

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická
Katedra výkonové elektroniky a strojů

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Konstrukce elektrického stroje s permanentními magnety
v Halbachově uspořádání

Autor práce: **Bc. Tomáš Paveza**
Vedoucí práce: **Ing. Jiří Dražan**

2024

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2023/2024

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Tomáš PAVEZA**
Osobní číslo: **E22N0036P**
Studijní program: **N0713A060013 Výkonové systémy a elektroenergetika**
Specializace: **Elektrické stroje**
Téma práce: **Konstrukce elektrického stroje s permanentními magnety v Halbachově uspořádání**
Zadávací katedra: **Katedra výkonové elektroniky a strojů**

Zásady pro vypracování

1. Rešerše materiálů použitelných pro tento typ stroje.
2. Navrhněte konstrukční provedení stroje navrženého v předcházející bakalářské práci (viz doporučená literatura 1.).
3. Ověřte navrženou konstrukci z mechanického hlediska pomocí simulací.
4. Vytvořte prototyp daného stroje.
5. Ověřte funkčnost prototypu a změřte jeho charakteristické vlastnosti.


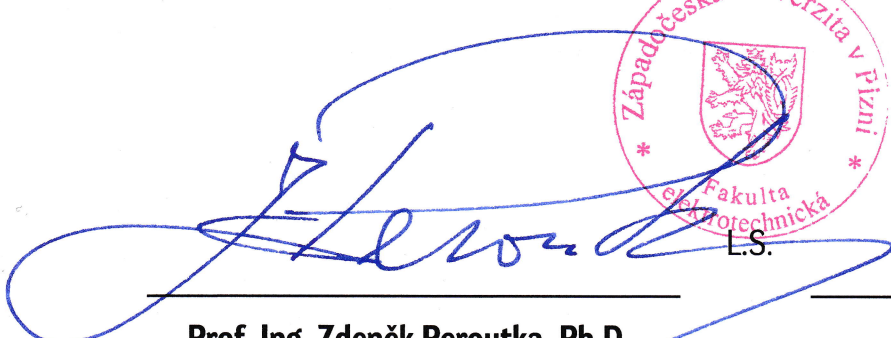
Rozsah diplomové práce: **40-60**
Rozsah grafických prací: **dle doporučení vedoucího**
Forma zpracování diplomové práce: **elektronická**

Seznam doporučené literatury:

1. PAVEZA, Tomáš. *Návrh bezkartáčového stejnosměrného motoru využívajícího Halbachovo pole*. Plzeň, 2022. Bakalářská práce. Západočeská univerzita v Plzni. Fakulta elektrotechnická. Vedoucí práce Jiří DRAŽAN.
2. HENDERSHOT, J. R. a T. J. E. MILLER. *Design of brushless permanent-magnet motors*. Hillsboro: Magna Physics Publishing, c1994. Monographs in electrical and electronic engineering. ISBN 978-1-881855-03-3.
3. Hanselman, Duane C. *Brushless permanent-magnet motor design*. [1st ed.]. New York: McGraw-Hill, 1994. x, 191 s. ISBN 0-07-026025-7.
4. PYRHÖNEN, Juha, Tapani JOKINEN a Valéria HRABOVCOVÁ. *Design of rotating electrical machines*. 2nd ed. Chichester: Wiley, 2014. ISBN 978-1-118-58157-5.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Jiří Dražan**
Katedra výkonové elektroniky a strojů

Datum zadání diplomové práce: **6. října 2023**
Termín odevzdání diplomové práce: **24. května 2024**



L.S.

Prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.
děkan



Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 6. října 2023

Abstrakt

Předkládaná diplomová práce se zabývá konstrukcí elektrického točivého stroje s permanentními magnety v Halbachově uspořádání. Konstrukce vychází z elektromagnetického návrhu z předchozí bakalářské práce. Cílem této práce je vytvořit 3D model stroje, pomocí simulací MKP ověřit navrženou konstrukci z mechanického hlediska a následně jej vyrobit za pomoci aditivních technologií a změřit jeho charakteristické parametry.

Klíčová slova

3D tisk, aditivní technologie, BLDC, bezkartáčový stejnosměrný motor, CAD, dvojitý rotor, radiální tok, Halbachovo pole, metoda konečných prvků, permanentní magnety, pětifázové vinutí, stator, statická mechanická analýza, vnější rotor, zubové vinutí

Abstract

The presented master thesis deals with the construction of an electric rotating machine with permanent magnets in a Halbach array configuration. The design is based on the electromagnetic design from the previous bachelor thesis. The aim of this thesis is to create a 3D model of the machine, to verify the proposed design from a mechanical point of view using FEM simulations and then to manufacture it using additive technologies and to measure its characteristic parameters.

Key Words

3D printing, additive technology, BLDC, brushless DC motor, CAD, double rotor, radial flux, Halbach array, finite element method, permanent magnets, five-phase winding, stator, static mechanical analysis, outer rotor, concentrated winding

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce, panu Ing. Jiřímu Dražanovi, za cenné rady a připomínky při vedení práce. Dále bych chtěl jmenovitě poděkovat panu Ing. Zdeňku Frankovi, za jeho pomoc při řešení praktické části měření v této práci. Děkuji také celému kolektivu Katedry výkonové elektroniky a strojů, za jejich cenné rady a praktické připomínky při konzultacích. Závěrem bych rád poděkoval své rodině a přítelkyni za jejich psychickou podporu během celého studia a při psaní této práce.

Obsah

Úvod.....	- 1 -
1 Konstrukční materiály pro BLDC stroje	- 2 -
1.1 Jho statoru a rotoru	- 2 -
1.1.1 Stator.....	- 2 -
1.1.2 Rotor	- 4 -
1.2 Vinutí.....	- 6 -
1.3 Permanentní magnety	- 7 -
2 Aditivní technologie	- 10 -
2.1 Množství a vzor výplně	- 12 -
2.2 Metody 3D tisku.....	- 14 -
2.2.1 FDM	- 14 -
2.2.2 SLA.....	- 18 -
2.2.3 SLM.....	- 20 -
2.2.4 SLS	- 20 -
2.2.5 DMLS	- 21 -
2.3 Metoda CMF	- 22 -
2.4 Uplatnění aditivních technologií v konstrukci elektrických strojů.....	- 23 -
3 Návrh konstrukčního provedení BLDC stroje.....	- 27 -
3.1 Vinutí statoru	- 27 -
3.2 Vstupní konstrukční parametry a omezení	- 28 -
3.3 Návrh jednotlivých částí stroje.....	- 29 -
3.3.1 Rotor	- 29 -
3.3.2 Stator.....	- 32 -
3.3.3 Vinutí a zuby statoru	- 33 -
3.3.4 Ložiska	- 35 -
3.3.5 Vyvedení mechanického výkonu.....	- 36 -
3.4 Návrh uchycení stroje na vnější konstrukci pro měření parametrů.....	- 36 -
4 Ověření návrhu konstrukce stroje z mechanického hlediska pomocí simulací..	- 39 -
4.1 Určení statického tíhového zatížení na statoru.....	- 39 -

4.1.1	Nastavení okrajových podmínek modelu statoru	- 39 -
4.1.2	Nastavení výpočetní sítě statoru	- 41 -
4.1.3	Výsledné deformace a napětí ve statoru	- 42 -
4.2	Určení deformací a mechanického napětí v rotoru	- 44 -
4.2.1	Nastavení okrajových podmínek modelu statoru	- 45 -
4.2.2	Nastavení výpočetní sítě rotoru	- 47 -
4.2.3	Výsledné deformace a napětí v rotoru	- 48 -
5	Stavba navrženého stroje	- 51 -
5.1	Parametry 3D tisku jednotlivých částí stroje	- 51 -
5.2	Výroba statoru	- 52 -
5.3	Vinutí	- 53 -
5.4	Rotor	- 56 -
5.5	Sestavení celého stroje	- 59 -
6	Měření a zkoušení parametrů navrženého stroje	- 60 -
6.1	Měření a výpočty parametrů vinutí	- 61 -
6.2	Měření nakrátko	- 63 -
6.3	Měření naprázdno	- 64 -
6.3.1	Měření velikosti indukovaného napětí	- 65 -
6.3.2	Měření ztrát naprázdno v generátorickém režimu	- 67 -
6.4	Oteplovací zkouška a stanovení teoretického výkonu stroje	- 69 -
7	Porovnání parametrů z naměřených hodnot s parametry simulací MKP	- 74 -
7.1	Konečno prvkový model navrženého stroje	- 74 -
7.2	Nastavení výpočetní sítě	- 74 -
7.3	Hledání jmenovitého bodu stroje při jmenovitých otáčkách	- 75 -
7.4	Porovnání průběhu indukovaného napětí získaného výpočtem MKP a průběhu získaného měřením	- 77 -
	Zhodnocení a závěr	- 79 -
	Literatura	- 81 -
	Přílohy	I

Seznam symbolů a zkratek

Značka	Popisek	Jednotka
a_{cU}	Rázová houževnatost	(kJ/m ²)
B	Magnetická indukce	(T)
D	Průměr	(m)
E	Youngův modul	(Pa)
f	Frekvence	(Hz)
F_g	Tíhová síla	(N)
G	Modul pružnosti ve smyku	(Pa)
H	Intenzita magnetického pole	(A/m)
I	Elektrický proud	(A)
J	Proudová hustota	(A/mm ²)
K	Modul objemové pružnosti	(Pa)
l	Délka	(m)
L	Indukčnost	(H)
m	Počet fází; hmotnost	(-), (kg)
M	Točivý moment	(Nm)
N	Počet závitů cívky	(-)
n	Mechanické otáčky	(ot/min)
P	Elektrický činný výkon	(W)
Q	Počet drážek	(-)
r	Poloměr	(m)
R	Elektrický odpor	(Ω)
S	Průřez	(mm ²)
T	Teplota	(°C), (K)
t	Čas	(s)
T_C	Curieova teplota	(°C)
U	Elektrické napětí	(V)
V	Objem	(m ³)
X	Reaktance	(Ω)
Z	Impedance	(Ω)

μ	Poissonovo číslo; převod řemenu	(-)
μ_0	Permeabilita vakua	(H/m)
μ_r	Relativní permeabilita	(-)
ρ	Objemová hustota; měrný odpor	(kg/m ³), ($\Omega \cdot m$)
σ_0	Pevnost v ohybu	(Pa)
σ_T	Pevnost v tahu	(Pa)
ω	Úhlová rychlost	(rad/s)

Úvod

Elektrické točivé stroje s vysokou hustotou výkonu jsou v současnosti velkým trendem v oblasti vývoje a jejich aplikací. Bezkartáčové stejnosměrné stroje (BLDC) jsou typem elektrických točivých strojů s permanentními magnety a jsou velmi oblíbené v oblasti lehké trakce právě z důvodů jejich velmi vysoké hustotě výkonu a díky rozmachu polovodičové techniky není obtížné tyto stroje efektivně napájet a řídit. Existuje nespočet konstrukčních možností a variací těchto strojů a lze říci, že jejich klasická konstrukční řešení jsou již na kraji svých možností.

V dnešní době je problematika zdokonalování a inovací tradičních elektrických strojů téměř na maximu svých možností a i malého dalšího zlepšení lze dosáhnout jen s velkým úsilím a vysokými náklady. Jejich vývoj vyžaduje mnohem více inovativních přístupů, pro zvýšení jejich výkonu, účinnosti a udržitelnosti. Jediným řešením v jejich vývoji se jeví zcela nové metody a využitím radikálně nových přístupů k topologii, materiálům a výrobě. Aditivní výroba (AM) se stala významnou metodou, která mění podobu komponent elektrických strojů, od magnetických obvodů přes vinutí až po komponenty pro odvádění a vedení tepla. V oblasti magnetických obvodů je schopností AM vyrábět velmi komplexní struktury, které jsou optimalizovány pro nejefektivnější vedení magnetického toku jhem. V oblasti vinutí se schopnosti AM projevují obdobně, tedy v inovativních řešeních a koncepcích, které silně zmírňují účinky střídavých proudů a komplexním chlazením účinně odvádějí vzniklé ztrátové teplo a zároveň zmenšují hmotnost. Proto je této aktuální problematice věnována v této diplomové práci samostatná kapitola, jako alternativa pro materiály a konstrukce elektrických strojů metodou AM.

Cílem této diplomové práce je tedy konstrukčně navrhnout BLDC stroj s radiálním směrem toku za pomoci AM dle dostupných prostředků a možností s co možná největším výkonem. Návrh vychází z předchozí bakalářské práce, kde byl stroj navržen elektromagneticky zjednodušeně ve 2D. Konstrukce tohoto konkrétního stroje je v mnoha ohledech netradiční, například použitím dvou spolu spojených rotorů, soustavou permanentních magnetů v Halbachově uspořádání a použitím pětifázového systému vinutí statoru.

1 Konstrukční materiály pro BLDC stroje

V současnosti se bezkartáčové stejnosměrné stroje (BLDC) používají v širokém spektru aplikací. Od malých strojů v modelářství, v elektrickém nářadí a spotřebičích, v malé i středně velké elektrické trakci (elektrokoloběžky, elektrokola, elektromobily apod.) přes výrobní linky a přesné manipulátory až po letectví. V závislosti na jejich konkrétní aplikaci jsou v při jejich konstrukci použity správné materiály.

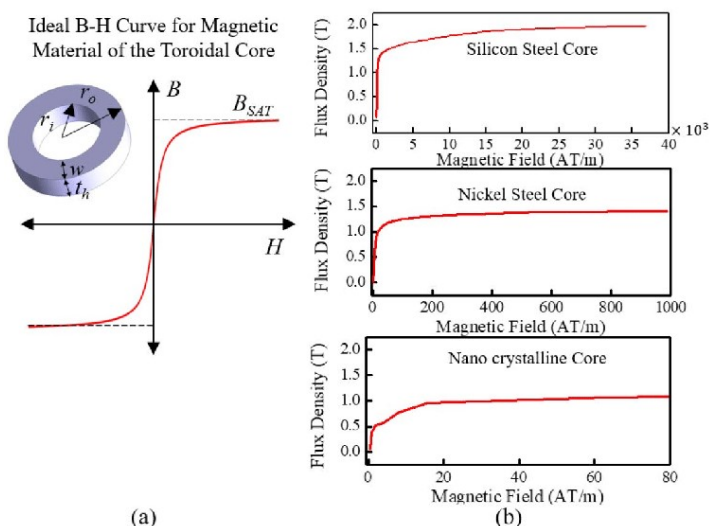
Obecně je výběr konstrukčních materiálů pro BLDC stroje závislý na požadavcích na výkon, účinnost a provozní podmínky motoru. Je důležité vybrat takové materiály, které splňují požadavky na mechanickou pevnost, elektrickou izolaci a tepelnou stabilitu, a zároveň zajišťují optimální výkon stroje.

1.1 Jho statoru a rotoru

1.1.1 Stator

Jho statoru společně se zuby statoru jsou obvykle vyrobeny z vrstvených plechů elektrotechnické oceli, které snižují ztráty vířivými proudy, a tedy zvyšují účinnost motoru. Elektrotechnická ocel (křemíková ocel) je běžně používaným materiálem pro statorová jádra díky svým dobrým magnetickým vlastnostem. Tato ocel se běžně vyrábí v definovaných tloušťkách 0,5 mm, 0,35 mm a výjimečně 0,2 mm. Plechy z elektrotechnické oceli se vyrábí válcováním za tepla ze slitiny železa a křemíku, s obsahem křemíku obvykle okolo 1 až 4 %. Jednotlivé plechy, ze kterých je složeno jho, je třeba od sebe vzájemně odizolovat, například impregnačním lakem [1] [2].

Výsledné plechy se buď lisují (stříhají) do požadovaných tvarů, nebo se vypalují výkonnými lasery. V případě lisování dochází k otřepům na hranách plechů a je poté problematické tyto plechy vyrovnaně skládat do svazků (paketů). Naproti tomu vypalované plechy bývají přesnější a jednodušší na výrobu, nicméně na hranách vznikají opalované hrany, kde materiál „teče“. Oba tyto nechtěné jevy zvyšují odpor a snižují efektivnost plechů [1] [2].



Obr. 1.1 a) Idealizovaná B-H charakteristika pro magnetický materiál jha, b) Porovnání materiálů z hlediska jejich křivky magnetizace [3]

Elektrotechnické plechy se vyrábí v řadách Mx-yA, každé s odlišnými vlastnostmi. V tabulkách se pak uvádí například jejich měrné ztráty p (W/kg) při definované hodnotě magnetické indukce B (T) a frekvence f (Hz), nebo intenzita magnetického pole max. H_{eff} (A/m) pro $B = 1,5$ T. Pro plechy řady M350-50A jsou jejich typické parametry zobrazeny na Obr. 1.2.

T	W/kg at 50 Hz	VA/kg at 50 Hz	A/m at 50 Hz	W/kg at 100 Hz	W/kg at 200 Hz	W/kg at 400 Hz	W/kg at 1000 Hz	W/kg at 2500 Hz
0,1	0,02	0,08	36,4	0,06	0,17	0,48	2,02	8,34
0,2	0,09	0,20	48,1	0,24	0,62	1,75	7,15	29,0
0,3	0,18	0,36	56,1	0,50	1,30	3,62	14,7	60,1
0,4	0,30	0,54	63,2	0,81	2,15	6,02	24,6	104
0,5	0,44	0,75	70,2	1,18	3,17	8,96	37,2	162
0,6	0,59	0,99	77,5	1,60	4,36	12,5	53,1	241
0,7	0,76	1,27	85,6	2,08	5,73	16,6	72,7	343
0,8	0,95	1,58	94,8	2,62	7,31	21,5	96,9	474
0,9	1,16	1,94	106	3,21	9,09	27,2	126	638
1,0	1,39	2,39	122	3,88	11,1	33,8	162	840
1,1	1,65	2,96	146	4,61	13,4	41,5	204	1079
1,2	1,95	3,76	185	5,43	16,0	50,4	254	1360
1,3	2,29	5,11	264	6,37	18,9	60,4	312	1679
1,4	2,75	8,40	481	7,53	22,3	72,1	378	2036
1,5	3,29	19,8	1200	8,99	26,6	85,7	456	2316
1,6	4,41	54,1	3025					
1,7	4,77	124	6186					
1,8	5,00	238	10720					

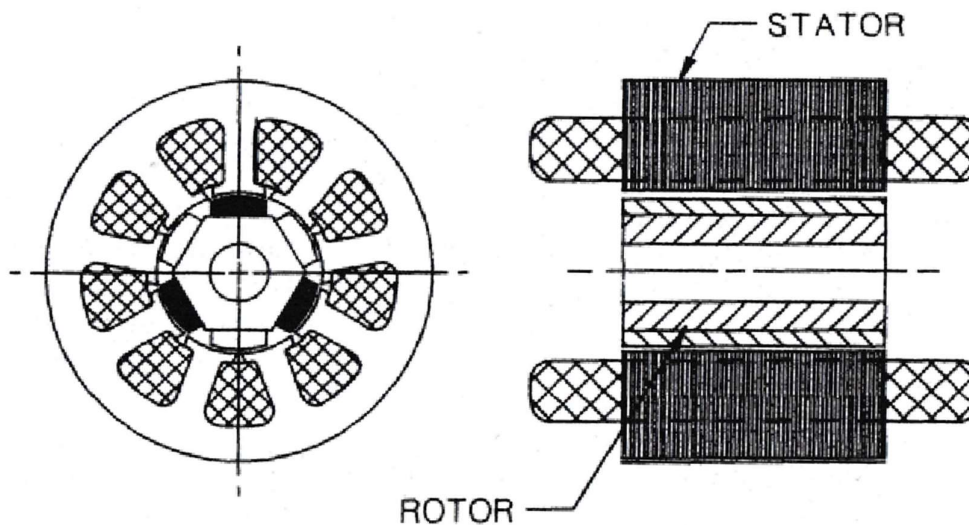
Obr. 1.2 Tabulka parametrů elektrotechnických plechů řady M350-50A pro různé frekvence [3]

1.1.2 Rotor

Pro rotor BLDC motoru se často používají materiály s vysokou permeabilitou, jako je měkká magnetická ocel, která umožňuje uzavírat magnetické pole, resp. magnetický tok a zvyšuje účinnost motoru. Výjimkou může být rotor navržený v této práci s tzv. Halbachovo polem permanentních magnetů, kde se magnetický tok uzavírá i bez přítomnosti „železa“.

BLDC stroje lze rozdělit podle konfigurace rotoru na dva typy. Na stroje s vnitřním rotorem a s vnějším rotorem (v anglické literatuře označován jako „interior-rotor“ a „exterior-rotor“, resp. „inrunner“ a „outrunner“) a každý z nich mají jiné výhody a nevýhody [1].

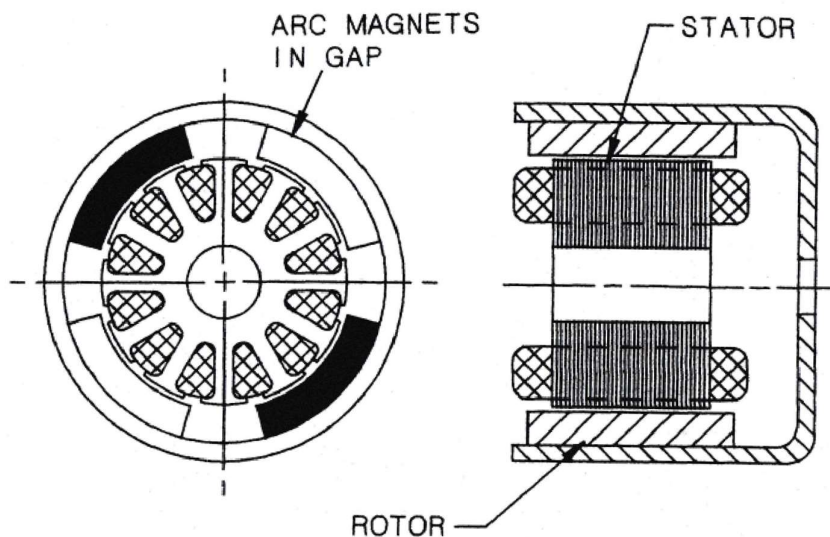
Stroje s vnitřním rotorem mají obdobnou konfiguraci jako klasické asynchronní, nebo synchronní stroje. Výhodou strojů s touto konfigurací je jejich dynamika a vyšší hodnoty točivého momentu. Naopak nevýhodou této konfigurace je její omezení mechanických otáček, z důvodu, aby se permanentní magnety uložené na rotoru při velkých odstředivých silách neodlepily. Proto je tato konfigurace volena do aplikací, kde není potřeba vyšších mechanických otáček. Případně je možné zvolit jiné uložení permanentních magnetů, které ale mají zásadní vliv na parametry stroje (větší vzduchová mezera, vyšší rozptylová indukčnost atd.). Tato konfigurace je hojně používána v menších motorech RC modelů a dronů [1].



Obr. 1.3 Konfigurace BLDC stroje s vnitřním rotorem – převzato [1]

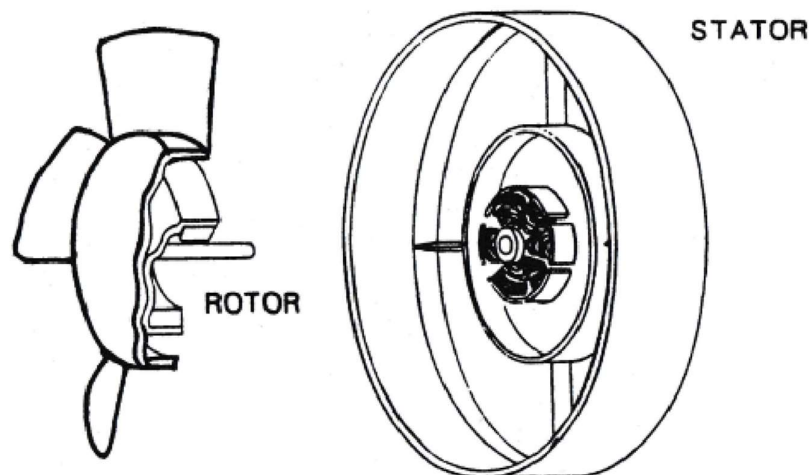
Rotor může být, v závislosti na velikosti stroje, vyroben z jednoho kusu oceli, případně vyroben z magnetických plechů, vzájemně od sebe izolovaných [1].

Stroje s vnějším rotorem jsou nejrozšířenější konfigurací. Rotor je opět tvořen z magneticky měkké oceli ve tvaru misky, nicméně v tomto případě jej nelze vyrobit z elektrotechnických plechů. Magnety jsou uloženy a přilepeny uvnitř rotoru a díky odstředivým silám jsou drženy uvnitř stroje, což nabízí využití v aplikacích, kde je zapotřebí vysokých otáček. Mezi výhody (v určitých případech i nevýhoda) patří použití pouze jednoho ložiska (viz Obr. 1.4 a Obr. 1.5), což snižuje celkovou cenu [1].



Obr. 1.4 Konfigurace BLDC stroje s vnějším rotorem – převzato [1]

Tato konfigurace vyžaduje velmi přesné vyvážení, právě z důvodu větší rotující hmoty a kvůli použití pouze jednoho ložiska, nicméně i přes to je velmi oblíbená například v modelářství a v bezpilotních letounech a dronech.



Obr. 1.5 BLDC motor použitý jako ventilátor na vnějším rotoru – převzato [1]

BLDC stroje s vnějším rotorem se často používají v menších chladících ventilátorech elektroniky, v dnes již dosluhujících HDD discích, ve ventilátorech vzduchotechniky a v modelářství. V těch nejjednodušších BLDC strojích, například PC ventilátory, mají magnety na rotoru z jednoho kusu, feritového kroužku, který je zmagnetován až v rotoru (případně mimo něj). [1].

1.2 Vinutí

Vinutí představuje aktivní část elektrického obvodu stroje, sestávající z cívek propojených a vzájemně spřažených magnetickým tokem. Cívky se skládají z izolovaných i neizolovaných drátů, tyčí, případně pásek a izolace vinutí spolu s dalšími konstrukčními prvky. Cívka může být utvořena několika závity nebo v některých případech pouze z jediného závitu. Vinutí v elektrických točivých strojích se dělí do různých skupin podle účelu, použití, provedení a dalších hledisek.

Tvar vodičů vinutí BLDC strojů může být kruhový což se týká hlavně vodičů s menšími průřezy, nebo může být obdélníkový tedy u průřezů větších.

Vinutí se nejčastěji skládá jako zubové, výjimečně jako postupné. U malých strojů je hlavní výhodou zubového vinutí jeho cena a náročnost na výrobu. Obecněji ale hlavní výhodou zubového vinutí je to, že čela vinutí jsou mnohem menší oproti rozloženému vinutí, což je výhodné, protože čela nepřispívají do tvorby momentu stroje.

Pro izolaci a ochranu statorového vinutí a elektronických komponent v BLDC motoru se často používají různé izolační materiály ale nejčastěji v podobě laku, jako jsou epoxydové pryskyřice, polyamidy a další izolační materiály na podobných bázích. Izolační systémy jsou velkou problematikou, kdy proti sobě stojí dva hlavní požadavky. Prvním je elektroizolační schopnost, tedy aby izolace byla co nejsilnější a druhým je odvod ztrátového tepla, tedy aby izolace byla co nejtenčí. V praxi se většinou hledá kompromis mezi těmito oběma požadavky.

1.3 Permanentní magnety

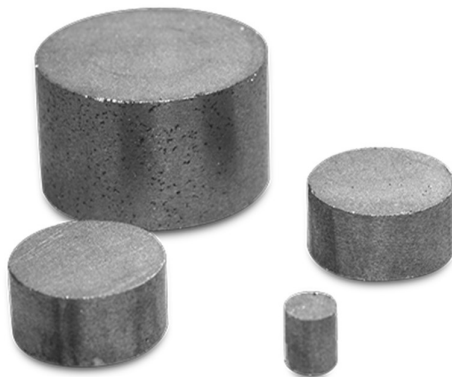
Permanentní magnety jsou nedílnou součástí BLDC strojů, ale i jiných synchronních strojů, poskytujícími budící magnetické pole (v ideálních podmínkách trvalé) nezbytné pro jejich provoz. V elektrických strojích obecně se používají různé druhy permanentních magnetů, lišící se svými charakteristikami, výhodami a nevýhodami a pro každou aplikaci je tedy výhodné použít jiný typ.

Permanentní magnety typu neodym-železo-bór (přesněji $Nd_2Fe_{14}B$) jsou díky svým výjimečným magnetickým vlastnostem nejoblíbenější volbou pro mnoho moderních elektrických strojů. Vyznačují se nejvyšší hodnotou remanentní indukce (remanence) ze všech v současnosti známých typů magnetů. Udává se, že tyto magnety (obecně) dokáží udržet 1000x násobek své hmotnosti, tzn. že magnet o hmotnosti 10 g unese 10 kg železný předmět. Tyto magnety se běžně používají v bezkartáčových stejnosměrných motorech (BLDC) a jiných typech synchronních strojů s vysokou hustotou výkonu. Příklady magnetů, se kterými se lze běžně setkat, jsou zobrazeny na Obr. 1.6 [1].



Obr. 1.6 Příklady tvarů $NdFeB$ permanentních magnetů – převzato [4]

Samarium-kobaltové (SmCo) permanentní magnety jsou známé svou stabilitou při vysokých teplotách, a i celkovou odolností vůči demagnetizaci. Často se používají v aplikacích, kde jsou problémem extrémní teploty, například v letectví a vojenství.



