plnění drážky.

2.1 Popis generátoru

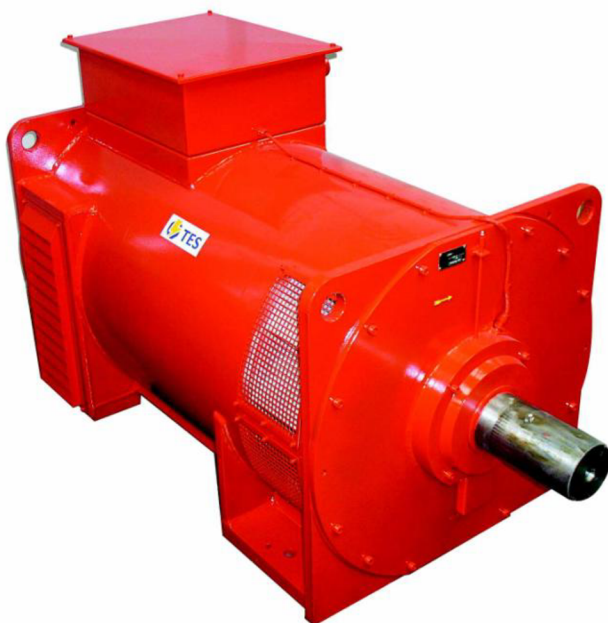
V této kapitole je popsán generátor, pro který je navrhováno pomocné vinutí:

Generátor pro malou vodní elektrárnu, synchronní, třífázový, nízkonapěťový, 8pólový. Buzení je bezkartáčové s pomocným budičem a rotujícím usměřovačem. Regulace napětí automatickým napěťovým regulátorem (AVR).

Technické parametry:

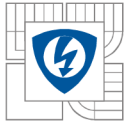
štitkové údaje:

typ		GSH450L8	zatěžovatel	S1
počet fází	m	3	tvar	IM 1001
zdánlivý výkon	S_n	950 kVA	krytí	IP 23
$\cos \phi$		0,8	chlazení	IC 01
otáčky	n	750 min^{-1}	nadmořská výška	1000 m.n.m
frekvence	f	50 Hz	teplota okolí	$40 \text{ }^\circ\text{C}$
napětí	U_n	420 V	izolační třída	F
zapojení		hvězda	využití ve třídě	B
proud	I_n	1306 A	průběžné otáčky	1350 min^{-1}



Obr. 2-2 Synchronní generátor TES řady GSH [10]

osová výška	450 mm
počet pólů	$2p = 8$



rozměry magnetického obvodu:

vnější průměr statoru	$D_e = 860 \text{ mm}$
vnitřní průměr statoru	$D = 690 \text{ mm}$
vnitřní průměr rotoru	$D_i = 400 \text{ mm}$
velikost vzduchové mezery	$\delta = 2,2 \text{ mm}$
délka statorového paketu	$l_1 = 914 \text{ mm}$
aktivní délka stator. paketu	$l_{Fe} = 12 \times 67 \text{ mm} = 804 \text{ mm}$
počet radiálních ventil. kanálů	$n_{vk} = 11$
šířka ventilačních kanálů	$b_{vk} = 10 \text{ mm}$
počet drážek statoru	$Q_1 = 96$
počet drážek na pól a fázi	$q = 96/(8.3) = 4$
Pólová rozteč v počtu drážek (počet drážek na pól)	$Q_p = Q/2p = 96/8 = 12$
statorová drážka typu Lx o rozměrech (š x v)	$12,2 \times 31,1 \text{ mm}$
počet drážek rotoru	$Q_2 = 72$
počet vyražených drážek rotoru	$Q_b = 32$
rotorová drážka typu Lx o rozměrech (š x v)	$21,2 \times 59,5 \text{ mm}$
natočení drážky	$1 / 96$
jakost plechů	M400-50A
činitel plnění železa	0,95

vinutí stator:

způsob navinutí:	vsypávané
druh vinutí:	dvouvrstvé
počet závitů v sérii (stat. vinutí)	$N_1 = 10$
počet vodičů v drážce:	5
počet paralelních drátů:	12
rozměr drátu:	$9 \times \phi 2,0 \text{ mm} + 3 \times \phi 1,9 \text{ mm}$
zkrácení β	10 / 12
počet paralelních větví a	8

vinutí rotor:

způsob navinutí:	vsypávané
druh vinutí:	jednovrstvé
počet závitů v sérii (budicí vinutí)	$N_b = 96$
počet vodičů v drážce:	48

2.2 Výpočet charakteristiky naprázdno (hlavního vinutí)

Charakteristika naprázdno $U_i = f(F_{b0})$ bude sestrojena na základě výpočtu magnetického obvodu. Při výpočtu magnetického obvodu se určuje magnetomotorické napětí budícího vinutí F_{b0} , nutné k vytvoření magnetického toku stroje Φ při chodu naprázdno. Při otáčení rotoru vyvolá tento magnetický tok ve statorovém vinutí indukované napětí.

2.2.1 Výpočet magnetického obvodu

Podkapitoly v této části textu vychází z literatury [7].

Výpočet magnetického obvodu vychází z fázové hodnoty napětí ve statorovém vinutí $U_i = U_n / \sqrt{3}$ a ze známého vztahu se vypočítá odpovídající magnetický tok Φ

$$\Phi = \frac{U_i}{4 k_B f N_1 k_{v1}} = \frac{242,49}{4 \cdot 1,11 \cdot 50 \cdot 10 \cdot 0,925} = 118,08 \text{ mWb} \quad (11)$$

kde N_1 je počet závitů zapojených v sérii,

k_{v1} činitel statorového vinutí [-],

f frekvence [Hz],

k_B činitel tvaru pole [-], což je poměr efektivní hodnoty indukce ke střední hodnotě.

Má-li magnetická indukce ve vzduchové mezeře stroje sinusový průběh, je činitel tvaru pole $k_B = 1,11$.

Činitel vinutí k_v uvažuje zmenšení napětí indukovaného ve fázi vinutí elektrického stroje, uloženého v drážkách ve srovnání s napětím, které by se indukovalo ve vinutí s týmž počtem závitů, ale s plným krokem, rovným pólové rozteči, a jež by bylo soustředěno do jedné cívky.

Činitel vinutí je dán vztahem

$$k_{v1} = k_y k_r = 0,966 \cdot 0,958 = 0,925 \quad (12)$$

kde k_y je činitel zkrácení kroku [-], uvažující zmenšení napětí indukovaného v závitě vlivem zkrácení kroku,

k_r činitel rozlohy [-], uvažující zmenšení indukovaného napětí vlivem rozložení do více drážek.

Činitel zkrácení kroku

Poměr skutečného kroku vinutí y k velikosti pólové rozteče t_p se nazývá zkrácení kroku. Jestliže vyjádříme krok v počtu drážek, můžeme jej označit y_d a pólovou rozteč (počet drážek na pól) v počtu drážek $Q_p = Q/2p$. Zkrácení kroku je tedy $y/t_p = y_d/Q_p$ a někdy se označuje písmenem β .

Poměr geometrického součtu napětí indukovaného ve dvou aktivních stranách téhož závitě k jejich aritmetickému součtu se nazývá činitel zkrácení kroku k_y

$$k_y = \sin\left(\frac{y}{t_p} \cdot \frac{\pi}{2}\right) = \sin\left(\frac{y_d}{Q_p} \cdot \frac{\pi}{2}\right) = \sin\left(\frac{10}{12} \cdot \frac{\pi}{2}\right) = 0,966 \quad (13)$$

Činitel rozlohy trojfázových vinutí vychází ze zvoleného počtu drážek na pól a fázi

$$k_r = \frac{\sin \frac{\pi}{2m}}{q \sin \frac{\pi}{2mq}} = \frac{\sin \frac{\pi}{2 \cdot 3}}{4 \sin \frac{\pi}{2 \cdot 3 \cdot 4}} = 0,958 \quad (14)$$

Z vypočteného magnetického toku se počítá maximální hodnota indukce ve vzduchové mezeře

$$B_\delta = \frac{\Phi}{\alpha_\delta t_p l_i} = \frac{118,08 \cdot 10^{-3}}{0,748 \cdot 0,27096 \cdot 0,866} = 0,673 \text{ T} \quad (15)$$

kde α_δ je výpočtový činitel pólového krytí [-],

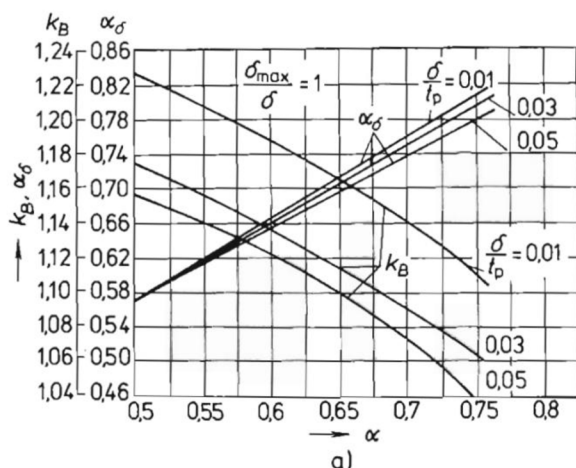
t_p pólová rozteč [m],

l_i ideální délka statoru [m].

Pólová rozteč t_p se bude geometricky rovnat

$$t_p = \frac{\pi D}{2p} = \frac{\pi \cdot 690}{8} = 270,96 \text{ mm} \quad (16)$$

kde D je vnitřní průměr statoru [mm].



Obr. 2-3 Činitel pólového krytí $\alpha_\delta = f(\alpha)$ a činitel tvaru pole $k_B = f(\alpha)$ při poměru $\delta_{\max} / \delta = 1$ [7]

Hodnoty výpočtového činitele pólového krytí jsou v Obr. 2-3 vyneseny jako funkce pólového krytí α a poměru δ/t_p

$$\frac{\delta}{t_p} = \frac{2,2}{270,96} = 0,008 \quad (17)$$

K odečtení výpočtového činitele pólového krytí α_δ z grafu je zapotřebí určit činitele pólového krytí α pro danou geometrii

$$\alpha = \frac{b_{pn}}{t_{p2}} = \frac{184,4}{269,2} = 0,685 \quad (18)$$

kde b_{pn} je výpočtová šířka pólu rotoru [mm],

t_{p2} pólová rozteč rotoru [mm].

Pólová rozteč rotoru

$$t_{p2} = \frac{\pi D_r}{2p} = \frac{\pi \cdot 685,6}{8} = 269,2 \text{ mm} \quad (19)$$

kde D_r je vnější průměr rotoru, určený jako

$$D_r = D - 2 \cdot \delta = 690 - 2 \cdot 2,2 = 685,6 \text{ mm} \quad (20)$$

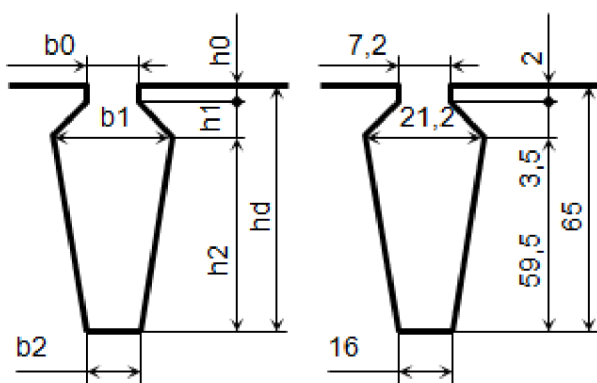
kde δ je velikost vzduchové mezery [mm].

Výpočtový rozměr pólu rotoru s využitím zjednodušeného výpočtu geometrického uspořádání pólu a zubů rotoru

$$b_{pn} = t_{p2} - (q_b \cdot b_{1r}) = 269,2 - (4 \cdot 21,2) = 184,4 \text{ mm} \quad (21)$$

kde q_b je počet vyražených drážek rotoru na 1 pól,

b_{1r} šířka drážky rotoru [mm].



Obr. 2-4 Značení a rozměry rotorových drážek

Ideální délka statorového svazku se počítá podle vztahu

$$l_i = l_1 - b'_{vk} n_{vk} + 2\delta = 914 - \frac{\left(\frac{10}{2,2}\right)^2}{5 + \frac{10}{2,2}} \cdot 2,2 \cdot 11 + 2 \cdot 2,2 = 866 \text{ mm}$$

$$b'_{vk} = \gamma \delta, \quad (22)$$

$$\gamma = \frac{\left(\frac{b_{vk}}{\delta}\right)^2}{5 + \frac{b_{vk}}{\delta}}$$

kde l_1 je délka statorového paketu [mm],

n_{vk} počet ventilačních kanálů,

b_{vk} šířka ventilačních kanálů [mm].

Magnetomotorické napětí budicího vinutí je součet magnetických napětí jednotlivých částí magnetického obvodu stroje.

2.2.1.1 Magnetické napětí vzduchové mezery

$$U_{\delta} = \frac{1}{\mu_0} B_{\delta} \delta k_c = 800 \cdot 10^3 \cdot 0,673 \cdot 2,2 \cdot 10^{-3} \cdot 1,143 = 1353,8 \text{ A} \quad (23)$$

kde μ_0 je permeabilita vakua.

Carterův činitel k_c je součinem Carterova činitele statoru k_{c1} a rotoru k_{c2}

$$k_c = k_{c1} k_{c2} = 1,123 \cdot 1,018 = 1,143 \quad (24)$$

Činitelé statoru k_{c1} a rotoru k_{c2} se počítají podle empirických vztahů

$$k_{c1} = \frac{t_{d1} + 10\delta'}{t_{d1} - b_{01} + 10\delta'} = \frac{22,58 + 10 \cdot 2,2}{22,58 - 4,9 + 10 \cdot 2,2} = 1,123 \quad (25)$$

$$k_{c2} = \frac{t_{d2} + 10\delta'}{t_{d2} - b_{02} + 10\delta'} = \frac{29,91 + 10 \cdot 2,2}{29,91 - 0,9 + 10 \cdot 2,2} = 1,018$$

kde t_{d1} je drážková rozteč statoru [mm],

t_{d2} drážková rozteč rotoru [mm],

b_{01} šířka otevření drážky statoru [mm],

b_{02} šířka otevření drážky rotoru [mm].

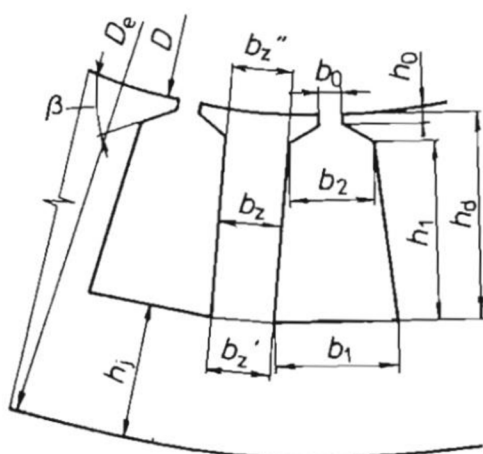
Drážkové rozteče statoru a rotoru

$$t_{d1} = \frac{\pi D}{Q_1} = \frac{\pi \cdot 690}{96} = 22,58 \text{ mm} \quad (26)$$

$$t_{d2} = \frac{\pi D_r}{Q_2} = \frac{\pi \cdot 685,6}{72} = 29,91 \text{ mm}$$

kde Q_1 je počet drážek statoru,

Q_2 počet drážek rotoru.



Obr. 2-5 Statorová drážka typu L s rovnoběžnými zuby [7]

2.2.1.2 Magnetické napětí zubů statoru

$$U_{z1} = H_{z1} h_{d1} \quad (27)$$

kde H_{z1} je intenzita magnetického pole v zubu statoru [$A \cdot m^{-1}$],

h_{d1} hloubka statorové drážky [mm].

Magnetická indukce pro jeden průřez zubu, v jedné polovině hloubky drážky

$$B_{z1} = \frac{B_{\delta} t_{d1} l_i}{b_{z1 \frac{1}{2}} l_{Fe1} k_{Fe}} = \frac{0,673 \cdot 22,84 \cdot 866}{10,68 \cdot 804 \cdot 0,95} = 1,63 \text{ T} \quad (28)$$

kde $b_{z1 \frac{1}{2}}$ šířka zubu v jedné polovině hloubky h_{d1} [mm],

l_{Fe} aktivní délka statorového paketu [mm],

k_{Fe} činitel plnění železa [-].

U strojů s polozavřenými drážkami typu L má zub téměř po celé své výšce konstantní šířku, a tedy i průřez a v tomto případě se B_{z1} a H_{z1} určují pro průřez v jedné polovině hloubky h_{d1} .

Šířka zubu v jedné polovině hloubky h_{d1}

$$b_{z1 \frac{1}{2}} = t_{d1 \frac{1}{2}} - b_{d1} = 23,86 - 13,18 = 10,68 \text{ mm} \quad (29)$$

přičemž drážková rozteč v jedné polovině hloubky h_{d1}

$$t_{d1 \frac{1}{2}} = \frac{\pi(D + \frac{1}{2} h_{d1})}{Q_1} = \frac{\pi(690 + \frac{1}{2} \cdot 65)}{96} = 23,86 \text{ mm} \quad (30)$$

a šířka drážky v jedné polovině hloubky h_{d1}

$$b_{d1 \frac{1}{2}} = \frac{b_1 + b_2}{2} = \frac{14,15 + 12,2}{2} = 13,18 \text{ mm} \quad (31)$$

Pro určení intenzity H_{z1} , která odpovídá příslušné hodnotě indukce B_{z1} , se používají magnetizační křivky elektrotechnického plechu, z něhož je sestaven statorový svazek. Pro tento navrhovaný stroj je využit plech pro elektrotechniku izotropní, válcovaný za studena ozn. M400-50A. Intenzita magnetického pole H_{z1} se pak pro daný materiál určuje podle Tab. P-6:

$$H_{z1} \approx 3,424 \text{ A/mm}$$

pak tedy magnetické napětí zubů statoru:

$$U_{z1} = H_{z1} h_{d1} = 3,424 \cdot 35,1 = 120,2 \text{ A} \quad (32)$$

2.2.1.3 Magnetické napětí jha statoru

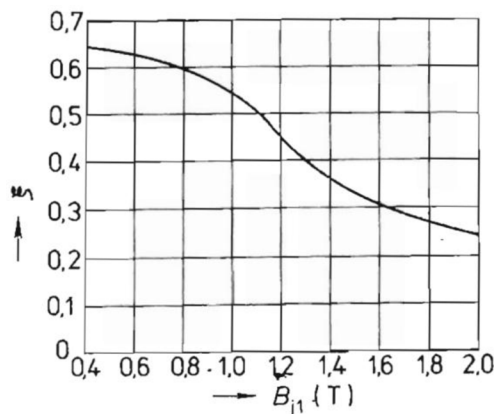
$$U_{j1} = \xi H_{j1} l_{j1} \quad (33)$$

kde H_{j1} je intenzita magnetického pole ve jhu statoru [$A \cdot m^{-1}$],

l_{j1} délka indukční čáry ve jhu statoru [mm],

$$l_{j1} = \frac{\pi(D_e - h_{j1})}{4p} = \frac{\pi(860 - 49,9)}{4 \cdot 4} = 159,06 \text{ mm} \quad (34)$$

ξ je činitel respektující nerovnoměrné rozložení magnetické indukce v příčném průřezu jha statoru, určuje se z Obr. 2-6.



