

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Stavba demonstračního soustrojí

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2017/2018

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

Jméno a příjmení: **Bc. Zdeněk FRANK**
Osobní číslo: **E16N0051P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Průmyslová elektronika a elektromechanika**
Název tématu: **Stavba demonstračního soustrojí**
Zadávající katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

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

1. Sestavte demonstrační soustrojí tvořené dvěma synchronními stroji.
2. Proveďte návrh buzení tohoto soustrojí a výpočet charakteristik strojů v soustrojí.
3. Ověřte měření analytické výpočty.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah kvalifikační práce: 40 - 60 stran

Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

1. CIGÁNEK, L.: Stavba elektrických strojů SNTL, Praha, 1958.
2. PETROV, G. N.: Elektrické stroje 2. ACADEMIA, Praha, 1982.
3. BARTOŠ, V.: Teorie elektrických strojů ZČU, Plzeň, 2006. ISBN 80-7043-509-7

Vedoucí diplomové práce: Ing. Karel Hruška, Ph.D.


Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

Datum zadání diplomové práce: 10. října 2017

Termín odevzdání diplomové práce: 24. května 2018


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




Prof. Ing. Václav Kús, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 10. října 2017

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá návrhem a stavbou demonstračního soustrojí tvořeného dvěma synchronními stroji. Součástí práce je elektromagnetický návrh, konstrukční řešení celého stroje a jednotlivých součástí. Cílem této práce je zhotovit funkční soustrojí vhodné pro výukové účely.

Klíčová slova

Synchronní soustrojí, synchronní stroj, elektromagnetický návrh, konstrukční řešení.

Abstract

This master thesis focuses on design and construction of a demonstrational electrical engine machinery consisting of two synchronous electrical machines. The thesis also includes an electromagnetic design, constructional solution of the whole machinery and its individual parts. The purpose of this thesis is to create a functional synchronous machine machinery appropriate for educational purposes.

Klíčová slova

Electrical engine machinery, synchronous machine, electromagnetical design, constructional solution.

Prohlášení

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

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

.....

podpis

V Plzni dne 24. 3. 2018

Zdeněk Frank

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu práce, panu Doc. Ing. Karlovi Hruškovi, Ph.D. a kolektivu KEV, za cenné rady, trpělivost a čas, který mi věnovali při konzultacích. Dále bych rád poděkoval Ing. Jindřichu Vaňkovi, Zbyňkovi Brůhovi a Janu Panskému za poskytnutí materiálu na stavbu synchronních strojů. A v neposlední řadě rodině a spolužákům, zejména Bc. Michalu Černochovi, Bc. Radku Čermákovi a nevyjímaje zbytku oboru PE. Děkuji

Obsah

Obsah	8
Seznam symbolů a zkratk	9
Úvod	12
1. Koncept	13
1.1. Požadavky na synchronní soustrojí.....	13
1.2. Uspořádání soustrojí	14
1.3. Stator.....	15
1.4. Rotor	16
1.5. Ložiskové stojany a budící kartáče:.....	17
2. Elektromagnetický návrh synchronního stroje	18
2.1. Výchozí parametry pro elektromagnetický výpočet	18
2.2. Rozměry statoru	19
2.3. Rozměry statorové drážky:	19
2.4. Měření magnetizační charakteristiky statorových plechů	20
2.5. Návrh topologie vinutí statoru	22
2.6. Určení základních parametrů statoru	25
2.7. Návrh magnetického obvodu	27
2.8. Návrh tlumiče	32
2.9. Určení parametrů náhradního schématu	33
2.10. Náhradní schéma, fázorový diagram a návrh buzení	36
2.11. Návrh buzení	38
2.12. Výkonová a momentová charakteristika stroje	40
2.13. Stanovení ztrát a účinnosti	41
3. Měření	43
3.1. Měření odporů vinutí	43
3.2. Měření naprázdno a nakrátko.....	44
3.3. Zatěžovací zkouška.....	47
4. Závěr	49
Seznam literatury a informačních zdrojů:	51
Seznam příloh:	52

Seznam symbolů a zkratek

Symbol	Název veličiny	Jednotka
$2p$	Počet pólů	-
a	Počet paralelních větví střídavého vinutí	-
A	Obvodová proudová hustota	A/m
B_{jm}	Magnetická indukce ve jhu při měření	T
B_{jr}	Magnetické indukce jha rotoru	T
B_{js}	Magnetické indukce jha statoru	T
B_p	Magnetické indukce pólu	T
B_z	Magnetické indukce zubu	T
B_δ	Magnetická indukce ve vzduchové mezeře	T
b	Šířka	m
b_c	Střední šířka cívky	m
b_n	Šířka pólového nástavce	m
b_z	Šířka statorového zubu	m
C	Essonův činitel	VA/m ³ min
$\cos \varphi$	Účinitel	-
D_1	Vnitřní průměr statoru	m
D_2	Vnější průměr statoru	m
d_t	Průměr tyče tlumiče	m
d_v	Průměr vodiče	m
f	Frekvence	Hz
F_a	Magnetické napětí reakce kotvy	A
F_b	Budící magnetické napětí	A
F_o	Magnetické napětí naprázdno	A
H	Intenzita magnetického pole	A/m
h	Výška	m
h_d	Výška statorové drážky	m
h_{js}	Výška jha statoru	m
I_1	Fázový proud	A
I_b	Proud budící cívky	A
I_d	Proud drážkou	A
I_{k1g}	Proud generátoru nakrátko	A
K	Počet cívek	-
K_1	Počet cívek ve skupině	-
k_c	Carterův činitel	-
k_{Fe}	Činitel plnění plechů	-
k_e	Činitel elektromotorické síly	-
k_v	Činitel vinutí	-
k_w	Činitel plnění drážky	-
l_ξ	Délka čela	m
l_{ef}	Efektivní délka stroje	m
l_{jr}	Střední délka siločáry jha rotoru	m
l_{js}	Střední délka siločáry jha statoru	m
$l_{js_stř}$	Střední délka siločáry statoru	m
l_p	Střední délka siločáry pólu	m

l_s	Délka statorových plechů	m
l_z	Délka siločáry v zubu	m
l_{z1}	Střední délka závitů statorového vinutí	m
l_{zb}	Střední délka budící cívky	m
m	Počet fází	-
m'	Matematický počet fází	-
m_{js}	Hmotnost jha statoru	kg
m_z	Hmotnost zubů	kg
N_c	Počet závitů jedné cívky	-
N_m	Počet závitů měřicí cívky	-
n_s	Synchronní rychlost	ot/min
N_s	Počet závitů jedné fáze v sérii	-
p	Počet pólpárů	-
P	Činný výkon	W
q	Počet drážek na pól a fázi	-
Q	Počet drážek	-
Q_p	Počet drážek na pól	-
Q_{tn}	Počet tyčí tlumiče v pólovém nastavci	-
R_1	Elektrický odpor statorového vinutí	Ω
R_{1g}	Střední poloměr Görgesova obrazce	p.u.
R_{1h}	Poloměr Görgesovy kružnice	p.u.
R_b	Elektrický odpor budícího vinutí	Ω
R_m	Odpor měřicí cívky	Ω
S	Zdánlivý výkon	VA
S'_{cu1}	Předběžný průřez vodiče	m^2
S_b	Plocha pro uložení vinutí	m^2
S_c	Počet skupin cívek vinutí	-
S_{Cu}	Efektivní průřez vodiče	m^2
S_d	Obsah statorové drážky	m^2
S_f	Počet skupin cívek v jedné fázi	-
S_i	Výkon ve vzduchové mezeře	VA
S_j	Obsah jha	m^2
S_k	Průřez kruhu	m^2
S_t	Průřez tyče tlumiče	m^2
S_{v_ef}	Obsah mědi v drážce	m^2
t'_t	Rozteč tyčí tlumiče	m
t_{d1}	Drážková rozteč	m
t_p	Pólová rozteč	m
U	Sdružené napětí	V
U_0	Napětí naprázdno	V
U_b	Budící napětí	V
U_f	Fázové napětí	V
U_{fe}	Úbytek magnetického napětí v magnetickém obvodu	A
U_i	Indukované napětí	V
U_m	Magnetické napětí	A
U_{mjs}	Magnetické napětí ve jhu statoru	A
U_{mp}	Magnetické napětí pólu	A
U_{mz}	Magnetické napětí zubu	A
$U_{m\delta}$	Magnetické napětí ve vzduchové mezeře	A

X_{μ}	Magnetizační reaktance	Ω
X_{ad}	Podélná reaktance kotvy	Ω
X_{aq}	Příčná reaktance kotvy	Ω
$X_{a\sigma}$	Rozptylová reaktance kotvy	Ω
X_d	Podélná reaktance kotvy	Ω
X_q	Příčná reaktance kotvy	Ω
X_{dn}	Nenasycená synchronní reaktance	Ω
X_{dnas}	Nasycená synchronní reaktance	Ω
y_{1d}	Cívkový krok v počtu drážek	-
Z_{dn}	Nenasycená synchronní impedance	Ω
Z_{dnas}	Nasycená synchronní impedance:	Ω
α	Činitel pólového krytí	-
β	Poměrné zkrácení kroku	-
δ	Velikost vzduchové mezery	m
δ_{max}	Maximální vzduchová mezera	m
δ_p	Průměrná vzduchová mezera	m
ΔP	Celkové ztráty	W
ΔP_{Cu}	Jouleovy ztráty ve vinutí	W
ΔP_{Fe}	Celkové ztráty v železe	W
ΔP_m	Mechanické a ventilační ztráty	W
ΔP_p	Povrchové ztráty	W
$\Delta P_{př}$	Přídavné ztráty	W
η	Účinnost	-
η'	Předpokládaná účinnost	-
λ_c	Činitel poměrné magnetické vodivosti čel	-
λ_{dh}	Činitel poměrné magnetické vodivosti drážky	-
μ	Permeabilita	H/m
μ_m	Relativní permeabilita	-
σ_{cu}	Proudová hustota ve vodiči	A/mm ²
σ_v	Rozptyl měřicí cívky	
τ_{dif}	Diferenční rozptyl	-
Φ	Magnetický indukční tok	Wb
ω	Úhlová rychlost	rad/s

Úvod

Cílem této diplomové práce je navrhnout a zkonstruovat soustrojí vhodné pro výukové účely. Soustrojí bude tvořeno dvěma stejnými synchronními stroji s vyniklými póly. Práce zahrnuje návrh jednotlivých dílů soustrojí, výroby komponentů, kompletní montáž a uvedení soustrojí do chodu. Po ověření chodu soustrojí budou změřeny parametry náhradního schématu a charakteristiky stroje.

Synchronní stroj s vyniklými póly je používán jako jeden z nečastějších generátorů elektrické energie u vodních elektráren. Demonstrační soustrojí má za úkol pomoci studentům pochopit základní problematiku principů a konstrukce synchronních strojů.

1. Koncept

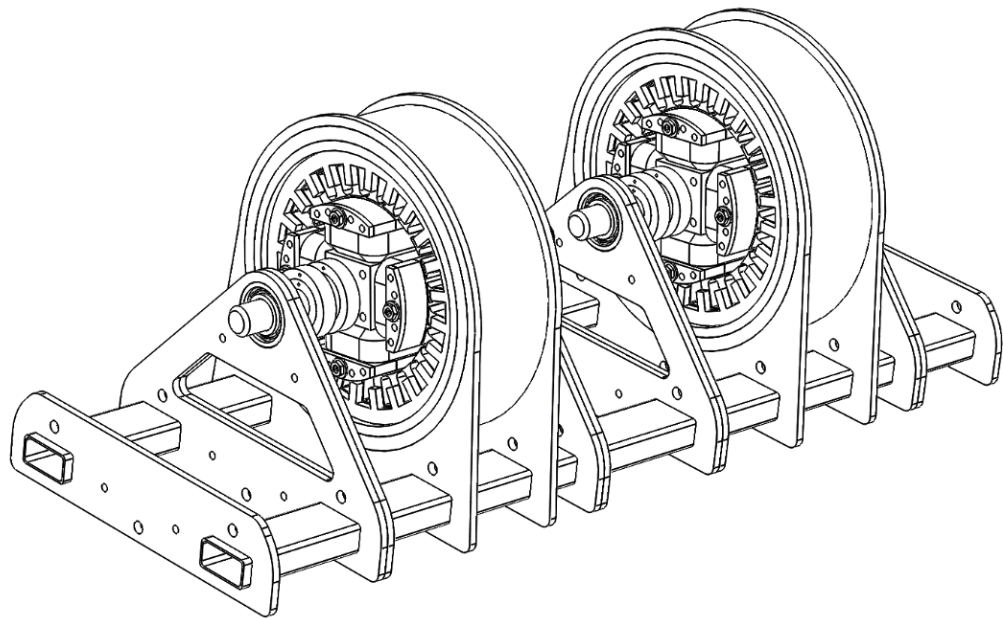
Na začátku návrhu bylo nutné stanovit řešení, jakým se bude postupovat při návrhu a konstrukci synchronního soustrojí. V první řadě bylo nutné určit požadavky a priority na soustrojí. Těmito požadavky byla ovlivněna většina konstrukčních řešení. Po stanovení konstrukčních řešení jsme provedli elektromagnetický návrh stroje. Poté byl vytvořen model celého soustrojí a vytvořena dokumentace pro výrobu jednotlivých dílů. Soustrojí bylo sestaveno a ve zkušebním provozu byly změřeny základní charakteristiky.

1.1. Požadavky na synchronní soustrojí

- **Proveditelnost** - Soustrojí musí být možné realizovat dostupnými prostředky.
- **Vhodné pro výukové účely** - Názornost, jednoduchost a robustnost.
- **Mobilita** - Možnost snadno soustrojí přemístit.
- **Cenová dostupnost** - Omezený rozpočet.
- **Variabilita** - Snadná rozložitelnost celého soustrojí.

1.2. Uspořádání soustrojí

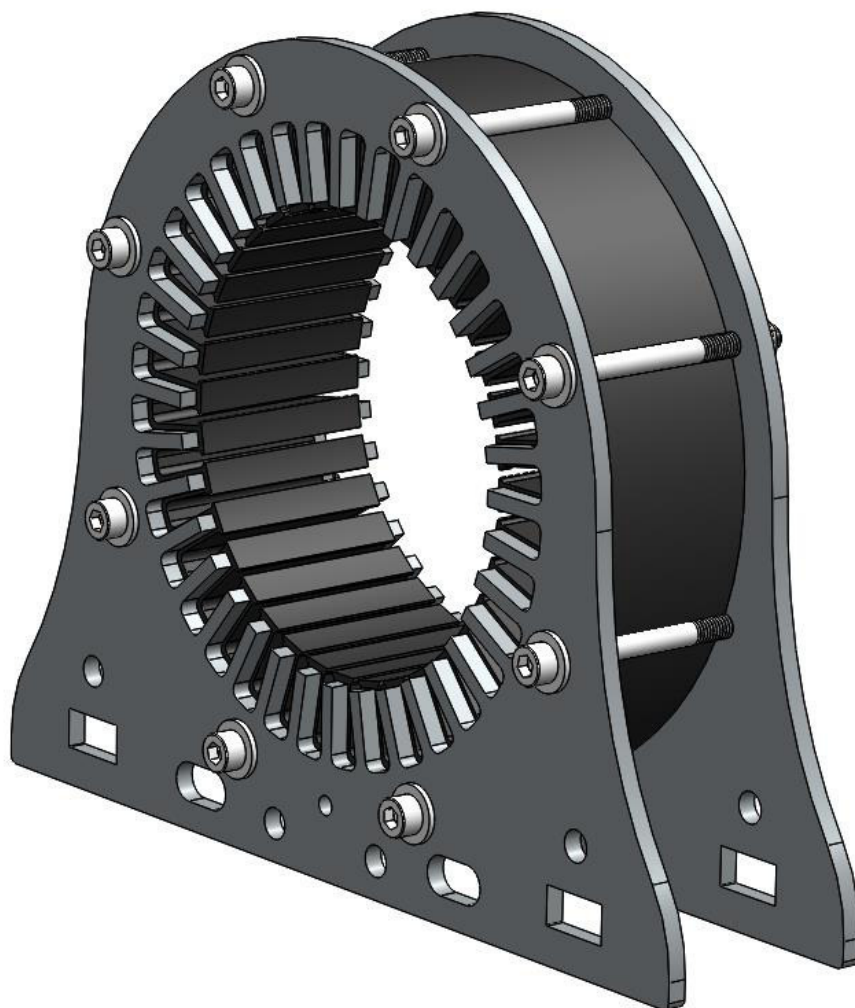
Soustrojí je složeno ze dvou totožných synchronních strojů s vyniklými póly. Na rotoru je umístěno budící vinutí, které je napájeno za pomoci kluzných uhlíkových kontaktů. Hřídele jsou uloženy ve valivých ložiskách, která nesou ložiskové stojany. Oba stroje jsou uloženy na nosných pravítkách a zajištěny pomocí závitových tyčí. Všechny tyto součásti tvoří samonosný celek, viz obrázek obr. 1.1.



Obr. 1.1: Uspořádání synchronního soustrojí

1.3. Stator

Stator je tvořen statorovým paketem staženým stahovacími nemagnetickými lamelami viz obr.1.2. Nejdříve měly být statorové plechy vypáleny za pomoci laseru, ale tato varianta byla pro svou finanční náročnost nevyhovující. Proto bylo přistoupeno k rozebrání staršího asynchronního motoru, ze kterého byl demontován statorový paket. Ze statorového paketu bylo následně vyjmuto stávající vinutí. Vyčištěný paket byl rozdělen na dvě stejné části. Po změření jednotlivých rozměrů a magnetizační charakteristiky plechů bylo navrženo a uloženo do drážek nové vinutí pro synchronní stroj.



Obr. 1.2: Nákres návrhu statoru

1.4. Rotor

Magnetický obvod rotoru byl složen ze 3 mm plechů a stažen za pomoci šroubů s dalšími částmi rotoru. Pomocí nosných kamenů je připevněn rotorový paket k hřídeli. Kameny a hřídel mají vyfrézované zámky, které do sebe přesně zapadají. Toto spojení umožňuje přenos točivého momentu. Na hřídel byly nalisovány vysoustružené silonové prstence, na nichž jsou umístěny měděné kroužky, které umožňují přenos budícího proudu. Budící vinutí bylo ručně navinuto a odizolováno elektrotechnickou lepenkou od kovových částí rotoru. V pólovém nástavci jsou uloženy měděné tyče tvořící tlumič, které jsou na konci sletovány s měděným páskem kopírujícím tvar pólového nástavce obr.1.3.



Obr. 1.3: *Nákres návrhu synchronního rotoru*

1.5. Ložiskové stojany a budící kartáče:

Ložiskové stojany jsou jedny z důležitých nosných prvků pro vymezení dílčích částí stroje. Ve stojanech bylo vytvořeno uložení pro silonová pouzdra, ve kterých byla nalisována ložiska viz obr.1.4. Tato pouzdra slouží k odizolování případných ložiskových proudů, které by mohly vzniknout případnou nesymetrií magnetického obvodu a vést k poškození ložisek. Dále byly do ložiskových stojanů vypáleny konstrukční otvory, zejména pro připevnění pouzder budících kartáčů. Pouzdra s kartáči byla demontována ze staršího stejnosměrného stroje. Pokud **ne**budou v průběhu provozu **ne**vyhovovat, budou navržena a vytisknuta nová na 3D tiskárně.



Obr. 1.4: *Nákres ložiskových stojanů s hřídelí*

2. Elektromagnetický návrh synchronního stroje

2.1. Výchozí parametry pro elektromagnetický výpočet

Tyto uvedené hodnoty byly použity pro návrh motoru:

Sdružené napětí	$U = 400 \text{ V}$	(2.1)
Frekvence	$f = 50 \text{ Hz}$	(2.2)
Účinník	$\cos \varphi = 0,95$	(2.3)
Počet fází:	$m = 3$	(2.4)
Počet pólparů	$p = 3$	(2.5)
Počet drážek	$Q = 36$	(2.6)
Mag. indukce ve vzduchové mezeře	$B_{\delta} = 0,5$	(2.7)
Obvodová proudová hustota	$A = 20\,000 \text{ A/m}$	(2.8)
Činitel elektromotorické síly	$k_e = 0,9$	(2.9)
Předpokládaná účinnost	$\eta' = 0,8$	(2.10)
Vnitřní průměr statoru	$D_1 = 0,116 \text{ m}$	(2.11)
Vnější průměr statoru	$D_2 = 0,180 \text{ m}$	(2.12)
Délka statorových plechů	$l_s = 0,048 \text{ m}$	(2.13)
Šířka statorového zubu	$b_z = 0,0064 \text{ m}$	(2.14)
Velikost vzduchové mezery	$\delta = 1 \text{ mm}$	(2.15)
Činitel plnění statorových plechů	$k_{Fe} = 0,95$	(2.16)
Činitel pólového krytí	$\alpha = 0,63$	(2.17)

2.2. Rozměry statoru

Efektivní délka statoru:

$$l_{ef} = k_{Fe} \cdot l_s = 0,95 \cdot 0,048 = 0,046 \text{ mm} \quad (2.18)$$

Pólová rozteč:

$$t_p = \frac{\pi \cdot D_1}{2p} = \frac{\pi \cdot 116}{6} = 60,7 \text{ mm} \quad (2.19)$$

Drážková rozteč:

$$t_{d1} = \frac{\pi \cdot D_1}{Q} = \frac{\pi \cdot 116}{36} = 10,12 \text{ mm} \quad (2.20)$$

Výška jha statoru:

$$h_{js} = \frac{D_2 - D_1 - 2 \cdot h_d}{2} = \frac{180 - 116 - 2 \cdot 20}{2} = 12 \text{ mm} \quad (2.21)$$

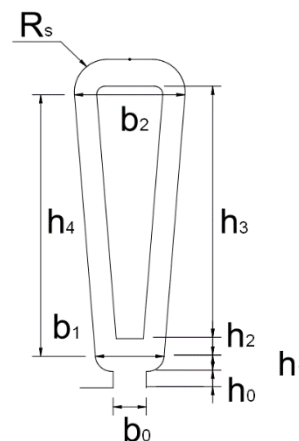
Šířka zubu:

$$b_z = 6,4 \text{ mm} \quad (2.22)$$

2.3. Rozměry statorové drážky:

b ₀ [mm]	2
b ₁ [mm]	4
b ₂ [mm]	7
h ₀ [mm]	1
h ₁ [mm]	1
h ₂ [mm]	2
h ₃ [mm]	15
h ₄ [mm]	16
R _s [mm]	2
S _d [mm ²]	100

Tab. 2.1: Rozměry drážky



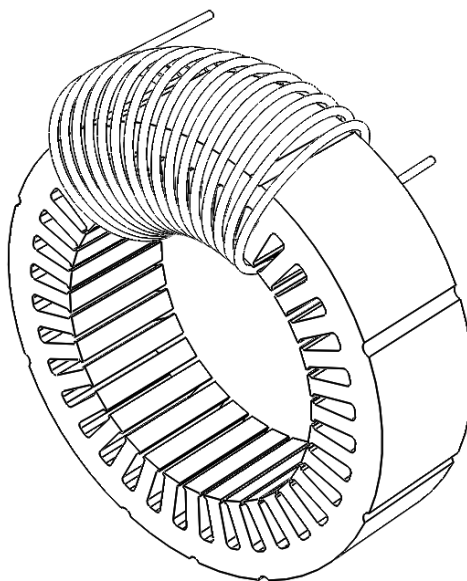
Obr. 2.1: Nákres statorové drážky

Výška drážky:

$$h_d = h_0 + h_1 + h_4 + R_s = 1 + 1 + 16 + 2 = 20 \text{ mm} \quad (2.23)$$

2.4. Měření magnetizační charakteristiky statorových plechů

Pro návrh magnetického obvodu bylo nutné určit magnetizační charakteristiku statorových plechů. Pro její změření byla na statorový paket navinuta cívka viz obr.2.2 a změřena voltampérová charakteristika, ze které byla vypočtena hodnota magnetické indukce a intenzita magnetického pole. Při výpočtu jsme uvažovali odpor, rozptyl vinutí a magnetický tok, procházející pouze jhem statoru.