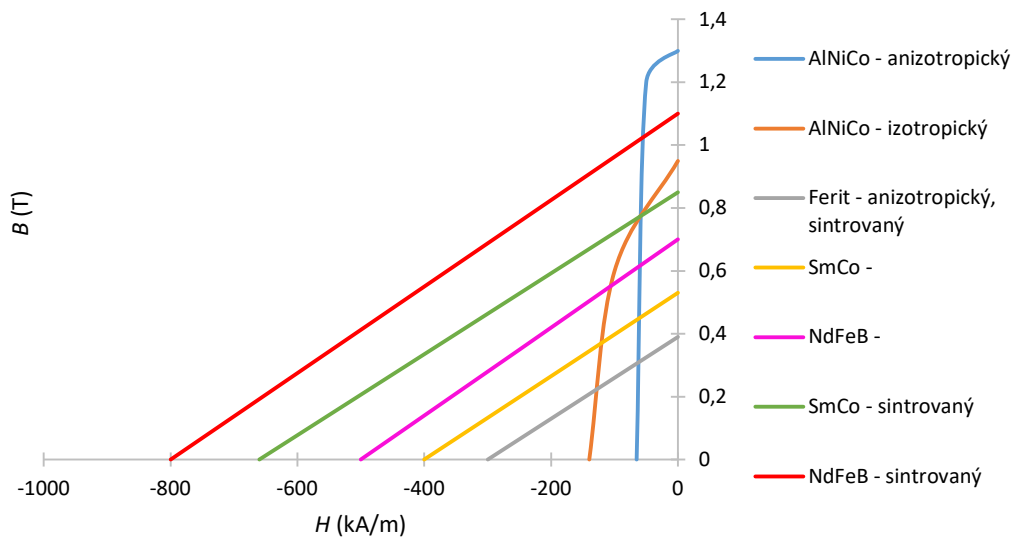
Obr. 1.7 SmCo permanentní magnety válcového tvaru – převzato [5]

AlNiCo (hliník-nikl-kobaltové) permanentní magnety, obdobě jako SmCo magnety, vynikají svojí stálostí v závislosti na teplotě a poměrně velkou remanencí. Obvykle se používají v malých motorech a v aplikacích, kde není kladen důraz na cenu.

Nejrozšířenějším typem permanentních magnetů jsou stále feritové permanentní magnety. Feritové permanentní magnety jsou vyrobeny keramických oxidů (feritů) pomocí metody spékání (sintrování). Jsou to současně nejvíce cenově příznivé a tedy i nejpoužívanější permanentní magnety. Vynikají velkou odolností proti korozi. Nejčastěji se s nimi lze setkat v malých strojích, resp. motorech v domácích spotřebičích. Nicméně v BLDC strojích se velmi zřídka používají, kvůli jejich malé remanentní indukci. Lze se s nimi setkat například u synchronních reluktančních strojích, kde jejich použití celkově zlepšuje parametry těchto strojů [1].

Tab. 1.1 Parametry vybraných permanentních magnetů při teplotě 20 °C – upraveno [1]

Veličina	Jednotky	AlNiCo	Ferit – anizotropický	SmCo - sintrovaný	NdFeB - sintrovaný
B_r	T	0,6 až 1,35	0,35 až 0,43	0,7 až 1,05	1,0 až 1,3
H_c	kA/m	40 až 130	180 až 400	800 až 1500	800 až 1900
μ_r	-	1,9 až 7	1,05 až 1,15	1,02 až 1,07	1,04 až 1,1
$(BH)_{max}$	kJ/m ³	20 až 100	24 až 36	140 až 220	180 až 320
Magnetizace	kA/m	200 až 600	600 až 1700	1600 až 4000	2000 až 3000
Měrný odpor	$\mu\Omega \cdot \text{cm}$	47	$> 10^4$	86	150
Maximální pracovní teplota T_{max}	°C	500 až 550	250	250 až 350	80 až 200
Curieova teplota T_c	°C	850	450	700 až 800	310 až 350
Hustota ρ	kg/m ³	7300	4900	8200	7400



Obr. 1.8 Typické BH charakteristiky vybraných permanentních magnetů pro teplotu 20°C – upraveno [1]

2 Aditivní technologie

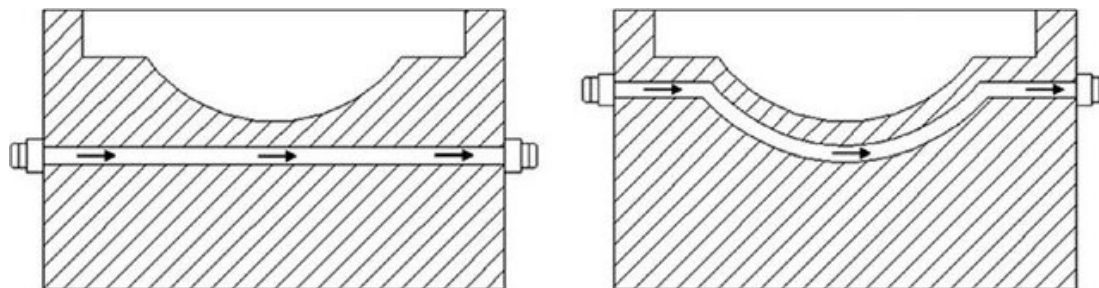
Aditivní technologie (AM, angl. additive manufacturing), nebo dnes běžněji známo jako 3D tisk, je takový proces, při kterém je vyráběn fyzický model z digitální předlohy. Vytváření modelu je dosaženo procesem postupným přidáváním (z angl. názvu „add“ neboli „přidat“) daného materiálu po vrstvách. Jedná se tedy o přesný opak metody subtraktivní (odebírání materiálu), kterou může být typicky obrábění. Tím vzniká jedna z hlavních výhod této metody vytváření modelů, a to je minimální, či dokonce žádný vznik odpadu a celkově minimalizace ztrát materiálu [6].

Tato technologie, lze dále rozdělit do tří kategorií, podle toho, kam výsledný výrobek směřuje:

- Rapid prototyping (RP)
- Rapid tooling (RT)
- Rapid manufacturing (RM)

Oblast prototypové výroby (RP) je oblastí výroby prototypů a nástrojů, které by jinak museli být obvykle velmi nákladně a složitě vytvářeny na zakázku běžnými metodami.

„Rapid tooling“ (RT) je oblastí zabývající se vytvářením výrobků sloužících jako nástroj pro další technologii výroby (například formy, podstavce apod.). Dalším příkladem velké výhody této technologie je výroba tzv. konformního chlazení, což je umístění chladících kanálů a cest komplikovaných tvarů v blízkosti plochy, která má být chlazena, které by se standartními metodami obtížně vyráběli (odléváním nebo vrtáním) [6].



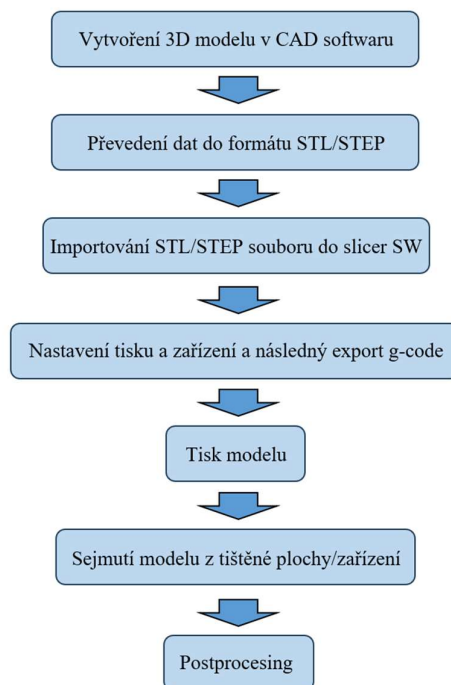
Obr. 2.1 Konvenční metoda chlazení (vlevo) a konformní chlazení (vpravo) – převzato [7]

Na Obr. 2.1 vpravo je zobrazen nejjednodušší příklad konformního chlazení, kde je zobrazena zmíněná chladící cesta (kanál) v blízkosti chlazené plochy a jak její tvar kopíruje.

Třetí zmíněnou oblastí je „Rapid manufacturing“ (RM), je oblastí, která charakterizuje výrobu modelu/dílu jako plně funkční a hotový výrobek. Obvykle se tedy jedná o výrobky kusové, případně o výrobky jinak velmi obtížně vyrobitelné [6].

Nicméně díky rozmachu aditivních technologií a snížení nákladů na výrobu touto metodou, se tato technologie již nepoužívá pouze jako prototypová výroba, ale již jako plná technologie pro výrobu finálních výrobků.

Aditivní technologie umožňují vyrábět přímo finální díly, bez nutnosti použití dalších technologií. Materiál, případně materiály, ze kterého se postupně z jednotlivých vrstev vytváří (tiskne) finální výrobek, je nejčastěji ve formě velmi jemného prášku, kapaliny, drátu, nebo pásu, v závislosti na metodě tisku, které jsou zmíněny dále. V principu mají téměř všechny metody stejný způsob tisku. Aby totiž bylo možné vyrobit požadovaný výrobek, resp. tvar, tak je zapotřebí přidávaný materiál natavit za pomoci laseru, nahřívání plochy, plazmy, elektronového svazku apod. V případě že je potřeba přidávaný materiál vytvrdit, použije se ultrafialových paprsků (metody 3D tisku jsou zmíněny v další kapitole). Před samotnou výrobou výrobků, je nejprve nutné připravit 3D model jakožto vstupní data. Pro to se využívá CAD softwaru [6].



Obr. 2.2 Postup při vývoji a výrobě součásti pomocí aditivními technologiemi – upraveno [6]

Aditivní technologie, jako ostatní technologie a metody výroby, mají svoje výhody i nevýhody. Nicméně je nutné zmínit, že technologické možnosti této technologie se stále vyvíjí a zdokonalují a jedná se tedy o velmi perspektivní obor.

Mezi obecné výhody a nevýhody lze uvést:

- Výhody
 - Výroba modelů velmi složitých tvarů
 - Snadná úprava 3D modelu pro změnu ve výrobě
 - Tisk komplexních součástí
 - Rychlost výroby
 - Mechanické vlastnosti

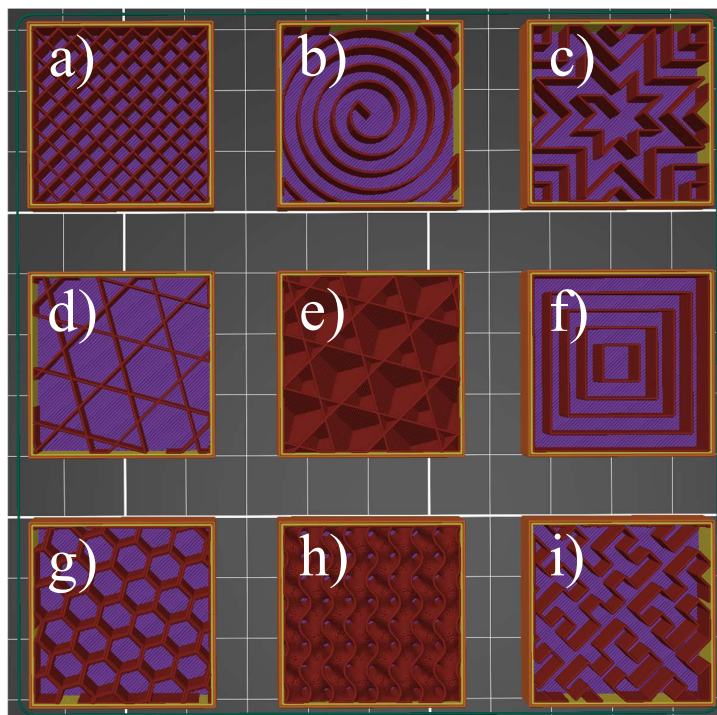
- Nevýhody
 - Nízká produktivita
 - Ladění a kalibrace výrobního procesu
 - Mechanické vlastnosti

Ze zmíněných výhod aditivní technologie výroby, lze považovat za hlavní například možnost výroby takových výrobků různých tvarů, které by standartními postupy výroby byly nevyrobitelné. To mimo jiné velmi urychluje dodací lhůty v případě zakázek na výrobu a také eliminuje nejrůznější sestavy komplexních součástí. Další velkou výhodou je změna výroby, například změna měřítka. Mezi nesporné nevýhody je produktivita, která je oproti rychlé sériové výrobě velmi nízká. Další nevýhodou se dá uvažovat výsledné mechanické vlastnosti výrobku, který může vykazovat odlišné vlastnosti v různých směrech (anizotropie), což ale v některých aplikacích nemusí být nutně nevýhoda. Různé metody tisku také mají například i odlišnou drsnost povrchu a pórovitost [6].

2.1 Množství a vzor výplně

Množství výplně má významný vliv na dobu tisku, stabilitu tisku a spotřebu filamentu. Nastavení se provádí pomocí procentuální hodnoty, kde 0 % představuje minimální výplň pro duté objekty a 100 % znamená úplné vyplnění (ale stále s konkrétním vzorem). Větší množství materiálu výrazně zlepšuje mechanické vlastnosti výtisku. S rostoucím množstvím výplně se zvyšuje i spojovací plocha mezi vrstvami, což zlepšuje adhezi mezi nimi a snižuje

riziko delaminace a lomu, což přispívá ke stabilitě tisku. Pro objekty mezi dutým a plně vyplněným je také možné použít různé vzory výplně, které ovlivňují mechanické vlastnosti a dobu tisku. Pro plně vyplněné objekty se obvykle používá přímočará výplň. Množství výplně má klíčový vliv na pevnost, efektivitu a rychlost tisku, což rozděluje tisky na estetické a funkční [8].



Obr. 2.3 Různé vzory výplně – PrusaSlicer

Na Obr. 2.3 jsou možné vidět různé druhy výplně, označeny od a) do i), kde

a) je označena přímočará výplň, což je jednoduchý vzor se vzájemně kolmými linkami, vytvářející mřížku, která poskytuje dobrou pevnost při zachování určité flexibility.

b) je označeno spirálové stočení („Archimedean chords“) Spirálovité stočení výplně usnadňuje naplnění tekutinou. Tento jednoduchý tvar umožňuje úsporu materiálu a času ve srovnání s přímočarou výplní. Archimédovská spirála, podobně jako u přímočaré výplně, zvyšuje pružnost modelu, zejména když je tisknut z elastického filamentu.

c) je označena osmiúhelníková spirála, jejíž tvar usnadňuje naplnění tekutinou díky větším prostorům vytvořeným touto specifickou formou výplně. Tento typ výplně rovněž přispívá k flexibilitě některých modelů.

d) je označena hvězda, kde výplň ve tvaru hvězdy vychází z trojúhelníků, přičemž linie jsou posunuty tak, aby vytvořily šesticípé hvězdy. Tento typ výplně je znovu utvářen pomocí lineárních prvků, které se navzájem kříží v rámci jedné vrstvy. Spotřeba materiálu a doba tisku jsou obdobné jako u trojúhelníku.

e) je kubická, která obsahuje určité linky, které se vzájemně protínají v jedné vrstvě, vytvářející krychli s jedním rohem orientovaným dolů. Výsledkem jsou uzavřené vzduchové kapsy, které mohou fungovat jako tepelná izolace nebo způsobit, že model plave (při použití voděodolných filamentů, například PETG). Doba tisku a spotřeba filamentu zůstávají srovnatelné s předchozími typy náplní.

f) je koncentrická, která vyniká svou vlastností „průhlednosti“, při použití průhledného filamentu, případně lze použít pro tisk pružných dílů, například pneumatik pro malá RC vozidla.

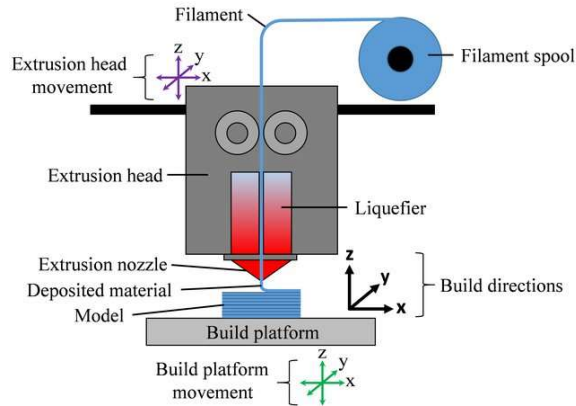
i) je Hilbertova křivka, která vytváří uvnitř modelu pravoúhlý labyrint. Klíčovým benefitem tohoto typu výplně je její nekonvenční vzhled, který lze poměrně snadno vyplnit epoxidem nebo jinou kapalinou. Model je rozdělen do několika velkých dutin namísto mnoha malých "bublin". Hlavní nevýhodou této výplně je poměrně delší doba tisku.

2.2 Metody 3D tisku

2.2.1 FDM

Jedná se o současně nejrozšířenější a nejoblíbenější technologii 3D tisku. „Fused Deposition Modeling“ (FDM) neboli modelování taveným nanášením materiálu, je současně nejčastěji používaná a nejoblíbenější metoda pro tisk prototypových a funkčních komponent [6].

Výhodou této metody jsou nízké pořizovací a provozní náklady a také dostupnost. Nevýhodou je ale delší čas tisku (výroby) oproti jiným metodám, protože v tomto případě jednu vrstvu tiskne jedna tryska, která musí celou vrstvu vyplnit. Principem FDM je tedy natavování přidávaného materiálu v podobě drátu (filamentu) a jeho postupné vytlačování skrze malou trysku, jejímž průměrem je dána i celková přesnost tisku. Výsledné vytištěné prototypy se vyznačují poměrně dobrými mechanickými vlastnostmi [6].



Obr. 2.4 Diagram procesu tisku FDM tiskárny – převzato [9]

Existuje široká škála konstrukčních materiálů pro FDM tisk, které se odlišují nejen svými mechanickými vlastnostmi, ale také vizuálně a cenou. Mezi nejrozšířenější se řadí následující:

- PLA

„Polylactic acid“ neboli kyselina polymléčná, je nejčastější typ filamentu, který se v dnešní době používá. Je to biologicky rozložitelný termoplast vyráběný z přírodních zdrojů jako je například kukuřičný škrob a celkově je šetrný k životnímu prostředí. Tisk z tohoto materiálu je snadné, rychlé a probíhá za nižších teplot než ostatní materiály. Výsledné díly a modely se po zchladnutí nesmršťují a je snadné je dále zpracovávat. Mezi nevýhody PLA se řadí špatná teplotní stabilita (při teplotách 60 °C), která vede k nevratné deformaci, dále její špatná odolnost proti UV záření, kdy tento materiál degraduje a dále špatná odolnost proti mechanickému napětí a tedy celková trvanlivost. Výrobky tištěné z materiálu PLA nejsou vhodné pro aplikace s větším mechanickým zatížením [6].

- PET/PETG

Polyethylentereftalát (PET) je druh polyesteru, konkrétně termoplastická polymerová pryskyřice. Je to velmi rozšířený druh plastu, aplikovaný v plastových lahvách až po oblečení. Z hlediska aditivních technologií se jedná o velmi kvalitní konstrukční materiál. Znamější a používanější materiál v 3D tisku je PETG, který se od PET liší o přidání glykol pro zvýšení pevnosti. Tiskne se

obtížněji než PLA, ale obvykle má hladší povrch než PLA. Výhodou PETG je jeho recyklovatelnost, sterilita (potravinová), odolnost proti vlhkosti a hlavně jeho odolnost proti teplotnímu a mechanickému zatížení (je flexibilní) [6].

- ABS

Akrylonitril butadienstyren (ABS) je amorfní tříslučkový polymer, výrazně (zatím) využívaný v FDM tisku. V průmyslu se používá v aplikacích, kde je třeba vyšší pevnost. V současnosti je ale postupně nahrazován jinými materiály. Nevýhodou ABS je složitost procesu tisku za vyšších teplot, respektive je velmi citlivé na změny teplot. Dalším problémem při tisku je, že tento materiál po zahřátí zapáchá a nasává vzdušnou vlhkost a degraduje při vystavení UV záření. Výhodou výtisků z ABS je velká odolnost proti mechanickému napětí, jsou teplotně stabilní, tuhé a trvanlivé. Výtisky lze poté opracovávat a vyhlazovat pomocí acetonu [6].

- ASA

Akrylonitrilový styrenakrylát (ASA) je náhrada za ABS. Díky ASA lze vytisknout velmi přesné a detailní díly, odolné v relativně velkém rozmezí teplot od -65 °C do +98 °C, proto je tento materiál vhodný pro venkovní aplikace. Tisk tohoto materiálu je obdobně obtížný jako ABS a taktéž probíhá za vyšších teplot. Pro vnější úpravu výtisku lze opět použít aceton. ASA je celkově velmi silný a odolný materiál [6].

- Nylon

Nylon vyniká svými skvělými mechanickými vlastnostmi. Vlákná nylonu mohou být vytvořena z různých polyamidů, čímž se ovlivní výsledné vlastnosti. Kromě metody FDM, lze nylon použít i v metodě SLS. Vyznačuje se svou odolností proti nárazům, které je ze zmíněných materiálů největší. Tisk je poměrně obtížný, protože tento materiál je velmi pružný a zároveň je hydrofobní, tzn. že nasákne do sebe hodně vlhkosti a zapáchá [6].

- PC

Polykarbonát, zkráceně označovaný jako PC, představuje termoplastický polymer obsahující karbonátové skupiny, které mu propůjčují výraznou pevnost. Tento materiál představuje atraktivní alternativu k ABS. V průmyslu nalezne široké využití, zejména v oblastech letectví, stavebnictví, lékařství, a také při výrobě lahví, sklenic a elektroniky. Oproti ABS se polykarbonát lépe tiskne, avšak za vyšších teplot. Je náchylný k absorpci vlhkosti a citlivý na UV záření, což ho může dělat méně vhodným pro venkovní použití ve srovnání s alternativami, jako je například ASA. Na druhou stranu je polykarbonát sterilní, odolává vysokým teplotám, má vysokou pevnost a lze snadno dalším způsobem zpracovávat [6].

- Speciální typy

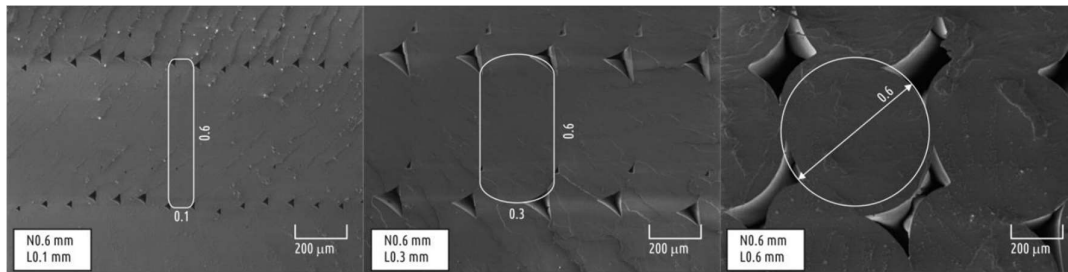
Mezi speciální typy lze například zařadit materiály s kovovou (vodivou) příměsí, která výsledným výrobkům přidává na elektrické vodivosti a magnetickým vlastnostem. Případně lze použít tyto materiály v metodě CMF jak je zmíněno v kapitole 2.3.

Tab. 2.1 Vybrané Parametry nejpoužívanějších FDM materiálů

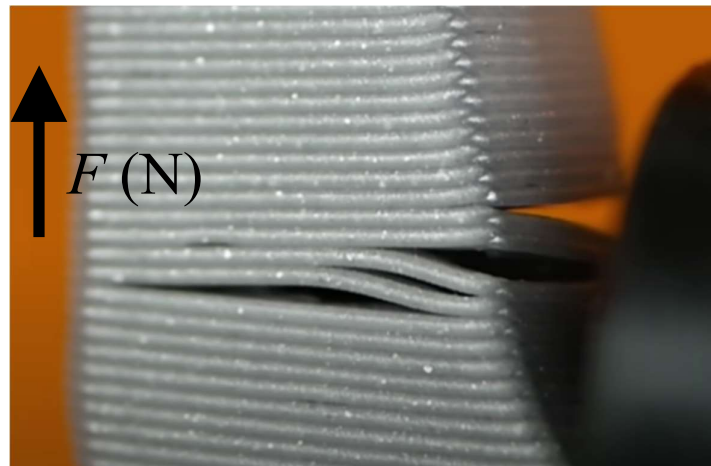
Parametr	PLA	ABS	PETG	ASA
Teplota extrudéru T_E (°C)	190 až 210	220 až 260	230 až 250	250
Teplota podložky při tisku T_P (°C)	25 až 80	90 až 110	60 až 80	110
Hustota ρ (g/cm ³)	1,25	1,04	1,23	1,07
Pevnost v tahu σ_T (MPa)	51	43	42	43
Pevnost v ohybu σ_O (MPa)	80	66	70	68
Rázová houževnatost a_{CU} (kJ/m ²)	15	17	16,8	34

Obecně se dle výrobců uvádí, jaký materiál, pro jakou aplikaci je vhodný. Zatímco PLA se velmi snadno tiskne a opracovává, tak například PETG je v tomto ohledu náročnější. PLA ale není vhodný na mechanické díly, zatímco PETG je velmi vhodný apod [10].

Velmi problematické u metody FDM ale 3D tisku obecně, jsou vrstvy materiálu jako takové. Čím větší vrstva je, tím horší je mechanické a chemické spojení mezi vrstvami konkrétního materiálu. Toto pak vede na špatné mechanické vlastnosti v dané ose vrstev. Tento nežádoucí jev je zobrazen na Obr. 2.5 a Obr. 2.6.



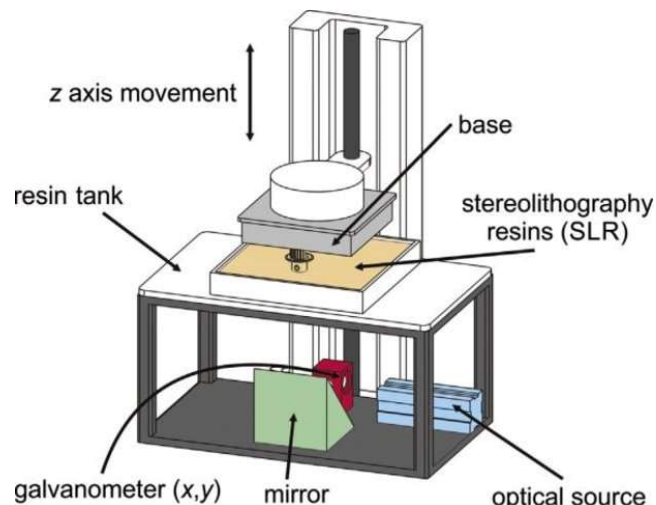
Obr. 2.5 Snímek elektronovým mikroskopem s vlivem velikosti průřezu vlákna s nárůstem tloušťky vrstvy a zobrazenou křivkou idealizované vrstvy – převzato [11]



Obr. 2.6 Výsledek působení mechanického namáhání ve směru vrstev tisku FDM

2.2.2 SLA

Tato metoda je nejstarší a zároveň doposud jednou z nejpřesnějších (nejdetailnějších) metod 3D tisku. Stereolitografie (SLA) je metoda vytváření modelů, pomocí postupného vytvrzování polymerů pomocí působení záření různých vlnových délek, ale nejčastěji UV záření. Přesnost této metody lze teoreticky stanovit, respektive odpovídá velikosti molekuly polymeru. Polymer, přídatný materiál, musí být fotocitlivý, aby po vystavení UV záření ztuhnul (polymerizace). Výška jedné vytvrzené vrstvy se pohybuje od 0,05 mm do 0,25 mm. Komerční tiskárny se vyznačují, v porovnání s jinými metodami, poměrně malou tištěnou plochou [6].



Obr. 2.7 Diagram procesu tisku SLA tiskárny – převzato [12]

Princip (dle Obr. 2.7) spočívá v pohybu tiskové hlavy nad tiskovou plochou, kde je aplikována fotopolymerová pryskyřice, a následném ozáření na specifických místech. Po dokončení každé vrstvy se základní platforma pohybuje (směrem dolů nebo nahoru) o tloušťku vrstvy a proces vytvrzování se opakuje pro další vrstvu [6].

Používané materiály pro tuto metodu, jsou označovány obecně jako pryskyřice a lze je rozdělit do tří skupin [6]:

- Akrylátové pryskyřice
- Epoxidové pryskyřice
- Plněné pryskyřice

Podle výsledných vlastností materiálu, lze pryskyřice dále rozdělit do skupin dle jejich účelu [6]:

- Standartní
- Technické
 - Houževnaté
 - Odolné proti opotřebení
 - Proti vyšším teplotám
 - Flexibilní
 - Tuhé
- Biokompatibilní
- Tavitelné

Obecně lze o této metodě říci, že je velmi oblíbená z důvodu velmi detailních výsledných tištěných modelů, například oproti nejrozšířenější metodě FDM. Nicméně výtisky metodou SLA jsou poměrně křehké.

2.2.3 SLM

SLM neboli „Selective laser melting“ je metoda v principu stejná jako technologie SLS, liší se pouze použitým materiálem, tedy v tomto případě čistým kovem. Touto metodou lze vytvářet komplikované kovové tvary a výrobky, jinak obtížně vyrobitelné. Například výroba jha elektrických strojů, jak je více popsáno v kapitole 2.3.

Práškové nože nanese vrstvu prášku, který se při dosažení teploty tání rozpustí. Dodaná energie do vrstvy prášku nejenže způsobuje tání materiálu, ale také ovlivňuje oblasti v okolí tavné lázně díky tepelné vodivosti. Během tuhnutí taveniny se předchozí, ztuhlá vrstva spojí s novou roztavenou vrstvou. Po ozáření práškového lože laserovým paprskem se pracovní deska sníží, následně se aplikuje další kovový prášek a opakuje se proces nanesení a roztavení nové vrstvy. Po dokončení tisku lze prášek prosít a znovu zahrnout do procesu [6].

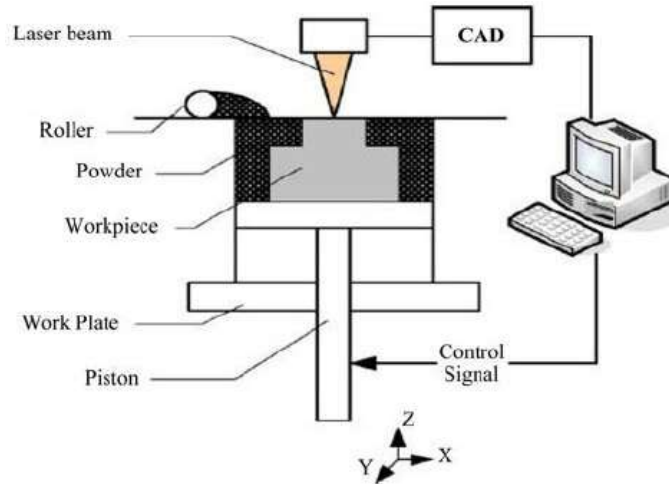
2.2.4 SLS

SLS neboli z angl. „Selective Laser Sintering“ je technologie využívaná k výrobě 3D součástí pomocí práškového materiálu, který je zapékán pomocí tepelné energie vyvinuté laserovým paprskem. Teplota tání těchto prášků, je obvykle okolo 200 °C a rychlé spékání pomocí laseru by bylo velmi složité. Proto se celý objem prášku nejdříve nahřeje na teplotu blízkou teplotě tání a poté je laserem dosažena teplota tání jen v požadovaných místech a poměrně rychle.