Obr. 2-6 Závislost činitele ξ na indukci ve jhu [7]

Intenzita magnetického pole H_{j1} se určuje z hodnoty indukce B_{j1} z těže magnetizační křivky, která platí pro zuby statoru. Magnetická indukce ve jhu statoru

$$B_{j1} = \frac{\Phi}{2 l_{Fe1} h_{j1} k_{Fe}} = \frac{118,08}{2 \cdot 804 \cdot 49,9 \cdot 10^{-3} \cdot 0,95} = 1,55 \text{ T} \quad (35)$$

kde h_{j1} hloubka jha statoru [mm],

$$h_{j1} = \frac{D_e - (D + 2h_{z1})}{2} = \frac{860 - (690 + 2 \cdot 35,1)}{2} = 49,9 \text{ mm} \quad (36)$$

a vyhledá se odpovídající hodnota intenzity magnetického pole

$$H_{j1} \approx 0,5170 \text{ A/mm}$$

potom magnetické napětí jha statoru

$$U_{j1} = \xi H_{j1} l_{j1} = 0,32 \cdot 0,517 \cdot 159,06 = 26 \text{ A} \quad (37)$$

2.2.1.4 Magnetické napětí zubů rotoru

$$U_{z2} = H_{z2} h_{d2} \quad (38)$$

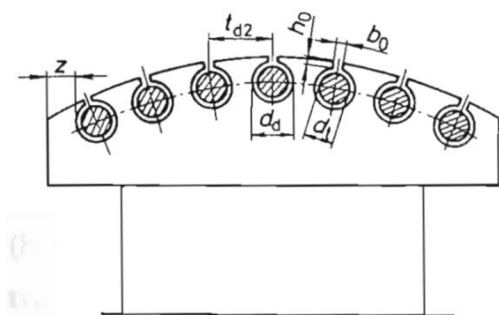
kde H_{z2} je intenzita magnetického pole v zubu rotoru [$A \cdot m^{-1}$],

h_{d2} hloubka rotorové drážky [mm].

$$h_{d2} = h_0 + d_d = 1 + 4,5 = 5,5 \text{ mm} \quad (39)$$

kde h_0 je výška otevření rotorové drážky tlumicího vinutí [mm],

d_d průměr rotorové drážky tlumicího vinutí [mm].



Obr. 2-7 Značení pro výpočet rozměrů drážek tlumicího vinutí [7]

Magnetická indukce pro jeden průřez zubu, ve výšce jedné poloviny hloubky drážky

$$B_{z2} = \frac{B_\delta t_{d2} l_i}{b_{zt} l_2 k_{Fe2}} = \frac{0,673 \cdot 29,9 \cdot 866}{25,4 \cdot 804 \cdot 0,95} = 1,63 \text{ T} \quad (40)$$

kde l_2 je aktivní délka rotorového paketu (shodná se statorem, rovna l_{Fe}) [mm],

k_{Fe2} činitel plnění železa rotoru (shodný se statorem, roven k_{Fe}) [-],

b_{zt} šířka zubu rotoru mezi drážkami pro tlumicí vinutí [mm],

$$b_{zt} = t_{d2} - d_d = 29,9 - 4,5 = 25,4 \text{ mm} \quad (41)$$

kde d_d je průměr drážky tlumicího vinutí [mm].

Pro určení intenzity H_{z2} , která odpovídá příslušné hodnotě indukce B_{z2} , se používají magnetizační křivky elektrotechnického plechu, z něhož je sestaven rotorový svazek, v tomto případě stejné jako u statoru M400-50A, dle Tab. P-6:

$$H_{z2} \approx 0,101 \text{ A/mm}$$

pak tedy magnetické napětí zubu rotoru

$$U_{z2} = H_{z2} h_{d2} = 0,101 \cdot 5,5 = 0,56 \text{ A} \quad (42)$$

2.2.1.5 Magnetické napětí pólu

$$U_p = H_p(h_p + h_{pn}) \quad (43)$$

kde $h_p + h_{pn}$ je délka indukční čáry v pólu [mm],

h_p výška pólu [mm],

h_{pn} výška pólového nástavce [mm],

H_p intenzita magnetického pole v pólu při jeho základně [$A \cdot m^{-1}$].

Intenzita magnetického pole H_p se vyhledá v magnetizační charakteristice plechu M400-50A pro indukci v pólu B_p . Při určování této hodnoty je nutné upřesnit rozptylový tok Φ_σ . Rozptylový tok Φ_σ je možné rozdělit na tři složky: 1. rozptylový tok mezi vnitřními povrchy jader pólů, 2. rozptylový tok mezi vnitřními povrchy pólových nástavců, 3. rozptylový tok mezi čelními povrchy pólů. Podle toho je možné celkový rozptylový tok počítat ze vztahu

$$\Phi_\sigma = 4\lambda_{p\sigma}l_{Fe}(U_\delta + U_{z1} + U_{j1} + U_{z2}) \quad (44)$$

kde $\lambda_{p\sigma}$ je poměrná magnetická vodivost pro rozptylový tok na jednu stranu pólu,

$$\begin{aligned} \lambda_{p\sigma} &= \lambda_{pl} + \lambda_{pnl} + \lambda_{p\check{c}} = 4,11 \cdot 10^{-7} + 1,63 \cdot 10^{-7} + 6,28 \cdot 10^{-8} = \\ &= 6,366 \cdot 10^{-7} \end{aligned} \quad (45)$$

Poměrná rozptylová vodivost mezi vnitřními (bočními) povrchy jader pólů

$$\begin{aligned} \lambda_{pl} &= \frac{0,55h_p}{t_{p2} - b_p - \frac{\pi}{2p}(h_p + 2h_{pn} + 2\delta)} 10^{-6} \\ \lambda_{pl} &= \frac{0,55 \cdot 65}{269,2 - 155 - \frac{\pi}{2 \cdot 4}(65 + 2 \cdot 0 + 2 \cdot 2,2)} 10^{-6} = 4,11 \cdot 10^{-7} \end{aligned} \quad (46)$$

U stroje s kruhovým rotorem je počítaná výška pólového nástavce h_{pn} nulová.

Poměrná rozptylová vodivost mezi bočními povrchy pólových nástavců

$$\begin{aligned} \lambda_{pnl} &= \left[1,4 \left(\frac{d_p}{a'_p} - 0,25 \right) + 0,55 \left(\frac{c_p}{a'_p} + 0,2 \right) - 0,4 \left(\frac{c_p}{a'_p} - 0,5 \right)^2 \right] 10^{-6} \\ \lambda_{pnl} &= \left[0,55 \left(\frac{14,7}{84,8} + 0,2 \right) - 0,4 \left(\frac{14,7}{84,8} - 0,5 \right)^2 \right] 10^{-6} = 1,63 \cdot 10^{-7} \end{aligned} \quad (47)$$

V tomto vztahu se dosazuje

$$\begin{aligned} c_p &= \frac{b_{pn} - b_p}{2} = \frac{184,4 - 155}{2} = 14,7 \text{ mm} \\ a'_p &= t_{p2} - b_{pn} - \frac{\pi d_p}{p} = 269,2 - 184,4 - \frac{\pi \cdot 0}{4} = 84,8 \text{ mm} \\ d_p &= h_{pn} + \delta - \frac{b_{pn}^2}{4D} = 0 + 2,2 - \frac{184,4^2}{4 \cdot 690} < 0 \Rightarrow \text{dosazujeme } 0 \text{ mm} \end{aligned} \quad (48)$$

Jestliže je $d_p / a'_p < 0,25$, což je splněno, zanedbává se první člen ve vztahu (47).

Poměrná rozptylová vodivost mezi bočními povrchy pólových nástavců

$$\lambda_{p\check{c}} = 0,37 \frac{b_p}{l_2} 10^{-6} = 0,37 \frac{155}{914} 10^{-6} = 6,28 \cdot 10^{-8} \quad (49)$$

Celkový rozptylový tok vyčíslen

$$\begin{aligned} \Phi_{\sigma} &= 4\lambda_{p\sigma} l_{Fe} (U_{\delta} + U_{z1} + U_{j1} + U_{z2}) = \\ &4 \cdot 6,366 \cdot 10^{-7} \cdot 804 \cdot (1353,8 + 120,2 + 26 + 0,56) = 3,37 \text{ mWb} \end{aligned} \quad (50)$$

Magnetická indukce v jádře pólu v polovině výšky je

$$B_p = \frac{\Phi + \Phi_{\sigma}}{l_2 b_{p+z} k_{Fe2}} = \frac{118,08 + 3,37}{914 \cdot 170,3 \cdot 0,95} = 0,82 \text{ T} \quad (51)$$

kde b_{p+z} je šířka pólu a zubů rotoru v polovině výšky pólu [mm],

$$b_{p+z} = b_{px} + (Q_b - 1)b_z = 145,6 + (4 - 1) \cdot 8,2 = 170,3 \text{ mm} \quad (52)$$

kde b_{px} je šířka pólu v polovině výšky pólu [mm].

Magnetická indukce se pro zpřesnění výpočtu počítá ve třech průřezech pólu: ve středním průřezu, u jeho základny a u pólového nástavce, potom z charakteristik odečtená intenzita magnetického pole bude:

$$b_p = 0,82 \text{ T} \quad \approx 0,088 \text{ A/mm}$$

$$b_{p \min} = 0,9 \text{ T} \quad \approx 0,101 \text{ A/mm}$$

$$b_{p \max} = 0,75 \text{ T} \quad \approx 0,08 \text{ A/mm}$$

Pro výpočet se používá střední hodnota intenzity magnetického pole, počítaná s použitím tzv. Simpsonova vztahu [7]

$$\begin{aligned} H_{ps} &= \frac{1}{6} (H_{p \min} + 4H_{pav} + H_{p \max}) = \frac{1}{6} (0,101 + 4 \cdot 0,088 + 0,08) \\ &= 0,089 \text{ A/mm} \end{aligned} \quad (53)$$

Magnetické napětí pólu bude

$$U_p = H_p (h_p + h_{pn}) = 0,089 \cdot 65 = 5,8 \text{ A} \quad (54)$$

2.2.1.6 Magnetické napětí jha rotoru

$$U_{j2} = H_{j2} l_{j2} \quad (55)$$

kde délka indukční čáry ve jhu rotoru

$$\begin{aligned} l_{j2} &= \frac{\pi(D - 2\delta - 2(h_p + h_{pn}) - h_{j2})}{4p} = \\ &= \frac{\pi(690 - 2 \cdot 2,2 - 2(65 + 0) - 77,8)}{16} = 93,8 \text{ mm} \end{aligned} \quad (56)$$

Intenzita magnetického pole H_{j2} se určuje z hodnoty indukce B_{j2} magnetizační křivky použitých plechů M400-50A.

Magnetická indukce ve jhu rotoru

$$B_{j2} = \frac{\Phi + \Phi_{\sigma}}{2l_2 h_{j2} k_{Fe2}} = \frac{118,08 + 3,37}{2,914 \cdot 77,8 \cdot 0,95} = 0,9 \text{ T} \quad (57)$$

kde výška jha rotoru

$$h_{j2} = \frac{D_r - 2h_d - D_i}{2} = \frac{685,6 - 2 \cdot 65 - 400}{2} = 77,8 \text{ mm} \quad (58)$$

Intenzita magnetického pole H_{j2} se vyhledá v magnetizační charakteristice plechu M400-50A viz Tab. P-7 pro indukci ve jhu B_{j2}

$$H_{j2} \approx 0,062 \text{ A/mm}$$

Magnetické napětí jha rotoru

$$U_{j2} = H_{j2} l_{j2} = 0,062 \cdot 93,8 = 5,8 \text{ A} \quad (59)$$

2.2.1.7 Magnetomotorické napětí

Sečtením magnetických napětí všech částí magnetického obvodu se určí magnetomotorické napětí, tj. výsledné magnetické napětí budicího vinutí na jeden pól při chodu naprázdno

$$\begin{aligned} F_{b0} &= U_{\delta} + U_{z1} + U_{j1} + U_{z2} + U_p + U_{j2} = \\ &= 1353,8 + 120,2 + 26 + 0,56 + 5,8 + 5,8 = \\ &= 1512,2 \text{ A} \end{aligned} \quad (60)$$

Jestliže se magnetomotorické napětí budicího vinutí počítá pro několik hodnot indukovaného napětí, získá se charakteristika naprázdno $U_i = f(F_{b0})$.

2.2.2 Výpočet budicího proudu naprázdno

Ze získaného magnetomotorického napětí lze vypočítat velikost budicího proudu pro dané indukované napětí

$$I_{bo} = \frac{F_m}{N_b} = \frac{1512,2}{96} = 15,75 \text{ A} \quad (61)$$

2.2.3 Výpočet hodnot charakteristiky naprázdno

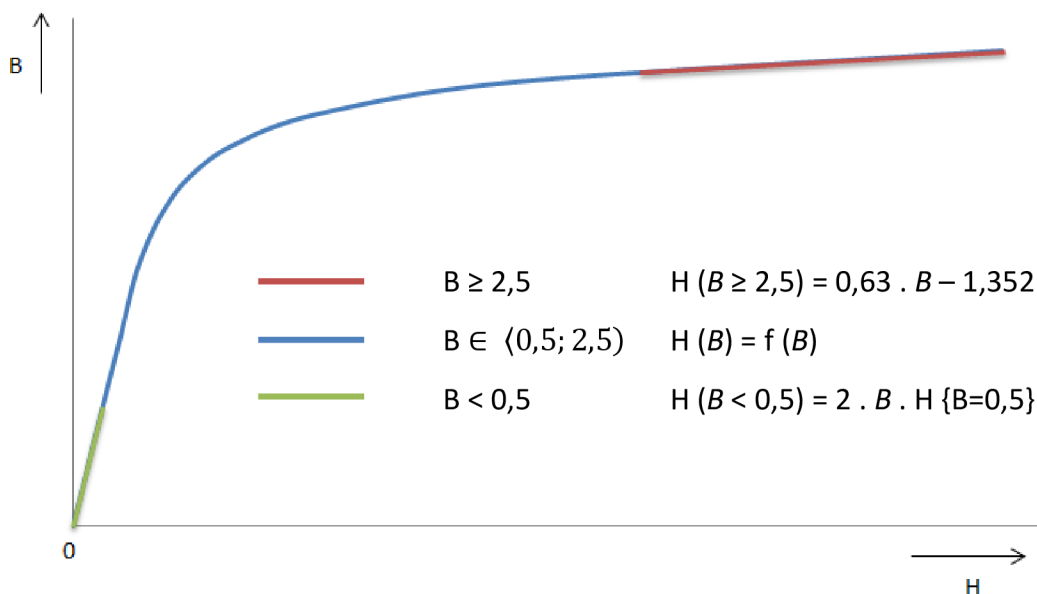
Pro výpočet kompletní charakteristiky naprázdno je zapotřebí propočítat každý z jednotlivých bodů charakteristiky podle kapitol 2.2.1 a 2.2.2. To zahrnuje velké množství rutinních výpočtů, proto je velmi vhodné využít k výpočtům počítač.

Výpočty hodnot charakteristiky naprázdno byly prováděny programem Microsoft Office Excel. Do tohoto programu je možné zadat všechny potřebné rovnice pro výpočet z kapitol 2.2.1 a 2.2.2 a s výhodou lze také využít pokročilých vyhledávacích funkcí programu Excel, pro hledání hodnot z magnetizačních charakteristik.

K automatizovanému určování hodnot intenzit magnetického pole (H) z magnetizační charakteristiky pro dané hodnoty magnetických indukci (B) se zapíše hodnoty z charakteristik

plechů z Tab. P-6 a Tab. P-7 do tabulky v Excelu. Samotné vyhledávání je pak realizováno excelovskou funkcí "INDEX".

Pro hodnoty nezahrnuté v tabulkách Tab. P-6 a Tab. P-7. – to jsou hodnoty indukce od 0 do 0,5 T a potom nad 2,5 T, jsou velikosti intenzity magnetického pole vypočteny lineárním přepočtem, jak uvádí Obr. 2-8:



Obr. 2-8 BH magnetizační charakteristika plechů rozšířená o lineární oblasti hodnot.

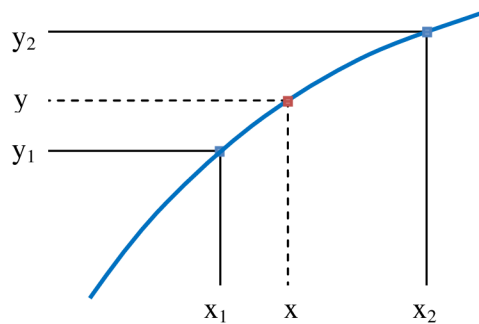
Indukce pod 0,5 T jsou určeny poměrným přepočtem, Indukce nad 2,5 T jsou určeny pomocí směrnice.