Obr. 2.2: Ilustrační obrázek měření magnetizační charakteristiky statorových plechů

f [Hz]	50
R _m [Ω]	0,107
N _m [-]	73
σ _v [-]	0,95
h _{js} [m]	0,012

Tab. 2.2: Parametry měření

Délka střední siločáry statoru:

$$l_{js_stř} = \pi \cdot (D_2 - h_{js}) = \pi \cdot (0,180 - 0,012) = 0,527 \text{ m} \quad (2.24)$$

Obsah jha:

$$S_j = l_{ef} \cdot h_j = 0,046 \cdot 0,012 = 0,552 \text{ mm}^2 \quad (2.25)$$

Indukované napětí za předpokladu 5% rozptylu magnetického pole a naměřené hodnoty pro $U_m = 11$ V:

$$U_{im_{11}} = (U_m - R_m \cdot I_m) \cdot \sigma = (11 - 0,107 \cdot 2,2) \cdot 0,95 = 10,20 \text{ V} \quad (2.26)$$

Intenzita magnetického pole:

$$H_{11} = \frac{\sqrt{2} \cdot N_m \cdot I_m}{l_{js_stř}} = \frac{\sqrt{2} \cdot 73 \cdot 2,20}{0,527} = 430 \text{ A/m} \quad (2.27)$$

Magnetická indukce ve jhu:

$$B_{jm_{11}} = \frac{\sqrt{2} \cdot U_{im}}{2 \cdot \pi \cdot N_m \cdot S_j \cdot f} = \frac{\sqrt{2} \cdot 10,20}{2 \cdot \pi \cdot 73 \cdot 0,552 \cdot 10^{-3} \cdot 50} = 1,14 \text{ T} \quad (2.28)$$

Permeabilita:

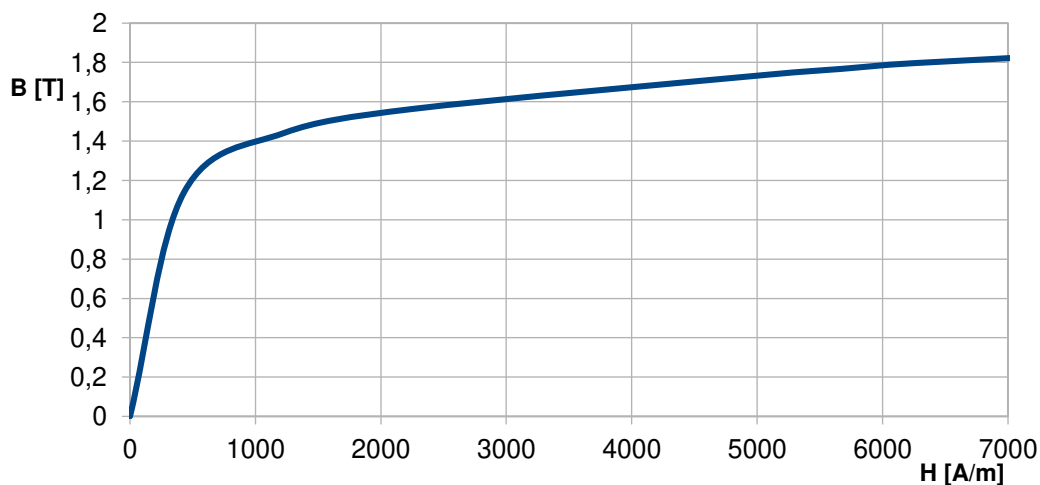
$$\mu_{11} = \frac{B}{H} = \frac{1,14}{430} = 2,65 \cdot 10^{-3} \text{ H/m} \quad (2.29)$$

Relativní permeabilita:

$$\mu_{r_{11}} = \frac{\mu}{\mu_0} = \frac{2,65 \cdot 10^{-3}}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}} = 2107 \quad (2.30)$$

U_m [V]	I_m [A]	U_{im} [V]	H [A/m]	B_{jm} [T]	μ_m [H/m]	μ_{rm} [-]
11,00	2,20	10,20	430	1,14	2,65E-03	2107
14,30	6,30	12,91	1232	1,44	1,17E-03	931
16,00	11,50	13,99	2249	1,56	6,95E-04	553
19,20	26,00	15,56	5086	1,74	3,42E-04	272
19,80	29,00	15,82	5673	1,77	3,12E-04	248
20,40	32,00	16,09	6259	1,80	2,87E-04	228
22,50	44,50	16,81	8704	1,88	2,16E-04	172

Tab. 2.3: Naměřené a spočtené hodnoty



Obř. 2.3: Magnetizační charakteristika statorových plechů

2.5. Návrh topologie vinutí statoru

Typ statorového vinutí jsme zvolili jednovrstvé ($2u = 1$), smyčkové. Pro další výpočty bylo nutné určit počet drážek na pól a fázi q .

Počet drážek na pól a fázi:

$$q = \frac{Q}{2p \cdot m} = \frac{n}{c} = \frac{36}{6 \cdot 3} = \frac{2}{1} \quad (2.31)$$

Počet paralelních větví střídavého vinutí:

$$a = p = 3 \quad (2.32)$$

Počet drážek na pól a fázi musí splňovat tyto podmínky:

- Jmenovatel c nesmí být násobkem počtu fází m (tj. 3,6,...)
- Jmenovatel c nesmí být větší než hodnota p (v tomto případě ≤ 3)
- $\frac{2p}{a \cdot c}$ je číslo celé

$$\frac{2p}{a \cdot c} = \frac{6}{3 \cdot 1} = 2 \quad (2.33)$$

- Počet drážek na fázi musí být celé číslo

$$Q_f = \frac{Q}{m} = \frac{36}{3} = 12 \quad (2.34)$$

Podmínky jsou splněny.

Počet drážek na pól:

$$Q_p = \frac{Q}{2p} = \frac{36}{6} = 6 \quad (2.35)$$

Volíme cívkový krok v počtu drážek, který musí být celé číslo:

$$y_{1d} = (0,8 \div 0,86) \cdot Q_p \quad (2.36)$$

$$y_{1d} = 5 \quad (2.37)$$

Poměrné zkrácení kroku:

$$\beta = \frac{y_{1d}}{Q_p} = \frac{5}{6} = 0,8\bar{3} \quad (2.38)$$

Přední cívkový krok v počtu cívkových stran:

$$y_1 = y_{1d} = 5 \quad (2.39)$$

Matematický počet fází:

$$m' = 2 \cdot m = 2 \cdot 3 = 6 \quad (2.40)$$

Počet skupin cívek vinutí:

$$S_c = a \cdot m' = 3 \cdot 6 = 18 \quad (2.41)$$

Počet cívkových skupin jedné fáze:

$$S_f = \frac{S_c}{m} = \frac{18}{3} = 6 \quad (2.42)$$

Počet cívek:

$$K = Q \cdot u = 36 \cdot \frac{1}{2} = 18 \quad (2.43)$$

Počet cívek ve skupině:

$$K_1 = \frac{K}{S_c} = \frac{18}{18} = 1 \quad (2.44)$$

Vzorec pro výpočet činitelů vinutí:

$$k_v = k_{y_v} \cdot k_{r_v} = \sin\left(v \cdot \beta \cdot \frac{\pi}{2}\right) \cdot \frac{\sin\left(v \cdot \frac{\pi}{m'}\right)}{n \cdot u \cdot \sin\left(v \cdot \frac{\pi}{m' \cdot n \cdot u}\right)} \quad (2.45)$$

Činitel vinutí základní harmonické:

$$k_{v1} = k_{y1} \cdot k_{r1} = \sin\left(1 \cdot \beta \cdot \frac{\pi}{2}\right) \cdot \frac{\sin\left(1 \cdot \frac{\pi}{m'}\right)}{n \cdot u \cdot \sin\left(1 \cdot \frac{\pi}{m' \cdot n \cdot u}\right)} \quad (2.46)$$

$$k_{v1} = \sin\left(1 \cdot 0,8\bar{3} \cdot \frac{\pi}{2}\right) \cdot \frac{\sin\left(1 \cdot \frac{\pi}{6}\right)}{2 \cdot \frac{1}{2} \cdot \sin\left(1 \cdot \frac{\pi}{6 \cdot 2 \cdot \frac{1}{2}}\right)} = 0.966$$

Činitelé vinutí vyšších harmonických:

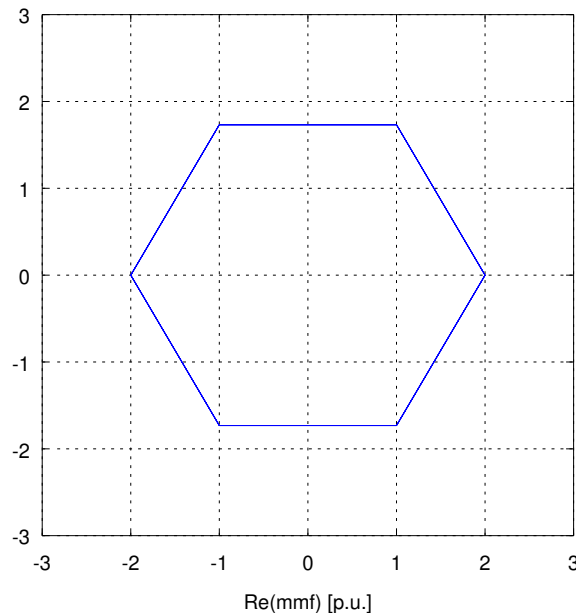
$$k_{v3} = 0.707 \quad (2.47)$$

$$k_{v5} = 0.259 \quad (2.48)$$

$$k_{v7} = -0.259 \quad (2.49)$$

Obsah vyšších harmonických v magnetickém poli vzduchové mezery je charakterizován diferenčním rozptylem. Ten lze určit za pomoci Görgesova obrazce. Přesný postup k určení je popsán v [2].

Goerges' Pattern of Winding's Magnetomotive Force in t=0 Degrees



Obr. 2.4: Görgesův diagram

Poloměr Görgesovy kružnice:

$$R_{1h} = \frac{m}{\pi} \cdot q \cdot k_v = \frac{3}{\pi} \cdot \frac{2}{1} \cdot 0,966 = 1,84 \text{ p.u.} \quad (2.50)$$

Střední poloměr Görgesova obrazce:

$$R_{1g} = \frac{1}{f} \cdot \sum_f r_i = \frac{1}{18} \cdot (18 \cdot 2) = 2 \text{ p.u.} \quad (2.51)$$

Diferenční rozptyl:

$$\tau_{dif} = \frac{R_{1g}^2 - R_{1h}^2}{R_{1h}^2} = \frac{2^2 - 1,84^2}{1,84^2} = 0,176 \quad (2.52)$$

2.6. Určení základních parametrů statoru

Synchronní rychlost:

$$n_s = \frac{60 \cdot f}{p} = \frac{60 \cdot 50}{3} = 1000 \text{ ot / min} \quad (2.53)$$

Essonův činitel:

$$C = \frac{\pi^2}{60 \cdot \sqrt{2}} \cdot A \cdot B_\delta \cdot k_{v1} \quad (2.54)$$

$$C = \frac{\pi^2}{60 \cdot \sqrt{2}} \cdot 20000 \cdot 0,5 \cdot 0,966 = 1112 \text{ VA / m}^3 \text{ min}$$

Výkon ve vzduchové mezeře:

$$S_i = C \cdot D_1^2 \cdot n \cdot l_s = 1112 \cdot 0,116^2 \cdot 1000 \cdot 0,048 = 682 \text{ VA} \quad (2.55)$$

Zdánlivý výkon:

$$S = \frac{S_i}{k_e} = \frac{682}{0,9} = 758 \text{ VA} \quad (2.56)$$

Činný výkon:

$$P = S \cdot \cos \varphi \cdot \eta' = 758 \cdot 0,9 \cdot 0,75 = 576 \text{ W} \quad (2.57)$$

Fázové napětí:

$$U_f = \frac{U}{\sqrt{3}} = \frac{400}{\sqrt{3}} = 230,9 \text{ V} \quad (2.58)$$

Fázový proud:

$$I_1 = \frac{S}{U_s \sqrt{3}} = \frac{758}{400 \cdot \sqrt{3}} = 1,09 \text{ A} \quad (2.59)$$

Proud drážkou:

$$I_d = \frac{\pi \cdot D_1 \cdot A}{Q} = \frac{\pi \cdot 0,116 \cdot 20000}{36} = 202 \text{ A} \quad (2.60)$$

Počet závitů jedné cívky:

$$N_c = \frac{I_d}{I_1} = \frac{202}{1,09} = 185,3 \Rightarrow 185 \quad (2.61)$$

Počet závitů jedné fáze v sérii pro sériové zapojení cívek vinutí:

$$N_s = N_c \cdot S_f = 185 \cdot 6 = 1110 \quad (2.62)$$

Předběžný průřez vodiče:

$$S'_{Cu1} = \frac{I_1}{\sigma'_{Cu1}} = \frac{1,09}{5} = 0,21 \text{ mm}^2 \quad (2.63)$$

Předběžně jsme zvolili proudovou hustotu $\sigma'_{Cu1} = 5 \text{ A/mm}^2$. Následně dopočteme průměr vodiče, který jsme zvolili dle normalizované řady.

Průměr vodiče:

$$d_v = 2 \cdot \sqrt{\frac{S_{Cu}}{\pi}} = 2 \cdot \sqrt{\frac{0,21}{\pi}} = 0,52 \Rightarrow 0,56 \text{ mm} \quad (2.64)$$

Efektivní průřez vodiče:

$$S_{Cu} = \frac{\pi \cdot d_v^2}{4} = \frac{\pi \cdot 0,56^2}{4} = 0,25 \text{ mm}^2 \quad (2.65)$$

Obsah mědi v drážce:

$$S_{d-ef} = S_{Cu} \cdot N_c = 0,25 \cdot 185 = 45,6 \text{ mm}^2 \quad (2.66)$$

Činitel plnění drážky:

$$k_w = \frac{S_{d-ef}}{S_d} = \frac{45,6}{100} = 0,456 \quad (2.67)$$

Skutečná proudová hustota ve vodiči:

$$\sigma_{Cu1} = \frac{I_1}{S_{cu}} = \frac{1,09}{0,25} = 4,36 \text{ A/mm}^2 \quad (2.68)$$

2.7. Návrh magnetického obvodu

Magnetický obvod statoru byl složen z elektromagnetických plechů. Charakteristika těchto plechů byla popsána v předchozí kapitole. Rotor je složen z ocelových plechů o tloušťce 3mm.

Magnetický indukční tok:

$$\Phi = \frac{U_f}{4,44 \cdot f \cdot N_s \cdot k_{v1}} = \frac{230,9}{4,44 \cdot 50 \cdot 1110 \cdot 0,966} = 0,872 \text{ mWb} \quad (2.69)$$

Kontrola podle rozměrů stroje:

$$\Phi = \frac{2}{\pi} \cdot t_p \cdot l_{ef} \cdot B_\delta = \frac{2}{\pi} \cdot 0,060 \cdot 0,046 \cdot 0,5 = 0,878 \text{ mWb} \quad (2.70)$$

Hodnoty jsou téměř shodné. Dále budeme používat hodnotu magnetického toku $\Phi = 0,872 \text{ mWb}$

Volíme velikost vzduchové mezery $\delta = 1 \text{ mm}$. Tato hodnota byla zvolena s ohledem na technologické možnosti při výrobě stroje.

$$\delta = 1 \text{ mm} \quad (2.71)$$

Velikost vzduchové mezery na kraji pólu:

$$\delta_{\max} = 1,5 \cdot \delta = 1,5 \cdot 1 = 1,5 \text{ mm} \quad (2.72)$$

Průměrná vzduchová mezera:

$$\delta_p = \frac{\delta + \delta_{\max}}{2} = \frac{1 + 1,5}{2} = 1,25 \text{ mm} \quad (2.73)$$

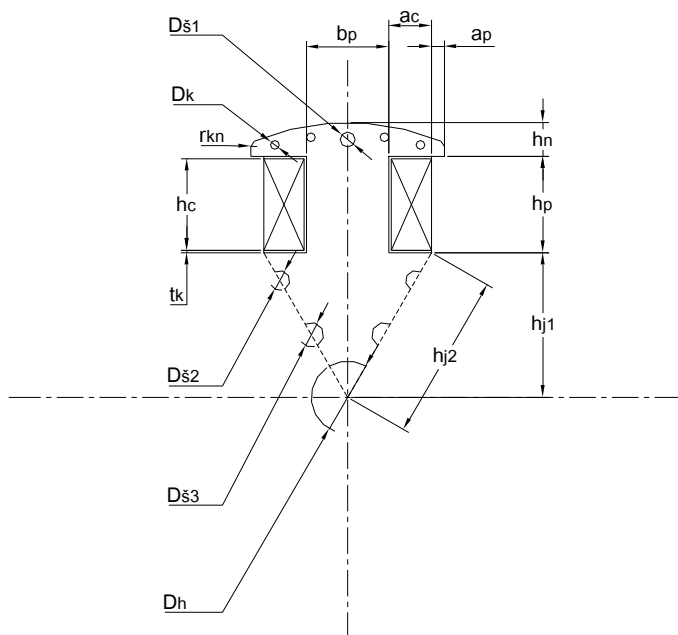
Carterův činitel:

$$k_c = \frac{t_{d1} + 10 \cdot \delta_p}{t_{d1} - b_0 + 10 \cdot \delta_p} = \frac{10,12 + 10 \cdot 1,25}{10,12 - 2 + 10 \cdot 1,25} = 1,1 \quad (2.74)$$

Elektromagnetická vzduchová mezera:

$$\delta' = k_c \cdot \delta = 1 \cdot 1,1 = 1,1 \text{ mm} \quad (2.75)$$

V dalším kroku je třeba určit rozměry rotoru a střední délky siločar, aby bylo možné stanovit magnetická napětí, indukce a magnetický odpor v jednotlivých částech magnetického obvodu.