Na pracovní plochu je za pomoci „rolleru“ (válečku) nanese tenká vrstva práškového materiálu. Paprsek se soustředí na jemný prášek, který se díky laseru taví a vzniká jedna z mnoha vrstev. Hotová vrstva se pokryje další vrstvou prášku a proces se opakuje. Výhodou tohoto postupu je, že nevzniká v podstatě žádný odpad, jinými slovy nanesená vrstva prášku válečkem, která není roztavena laserem, se po dokončení tisku jednoduše oddělí od hotového modelu a použije se na další tisk [6].

Výsledné vytištěné modely jsou zpravidla velmi detailní, tiskárny tisknou zpravidla s přesností 0,05 mm. Nicméně výsledný vyrobený model, se touto metodou tisku vyznačuje

poměrně velkou drsností povrchu, jak je možné vidět na výsledném prototypu této práce, případně na Obr. 5.1. Materiálem pro tento tisk může být například keramika nebo spíše častěji různé druhy plastů (Nylon, ABS, PET atd.) ve formě prášku [6].



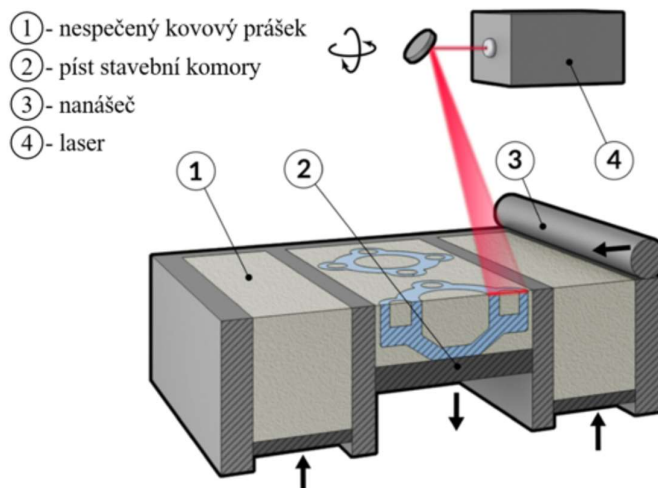
Obr. 2.8 Diagram procesu tisku SLS 3D tiskárny – převzato [13]

Na Obr. 2.6 je možno vidět diagram procesu tisku výrobku metodou SLS a jednotlivé hlavní části této tiskárny.

SLS patří mezi ty nejdražší současné metody tisku, kdy pořizovací cena komerčních tiskáren obvykle převyšuje cenu 1 000 000 Kč, a tedy i cena jednoho výrobku je velmi vysoká.

2.2.5 DMLS

DMLS neboli z angl. „Direct Metal Laser Sintering“ a stejně jako SLS spadá do kategorie využívající tavení prášku („Powder bed fusion“). Principiálně je to metoda SLS, nicméně vzhledem k tomu, že využívá kovový prášek jako aditivní materiál, je označována jako samostatná kategorie. Jedná se o proces, při kterém je kovový prášek rovnoměrně rozprostřen v tenkých vrstvách, obvykle o tloušťce 20 μm až 100 μm , na pracovní plochu o rozměrech od 50 mm x 50 mm až po 800 mm x 400 mm. Kovový prášek může být přiveden buď z násypky nebo ze zásobárny umístěné poblíž pracovní plochy. [6].



Obr. 2.9 Diagram procesu tisku DMLS 3D tiskárny – upraveno [14]

2.3 Metoda CMF

Jako samostatná kategorie tisku, lze zařadit metoda „Cold Metal Fusion“ (CMF), neboli „spékání kovů za studena“, která je poměrně novou technologií. Tato metoda je aplikovatelná do již existujících 3D tiskáren (hlavně typu FDM a SLS), kde je původní polymerní materiál obohacen kovovou příměsí (Oceli, měď a další kovy), obvykle převyšující 75 % v podílu na celkové práškové směsi. Tento prášek je tedy směsí polymeru (pojiva) a právě zmíněného kovového prachu. V principu jde o to, že je při tisku konkrétního výrobku roztaveno pouze pojivo (polymer) a kovový prach se netaví. Vznikne tedy výrobek s metalickým vzhledem, označován jako „Green part“. Poté je tato součást očištěna od zbylého materiálu a poté je vložena do nádoby s rozpouštědlem („Debinding station“), kde je řízenou reakcí při zvýšené teplotě postupně odbouráváno pojivo a vzniká pouze kovová matrice s minimálním obsahem polymerního pojiva. Výsledný část se po této fázi nazývá „Brown part“. V posledním kroku je tato součást vložena do sintrovací pece, kde při teplotě nad 1000 °C (dle kovu v příměsi) dojde ke spečení kovového prachu do finálního kovového výrobku, tzv. „Steel part“. Výsledné výrobky mají obdobné vlastnosti jako výrobky odlévané. U ocelových směsí se udává, že od prvotního vytisknutí do spečení, dojde ke smrštění v hodnotě přibližně 18 %.

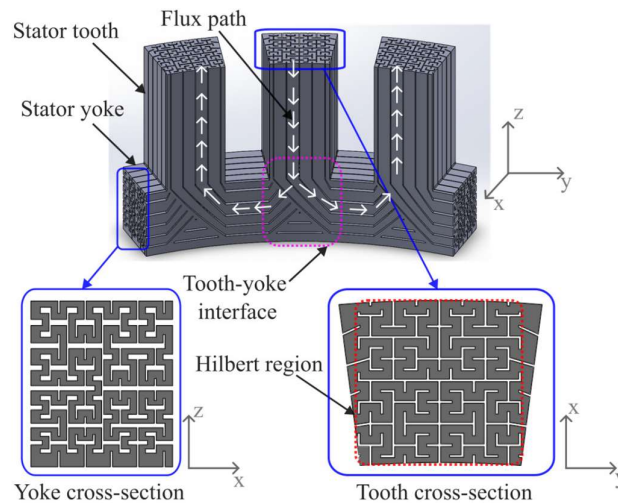
Pro zajištění rovnoměrného rozložení kovového prášku se využívá vyrovnávací systém nebo rameno s břitem. Laserový paprsek o síle od 20 W do 1 kW je zaměřen na rovnoměrně nanesenou vrstvu prášku, kterou při překročení teploty tání roztaví. Nicméně laser bývá ve

většinou v případech nižších výkonů. Zahřívací tělesa přivedou objem prášku k teplotě blízké tání (pojiva) a laser poté dodá zbytek energie nutné pro dosažení teploty tání a dojde ke spečení (pojiva).

2.4 Uplatnění aditivních technologií v konstrukci elektrických strojů

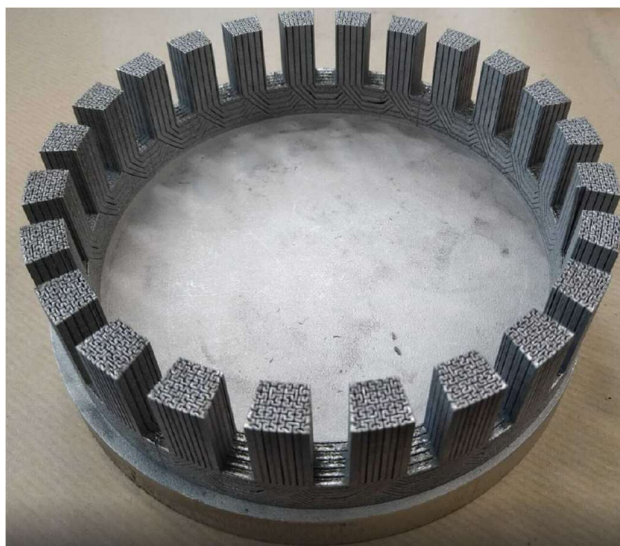
Aditivní technologie mají u speciálních elektrických strojů velké uplatnění. Může se jednat o výrobu sofistikovaných chladících systémů a výměníků tepla pro chlazení, nebo o výrobu jha satorů a rotorů jiným způsobem, než je dosavadní zvyklost, tj. laminované elektrotechnické plechy, stříhané lisem. Tato technologie totiž umožňuje vytváření takových tvarů, které klasickými metodami nejsou možné (odléváním, lisováním apod.). Chladící plochy výměníků tepla, lze tedy teoreticky zvětšovat do nekonečna. V praxi to ovšem možné není, nicméně lze tímto způsobem vytvořit mnohem větší chladící plochu nežli klasickým způsobem.

V současnosti je tato technologie stále spíše ve svém počátku, a tedy nástroje potřebné na výrobu, respektive finální výrobky jsou poměrně drahé. Pokud se tedy jedná o aplikaci, kde finance nehrají roli, případně nelze vytvořit jinak, je tato metoda velmi příznivá pro výsledné parametry navrhovaných strojů. Současným trendem výzkumu je tzv. tisk jha satorů, případně rotorů elektrických strojů. To může přinést několik výhod, například z hlediska redukce ztrát, případně jejich lepšímu odvádění v podobě tepla.



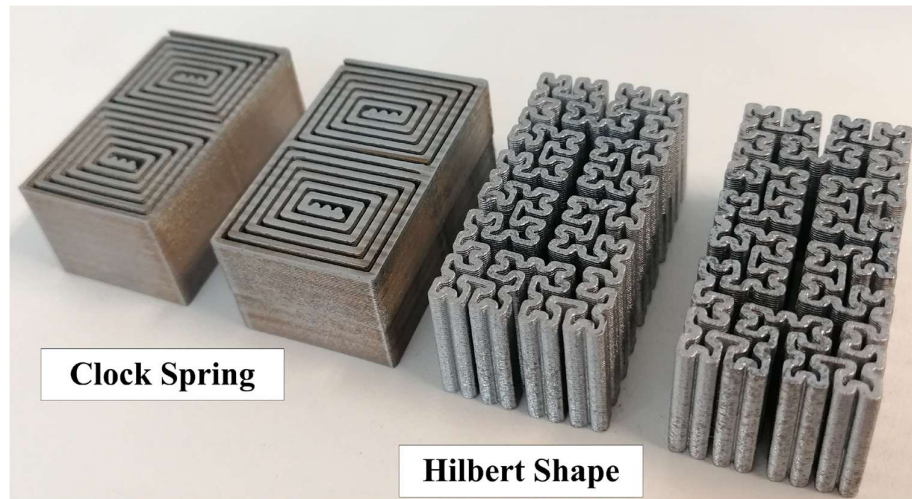
Obr. 2.10 Výřez satorového jha axiálního stroje vyrobeného pomocí SLM metody – převzato [15]

Na Obr. 2.10 je vidět částečný výřez (1/8) jha statoru, vytvořeného AM metodou DMLS, tedy tiskem kovů. Klasická laminace statorovými elektrotechnickými plechy, je zde nahrazena (v řezu) tvarem Hilbertovy křivky, která má za následek potlačení vířivých proudů a snížení ztrát a ušetření materiálu. Jinými slovy, ve směru magnetického toku jsou zachovány příznivé vlastnosti a v kolmém směru je tok omezen a tedy jsou omezeny vířivé proudy. Na obrázku je v sekci označené růžovou barvou vidět přechod zub-jho, kde autor vytvořil vhodné napojení, které neobsahuje geometrické změny dráhy pro magnetický tok, tzn. dráha v zubu není kolmá na dráhu ve jhu v místě přechodu [15].

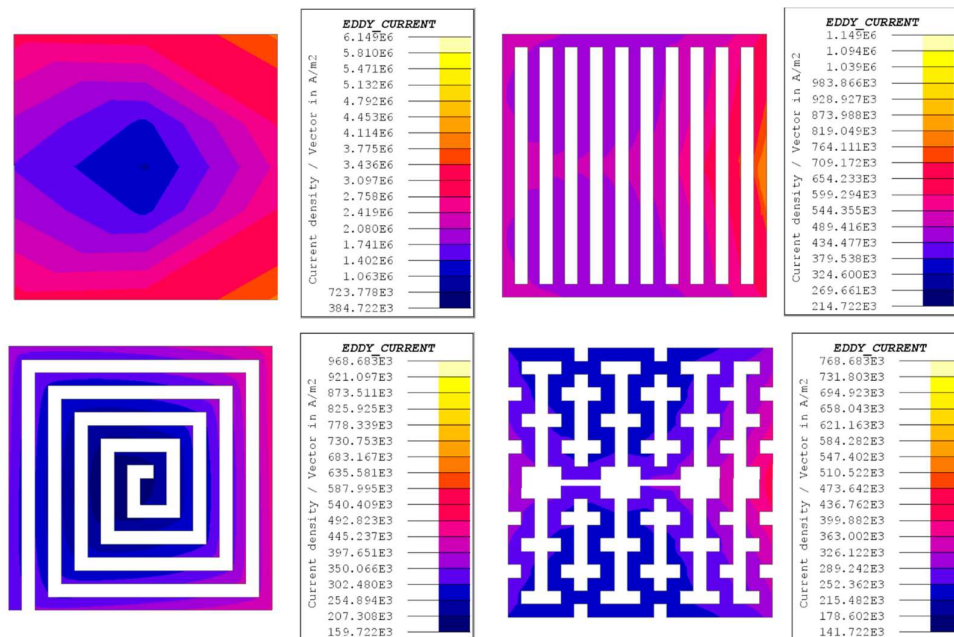


Obr. 2.11 Příklad využití SLM metody při výrobě jha statoru axiálního stroje – převzato [15]

Na Obr. 2.11 je vidět kompletní geometrie statoru, která byla realizována vytlačěním Hilbertova vzoru (křivky) ve třech rozměrech, aby bylo možné realizovat jednu souvislou část. Je třeba zmínit, že zatímco u základního laminovaného statoru axiálního stroje (stator se skládá z jednoho kusu) se používal plech o tloušťce 0,127 mm, zatímco minimální tloušťka prvku Hilbertova vzoru (křivky), pomocí AM je přibližně 0,5 mm což je dáno v tomto případě možností výrobního zařízení [15].



Obr. 2.12 Příčné řezy příkladů možných tvarů jha statorů vyrobených SLM metodou – převzato [16]



Obr. 2.13 Vykreslení proudové hustoty vlivem vířivých proudů v příčném řezu různých tvarů jha – převzato [16]

Na Obr. 2.12 jsou vidět dva možné tvary (profily) jha statoru (případně rotoru), které mohou nahradit dosavadně standardně používané laminované statorové (rotorové) plechy. Je to úplně nejjednodušší tvar – spirála (značeno jako „clock spring“), případně pružina a druhým tvarem je již výše zmíněná Hilbertova křivka. V obou případech je cílem omezit velikost vířivých proudů, tzn. znemožnit tomuto proudu se uzavírat (téct) v axiálním směru

v případě stroje s radiálním tokem, respektive v radiálním směru v případě stroje s axiálním tokem. Vliv konfigurace na velikost vířivých proudů („Eddy current“) je očividný na Obr. 2.13 [16].

Nevýhodou těchto metod tisku kovu obecně, je nemožnost příměsi křemíku k dosažení většího odporu „železa“, jako je tomu u běžných lisovaných elektrotechnických plechů.

Ve speciálních případech se využívá i polymerů při tisku částí elektrických strojů. Lze buď použít výhradně plast, nebo lze použít předem namíchanou směs polymerů a kovů (metoda CMF).

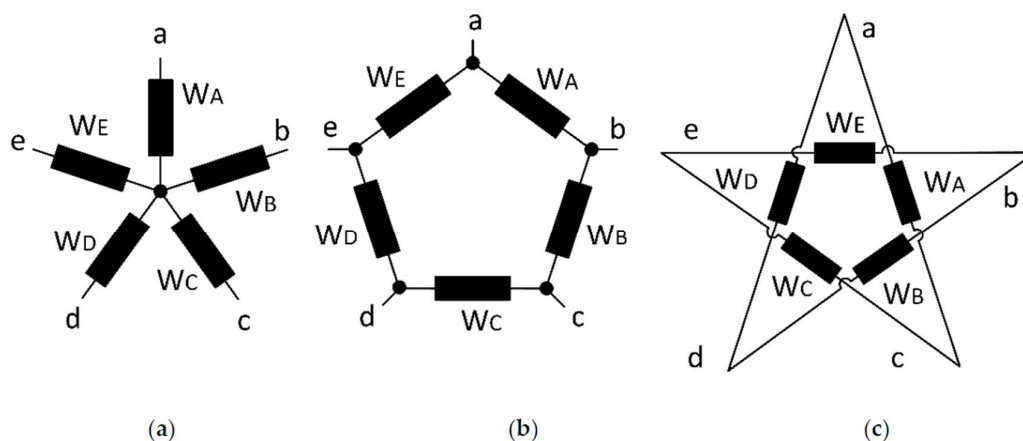
3 Návrh konstrukčního provedení BLDC stroje

Návrh konstrukčního řešení tohoto BLDC stroje, vychází z předchozí bakalářské práce, kde byl tento stroj zjednodušeně navržen elektromagneticky v 2D [17].

Navrhovaný stroj má být a je koncipován jako stavebnice a jako učební pomůcka, tzn. že je poměrně jednoduché jej rozebrat na jednotlivé komponenty, případně některé vyměnit, či upravit a opět jej složit zpět. Z tohoto důvodu bylo prvotní myšlenkou, aby hlavní části stroje, tj. stator a rotor složeny ze dvou částí, které se k sobě určitým způsobem spojují a výsledný stroj je v podstatě jakousi stavebnicí [18].

3.1 Vinutí statoru

Použití pětifázového (obecně vícefázového) systému má oproti třífázovému několik výhod. Hlavní výhodou je snížení potřebného výkonu na jednu fázi měniče (při zachování stejného výkonu stroje při použití standartního 3f systému). Snižuje se proud bez zvýšení napětí a zlepšují se mechanické a elektrické vlastnosti. Mezi další výhody patří lepší účinnost díky snížení ztrát ve statorovém vinutí, nižší obsah vyšších harmonických, snížení hluku stroje, zvýšení točivého momentu stroje a minimalizace jeho zvlnění [19].



Obr. 3.1 Možnosti zapojení pětifázového vinutí: a) hvězda; b) pentagon; c) pentagram – převzato [19]

U pětifázového stroje se rozlišují tři zapojení statorového vinutí. Každé z těchto zapojení má jiné vlastnosti. Jedná se o zapojení do hvězdy, do pentagonu (pětiúhelníku) a do pentagramu (pěticípá hvězda). Schématické znázornění zapojení je zobrazeno na Obr. 3.1.

Písmena a-e představují připojení napájení z pětifázového měniče a W_A - W_E představují jednotlivé fáze statorového vinutí [19].

Konce cívek vinutí jsou uvažovány tak, že budou vyvedeny mimo stroj a za vnější upevňující konstrukci („stand“), kde bude možné je pospojovat dle konkrétní potřeby.

3.2 Vstupní konstrukční parametry a omezení

V elektromagnetickém návrhu tohoto stroje, ze kterého tato práce vychází, je uvedeno že průměr vodiče vinutí je:

$$d_{v1} = 1 \text{ mm} \quad (3.1)$$

Vinutí má v původním elektromagnetickém návrhu 2 paralelní vodiče a 30 závitů na cívku. Nicméně po navinutí dvou cívek vinutí vedle sebe bylo zjištěno, že mezi jednotlivými cívkami je poměrně velký dostatek volného místa, vhodný pro zvětšení průměru vodiče. Maximální možný průměr vodiče, co je možné do drážky navinout se stejným počtem závitů je:

$$d_{v2} = 1,5 \text{ mm}, \quad (3.2)$$

což ale snižuje počet paralelních vodičů z původních 2 na 1:

$$a = 1 \quad (3.3)$$

A tedy se mění i počet vodičů cívky:

$$N_C = 30 \quad (3.4)$$

Hlavním omezením v návrhu je maximální rozměr, respektive rozměry stroje. Maximální vnější průměr vnějšího rotoru je:

$$D_{2R} = 180 \text{ mm}, \quad (3.5)$$

kde toto omezení vychází z předpokladu, že rotor bude tištěn na komerčně dostupné tiskárně, konkrétně na tiskárně Prusa MK4, kde je maximální rozměr tisku je 250x210x210 mm [17].

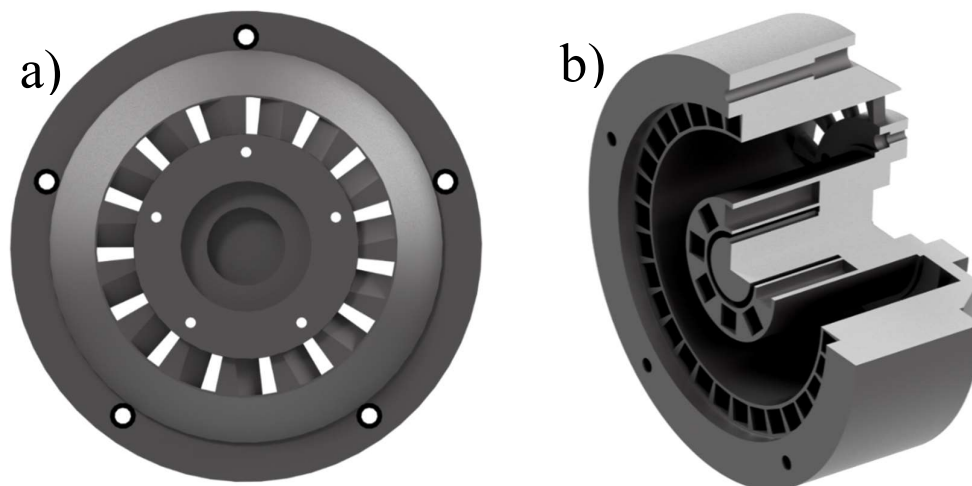
3.3 Návrh jednotlivých částí stroje

Při návrhu jednotlivých částí BLDC stroje je uvažováno, že různé části budou vyrobeny pomocí různých metod 3D tisku a z různých materiálů. Statorová část (obě části statoru a schránky pro zuby statoru) má být vyrobena pomocí SLS metody, protože materiál použitý při této metodě má velmi kladné vlastnosti, jak mechanické, tak ale převážně tepelné. Rotorová část a ostatní dílčí části mají být vyrobeny běžnou metodou FDM. Z tohoto předpokladu jsou voleny vhodné rozměry a tolerance jednotlivých komponent. Jinými slovy, SLS metodou se možné docílit velmi detailních a ostrých přechodů, na rozdíl od FDM metody, která se právě oproti SLS vyznačuje větší tolerancí výtisků.

3.3.1 Rotor

Jak již bylo zmíněno, z předchozí bakalářské práce byly stanoveny hlavní rozměry stroje. Mezi ně patří maximální vnější průměr vnějšího rotoru, taktéž vnitřní průměr vnějšího rotoru a stejně i pro rotor vnitřní. Je dána rozteč mezi póly, respektive vzájemná rozteč mezi permanentními magnety a také jejich vzdálenost od středu osy rotace (opět pro oba rotory) [17].

Při návrhu rotoru bylo mimo jiné uvažováno, že bude třeba okolo pólů vytvořit poměrně velký objem „jha“ (plastu). Tato úvaha má potlačit dva nepříznivé vlivy. Prvním je velká odstředivá síla magnetů a rotujících částí na relativně velkém poloměru rotoru. Jinými slovy, silný kruh okolo vnějšího obvodu stroje by měl svou pevností udržet tyto působící síly, aby se stroj neroztrhl. Druhým vlivem je teplota. Při návrhu není zcela jasné, jak se bude stroj prohřívat a jak efektivně by mohl ventilátor integrovaný na rotoru vznikající teplo odvádět. Proto je vhodné vytvořit silnou vrstvu okolo elementů, které by se mohl velmi zahřívat.

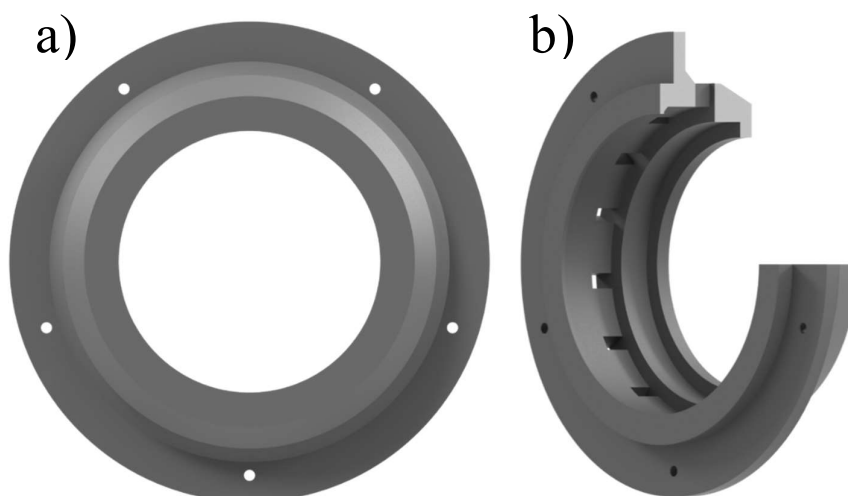


Obr. 3.2 CAD model návrhu hlavní části rotoru navrhovaného BLDC stroje: a) Pohled na stranu DE, b) Pohled na částečný řez izometricky na stranu NDE

Na Obr. 3.2 je vidět rotor navrženého BLDC stroje. Je složen ze dvou hlavních částí, vnitřní rotor a vnější rotor, které jsou ale k sobě pevně spojeny a tvoří jeden díl.

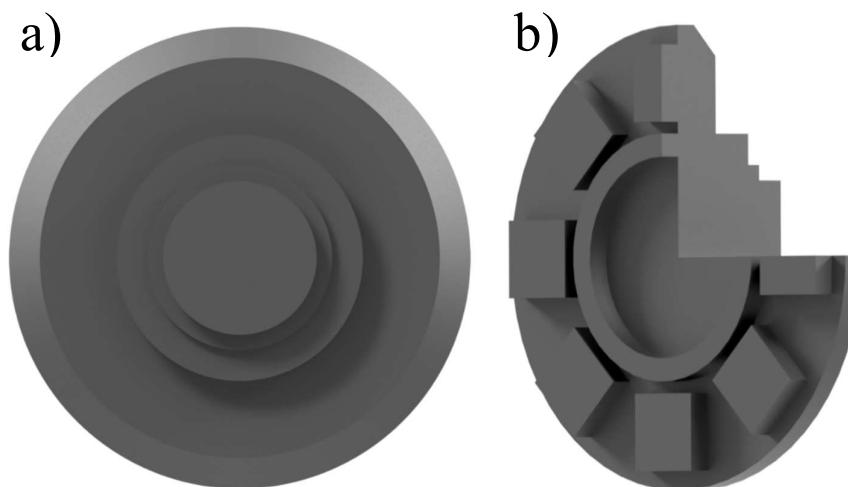
Na straně DE (drive-end) je vidět několik prvků. Na vnějším obvodu rotoru je vidět celkem 5 děr, které jsou připraveny ke spojení s druhou částí rotoru, která drží permanentní magnety uvnitř rotoru a zároveň nese váhu na ložisko na straně NDE. Dalším zmíněným viditelným prvkem je chladicí axiální ventilátor, integrovaný přímo do rotoru. Je třeba ale podotknout, že ventilátor nebyl nijak výpočetně navržen a proto jeho funkčnost, lze ověřit pouze měřením teplot přímo ve stroji a jejich změny v závislosti na otáčkách.

Posledním zmíněným prvkem je absence hřídele. Přenos momentu na hřídel by bylo v tomto případě velmi komplikované a pravděpodobně by to při předpokládaném momentu přes uchycení hřídele roztrhlo vnitřní rotorovou část. Proto je na rotoru vytvořen přípravek na připojení libovolného konce na vyvedení výkonu. Může tím být ozubené kolo, vrtule, případně hřídel.



Obr. 3.3 CAD model návrhu vnější rotorové krytky: a) Pohled na stranu DE, b) Pohled na částečný řez izometricky na stranu NDE

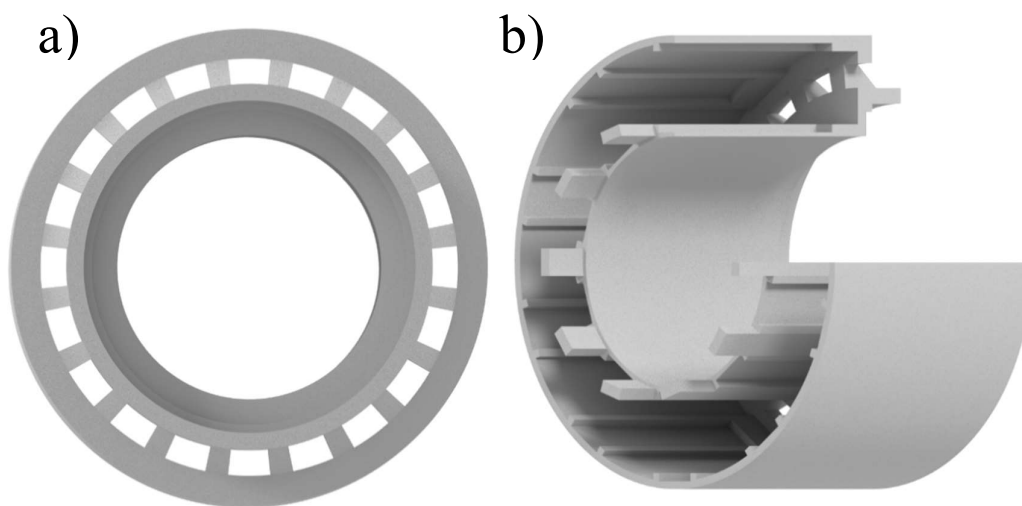
Vnější (hlavní) kryt rotoru, který je zobrazen na Obr. 3.3, zastává 3 funkce. První funkcí je celkové „zakotvení“ celého stroje, kdy 5 šroubů na vnějším průměru je celý rotor stažen a zabraňuje stroji, aby se při chodu samovolně rozložil. Druhou funkcí je nesení hlavního (největšího) ložiska na straně NDE. A poslední funkcí je funkce chladicí, kdy je na tomto díle umístěn radiální ventilátor, který by měl rozdílem tlaků odnášet vnitřní zahřátý vzduch ven ze stroje.