Při velkých rozestupech mezi jednotlivými hodnotami BH-charakteristiky lze částečně zpřesnit výpočet intenzit magnetického pole použitím lineární aproximace

$$f(x_i, x_{i+1}) = \frac{y_{i+1} - y_i}{x_{i+1} - x_i} \quad (62)$$

podle principu naznačeného na Obr. 2-9 se rovnice převede do tvaru pro výpočet hledaného parametru y-souřadnice

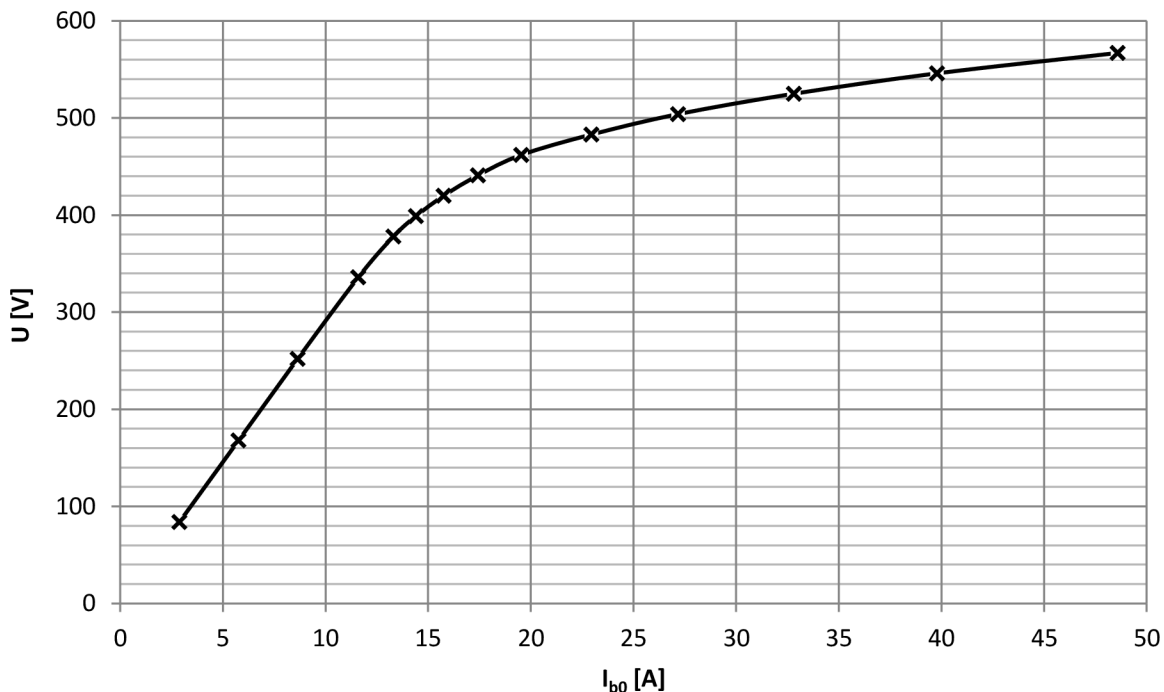
$$y(x) = y_1 + (x - x_1) \cdot (y_2 - y_1) \quad (63)$$



Obr. 2-9 K principu aproximace magnetizační charakteristiky

2.2.4 Vypočtená charakteristika naprázdno hlavního vinutí

Postupem provedeným dle kapitol 2.2.1, 2.2.2 a 2.2.3 byla spočtena charakteristika naprázdno hlavního vinutí viz Obr. 2-10. Číselné výsledky uvádí Tab. P-1.

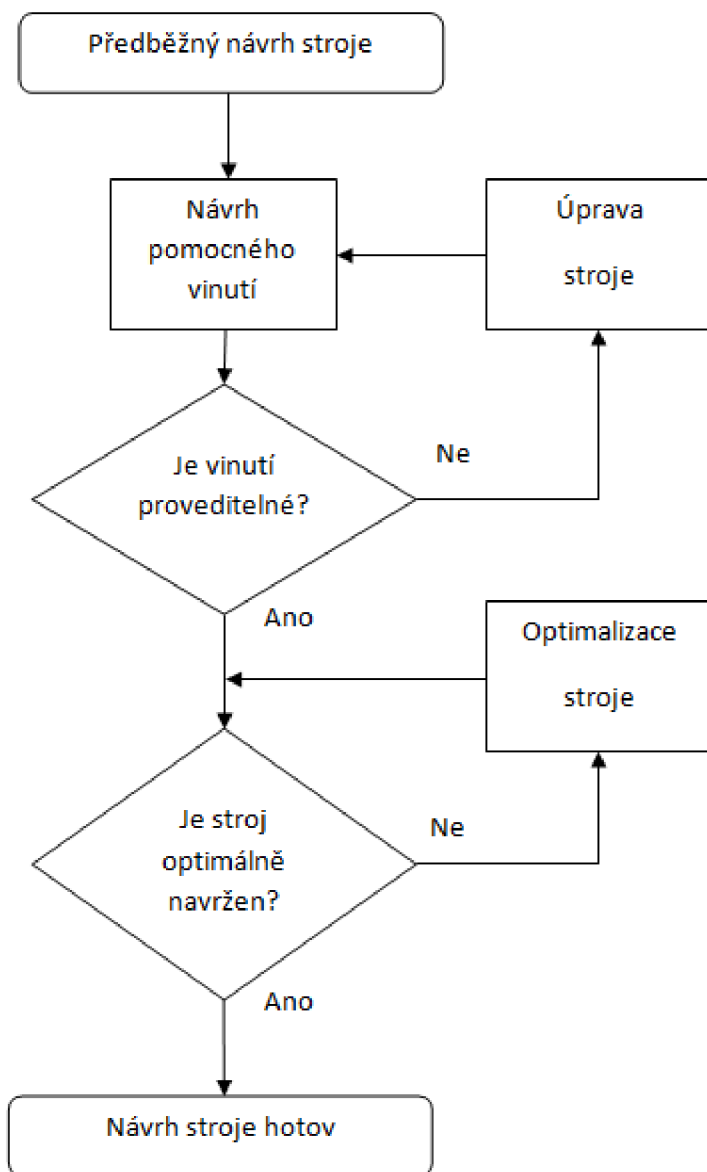


Obr. 2-10 Charakteristika naprázdno hlavního vinutí z výsledků výpočtů analytickým výpočtem

Z kapitoly 1.6 *Metoda výpočtu počtu závitů pomocného vinutí* plyne, že poměr mezi indukovaným napětím hlavního a pomocného vinutí je dán počtem a rozvržením závitů. Z toho lze vyvodit, že poměr indukovaného napětí v hlavním a pomocném vinutí bude v rámci charakteristiky naprázdno konstantní.

Charakteristika naprázdno pomocného vinutí tak bude mít stejnou podobu jako charakteristika hlavního vinutí, pouze bude v jiných absolutních hodnotách. V poměrných jednotkách budou charakteristiky zcela shodné.

2.3 Postup návrhu pomocného vinutí



Obr. 2-11 Schéma postupu při návrhu pomocného vinutí v generátoru

2.4 Výpočet pomocného vinutí

Vychází se z postupu uvedeného v kapitole 1.6. Ze stanoveného napěťového rozmezí (v kap. 1.4.3 Zhodnocení požadavků na napájení), si zvolíme hodnotu uprostřed rozsahu tj. $U_i = 215$ V.

2.4.1 Počet závitů

Předběžně se získá podle rovnice (9) počet závitů v sérii jedné fáze z hodnoty magnetického toku vypočteného dle rovnice (11)

$$N_{1pom}' = \frac{U_i}{4 k_b f \Phi k_{v1}} = \frac{215}{4 \cdot 1,11 \cdot 50 \cdot 118,08 \cdot 10^{-3} \cdot 0,92} = 8,91 \text{ závitů} \quad (64)$$

kde je činitel statorového vinutí k_{v1} přibližně volen 0,92 (tj. hodnota činitele statorového vinutí hlavního statorového vinutí).

Zvolený počet závitů musí být celým číslem. Z předběžného výpočtu počtu závitů rovnice (64) se zaokrouhlí na hodnotu 9 závitů. Připomeňme, že jde o počet závitů v sérii (= jedné fáze, jedné paralelní větve). Pro tento počet závitů se dále hledá vhodné rozvržení jednotlivých závitů do statorových drážek:

Hlavní stroj má $Q = 96$ statorových drážek, to jest 32 drážek na fázi.

U jednovrstvého vinutí pak lze do 32 drážek založit maximálně 16 cívek (cívku tvoří 2 cívkové strany). Cívku tvoří minimálně 1 závit.

Pokud využijeme polovinu drážek tj. 16, bude závitů 8 a v každé použité drážce bude právě 1 vodič.

Výpočtem ověříme správnost zvoleného počtu závitů:

Činitel rozlohy pro první harmonickou trojfázových vinutí vychází ze zvoleného počtu drážek na pól a fázi

$$k_r = \frac{\sin \frac{\pi}{2 m}}{q \sin \frac{\pi}{2 m q}} = \frac{\sin \frac{\pi}{2 \cdot 3}}{2 \sin \frac{\pi}{2 \cdot 3 \cdot 2}} = 0,966 \quad (65)$$

Krok cívek ve zvoleném vinutí je $y = t_p$, proto činitel zkrácení $k_y = 1$ a tak dostáváme činitel vinutí

$$k_v = k_y k_r = 1 \cdot 0,966 = 0,966 \quad (66)$$

Kontrola výstupního napětí na svorkách pomocného vinutí podle

$$U_i = 4 k_b f N_1 \Phi k_{v1} = 4 \cdot 1,11 \cdot 50 \cdot 8 \cdot 118,08 \cdot 10^{-3} \cdot 0,966 = 202,6 \text{ V} \quad (67)$$

Výsledné napětí 203 V leží ve stanoveném rozsahu napájecího napětí pro regulátor (kap. 1.4.3), tudíž navržené vinutí vyhovuje.

Podle charakteristiky na Obr. 2-10 ještě provedeme kontrolu velikosti napětí při přebuzení:

Při přebuzení na 2,5násobek jmenovitého buzení naprázdno je velikost indukovaného napětí 1,3násobná, vyčísleno 264 V, což lze považovat za bezpečnou hodnotu.

2.4.2 Návrh vodiče pomocného vinutí

Pro provedení pomocného vinutí se využije izolovaného kabelu typu RADOX 155. Jde o lanový kabel s dvojitou izolací teplotní třídy F. Průřezy vodičů se volí podle předpokládaného proudového zatížení regulátorem. Nejvyšší proud tímto vinutím bude při maximálním příkonu regulátoru 1750 VA:

$$I = \frac{S_{AVR}}{3 \cdot U_i} = \frac{1750}{3 \cdot 202,6} = 2,88 \text{ A} \quad (68)$$

Volíme průřez vodiče $1,5 \text{ mm}^2$. Pro pomocné vinutí použijeme kabel RADOX 155 $1,5 \text{ mm}^2$, což je ve výrobě TES nejmenší běžně nakupovaný průřez vodiče RADOX 155, rozumějme skladový.

Proudová hustota bude

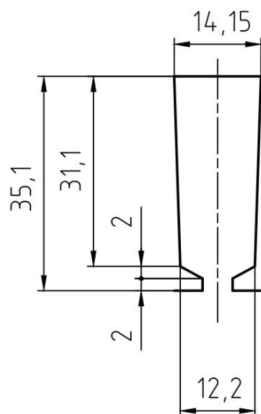
$$\sigma = \frac{I}{S_{vp}} = \frac{2,88}{1,5} = 1,92 \text{ A} \cdot \text{mm}^{-2} \quad (69)$$

Hodnota proudové hustoty je relativně nízká. Pomocné vinutí bude možné zatěžovat i vyšším proudem, než je stanovených 2,88 A.

2.5 Ověření realizovatelnosti vinutí z hlediska plnění drážky

2.5.1 Plocha drážky

Celková plocha drážky včetně klínového prostoru a otevření drážky se vypočítá součtem dílčích ploch drážky:



Obr. 2-12 Rozměry statorové drážky návrhového generátoru

jako obsah lichoběžníka pro hlavní drážkovou část

$$S_{d1} = \left(b_2 + \frac{b_1 - b_2}{2} \right) \cdot h_1 = \left(12,2 + \frac{14,15 - 12,2}{2} \right) \cdot 31,1 = 409,74 \text{ mm}^2 \quad (70)$$

jako obsah lichoběžníka pro klínovou drážkovou část

$$S_{d2} = \left(b_0 + \frac{b_2 - b_0}{2} \right) \cdot h_{klín.} = \left(4,9 + \frac{12,2 - 4,9}{2} \right) \cdot 2 = 17,1 \text{ mm}^2 \quad (71)$$

jako obsah obdélníka pro drážkovou část otevření

$$S_{d3} = b_0 \cdot h_0 = 4,9 \cdot 2 = 9,8 \text{ mm}^2 \quad (72)$$

a celková plocha drážky včetně klínového prostoru a otevření drážky součtem

$$S_{celk.} = S_{d1} + S_{d2} + S_{d3} = 409,74 + 17,1 + 9,8 = 436,64 \text{ mm}^2 \quad (73)$$

2.5.2 Plocha vodičů

Vypočteme plochu, kterou zabírají vodiče hlavního vinutí. V každé drážce je 5 vodičů hlavního vinutí, každý vodič je tvořen 12 dráty. Těchto 12 dílčích drátů je rozděleno na 9 o vyšším průřezu a 3 o menším průřezu. Principiálně budeme dráty sčítat takto:

$$S_v = 5 \times (9 \times \phi 2 \text{ mm} + 3 \times \phi 1,9 \text{ mm}) \quad (74)$$

Do kalkulace zahrneme celkovou plochu drátů včetně izolace (lak). Tab. 2-1 uvádí izolační přírůstky a maximální vnější průměry vodičů užitých v hlavním vinutí.

Tab. 2-1 Vlastnosti měděných lakovaných vodičů dle EN 60317-0-1 [11]

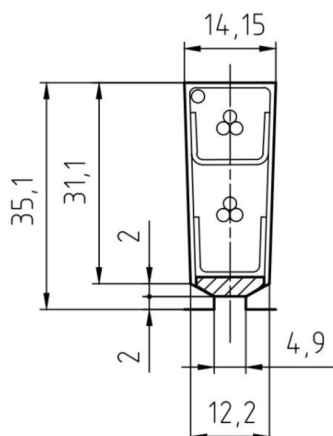
Jádro mm	Tolerance +- mm	Minimální přírůstek izolace		Max. vnější průměr	
		Stupeň 1 mm	Stupeň 2 mm	Stupeň 1 mm	Stupeň 2 mm
1,900	0,019	0,040	0,075	1,974	2,012
2,000	0,020	0,040	0,075	2,074	2,112

Plocha vodičů se pak spočte jako obsah čtverců opsaných vodičům včetně izolace (ve výpočtu je průměr zaokrouhlen, z praktického hlediska, nahoru).

Celková plocha vodičů hlavního vinutí:

$$S_v = 5 \cdot (9 \cdot 2,12^2 + 3 \cdot 2,02^2) = 263,5 \text{ mm}^2 \quad (75)$$

2.5.3 Plocha drážkové izolace



Obr. 2-13 Rozměry statorové drážky pro výpočet plochy drážkové izolace

Plocha vyložení drážky (drážkové izolace po obvodu drážky) – vkládají se 2 izolační vrstvy

$$S_{iz1} = (2 \cdot 31,1 + 12,2) \cdot (0,3 + 0,36) = 49,1 \text{ mm}^2 \quad (76)$$

Plocha izolace pod klínem, kde přesah „neužitečné“ izolace je 10 mm na každé straně:

$$S_{iz2} = (14,15 + 2 \cdot 10) \cdot 0,3 = 12,3 \text{ mm}^2 \quad (77)$$

Plocha izolace mezivrstvé - v praxi se vyrobí vložka stejných rozměrů jako má izolace pod klínem.

Plocha drážkové izolace je určena součtem jednotlivých izolačních vložek.

$$S_{iz} = S_{iz1} + 2 \cdot S_{iz2} = 49,1 + 2 \cdot 12,3 = 73,7 \text{ mm}^2 \quad (78)$$

Plocha vodiče statoru + izolace

$$S_{v+iz} = S_v + S_{iz} = 263,5 + 73,7 = 337,2 \text{ mm}^2 \quad (79)$$

Využitelný prostor v drážce je zmenšený o přesah drážkového klínu mimo klínovou část drážky. V tomto případě je přesah 1 mm a ten se od plochy drážky odečte. Využitelný prostor v drážce

$$S_d = \left(b_2 + \frac{b_1 - b_2}{2} \right) \cdot (h_1 - 1) =$$

$$\left(12,2 + \frac{14,15 - 12,2}{2} \right) \cdot (31,1 - 1) = 396,6 \text{ mm}^2 \quad (80)$$

2.5.4 Plnění

Skutečné plnění drážky – pouze hlavní vinutí statoru:

$$\frac{S_{v+iz}}{S_d} = \frac{337,2}{396,6} * 100 = 85,0 \% \quad (81)$$

Průřez vodiče [12] pomocného vinutí s izolací (RADOX 155 1,5 mm²) se stanoví jako plocha čtverce s vepsanou kružnicí o průměru rovnému průměru vodiče:

$$S_{vp+iz} = 2,7^2 = 7,29 \text{ mm}^2 \quad (82)$$

Průřez vodičů hlavního vinutí + pomocného vinutí:

$$S_v' = S_{v+iz} + S_{vp+iz} = 337,2 + 7,29 = 344,5 \text{ mm}^2 \quad (83)$$

Skutečné plnění drážky – včetně pomocného vinutí:

$$\frac{S_v'}{S_d} = \frac{344,5}{396,6} * 100 = 86,9 \% \quad (84)$$

Obvyklé hodnoty plnění drážky pro daný typ a výkonovou úroveň stroje se nejčastěji pohybují v rozmezí 85-88 %. Vypočtené plnění drážky vyhovuje.

Jelikož je pro pomocné vinutí využita jen polovina statorových drážek, je zapotřebí v polovině drážek neobsahující pomocné vinutí přidat izolační vložky, aby vinutí v drážkách nebylo příliš volné.

2.6 Shrnutí návrhu pomocného vinutí

Návrh pomocného vinutí principiálně vychází z výpočtu magnetického toku v hlavním stroji. Indukované napětí na svorkách pomocného vinutí odpovídá magnetickému toku a počtu závitů pomocného vinutí zvoleném při návrhu stroje.

Pomocné vinutí se nachází ve statorových drážkách spolu s vinutím hlavním. Nezbytnou podmínkou pro úspěšný návrh vinutí bylo poněkud nižší plnění drážky u hlavního statorového vinutí generátoru. Stroj bez přidaného pomocného vinutí má plnění drážky 85 %, včetně pomocného vinutí je to 86,9 %.

Pro vlastní pomocné vinutí je početně využita polovina drážek. V drážkách neobsahujících pomocné vinutí je potřeba přidat izolační vložky, aby vinutí v drážkách nebylo příliš volné.

Pomocné vinutí je umístěno na dně drážky. Vinutí je navinuto přímo do drážek, vždy jeden kabel na fázi, vcelku, bez přidavných spojů, viz *Obr. P-1 Rozvinuté schéma zapojení pomocného vinutí ve statoru*.

Vývody vinutí jsou vyvedeny na svorky ve svorkovnici. Ve svorkovnici jsou jednotlivé fáze spojeny do trojúhelníka. Vypočtené napětí na svorkách pomocného vinutí by mělo být 203 V.

Specifikace pomocného vinutí:

Jednovrstvé, třífázové vinutí, 1 závit na pól a fázi, ve fázi 8 závitů, celkem 24 závitů ve 3 fázích. 1 vodič v každé druhé drážce. Drážkový krok z 1. do 13. drážky.