Obr. 2.5: Částečný náčrt rotoru

Název	Označení	Hodnota [mm]
Šířka pólového nástavce	$b_n = 2(ac + a_p) + b_p$	40
Šířka těla pólu	b_p	17
Šířka uložení cívky	a_c	9
Šířka přesahu p. nástavce	a_p	2,5
Výška pólu	h_p	20
Výška pólového nástavce	h_n	7
Výška rotorového jha 1	h_{rj1}	30
Výška rotorového jha 2	h_{rj2}	34,5
Efektivní výška rot. jha	$h_{rjmin} = h_{rj2} - D_{\text{š}2} - D_{\text{š}3}$	25,3
Výška uložení cívky	h_c	19,2
Šířka izolace	t_k	0,4
Průměr hřídele	D_h	15
Průměr uložení klece	D_k	1,8
Průměr pro stah. šroub 1	$D_{\text{š}1}$	3,1
Průměr pro stah. šroub 2	$D_{\text{š}2}$	4,1
Průměr pro stah. šroub 3	$D_{\text{š}3}$	5,1
Poloměr konce p. nástavce	r_{kn}	1,2

Tab. 2.4: Rozměry rotoru

Délka střední siločáry ve jhu statoru:

$$l_{js} = \frac{l_{js-str}}{2p} = \frac{0,527}{6} = 0,088 \text{ m} \quad (2.76)$$

Délka siločáry zubu:

$$l_z = h_0 + h_1 + h_4 + R_s = 0,001 + 0,001 + 0,016 + 0,002 = 0,020 \text{ m} \quad (2.77)$$

Střední délka siločáry pólu:

$$l_p = h_p + h_n = 0,020 + 0,007 = 0,027 \text{ m} \quad (2.78)$$

Střední délka siločáry jha rotoru:

$$l_{jr} = \frac{\pi \cdot h_{j2}}{2p} = \frac{\pi \cdot 0,0345}{6} = 0,018 \text{ m} \quad (2.79)$$

Výpočet magnetického indukčního toku:

$$\Phi = \int_S B \cdot dS \quad (2.80)$$

Magnetická indukce ve jhu statoru:

$$B_{js} = \frac{\Phi}{2 \cdot S_{js}} = \frac{\Phi}{2 \cdot h_{js} \cdot l_{ef}} = \frac{0,872 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 0,012 \cdot 0,046} = 0,80 \text{ T} \quad (2.81)$$

Magnetické indukce v zubu:

$$B_z = \frac{\Phi_z}{S_z} = \frac{B_\delta \cdot t_{d1} \cdot l_{ef}}{b_z \cdot l_{ef}} = \frac{0,5 \cdot 0,01012 \cdot 0,046}{0,0064 \cdot 0,046} = 0,79 \text{ T} \quad (2.82)$$

Magnetické indukce v pólu:

$$B_p = \frac{\Phi}{S_p} = \frac{\Phi}{b_p \cdot l_s} = \frac{0,872 \cdot 10^{-3}}{0,017 \cdot 0,048} = 1,07 \text{ T} \quad (2.83)$$

Magnetické indukce ve jhu rotoru:

$$B_{jr} = \frac{\Phi}{2 \cdot S_{jr}} = \frac{\Phi}{2 \cdot h_{rj\min} \cdot l_s} = \frac{0,872 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 0,0253 \cdot 0,048} = 0,36 \text{ T} \quad (2.84)$$

Výpočet magnetického napětí:

$$U_m = H \cdot l \quad (2.85)$$

Pro stanovení magnetického napětí je nutné určit intenzity magnetického pole. Tyto intenzity byly odečteny z charakteristiky na obr. 2.3 pro statorové plechy a z přílohy č.1 pro rotorové plechy.

Výchozí parametry magnetického obvodu:

- Magnetická indukce ve jhu statoru	$B_{js} = 0,80 \Rightarrow H_{js} = 304 \text{ A/m}$
- Magnetická indukce v zubu statoru	$B_z = 0,79 \Rightarrow H_z = 301 \text{ A/m}$
- Magnetická indukce v pólu rotoru	$B_p = 1,07 \Rightarrow H_p = 6294 \text{ A/m}$
- Magnetická indukce ve jhu rotoru	$B_{jr} = 0,36 \Rightarrow H_{jr} = 2117 \text{ A/m}$

Magnetické napětí ve jhu statoru:

$$U_{mjs} = H_{js} \cdot l_{js} = 304 \cdot 0,088 = 27 \text{ A} \quad (2.86)$$

Magnetické napětí v zubu:

$$U_{mz} = H_z \cdot l_z = 301 \cdot 0,020 = 6 \text{ A} \quad (2.87)$$

Magnetické napětí ve vzduchové mezeře:

$$U_{m\delta} = \Phi \cdot \frac{\delta'}{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot t_p \cdot \alpha \cdot l_e} \quad (2.88)$$

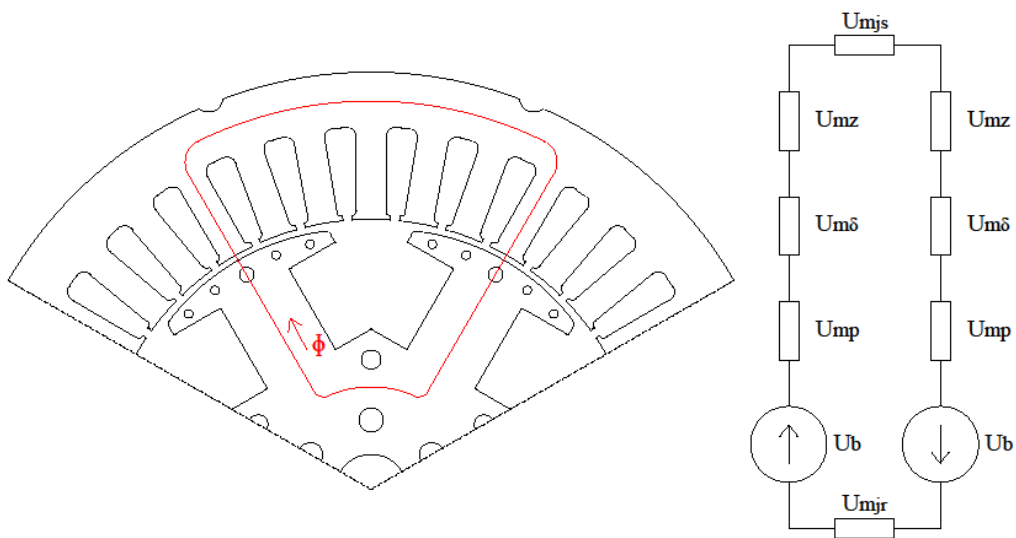
$$U_{m\delta} = 0,872 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{0,0011}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 1 \cdot 0,060 \cdot 0,63 \cdot 0,046} = 438 \text{ A}$$

Magnetické napětí v pólu:

$$U_{mp} = H_p \cdot l_p = 6294 \cdot 0,027 = 169 \text{ A} \quad (2.89)$$

Magnetické napětí ve jhu rotoru:

$$U_{mjr} = H_{jr} \cdot l_{jr} = 2117 \cdot 0,018 = 38 \text{ A} \quad (2.90)$$



Obr. 2.6: Magnetický obvod a jeho náhradní schéma

Úbytek magnetického napětí v magnetickém obvodu:

$$\begin{aligned} U_{fe} &= U_{mjs} + U_{mjre} + 2 \cdot (U_{mz} + U_{m\delta} + U_{mp}) = \\ &= 27 + 38 + 2 \cdot (6 + 438 + 169) = 1291 \text{ A} \end{aligned} \quad (2.91)$$

Magnetické napětí naprázdno:

$$F_0 = \frac{U_{fe}}{2} = \frac{1291}{2} = 646 \text{ A} \quad (2.92)$$

Magnetické napětí reakce kotvy:

$$F_a = 0,45 \cdot m \cdot \frac{N_s \cdot k_{v1}}{p} \cdot I_f = 0,45 \cdot 3 \cdot \frac{1110 \cdot 0,966}{3} \cdot 1,09 = 528 \text{ A} \quad (2.93)$$

2.8. Návrh tlumiče

Návrh tlumiče byl proveden dle postupu [2].

Rozteč tyčí byla uvažována na obvodu statoru:

$$t'_t = 0,8 \cdot t_{d1} = 0,8 \cdot 10,12 = 8,1 \text{ mm} \quad (2.94)$$

Šířka pólového nástavce:

$$b_n = b_p + 2 \cdot (A_c + A_p) = 17 + 2 \cdot (9 + 2,5) = 40 \text{ mm} \quad (2.95)$$

Počet tyčí v pólovém nástavci:

$$Q_m = \frac{b_n}{t'_t} = \frac{40}{8,1} = 4,9 \Rightarrow 5 \quad (2.96)$$

Průřez všech tyčí:

$$S_t = 0,2 \cdot N_c \cdot Q \cdot S_{cut} = 0,2 \cdot 184 \cdot 36 \cdot 0,25 = 331 \text{ mm}^2 \quad (2.97)$$

Průřez jedné tyče:

$$S'_{t1} = \frac{S_t}{2p \cdot Q_m} = \frac{331}{6 \cdot 5} = 11 \text{ mm}^2 \quad (2.98)$$

Průměr tyče:

$$d'_{t1} = \sqrt{\frac{4 \cdot S'_{t1}}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 11}{\pi}} = 3,8 \text{ mm} \quad (2.99)$$

Průřez kruhu:

$$S'_k = 0,45 \cdot S'_{t1} \cdot Q_m = 0,45 \cdot 11 \cdot 5 = 24,75 \text{ mm}^2 \quad (2.100)$$

Průměr tyče byl stanoven větší, než nám dovolují rozměry pólového nástavce. Pokud by byl tlumič navrhnut dle výpočtu, výroba rotoru by nebyla možná. Proto byl zvolen průřez tyče $S_{t1} = 2,5 \text{ mm}^2$. Spojení tyčí je realizováno měděným páskem kopírující tvar pólového nástavce o šířce $l_k = 3 \text{ mm}$.

2.9. Určení parametrů náhradního schématu

Výpočet odporu statorového vinutí:

Pro výpočet odporu statorového vinutí musíme určit střední délku jedné cívky.

Střední šířka cívky procházející středem drážky:

$$b_c = \frac{\pi \cdot (D_1 + h_d)}{2p} \cdot \beta = \frac{\pi \cdot (116 + 20)}{6} \cdot 0,83 = 0,059 \text{ m} \quad (2.101)$$

Délka čela statorového vinutí:

$$l_\varepsilon = K_\varepsilon \cdot b_c + h + 2 \cdot B = 1,4 \cdot 0,059 + 2 \cdot 0,006 = 0,095 \text{ m} \quad (2.102)$$

Střední délka závitu statorového vinutí:

$$l_{z1} = 2 \cdot (l_\varepsilon + l_s) = 2 \cdot (0,095 + 0,048) = 0,286 \text{ m} \quad (2.103)$$

Elektrický odpor statorového vinutí při 20 °C:

$$R_{1/20} = \rho_{Cu} \frac{l_{z1} \cdot N_s}{a \cdot S_{Cu1}} = \frac{1}{56 \cdot 10^6} \cdot \frac{0,286 \cdot 1110}{1 \cdot 0,25 \cdot 10^{-6}} = 22,7 \ \Omega \quad (2.104)$$

Elektrický odpor statorového vinutí při 60 °C:

$$R_{1/60} = R_{1/20} \cdot (1 + \alpha_{Cu} \cdot \Delta t) = 22,7 \cdot (1 + 0,004 \cdot 40) = 26,4 \ \Omega \quad (2.105)$$

Výpočet rozptylové reaktance statorového vinutí:

Výpočet je proveden dle postupu [1], [3]. Koeficient C_{d1} a C_{q1} byl určen z přílohy č.2.

Magnetizační reaktance:

$$X_{\mu} = 4 \cdot m \cdot \frac{\mu_0}{\pi} \cdot \frac{(N_s \cdot k_{v1})^2}{p} \cdot \frac{t_p \cdot l_s}{\delta_p \cdot k_c} \cdot f$$

$$X_{\mu} = 4 \cdot 3 \cdot \frac{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}}{\pi} \cdot \frac{(1110 \cdot 0,966)^2}{3} \cdot \frac{0,061 \cdot 0,048}{0,00125 \cdot 1,1} \cdot 50 \quad (2.106)$$

$$X_{\mu} = 196 \, \Omega$$

Činitel poměrné magnetické vodivosti drážky:

$$\lambda_{dh} = \lambda_d + \lambda_h = 1,32 + 0,44 = 1,76 \quad (2.107)$$

Činitel k'_{β} :

$$k'_{\beta} = 0,25 \cdot (1 + 3 \cdot \beta) = 0,25 \cdot \left(1 + 3 \cdot \frac{5}{6}\right) = 0,875 \quad (2.108)$$

Činitel k_{β} :

$$k_{\beta} = 0,25 \cdot (1 + 3 \cdot k'_{\beta}) = 0,25 \cdot (1 + 3 \cdot 0,875) = 0,91 \quad (2.109)$$

Činitel poměrné magnetické vodivosti mezi stěnami drážky:

$$\lambda_d = \frac{h_3}{3 \cdot b_1} \cdot k_{\beta} + \left(0,785 - \frac{b_0}{2 \cdot b_1} + \frac{h_2}{b_1} + \frac{h_0}{b_0}\right) \cdot k'_{\beta}$$

$$\lambda_d = \frac{0,015}{3 \cdot 0,004} \cdot 0,91 + \left(0,785 - \frac{0,002}{2 \cdot 0,004} + \frac{0,002}{0,004} + \frac{0,001}{0,002}\right) \cdot 0,875 \quad (2.110)$$

$$\lambda_d = 1,32$$

Činitel poměrné magnetické vodivosti hlav zubů:

$$\lambda_h = \left[\alpha \cdot \lambda'_h + \left(0,22 + 0,32 \cdot \sqrt{\frac{t_{d1} - b_0}{b_0}} \right) \cdot (1 - \alpha) \right] \cdot k'_\beta$$

$$\lambda_h = \left[0,63 \cdot 0,3 + \left(0,22 + 0,32 \cdot \sqrt{\frac{10,12 - 2}{2}} \right) \cdot (1 - 0,63) \right] \cdot 0,875 \quad (2.111)$$

$$\lambda_h = 0,44$$

Činitel poměrné magnetické vodivosti čel:

$$\lambda_\varepsilon = 0,34 \cdot \frac{q}{l_s} \cdot (l_\varepsilon - 0,64 \cdot \beta \cdot t_p)$$

$$\lambda_\varepsilon = 0,34 \cdot \frac{2}{0,048} \cdot \left(0,095 - 0,64 \cdot \frac{5}{6} \cdot 0,0607 \right) = 0,887 \quad (2.112)$$

Rozptylová reaktance jedné fáze:

$$X_{a\sigma} = 15,8 \cdot \left(\frac{f}{100} \right) \cdot \left(\frac{N_s}{100} \right)^2 \cdot \left(\frac{l_s}{p \cdot q} \right) \cdot (\lambda_{dh} + \lambda_\varepsilon) + \tau_{dif} \cdot X_\mu$$

$$X_{a\sigma} = 15,8 \cdot \left(\frac{50}{100} \right) \cdot \left(\frac{1110}{100} \right)^2 \cdot \left(\frac{0,048}{3 \cdot 2} \right) \cdot (1,76 + 0,877) + 0,176 \cdot 196 \quad (2.113)$$

$$X_{a\sigma} = 55 \, \Omega$$

Činitel C_{d1} :

$$C_{d1} = e \cdot f = 0,8 \cdot 1,08 = 0,856 \quad (2.114)$$

Činitel C_{q1} :

$$C_{q1} = g \cdot h = 1,62 \cdot 0,25 = 0,405 \quad (2.115)$$

Příčná reaktance kotvy:

$$X_{aq} = X_{\mu} \cdot C_{q1} = 196 \cdot 0,405 = 80 \, \Omega \quad (2.116)$$

Podélná reaktance kotvy:

$$X_{ad} = X_{\mu} \cdot C_{d1} = 196 \cdot 0,856 = 168 \, \Omega \quad (2.117)$$

Podélná reaktance kotvy:

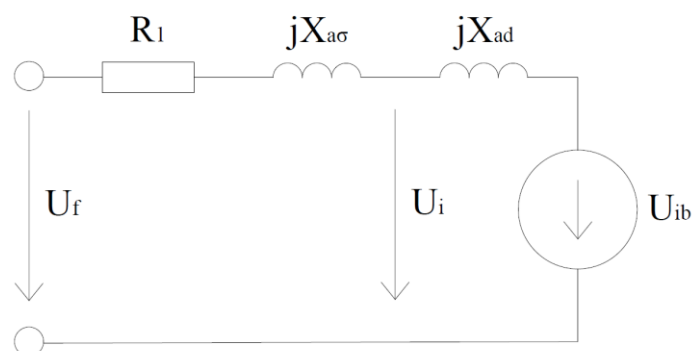
$$X_d = X_{a\sigma} + X_{ad} = 55 + 168 = 223 \, \Omega \quad (2.118)$$

Příčná reaktance kotvy:

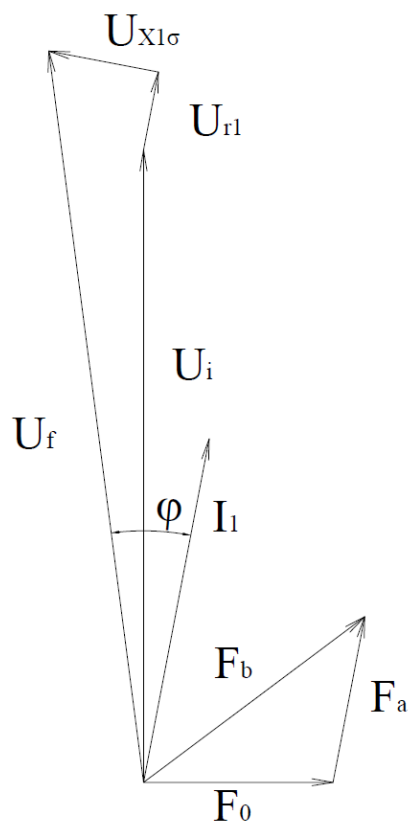
$$X_q = X_{a\sigma} + X_{aq} = 55 + 80 = 135 \, \Omega \quad (2.119)$$

2.10. Náhradní schéma, fázorový diagram a návrh buzení

Pro návrh buzení je nutné nejdříve určit parametry náhradního schématu a sestavit fázorový diagram. Pro zjednodušení je uvažován fázorový diagram pro stroj s hladkým rotorem. Z tohoto diagramu bylo určeno indukované napětí a vypočítaný skutečný činitel elektromotorické síly. Z tohoto diagramu bylo odečteno potřebné magnetické napětí potřebné pro buzení stroje [4].



Obr. 2.7: Náhradní schéma synchronního stroje



Obr. 2.8: Fázorový diagram synchronního stroje

Určené hodnoty z fázorového diagramu:

Indukované napětí:

$$U_i = 195 \text{ V} \quad (2.120)$$

Skutečný činitel elektromotorické síly:

$$K'_e = \frac{U_i}{U_f} = \frac{195}{230} = 0,85 \quad (2.121)$$

Budící magnetické napětí:

$$F_b = 864 \text{ A} \quad (2.122)$$

2.11. Návrh buzení

V návrhu buzení je třeba brát v potaz ruční navíjení cívek. S tímto ohledem byl zvolen jako ideální měděný vodič kruhového průřezu o průměru 1 mm. Měděný vodič s tímto průměrem je dobře tvárný a dostatečně mechanicky pevný. Při návrhu byl uvažován činitel plnění pod pólovým nástavcem $k'_{wb} = 0,45$. Při provozu nesmí být překročena hodnota proudové hustoty $\sigma'_{CuR} = 11 \text{ A/mm}^2$.

Plocha uložení vinutí budící cívky:

$$S_b = A_c \cdot h_c = 9 \cdot 19,2 = 172 \text{ mm}^2 \quad (2.123)$$

Střední délka závitu budící cívky:

$$l_{zb} = 2 \cdot \left(b_p + \frac{2 \cdot A_c}{2} + l_e + \frac{2 \cdot A_c}{2} \right) = 2 \cdot (17 + 9 + 48 + 9) = 166 \text{ mm} \quad (2.124)$$

Průřez vodiče:

$$S_{vb} = \pi \cdot r^2 = \pi \cdot 0,5^2 = 0,79 \text{ mm}^2 \quad (2.125)$$

Počet závitů budící cívky:

$$N'_b = \frac{S_b \cdot k'_{wb}}{S_{vb}} = \frac{172 \cdot 0,45}{0,79} = 99 \quad (2.126)$$

Proud budící cívky:

$$I'_b = \frac{F_b}{N'_b} = \frac{864}{99} = 8,72 \text{ A} \quad (2.127)$$

Proudová hustota budící cívky:

$$\sigma'_{Cub} = \frac{I'_b}{S_{vb}} = \frac{8,72}{0,79} = 11 \text{ A/mm}^2 \quad (2.128)$$

Při návrhu buzení nedošlo k překročení mezních limitů proudové hustoty. Během navíjení budící cívky bylo zajištěno efektivnější uložení vodičů na těle pólu a navinuta cívka o počtu závitů $N_b = 108$.

Parametry buzení:

Skutečný proud budící cívky:

$$I_b = \frac{F_b}{N_b} = \frac{864}{108} = 8 \text{ A} \quad (2.129)$$

Skutečná proudová hustota budící cívky:

$$\sigma_{Cub} = \frac{I_b}{S_{vb}} = \frac{8}{0,79} = 10,18 \text{ A/mm}^2 \quad (2.130)$$

Elektrický odpor budícího vinutí při 20 °C:

$$R_{b/20} = \rho_{Cu} \frac{l_{zb} \cdot N_b \cdot 2p}{S_{vb}} = \frac{1}{56 \cdot 10^6} \cdot \frac{0,166 \cdot 108 \cdot 6}{0,79 \cdot 10^{-6}} = 2,43 \Omega \quad (2.131)$$

Elektrický odpor budícího vinutí při 90 °C:

$$R_{b/90} = R_{b/20} \cdot (1 + \alpha_{Cu} \cdot \Delta t) = 2,43 \cdot (1 + 0,004 \cdot 70) = 3,11 \Omega \quad (2.132)$$

Minimální budící napětí:

$$U_{b_min} = 2 \cdot U_k + R_{b/20} \cdot I_b = 2 \cdot 2 + 2,43 \cdot 8 = 23,44 \text{ V} \quad (2.133)$$

Maximální budící napětí:

$$U_{b_max} = 2 \cdot U_k + R_{b/90} \cdot I_b = 2 \cdot 2 + 3,11 \cdot 8 = 28,9 \text{ V} \quad (2.134)$$

Pro buzení je vhodné použít regulovaný zdroj napětí v rozsahu 20-30 V. Přesné napětí je třeba upravit pro požadované provozní parametry stroje na požadovanou hodnotu proudu.