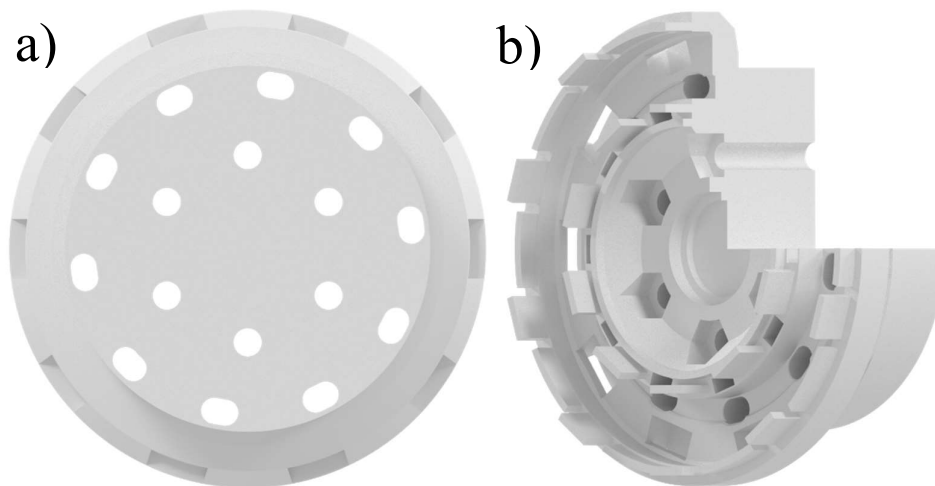
Obr. 3.4 CAD model návrhu vnitřní rotorové krytky: a) Pohled na stranu NDE, b) Pohled na částečný řez izometricky na stranu DE

3.3.2 Stator

Obdobný přístup při návrhu, jako v případě návrhu rotoru, byl zvolen i u statoru. Je tedy složen ze dvou částí, které se do sebe zasouvají. Uvnitř duté části statoru, které je vidět na Obr. 3.5 b), jsou připraveny schránky pro jednotlivé zuby, respektive cívky zubového pětifázového vinutí statoru. Předpokladem je že mezi těmito cívkami namotanými na zubech bude dostatečný prostor, který vytvoří chladicí kanál s dostatečným průřezem pro vzduchové chlazení z integrovaného ventilátoru na rotoru.



Obr. 3.5 CAD model návrhu hlavní části statoru (bez zubů): a) Pohled na stranu DE, b) Pohled na stranu NDE v částečném řezu izometricky



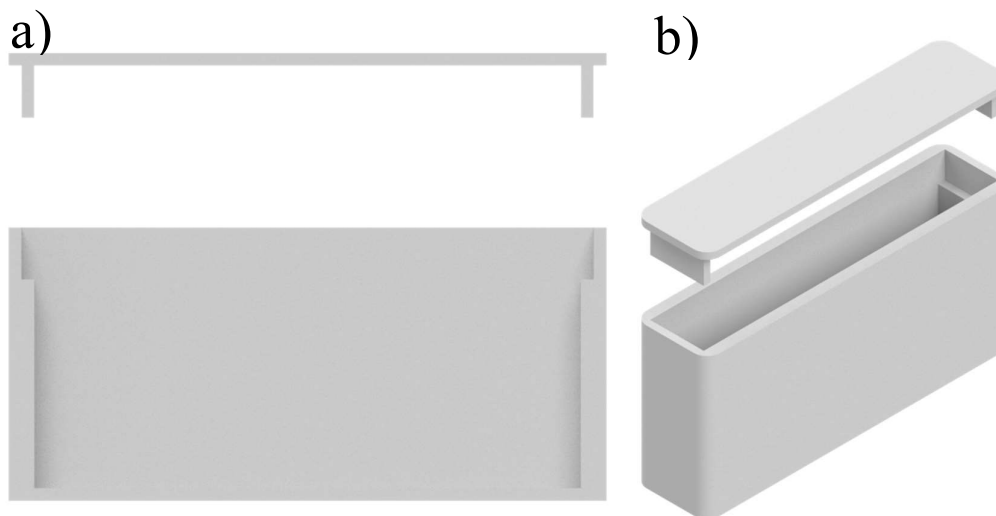
Obr. 3.6 CAD model statorové části pro vyvedení vinutí na svorkovnici a připevnění stroje k vnější konstrukci: a) Pohled na stranu NDE, b) Pohled na stranu DE v částečném řezu izometricky

3.3.3 Vinutí a zuby statoru

Jak již bylo zmíněno, v původním elektromagnetickém návrhu bylo uvažováno, že vinutí na statoru bude navinuto z měděného drátu s průměrem $d_{v1} = 1$ mm. Po úpravách je ale použit vodič s průměrem $d_{v2} = 1,5$ mm. K tomuto průměru se dospělo tak, že po pokusech navinutí různých vodičů různých průřezů a vždy zachování stejného počtu závitů, byl vodič s průměrem 1,5mm největší možných vodič, který lze navinout a vložit se zuby do slotů statoru. Jinými slovy, je tímto maximalizovaný činitel plnění drážky. Při tomto kroku v konstrukčním návrhu ale tímto došlo ke změně, kterou je počet paralelních vodičů a celková změna maximálního proudu vodičem při dodržení stanovené proudové hustoty:

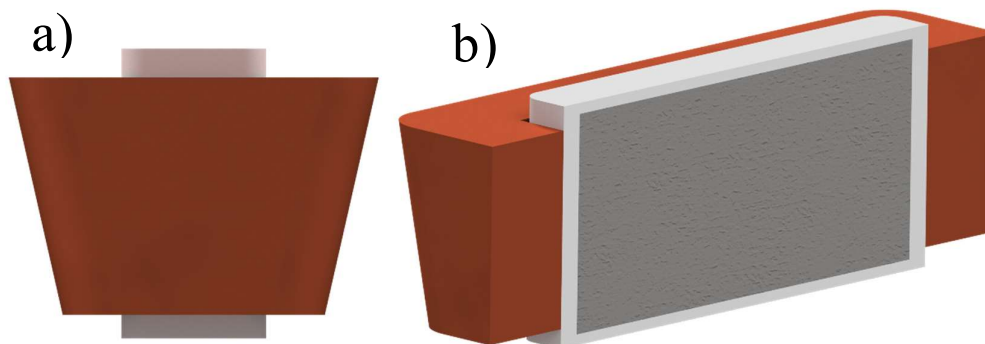
$$J_n = 3 \text{ A/mm}^2, \quad (3.6)$$

Tato hodnota byla stanovena již při elektromagnetickém návrhu a odpovídá hodnotě, která by neměla vytvořit při hodnotě průchodu odpovídajícího proudu takové oteplení, aby bylo třeba vinutí aktivně chladit.



Obr. 3.7 CAD model rozložených statorových zubů: a) Pohled na statorový zub v řezu, b) Pohled statorový zub izometricky

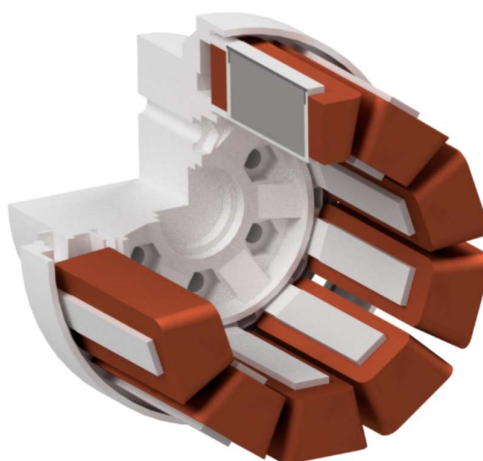
Na Obr. 3.7 je vidět jeden statorový zub, respektive jeho „schránku“. Do ní jsou následně vloženy elektrotechnické plechy a celá schránka je poté ovinuta vodičem cívky, jak je následně vidět na Obr. 3.8.



Obr. 3.8 CAD model statorového zubu s elektrotechnickými plechy a vinutím: a) Pohled na statorový zub v axiálním směru, b) Pohled statorový zub v řezu izometricky

Elektrotechnické plechy (železo) jsou vloženy zubu proto, aby se zlepšilo celkové uzavírání magnetického toku ve stroji. Elektrotechnické plechy, lze v tomto případě možné vložit dvěma způsoby. Buď standartně laminované plechy uložit axiálně anebo radiálně, což by snížilo potřebný počet plechů a zároveň usnadnilo vkládání plechů do zubové schránky. Nicméně tímto způsobem by byly navýšeny ztráty vířivými proudy a pravděpodobně by se některé části zubů přesycovali. V zubech statoru jsou použity plechy typu M700-50A, jejichž parametry jsou uvedeny v příloze D.

Na Obr. 3.9 je vidět názorné osazení, respektive rozložení zubů s vinutím po obvodu statoru stroje. V tomto případě jsou připojeny k statorové části pro vyvedení vinutí na svorkovnici a připevnění stroje k vnější konstrukci.



Obr. 3.9 CAD model sestavy hlavní části statoru společně se zuby a zubovým vinutím

Ve statoru je uvažováno, že mezi jednotlivými cívkami vinutí vznikne průřezově dostatečně velký chladicí kanál, který by díky dvojici ventilátorů (axiální a radiální) dokázal aktivně vzduchem chladit „drážky“ stroje. Nicméně velikost vzniklého prostoru je silně závislá na kvalitě navinutého vinutí.

$$S_{kanal} \cong 30 \text{ mm}^2 \quad (3.7)$$

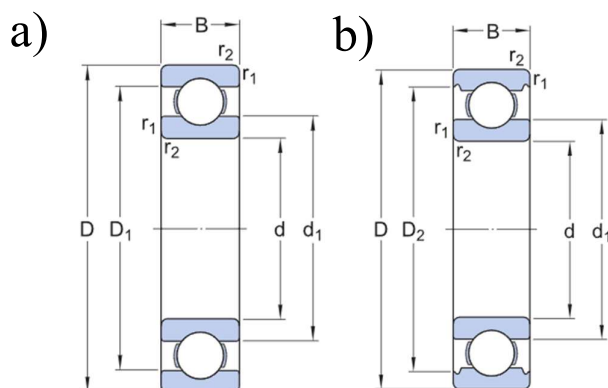
3.3.4 Ložiska

Dle dostupného prostoru v jednotlivých částech stroje, byla vybrána ložiska od firmy SKF uvedené v Tab. 3.1. Jednotlivé části stroje byly v průběhu návrhu pozměňovány, právě kvůli normovaným rozměrům ložisek a jejich dostupnosti.

Tab. 3.1 *Vybrané parametry udávané výrobcem ložisek pro navržený BLDC stroj – upraveno [20]*

Označení ložiska	d (mm)	D (mm)	B (mm)	d_1 (mm)	D_1 (mm)	D_2 (mm)	m (kg)	C (kN)	Mezní otáčky (ot/min)
61803	17	26	5	19,8	23,3	N/A	0,0075	2,03	34000
61812	60	78	10	65,4	72,9	74,5	0,095	11,9	11000
61817	85	110	13	93,3	N/A	104,3	0,26	19,5	7500

Kromě rozměrů, udávaných výrobcem v Tab. 3.1, jsou kritické i maximální možné otáčky ložisek. Dle předpokladů návrhu, kdy jmenovité otáčky stroje jsou 3000 ot/min, všechny tři vybraná ložiska tomuto předpokladu vyhovují minimálně dvakrát, v případě ložiska 61803 dokonce jedenáctkrát. Z tohoto je tedy zřejmé, že vybraná ložiska z pohledu maximálních otáček vyhovují jmenovitému chodu stroje.



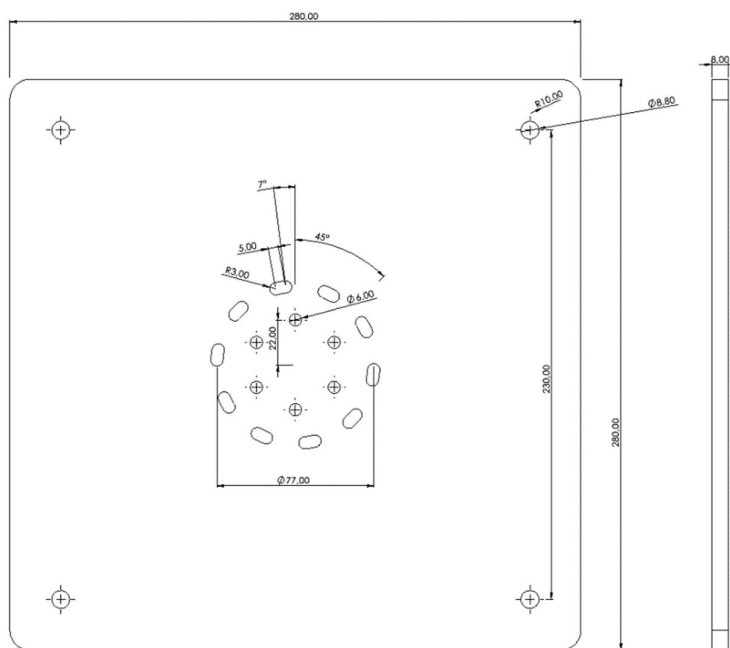
Obr. 3.10 Geometrie použitých ložisek: a) ložisko 61812, b) ložiska 61803 a 61817 – převzato [20]

3.3.5 Vyvedení mechanického výkonu

Předpokladem při návrhu vyvedení mechanického výkonu je, že stroj k tomu nebude využívat hřídele, ale vývod bude celý rotor jako takový. Proto byl zvolen opět princip modulárnosti a strana DE (drive end) je připravena pro umístění jakéhokoli prvku pro vyvedení výkonu. Může jím být právě hřídel (externí), případně ozubené kolo, ventilátor apod. Nicméně vzhledem k složité nehomogenní konstrukci a použitým materiálům, není vhodné stroj zatěžovat tangenciální silou v jednom směru, jinými slovy není vhodné případné ozubené kolo zatěžovat přímo, ale podpořit jej doplňující nosnou konstrukcí s vlastním ložiskem. Lze předpokládat, že čím dále v axiálním směru od uchycení stroje je zdroj tangenciálních sil, tím více je tento stroj přetěžován a může dojít k jeho poškození.

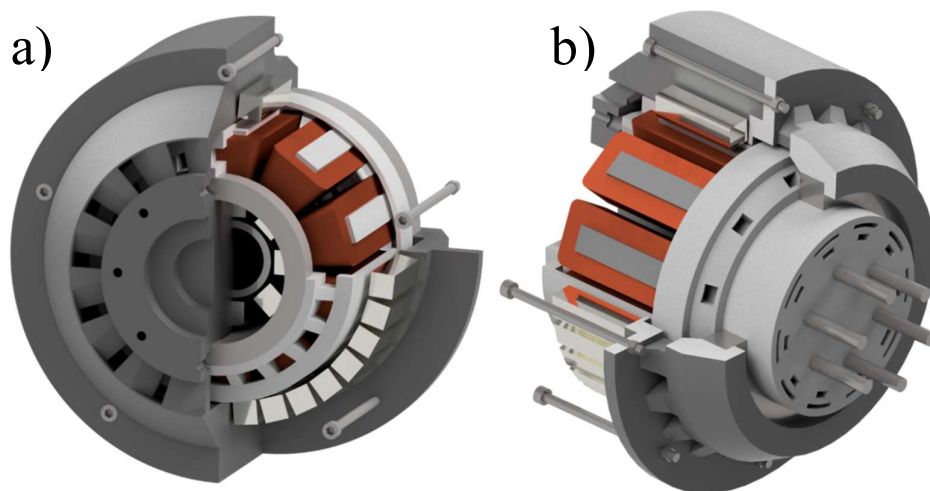
3.4 Návrh uchycení stroje na vnější konstrukci pro měření parametrů

Jako měřicí stanoviště bylo zvoleno dosavadní měřicí stanoviště v laboratořích, sloužící pro měření strojů s přírubovou tak i patkovou uchycovací konstrukcí. Toto stanoviště je navíc osazeno otvory pro budoucí modulární úpravy. Tato konstrukce je zobrazena na Obr. 6.1.

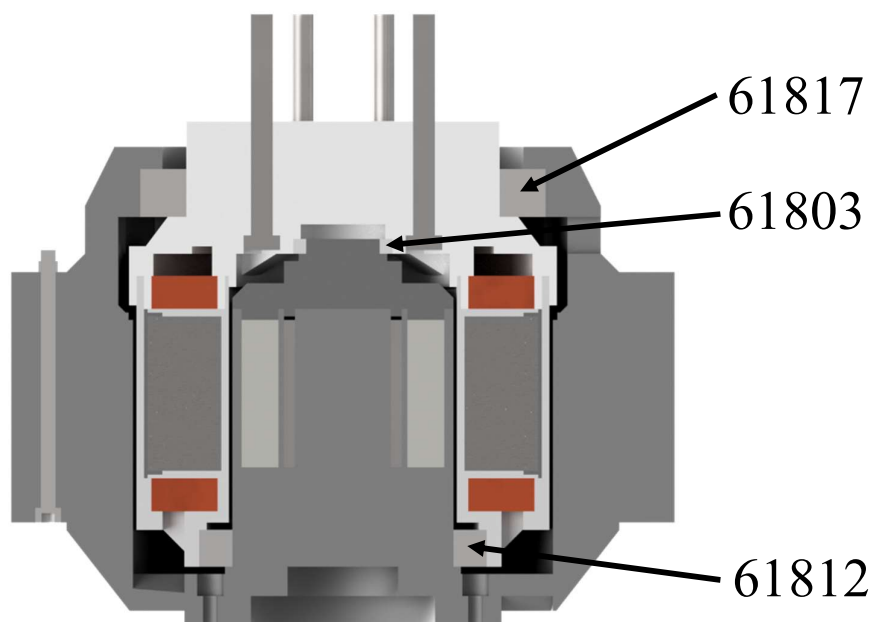


Obr. 3.11 Návrh desky pro uchycení navrženého BLDC stroje

Vzhledem k tomu, že každý stroj má odlišné typy přírub (počet děr, rozteče apod.), bylo třeba vytvořit nový plech k uchycení navrženého BLDC stroje, jehož náčrt je zobrazen na Obr. 3.11. Tato deska pro uchycení je vyrobena pomocí velkoplošného laserového plotteru z dřevěné desky s průměrem $d_p = 8$ mm. Je to dáno nízkou hmotností a tedy malými silami, kterými je deska vahou stroje namáhána. Výroba železné varianty této desky by byla časově náročná.



Obr. 3.12 CAD model celé sestavy BLDC stroje v částečném řezu



Obr. 3.13 CAD model celé sestavy BLDC stroje v řezu

Na Obr. 3.13 je možné vidět celou sestavu modelu navrženého BLDC stroje, kde jsou současně znázorněny umístění a označení jednotlivých ložisek. Jsou taktéž zobrazena čela zubového vinutí, permanentní magnety ve vnitřním rotoru a jeden z pětice stahovacích šroubů na vnějším rotoru.

4 Ověření návrhu konstrukce stroje z mechanického hlediska pomocí simulací

Již během konstrukčního návrhu pomocí CAD programu Autodesk Inventor, byl kladen důraz alespoň na částečnou symetrii. Je tomu tak proto, že strukturální numerické výpočty v Ansys Mechanical jsou velmi náročné na výpočetní výkon. Proto je vhodné minimalizovat například počet elementů sítě, vytvořením právě konkrétní symetrie modelu a tím zmenšit celkový „objem“ modelu, který je třeba počítat.

4.1 Určení statického tíhového zatížení na statoru

V případě statoru, je v tomto případě vhodné určit pouze statické tíhové zatížení, tedy stav, kdy se rotor netočí a pouze svojí hmotností namáhá strukturu statoru. To znamená, že model statoru je potřeba na plochách kontaktů s ložisky „zatížit“ známou hmotností rotoru s ložisky. Celková hmotnost rotoru i s ložisky je tedy přibližně:

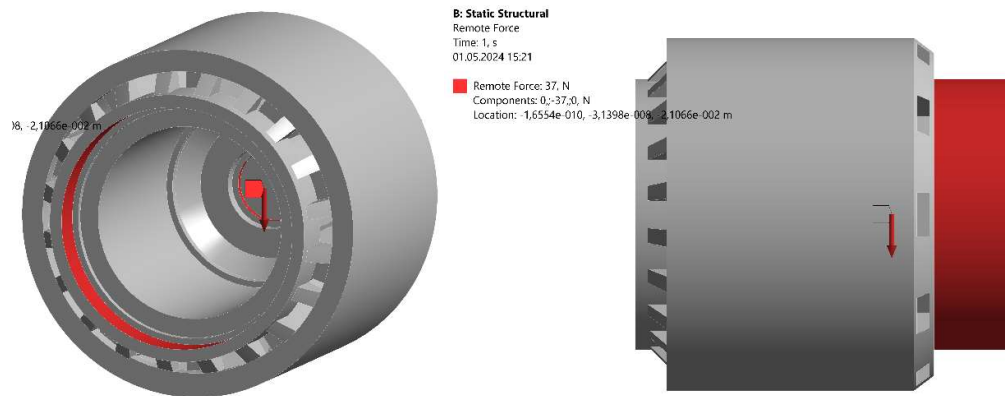
$$m_{Rot} \cong 3,7 \text{ kg} \quad (4.1)$$

Nastavení působení sil v tomto případě nelze nastavit jako hmotnost rozložená na plochu, ale jako síla F (N). Tedy známé hmotnosti rotoru odpovídá síla:

$$F_{g_Rot} \cong 36,85 \text{ N} \quad (4.2)$$

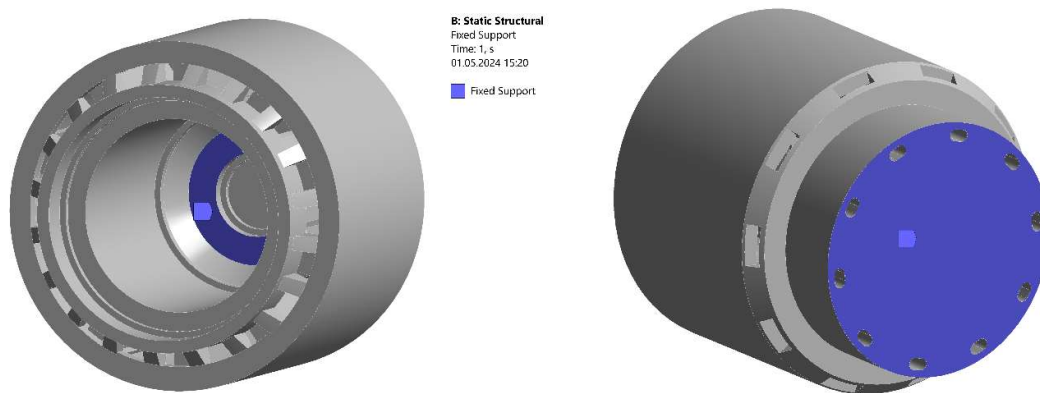
4.1.1 Nastavení okrajových podmínek modelu statoru

V této simulaci je uvažováno, že hmotnost rotoru a ložisek, respektive jejich tíhové zatížení je rozloženo celkem do tří rotačních ploch, tedy do míst, kde jsou umístěna ložiska. Právě proto, působí tíha rotoru v tomto případě pouze v jedné ose a to v ose Y .



Obr. 4.1 Rozložení tíhového zatížení statoru rotorem

Uchycení statoru stroje je přírubové a je tedy pouze z jedné strany (NDE). Právě na této straně je nutné nastavit podmínku uchycení „Fixed support“ (pevné uchycení), tedy uvažování, že tyto plochy se nebudou nijak posouvat od přírubové konstrukce. Umístění této podmínky je vidět na Obr. 4.2.

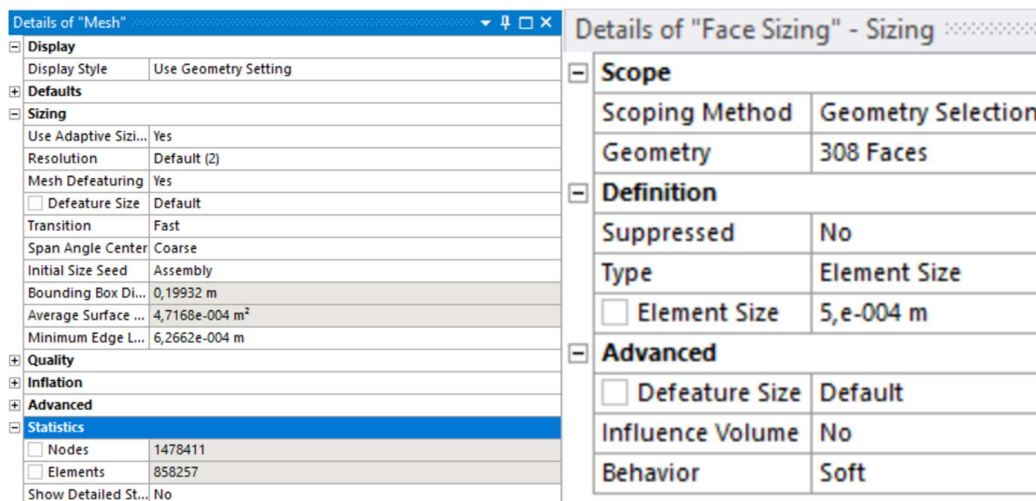


Obr. 4.2 Zobrazení umístění podmínek pevného uchycení

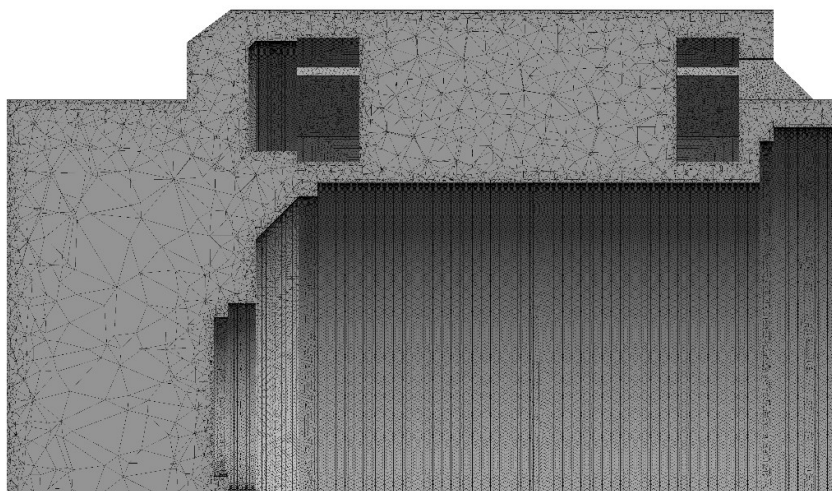
Pro stator byl v rámci simulace zvolen materiál ze standardní knihovny Ansys Workbench a to materiál PA12. Některé materiálové parametry byly upraveny na data udávané výrobcem použitého PA12 při stavbě navrženého stroje.

4.1.2 Nastavení výpočetní sítě statoru

Vzhledem k výskytu tenkostěnných částí v modelu statoru, bylo třeba stanovit minimální rozměr elementu výpočetní sítě. Ten byl stanoven na velikost 0,5 mm, uvedenou na Obr. 4.3.



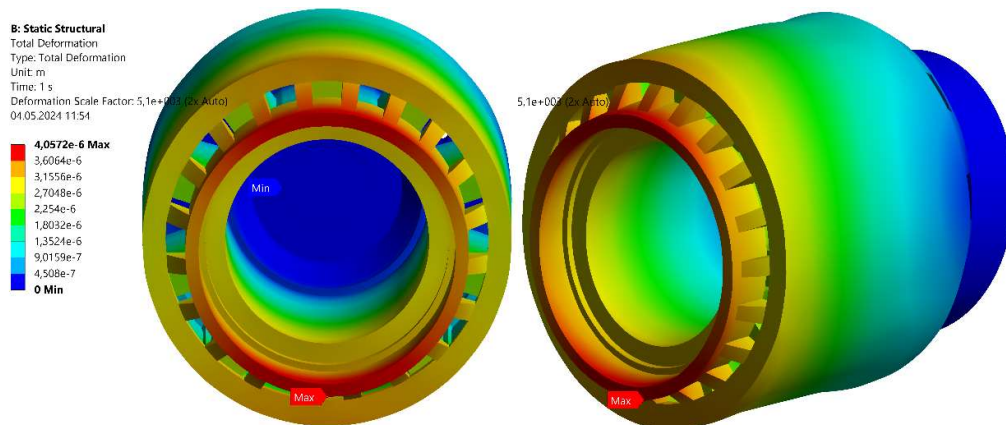
Obr. 4.3 Parametry nastavení výpočetní sítě pro model statoru



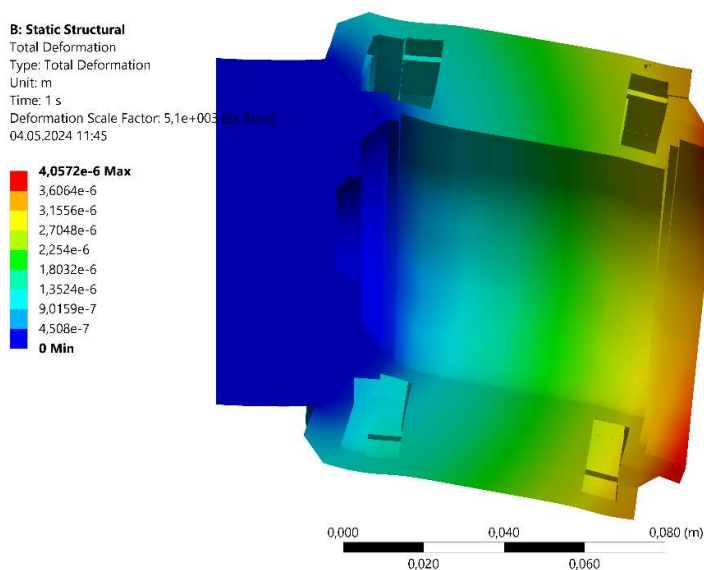
Obr. 4.4 Pohled na vykreslení výpočetní sítě statoru

4.1.3 Výsledné deformace a napětí ve statoru

Výsledná deformace struktury statoru byla metodou MKP vypočítána a její absolutní velikosti a trend deformace je vidět na Obr. 4.5 a 4.6. Teoretickým předpokladem je, že stator s přírubovou konstrukcí je zatížen tíhou rotoru a bude se ve své délce v ose z ohýbat.