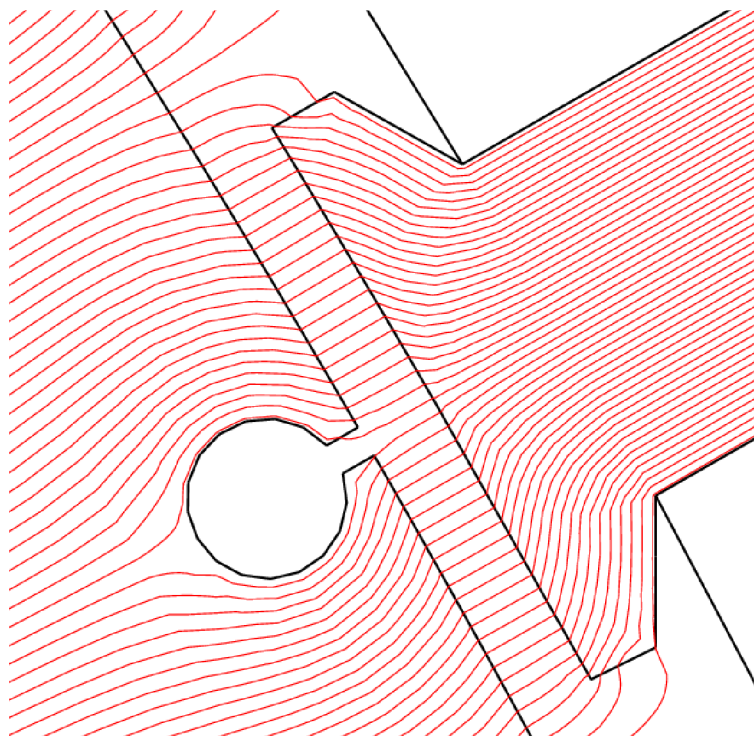
Provedení vinutí: kabelem Radox 155 1,5 mm² navinuté vcelku pro 1 fázi a vyvedené do svorkovnice. Po založení pomocného vinutí vloženo hlavní 2vrstvé vinutí.

2.7 Ověření návrhu výpočtem metodou konečných prvků (MKP)

Analytický výpočet a jeho přesnost má svá omezení vyplývající z více či méně značného zjednodušení analyzované geometrie a vlastností materiálů užitých ke stavbě stroje.

Provedený návrh stroje a pomocného vinutí bude ověřen výpočty metodou konečných prvků.

Metoda konečných prvků (MKP) je numerická metoda sloužící k simulaci fyzikálních dějů na vytvořeném modelu. Její princip spočívá v diskretizaci spojitého kontinua do určitého (konečného) počtu prvků, přičemž zjišťované parametry jsou určovány v jednotlivých uzlových bodech. [13]



Obr. 2-14 K popisu metody konečných prvků (MKP)

Při analytickém výpočtu, kupříkladu u výpočtu magnetické indukce v rovnoběžném zubu statoru, je běžný přístup ve spočtení jediné hodnoty indukce uvažované pro celou výšku zubu, zatímco u MKP je model detailní (příklad na Obr. 2-14) a výpočty jsou prováděny i pro místa v analytickém výpočtu neuvažované (nebo zanedbávané).

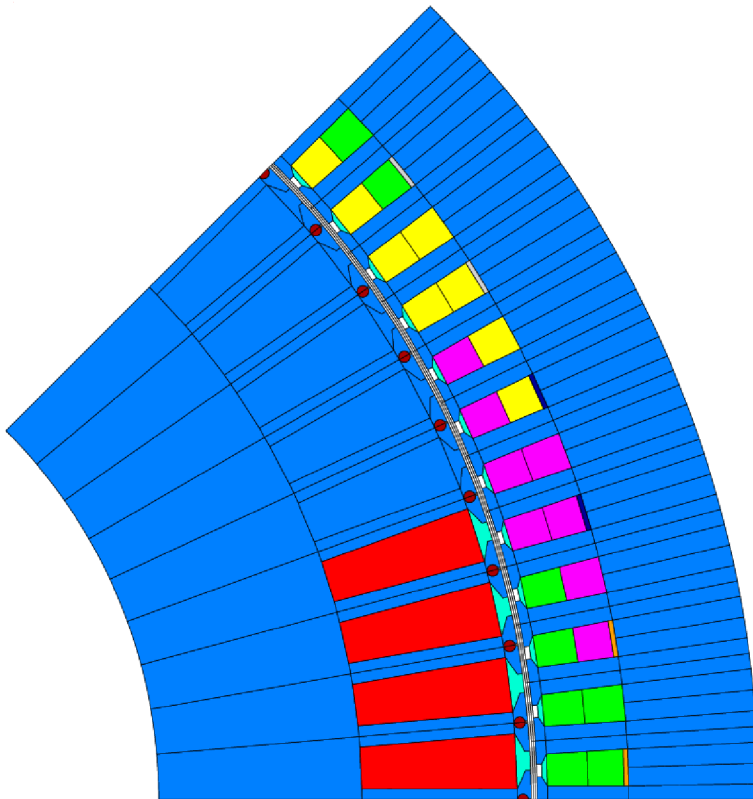
Praxe pro analytické výpočty je taková, že se výpočty empiricky upravují na základě měření vyrobených strojů a zařízení. Zpřesňováním různých koeficientů a činitelů se pak lze dostat k velmi přesným výsledkům. To je však možné až tehdy, jsou-li počítaná zařízení vyrobena a změřena.

2.7.1 Software FEMAG

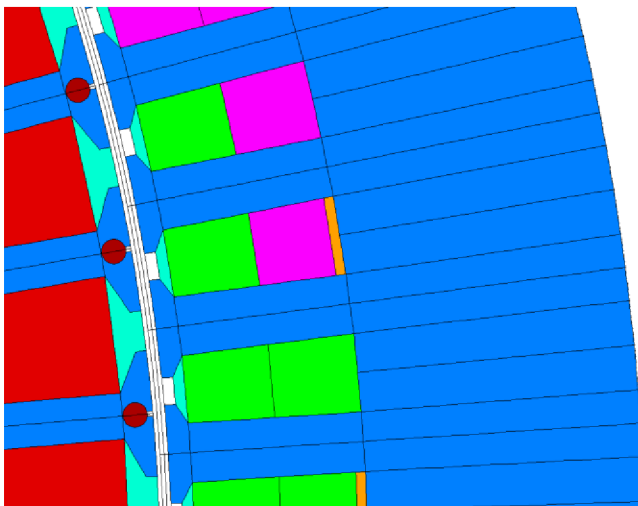
Analytický návrh stroje bude ověřen výpočtem metodou konečných prvků (MKP nebo angl. zkr. FEM). K výpočtům bude využito počítačového programu FEMAG, což je software pro analýzu a simulování dvourozměrných stacionárních nebo kvazistacionárních elektromagnetických polí. FEMAG je využitelný pro počítačem podporované navrhování (CAD) k analýze a optimalizaci návrhu elektromagnetických zařízení. FEMAG byl vyvinut Institutem elektrických strojů švýcarského federálního technického institutu v Curychu.

Femag zahrnuje

- rozhraní pro externí CAD-systémy,
- vlastní CAD-systém pro modelování geometrie node-chain a generování sítě,
- parametrický vstup pro generování topologie elektrických strojů,
- univerzální konečně-prvkový solver pro výpočet 2 a 2,5 rozměrných elektromagnetických polí,
- speciální funkce pro simulování elektrických strojů, např. synchronních strojů, bezkartáčových stejnosměrných strojů (BLDC), apod.,
- funkce pro simulaci magnetizačních a demagnetizačních procesů.



Obr. 2-15 Geometrie analyzovaného stroje s pomocným vinutím vytvořená ve Femagu



Obr. 2-16 Detail modelu Femag.

2.7.2 Vytvoření geometrie

Pro analyzování vlastností stroje metodou konečných prvků je potřeba vytvořit co nejpřesnější model geometrie daného stroje. Pokud je to možné, vytváří se pouze část geometrie (výsek), která je unikátní a ta se v nastavení okrajových podmínek definuje, co do způsobu jejího opakování, v celku stroje. Redukuje se tak počet prvků modelu. Je to praktické zejména v ohledu na množství při analýze prováděných výpočtů a s tím související časové náročnosti výpočtů.

Geometrii lze do Femagu přenést z externího CAD-systému importem nebo kreslit model přímo ve Femagu v jeho vlastním CAD rozhraní.

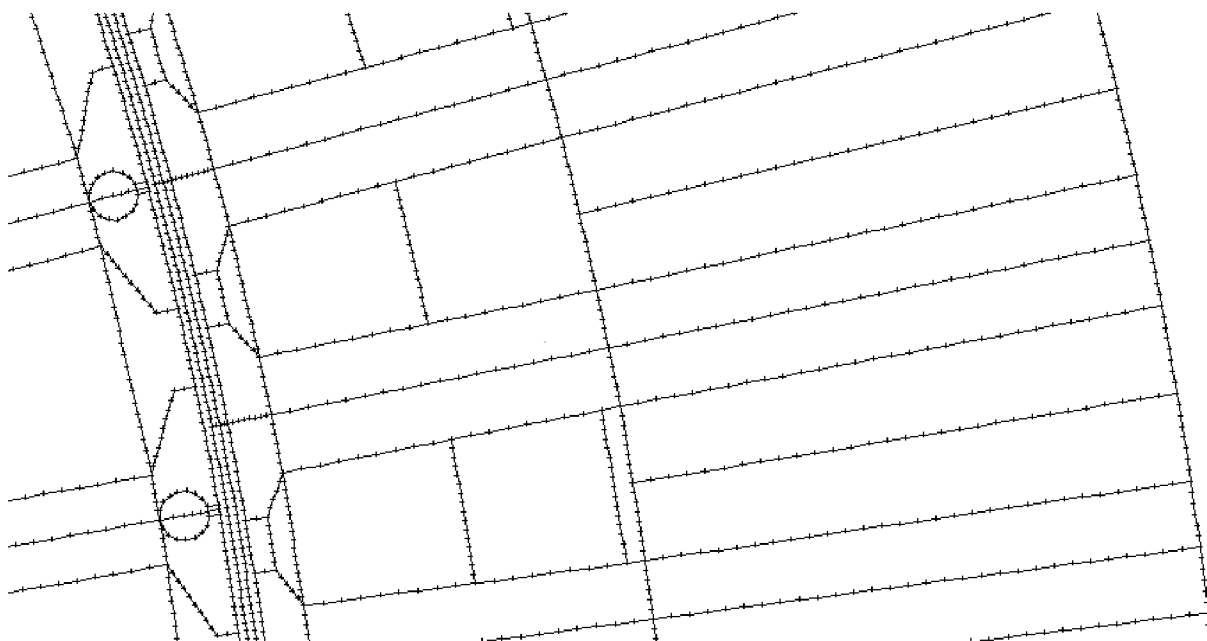
Geometrie musí zachycovat obrysy magnetického obvodu, tj. zubů resp. drážek, jha, případných otvorů ve statoru a rotoru. V zájmu přesnosti analýzy co nejdříve.

2.7.3 Vytvoření geometrie “nodechains“

Na geometrii se definují body a linie “nodechain“. Linie nodechain určují nejen obrys magnetického obvodu, ale i místa předělů mezi jednotlivými materiály, jednotlivými vinutími.

Nodechains slouží výchozí body, na jejichž rozmístění závisí uspořádání a hustota následně generované sítě “mesh“. Čím větší hustotu síť mesh má daný model, tím více bude mít počítaných bodů a tím přesněji bude model analyzován. V množství počítaných bodů je potřeba zvolit kompromis mezi požadovanou přesností výpočtu a dobou, kterou výpočet zabere. Je výhodné tvořit geometrii nodechains tak, aby vygenerovaná síť mesh byla mezi jednotlivými body čtyřstranná, nikoliv trojúhelníková. Čtyřstranná síť mesh se vytvoří v prostoru mezi protilehlými liniemi nodechains, které mají stejný počet nodů (ležících na obou liniích). Trojúhelníková síť vzniká v oblastech modelu, kde není dodrženo uvedené pravidlo a nezbytně také v místech kde geometricky sousedí tvary kruhové nebo zaoblené s tvary přímkovými. Trojúhelníková síť ve srovnání s čtyřstrannou vykazuje pro analýzu horší poměr přesnost/množství.

Pro analyzovaný stroj byla nakreslena geometrie jednoho pólu v CAD-rozhraní Femagu.

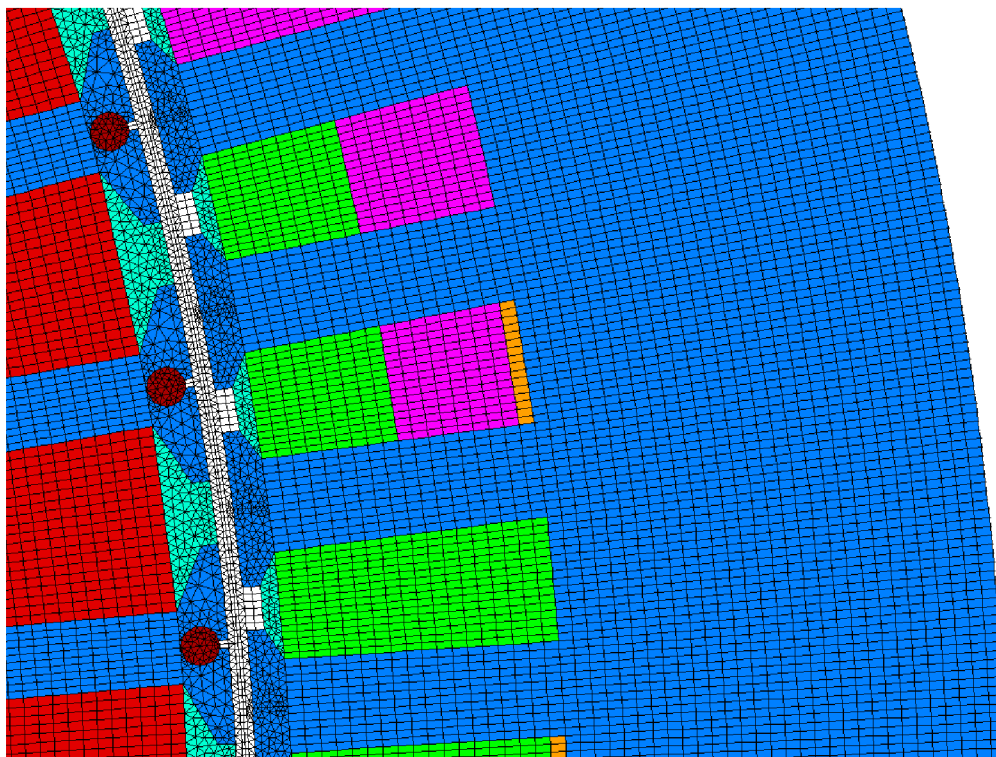


Obr. 2-17 Detail geometrie nodechains statorových drážek a jha.

U dna každé druhé drážky lze vidět sekce pro pomocné vinutí.

2.7.4 Vytvoření sítě “mesh“

Na základě geometrie nodechains se ve Femagu vytvoří síť mesh.

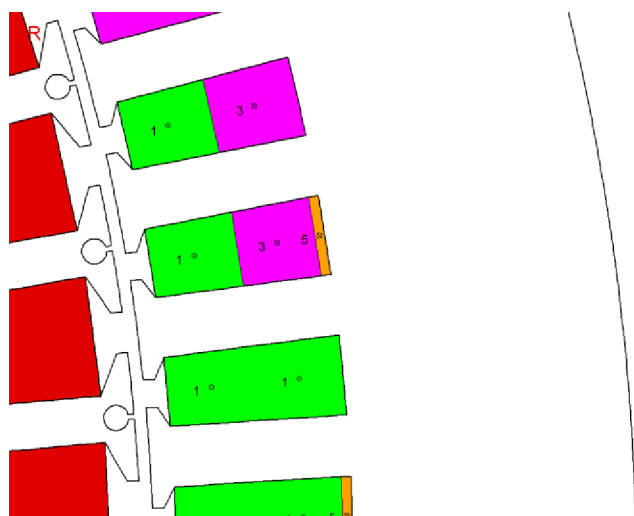


Obr. 2-18 Detail geometrie sítě mesh statorových drážek a jha.

V okolí vzduchové mezery je vygenerována síť trojúhelníková, jinde čtyřstranná.

2.7.5 Vinutí v modelu

Definování vinutí je ve Femagu možné prostřednictvím modulu pro generování vinutí (omezené možnosti), nebo manuálně zadáváním jednotlivých cívkových stran (to je potřeba, např. pro definování pomocného vinutí). Zadává se rozvržení cívkových stran v modelu, jejich zapojení, příslušnost cívek k jednotlivým fázím, orientace cívek, počet závitů v cívkách, proudy a označení.



Obr. 2-19 Detail vinutí v modelu Femag.

Statorové dvouvrstvé vinutí doplněné o pomocné vinutí. Barevně odlišeny jednotlivé fáze vinutí.

2.7.6 Definování materiálů a okrajových podmínek

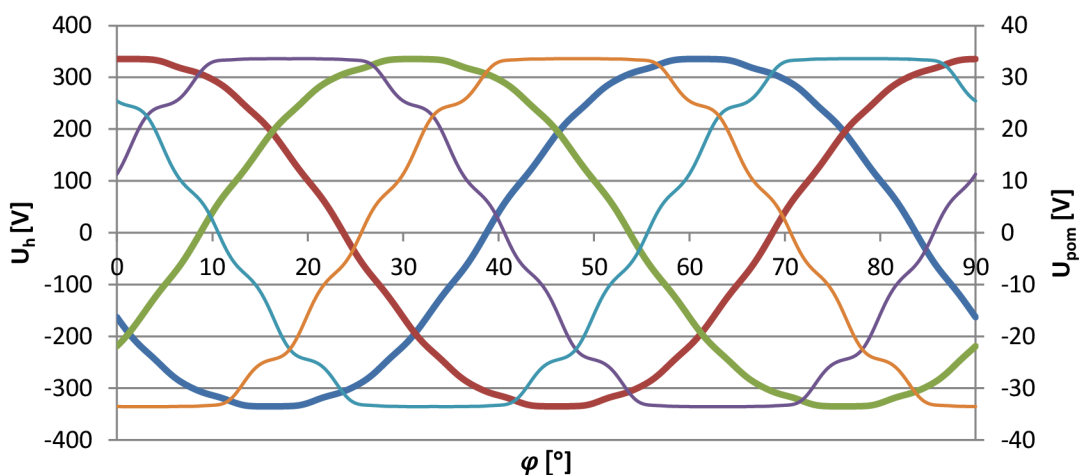
Definují se materiály pro magnetický obvod, vinutí, uzávěry drážek a vzduchovou mezeru.

V posledním kroku se nastavují okrajové podmínky.

2.7.7 Výpočet bodu naprázdno

Výpočty ve Femagu se provádějí v sekci “Field calculation“. Výpočty bodů naprázdno byly počítány funkcí “PM/Reluctance-Motor Simulation“. Funkce počítá jednotlivé stavy v zadavatelem nastaveném počtu kroků natočení rotoru vůči statoru a nastaveným počtem iterací. Čím více kroků natočení, tím více hodnot dílčích výsledků a tím jemnější rozptyl hodnot a tím přesnější simulace.