2.12. Výkonová a momentová charakteristika stroje

Výkonová charakteristika je dána vztahem:

$$P_{f(\beta)} = m \cdot U_f \cdot \left[\frac{U_{ib}}{X_d} \cdot \sin \beta + \frac{U}{2} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \cdot \sin 2\beta \right] \quad (2.135)$$

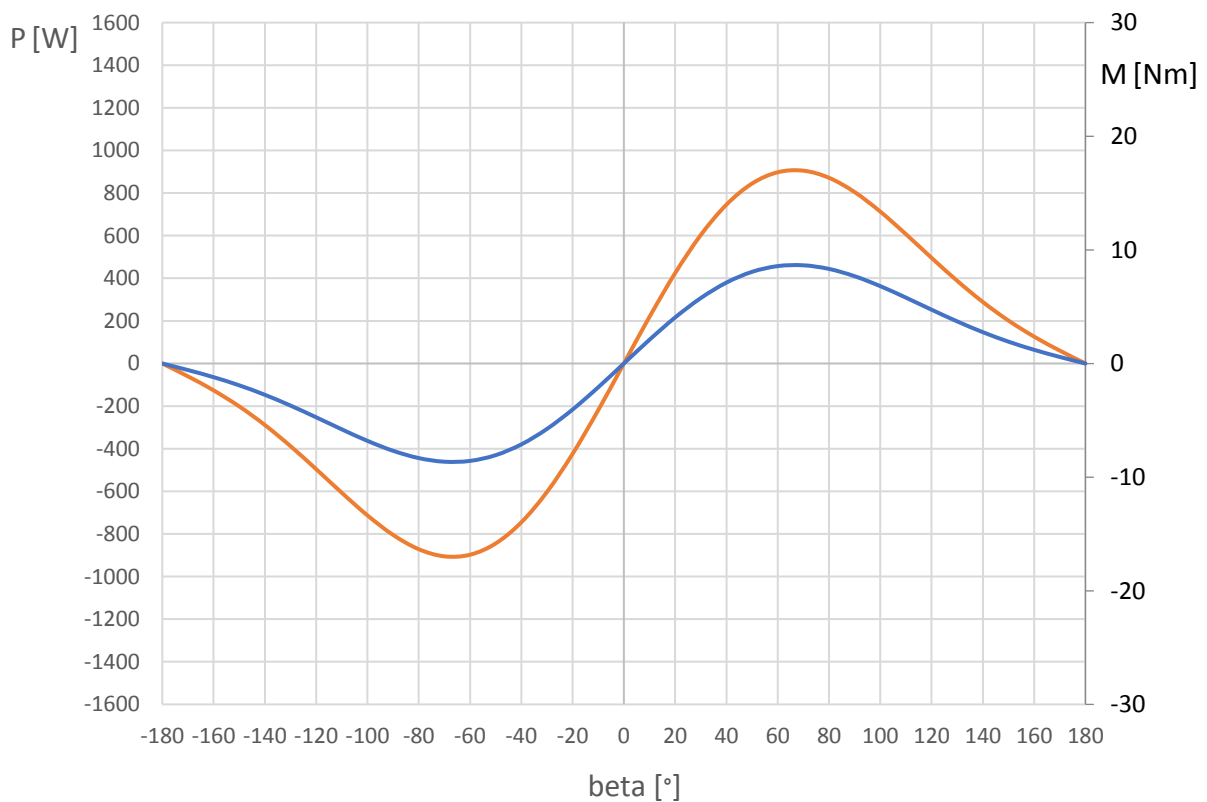
$$P_{f(\beta)} = 3 \cdot 230 \cdot \left[\frac{260}{223} \cdot \sin \beta + \frac{230}{2} \left(\frac{1}{135} - \frac{1}{223} \right) \cdot \sin 2\beta \right] [W]$$

Momentová charakteristika je dána vztahem:

$$M_{f(\beta)} = \frac{m \cdot p \cdot U_f}{\omega} \cdot \left[\frac{U_{ib}}{X_d} \cdot \sin \beta + \frac{U}{2} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \cdot \sin 2\beta \right] \quad (2.136)$$

$$M_{f(\beta)} = \frac{3 \cdot 3 \cdot 230}{2 \cdot \pi \cdot 50} \cdot \left[\frac{260}{223} \cdot \sin \beta + \frac{230}{2} \left(\frac{1}{135} - \frac{1}{223} \right) \cdot \sin 2\beta \right] [Nm]$$

Charakteristiky stroje určené dle uvedených vztahů jsou zobrazeny v obr. 2.9., přičemž výkonová charakteristika je vynesena červenou čarou, momentová charakteristika modrou čarou.



Obr. 2.9: Výkonová a momentová charakteristika

2.13. Stanovení ztrát a účinnosti

Jouleovy ztráty ve statorovém vinutí:

$$\Delta P_{Cu1} = m \cdot R_{1/60} \cdot I_1^2 = 3 \cdot 26,4 \cdot 1,09^2 = 94 \text{ W} \quad (2.137)$$

Jouleovy ztráty v budícím vinutí:

$$\Delta P_{Cub} = R_{b/90} \cdot I_b^2 + U_k \cdot I_b = 3,11 \cdot 8^2 + 2 \cdot 8 = 215 \text{ W} \quad (2.138)$$

Pro stanovení ztrát v železe je třeba určit hmotnost aktivních částí stroje.

Hmotnost zubů statoru:

$$\begin{aligned} m_z &= 7800 \cdot l_s \cdot k_{Fe} \cdot h_d \cdot b_z \cdot Q \\ m_z &= 7800 \cdot 0,048 \cdot 0,95 \cdot 0,020 \cdot 0,0064 \cdot 36 = 1,6 \text{ Kg} \end{aligned} \quad (2.139)$$

Hmotnost jha statoru:

$$\begin{aligned} m_{js} &= 7800 \cdot l_s \cdot k_{Fe} \cdot \pi \cdot (D_2 - h_{js}) \cdot h_{js} \\ m_{js} &= 7800 \cdot 0,048 \cdot 0,95 \cdot \pi \cdot (0,180 - 0,012) \cdot 0,012 = 2,3 \text{ Kg} \end{aligned} \quad (2.140)$$

Předpokládané ztrátové číslo plechů [1]:

$$\Delta p_{Fe} = 2,3 \text{ W / kg} \quad (2.141)$$

Ztráty v zubech statoru:

$$\begin{aligned} \Delta P_{Fez} &= 1,7 \cdot \Delta p_{Fe} \cdot B_{z2}^2 \cdot \left(\frac{f}{50}\right)^{1,3} \cdot m_{Fez} \\ \Delta P_{Fez} &= 1,7 \cdot 2,3 \cdot 0,79^2 \cdot \left(\frac{50}{50}\right)^{1,3} \cdot 1,6 = 3,9 \text{ W} \end{aligned} \quad (2.142)$$

Ztráty ve jhu statoru:

$$\begin{aligned}\Delta P_{Fej} &= 1,3 \cdot \Delta p_{Fe} \cdot B_{js}^2 \cdot \left(\frac{f}{50}\right)^{1,3} \cdot m_{Fej} \\ \Delta P_{Fej} &= 1,3 \cdot 2,3 \cdot 0,8^2 \cdot \left(\frac{50}{50}\right)^{1,3} \cdot 2,3 = 4,4 \text{ W}\end{aligned}\tag{2.143}$$

Povrchové ztráty:

$$\begin{aligned}\Delta P_p &= 0,5 \cdot 2p \cdot \alpha \cdot t_p \cdot l_s \cdot k_0 \cdot \left(\frac{Q \cdot n}{10000}\right)^{1,5} \cdot (B_0 \cdot t_{d1} \cdot 10^3)^2 \cdot 10^{-6} \\ \Delta P_p &= 0,5 \cdot 6 \cdot 0,63 \cdot 0,0607 \cdot 0,048 \cdot 12 \cdot \left(\frac{36 \cdot 1000}{10000}\right)^{1,5} \cdot \\ &\cdot (0,45 \cdot 0,010 \cdot 10^3)^2 \cdot 10^{-6} = 13 \text{ W}\end{aligned}\tag{2.144}$$

Mechanické ztráty:

$$\begin{aligned}\Delta P_m &\approx 3,68 \cdot p \cdot \left(\frac{v}{40}\right)^3 \sqrt{l_s} \cdot 10^{-3} \\ \Delta P_m &\approx 3,68 \cdot 3 \cdot \left(\frac{6,07}{40}\right)^3 \sqrt{0,048} \cdot 10^{-3} \approx 8,5 \text{ W}\end{aligned}\tag{2.145}$$

Přídavné ztráty:

$$\Delta P_{př} = 0,006 \cdot S = 0,006 \cdot 758 \approx 0,5 \text{ W}\tag{2.146}$$

Celkové ztráty:

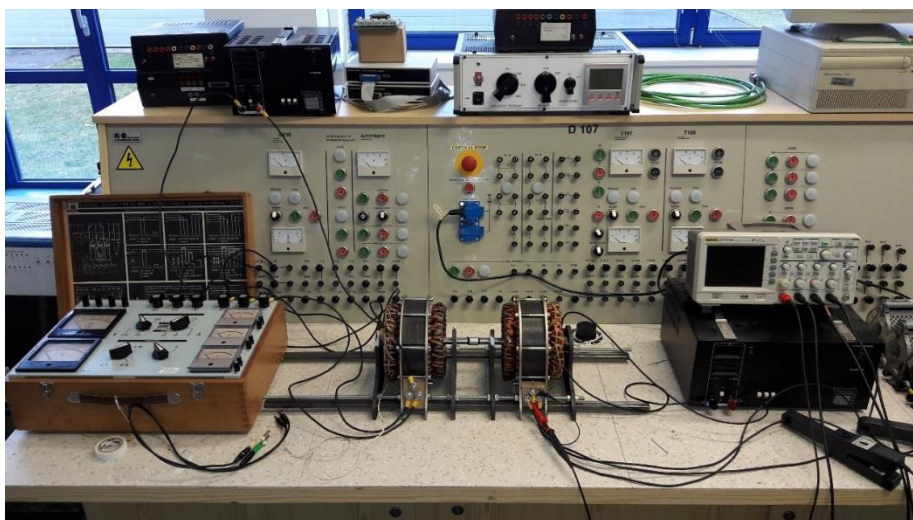
$$\begin{aligned}\Delta P &= \Delta P_{Cul} + \Delta P_{Cub} + \Delta P_{Fej} + \Delta P_{Fez} + \Delta P_p + \Delta P_m + \Delta P_{př} \\ \Delta P &= 94 + 215 + 4,4 + 3,9 + 13 + 8,5 + 0,5 = 335,3 \text{ W}\end{aligned}\tag{2.147}$$

Účinnost:

$$\eta = 1 - \frac{\Delta P}{m \cdot I_1 \cdot U_f \cos \varphi} = 1 - \frac{335,3}{3 \cdot 1,09 \cdot 230,9 \cdot 0,95} = 0,532\tag{2.148}$$

3. Měření

Všechna měření byla provedena na sestaveném synchronním soustrojí viz obr.3.1. Bylo předpokládáno, že oba stroje jsou identické, měření byla provedena pouze na jednom stroji. V soustrojí byl provozován jeden stroj v motorickém a druhý v generátorickém režimu. Synchronní motor byl vždy asynchronně rozběhnut, a to za pomoci autotransformátoru. Při dosažení požadovaných otáček byl stroj nabuzen a vtažen do synchronizmu. Po uvedení strojů do jmenovitých otáček proběhla jednotlivá měření s výjimkou měření odporu vinutí.



Obr. 3.1: Foto měřícího pultu se synchronním soustrojím

3.1. Měření odporů vinutí

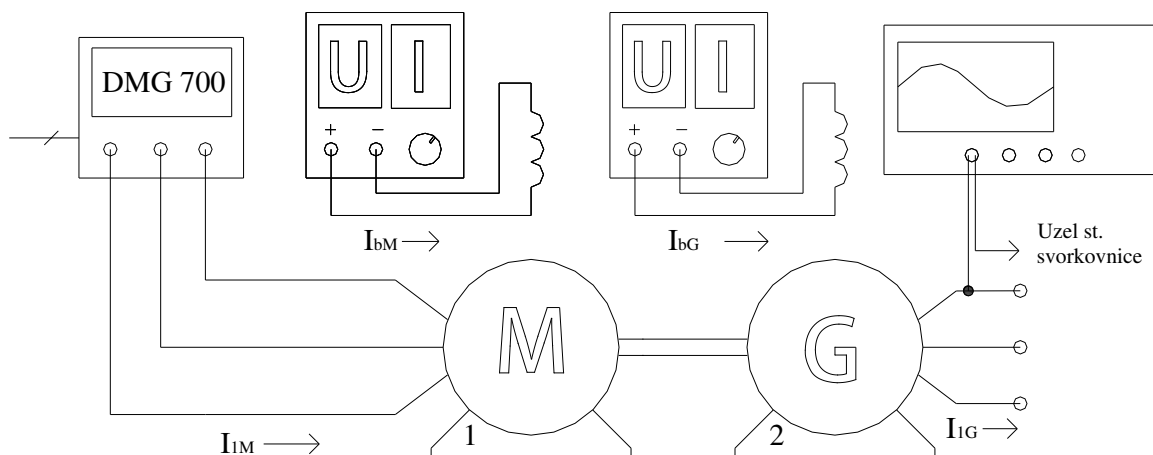
Měření odporů vinutí bylo provedeno měřícím přístrojem CROPICO DO5000 při pokojové teplotě 23 °C. V odporu vinutí je zahrnut i kontaktní odpor přívodních svorek. Měření odporu vinutí a kartáčů bylo provedeno při nulových otáčkách v klidovém stavu. Výsledky jsou uvedeny v tab.3.1.

Veličina	Označení	Hodnota	Jednotka
Odpor statorového vinutí U	R _u	22,56	Ω
Odpor statorového vinutí V	R _v	21,49	Ω
Odpor statorového vinutí W	R _w	22,32	Ω
Průměr	R _s	22,12	Ω
Budící vinutí	R _{bv}	2,28	Ω
Odpor kartáčů	R _k	1,52	Ω

Tab. 3.1: Naměřené hodnoty odporů vinutí

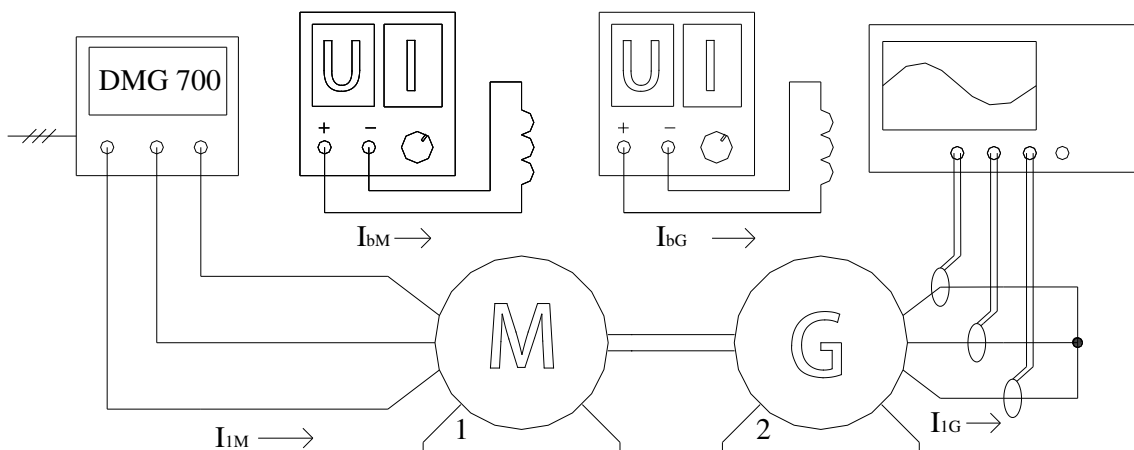
3.2. Měření naprázdno a nakrátko

Měření naprázdno bylo provedeno v generátorickém režimu a dle zásad [5]. Soustrojí bylo zapojeno podle obr.3.2. Svorky statorové svorkovnice generátoru byly rozpojeny a z osciloskopu RIGOL DS 1074 B byla odečtena hodnota fázového napětí při dané hodnotě budícího proudu.



Obr. 3.2: Blokové schéma pro měření naprázdno

Při měření nakrátko bylo postupováno obdobně jako u měření naprázdno. Soustrojí bylo zapojeno podle obrázku obr.3.3 a byly odečteny hodnoty statorového proudu odpovídající hodnotám budícího proudu.

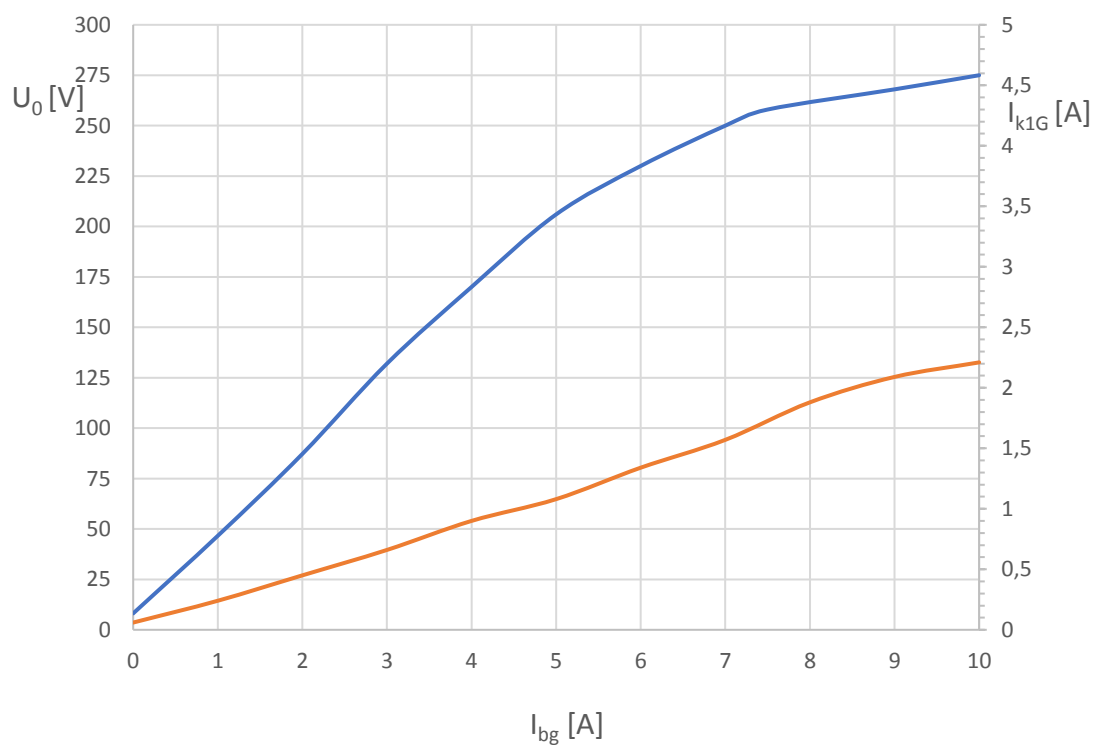


Obr. 3.3: Blokové schéma pro měření nakrátko

Naměřené hodnoty jsou uvedeny v tab.3.2 a zobrazeny v obr.3.4.

	Naprázdno	Nakrátko
I_b [A]	U_0 [V]	I_{k1G} [mA]
0	8,13	60
1	46,6	240
2	87,2	450
3	132	660
4	170	900
5	206	1080
6	230	1340
7	250	1570
8	258	1880
9	268	2090
10	275	2210

Tab. 3.2: Naměřené hodnoty měřením naprázdno a nakrátko



Obr. 3.4: Změřená charakteristika v chodu naprázdno a nakrátko

Z naměřených hodnot byly vypočteny parametry náhradního schématu stroje:

Nasycená synchronní impedance:

$$Z_{dnas} = \frac{U_0}{I_{k1GN}} = \frac{230}{1,340} = 171,5 \, \Omega \quad (3.1)$$

Nasycená synchronní reaktance:

$$X_{dnas} = \sqrt{Z_{dnas}^2 - R_s^2} = \sqrt{171,5^2 - 22,8^2} = 169 \, \Omega \quad (3.2)$$

Nenasycená synchronní impedance:

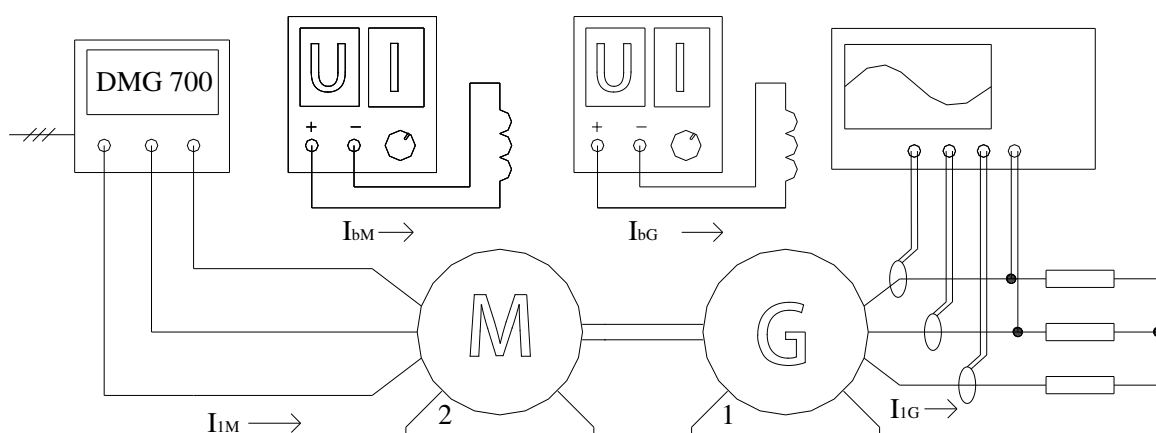
$$Z_{dn} = \frac{U_0}{I_{k1G}} = \frac{230}{1,15} = 200 \, \Omega \quad (3.3)$$

Nenasycená synchronní reaktance:

$$X_{dn} = \sqrt{Z_{dn}^2 - R_s^2} = \sqrt{200^2 - 22,8^2} = 199 \, \Omega \quad (3.4)$$

3.3. Zatěžovací zkouška

Synchronní soustrojí bylo uvedeno do provozu a po dobu jedné hodiny zatíženo ohmickou zátěží $3 \times R = 190 \Omega$ zapojenou do hvězdy viz obr.3.5. Při měření byly sledovány proudy a napětí, aby nedošlo k překročení mezních hodnot. Termokamerou byly snímány vybrané části stroje, zdali se nepřehřívají. Dále bylo pozorováno, jestli soustrojí nevykazuje známky mechanického či jiného poškození.