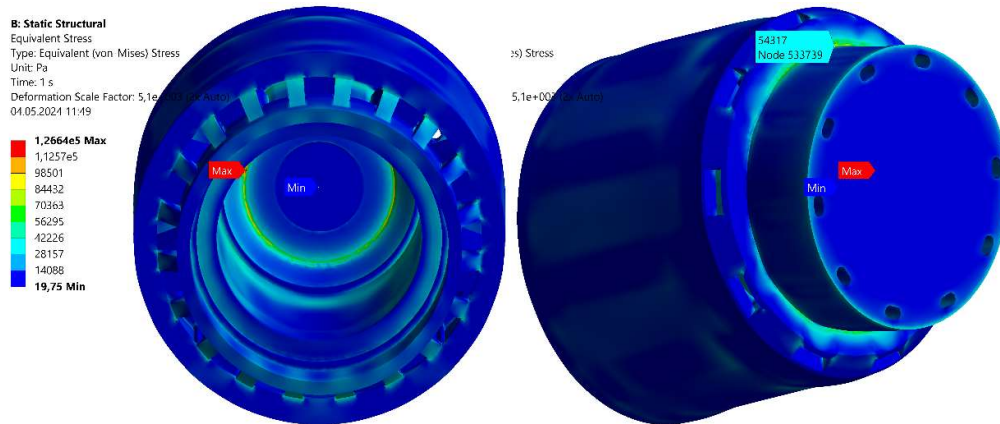
Obr. 4.5 Zobrazení deformací statoru vlivem statického tíhového zatížení rotorem



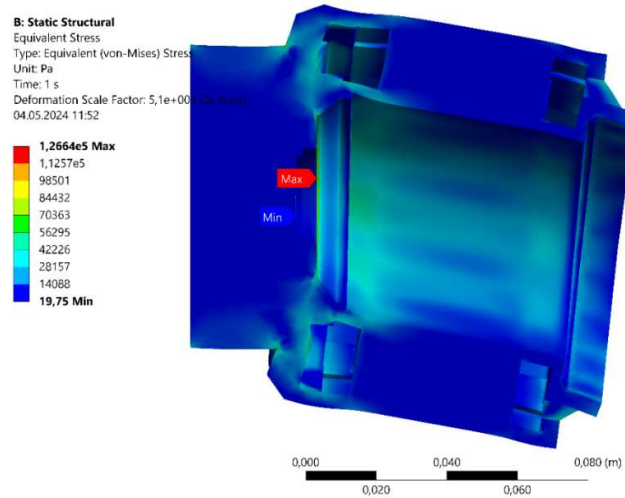
Obr. 4.6 Zobrazení deformací statoru vlivem statického tíhového zatížení rotorem v pohledu v řezu

Z Obr. 4.5 a 4.6 je patrné, že trend deformace odpovídá teoretickému předpokladu. Dle výpočtu MKP je maximální hodnota deformace na straně DE a to o velikosti:

$$x_{stator_max} \cong 4,06 \mu m \quad (4.3)$$



Obr. 4.7 Zobrazení ekvivalentního napětí (von-Mises) v objemu statoru



Obr. 4.8 Zobrazení ekvivalentního napětí (von-Mises) v objemu statoru v pohledu v řezu

Vypočítaná mechanická napětí ve statoru na Obr. 4.7 a 4.8 jsou pro názornost zobrazena bez „železa“, tedy zubů z elektrotechnických plechů. Vnitřní napětí těchto komponentů nejsou z tohoto hlediska důležitá. Z výpočtů MKP je získaná maximální hodnota ekvivalentního mechanického napětí von-Mises v objemu statoru:

$$\sigma_{ekv_max_stator} \cong 1,26 \text{ MPa} \quad (4.4)$$

4.2 Určení deformací a mechanického napětí v rotoru

Nejdůležitější komponentou, kterou je potřeba analyzovat statickou mechanickou analýzou je v tomto případě rotor. Je nutné stanovit deformace a napětí, která se mohou objevit v těle rotoru při působení odstředivých sil vlivem otáčení rotoru jmenovitými otáčkami. Vzhledem k charakteru materiálu rotoru by totiž mohlo dojít k překročení relativně malé meze pevnosti a tím k destrukci rotoru.

Je nutné podotknout, že pro analýzu modelu rotoru je pro jednoduchost uvažováno, že materiál, ze kterého je rotor vyroben (PETG) je izotropní. Proto je tato analýza pouze informativní a skutečný model se vlivem dodatečných materiálových vlastností může chovat částečně odlišně.

Materiálové vlastnosti PETG se uvádí v různých rozmezích, podle výrobce a hlavně podle parametrů tisku (extruze). Pro tento model byly použity parametry z [21].

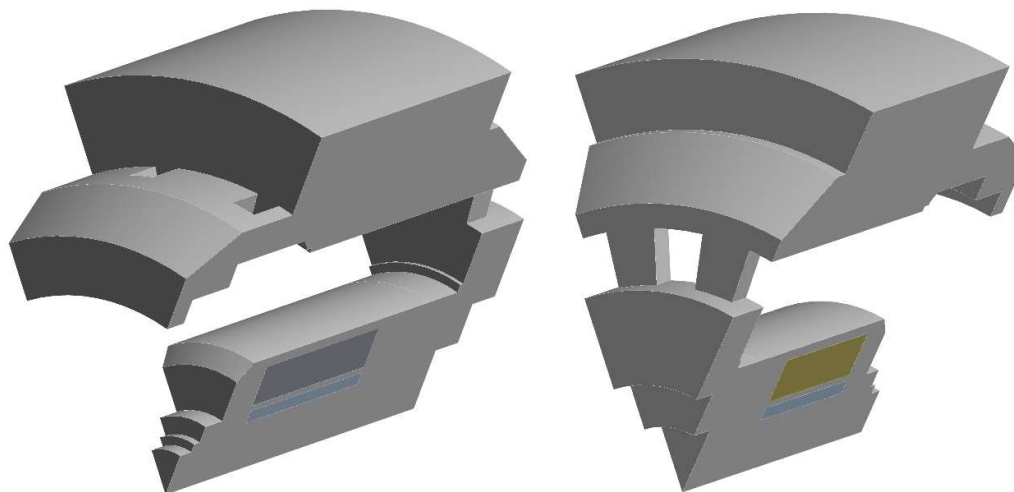
Tab. 4.1 Materiálové vlastnosti popisující materiál PETG pro Ansys Workbench – převzato [21]

Materiálový parametr		Velikost
Objemová hustota	ρ (kg/m ³)	1290
Youngův modul	E (Pa)	$2,2 \cdot 10^9$
Poissonovo číslo	μ (-)	0,33
Modul objemové pružnosti	K (Pa)	$2,156 \cdot 10^9$
Modul pružnosti ve smyku	G (Pa)	$8,27 \cdot 10^8$
Mez pevnosti v tahu	σ (Pa)	$47,9 \cdot 10^9$

Pro jho vnitřního rotoru (železná trubka), tedy část sloužící pro uzavírání magnetického toku od magnetů vnitřního rotoru, byl použit standartní materiál z materiálové knihovny

Ansyes Workbench a to „Structural steel“, tedy standartní ocel. Pro permanentní magnety byl použit materiál „N42 NdFeB“.

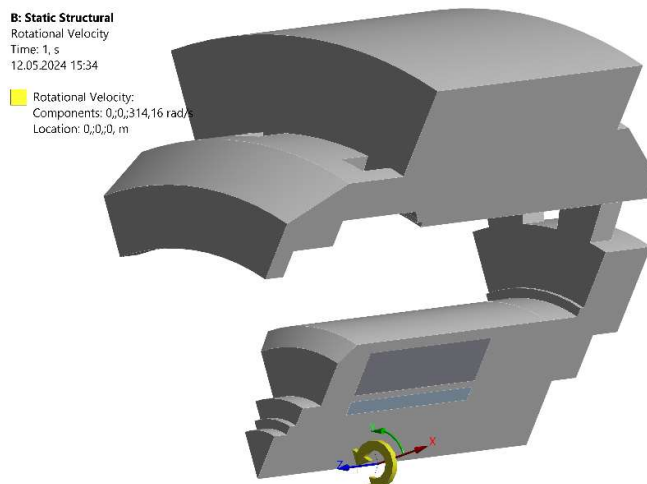
Pro zjednodušení výpočtu MKP z hlediska potřebného výpočetního výkonu, byla použita částečná symetrie rotoru. Tím je možné docílit mnohem jemnější sítě při zachování stejného počtu uzlů jako v celkové geometrii modelu. Model s 1/8 symetrií je možné vidět na Obr. 4.9.



Obr. 4.9 Izometrický pohled na 1/8 sektor symetrie rotoru zleva: Strana NDE; strana DE

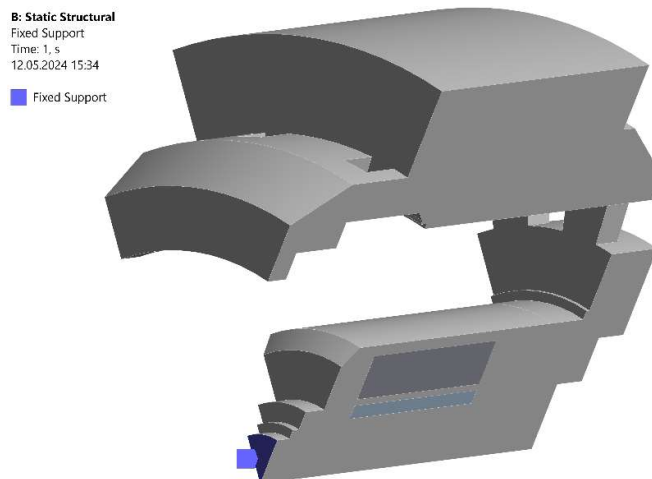
4.2.1 Nastavení okrajových podmínek modelu statoru

V této simulaci je uvažováno, že se rotor bude otáčet jmenovitými otáčkami v ustáleném stavu, tedy bez žádných skokových změn. Simulace je tedy statická.



Obr. 4.10 Nastavení podmínek rotace v ose Z modelu rotoru

Dalším předpokladem je, že stroj je na vnitřním rotoru „pevně“ uchycen vnitřním ložiskem. Tato podmínka stabilizuje výpočet a zároveň lze ji skutečně v rotoru předpokládat, protože v tomto místě bude docházet k nejmenším mechanickým napětím a deformacím.



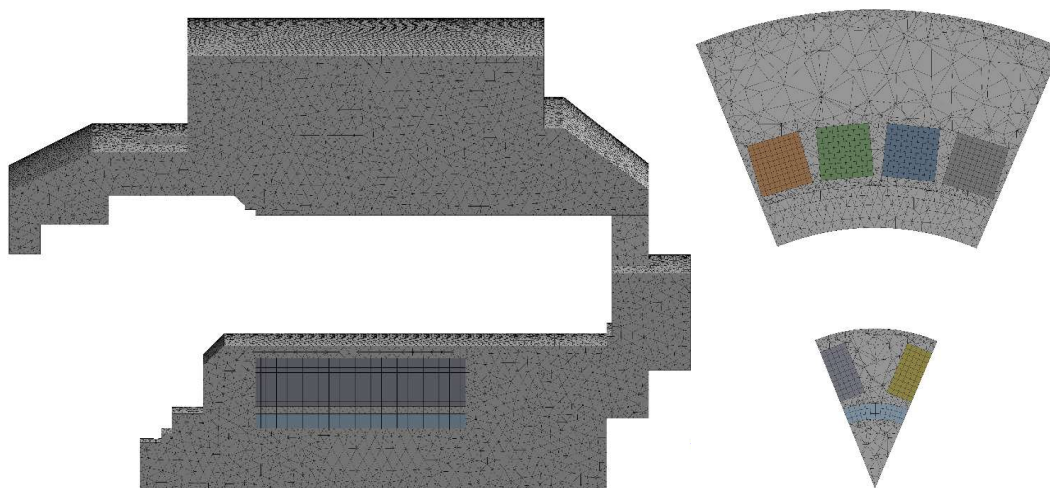
Obr. 4.11 Nastavení podmínek uchycení modelu rotoru

4.2.2 Nastavení výpočetní sítě rotoru

Vzhledem k výskytu tenkostěnných částí v modelu rotoru, bylo třeba stanovit minimální rozměr elementu výpočetní sítě. Ten byl stanoven na velikost 1 mm, uvedenou na Obr. 4.12.

Details of "Mesh"	
[-] Display	
Display Style	Use Geometry Setting
[-] Defaults	
Physics Preference	Mechanical
Element Order	Program Controlled
<input type="checkbox"/> Element Size	1,e-003 m
[-] Sizing	
Use Adaptive Sizi...	Yes
Resolution	Default (2)
Mesh Defeaturing	Yes
<input type="checkbox"/> Defeature Size	Default
Transition	Fast
Span Angle Center	Coarse
Initial Size Seed	Assembly
Bounding Box Di...	0,17044 m
Average Surface ...	4,0693e-004 m ²
Minimum Edge L...	8,e-004 m
+ Quality	
+ Inflation	
+ Advanced	
[-] Statistics	
<input type="checkbox"/> Nodes	331470
<input type="checkbox"/> Elements	153480
Show Detailed St...	No

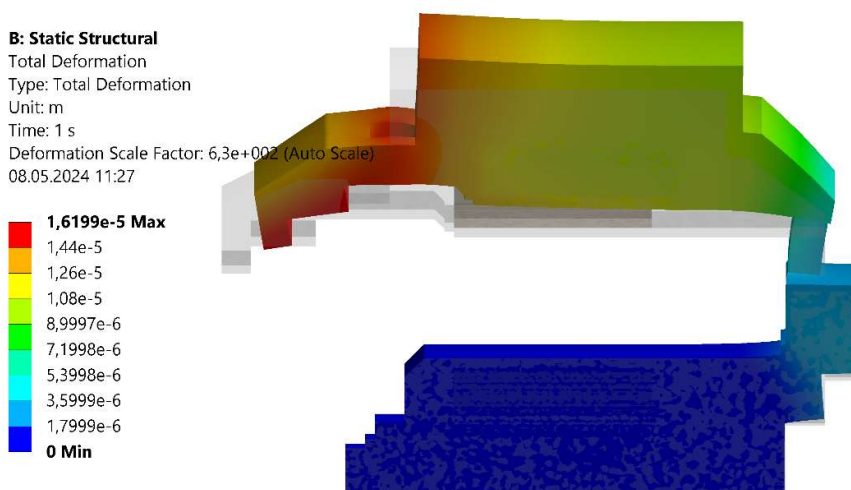
Obr. 4.12 Parametry nastavení výpočetní sítě pro model rotoru



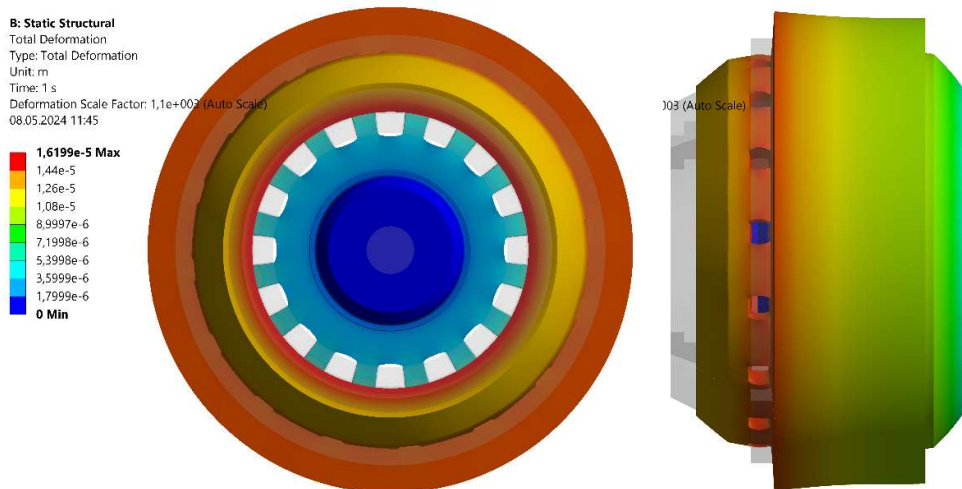
Obr. 4.13 Pohled na vykreslení výpočetní sítě v objemu rotoru

4.2.3 Výsledné deformace a napětí v rotoru

Zobrazené vypočítané deformace na Obr. 4.12 a 4.13 ukazují trend, jakým se jednotlivé části a oblasti budou deformovat. Teoretickým předpokladem je, že vzhledem ke konstrukci, se vnější rotor se zvyšujícími otáčkami roztahuje v radiálním směru. Tomuto předpokladu odpovídají i tyto vypočítané deformace:



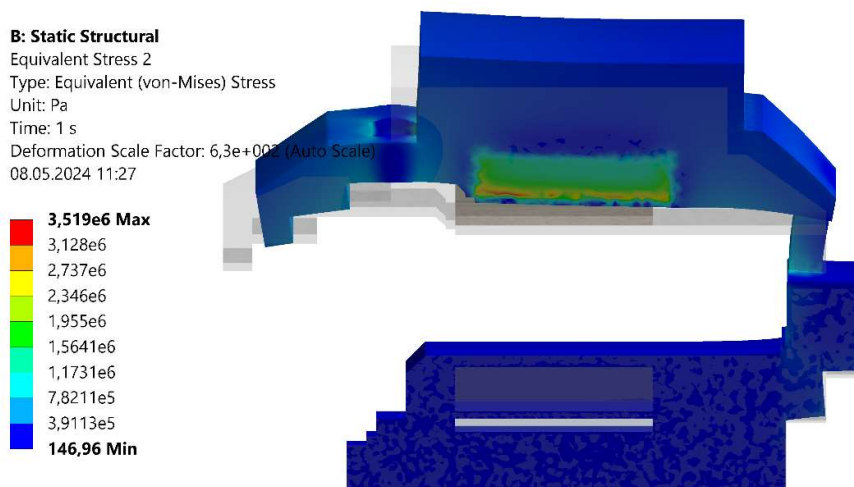
Obr. 4.14 Výsledná vypočítaná deformace rotoru zobrazená v 1/8 sektoru symetrie



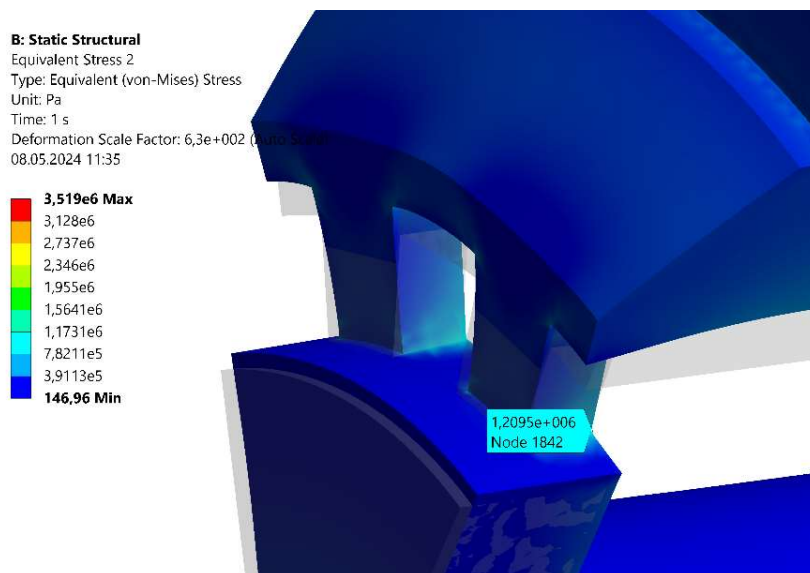
Obr. 4.15 Výsledná vypočítaná deformace rotoru zobrazená v celém modelu

Na obrázcích se zobrazenými deformacemi je dále vidět šedou barvou původní nedeformovaný rotor pro porovnání.

$$x_{rotor_max} \cong 16,20 \mu m \quad (4.5)$$



Obr. 4.16 Výsledné vypočítané ekvivalentní napětí von-Mises v objemu rotoru zobrazené v 1/8 sektoru symetrie



Obr. 4.17 Výsledné vypočítané ekvivalentní napětí von-Mises v detailu na lopatky axiálního ventilátoru strany DE

Vypočítaná mechanická napětí v rotoru na Obr. 4.14 a 4.15 jsou zobrazena bez permanentních magnetů a vnitřního jha (železné tyče). Vnitřní napětí těchto komponentů nejsou z tohoto hlediska důležitá. Z výpočtů MKP je získaná maximální hodnota ekvivalentního mechanického napětí von-Mises v objemu rotoru:

$$\sigma_{ekv_max_rot} \cong 3,52 \text{ MPa} \quad (4.6)$$

Ze získaných hodnot napětí a deformací výpočtem MKP lze usoudit, že stroj je bezpečné provozovat v navržených jmenovitých otáčkách. Je tomu tak proto, že maximální vypočítaná hodnota ekvivalentního mechanického napětí von-Mises je výrazně nižší, nežli mezní napětí materiálu PETG dle výrobce. Nicméně nelze tyto výpočty považovat za naprosto správné a je tedy nutné při měření stroje dbát na bezpečnosti osob a okolí.

5 Stavba navrženého stroje

Jak již bylo zmíněno, většina komponent navrhovaného stroje, je vyrobena aditivními technologiemi neboli 3D tiskem. Statorová část je vyrobena metodou SLS a to za pomoci tiskárny Sintratec S2 od švýcarské společnosti Sintratec z materiálu PA12 od stejného výrobce. Je to kvůli tomu, že tento materiál je odolnější vyšším teplotám nežli PETG a má celkově velmi dobré mechanické vlastnosti. Rotační části jsou vyrobeny pomocí metody FDM z materiálu PETG, od české společnosti Prusa Research. Vybrané hlavní parametry nastavení tisku, jsou zobrazeny v kapitole 5.1 v Tab. 5.1. Problematické části jako je kompletace vinutí, uložení permanentních magnetů a neposlední řadě uložení ložisek do stroje plného permanentních magnetů jsou popsány v následujících kapitolách.

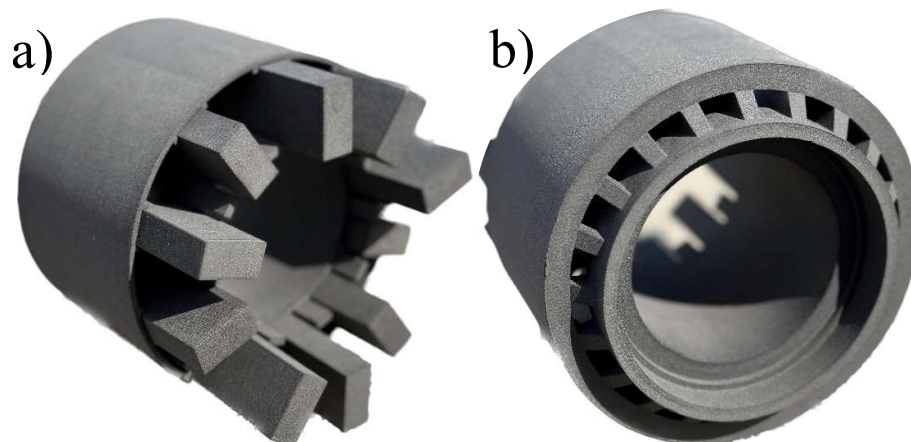
5.1 Parametry 3D tisku jednotlivých částí stroje

Tab. 5.1 Vybrané vstupní a výstupní parametry tištěných komponent navrženého stroje

Komponent	Metoda tisku	Materiál (výrobce)	Tiskárna (Výrobce)	Výška vrstvy (mm)	Min. počet perimetrů (-)	Výplň (%)	Hmotnost (g)
Rotor	FDM	PETG (Prusament)	MK4 (Prusa Research)	0,2	5	80	1235
Rotorová krytka vnější	FDM	PETG (Prusament)	MK4 (Prusa Research)	0,2	4	80	339
Rotorová krytka vnitřní	FDM	PETG (Prusament)	MK4 (Prusa Research)	0,2	3	60	30
Stator	SLS	PA12	S2 (Sintratec)	0,1	/	100	118,9
Statorová krytka	SLS	PA12	S2 (Sintratec)	0,1	/	100	226,6
Zub	SLS	PA12	S2 (Sintratec)	0,1	/	100	3,1
Zub krytka	SLS	PA12	S2 (Sintratec)	0,1	/	100	0,5

5.2 Výroba statoru

Stator je jako celek navržen tak, aby bylo možné jej vytisknout pomocí SLS tiskárny S2 od firmy Sintratec.



Obr. 5.1 Stator a statorové zuby: a) Pohled na stranu NDE, b) Pohled na stranu DE

Díly, které jsou vidět na Obr. 5.1 a Obr. 5.2 vytištěné pomocí SLS tiskárny je třeba velmi důkladně očistit od nespečeného prášku. V tomto případě je to velmi důležité, protože na těchto dílech budou umístěna ložiska, do kterých by se zbylý prášek mohl dostat a mohl by zřejmě působit abrazivně a tedy snížit jejich celkovou životnost.



Obr. 5.2 Hlavní statorová část s osazenými zuby, strana NDE

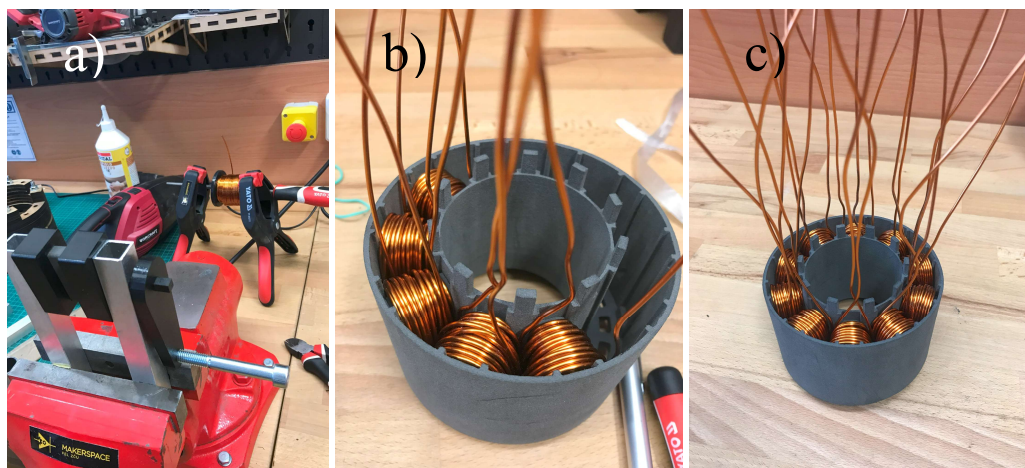


Obr. 5.3 *Statorové zuby osazené elektrotechnickými plechy*

Statorové zuby, respektive schránky na elektrotechnické plechy, které dohromady tvoří zuby, jsou vyrobeny jako zbytek statoru metodou SLS z materiálu PA12. V každém zubu je umístěno 80 elektrotechnických plechů o tloušťce 0,5mm. Což odpovídá délce 40 mm aktivních částí (permanentních magnetů). Tyto zuby jsou vidět na Obr. 5.3.

5.3 Vinutí





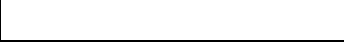
Pro navinutí cívek statorového vinutí, byla pro jednoduchost vyrobena primitivní ruční páková navíječka, která celý proces navíjení velmi ulehčila. Do dvojice obdélníků s přibližně 1 mm hlubokou drážkou se uchytlí zub statoru a kolem něj se pomocí pákového mechanismu začne navíjet vinutí o 30 závitů. Díky tomu, že stator je vyroben z polymeru PA12, jsou hrany zubu poměrně měkké a tedy nehrozí proražení izolace vodičů cívky.



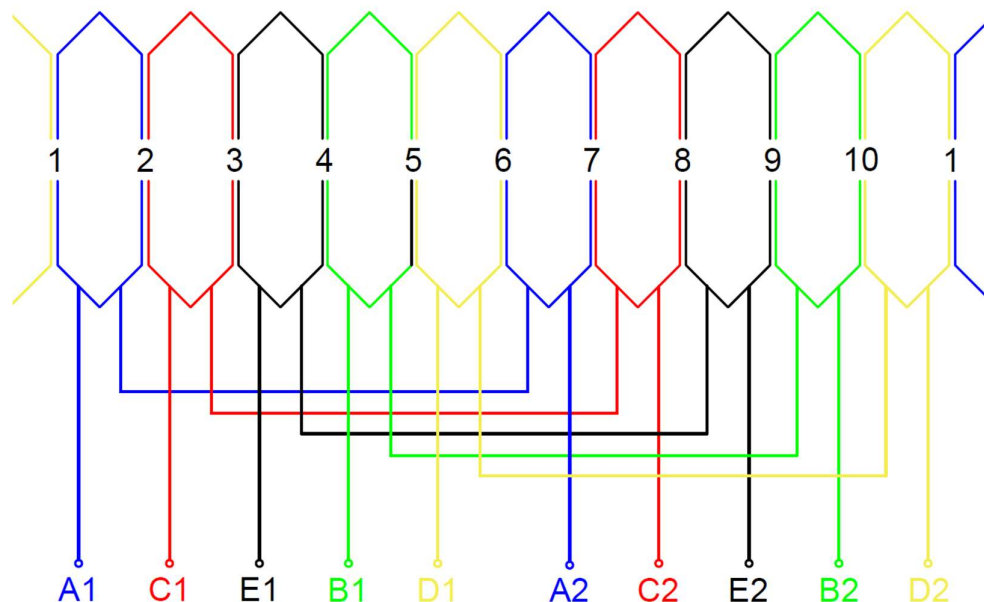
Obr. 5.4 Proces navíjení vinutí statoru: a) Navíječka vinutí, b) Částečně navinutý stator, c) Kompletně navinutý stator

Zapojení zubového vinutí je v tomto případě poměrně jednoduché, protože každá fáze má pouze dvě cívky, ve statoru rozložených po 180° mechanických a 30 závitů na cívku. Nicméně pro přehlednost je vhodné, aby vodiče byli vzájemně barevně odlišitelné, pro případné úpravy nebo opravy vnitřního zapojení vinutí. V Tab. 5.2 jsou uvedeny přidělené barvy jednotlivých fází navrženého stroje.

