

Výroba komponent bezkartáčového DC motoru pomocí 3D tisku

Marek Opravil

Bakalářská práce
2023

 Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická
Ústav výrobního inženýrství

Akademický rok: 2022/2023

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Marek Opravil**
Osobní číslo: **T20263**
Studijní program: **B3909 Procesní inženýrství**
Studijní obor: **Technologická zařízení**
Forma studia: **Prezenční**
Téma práce: **Výroba komponent bezkartáčového DC motoru pomocí 3D tisku**

Zásady pro vypracování

1. Vypracujte podrobnou literární rešerši na zadané téma.
2. Zhodnoťte dosavadní stav v oblasti tisku komponent pro DC motory.
3. Na základě vypracované literární rešerše vymodelujte díly motoru v CAD Software a připravte model vhodný pro převod do STL formátu.
4. Vyberte vhodné polymery pro tisk komponent DC motoru a připravte vzorky pomocí 3D tisku.
5. Připravené komponenty charakterizujte pomocí charakterizačních metod (SEM, DSC), dále změřte mechanické vlastnosti a magnetické vlastnosti.
6. Vyhodnoťte naměřená data, popište provedená měření, všechny výsledky interpretujte pomocí grafů, případně i tabulek a textového popisu.
7. Vzniklé závěry dostatečně popište a diskutujte.

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

- [1]. Kenjo, T., & Nagamori, S. (1986). *Brushless direct current motors*. Oxford University Press.
- [2]. Shi, Y., Yan, C., Zhou, Y., Wu, J., Wang, Y., Yu, S., & Ying, C. (2021). *Materials for Additive Manufacturing*. Academic Press.
- [3]. The 3D Printing Handbook: Technologies, design and applications Hardcover – November 14, 2017 ISBN978-90-827485-0-53D.
- [4]. Samoylenko, N. (2011). *Analysis of Brushless DC Motors*. LAP Lambert Academic Publishing.
- [5]. Emerald Group Publishing Limited. (2015). *A focus on SLM and SLS methods in 3D printing*. Emerald Publishing.
- [6]. Chi, R. B. (2012). *Brushless Motors and Controllers*. Books on Demand.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Jiří Matyáš, Ph.D.**
Centrum polymerních systémů

Datum zadání bakalářské práce: **2. ledna 2023**
Termín odevzdání bakalářské práce: **19. května 2023**

prof. Ing. Roman Čermák, Ph.D. v.r.
děkan

L.S.

Ing. Martin Bednařík, Ph.D. v.r.
ředitel ústavu

PROHLÁŠENÍ AUTORA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Beru na vědomí, že:

- bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému a dostupná k nahlédnutí;
- na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3;
- podle § 60 odst. 1 autorského zákona má Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- podle § 60 odst. 2 a 3 autorského zákona mohu užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- pokud bylo k vypracování bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tj. k nekomerčnímu využití), nelze výsledky bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- pokud je výstupem bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Prohlašuji,

- že jsem na bakalářské práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor.
- že odevzdaná verze bakalářské práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou obsahově totožné.

Ve Zlíně, dne:

Jméno a příjmení studenta:

.....
podpis studenta

ABSTRAKT

Cílem této bakalářské práce bylo zhotovit funkční bezkartáčový motor na stejnosměrný proud s využitím 3D tisku za účelem snížení výrobních nákladů a hmotnosti sestavy motoru oproti konvenčním výrobkům. Funkčnost motoru bylo nutné experimentálně zajistit správným výběrem tiskových strun s dostatečně dobrými mechanickými vlastnostmi a tepelnou odolností.

Klíčová slova: bezkartáčový elektromotor, 3D tisk, kompozitní filament, feromagnetický filament, Protopasta, neodymové magnety, odstředivá síla

ABSTRACT

The focus of this bachelor's thesis was to make a functional brushless direct current motor using 3D printing in order to reduce the production costs and the weight of the motor assembly compared to conventional products. The functionality of the motor had to be experimentally ensured by the correct selection of 3D printing filaments with sufficiently good properties and heat resistance.