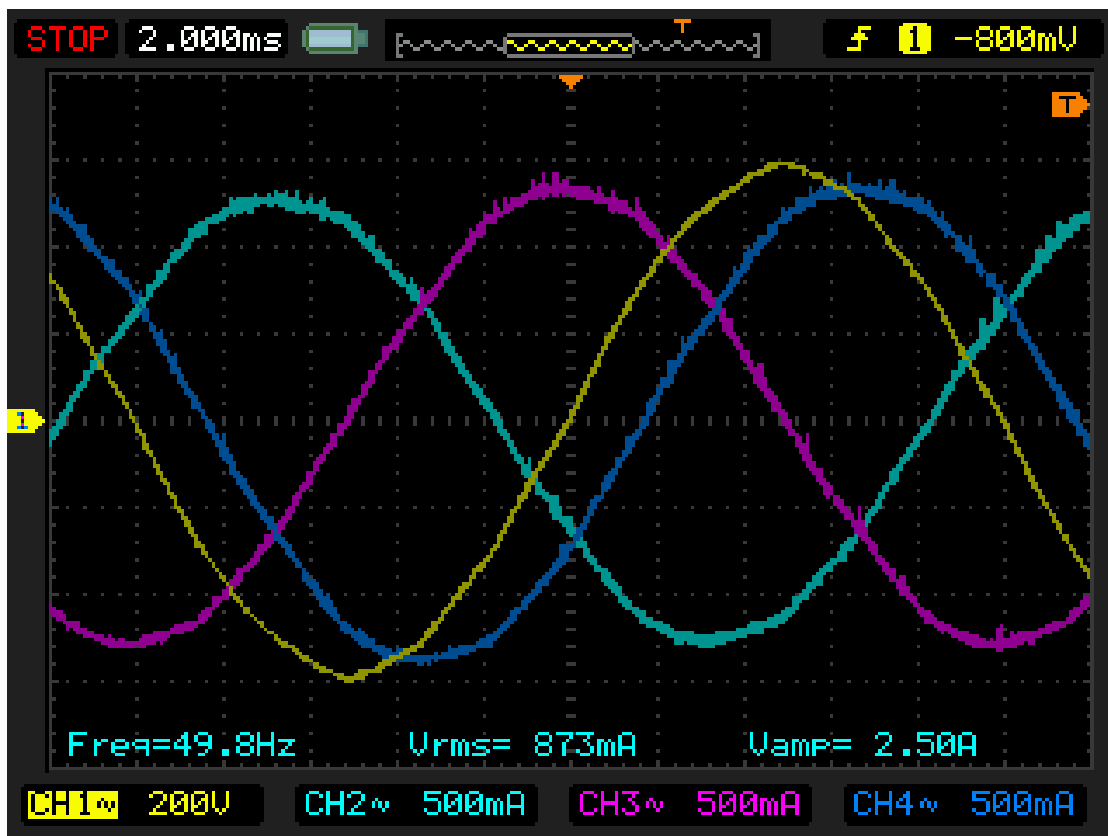


Obr. 3.5: Blokové schéma pro zatěžovací zkoušku

Během zkoušky soustrojí nevykazovalo žádné příznaky závažných poruch. Po ustálení provozní teploty stroje byly naměřeny hodnoty, které jsou uvedeny v tab. 3.3. Z osciloskopu byly pořízeny záznamy průběhů proudů a sdruženého napětí (žlutý průběh) obr.3.6.

Veličina	Označení	Generátor	Motor	Jednotka
Sdružené napětí	U_s	400,1	387,0	V
Fázové napětí	U_f	231	223,4	V
Proud	I_l	0,855	1,166	A
Účinnost	$\cos \phi$	0,992	0,987	-
Zdánlivý výkon	S	592,5	780	VA
Činný výkon	P	587,8	770	W
Jalový výkon	Q	4,74012	80	Var
Budící proud	I_b	8	7,2	A
Budící napětí	U_b	27,7	23,6	V

Tab. 3.3: Naměřené hodnoty zatěžovací zkoušky



Obr. 3.6: Průběhy proudů a napětí zatíženého stroje

Celkové ztráty motoru:

$$\Delta P' = I_{bM} \cdot U_{bM} + (S_M - S_G) \cdot \frac{S_M}{S_M + S_G} \quad (3.5)$$

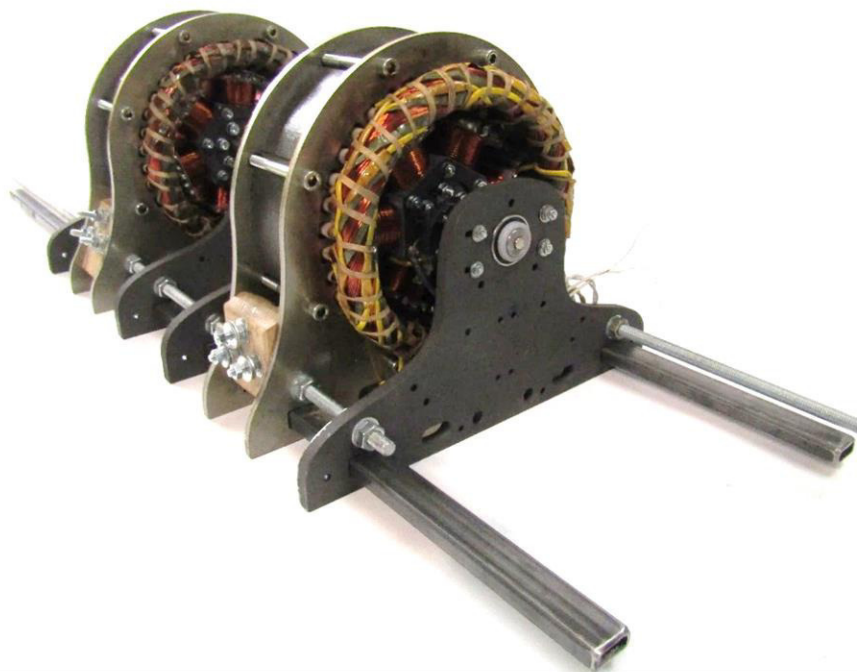
$$\Delta P' = 7,2 \cdot 23,6 + (780 - 592,5) \cdot \frac{780}{592,5 + 780} = 276,5 \text{ W}$$

Účinnost motoru:

$$\eta' = 1 - \frac{\Delta P'}{m \cdot I_1 \cdot U_f \cos \varphi} = 1 - \frac{276,5}{3 \cdot 1,16 \cdot 223,4 \cdot 0,987} = 0,64 \quad (3.6)$$

4. Závěr

V předložené diplomové práci bylo zrealizováno synchronní soustrojí, tvořené dvěma identickými stroji dle obr.4.1. o zdánlivém výkonu 760 VA. Soustrojí bylo uvedeno do provozu v laboratoři FEL ZČU, ve které bylo uskutečněno měření náhradních parametrů. Měřením byly získány hodnoty odporů vinutí, posléze byly získány charakteristiky ve stavu naprázdno a nakrátko v závislosti na budícím proudu. viz obr. 3.4. Z těchto charakteristik byla vypočtena nenasyčená a nasycená synchronní reaktance. Parametry náhradního schématu jsou uvedeny v tab. 4.1.



Obr. 4.1: Zhotovené demonstrační soustrojí

Název	Výpočet	Měření	Jednotka	Rozdíl [%]
Odpor statorového vinutí	22,7	24,8	Ω	9
Odpor budícího vinutí	2,43	2,28	Ω	6
Rozptylová reaktance kotvy	55	-	Ω	-
Podélná reaktance kotvy	80	-	Ω	-
Příčná reaktance kotvy	168	-	Ω	-
Synchronní reaktance nas.	-	169	Ω	-
Synchronní reaktance nes.	223	199	Ω	11
Účinnost	53	64	%	-

Tab. 4.1: Parametry náhradního schématu

Při zatěžovací zkoušce prováděné po dobu jedné hodiny v zatíženém stavu byl zjištěn nedostatečný kontakt kartáčů u stroje č. 1, který by pro dlouhodobý bezporuchový chod stroje měl být odstraněn výměnou kompletní sady kartáčů. Tím dojde ke snížení budících ztrát a k celkovému vylepšení účinnosti strojů.

V závěru zatěžovací zkoušky byl pořízen záznam průběhů proudů a sdruženého napětí obr.3.6 a za pomoci termokamery byla změřena teplota statorového vinutí, která dosáhla teploty 60 °. Pro oba stroje byl vytvořen štítek s jmenovitými parametry uvedený v tab. 4.2.

Název	Hodnota	Jednotka
Typ	Syn. motor	-
Sdružené napětí	400	V
Fázový proud	1,1	A
Zdánlivý příkon	760	VA
Činný výkon	580	W
Cos φ	0,95	-
Frekvence	50	Hz
Jmenovité otáčky	1000	ot/min
Budící proud	8	A
Budící napětí	20-30	V
Zapojení vinutí	Y	-
Krytí	IP 00	-
Druh provozu	S1	-

Tab. 4.2: Štítkové hodnoty synchronního stroje

Po výměně kartáčů lze soustrojí dlouhodobě a bezproblémově provozovat. Splňuje technické požadavky a nároky kladené na demonstrační soustrojí. Zejména je vhodné pro výukové účely, měření provozních parametrů a charakteristik stroje.

Seznam literatury a informačních zdrojů:

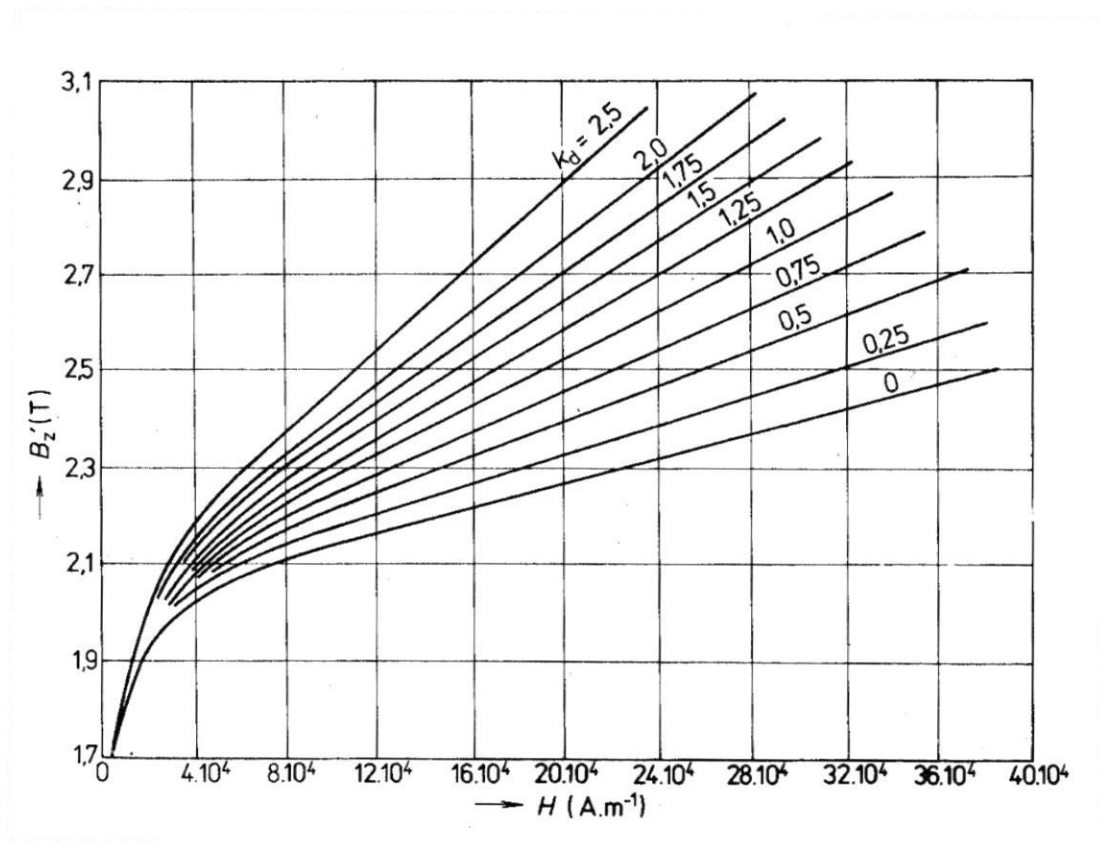
- [1] KOPYLOV, Igor Petrovič a kol. *Stavba elektrických strojů*. 1. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1988. 685 s.
- [2] CIGÁNEK, Ladislav. *Stavba elektrických strojů*. Praha: SNTL, 1958, 716 s. ISBN 05/34
- [3] PYRHONEN, Juha., Tapani JOKINEN a Valeria. HRABOVCOVÁ. *Design of rotating electrical machines*. Second edition. Chichester, West Sussex, United Kingdom: Wiley, 2014. ISBN 978-1-118-58157-5.
- [4] BARTOŠ, Václav. *Teorie elektrických strojů*. V Plzni: Západočeská univerzita, 2006. ISBN 80-7043-509-7.
- [5] BARTOŠ, Václav a Bohumil SKALA. *Měření na elektrických strojích*. 2. vyd. V Plzni: Západočeská univerzita, 2006. ISBN 80-7043-447-3.
- [6] SolidWorks. [online]. [Cit. 22.4.2018] Dostupné z <https://www.solidworks.cz/>

Seznam příloh:

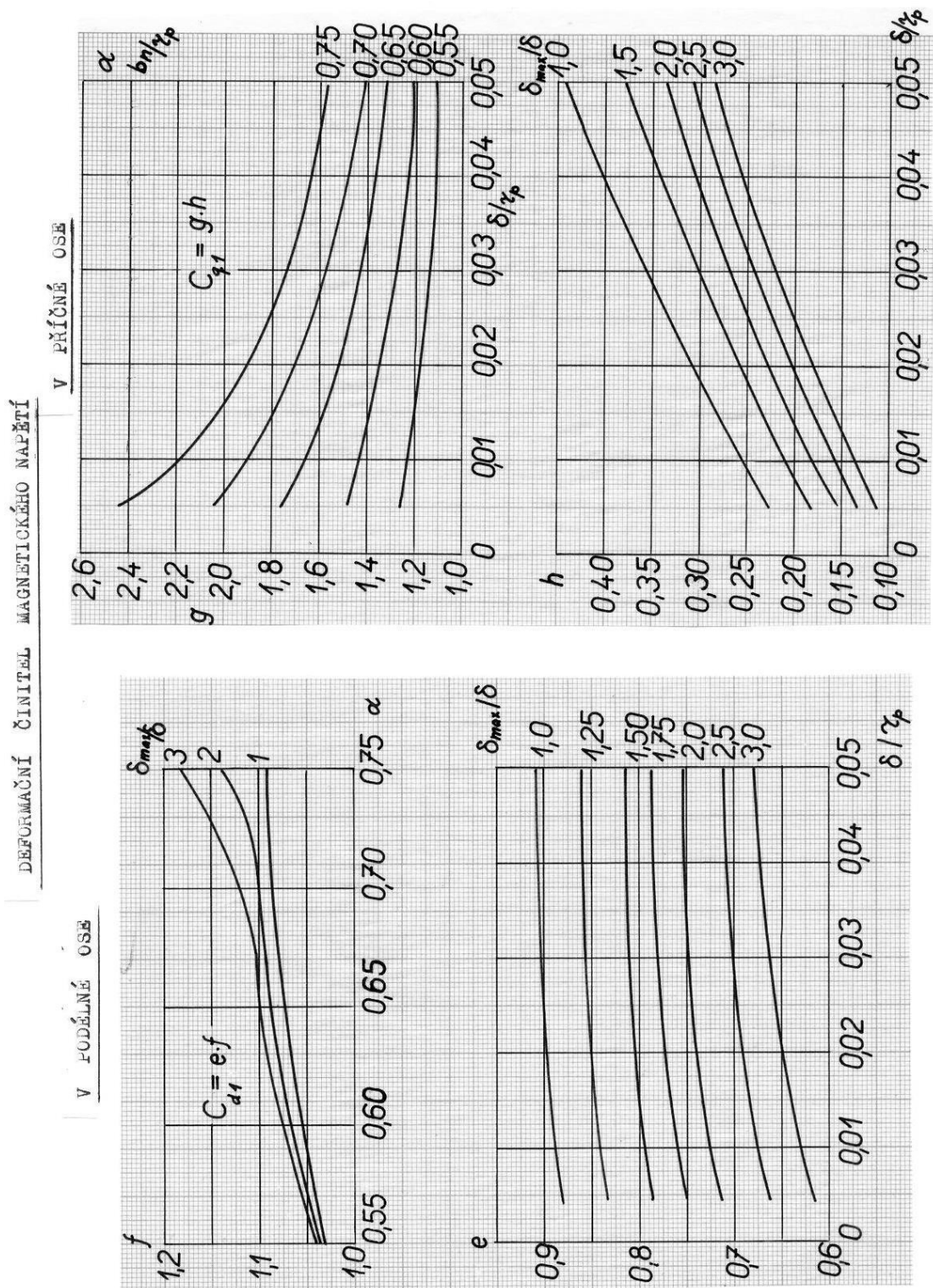
Příloha 1: Magnetizační charakteristika rotorových plechů [1]	1
Příloha 2: Deformační činitel magnetického napětí [1].....	2
Příloha 3: Pilové schéma vinutí	3
Příloha 4: Nákres synchronního stroje	4
Příloha 5: Nákres levého ložiskového stojanu.....	5
Příloha 6: Nákres pravého ložiskového stojanu	6
Příloha 7: Nákres hřídele	7
Příloha 8: Nákres kamene.....	8
Příloha 9: Nákres rotorového plechu	9
Příloha 10: Nákres pólového nástavce	10
Příloha 11: Nákres budícího prstence.....	11
Příloha 12: Nákres rotorové podložky.....	12
Příloha 13: Nákres statorového stahovacího plechu.....	13
Příloha 14: Nákres statorového paketu	14
Příloha 15: Nákres uspořádání synchronního soustrojí	15
Příloha 16: Fotogalerie popisující stavbu soustrojí	16

Přílohy:

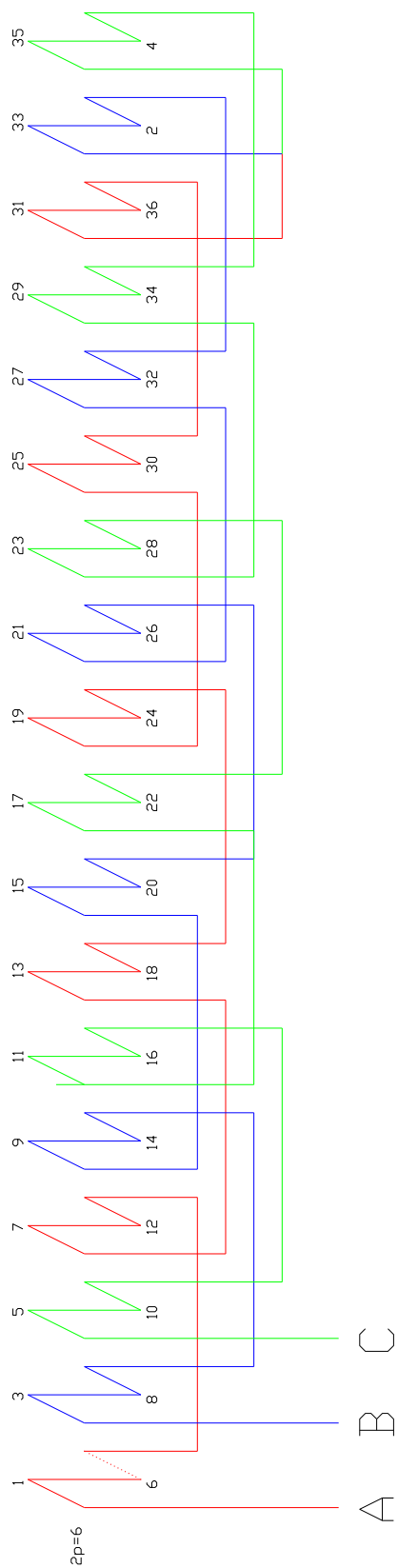
Příloha 1: Magnetizační charakteristika rotorových plechů [1]