Tab. 5.2 Barevné rozlišení vodičů jednotlivých fází statorového pětifázového vinutí

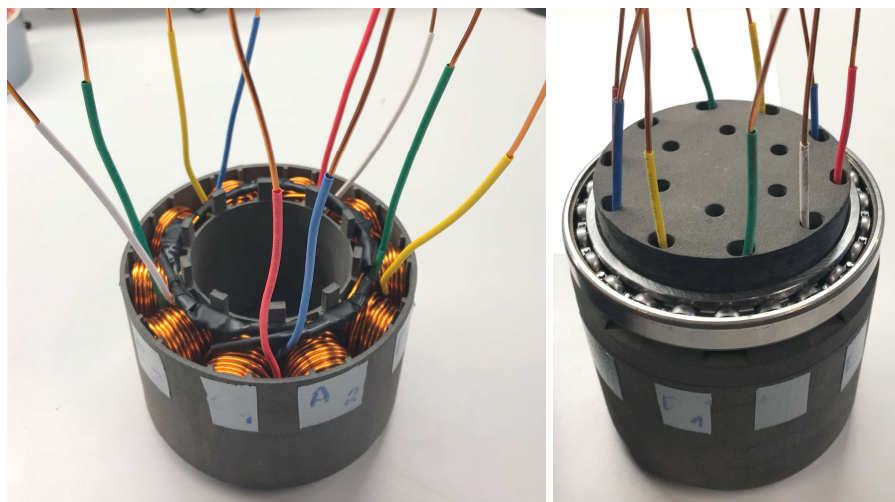
Fáze	Barevné označení	
A	Modrá	
B	Zelená	
C	Červená	
D	Žlutá	
E	Bílá (černá)	

Na Obr. 5.5 je možné vidět konstrukční schéma vinutí stroje. V případě fáze E je zde použita černá barva, ale ve skutečnosti je této fázi přiřazena barva bílá. Je to kvůli tomu, že bílá barva by na bílém pozadí konstrukčního schématu nebyla vidět.



Obr. 5.5 Konstrukční schéma vinutí statoru navrženého BLDC stroje

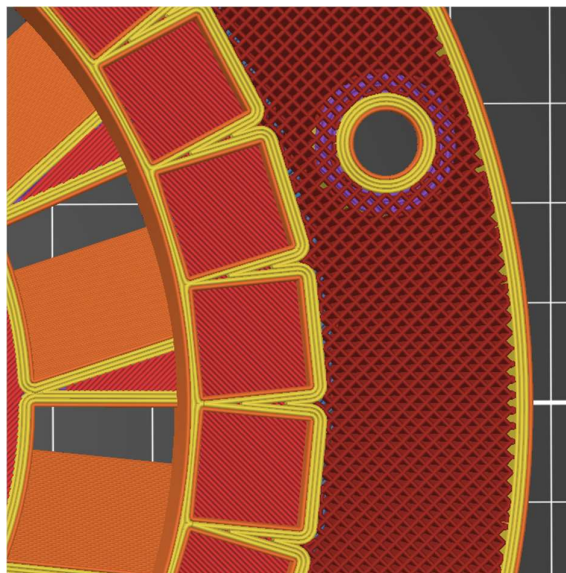
Dvojice cívek jednotlivých fází jsou pospojovány uvnitř statoru pomocí svorek z elektrických svorkovnic a pro jejich ochranu jsou tyto cesty obaleny smršťovacími bužírkami. Vývody jednotlivých fází jsou pak obaleny i korespondující barevnou bužírkou pro jejich odlišení.



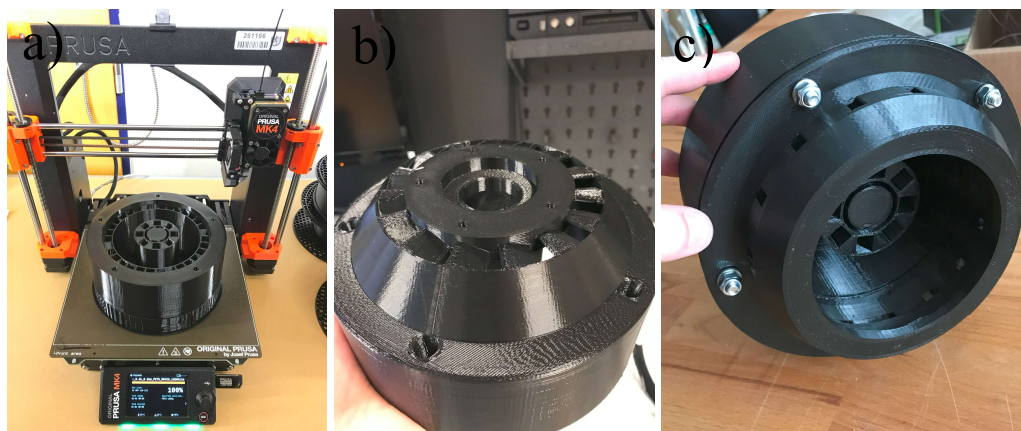
Obr. 5.6 Barevné označení jednotlivých fází statorového pětifázového vinutí

5.4 Rotor

Rotor je zde největší částí určenou k 3D tisku. Proto bylo nutné důkladně zhodnotit všechny nastavené parametry tisku a jaké důsledky budou mít na celkové mechanické vlastnosti rotoru. Na základě zkušeností a doporučení byl například zvýšen počet perimetrů okolo stěn výtisku. To znamená, že by stěny a technické otvory měli být mechanicky odolnější, ale zároveň bude rotor těžší.



Obr. 5.7 Detail řezu modelu rotoru v PrusaSlicer



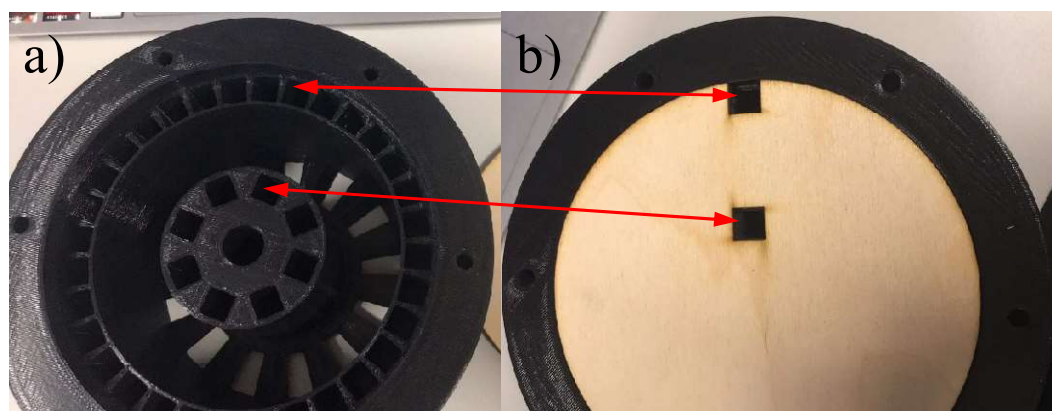
Obr. 5.8 Rotor: a) Výtisk hlavní rotorové části, b) Pohled na stranu DE, c) Kompletní rotor stažený šrouby

Při zasouvání permanentních magnetů do jejich slotů, bylo třeba dodržet správný směr, respektive jejich orientaci magnetizace. Protože permanentní magnety nejsou z výroby nikterak označeny, byla provedena zkouška pomocí teslametru Elimag MP-1, který podle použité sondy umí měřit v jedné, dvou nebo třech osách X, Y a Z. Při měření magnetické indukce permanentních magnetů pak podle pólu a natočení sondy přístroj ukazuje buď kladnou nebo zápornou hodnotu magnetické indukce B_z (mT), jak je vidět na Obr. 5.8.



Obr. 5.9 Zjišťování směru magnetizace permanentních magnetů použitých v navrženém BLDC stroji

Další problematickou částí při zasouvání magnetů do slotů je jejich poměrně velká přitažlivá síla, která je v tomto případě velmi znatelná, protože jsou magnety velmi blízko sobě. Proto byl pomocí expanzního CO₂ laseru vyroben velmi jednoduchý přípravek, na bezpečné zasouvání magnetů do příslušných slotů.

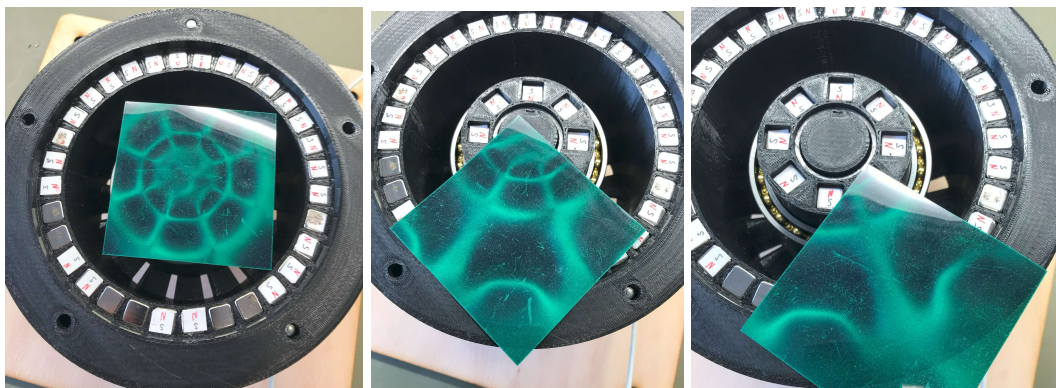


Obr. 5.10 Přípravek na zasouvání permanentních magnetů do jejich slotů v rotoru

Na Obr. 5.11 je možné vidět všechny kompletně usazené permanentní magnety ve slotech rotoru. Taktéž jsou pro názornost vidět papírové indikátory směru orientace permanentních magnetů a dále i uložené vnitřní ložisko.



Obr. 5.11 Hlavní rotorová část osazená permanentními magnety s označenou polarizací (North, South)

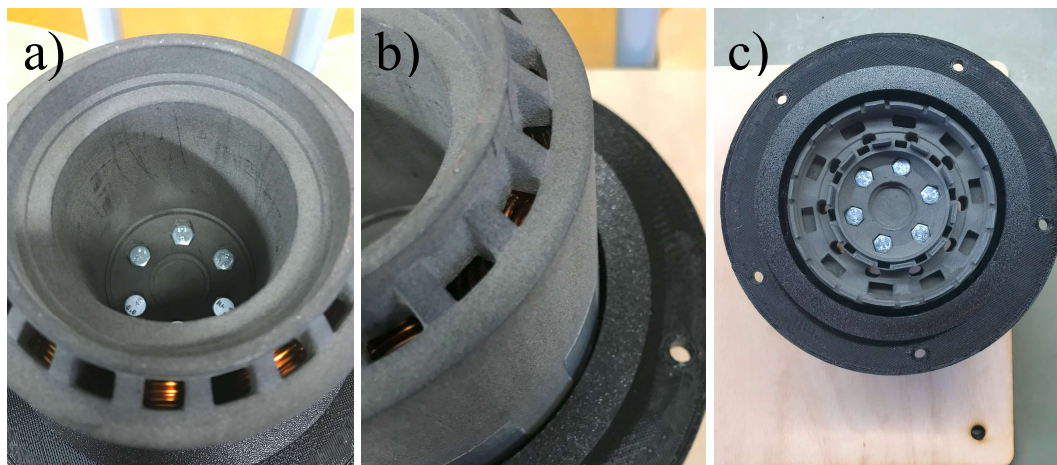


Obr. 5.12 Zobrazení magnetických siločar permanentních magnetů pomocí fólie citlivé na magnetické pole (flux detector)

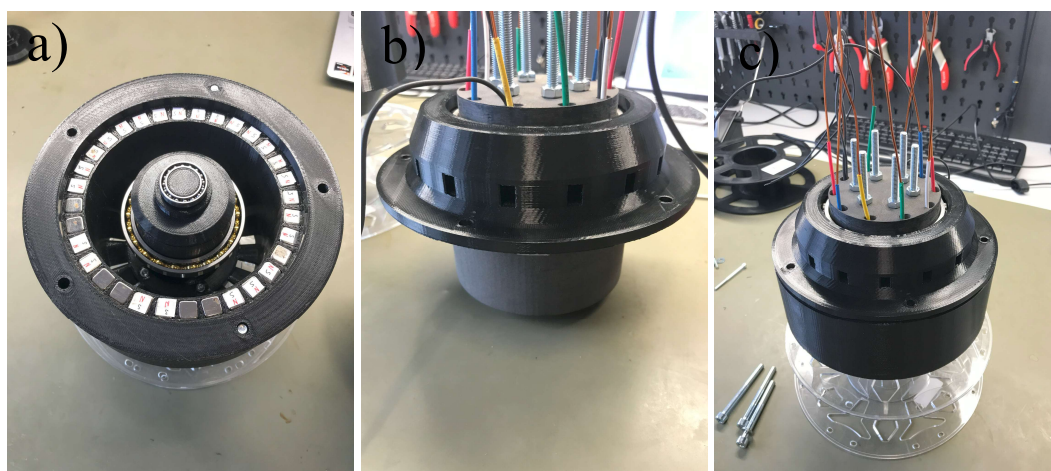
Na Obr. 5.11 je zobrazeno, v několika polohách, magnetické pole permanentních magnetů za pomoci speciální fólie citlivé na přítomnost magnetického pole. Prochází-li magnetické pole k sensorové fólii kolmo, například u pólů, fólie ztmavne. Když magnetické pole probíhá rovnoběžně, fólie zesvětlá.

5.5 Sestavení celého stroje

Kompletace strojů s permanentními magnety je obecně velmi náročná a nebezpečná. V tomto případě byla o něco jednodušší, protože stator s elektrotechnickými plechy a ložisky jsou chráněny vnější schránkou, a proto po vložení do silného pole rotoru se samovolně vycentrují do středu (kvůli vnitřnímu rotoru) a je třeba jen velmi málo korekce k jejich ustavení.



Obr. 5.13 Pohled na statorovou část: a) Kompletní stator s vinutím hlavním ložiskem na straně NDE, b) Přibližný pohled na vnější vzduchovou mezeru, c) Statorová část NDE s vývody vinutí a vnějším rotorovým krytem

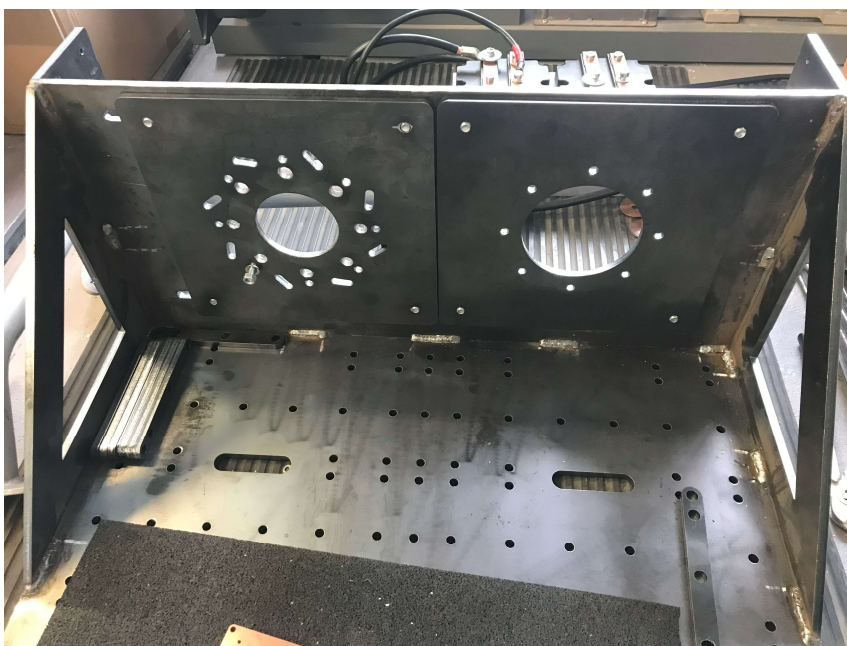


Obr. 5.14 Skládání celého BLDC stroje: a) Kompletní rotor, b) Stator osazen hlavním ložiskem a vnějším rotorovou krytkou, c) Sestavený stroj

6 Měření a zkoušení parametrů navrženého stroje

Jak již bylo zmíněno v kapitole 3, navrhovaný BLDC stroj je za pomoci příruby k dřevěné desce pevně připevněn k železné konstrukci. Veškerá měření parametrů stroje byla tedy provedena na této víceúčelové konstrukci pro měření elektrických točivých strojů. Konstrukce je svařena z vypalovaných ocelových plechů o tloušťce 8 mm.

Ve všech provedených měření bylo pro jednoduchost a menší časovou náročnost zapojen pouze jeden typ vinutí, a to do hvězdy, kde jeden konec každé fáze je zapojen do společného uzlu.



Obr. 6.1 Měřicí stanoviště pro soustrojí

Zdrojem momentu pro pohon navrhovaného BLDC je asynchronní motor (ASM), který je právě součástí soustrojí a je charakterizován jako dvoupólový. Štítek tohoto asynchronního motoru je vidět v Tab. 6.1.

Tab. 6.1 Štítek asynchronního motoru použitého v měřícím soustrojí

Siemens						
3~MOT 1LE10010EA422AB4-Z				Th.Cl. 155(F)		
IEC/EN 60034		FS 90L		IMB3	IP55	
V	Hz	kW	A	PF	RPM	ETA %
230 Δ	50	2,20	7,8	0,85	2890	83,2
400 Y	50	2,20	4,5	0,85	2890	83,2
460 Y	60	2,55	4,35	0,86	3485	83,5

Dle štítku jsou jeho jmenovité otáčky při frekvenci 50 Hz:

$$n_{nASM} = 2890 \text{ ot/min}, \quad (6.1)$$

což znamená, že stroj je charakterizován jako dvoupólový.

Soustrojí využívá snižující (z pohledu BLDC stroje) řemenový převod, jehož velikost je:

$$\mu_{\text{řemen}} = \frac{D_{\text{řemenice}}}{D_1} = \frac{50}{180} = 0,2777, \quad (6.2)$$

kde $D_{\text{řemenice}}$ (mm) je průměr řemenice usazené na hřídeli asynchronního motoru a D_1 (mm) je vnější průměr BLDC stroje.

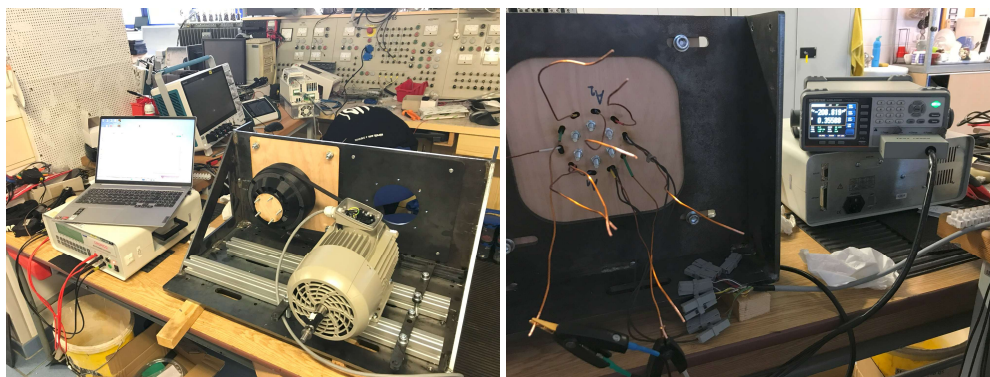
To znamená, že přibližná hodnota maximálních otáček dosažitelných v této konfiguraci soustrojí je:

$$n_{maxBLDCsoustroji} = n_{nASM} \cdot \mu_{\text{řemen}} = 2890 \cdot 0,2777 \cong 800 \text{ ot/min} \quad (6.3)$$

Nicméně, stroj je dle štítku možné napájet frekvencí až 60 Hz, to znamená že maximální otáčky BLDC stroje mohou být mírně vyšší (viz Obr. 6.5).

6.1 Měření a výpočty parametrů vinutí

Měření elektrických odporů vinutí jednotlivých fází bylo provedeno pomocí měřícího přístroje CROPICO Microhmmeter DO5000, což je digitální ohmmetr s automatickou tepelnou kompenzací, která zajišťuje že změřené hodnoty odporů odpovídají hodnotám odporů při 20°C.



Obr. 6.2 Měřicí stanoviště pro měření odporů (vlevo) a indukčnosti (vpravo) vinutí

Kromě hodnot elektrického odporu vinutí, uvedených v Tab. 6.1, bylo provedeno i měření indukčností vinutí laboratorním přístrojem GW INSTEK LCR-6300, který slouží právě k měření indukčností a kapacit, případně odporů. Nicméně vzhledem k tomu, že velikost indukčností vinutí silně závisí na poloze rotoru, bylo by toto měření velmi komplikované a zdlouhavé. Namísto toho se velikost indukčností vinutí zjistila pomocí měření nakrátko za snížené rychlosti a s naměřenými hodnotami odporů se velikost indukčností dopočítala. Hodnoty získané měřením nakrátko jsou uvedeny v Tab. 6.4 v kapitole 6.2.

Tab. 6.2 Měření elektrických odporů jednotlivých fází

Fáze	Barva fáze	R (m Ω)	R_{str} (m Ω)
A	Modrá	84,8	82,446
B	Zelená	81,6	
C	Červená	83,2	
D	Žlutá	78,9	
E	Bílá	83,8	

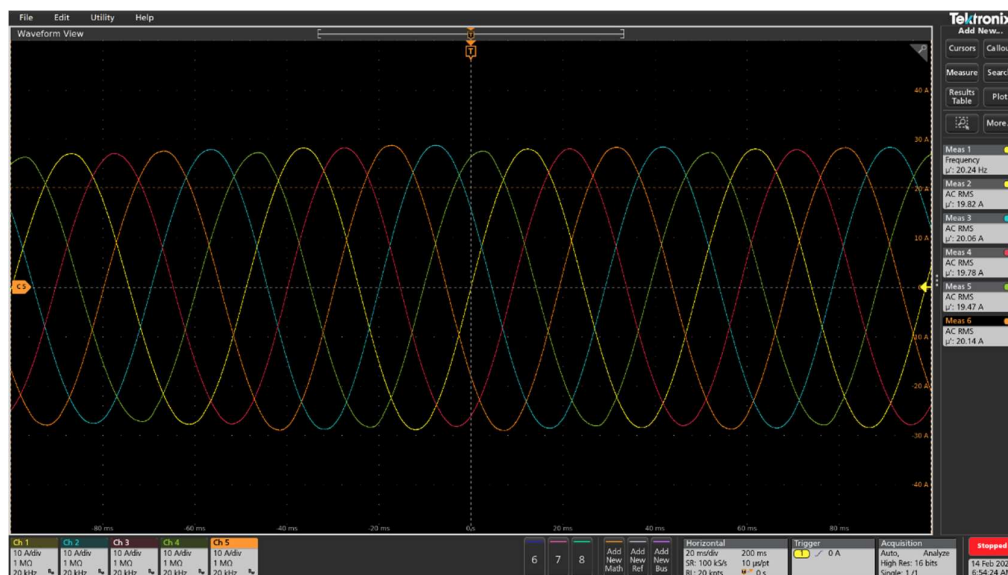
Odpory jednotlivých vinutí fází nejsou stejné, jak je vidět v Tab. 6.2 respektive Tab. 6.3. Důvodem je neshodný počet závitů, případně odpory kontaktů svorkovnice. Toto je více popsáno v kapitole 6.3.1 při měření naprázdno. Jak již bylo zmíněno, odpory odpovídají hodnotám při teplotě 20°C.

Tab. 6.3 Hodnoty elektrických odporů jednotlivých fází pro $T = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$

Fáze	Barva fáze	R (m Ω)	R_{stf} (m Ω)
A	Modrá	94,8	92,14
B	Zelená	91,2	
C	Červená	92,9	
D	Žlutá	88,1	
E	Bílá	93,6	

6.2 Měření nakrátko

Měření nakrátko bylo provedeno za snížené rychlosti a při spojení vinutí do hvězdy. Kvůli vysokému proudu, který teče vyzkratovaným pětifázovým vinutím, bylo měření provedeno za snížené rychlosti, tedy rychlosti nižší, nežli je maximální možná rychlost řemenového převodu. Výsledné průběhy proudu nakrátko I_k (A) je vidět na průběhu z osciloskopu na Obr. 6.3.



Obr. 6.3 Průběh proudu nakrátko jednotlivými fázemi při frekvenci 20 Hz

Na tomto snímku z osciloskopu je mimo jiné vidět i změřená frekvence proudu nakrátko ve vinutí BLDC, která je:

$$f_{nakrátko} = 20,24\text{ Hz}, \quad (6.4)$$

což po přepočtu odpovídá mechanickým otáčkám BLDC:

$$n_{nakrátko} = f_{nakrátko} \cdot \frac{n_{nBLDC}}{f_e} = 20,24 \cdot \frac{3000}{200} = 303,6 \text{ ot/min}, \quad (6.5)$$

kde n_{nBLDC} (ot/min) jsou jmenovité otáčky navrhovaného BLDC stroje a f_e (Hz) je frekvence komutace a zároveň frekvence rotace magnetického pole.

Tab. 6.4 Naměřené a spočtené hodnoty z měření nakrátko při snížené rychlosti

Číslo kanálu	Fáze	I_k (A)	f_i (Hz)	U_i (V)	f_u (Hz)	Z_d (Ω)	X_d (Ω)	L (μ H)	R (Ω)
1	A	19,82	20,24	1,823	20,25	0,0920	0,0356	280,104	0,085
2	C	20,06	20,24	1,819	20,25	0,0907	0,0361	283,546	0,083
3	E	19,78	20,24	1,842	20,25	0,0931	0,0406	319,384	0,084
4	B	19,47	20,24	1,784	20,25	0,0916	0,0417	328,201	0,082
5	D	20,14	20,24	1,721	20,25	0,0855	0,0329	258,790	0,079

$$Z_d = \frac{U_i}{I_k} = \frac{1,823}{19,82} = 0,092 \Omega, \quad (6.6)$$

kde Z_d (Ω) je impedance vinutí dané fáze, U_i (V) je změřené svorkové napětí a I_k (A) je změřený proud nakrátko.

$$X_d = \sqrt{Z_d^2 - R^2} = \sqrt{0,092^2 - 0,0848^2} = 0,0356 \Omega, \quad (6.7)$$

kde X_d (Ω) je reaktance vinutí, Z_d (Ω) je impedance vinutí dané fáze a R (Ω) elektrický odpor.

$$L = \frac{X_d}{\omega} = \frac{X_d}{2 \cdot \pi \cdot f_i} = \frac{0,0356}{2 \cdot \pi \cdot 20,24} = 280,104 \mu H, \quad (6.8)$$

kde L (H) je indukčnost vinutí, X_d (Ω) je reaktance vinutí a f (Hz) je frekvence.

6.3 Měření naprázdno

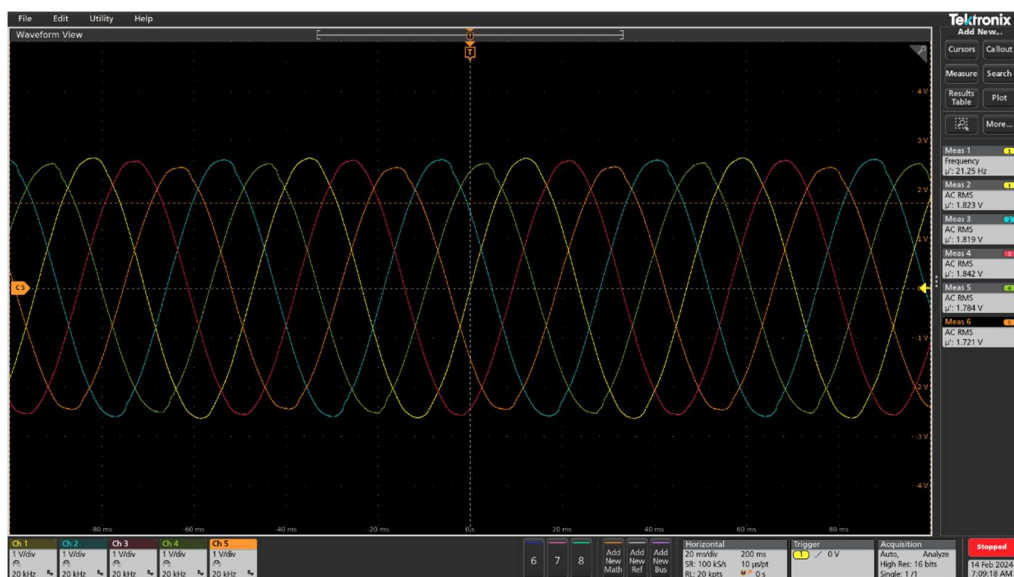
Měření naprázdno je v tomto případě rozděleno do několika měření. Prvním měřením je měření indukovaného napětí, kdy je BLDC stroj roztočen pomocí ASM a ve třech různých velikostech otáček BLDC stroje jsou změřeny průběhy indukovaných napětí pomocí osciloskopu.