Výsledkem a výstupem tohoto výpočtu je graficky zobrazený souhrn vybraných počítaných veličin (viz Obr. P-2 v příloze), a textový soubor *.BCH s rozsáhlými výsledky jednotlivých parametrů. Ačkoliv v tomto souboru lze nalézt hodnotu výsledného indukovaného napětí v hlavním vinutí, výsledky pro pomocné vinutí je potřeba dohledat, a zpracovat.



Obr. 2-20 Průběhy okamžitých hodnot napětí (vždy pro jednu cívkovou skupinu jednotlivých fází) hlavního vinutí tučnými čarami, pomocného vinutí tenkými čarami

Zpracování výsledků představuje přepočtení výsledků všech fází na efektivní hodnoty (průběhy, zejména u pomocného vinutí, vykazují znatelné harmonické zkreslení viz Obr. 2-20) a zprůměrování výsledku pro všechny tři fáze daného vinutí.

Výpočet efektivní hodnoty napětí vychází z běžného vztahu

$$U_{ef} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2(t) dt} \quad (85)$$

s tím, že výsledky výpočtů z Femagu jsou v diskrétní formě, tudíž výpočet efektivní hodnoty je prakticky prováděn podle rovnice

$$U_{ef} = \sqrt{\frac{1}{T} \sum_{t=0}^T u^2(t)} \quad (86)$$

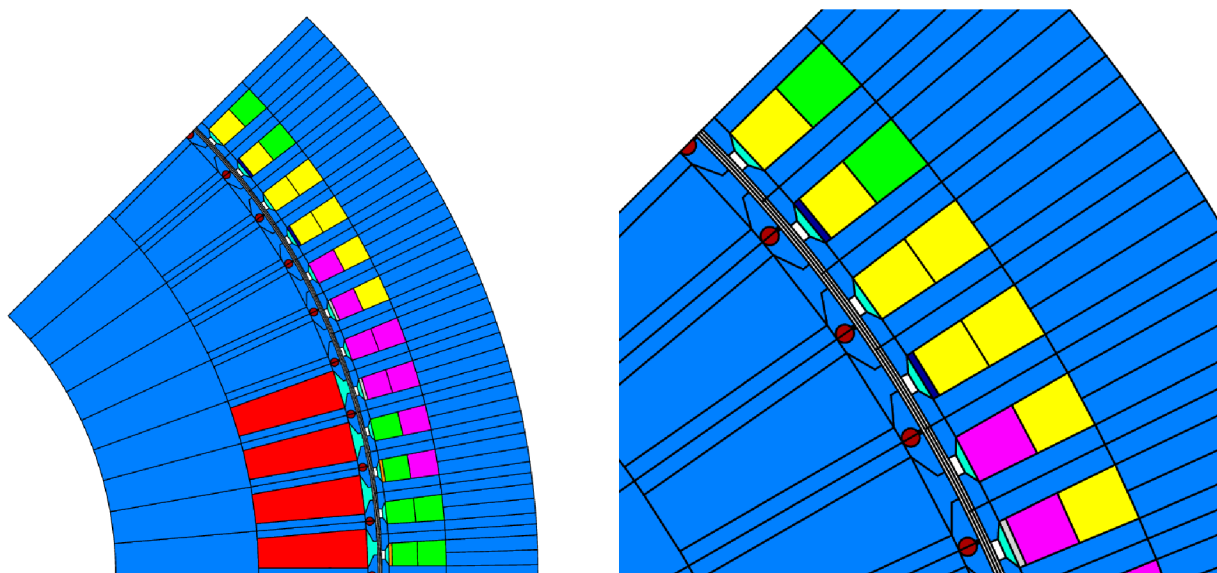
vzhledem k vysokému množství sčítaných hodnot bez velké újmy na přesnosti.

2.7.8 Srovnání variant pomocného vinutí umístěného na dně drážky a u otevření drážky

Pro umístění pomocného vinutí v drážce se nabízejí dvě varianty:

- na dně, tzn. pomocné vinutí uloženo v drážce před vkládáním hlavního vinutí (model v textu výše), nebo
- pod drážkovým klínem (u otevření drážky), tzn. pomocné vinutí uloženo v drážce až po vložení hlavního vinutí.

Aby byl znám rozdíl mezi oběma variantami, sestaví se model ve Femagu stejným postupem jako je uvedeno výše v kapitole 2.7, ovšem s pomocným vinutím umístěným u otevření drážky, nad hlavním vinutím viz Obr. 2-21.



Obr. 2-21 Varianta modelu s pomocným vinutím umístěným pod klínem drážky a detail.

Tab. 2-2 Srovnání výsledků FEM-výpočtů 2 variant umístění pomocného vinutí

umístění	I_{b0} [A]	U_h [V]	U_{pom} [V]
pod klínem	16,8	249,11	26,08
u dna	16,8	249,11	26,01

Pozn.: hodnoty vždy pro jednu cívkovou skupinu jednotlivých fází

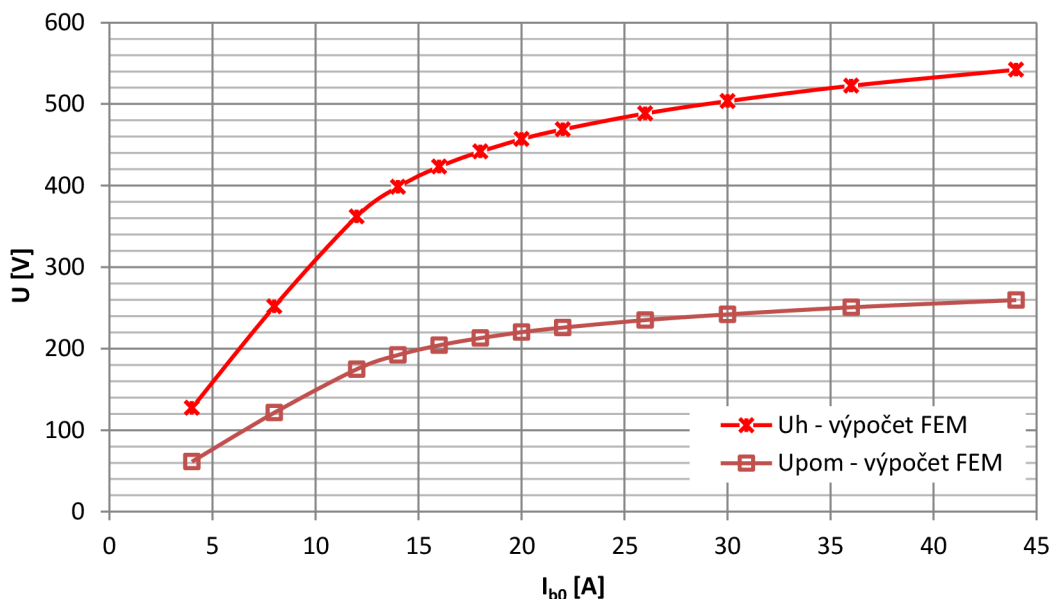
Hodnota indukovaného napětí v pomocném vinutí umístěném pod uzávěrem drážky je o 0,28 % vyšší ve srovnání s pomocným vinutím umístěným u dna drážky.

Rozdíl obou variant je zanedbatelný a obě řešení umístění vinutí můžeme z hlediska indukce napětí považovat za rovnocenné.

2.7.9 Výpočet jednotlivých bodů charakteristiky

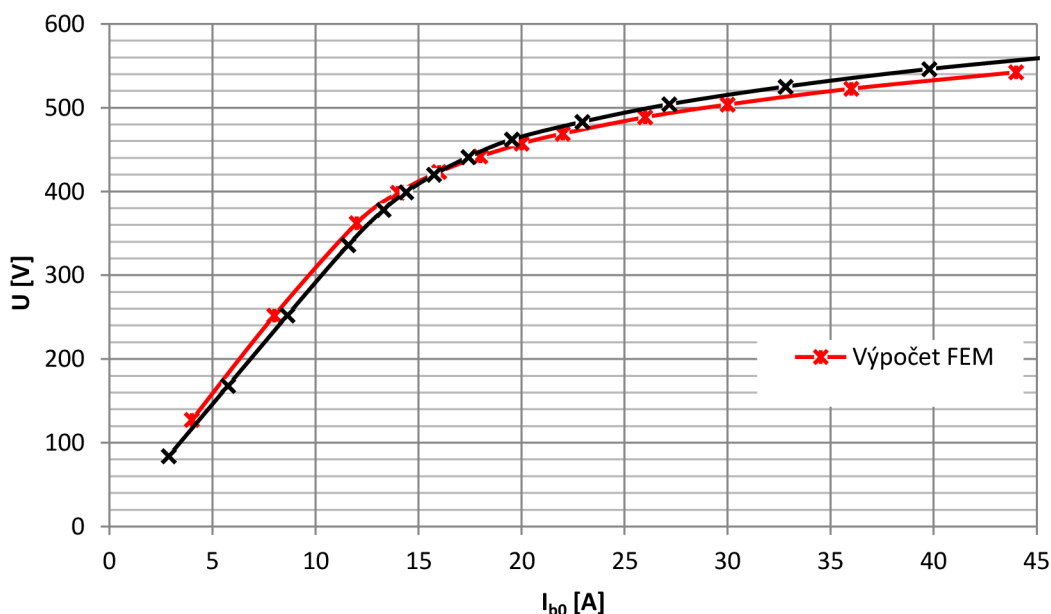
Pro výpočet celé charakteristiky je potřeba spočítat každý z bodů jednotlivě, jak uvádí kap. 2.7.7. Ze zadaného budicího proudu F_{mag} vypočítá hodnotu indukovaného napětí. Budicí proud generátoru pro tyto výpočty se upravuje v sekci "Windings". Výsledné indukované napětí je výstupem výpočtů. Směr postupu výpočtu je tak opačný, než u analytického výpočtu (kap. 2.2), tj. kde se pro zvolené indukované napětí se počítal budicí proud.

Výsledky výpočtů uvádí Tab. P-2: Charakteristika naprázdno hlavního a pomocného vinutí vypočtená FEM v příloze a Obr. 2-22.

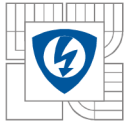


Obr. 2-22 Charakteristika naprázdno z výsledků výpočtů hlavního a pomocného vinutí metodou konečných prvků

2.8 Porovnání výsledků výpočtů charakteristiky naprázdno



Obr. 2-23 Porovnání výsledků výpočtů charakteristiky naprázdno hlavního vinutí metodou konečných prvků a analytickým výpočtem



3 ZKOUŠENÍ

3.1 Účel jednotlivých zkoušek

Zkouška naprázdno

Zkouškou pomocného vinutí naprázdno se provede ověření:

- základního funkčního předpokladu pomocného vinutí – vhodného nominálního svorkového napětí,
- dostatečné velikosti remanentního napětí (pro samonabuzení regulátoru AVR při startu generátoru),
- bezpečné úrovně napětí v oblasti přebuzení (riziko poškození regulátoru přepětím v napájecím vstupu),
- poměru napětí vůči napětí hlavního statorového vinutí,
- přesnosti výpočtů použitých v návrhu,
- přesnosti výsledků FEM simulace.

Zkouška v zatížení

Zatěžovací zkouškou pomocného vinutí se ověří schopnost vinutí dodávat energii potřebnou pro napájení regulátoru napětí (AVR).

Zkouška naprázdno při zatížení

Zkouška naprázdno (pomocné vinutí) při zatížení (hlavní vinutí) ukáže míru změny napětí na svorkách pomocného vinutí při měnící se velikosti výkonu dodávaného generátorem.

3.2 Metody zkoušek

3.2.1 Měření naprázdno

Zkouška naprázdno je zkouška, při níž stroj, který pracuje jako motor, nedává na hřídeli žádný užitečný mechanický výkon, nebo při níž stroj pracuje jako generátor s rozpojenými svorkami.

Měřením naprázdno zjišťujeme jednak vlastnosti magnetického obvodu měřeného stroje, které vyjadřuje magnetizační charakteristika (v praxi se nazývá charakteristikou naprázdno), jednak ztráty při chodu naprázdno v závislosti na napětí.

Měření naprázdno se provádí na nezatíženém elektrickém stroji buď při chodu stroje jako generátor nebo jako motor. V Prvém případě se rovná nule elektrický, v druhém mechanický výkon zkoušeného stroje. U strojů, které mají vlastní budící obvod, se měří naprázdno obvykle při chodu jako generátor. Měří se při stálých otáčkách.

Měření charakteristiky naprázdno u stroje v chodu jako generátor

K pohonu zkoušeného stroje v generátorovém chodu stačí motor s výkonem rovnajícím se ztrátám naprázdno při zvýšeném napětí se zálohou 20 až 30 % výkonu pro urychlení stroje na jmenovité otáčky. U malých středních strojů lze s výhodou použít k pohonu elektrického dynamometru, kterým zároveň měříme ztráty.

Udržíme stálé otáčky a měníme budicí proud a tím velikost indukovaného napětí stroje shora dolů, tj. od napětí $U_0 = 1,2$ až $1,3 U_n$ až do remanentního napětí. [14]

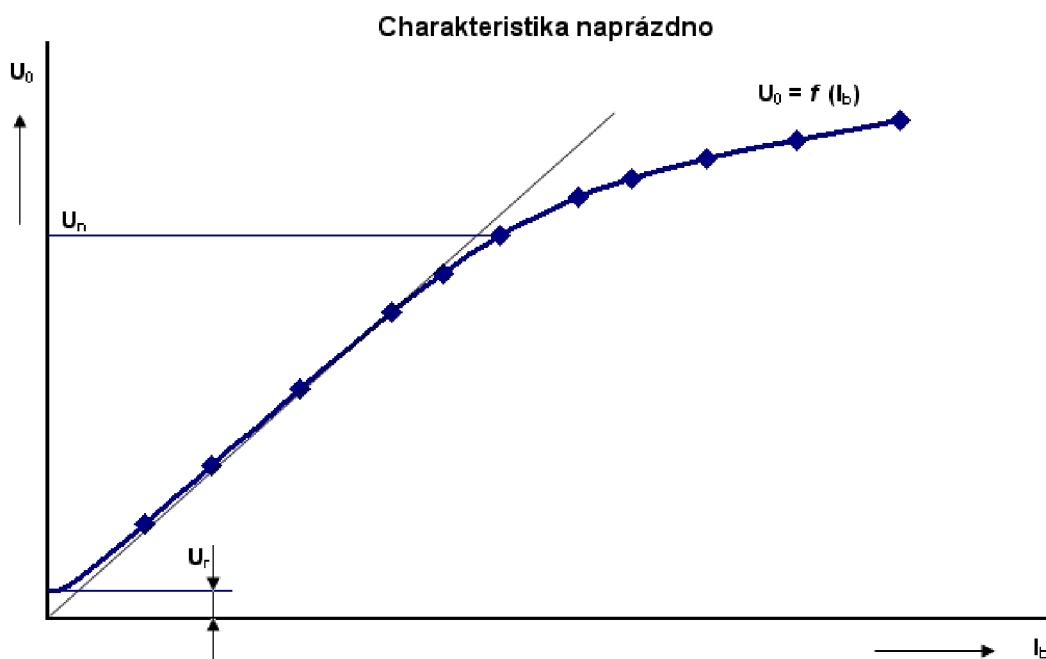
Měření charakteristiky naprázdno u stroje v chodu jako motor

Vyregulujeme-li při určitém napětí, např. při jmenovitém, buzení synchronního motoru tak, aby jím spotřebovaný proud byl nejmenší, tedy aby se účinník rovnal jedné, nebude se takto nastavená hodnota budicího proudu lišit prakticky od hodnoty, která odpovídá tomuto napětí podle charakteristiky naprázdno, naměřené při generátorickém stavu. Tato okolnost umožňuje měřit charakteristiku naprázdno v motorickém stavu. [15]

K tomu je třeba mít k dispozici zdroj střídavého napětí s regulací v širokém rozsahu. Využíváme proměnné napětí stálého kmitočtu, např. z indukčního regulátoru nebo alternátoru. Proud měříme ve všech třech fázích a bereme z naměřených hodnot aritmetický střed. Napětí naměřené na svorkách všech druhů elektrických motorů je vyšší než vnitřní indukované napětí o úbytky způsobené proudem naprázdno na odporu a na rozptylové reaktanci napájeného vinutí. Tyto úbytky bývají při chodu naprázdno malé a v praxi se neuvažují. Proto se vynáší jako závislost svorkového napětí U_0 na magnetizačním (budicím) proudu I_b . [15]

Při měření charakteristiky naprázdno u stroje v chodu jako motor, přivádíme na svorky stroje napětí sítě proměnné velikosti od $U_0 = 1,2$ až $1,3 U_n$ do $0,25 U_n$ a udržujeme opět stálé otáčky. Takto lze postupovat do okamžiku, kdy stroj vypadne ze synchronismu. [14]

Nevýhodou takto měřené charakteristiky naprázdno je neurčitost její spodní části, ve které není zachyceno indukované napětí způsobené remanentním magnetismem.



Obr. 3-1 K definici charakteristiky naprázdno synchronního generátoru

Charakteristika naprázdno

Charakteristika naprázdno (magnetizační charakteristika) určuje závislost vnitřního indukovaného napětí (hodnota vnitřního indukovaného napětí je rovna záporné hodnotě elektromotorické síly) na budícím proudu $U_0 = f(I_b)$. Vnitřní indukované napětí je při stálých otáčkách stroje nebo při stálém kmitočtu sítě úměrné magnetickému toku nebo magnetické indukci stroje. Budící proud je úměrný budící magnetomotorické síle, respektive intenzitě magnetického pole. Bude proto charakteristika naprázdno $U_0 = f(I_b)$ až na měřítko stejná jako závislost $B = f(H)$ příslušného magnetizačního obvodu a její průběh bude záviset na vlastnostech použitého magnetického materiálu. [14]

3.2.2 Měření charakteristik při zatížení

Při měření charakteristik při zatížení je třeba dodržet tato ustanovení:

Měří se pokud možno při provozní teplotě stroje. Měřením charakteristiky při zatížení se kontroluje současně správnost zapojení vinutí, která ovlivňují charakteristiku stroje při zatížení.

Při měření zatěžovacích charakteristik je možno kontrolovat momentové (výkonové) a proudové přetížitelnosti.

U generátorů se zpravidla měří tyto charakteristiky:

- a) vnější charakteristika, tj. závislost napětí na zatěžovacím proudu. Měří se při stálých otáčkách (při stálém kmitočtu), při stálém budícím proudu (u strojů s vlastním buzením při stálém nařízení budícího reostatu), při proměnné zátěži u synchronních strojů i při různých účinnících jako parametrech.
- b) Regulační charakteristika, tj. závislost budícího proudu cizího buzení na zatěžovacím proudu při stálém napětí a jmenovitých otáčkách, u synchronních strojů i při stálém účinníku.