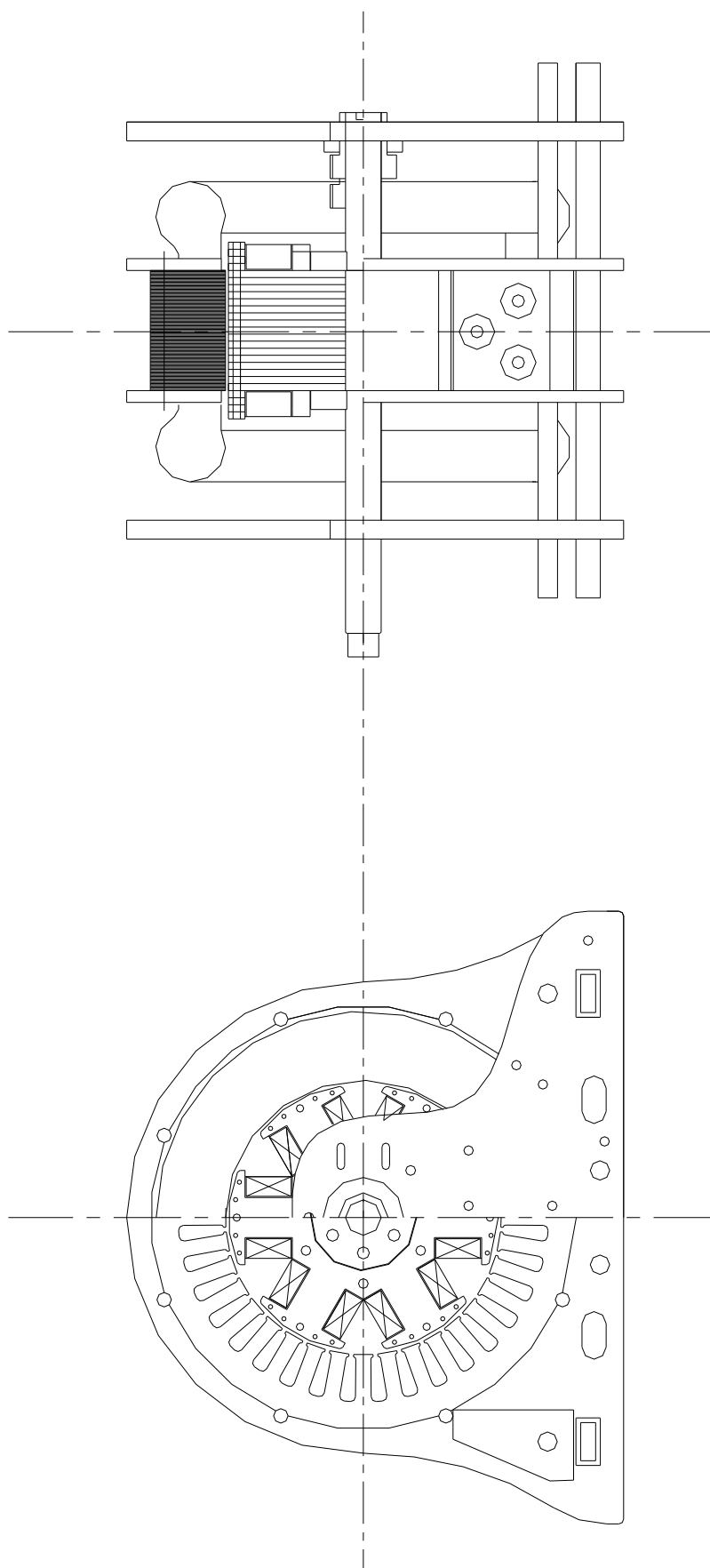
Příloha 2: Deformační činitel magnetického napětí [1]

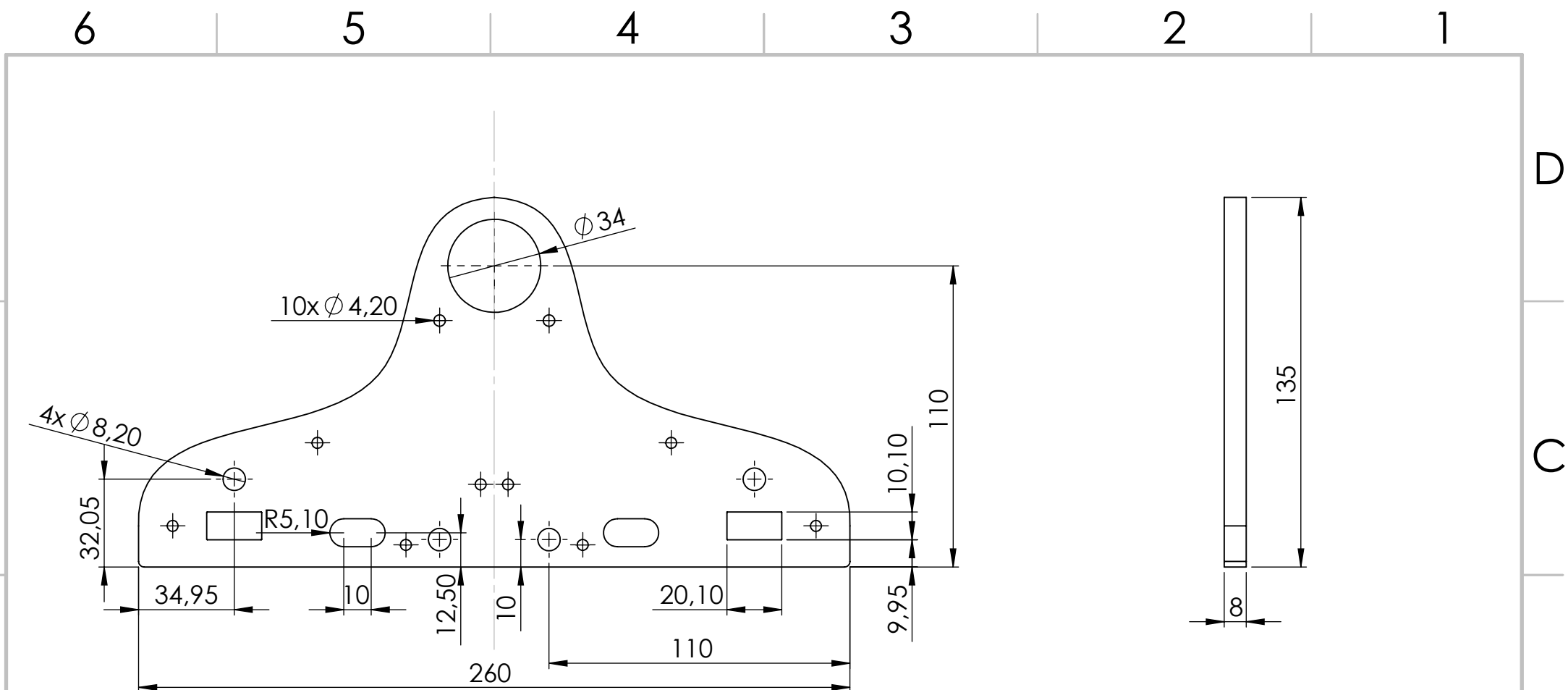


Příloha 3: Pilové schéma vinutí

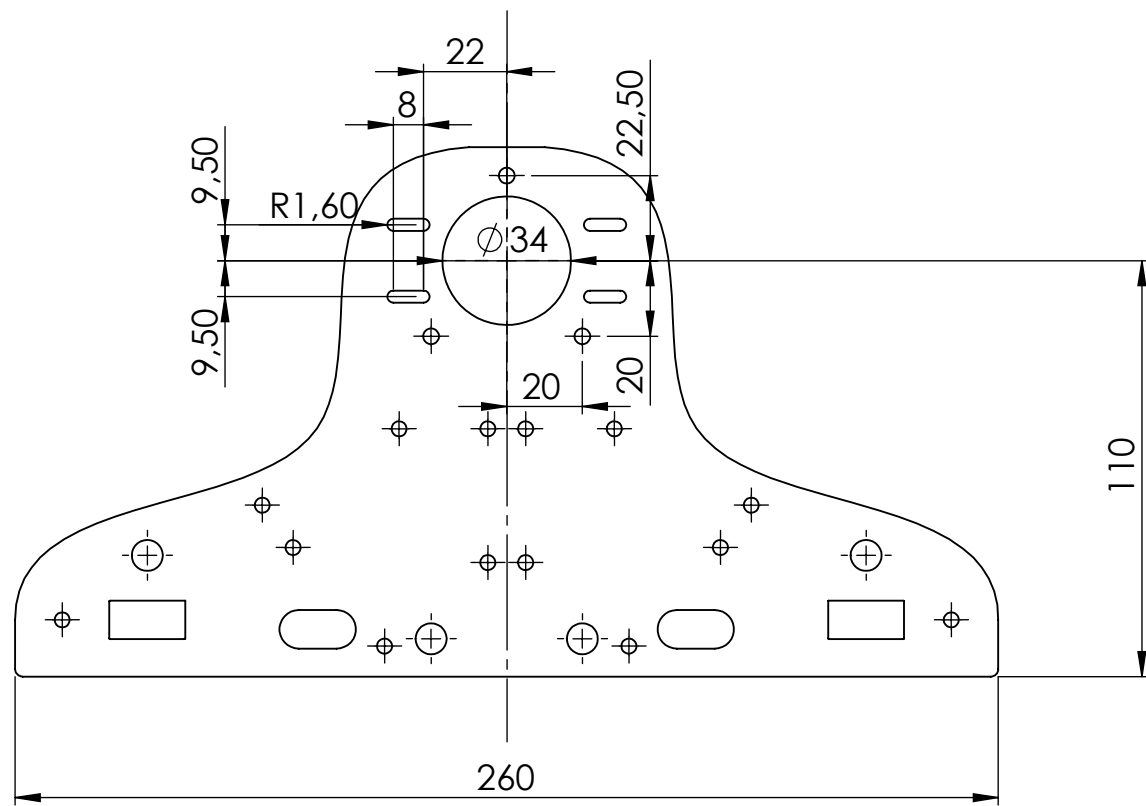


Příloha 4: Nákres synchronního stroje





Fakulta elektrotechnická ZČU Plzeň Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky		číslo přílohy: 5
Diplomová práce: Stavba demonstračního soustrojí		formát výkresu: A4
Název výkresu: Levý ložiskový stojan		číslo výkresu: 1
		datum: 10.1.2018
Zpracoval: Bc. Zdeněk Frank	Vedoucí práce: Doc. Ing. Karel Hruška, Ph.D.	měřítko: 1:2



Fakulta elektrotechnická ZČU Plzeň Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky		číslo přílohy: 6
Diplomová práce: Stavba demonstračního soustrojí		formát výkresu: A4
Název výkresu: Pravý ložiskový stojan		číslo výkresu: 2
		datum: 10.1.2018
Zpracoval: Bc. Zdeněk Frank	Vedoucí práce: Doc. Ing. Karel Hruška, Ph.D.	měřítko: 1:2

4

3

2

1

F

F

E

E

D

D

C

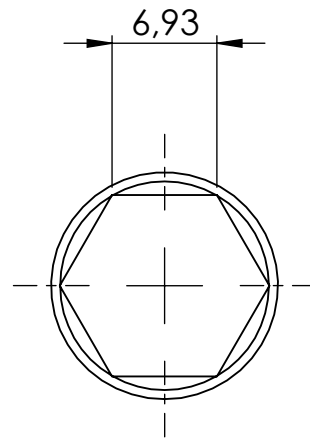
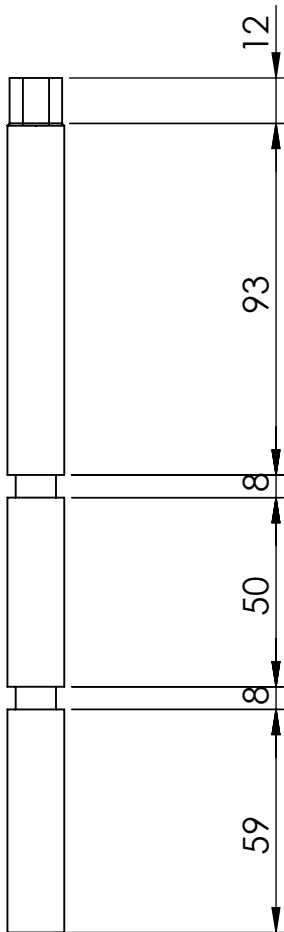
C

B

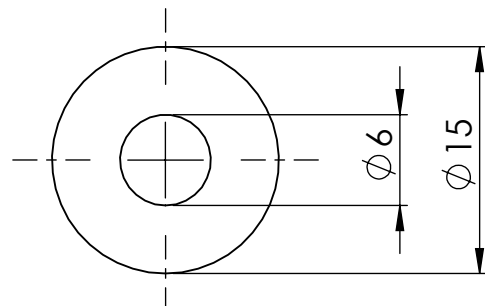
B

A

A



Měřítko 1:1



Měřítko 1:1

Fakulta elektrotechnická ZČU Plzeň
 Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

číslo přílohy:

7

Diplomová práce: Stavba demonstračního soustrojí

formát výkresu:

A4

Název výkresu:
 Hřídel

číslo výkresu:

3

datum:

10.1.2018

Zpracoval: Bc. Zdeněk Frank

Vedoucí práce: Doc. Ing. Karel Hruška, Ph.D.

měřítko:

1:2

4

3

2

1

4

3

2

1

F

F

E

E

D

D

C

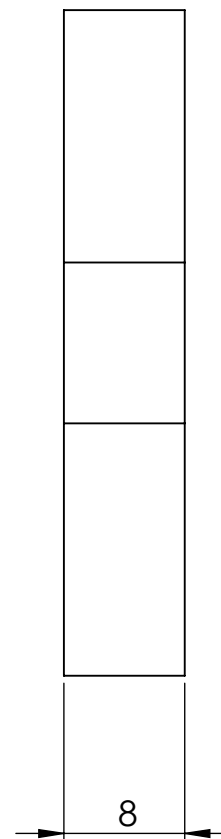
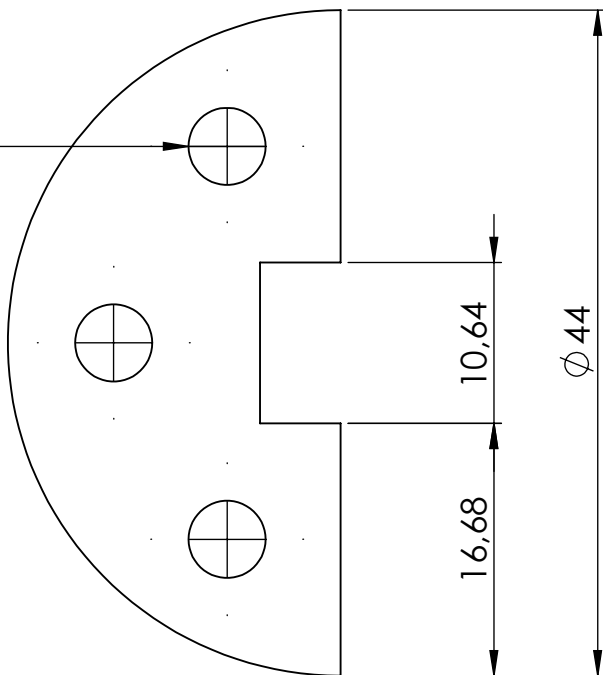
C

B

B

A

A

3x $\varnothing 5,10$ 

Fakulta elektrotechnická ZČU Plzeň
Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

číslo přílohy:

8

Diplomová práce: Stavba demonstračního soustrojí

formát výkresu: A4

Název výkresu: Kámen_zde

číslo výkresu: 4

datum: 10.1.2018

Zpracoval: Bc. Zdeněk Frank

Vedoucí práce: Doc. Ing. Karel Hruška, Ph.D.

měřítko: 2:1

4

3

2

1

4

3

2

1

F

F

E

E

D

D

C

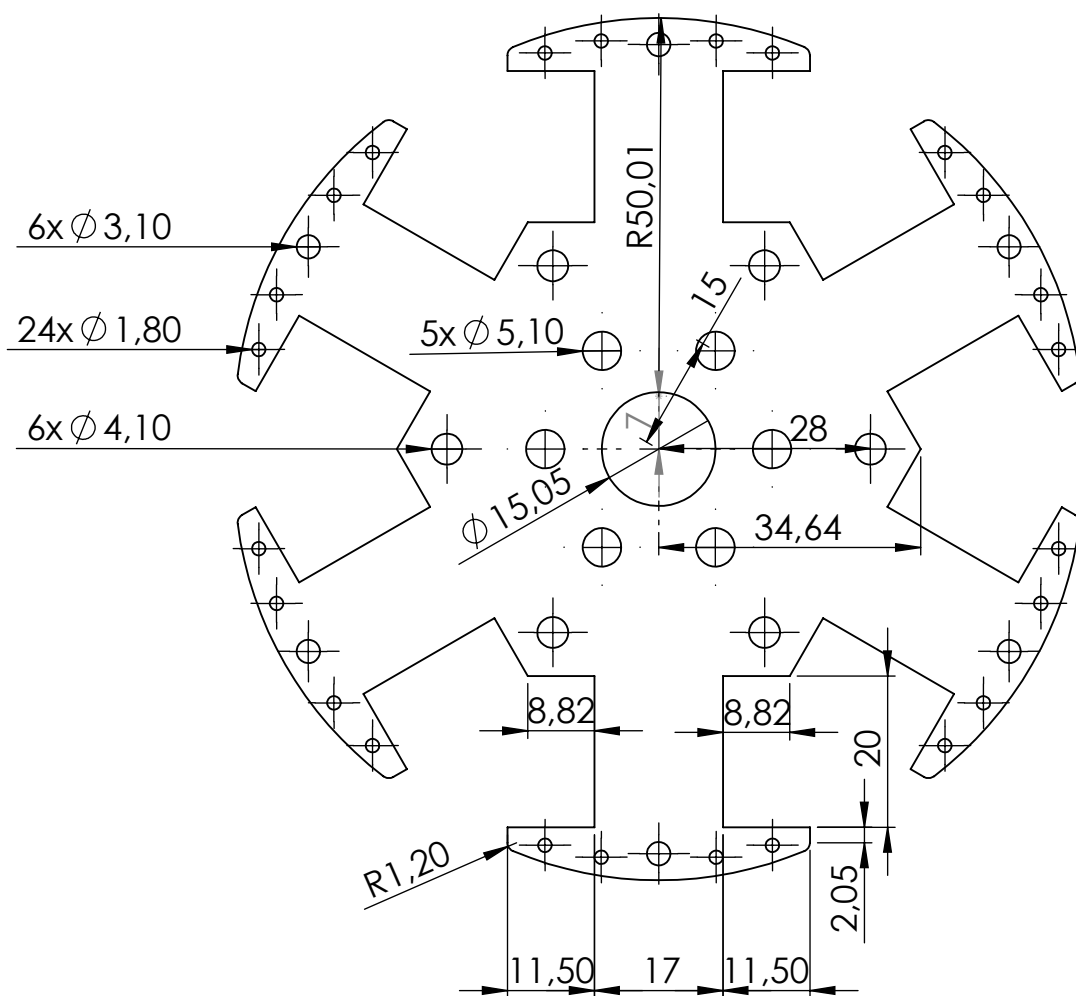
C

B

B

A

A



Fakulta elektrotechnická ZČU Plzeň
Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

číslo přílohy:

9

Diplomová práce: Stavba demonstračního soustrojí

formát výkresu:

A4

Název výkresu: Rotorový plech

číslo výkresu:

5

datum:

10.1.2018

Zpracoval: Bc. Zdeněk Frank

Vedoucí práce: Doc. Ing. Karel Hruška, Ph.D.

měřítko:

1:1

4

3

2

1

4

3

2

1

F

F

E

E

D

D

C

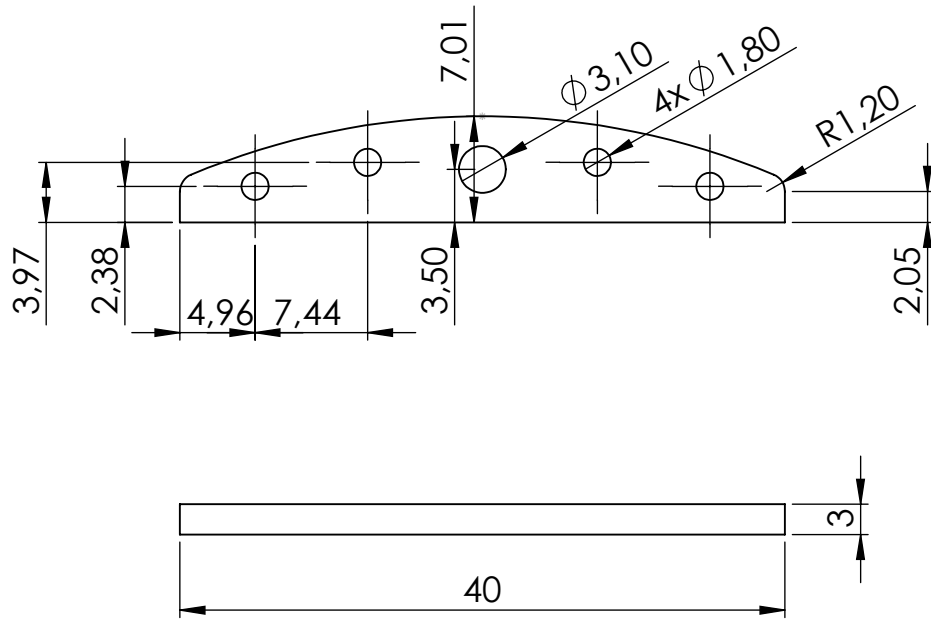
C

B

B

A

A



Fakulta elektrotechnická ZČU Plzeň
Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

číslo přílohy:

10

Diplomová práce: Stavba demonstračního soustrojí

formát výkresu:

A4

Název výkresu: Pólový nástavec

číslo výkresu:

6

datum:

10.1.2018

Zpracoval: Bc. Zdeněk Frank

Vedoucí práce: Doc. Ing. Karel Hruška, Ph.D.

měřítko:

2:1

4

3

2

1

6

5

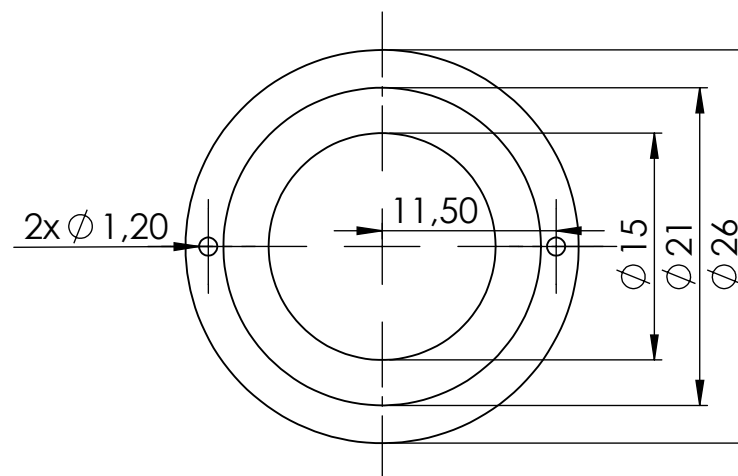
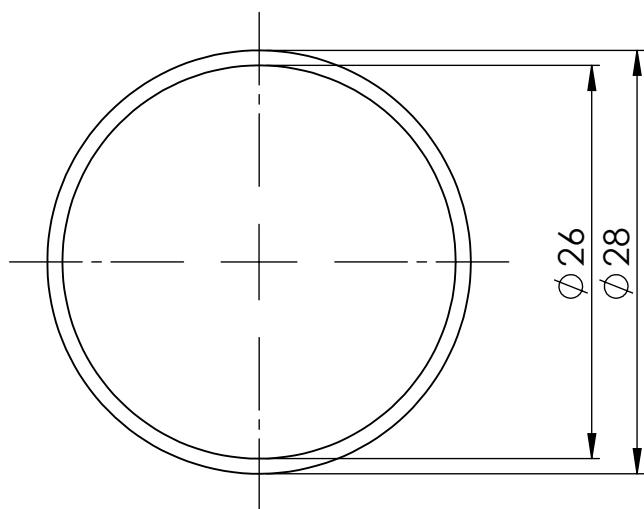
4