6.3.1 Měření velikosti indukovaného napětí

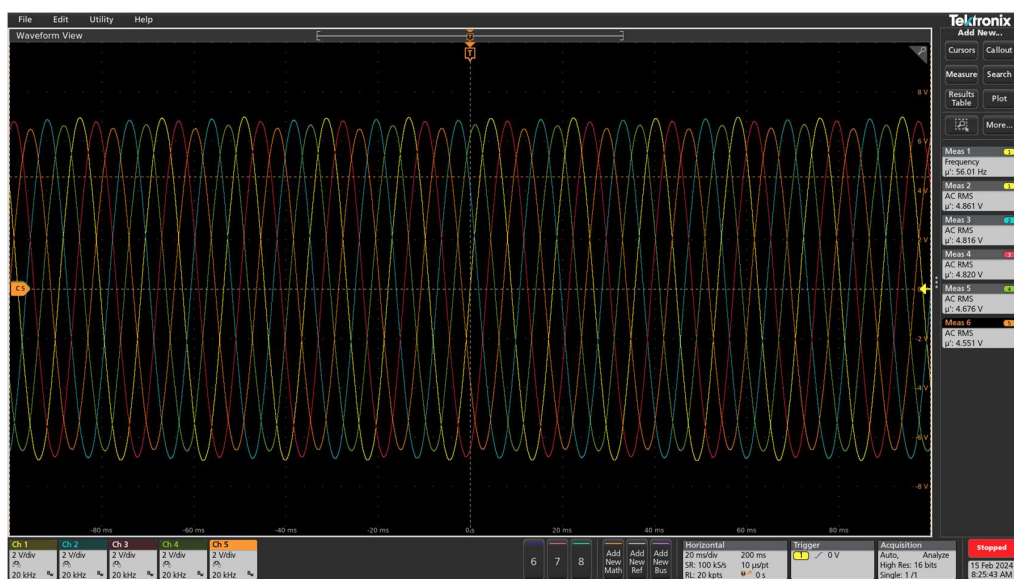
Měření velikosti indukovaného napětí je důležité, mimo jiné pro srovnání s hodnotami z MKP a z předchozí bakalářské práce. Výsledky z měření jsou následně porovnány s hodnotami ze simulací MKP v kapitole 7.



Obr. 6.4 Průběh indukovaného napětí BLDC při frekvenci 10 Hz



Obr. 6.5 Průběh indukovaného napětí BLDC při frekvenci 21 Hz



Obr. 6.6 Průběh indukovaného napětí BLDC při frekvenci 56 Hz

Na Obr. 6.7 je ze všech 3 měření naprázdno nejvíc patrné, že amplitudy indukovaných napětí do jednotlivých fází se mírně liší. To je s největší pravděpodobností zapříčiněno tím, že ve fázích s nižším indukovaným napětím došlo k chybnému navinutí daných cívek, například o nechtěné snížení počtu závitů (o jeden, případně dva). Příslušné velikosti indukovaných napětí v konkrétních fázích je uvedeno v Tab. 6.3. Na tomto snímku z osciloskopu je mimo jiné vidět i změřená frekvence napětí ve vinutí BLDC, která je:

$$f_{\text{naprázdno3}} = 56,01 \text{ Hz}, \quad (6.9)$$

což po přepočtu odpovídá mechanickým otáčkám BLDC:

$$n_{\text{naprázdno3}} = f_{\text{naprázdno3}} \cdot \frac{n_{\text{BLDC}}}{f_e} = 56,01 \cdot \frac{3000}{200} = 840,15 \text{ ot/min}, \quad (6.10)$$

kde n_{BLDC} (ot/min) jsou jmenovité otáčky navrhovaného BLDC stroje a f_e (Hz) je frekvence komutace a zároveň frekvence rotace magnetického pole.

Tab. 6.5 Velikosti efektivních hodnot indukovaných napětí jednotlivých fází při $n_{\text{BLDC}} = 840 \text{ ot/min}$

Fáze	D	B	C	E	A
U_i (V)	4,551	4,676	4,816	4,82	4,861

Zatímco fáze A, C a E jsou v podstatě identické, tedy co do počtu závitů stejné, tak fáze B a D mají snížené indukované napětí, právě o menší počet závitů. Tyto hodnoty jsou dále rozebírány v kapitole 7.3.1.

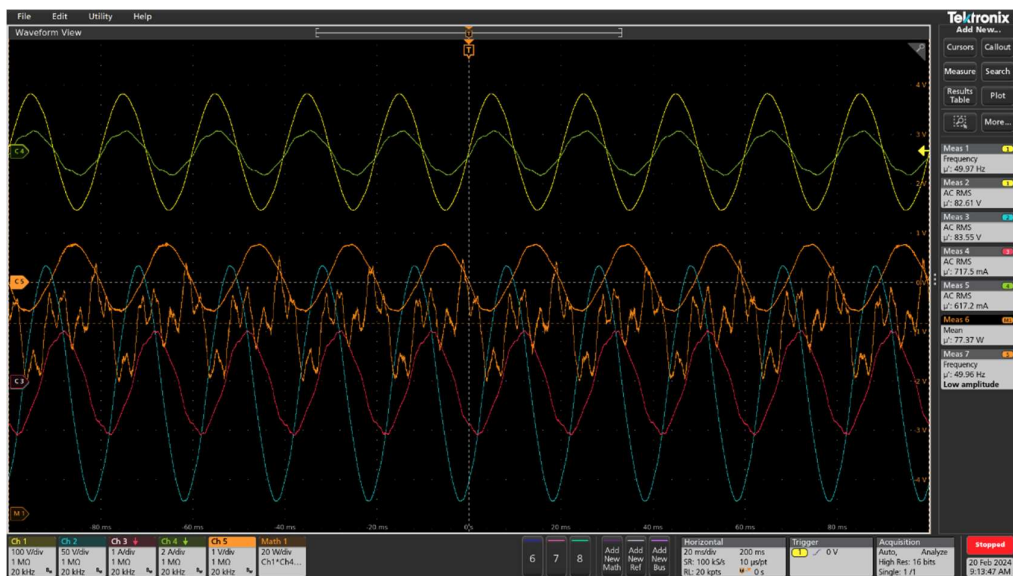
6.3.2 Měření ztrát naprázdno v generátorickém režimu

Z důvodu velké hlučnosti stroje, bylo třeba stanovit ztráty naprázdno, respektive vyhodnotit, zda mechanické ztráty v ložiskách nejsou příliš vysoké. Jinými slovy, zda vysoká hlučnost není zdrojem zvýšených mechanických ztrát v ložiskách.

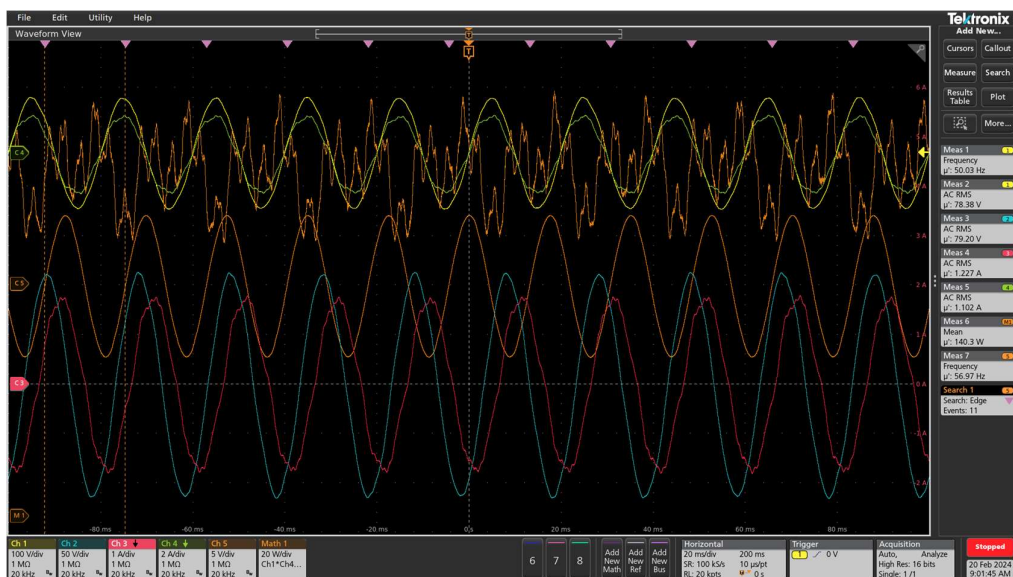
Asynchronní motor, který je součástí soustrojí a měřicího stanoviště, je použit v motorickém režimu a roztáčí přes řemenový snižovací převod navrhovaný BLDC stroj, který je z tohoto pohledu v generátorickém režimu. Postup tohoto měření je takový, že se nejprve změří nezatížený asynchronní motor (ASM) naprázdno a poté se řemenicí zatíží právě navrženým BLDC strojem. V obou případech je třeba zachovat stejné podmínky napájení a ASM je napájen z autotransformátoru při napětí:

$$U_{ATRef} = 90 V \quad (6.11)$$

Měření výkonů při zatížení a bez zatížení je provedeno pomocí stejného 8 kanálového osciloskopu, jako v ostatních měřeních na tomto stroji. Měření je provedeno v tzv. Aronovo zapojení pro měření 3f výkonů, kde jsou v tomto případě použity dvě proudové sondy pro fázi U a V a dvě diferenciální sondy pro měření sdruženého napětí U_{UW} (V) a U_{UV} (V). Funkce osciloskopu umožňuje rovnou zobrazovat výkony, pomocí funkcí „Math“, kde je možno pomocí matematiky zobrazovat jiné neměřitelné veličiny, jako například výkony. Na Obr. 6.8 a Obr. 6.9 jsou zobrazeny právě dvě měření, zatíženého a nezatíženého ASM. V těchto snímcích osciloskopu jsou mimo jiné vidět i právě zmíněné průběhy výkonů. Velmi zobecněným výpočtem lze tedy rozdílem těchto dvou výkonů vypočítat přibližné ztráty naprázdno BLDC v generátorickém režimu.



Obr. 6.7 Průběh naměřených veličin z osciloskopu nezatíženého asynchronního motoru



Obr. 6.8 Průběh naměřených veličin z osciloskopu zatíženého asynchronního motoru BLDC strojem

$$\Delta P_0 = P_{\text{zatížen}} - P_{\text{nezatížen}} = 140,3 - 77,37 = 62,93 \text{ W}, \quad (6.12)$$

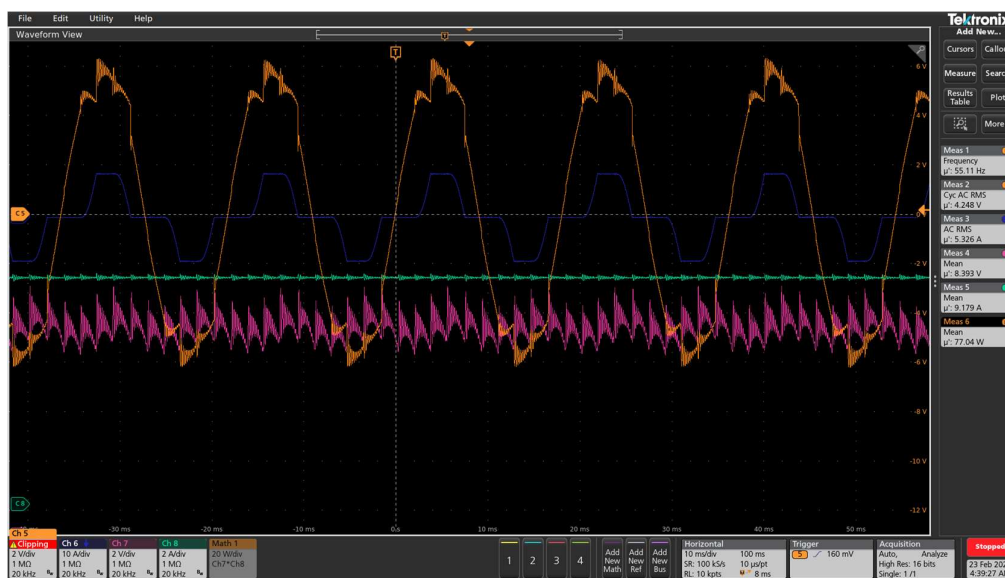
kde ΔP_0 (W) jsou přibližné ztráty naprázdno, $P_{\text{zatížen}}$ (W) je příkon ASM při zatížení BLDC strojem a $P_{\text{nezatížen}}$ (W) je příkon ASM při chodu naprázdno.

Ztráty naprázdno (3.17) jsou složeny z mechanických ztrát (ložiska, ventilační ztráty) a také ztrát kde se permanentní magnety přichycují k zubům a stroj brzdí, tedy částečně ztrátám v železe.

Vzhledem k charakteru stroje, nelze přesně určit, jaký podíl mají jednotlivé části na celkové ztrátě naprázdno. Protože je stroj z plastu, tak pohybem magnetů vzniká rotující magnetické pole, které vyzařuje dále za jeho „aktivní část“, čili i do ložisek, kde se indukují napětí a vznikají ztráty vířivými proudy a tedy oteplením ložisek. Zároveň z důvodu střídavé změny polarit magnetického pole nad jednotlivými ložisky vzniká domněnka, že valivá tělesa jsou střídavě přitahována a odtahována v radiálním směru, což vytváří přídavný hluk stroje.

6.4 Oteplovací zkouška a stanovení teoretického výkonu stroje

Vzhledem k použitým materiálům stroje, bylo vhodné mimo jiné provést i oteplovací zkoušku. Nicméně v tomto případě, má tato provedená zkouška pouze informativní charakter.



Obr. 6.9 Průběh napětí a proudu BLDC stroje a zátěže při $n = 845$ ot/min

Tab. 6.6 Naměřené a vypočítané hodnoty z měření oteplení stroje

Časový úsek (-)	t ₀	t ₁	t ₂	t ₃	t ₄
f _{BLDC} (Hz)	0	26,26	40,21	55,11	56,35
n (ot/min)	0	393,9	603,15	826,65	845,25
U _{fRMS} (V)	0	1,88	3,01	4,25	4,84
I _{fRMS} (A)	0	5,11	5,32	5,33	0,02
U _{DC} (V)	0	2,20	5,20	8,30	0,00
I _{DC} (A)	0	8,75	8,75	8,75	0,00
P _{BLDC} (W)	0	47,95	80,01	113,12	0,45
P _{DC} (W)	0	19,25	45,50	72,63	0,00
M (Nm)	0	1,16	1,27	1,31	0,01

$$n = \frac{n_{nBLDC}}{f_e} \cdot f = \frac{3000}{200} \cdot 55,11 = 826,65 \text{ ot/min}, \quad (6.13)$$

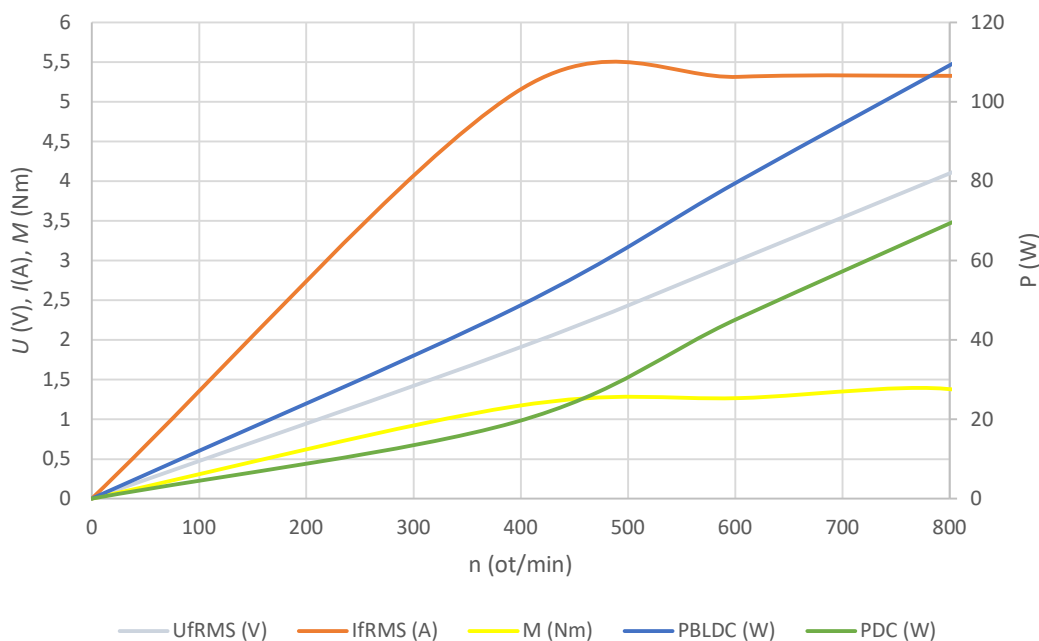
kde n (ot/min) jsou otáčky stroje, n_{nBLDC} (ot/min) jsou jmenovité otáčky stroje, f_e (Hz) je jmenovitá rychlost otáčení magnetického pole a f (Hz) je naměřená frekvence.

$$P_{BLDC} = m \cdot U_{fRMS} \cdot I_{fRMS} = 5 \cdot 5,25 \cdot 5,33 = 113,12 \text{ W}, \quad (6.14)$$

kde P_{BLDC} (W) je elektrický výkon stroje, m (-) je počet fází, U_{fRMS} (V) je efektivní hodnota indukovaného napětí a I_{fRMS} (A) je efektivní hodnota fázového proudu.

$$M = \frac{P_{BLDC} - \Delta P}{\omega} = \frac{P_{BLDC} - \Delta P_0 + m \cdot R \cdot I^2}{\frac{2 \cdot \pi \cdot n}{60}} = \frac{113,12 - 62,93 + 5 \cdot 0,092 \cdot 5,33^2}{\frac{2 \cdot \pi \cdot 826,65}{60}} = 1,1 \text{ Nm}, \quad (6.15)$$

kde M (Nm) je moment stroje, P_{BLDC} (W) je elektrický výkon stroje, ΔP je přibližná velikost ztrát stroje a ω (rad/s) je úhlová mechanická rychlost.



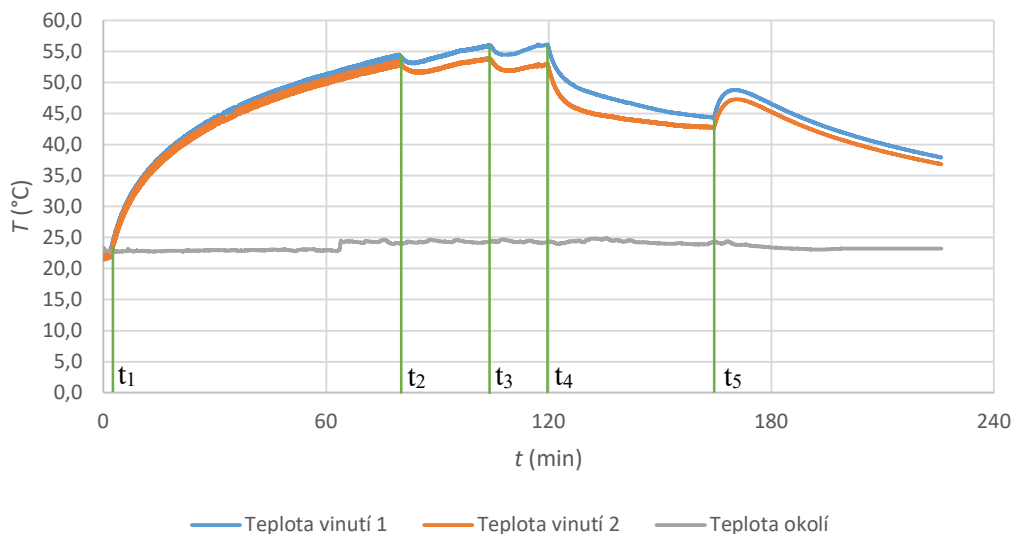
Obr. 6.10 Závislost velikosti indukovaného napětí, proudu, momentu a výkonů na otáčkách stroje

Díky měření ztrát naprázdno v kapitole 6.3.2, kde byla získaná přibližná hodnota ztrát naprázdno, při jedné hodnotě otáček BLDC stroje. Dále je možné vypočítat i přibližné Jouleovy ztráty ve vinutí a dohromady lze vypočítat přibližnou účinnost při zmíněné velikosti otáček v generátorickém režimu:

$$\eta_{n=826} = \frac{P_{BLDC}}{P_{BLDC} + \Delta P_0 + \Delta P_j} = \frac{P_{BLDC}}{P_{BLDC} + \Delta P_0 + m \cdot R \cdot I^2} = \frac{113,12}{113,12 + 62,93 + 5 \cdot 0,092 \cdot 5,33^2} \cong 60 \%, \quad (6.16)$$

kde P_{BLDC} (W) je výkon BLDC stroje dodávaný do zátěže, ΔP_0 (W) jsou přibližné ztráty naprázdno a ΔP_j (W) jsou Jouleovy ztráty ve vinutí.

Na Obr. 6.10 je vidět závislost elektrického výkonu a momentu, respektive proudu a napětí stroje v závislosti na jeho otáčkách. Měření bylo provedeno do plných otáček ASM, který navrhovaný BLDC stroj pohání, tedy do 50 Hz. Nicméně jak již bylo zmíněno, z důvodu bezpečnosti, je BLDC stroj připojen k ASM přes snižovací řemenový převod, takže zatímco se ASM otáčí mechanickou rychlostí $n_s = 3000$ ot/min, tak BLDC se točí méně jen 1/3 rychlostí.



Obr. 6.11 Průběh velikosti teplot ve stroji při různých otáčkách a zátěži v závislosti na čase

Na Obr. 6.11 je vidět časový průběh teplot při znázorněných změnách otáček stroje a tím i změnou zatížení (efektivní hodnota fázového proudu se nemění) v časech t_0 až t_4 , které vycházejí z tabulky Tab. 6.6. Zatížení bylo zvoleno tak, že se určila přibližná hodnota fázového proudu odpovídající návrhu proudové hustoty a ta se nastavila při již roztočeném BLDC stroji připojením DC zátěže přes diodový usměrňovací můstek. Poté se v určitých krocích zvyšovaly mechanické otáčky a tím se měnila i velikost indukovaného napětí. Tím že efektivní hodnota fázového proudu je tímto způsobem zachována, tak výkon roste lineárně společně s otáčkami. Vzhledem k charakteru materiálu statoru bylo stanoveno, že maximální hodnota teploty v tomto měření, by neměla přesáhnout:

$$T_{STmax} = 60 \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (6.17)$$

Tato podmínka byla v tomto měření splněna a maximální teplota, dle snímačů teploty PT100 byla 57 °C. Na konci charakteristiky jsou vidět dva zlomy v průběhu teplot. Prvním je odpojení zátěže a velikost teploty po ustálení odpovídá teplotě ve statoru v chodu naprázdno za snížených otáčkách. Druhým zlomem je úplné zastavení stroje a jeho postupné chladnutí.

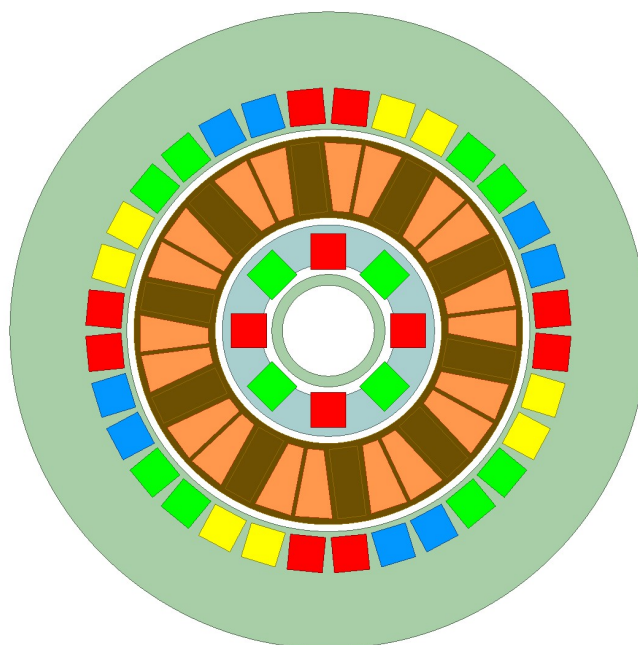
Do měřicího přístroje Datalogger ALMEMO 710 byly připojeny celkem 3 snímače teploty PT100. Dva jsou uloženy uvnitř vinutí statoru a třetí byl uložen venku na vzduchu, pro měření okolní teploty pro referenci. V průběhu na Obr. 6.11 je tento průběh viditelný

šedou barvou, přičemž v čase přibližně $t = 60$ minut, došlo k mírnému skoku v teplotě okolí. Je tomu tak proto, že tento snímač byl umístěn v vzdálenosti přibližně 1 m od osciloskopu a střídače ASM. Proto mohlo v jeden stejný moment dojít k zapnutí ventilátorů obou přístrojů a začali PT100 článek ofukovat horkým vzduchem. Po určité době došlo ke snížení teploty okolí opět na přibližně počáteční hodnotu.

7 Porovnání parametrů z naměřených hodnot s parametry simulací MKP

Jak již bylo zmíněno, v předchozí bakalářské práci byl vytvořen 2D elektromagnetický model v programu Ansys Maxwell pro určení základních parametrů navrhovaného stroje. Protože ale byly pozměny parametry vinutí a taktéž topologie vinutí, bylo třeba upravit i model a metodou MKP vypočítat nové parametry navrženého stroje.

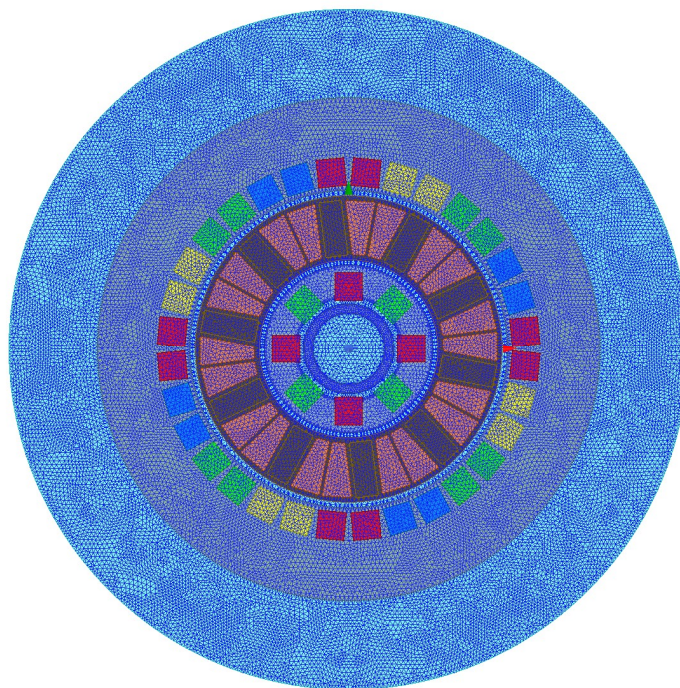
7.1 Konečno prvkový model navrženého stroje



Obr. 7.1 Model navrženého BLDC stroje s upraveným vinutím v Ansys Maxwell

7.2 Nastavení výpočetní sítě

Velikost elementů výpočetní sítě má přímý vliv na přesnost výpočtu. Obecně lze říci, že čím je síť (mesh) jemnější, tím přesnější bude výpočet a výsledky. Nicméně při procesu zjemňování sítě, což je jedním z kroků konvergenční analýzy, se lze dostat do kroku, kdy další zjemnění sítě nemá na výsledky výpočtu již žádný, případně minimální vliv. Tímto způsobem byla zvolena velikost sítě, která zajistí přesnost výpočtu a zároveň minimalizuje potřebný výpočetní výkon.



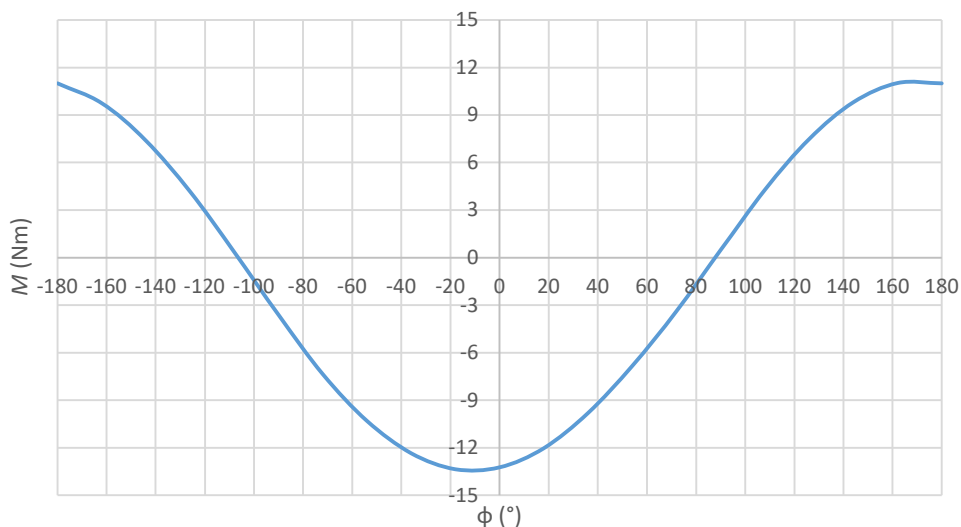
Obr. 7.2 Vykreslení sítě modelu BLDC stroje v programu Ansys Maxwell

7.3 Hledání jmenovitého bodu stroje při jmenovitých otáčkách

Na základě změřených hodnot navrženého BLDC stroje, bylo třeba najít jmenovitý bod stroje i za pomoci simulací pro jejich porovnání a závěry. Ten se změnou parametrů vinutí změnil, hlavně díky snížením odporu vinutí. Jmenovitý bod je nejprve hledán v jmenovitých otáčkách navrženého stroje z předchozí bakalářské práce [17].

$$n_n = 3000 \text{ ot/min}, \quad (7.1)$$

Princip hledání jmenovitého bodu byl zvolen takový, že se nejprve parametrizací veličiny φ (°), tedy úhel natočení rotoru vůči statoru, vypočítaly průběhy, respektive maximální hodnoty momentu stroje M (Nm) a následně se pro názornost vynesly do grafu, jak je vidět na Obr. 7.3.



Obr. 7.3 Momentová charakteristika navrženého stroje vypočítaná pomocí MKP

Tímto jsou získány dva významné body charakteristiky stroje. První bod, ve kterém je moment stroje nulový, tj $M = 0$ Nm a druhý bod ve kterém je naopak moment maximální. V případě idealizované charakteristiky by tomu odpovídali zátěžné úhly 0° a 90° elektrických.

Nicméně vlivem nenulové velikosti odporu vinutí, je momentová charakteristika mírně posunuta o úhel ρ ($^\circ$) a tudíž takzvaný nulový zátěžný úhel, tedy takový úhel, při kterém je moment stroje nulový nebude při úhlu 90° .