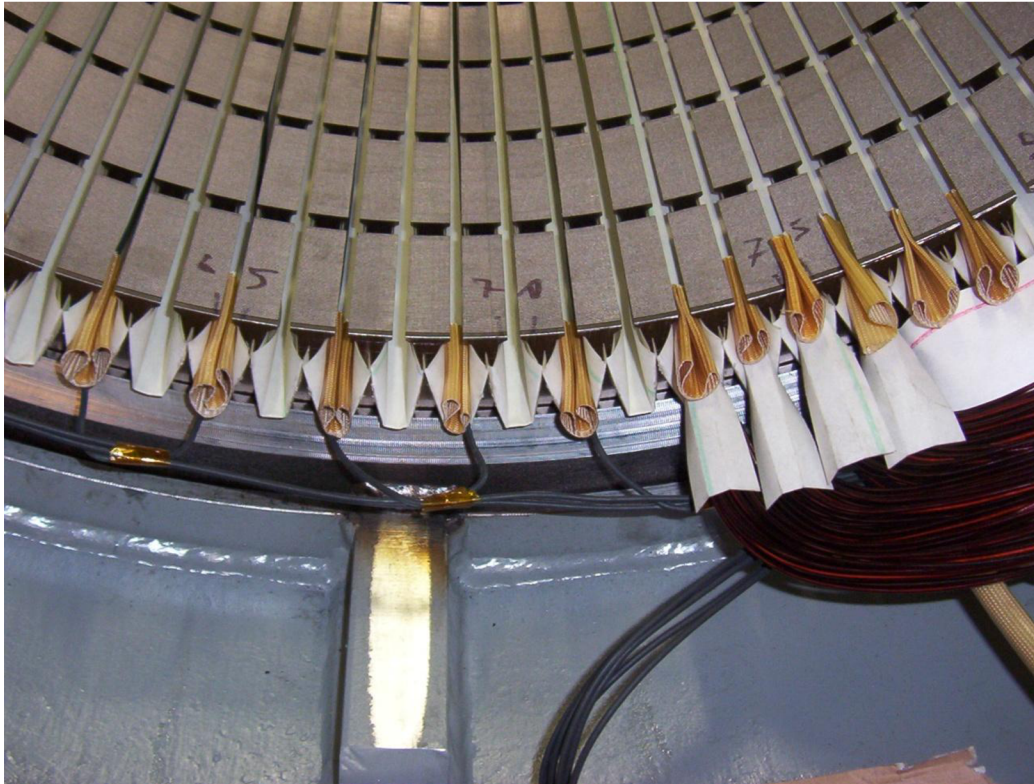
U synchronních strojů se dále měří V-křivka, tj. závislost proudu vinutí kotvy na budícím proudu při jmenovitém napětí kotvy a jmenovitém kmitočtu při daném konstantním výkonu.

- c) Zatěžovací charakteristika, tj. závislost proudu na budícím proudu při konstantním satorovém napětí a konstantních otáčkách, u alternátorů i při stálém účinníku blízkém nule.

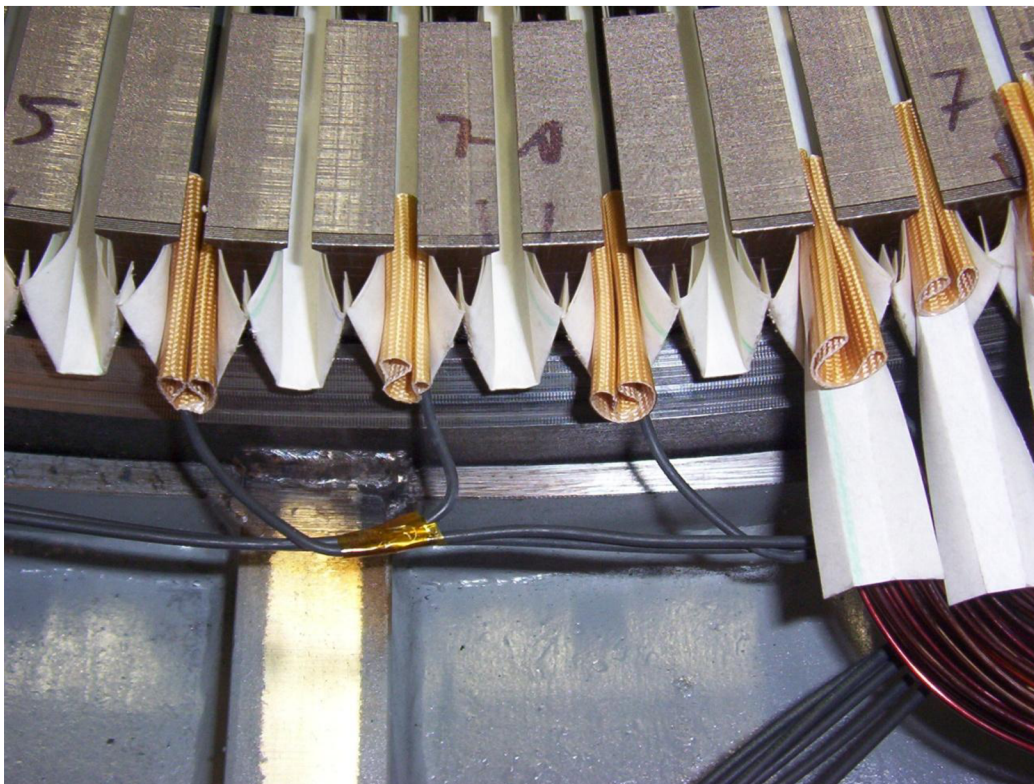
[16]

Synchronní generátor lze zatěžovat buď do impedance izolované od rozvodné sítě, tedy bez paralelní spolupráce, nebo do sítě, v paralelní spolupráci s několika alternátory tak, aby napětí U a kmitočet f byly stálé. Na zkušebně se používá buď prvního způsobu zatěžováním do přepínatelných tlumivek nebo transduktorů, a to až do největších výkonů; u malých výkonů i do odporů a indukčností při $\cos \varphi_n$ např. 0,8 anebo se vůbec nezatěžují. [17]

3.3 Realizace pomocného vinutí



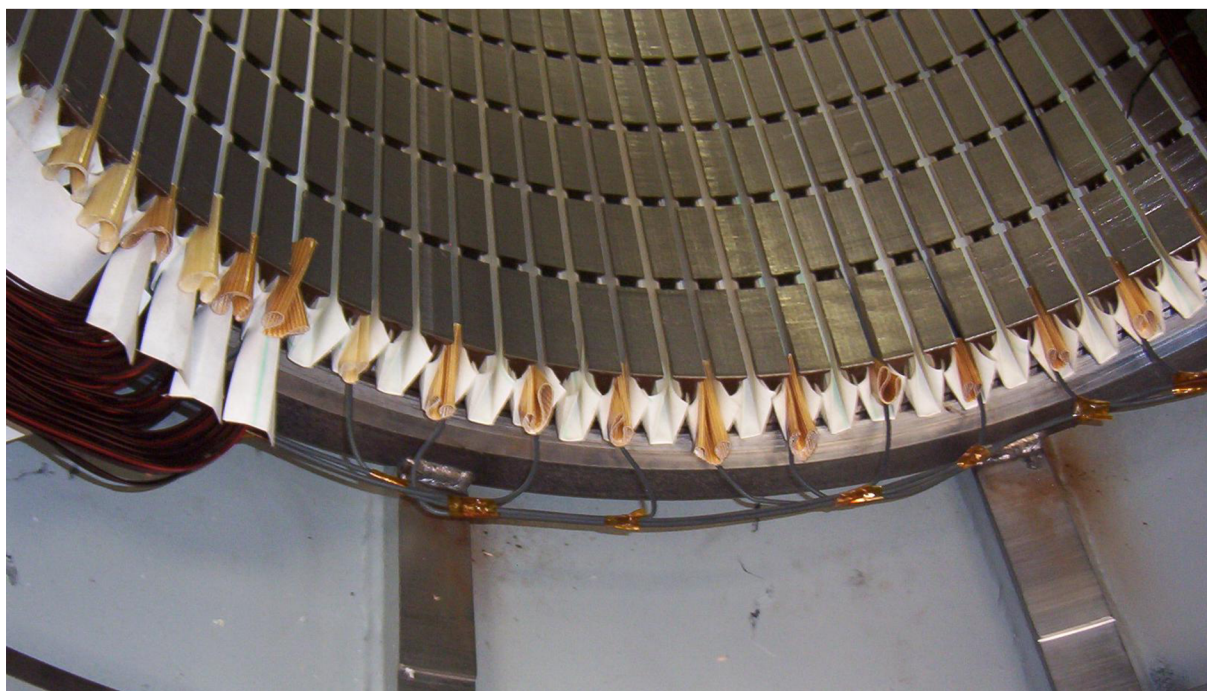
Obr. 3-2 Pomocné vinutí navinuté ve statorových drážkách. Pro vinutí není vkládána přidavná izolace. Izolaci pomocného vinutí je vlastní dvojitá izolace užitého kabelu. Napravo na obrázku založena i spodní vrstva hlavního dvouvrstvého vinutí.



Obr. 3-3 Pomocné vinutí je z praktického hlediska pro vkládání vinutí umístěno na dně drážek, to aby nebylo během navijení vytlačováno hlavním vinutím ven z drážek.



Obr. 3-4 Provizorní zajištění pomocného vinutí v drážkách pro následné manipulace při vkládání hlavního statorového vinutí



Obr. 3-5 Vzájemné zajištění čel závitů pomocného vinutí izolační páskou. Vinutí je navímáno vcelku, bez dodatečných spojů.

3.4 Provedená měření

3.4.1 Podmínky při zkouškách synchronního generátoru - obecně

Zkouší se na kompletním elektrickém stroji. V sestavě hlavní stroj + rotující budič na společné hřídeli.

Buzení stroje je externí. Při zkouškách elektrického stroje jako takového není buzení automatickým regulátorem napětí (AVR) aktivní, aby se nevnášel do měření vliv vlastního regulátoru. Dalším faktorem jsou požadavky při zkouškách charakteristik stroje, kdy je generátor zatěžován hodnotami přesahujícími jmenovitou úroveň, což může být nad možnosti daného automatického regulátoru napětí (AVR). Stator budiče je napájen z externího zdroje stejnosměrného proudu, velikost tohoto proudu a souvisejícího budičeho napětí je měřena.

Stroj pracuje v generátorickém režimu, mechanicky jej pohání dynamometr rychlostí jmenovitých otáček. Snímá se velikost momentu mechanického příkonu.

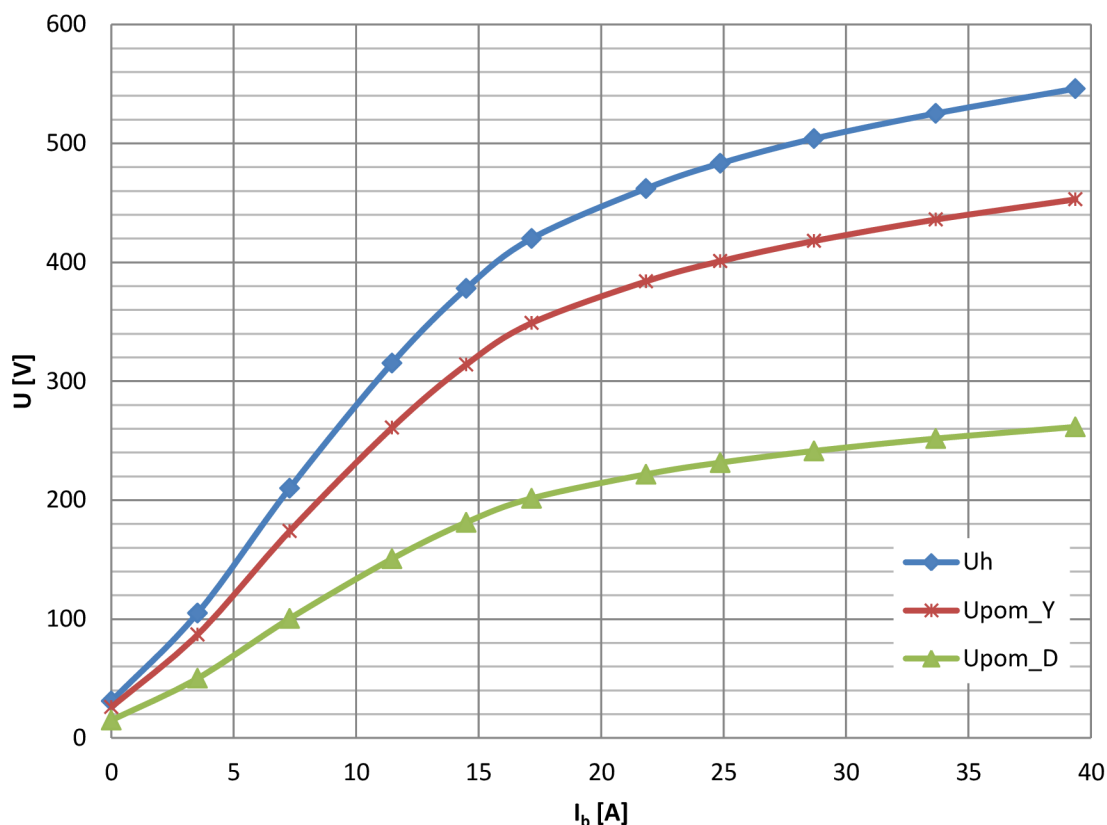
Velikost budičeho napětí a proudu hlavního stroje (to jest na rotoru) je měřena speciální metodou; Na hřídeli rotoru stroje je přibandážován elektronický voltmetr zapojený do obvodu rotorového vinutí. Při chodu stroje voltmetr rotuje s hřídelí a měří skutečnou hodnotu budičeho napětí. Měřené hodnoty lze z displeje voltmetru odečítat s pomocí stroboskopu. Frekvence záblesků stroboskopu se nastaví hodnotu shodnou s počtem otáček rotoru za 1 sekundu. Pak je rotující voltmetr zdánlivě nepohyblivý a tím se umožní odečítat z displeje voltmetru zobrazované hodnoty. Proud v obvodu rotoru je určen přepočtem z měřených hodnot rotorového napětí a odporu rotorového vinutí.



Obr. 3-6 Vyroběný generátor připravený k přesunu na zkušebnu

3.4.2 Podmínky při zkoušce naprázdno

Hlavní svorky generátoru jsou ve stavu naprázdno, zapojení vinutí je do hvězdy. Měří se napětí, které je nastavováno velikostí budičeho proudu v přibližně deseti krocích v rozsahu od 130 % jmenovitého napětí až do remanentního napětí (tzn. zcela bez buzení). Svorky pomocného vinutí jsou rovněž ve stavu naprázdno, vinutí zapojeno do hvězdy. Měří se sdružené napětí.



Obr. 3-7 Charakteristika naprázdno - naměřené hodnoty

U_h je svorkové napětí hlavního vinutí statoru; U_{pom_Y} svorkové napětí pomocného vinutí v zapojení do hvězdy; U_{pom_D} svorkové napětí pomocného vinutí v zapojení do trojúhelníka.

3.4.3 Vyhodnocení měření naprázdno

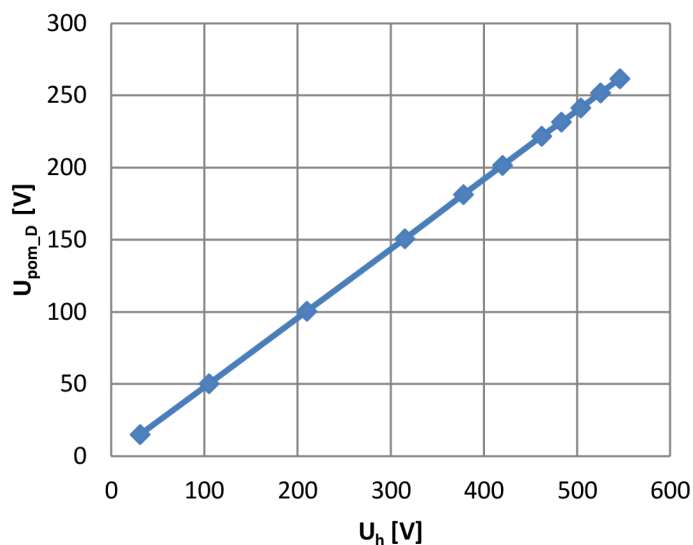
Změřením charakteristiky naprázdno na stroji s pomocným vinutím (výsledky viz Obr. 3-7 a Tab. P-3) bylo zjištěno následující:

Hodnota napětí pomocného vinutí ve stavu naprázdno, při jmenovité úrovni napětí hlavního vinutí (420 V), je 201 V. Porovnejme: při návrhu (viz kapitola 2.4) kalkulovaná hodnota napětí pomocného vinutí byla 203 V.

Velikost remanentního napětí na svorkách pomocného vinutí při jmenovitých otáčkách stroje je 15 V. Minimální napětí pro nabuzení regulátoru je obecně 12 V a u regulátoru DECS-100 v měřeném stroji je to 6 V.

Díky „lámání“ charakteristiky naprázdno nad jmenovitým napětím jsou hodnoty napětí v relativně bezpečné úrovni z hlediska ohrožení regulátoru přepětím na napájecím vstupu.

Poměr napětí pomocného vinutí vůči napětí hlavního statorového vinutí je v celé charakteristice konstantní, jak lze vidět v (Obr. 3-8 Závislost napětí pomocného vinutí na napětí hlavního vinutí) - závislost je lineární.



Obr. 3-8 Závislost napětí pomocného vinutí na napětí hlavního vinutí

3.4.4 Podmínky při měření v zatížení

Měření v zatížení u zkoušeného stroje nelze provádět při jmenovitých parametrech (napětí, frekvence, proud, $\cos \varphi$) kvůli nedostatečnému výkonu zkušebního pohonu. Pro pohon zkoušeného stroje je využito zkušební dynamometru, jehož maximální výkon ani zdaleka nedosahuje jmenovitého příkonu zkoušeného stroje (což je cca 800 kW). Nedostatečný příkon generátoru neumožní dosáhnout jmenovité hodnoty proudu statoru, při jmenovitém $\cos \varphi$.

Pro změření charakteristiky v zatížení generátoru ovšem je potřeba docílit statorových proudů ještě vyšších než jmenovitých. To vede k nutnosti měření zkoušky v zatížení náhradní metodou: stroj bude provozován v tzv. přebuzeném stavu při jmenovitém napětí, frekvenci i proudu, ale při jiném $\cos \varphi$. Buzení stroje bude vyšší, $\cos \varphi$ bude výrazně nižší (blízký nule). Vysoký fázový posuv mezi napětím a proudem statoru způsobí, že činný výkon generátoru bude minimální a stroj tak bude zatěžován zejména jalovým proudem, což významně omezí nároky na mechanický příkon.

Konfigurace měření v zatížení zmíněnou náhradní metodou je následující: testovaný stroj je mechanicky poháněn dynamometrem jmenovitými otáčkami; buzení generátoru je externí; svorky generátoru jsou připojeny k induktivní zátěži. Stroj pracuje v přebuzeném stavu a je zatěžován jalovou energií. Měří se fázové proudy, napětí, $\cos \varphi$.