3

2

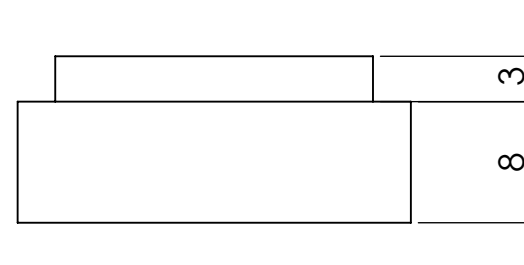
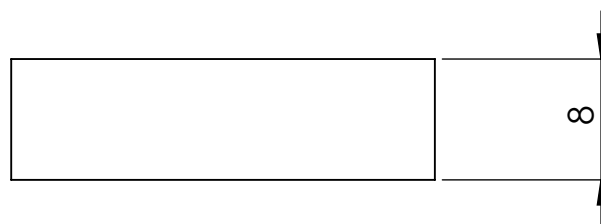
1

D



D

C



C

B

B

A

A

Fakulta elektrotechnická ZČU Plzeň
Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

číslo přílohy:

11

Diplomová práce:

Stavba demonstračního soustrojí

formát výkresu:

A4

Název výkresu:

Budící prstenec

číslo výkresu:

7

datum:

10.1.2018

Zpracoval:

Bc. Zdeněk Frank

Vedoucí práce:

Doc. Ing. Karel Hruška, Ph.D.

měřítko:

2:1

6

5

4

3

2

1

4

3

2

1

F

F

E

E

D

D

C

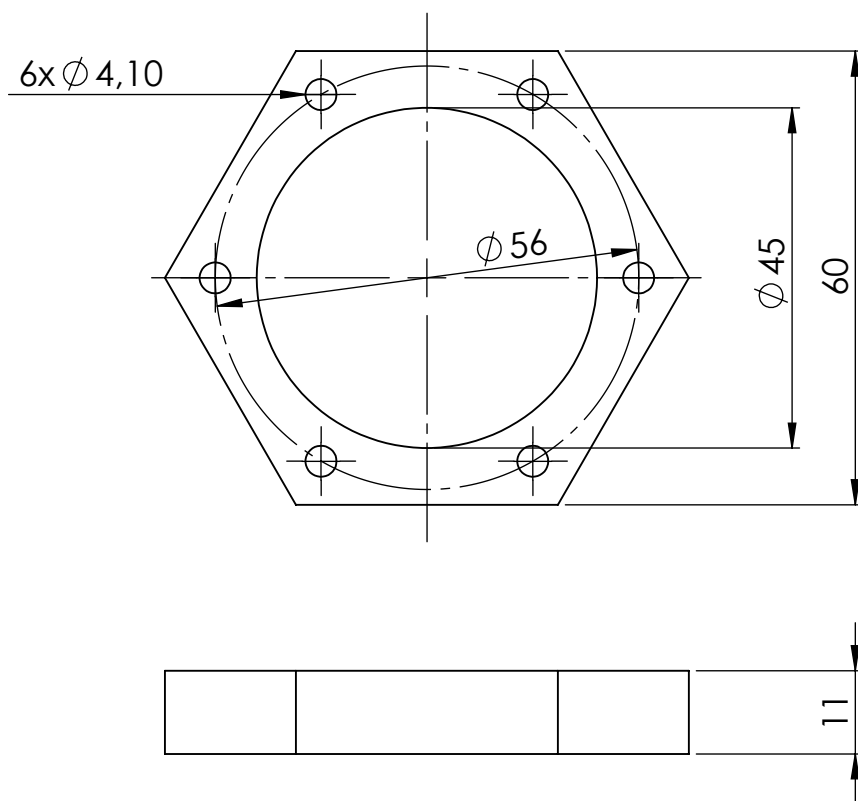
C

B

B

A

A



Fakulta elektrotechnická ZČU Plzeň
Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

číslo přílohy:

12

Diplomová práce: Stavba demonstračního soustrojí

formát výkresu:

A4

Název výkresu: Rotorová podložka

číslo výkresu:

8

datum:

10.1.2018

Zpracoval: Bc. Zdeněk Frank

Vedoucí práce: Doc. Ing. Karel Hruška, Ph.D.

měřítko:

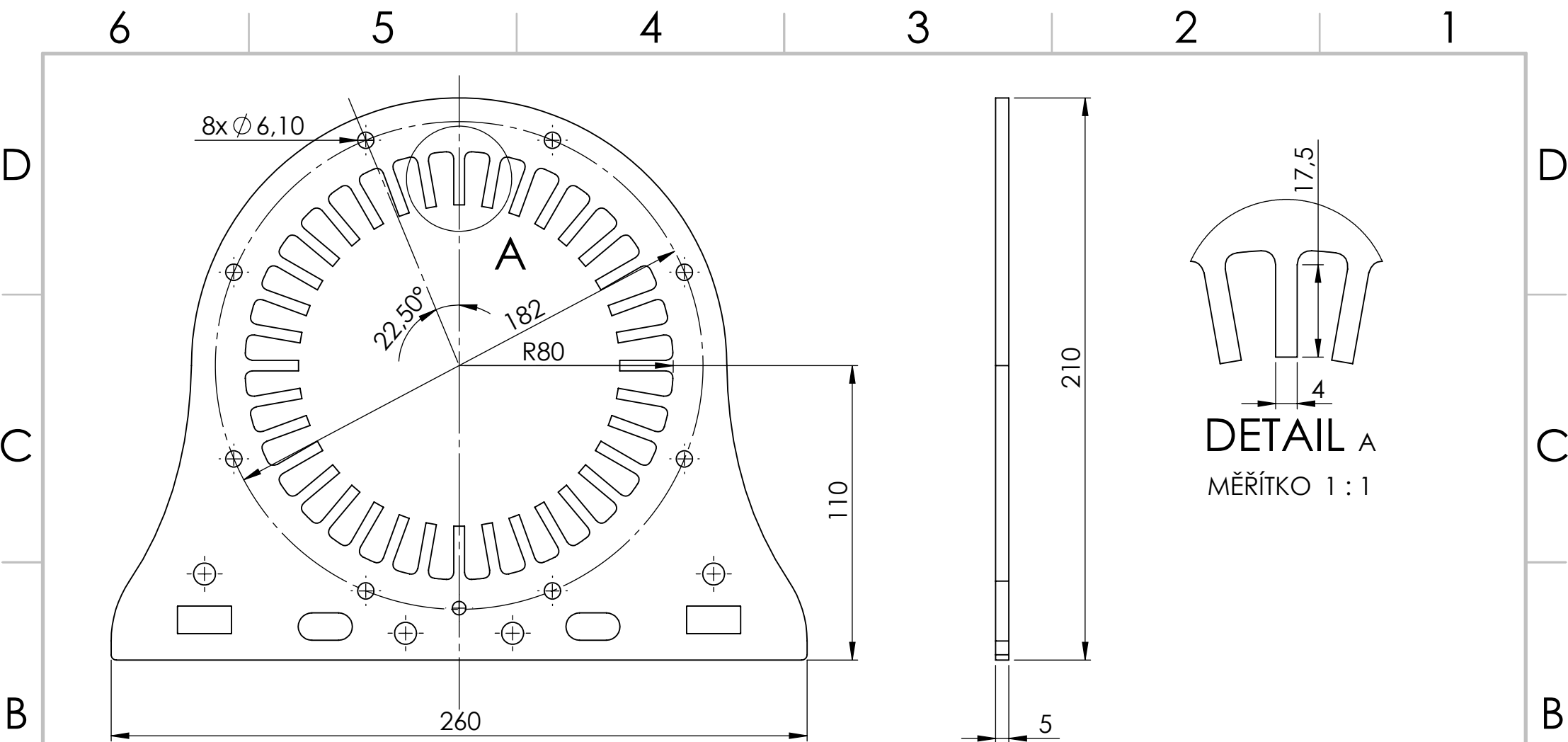
1:1

4

3

2

1



Fakulta elektrotechnická ZČU Plzeň
Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

číslo přílohy:

13

Diplomová práce:

Stavba demonstračního soustrojí

formát výkresu:

A4

Název výkresu:

Statorový stahovací plech

číslo výkresu:

9

datum:

10.1.2018

Zpracoval:

Bc. Zdeněk Frank

Vedoucí práce:

Doc. Ing. Karel Hruška, Ph.D.

měřítko:

1:2

4

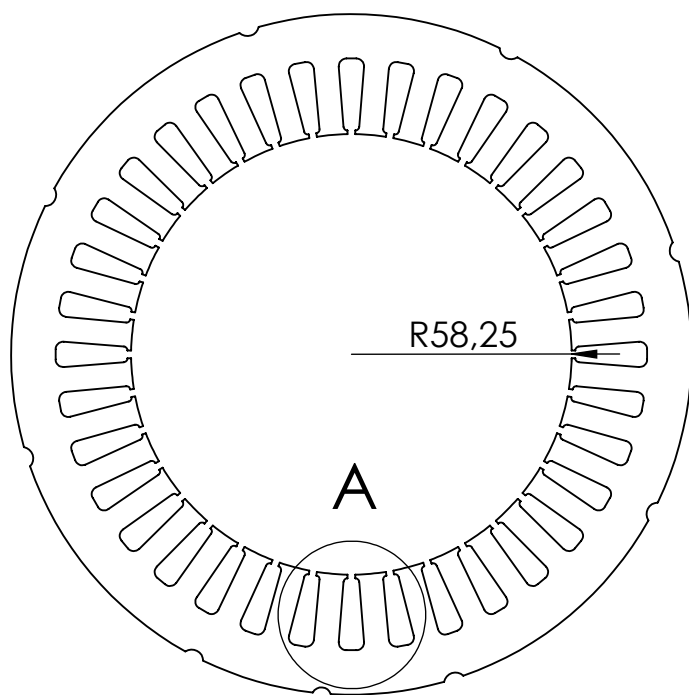
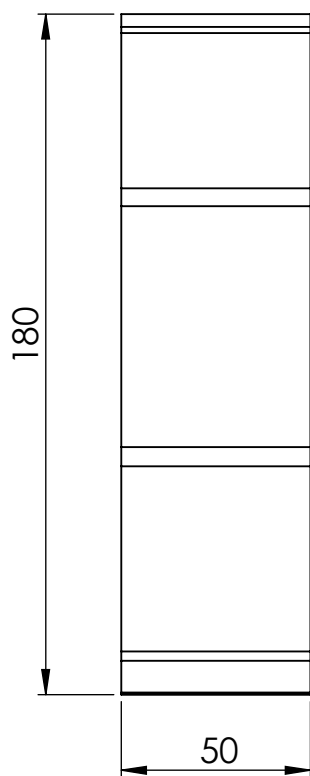
3

2

1

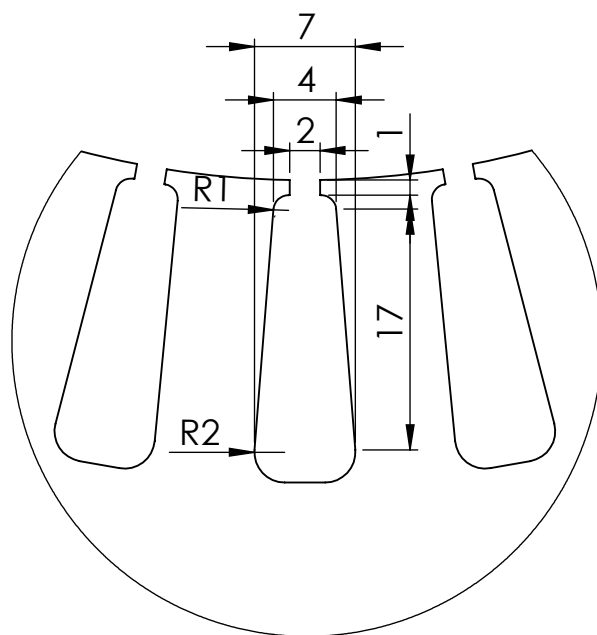
F

F



DETAIL A

MĚŘÍTKO 2:1



D

D

C

C

B

B

Fakulta elektrotechnická ZČU Plzeň
Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

číslo přílohy:

14

Diplomová práce: Stavba demonstračního soustrojí

formát výkresu:

A4

Název výkresu:
Statorový paket

číslo výkresu:

10

datum:

10.1.2018

Zpracoval: Bc. Zdeněk Frank

Vedoucí práce: Doc. Ing. Karel Hruška, Ph.D.

měřítko:

1:2

A

A

4

3

2

1

4

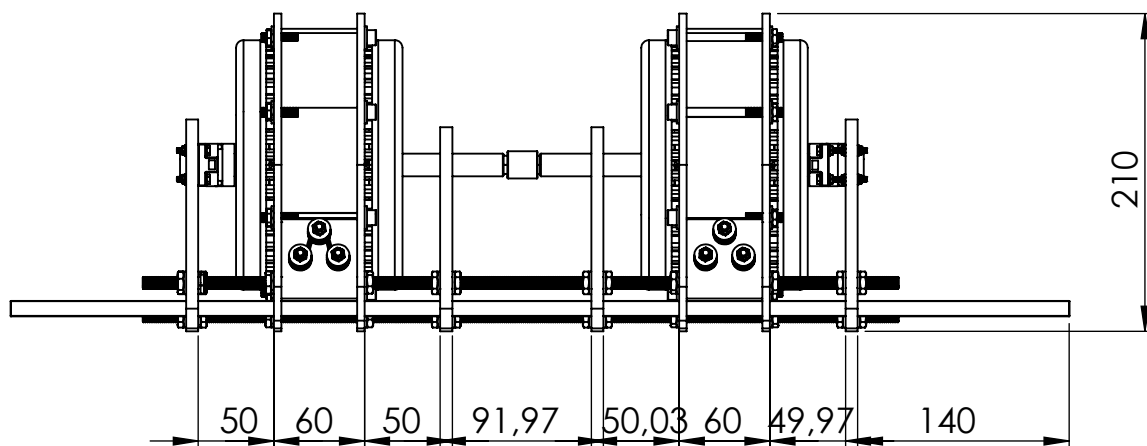
3

2

1

F

F

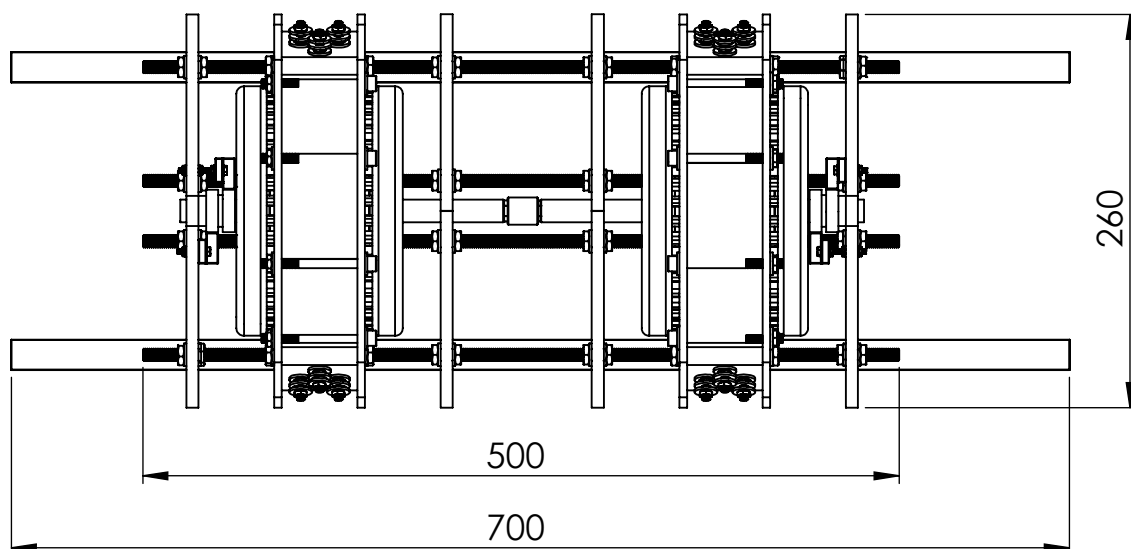


E

E

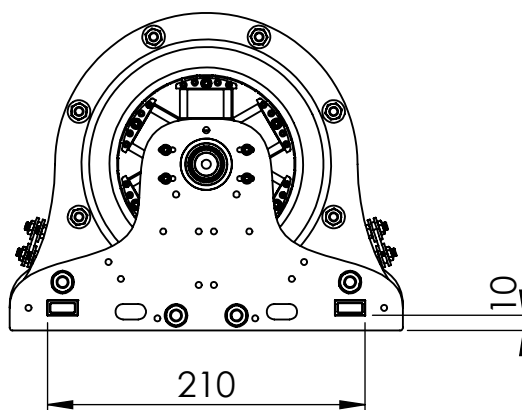
D

D



C

C



B

B

Fakulta elektrotechnická ZČU Plzeň
Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

číslo výkresu:

15

Diplomová práce:

Stavba demonstračního soustrojí

formát výkresu:

A4

Název výkresu:

Uspořádání demonstračního soustrojí

číslo výkresu:

11

datum:

10.1.2018

Zpracoval:

Bc. Zdeněk Frank

Vedoucí práce:

Doc. Ing. Karel Hruška, Ph.D.

měřítko:

1:5

A

A

4

3

2

1

Příloha 16: Fotogalerie popisující stavbu soustrojí



Foto 1: Jednotlivé komponenty stroje

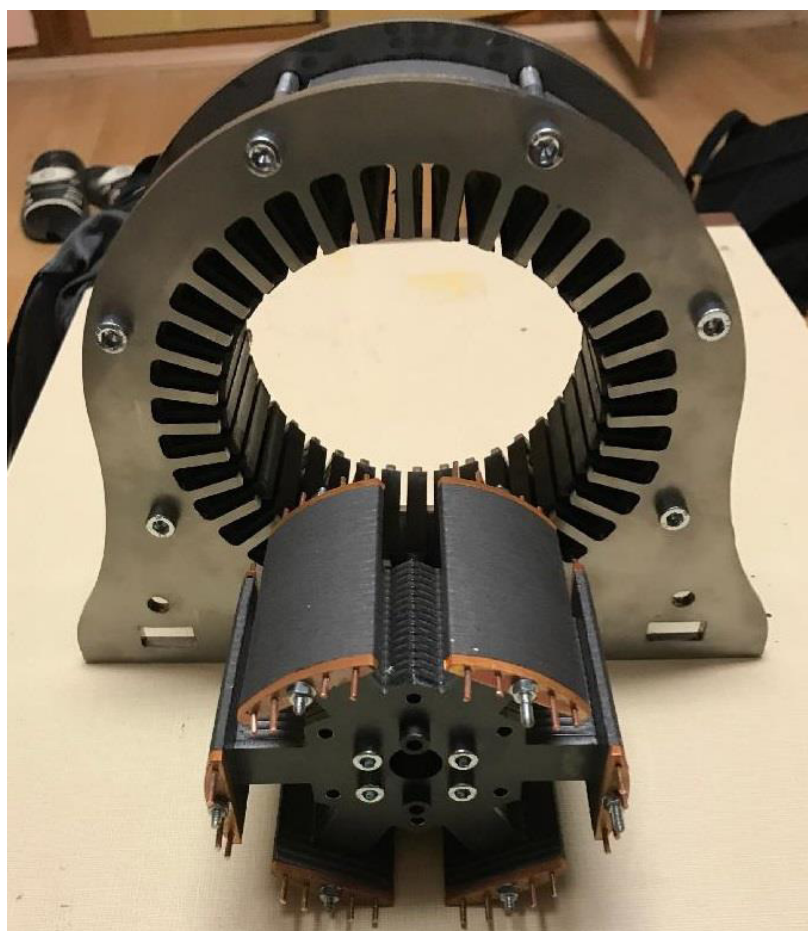


Foto 2: Stator a rotor stroje

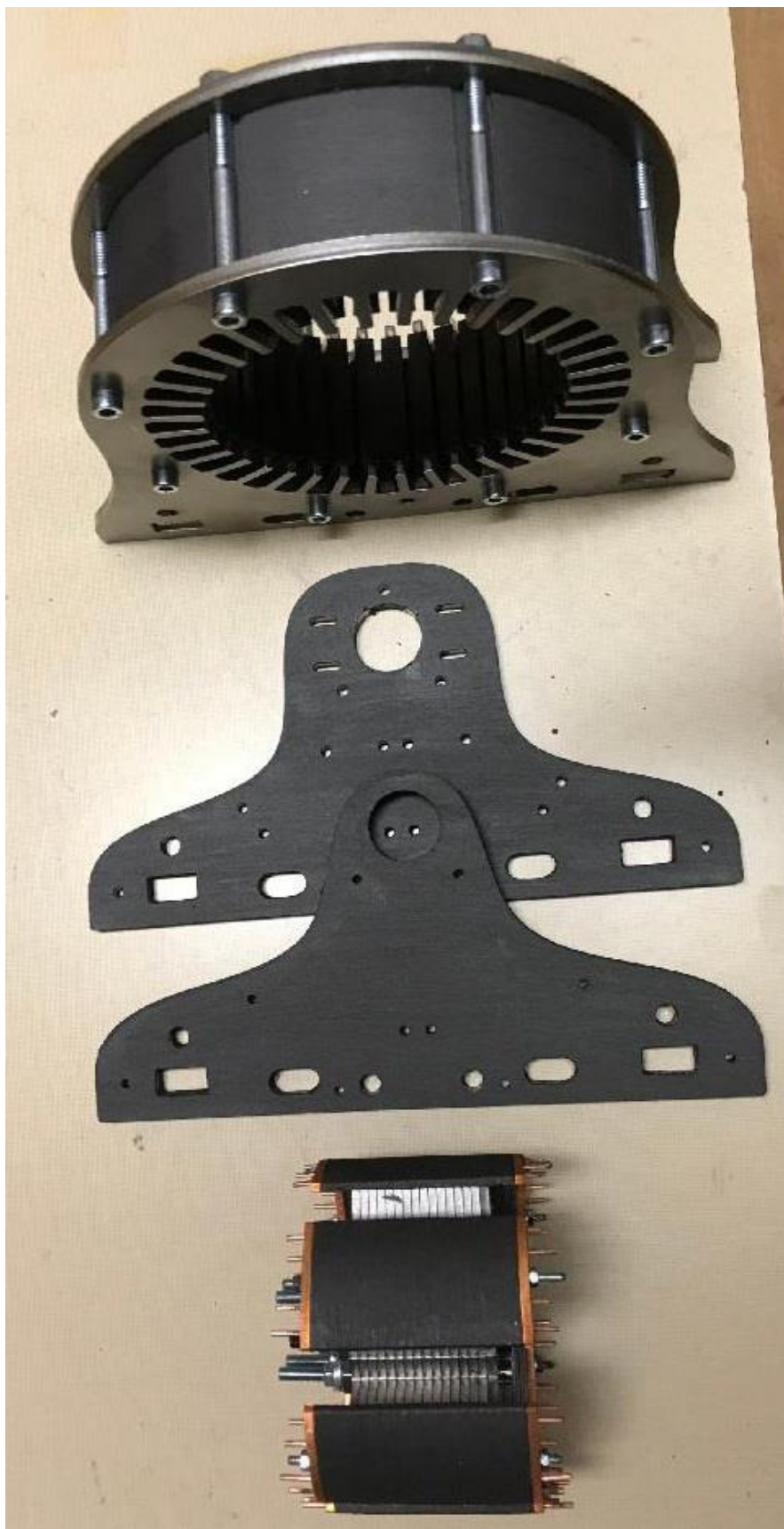


Foto 3: *Stator, rotor a ložiskové stojany*

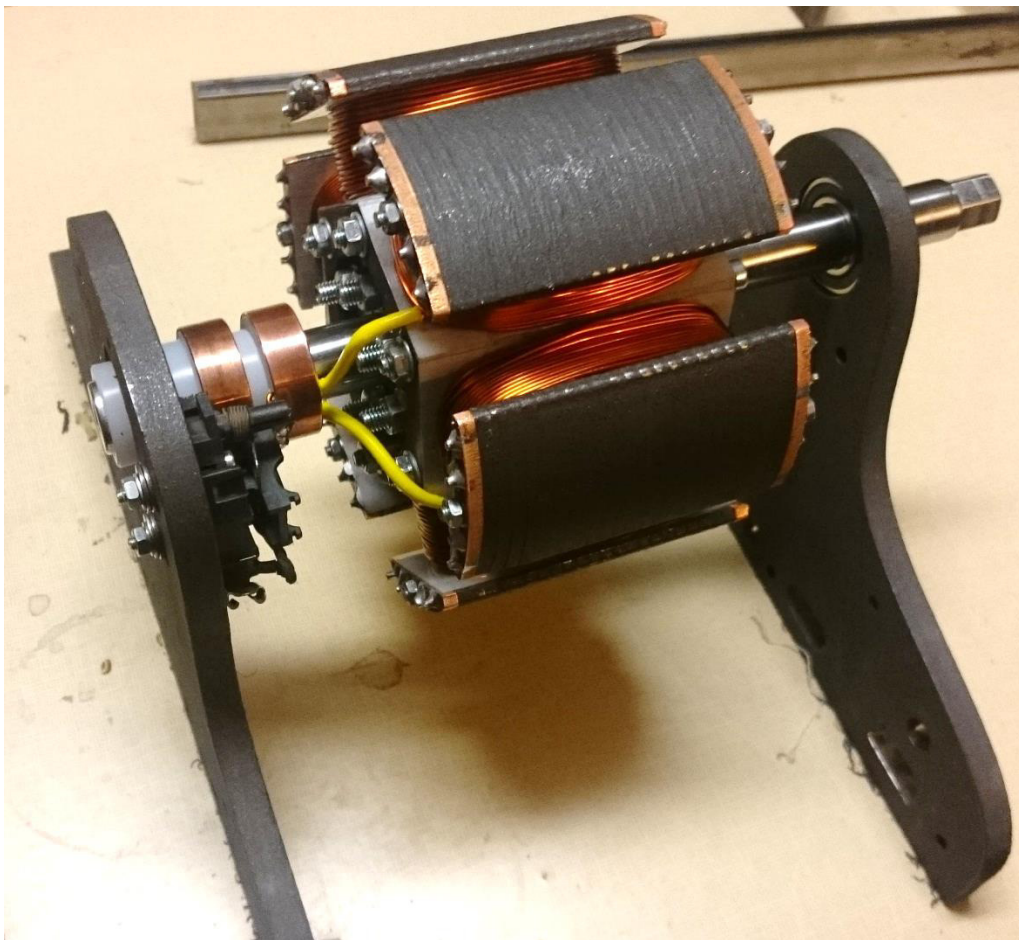


Foto 3: Kompletní rotor

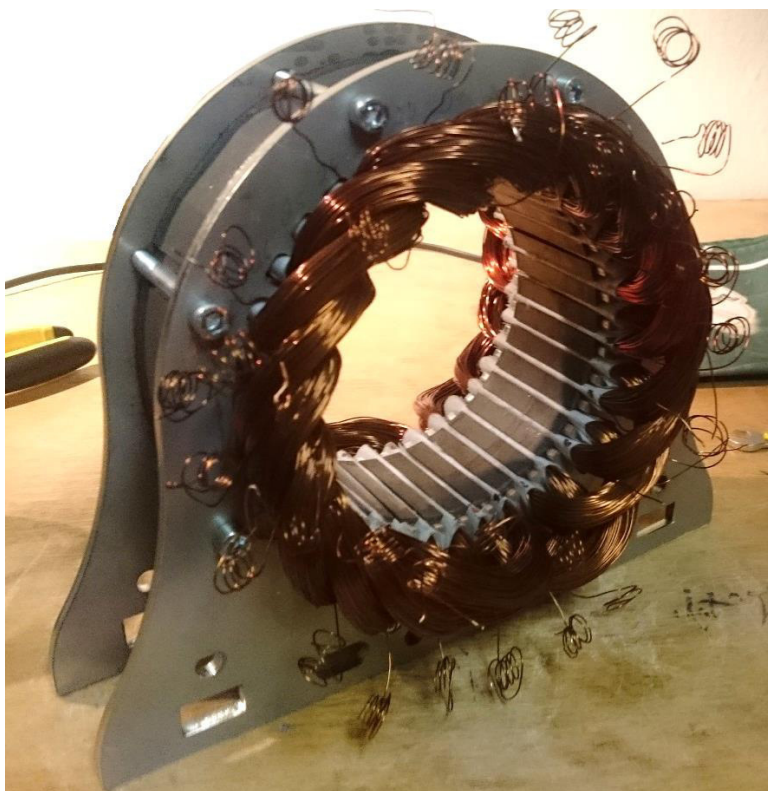


Foto 4: Stator s uloženými cívkami

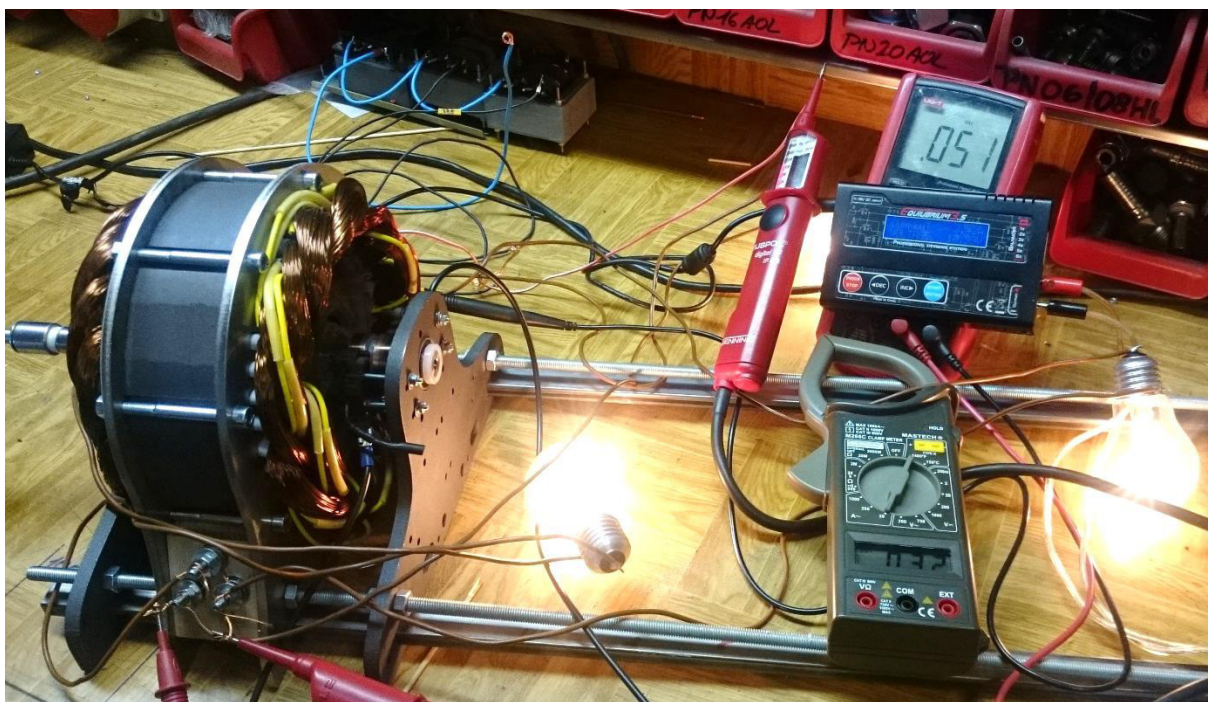


Foto 5: Zkušební test v generátorickém režimu

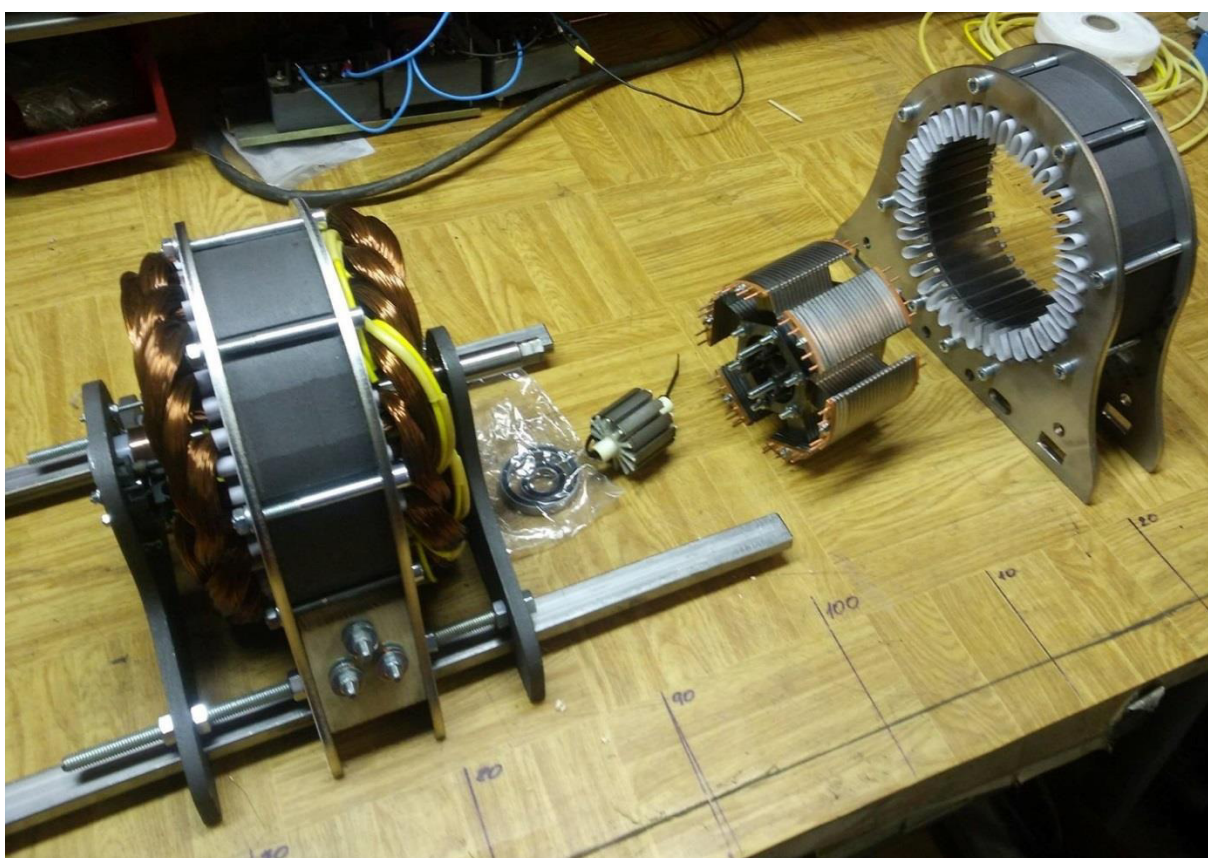


Foto 6: Montáž druhého stroje

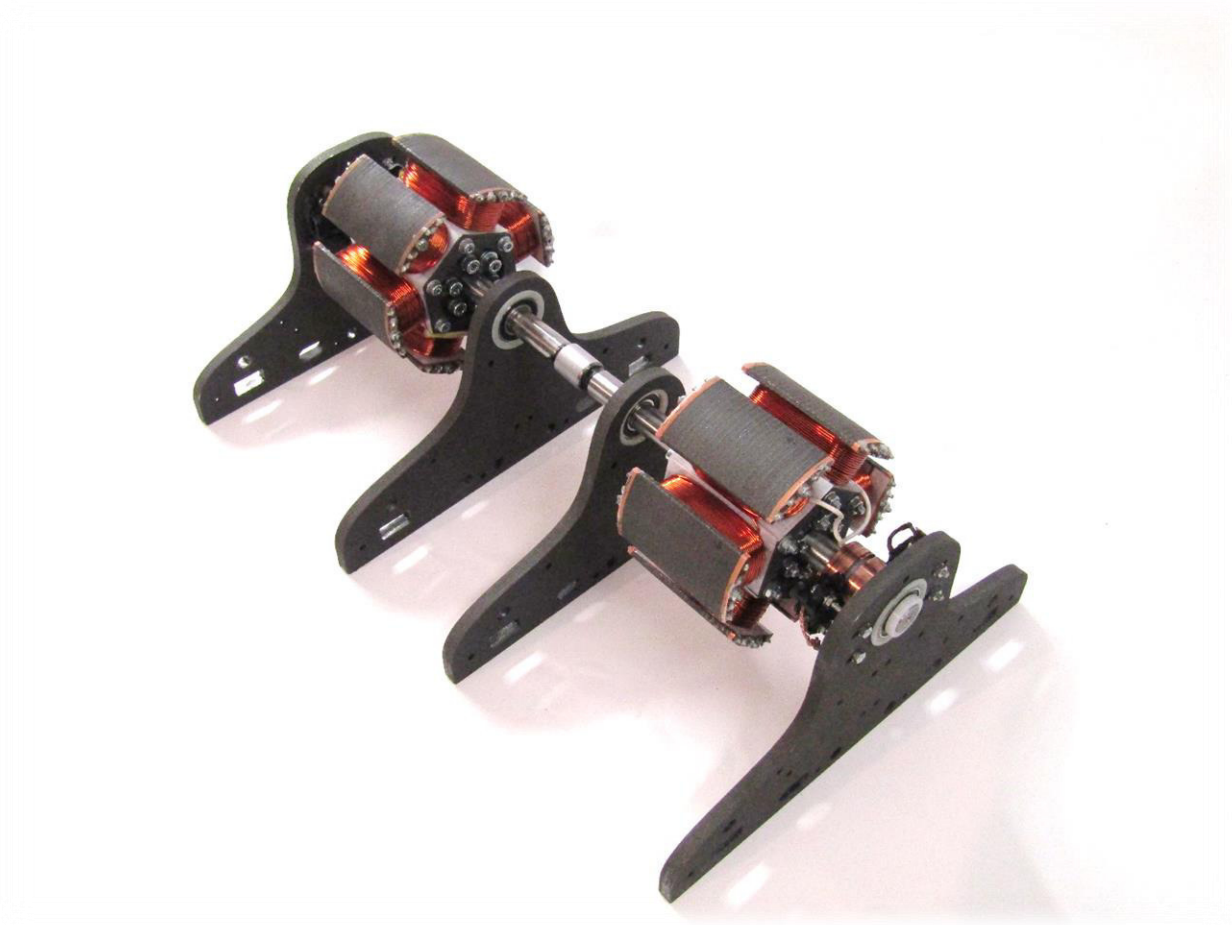


Foto 7: Rotory synchronního soustrojí

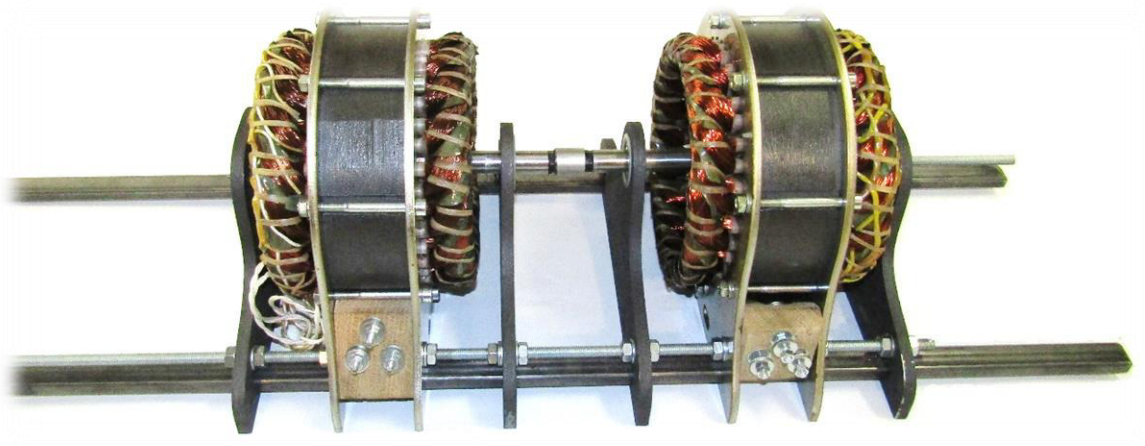


Foto 8: Synchronní soustrojí



Foto 9: 3D model rotorů synchronního soustrojí

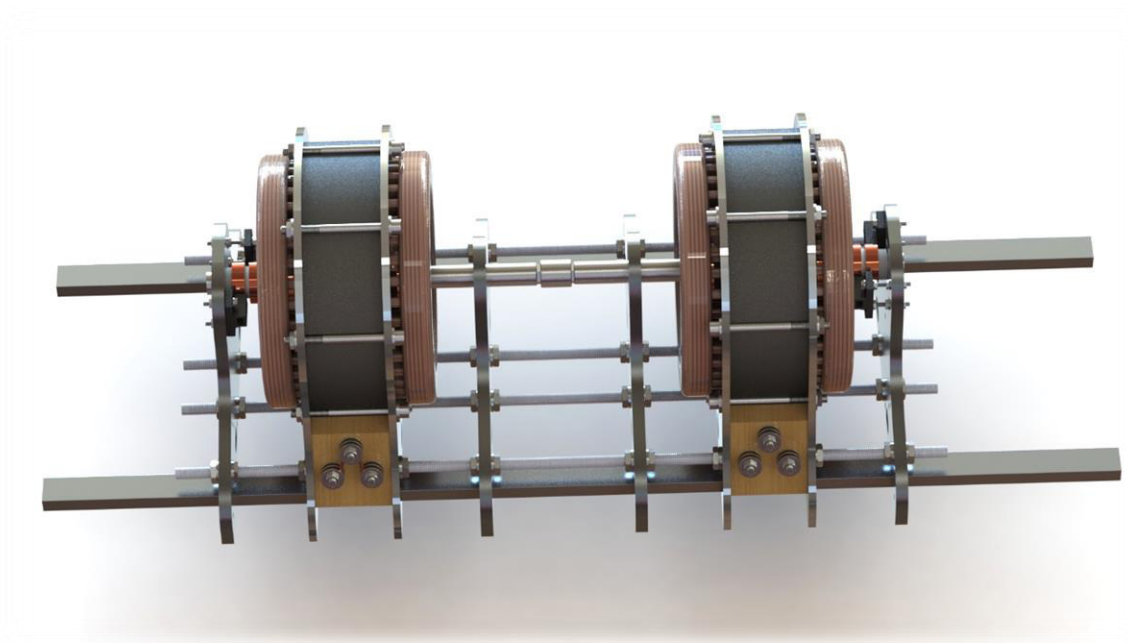


Foto 9: 3D model synchronního soustrojí