Z charakteristiky na Obr. 7.3 je možné vidět, že bod s nulovým momentem, bude dosažen přibližně při úhlu:

$$\varphi_{BLDC_{\beta=0^\circ}} = 88^\circ \quad (7.2)$$

A naopak maximální moment bude dosažen při úhlu:

$$\varphi_{BLDC_{M_{MAX}}} = 160^\circ \quad (7.3)$$

$$M_{MAX} = 12,97 \text{ Nm} \quad (7.4)$$

Proto je pro zpřesnění potřeba vytvořit další výpočty parametrizací úhlu φ ($^{\circ}$) s kratším krokem. Nicméně je potřeba uvažovat, že posun charakteristiky vlivem nenulového odporu vinutí není pouze v ose y , ale taktéž v ose x , což je možné vidět na rozdílné velikosti amplitudy v průběhu na Obr. 7.3, kdy v kladné amplitudě (motorický režim) má nižší hodnotu momentu, nežli v záporné amplitudě (generátorický režim).

Velikost posunu momentové charakteristiky je tedy vypočítána a má přibližnou velikost:

$$\rho_{BLDC} = 2,2^{\circ} \quad (7.5)$$

Opětnou parametrizací úhlu φ ($^{\circ}$) s krokem 0,1 je nalezen bod momentové charakteristiky, který přibližně odpovídá velikosti efektivní hodnoty jmenovitého proudu stroje v motorickém režimu:

$$\varphi_{BLDC_n} = 92,2^{\circ} \quad (7.6)$$

To odpovídá velikosti zátěžného úhlu v motorickém režimu:

$$\beta_{BLDC_n} = 4,2^{\circ} \quad (7.7)$$

A to odpovídá velikosti momentu M (Nm):

$$M_{BLDC_n} = 1,1 \text{ Nm} \quad (7.8)$$

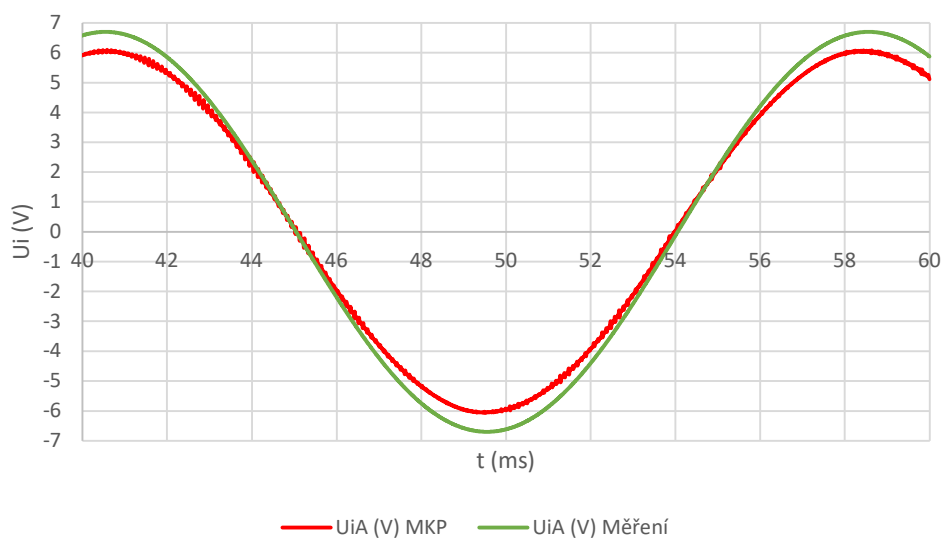
7.4 Porovnání průběhu indukovaného napětí získaného výpočtem MKP a průběhu získaného měřením

Porovnání velikostí amplitud a tvaru průběhu indukovaného napětí jednotlivých fází stroje, je z hlediska zhodnocení návrhu důležité, protože vypovídá o správnosti elektromagnetického návrhu a prototypu stroje. V Tab. 7.1 jsou porovnány jednotlivé fáze a je stanovena procentuální chyba mezi numerickým výpočtem a měřením.

Tab. 7.1 Porovnání amplitud indukovaného napětí jednotlivých fází z MKP a z měření

Fáze	U_M (V) MKP	U_M (V) Měření	Relativní chyba (%)
A	6,09	6,7	9,10
C	6,09	6,63	5,12
E	6,09	6,64	8,14
B	6,11	6,44	2,71
D	6,10	6,27	8,28

Rozdíl ve velikosti amplitud všech fází je zapříčiněn dvěma faktory. Jedním je již dříve zmíněné chybné navinutí vinutí, kde rozdíl ± 1 závit ve vinutí jedné fáze zapříčiní rozdíl amplitud. Druhým faktorem jsou nepřesné materiálové vlastnosti modelu v MKP a skutečným prototypem stroje, například u permanentních magnetů, kde je velikost B (T) závislá na teplotě.



Obr. 7.4 Průběhy indukovaného napětí fáze A získaných z MKP a z měření

Zhodnocení a závěr

Aditivní technologie jsou jedním z nových nástrojů, sloužící pro inovaci elektrických strojů. Tato problematika nových konstrukčních přístupů je v současnosti velmi řešeným tématem moderních elektrických strojů a tudíž je vhodné se této problematice nadále v budoucnu věnovat. Výstupem této práce je 3D návrh a následná konstrukce prototypu elektrického točivého stroje s permanentními magnety právě pomocí aditivních technologií, který vychází z předchozího elektromagnetického návrhu bakalářské práce. Vzhledem k jeho atypické konstrukci, nebylo možné se řídit konkrétní metodikou postupu návrhu elektrických strojů točivých. Konstrukce stroje tedy slouží jako učební pomůcka, kde jsou ověřeny možnosti 3D tisku a zároveň pro budoucí výuku, při které bude možné vytvářet nové komponenty stroje.

V kapitole 1 je provedena rešerše standartních materiálů pro konstrukci těchto elektrických stroků točivých, kde jsou mimo jiné uvedeny topologie BLDC strojů a materiálové vlastnosti permanentních magnetů a magnetických obvodů těchto strojů. Kapitola 2 se pak věnuje rešerši aditivních technologií, jejich možnostem, materiálových vlastností konkrétních běžných i méně běžných metod a jejich uplatnění při konstrukci a stavbě elektrických strojů.

Navržená konstrukce v kapitole 3, nakreslená pomocí CAD programu Autodesk Inventor, byla poté ověřena z hlediska strukturální analýzy metodou konečných prvků v programu Ansys Mechanical v kapitole 4., kde jsou poté zobrazena konkrétní napětí, posunutí a deformace získaná numerickými výpočty. V návrhu stroje, konkrétně v návrhu vinutí došlo k několika změnám, oproti původním elektromagnetickému návrhu v předchozí bakalářské práci. Byl zvýšen průřez vodiče cívky z původních $0,632 \text{ mm}^2$ na $1,767 \text{ mm}^2$, tedy z průměru vodiče 1 mm na 1,5 mm. S tím došlo i ke změně počtu paralelních vodičů, který se snížil z původních 2 na 1. Výsledkem je větší proudová zatížitelnost při zachování původní proudové hustoty, tj 3 A/mm^2 a větší činitel plnění drážky, který je ovšem pouze orientační, protože drážka je z nemagnetického materiálu.

Kapitole 4 je věnována problematice strukturální mechanické analýzy, kde je provedena zjednodušená, ale důležitá numerická analýza působení mechanického zatížení na prvky navrženého stroje. Numerickým výpočtem statického tíhového zatížení statoru, tedy zatížení vlastní vahou rotoru bylo zjištěno, že maximální hodnota ekvivalentního napětí von-Mises v objemu je přibližně $1,26 \text{ MPa}$ a to v očekávaných oblastech modelu. Výrobce udává modul pružnosti $1,97 \text{ GPa}$ a pevnost v tahu 53 MPa . To znamená, že model statoru z hlediska

vypočítaných hodnot mechanického napětí odpovídá pomyslnému koeficientu bezpečnosti „40“. Model rotoru byl v určitých oblastech zjednodušen, pro zjednodušení numerického výpočtu, mimo jiné kvůli maximální velikosti elementů výpočetní sítě. Dle numerického výpočtu mechanického zatížení rotoru bylo zjištěno, že maximální hodnota ekvivalentního napětí von-Mises v obruči je přibližně 3,52 MPa. Výrobce udává modul pružnosti 2,2 GPa a pevnost v tahu 50 MPa. To znamená, že model statoru z hlediska vypočítaných hodnot mechanického napětí odpovídá pomyslnému koeficientu bezpečnosti „14“. Nicméně je potřeba uvést, že tyto hodnoty platí pro materiál izotropní. Ve skutečnosti jsou ale vlivem vrstvením materiálu při tisku tyto hodnoty mírně odlišné a jsou silně závislé například na teplotě tisku.

V kapitole 6, tedy měření parametrů navrženého BLDC stroje, je mimo jiné zmíněno, že vznikají určité tepelné ztráty „navíc“ v ložiskách. To je způsobeno tím, že materiál (PETG), ze kterého je rotor vyroben, se z hlediska magnetického pole chová jako vzduch a tedy nijak neomezuje prostup magnetického pole do okolí. To bohužel vede k domněnce, že se indukují napětí v ložiskách (protože se každý element ložisek vůči rotujícímu magnetickému poli otáčí jinou relativní rychlostí), které jsou jak elektricky, tak magneticky vodivé a to tedy vede na ztráty v podobě tepla způsobené vířivými proudy. To je jedním z důvodů, proč stroj nebude moci dosáhnout velké účinnosti. V této kapitole byla dále provedena i zkouška zatížení v generátorickém režimu a současně i zjednodušená oteplovací zkouška. Zatížení bylo provedeno do maximálních otáček soustrojí a to do 826,65 ot/min. Byly získány hodnoty pro různé otáčky a díky tomu lze určit směrodatnost velikostí výkonů a dalších veličin. Bylo zjištěno, že stroj v těchto otáčkách dosahuje přibližně 60% účinnosti.

V kapitole 7 jsou porovnány naměřené hodnoty s hodnotami ze simulací MKP. Kvůli změně vinutí, bylo třeba znovu nalézt jmenovitý bod stroje, respektive najít jeho bod s nulovým momentem při daném zátěžném úhlu a taktéž při jmenovité efektivní hodnotě fázového proudu. Taktéž byly nastaveny v modelu snížené otáčky z měření 826,65 ot/min a odpovídající průběhy indukovaných napětí byli porovnány s hodnotami z měření.

Literatura

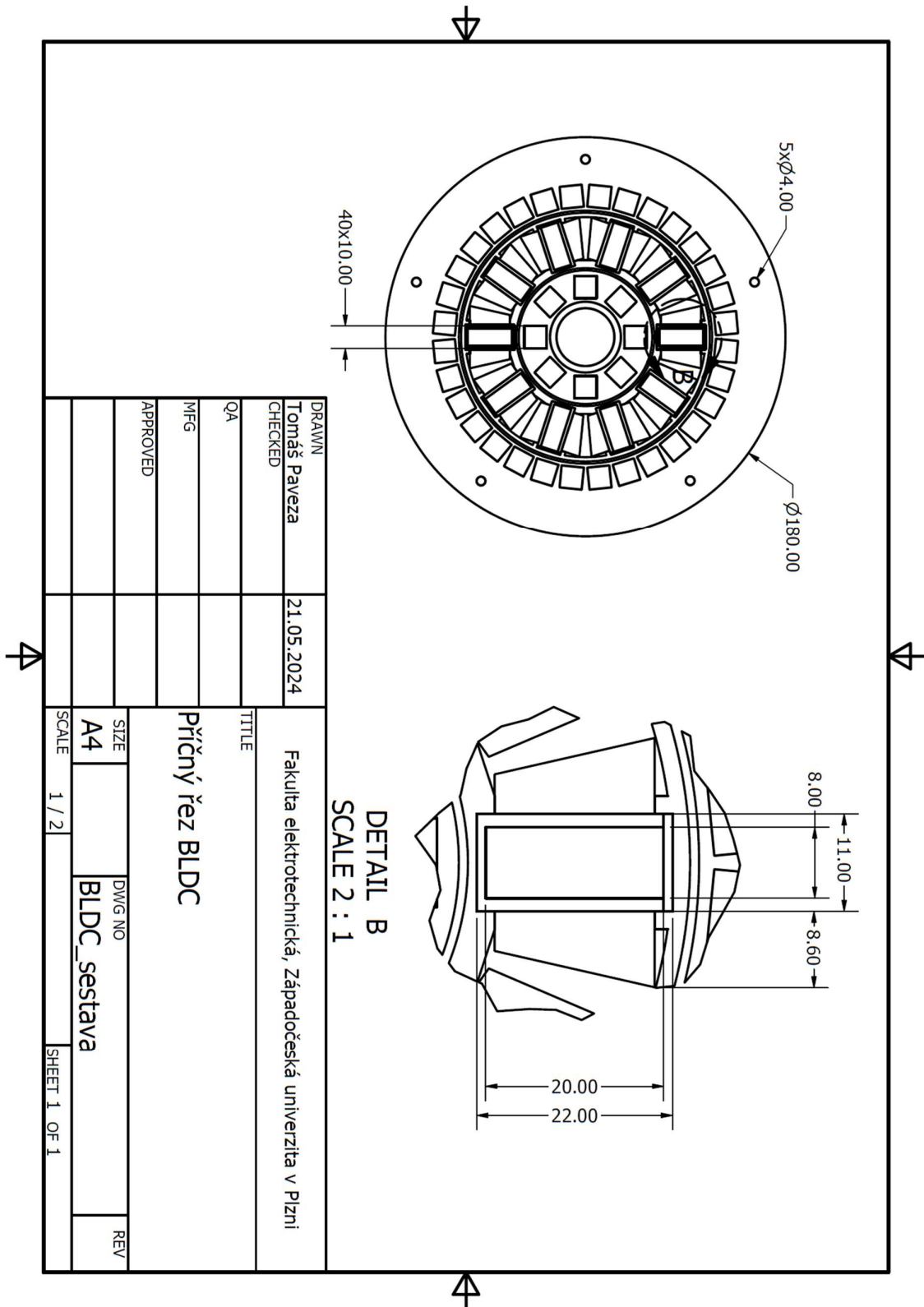
- [1] HENDERSHOT JR., J. a MILLER, TJE. *Design of Brushless Permanent-Magnet Motors*. Oxford: Magna Physics Publishing, Hillsboro, 1994. ISBN 978-1-881855-03-3.
- [2] HANSELMAN, Duane C. *Brushless permanent-magnet motor design*. [1st ed.]. New York: McGraw-Hill, 1994. ISBN 0-07-026025-7.
- [3] VEG, Lukáš. *KEV/KPES - Konstrukční prvky elektrických strojů: Konstrukční uspořádání elektrických strojů, IP, IM, IC, používané materiály, rozdělení strojů, automotive a trakční speciality*. Výchukové materiály. ZČU FEL, KEV, 2022.
- [4] GOUDSMIT MAGNETIC SUPPLIES B.V. *Neodymové magnety*. online. 2023. Dostupné z: <https://www.goudsmitmagnets.com/cs/solutions/permanent-magnets/neodymium-stock>. [cit. 2023-10-24].
- [5] ITALFIT MAGNETI S.R.L. *SAMARIUM COBALT magnets*. online. 2023. Dostupné z: <https://www.italfitmagneti.com/products/ferrite-permanent-magnet-alnico-smco/samarium-cobalt>. [cit. 2023-10-24].
- [6] ČVUT FAKULTA STROJNÍ. *3D tisk a jeho možnosti*. online. 2023. Dostupné z: <https://fs.cvut.cz/ostatni/sekce-3dtisk/3dtisk/moznosti-3dtisk/>. [cit. 2023-10-24].
- [7] ALTAF, Khurram; ABDUL-RANI, Ahmad-Majdi a RAGHAVAN, Vijay. Prototype production and experimental analysis for circular and profiled conformal cooling channels in aluminium filled epoxy injection mould tools. *Rapid Prototyping Journal*. 2013, roč. 19. Dostupné z: <https://doi.org/10.1108/13552541311323236>.
- [8] PRUSA RESEARCH A.S. *Základy 3D tisku s Josefem Průšou*. online. 2019. Dostupné z: <https://is.muni.cz/el/ped/jaro2021/TI9009/111101390/zaklady-3d-tisku.pdf>. [cit. 2023-10-24].
- [9] GORDELIER, T.; THIES, P.; TURNER, L. a JOHANNING, L. Optimising the FDM additive manufacturing process to achieve maximum tensile strength: a state-of-the-art review. online. *Rapid Prototyping Journal*. 2019. ISSN 1355-2546. Dostupné z: <https://doi.org/10.1108/RPJ-07-2018-0183>. [cit. 2023-11-20].

- [10] PRUSA RESEARCH. *Prusament Materiály*. online. In: Prusament. 2023. Dostupné z: <https://prusament.com/cs/materials/>. [cit. 2024-01-27].
- [11] E. KUZNETSOV, Vladimir; SOLONIN, Alexey; D. URZHUMTSEV, Oleg; SCHILLING, Richard a G. TAVITOV, Azamat. Strength of PLA Components Fabricated with Fused Deposition Technology Using a Desktop 3D Printer as a Function of Geometrical Parameters of the Process. online. *Polymers*. 2018, roč. 10, č. 3, s. 17. Dostupné z: <https://doi.org/10.20944/preprints201803.0036.v1>. [cit. 2024-03-09].
- [12] MANTADA, Phaneendra; MENDŘICKÝ, Radomír a ŠAFKA, Jiří. Parameters influencing the precision of various 3D printing technologies. online. *MM Science Journal*. 2017, č. 05. Dostupné z: https://doi.org/10.17973/MMSJ.2017_12_201776. [cit. 2024-04-02].
- [13] NEGI, Sushant; DHIMAN, Suresh a KUMAR SHARMA, Rajesh. Basics and applications of rapid prototyping medical models. online. *Rapid Prototyping Journal*. 2014, roč. 20, č. 3, s. 12. Dostupné z: <https://doi.org/10.1108/RPJ-07-2012-0065>. [cit. 2023-10-01].
- [14] MANUFACTURING GUIDE SWEDEN AB. *Direct Laser Metal Sintering, DMLS*. online. 2022. Dostupné z: <https://www.manufacturingguide.com/en>. [cit. 2023-11-25].
- [15] NISHANTH, F.; GOODALL, A.; TODD, I. a SEVERSON, E. Characterization of an Axial Flux Machine with an Additively Manufactured Stator. online. 2023, roč. 2023. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/TEC.2023.3285539>. [cit. 2023-11-20].
- [16] SELEMA, Ahmed a SERGEANT, Peter. Advanced Manufacturability of Electrical Machine Architecture through 3D Printing Technology. online. *Machines*. 2023, roč. 11. ISSN 2075-1702. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/machines11090900>. [cit. 2023-11-21].
- [17] PAVEZA, Tomáš. *Návrh bezkartáčového stejnosměrného motoru využívajícího Halbachovo pole*. online, Bakalářská, vedoucí Jiří DRAŽAN. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni. Fakulta Elektrotechnická, 2022. [cit. 2024-04-02].
- [18] PAVEZA, T.; DRAZAN, J. a CERMAK, R. Design of a Double Rotor BLDC Motor with Halbach Array Magnets. In: *2022 20th International Conference on*

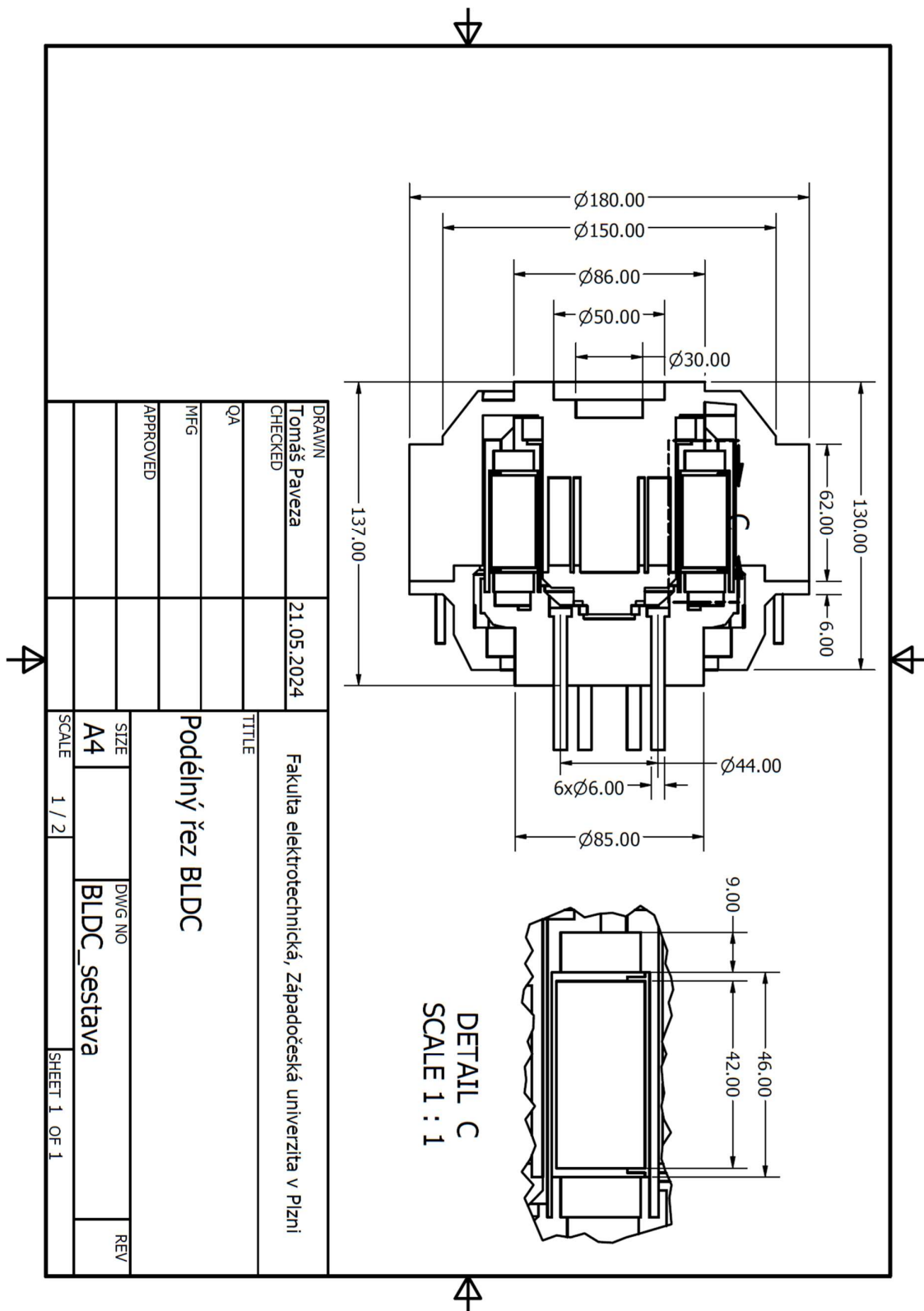
- Mechatronics - Mechatronika (ME)*. 2022, s. 1-4. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/ME54704.2022.9983331>.
- [19] KELLNER, Jakub; KAŠČÁK, Slavomír; PRAŽENICA, Michal a RESUTÍK, Patrik. A Comprehensive Investigation of the Properties of a Five-Phase Induction Motor Operating in Hazardous States in Various Connections of Stator Windings. online. *Electronics*. 2021, roč. 2021, č. 105, s. 32. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/electronics10050609>. [cit. 2023-11-13].
- [20] AB SKF. *Deep groove ball bearings*. online. 2023. Dostupné z: <https://www.skf.com/cz/productinfo/productid-61812>. [cit. 2023-12-06].
- [21] HUYSAMEN, Henry Wynand; KINNEAR, William Allan; FONTERNEL, Theodorus Ernst; TURTON, Edwin; YADROITSAVA, Ina et al. 3D printed laryngoscope for endotracheal intubation. online. *South African Journal of Industrial Engineering*. 2020, roč. 21, č. 3, s. 209-217. Dostupné z: <https://doi.org/10.7166/31-3-2446>. [cit. 2024-05-08].

Přílohy

Příloha A – Příčný řez strojem



Příloha B – Podélný řez strojem



Příloha C – Katalogový list N42



N42

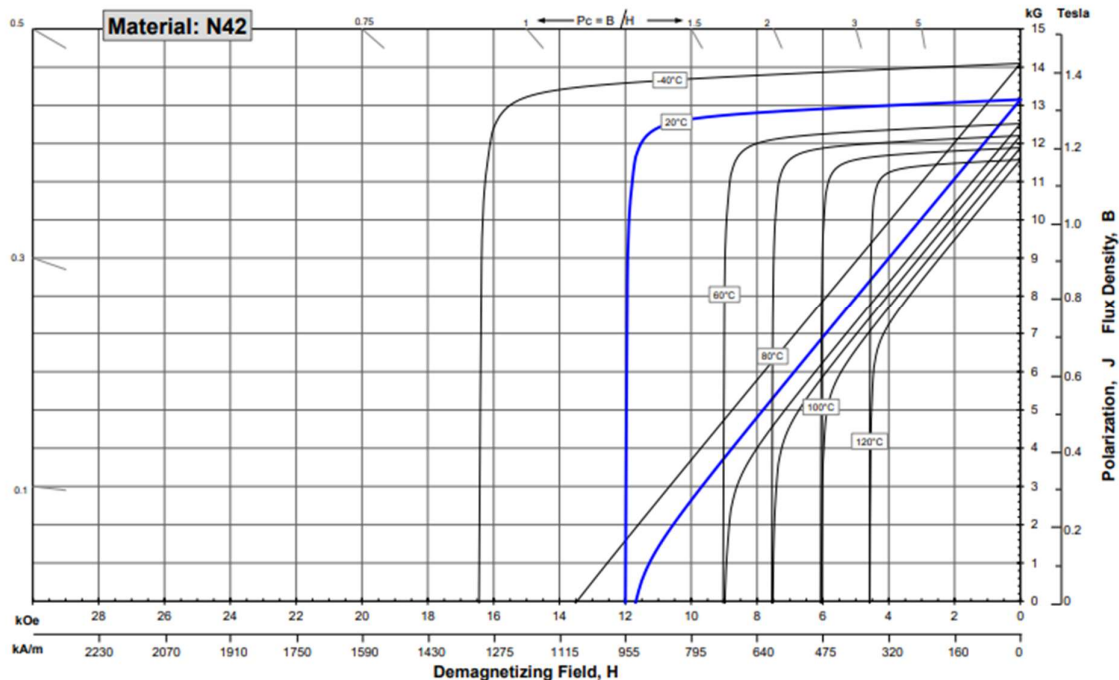
Sintered Neodymium-Iron-Boron Magnets

These are also referred to as "Neo" or NdFeB magnets. They offer a combination of high magnetic output at moderate cost. Please contact Arnold for additional grade information and recommendations for protective coating. Assemblies using these magnets can also be provided.

Characteristic	Units	Magnetic Properties		
		min.	nominal	max.
Br , Residual Induction	Gauss	12,800	13,150	13,500
	mT	1280	1315	1350
H_{cB} , Coercivity	Oersteds	10,800	11,850	12,900
	kA/m	860	943	1027
H_{cJ} , Intrinsic Coercivity	Oersteds	12,000		
	kA/m	955		
BH_{max} , Maximum Energy Product	MGOe	40	42	44
	kJ/m ³	318	334	350

Characteristic	Units	C //	C ⊥
Thermal Properties			
Reversible Temperature Coefficients ⁽¹⁾			
of Induction, α(Br)	%/°C		-0.12
of Coercivity, α(H _c)	%/°C		-0.62
Coefficient of Thermal Expansion ⁽²⁾	ΔL/L per °C x 10 ⁻⁶	7	-1
Thermal Conductivity	kcal/mhr°C	5.3	5.8
Specific Heat ⁽³⁾	cal/g°C		0.11
Curie Temperature, T _c	°C		310
Other Properties			
Flexural Strength	psi		41,300
	MPa		285
Density	g/cm ³		7.6
Hardness, Vickers	Hv		620
Electrical Resistivity, ρ	μΩ • cm		150 // 130 ⊥

Notes: (1) Coefficients measured between 20 and 80 °C
 (2) Between 20 and 200 °C. Values are typical and can vary.
 (3) Between 20 and 140 °C



Notes The material data and demagnetization curves shown above represent typical properties that may vary due to product shape and size. **Demagnetization curves show nominal Br and minimum H_c.** Magnets can be supplied thermally stabilized or magnetically calibrated to customer specifications. Additional grades are available. Please contact the factory for information.

Příloha D – Katalogový list SURA M700-50A

Typical data for SURA® M700-50A

T	W/kg at 50 Hz	VA/kg at 50 Hz	A/m at 50 Hz
0,1	0,05	0,14	67,8
0,2	0,16	0,36	88,3
0,3	0,37	0,63	99,2
0,4	0,59	0,92	108
0,5	0,84	1,23	116
0,6	1,12	1,58	124
0,7	1,43	1,96	132
0,8	1,77	2,38	142
0,9	2,15	2,84	152
1,0	2,57	3,36	164
1,1	3,03	3,96	180
1,2	3,55	4,71	206
1,3	4,13	5,76	254
1,4	4,83	7,57	363
1,5	5,68	12,4	690
1,6	6,54	30,3	1760
1,7	7,29	79,7	4230
1,8	7,81	172	8130

Loss at 1.5 T , 50 Hz, W/kg	5,68
Loss at 1.0 T , 50 Hz, W/kg	2,57
Anisotropy of loss, %	5

Magnetic polarization at 50 Hz

H = 2500 A/m, T	1,64
H = 5000 A/m, T	1,72
H = 10000 A/m, T	1,84

Coercivity (DC), A/m	100
Relative permeability at 1.5 T	1730
Resistivity, $\mu\Omega\text{cm}$	25

Yield strength, N/mm ²	285
Tensile strength, N/mm ²	405
Young's modulus, RD, N/mm ²	210 000
Young's modulus, TD, N/mm ²	220 000
Hardness HV5 (VPN)	125

RD represents the rolling direction
 TD represents the transverse direction
 Values for yield strength (0.2 % proof strength)
 and tensile strength are given for the rolling direction
 Values for the transverse direction are approximately 5% higher