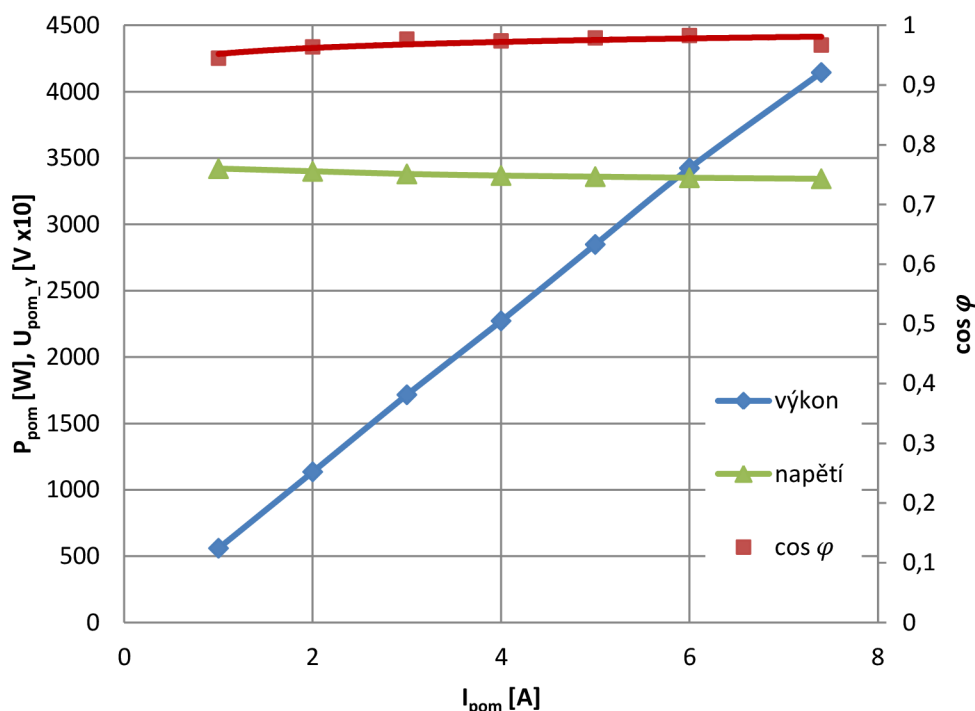
Měření zatěžovací charakteristiky pomocného vinutí

Pomocné vinutí je připojeno k odporové zátěži. Předpokládané proudové zatížení pomocného vinutí regulátorem (AVR) bylo v návrhu dříve stanoveno na, za běžného provozu, nejvýše 3 A. Vzhledem k nízké proudové hustotě v pomocném vinutí lze při zkoušce vinutí zatížit i dvojnásobkem jmenovitého proudu. Při měření zatěžovací charakteristiky pomocného

vinutí se v několika stupních mění zátěž pomocného vinutí, zatímco vinutí hlavního stroje je zatíženo při stálých parametrech, uvedených viz Tab. 3-1.

Tab. 3-1 Parametry generátoru při měření zatížení pomocného vinutí

n	750 ot.
U_h	420 V (Y)
I_h	999 A
P_1	89 kW
I_b	52,3 A



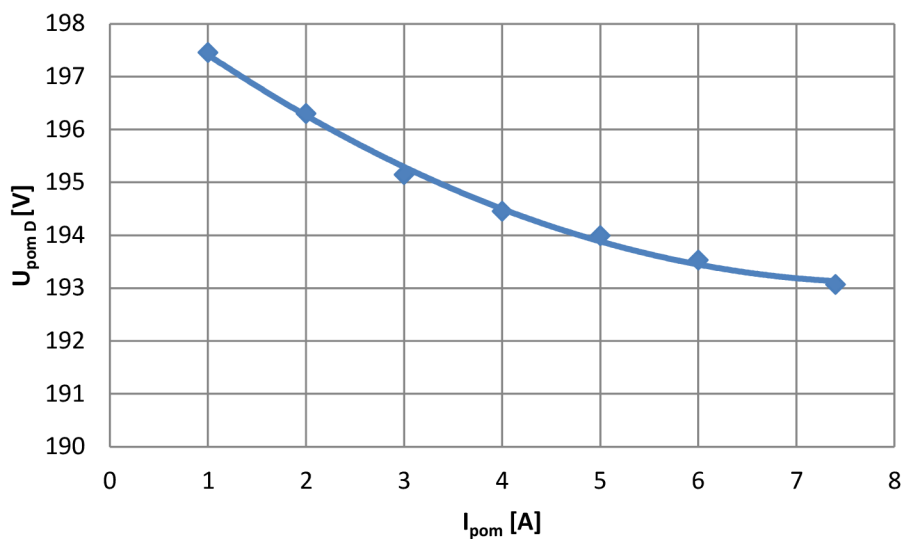
Obr. 3-9 Zatěžovací charakteristika pomocného vinutí

3.4.5 Vyhodnocení měření v zatížení

Zkouška simuluje podmínky obvyklého provozního stavu, tj. hlavní vinutí generátoru zatíženo přibližně jmenovitým proudem a pomocné vinutí rovněž zatíženo měrou potřebnou pro pokrytí příkonu budicího systému.

V průběhu zkoušky byl proud hlavního vinutí konstantní 1 kA, zatímco proud pomocného vinutí byl nastavován v rozsahu 1 – 7,4 A. Tak byla ověřena schopnost pomocného vinutí dodávat energii potřebnou pro napájení regulátoru napětí (AVR) viz (Obr. 3-9).

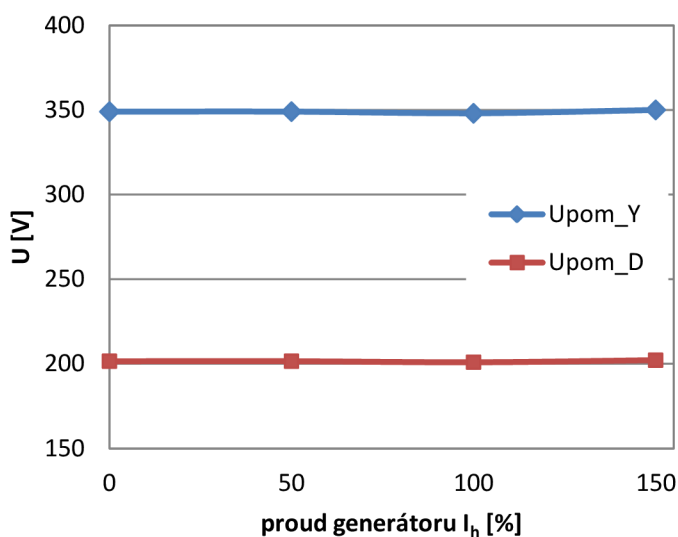
Se zvyšujícím se zatěžováním pomocného vinutí dochází ke zvětšování napětového úbytku na jeho svorkách. Pokles napětí pomocného vinutí lze vidět v Obr. 3-10. Při nejvyšším zatížení pomocného vinutí (7,4 A) napětový úbytek způsobil pokles svorkového napětí na 193,1 V. Naměřené hodnoty uvádí Tab. P-3: Charakteristika naprázdno - naměřené hodnoty v příloze.



Obr. 3-10 Závislost napětí pomocného vinutí na zátěži pomocného vinutí

3.4.6 Podmínky při měření naprázdno (pomocného vinutí) při zatížení (hlavního vinutí)

Generátor je mechanicky poháněn dynamometrem jmenovitými otáčkami; buzení generátoru je externí; svorky generátoru jsou připojeny k induktivní zátěži. Stroj pracuje v přebuzeném stavu a je zatěžován jalovou energií. Svorky pomocného vinutí jsou naprázdno, vinutí zapojeno do hvězdy. Měří se sdružené napětí.

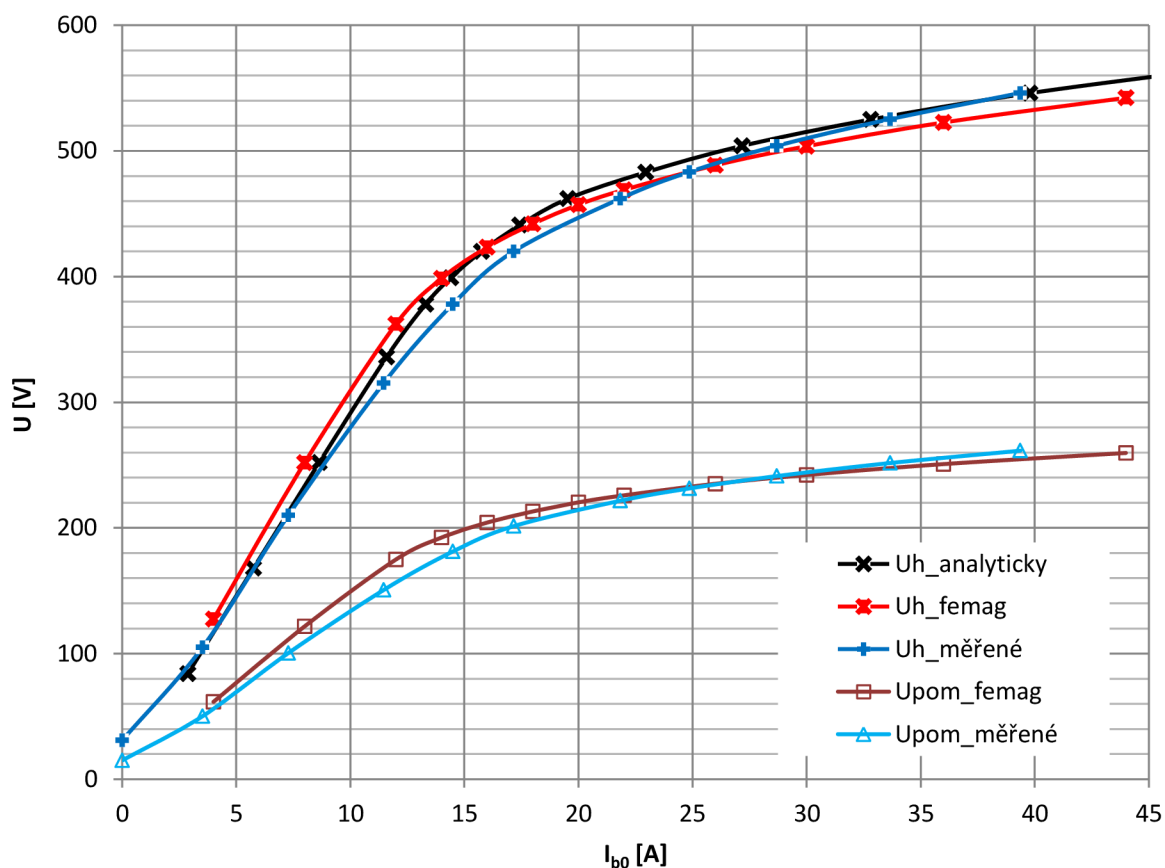


Obr. 3-11 Závislost napětí naprázdno pomocného vinutí na zatížení generátoru

3.4.7 Vyhodnocení měření naprázdno (pomocného vinutí) při zatížení (hlavního vinutí)

Zkouška by měla ukázat, jak se mění napětí pomocného vinutí naprázdno se zvyšujícím se proudem generátoru (hlavního vinutí) a rovněž rostoucím budicím proudem. Při zvyšování proudu generátoru od nuly až do hodnoty $1,5 I_n$ se hodnota měřeného napětí na svorkách pomocného vinutí prakticky neměnila (viz Obr. 3-11 a Tab. P-5: Měření pomocného vinutí naprázdno při proudovém zatížení generátoru v příloze). Odchyłky hodnot měřeného napětí v rozmezí jednoho voltu můžeme přičíst možné chybě odečítání ze stupnice analogového voltmetru a zejména nepřesnosti nastavení budicího proudu spolu s nesoučasným odečítáním měřených hodnot.

3.5 Srovnání výsledků výpočtů a měření



Obr. 3-12 Charakteristika naprázdno - srovnání výsledků výpočtů a měření

4 ZÁVĚR

Cílem práce byl návrh, realizace a ověření vlastností pomocného vinutí pro napájení napěťového regulátoru konkrétního synchronního generátoru.

Jedná se o osmi pólový synchronní generátor pro malou vodní elektrárnu, výrobce TES Vsetín, typového označení GSH450L8, třífázový, nízkonapěťový, s dvouvrstvým vsypávaným statorovým vinutím. Jmenovité napětí generátoru je 420 V, zdánlivý výkon 950 kVA. Buzení generátoru je bezkroužkové s pomocným rotujícím budičem.

V úvodní kapitole se objasňuje princip a uspořádání bezkroužkového systému buzení synchronního generátoru s pomocným rotačním budičem. Posuzují se vlastnosti pomocného vinutí a srovnávají se přednosti a nedostatky pomocného vinutí s jinými používanými systémy pro napájení regulátorů napětí. Uvádí se způsoby činnosti regulace napěťových regulátorů (AVR). Dále se objasňuje terminologie a technologie vinutí nízkonapěťových střídavých strojů.

Ve výchozím stavu pro návrh pomocného vinutí byl určen konkrétní synchronní generátor a k němu příslušný automatický regulátor napětí (Basler DECS-100) a alternativně uvažovaný typu regulátoru (Basler AVC125-10). V kapitole 1.4 byly stanoveny požadavky pro napájení daných regulátorů, tj. zejména napěťový rozsah (180 – 250 V) a odběr; na základě těchto požadavků bylo navrhováno pomocné vinutí v kapitole 2.

Předpokládané umístění pomocného vinutí bylo ve statorových drážkách generátoru. Uvedený synchronní generátor měl ve výchozím stavu návrhu záměrně poněkud menší plnění statorových drážek (na spodní hranici obvyklého rozmezí). Takto snížené plnění statorové drážky u tohoto stroje představuje snížení potenciálně dosažitelného výkonu o cca 1 %.

Při návrhu pomocného vinutí se principiálně vycházelo z vypočteného magnetického toku ve statoru hlavního stroje. Indukované napětí na svorkách pomocného vinutí odpovídá magnetickému toku a počtu závitů pomocného vinutí zvolenému při návrhu stroje. Byl určen předběžný počet závitů a bylo nalezeno vhodné rozložení vinutí do statoru (viz kap. 2.4).

Pro zvolený počet závitů bylo spočteno jmenovité napětí pomocného vinutí 203 V. Navržené vinutí má jmenovité napětí v rozsahu vhodném pro napájení regulátoru.

Následně byly zkontrolovány velikosti plnění drážek (bez vinutí 85 %, včetně pomocného vinutí 86,9 %) – obě hodnoty jsou v běžném rozmezí pro plnění drážek (viz kap. 2.5).

Navržené pomocné vinutí je třífázové, má pouze jeden závit na cívku, vodič je tvořen jediným drátem – lanovým kabelem s vlastní dvojitou izolací, která představuje izolační systém, další izolace k pomocnému vinutí se nepřidává. Vinutí zaujímá pouze polovinu statorových drážek (každou druhou drážku), závity celé 1 fáze jsou do statoru navinuty vcelku tj. bez cívkových spojů, vývody vyvedeny do svorkovnice, na svorkách spojeny do trojúhelníka (viz kap. 2.6).

Pro ověření velikosti nárůstu indukovaného napětí ve vinutí při přebuzení byla analyticky spočtena charakteristika naprázdno hlavního stroje (viz graf na Obr. 2-10 a číselné výsledky viz Tab. P-1). Tato charakteristika je v poměrných jednotkách shodná s charakteristikou naprázdno pomocného vinutí, čehož lze využít a spočíst tuto charakteristiku ještě před vlastním návrhem počtu vodičů pomocného vinutí (viz kap. 2.2).

Výpočet bodů charakteristiky naprázdno zahrnuje velké množství rutinních výpočtů (viz kap. 2.2) a časté vyhledávání hodnot v charakteristikách, proto je velmi vhodné využít k výpočtům počítače, např. jak naznačuje kap. 2.2.3.

Přesnost a správnost analytického výpočtu byla ověřena výpočtem metodou konečných prvků (MKP, angl. FEM). Za tímto účelem byl vytvořen model stroje ve FEM programu pro analýzu a simulování magnetických obvodů strojů Femag (kap. 2.7). Výsledky charakteristiky naprázdno počítané FEM uvádí graf na Obr. 2-22 a číselně Tab. P-2. Časově velmi náročná část práce. Srovnání výsledků výpočtů analytických a konečně prvkových přináší graf na Obr. 2-23; křivky charakteristiky naprázdno, počítané různými metodami, jsou si v celém svém průběhu velmi blízké.

Metodou konečných prvků ve Femagu byly srovnávány varianty umístění pomocného vinutí na dno drážek, nebo pod drážkový klín (u otevření drážek). Jak lze porovnat z výsledných hodnot v Tab. 2-2 – obě varianty jsou z hlediska velikosti indukovaného napětí rovnocenné.

Při navíjení stroje bylo pomocné vinutí navinuto do statorových drážek před vložením hlavního vinutí. Umístění pomocného vinutí je tedy na dně drážek viz Obr. 3-2 až Obr. 3-5.

V kapitole 3 jsou popsány účely jednotlivých zkoušek, co se měří a za jakých podmínek. Naměřené hodnoty ze zkoušky naprázdno jsou zakresleny na Obr. 3-7 a zapsány v Tab. P-3. Zkouška prokazuje základní funkční předpoklad pomocného vinutí – na svorkách je vhodné nominálního napětí pro napájení regulátoru napětí. Naměřená hodnota napětí pomocného vinutí, při jmenovité hodnotě napětí hlavního vinutí (420 V), je 201 V. Porovnejme: při návrhu (viz kap. 2.4) kalkulovaná hodnota napětí pomocného vinutí byla 203 V, což je velmi dobrá shoda.

Naměřená velikost remanentního napětí na svorkách pomocného vinutí při jmenovitých otáčkách stroje je 15 V. Minimální napětí pro nabuzení regulátoru je obecně 12 V a u regulátoru DECS-100 v měřeném stroji je to 6 V. Tudíž start generátoru (nabuzení generátoru na jmenovité napětí) bude bezproblémový.

Poměr napětí pomocného vinutí vůči napětí hlavního statorového vinutí je v celé charakteristice konstantní, jak lze vidět v (Obr. 3-8 Závislost napětí pomocného vinutí na napětí hlavního vinutí) – potvrzuje se předpoklad – závislost je lineární.

Zkouška v zatížení simuluje podmínky obvyklého provozního stavu grafická závislost viz Obr. 3-9 a Tab. P-4. Pomocné vinutí zvládá dodávat potřebný proud pro napájení regulátoru.

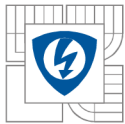
Se zvyšujícím se zatížením pomocného vinutí dochází ke zvýšení napěťového úbytku na jeho svorkách. Pokles napětí pomocného vinutí zachycuje Obr. 3-10. Při nejvyšším zatížení pomocného vin. (7,4 A) napěťový úbytek způsobil pokles svorkového napětí z 201 V na 193,1 V.

Zkouška naprázdno (pomocné vinutí) při zatížení (hlavní vinutí) ukázala, že se napětí na svorkách pomocného vinutí při měnící se velikosti výkonu dodávaného generátorem podstatně nemění (viz Obr. 3-11).

Graf na obrázku Obr. 3-12 provádí srovnání charakteristiky naprázdno z měření, z výpočtu analyticky a výpočtu MKP. Zde je zapotřebí poznamenat, že míra shody analytického výpočtu parametrů s měřením stroje se liší typ od typu stroje.

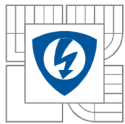
Použitá metoda návrhu pomocného byla ověřena jako funkční s dobrou přesností výpočtu.

Provedená měření lze shrnout konstatováním, že vyrobené pomocné vinutí splňuje všechny požadavky pro napájení regulátoru synchronního generátoru.



LITERATURA

- [1] Roubíček O.; Motor s kroužkovým rotorem; 2008; dostupný dne 28.5.2014 na <http://elektrika.cz/data/clanky/motor-s-krouzkovym-rotorem/view>
- [2] Rasilo P.; Low-voltage Synchronous Generator Excitation Optimization and Design; 2007
- [3] Wells S.; Mecc Alte Ltd.; Power to the AVR; dostupný dne 28.5.2014 na <http://www.scribd.com/doc/192700366/Aux-Winding-and-PMG>
- [4] www.meccalte.com; Why PMG system is no longer necessary?; dostupný dne 28.5.2014 na <http://www.meccalte.com/index.php?s=170&n=9>
- [5] www.cee.siemens.com; Sipol – Tranzistorové budicí soustavy pro synchronní generátory; dostupné dne 28.5.2014 na [https://www.cee.siemens.com/web/cz/cz/corporate/portal/home/energy/sekto_r_energy/vyroba_energie/budici_soustavy/Documents/43714_Sipol\\$cz.pdf](https://www.cee.siemens.com/web/cz/cz/corporate/portal/home/energy/sekto_r_energy/vyroba_energie/budici_soustavy/Documents/43714_Sipol$cz.pdf)
- [6] www.basler.com; Technická dokumentace; dostupné 28.5.2014 na www.basler.com
- [7] Kopylov I., a kolektiv; Stavba elektrických strojů, SNTL, Praha 1988.
- [8] motor.feld.cvut.cz; Návrh vinutí statoru; dostupné dne 28.5.2014 na http://motor.feld.cvut.cz/www/materialy/X14OEO/4_Vinuti_statoru_AM.pdf
- [9] Petrov G., Elektrické stroje 2, Academia, Praha 1982.
- [10] TES Vsetín; Propagační materiály
- [11] www.elviko.cz ; Vlastnosti měděných lakovaných vodičů dle EN 60317-0-1, dostupné 28.5.2014 na <http://www.elviko.cz/zbozi/medene-draty/>
- [12] Huber+Suhner AG; Datasheet Radox; dostupný na 28.5.2014 na http://www.intelcomservices.com/products/Radox/hs-p-es-cab-over-abc-rx155_en.pdf
- [13] cs.wikipedia.org; Metoda konečných prvků; dostupný na 28.5.2014 na http://cs.wikipedia.org/wiki/Metoda_konecn%C3%BDch_prvk%C5%BD
- [14] Bašta J., a kol. Měření na elektrických strojích 1. Všeobecná část. Praha 1959, Státní nakladatelství technické literatury.
- [15] Žerve G.K., Zkoušení elektrických strojů v průmyslu. Praha 1954, Státní nakladatelství technické literatury.
- [16] ČSN 35 0010; Točivé elektrické stroje. Zkoušky; Praha 1992, Český normalizační institut.
- [17] Bašta J., a kol. Měření na elektrických strojích 5. Měření na synchronních strojích. Praha 1959, Státní nakladatelství technické literatury.



PŘÍLOHY

P1 Výsledky výpočtů

Tab. P-1: Charakteristika naprázdno hlavního vinutí vypočtená analyticky

U_i / U_n	0,2	0,4	0,6	0,8	0,9	0,95	1	1,05	1,1	1,15	1,2	1,25	1,3	1,35
U_i [V]	84	168	252	336	378	399	420	441	462	483	504	525	546	567
I_{b0} [A]	2,88	5,76	8,64	11,6	13,3	14,4	15,8	17,4	19,5	23,0	27,2	32,8	39,8	48,6

Tab. P-2: Charakteristika naprázdno hlavního a pomocného vinutí vypočtená FEM

I_{b0} [A]	4	8	12	14	16	18	20	22	26	30	36	44
U_h [V]	127	252	362	399	423	442	457	469	489	504	523	542
U_{pom} [V]	62	122	175	192	204	213	220	226	235	242	251	260

P2 Výsledky měření

Tab. P-3: Charakteristika naprázdno - naměřené hodnoty

U/U_n [-]	U_{0h} (U-V) [V]	U_{Eb} (budič) [V]	I_{Eb} (budič) [A]	I_b (rotor) [A]	U_{0pom_Y} [V]	U_{0pom_D} [V]
1,3	546	24,4	3,25	39,4	453	262
1,25	525	20,9	2,78	33,7	436	252
1,2	504	17,9	2,37	28,7	418	241
1,15	483	15,5	2,05	24,9	401	232
1,1	462	13,6	1,80	21,8	384	222
1	420	10,7	1,42	17,2	349	201
0,9	378	9,0	1,20	14,5	314	181
0,75	315	7,2	0,95	11,5	261	151
0,5	210	4,6	0,60	7,3	174	100
0,25	105	2,3	0,29	3,5	87	50,2
rem	31	-	-	-	26	15,0

Tab. P-4: Zatěžovací charakteristika pomocného vinutí - naměřené hodnoty

I_{pom} [A]	U_{pom_Y} [V]	U_{pom_D} [V]	P_{pom} [W]	$\cos \varphi$ [-]
1	342,0	197,5	560	0,945
2	340,0	196,3	1135	0,964
3	338,0	195,1	1716	0,977
4	336,8	194,5	2273	0,974
5	336,0	194,0	2849	0,979
6	335,2	193,5	3424	0,983
7,4	334,4	193,1	4145	0,967

Tab. P-5: Měření pomocného vinutí naprázdno při proudovém zatížení generátoru

U_h [V]	I_h [%]	U_{0pom_Y} [V]	U_{0pom_D} [V]
420	0	349	201,5
420	50	349	201,5
420	100	348	200,9
420	150	350	202,1

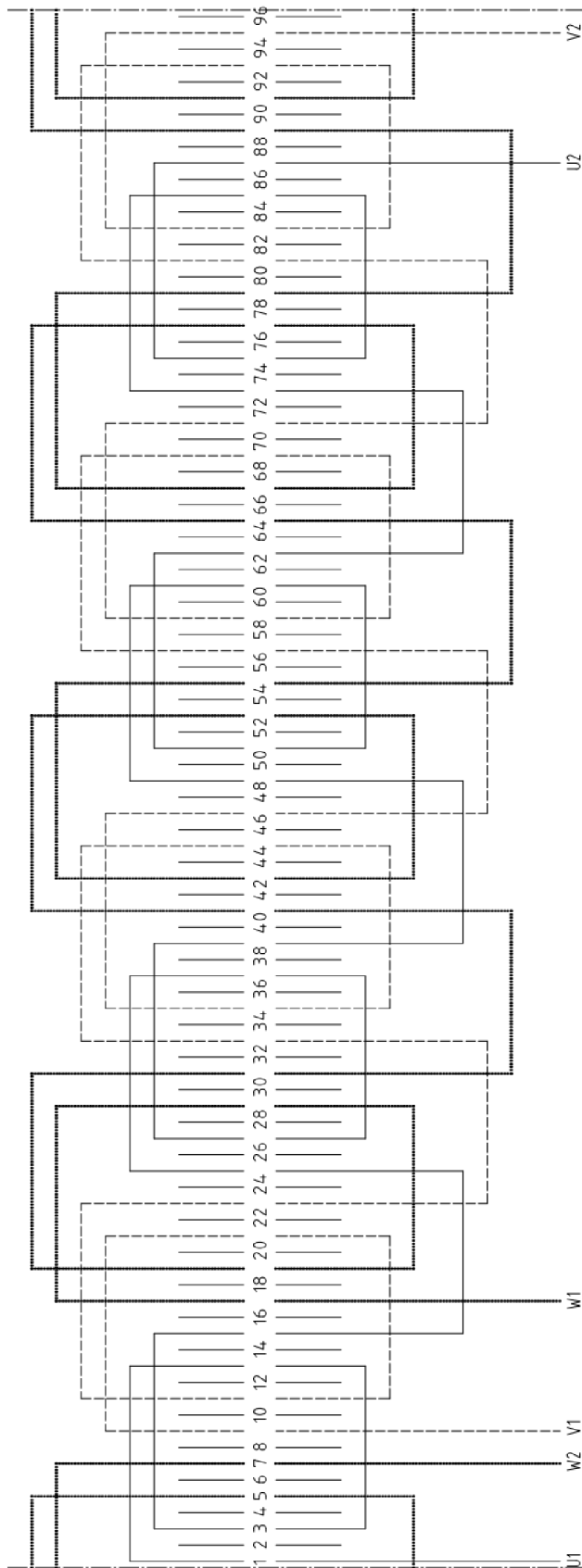
P3 Magnetizační charakteristiky plechů pro elektrotechniku
Tab. P-6: Magnetizační charakteristika plechů M400-50A, pro zuby střídavých strojů

B [T]	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	H [A . mm ⁻¹]									
0,5	0,053	0,0541	0,0552	0,0563	0,0574	0,0585	0,0596	0,0607	0,0618	0,0629
0,6	0,064	0,0650	0,0660	0,0670	0,0680	0,0690	0,0700	0,0710	0,0720	0,0730
0,7	0,074	0,0751	0,0762	0,0773	0,0784	0,0795	0,0806	0,0817	0,0828	0,0839
0,8	0,085	0,0866	0,0882	0,0898	0,0914	0,0930	0,0946	0,0962	0,0978	0,0994
0,9	0,101	0,1032	0,1054	0,1076	0,1098	0,1120	0,1142	0,1164	0,1186	0,1208
1,0	0,123	0,1263	0,1296	0,1329	0,1362	0,1395	0,1428	0,1461	0,1494	0,1527
1,1	0,156	0,1618	0,1676	0,1734	0,1792	0,1850	0,1908	0,1966	0,2024	0,2082
1,2	0,214	0,2256	0,2372	0,2488	0,2604	0,2720	0,2836	0,2952	0,3068	0,3184
1,3	0,330	0,3562	0,3824	0,4086	0,4348	0,4610	0,4872	0,5134	0,5396	0,5658
1,4	0,592	0,6578	0,7536	0,7894	0,8552	0,9210	0,9868	1,053	1,1184	1,1842
1,5	1,25	1,390	1,530	1,670	1,810	1,950	2,090	2,230	2,370	2,510
1,6	2,65	2,908	3,166	3,424	3,682	3,940	4,198	4,456	4,714	4,972
1,7	5,23	5,636	6,042	6,448	6,854	7,260	7,666	8,072	8,478	8,884
1,8	9,29	10,07	10,85	11,63	12,41	13,20	13,98	14,76	15,54	16,32
1,9	17,1	18,20	19,30	20,40	21,50	22,60	23,70	24,80	25,90	27,00
2,0	28,1	29,79	31,48	33,17	34,86	36,55	38,24	39,93	41,62	43,31
2,1	45,0	47,25	49,50	51,75	54,00	56,25	58,50	60,75	63,00	65,25
2,2	67,5	70,45	73,40	76,35	79,30	82,25	85,20	88,15	91,10	94,05
2,3	97,0	103,3	109,6	115,9	122,2	128,5	134,8	141,1	147,4	153,7
2,4	160	166,3	172,6	178,9	185,2	191,5	197,8	204,1	210,4	216,7

Tab. P-7: Magnetizační charakteristika plechů M400-50A, pro jha střídavých strojů

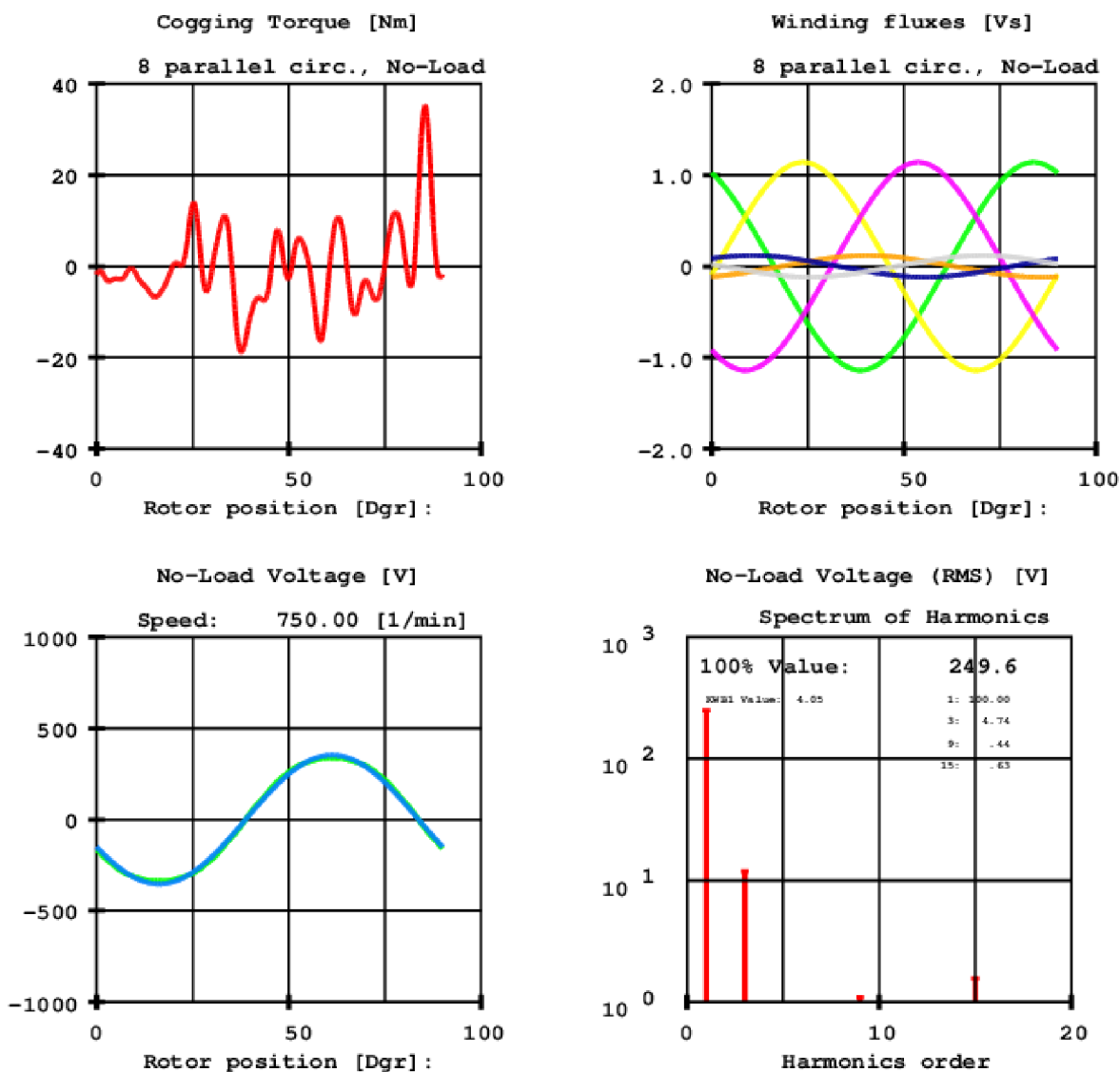
B [T]	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	H [A . mm ⁻¹]									
0,5	0,034	0,0347	0,0354	0,0361	0,0368	0,0375	0,0382	0,0389	0,0396	0,0403
0,6	0,041	0,0416	0,0422	0,0428	0,0434	0,0440	0,0446	0,0452	0,0458	0,0464
0,7	0,047	0,0477	0,0484	0,0491	0,0498	0,0505	0,0512	0,0519	0,0526	0,0533
0,8	0,054	0,0548	0,0556	0,0564	0,0572	0,0580	0,0588	0,0596	0,0604	0,0612
0,9	0,062	0,0630	0,0640	0,0650	0,0660	0,0670	0,0680	0,0690	0,0700	0,0710
1,0	0,072	0,0733	0,0746	0,0759	0,0772	0,0785	0,0798	0,0811	0,0824	0,0837
1,1	0,085	0,0869	0,0888	0,0907	0,0926	0,0945	0,0964	0,0983	0,1002	0,1021
1,2	0,104	0,1073	0,1106	0,1139	0,1172	0,1205	0,1238	0,1271	0,1304	0,1337
1,3	0,137	0,1436	0,1502	0,1568	0,1634	0,170	0,1766	0,1832	0,1898	0,1964
1,4	0,203	0,2182	0,2334	0,2486	0,2638	0,279	0,2942	0,3094	0,3246	0,3398
1,5	0,355	0,387	0,420	0,452	0,485	0,517	0,550	0,582	0,615	0,647
1,6	0,680	0,742	0,803	0,865	0,927	0,988	1,050	1,112	1,174	1,235
1,7	1,297	1,400	1,504	1,607	1,710	1,813	1,917	2,020	2,123	2,227
1,8	2,330	2,514	2,698	2,882	3,066	3,249	3,433	3,617	3,801	3,985
1,9	4,169	4,453	4,736	5,020	5,304	5,587	5,871	6,155	6,439	6,722
2,0	7,006	7,435	7,864	8,292	8,720	9,150	9,579	10,01	10,44	10,87
2,1	11,29	11,91	12,52	13,13	13,75	14,36	14,97	15,59	16,20	16,81
2,2	17,43	18,25	19,07	19,89	20,71	21,53	22,35	23,18	24,00	24,82
2,3	25,64	27,03	28,43	29,82	31,22	32,61	34,01	35,40	36,80	38,19
2,4	39,59	41,00	42,39	43,79	45,18	46,58	47,97	49,37	50,76	52,16

P4 Zapojení cívek pomocného vinutí



Obr. P-1 Rozvinuté schéma zapojení pomocného vinutí ve statoru

P5 Příklad grafického zobrazení výsledků z Femagu



Skew-angle: 3.75 [Dgr]; Skew-steps: *** ;Length: 914 [mm]
 20:02:2014/12: 4 .GSH450L8

Obr. P-2 Příklad grafického výstupu výsledků výpočtů naprázdno v programu FEMAG