Keywords: brushless electric motor, 3D printing, composite filament, ferromagnetic filament, Protopasta, neodymium magnets, centrifugal force

Děkuji panu Ing. Jiřímu Matyášovi, Ph.D. za vstřícné přijetí pod jeho vedení a přátelský, avšak odborný přístup k mému tématu bakalářské práce. Také bych rád poděkoval své přítelkyni, kolegům a rodině za podporu při studiu.

Prohlašuji, že odevzdaná verze bakalářské práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

OBSAH

ÚVOD	9
I TEORETICKÁ ČÁST	10
1 TECHNOLOGIE 3D TISKU A MATERIÁLY	11
1.1 HISTORIE 3D TISKU	12
1.2 TYPY 3D TISKÁREN	13
1.2.1 Stereolitografie	13
1.2.2 Fused Deposition Modeling	13
1.2.3 Selektivní laserové slinování.....	15
1.2.4 Selektivní laserové tavení	15
1.3 NEJPOUŽÍVANĚJŠÍ FDM MATERIÁLY	16
1.3.1 Kyselina polyléčná	17
1.3.2 Polyethyltereftalát modifikovaný glykolem.....	18
1.3.3 Akrylonitrilbutadienstyren	19
1.3.4 Kopolyester	19
1.3.5 Polyamid 6	20
1.3.6 Polybutyltereftalát	20
1.3.7 Plniva ve filamentech.....	21
2 ELEKTROMOTORY A JEJICH POUŽITÍ	23
2.1 STEJNOSMĚRNÉ ELEKTROMOTORY	24
2.1.1 Kartáčové elektromotory.....	24
2.1.2 Bezkartáčové DC elektromotory.....	25
2.2 STŘÍDAVÉ ELEKTROMOTORY.....	28
2.2.1 Synchronní	29
2.2.2 Asynchronní	29
II PRAKTICKÁ ČÁST	30
3 POUŽITÉ VYBAVENÍ A MATERIÁLY	31
3.1 NATURAL PLA AURAPOL	32
3.1.1 Mechanické zkoušky PLA	33
3.1.2 DSC analýza PLA	34
3.2 PBT LANKEDA.....	34
3.2.1 Mechanické zkoušky PBT.....	36
3.2.2 DSC analýza PBT	36
3.3 CPE HG100 FILLAMENTUM.....	37
3.3.1 Mechanické zkoušky CPE HG100.....	38
3.3.2 DSC analýza CPE HG100.....	39
3.4 ŽELEZEM PLNĚNÉ PLA PROTOPASTA	40
3.4.1 Mechanické zkoušky železem plněného PLA.....	41
3.4.2 DSC analýza železem plněného PLA	42

3.5	UHLÍKEM PLNĚNÉ ABS LANKEDA.....	43
3.5.1	Mechanické zkoušky uhlíkem plněného ABS	45
3.5.2	DSC analýza uhlíkem plněného ABS	45
4	KOMPLETACE MOTORŮ.....	46
4.1	VINUTÍ	46
5	KOMPONENTY BLDC MOTORŮ A 3D TISK.....	47
5.1	STATOR KONVENČNÍHO MOTORU 3542 (2820)	48
5.1.1	Průběh teploty statoru s jemným vinutím	50
5.1.2	Průběh teploty statoru s hrubým vinutím	51
5.2	AXIÁLNÍ MOTOR 3N4P	51
5.2.1	Varianta s magnety Ø12 x 2 mm.....	52
5.2.2	Varianta s magnety Ø12 x 4 mm.....	54
5.2.3	Varianta s magnety Ø20 x 2 mm.....	56
5.3	RADIÁLNÍ MOTOR DLE LAIMERA [87].....	56
5.4	RADIÁLNÍ MOTOR S KONVENČNÍM STATOREM 6008	58
5.5	RADIÁLNÍ MOTOR S KONVENČNÍM STATOREM 4030	61
	ZÁVĚR	64
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	65
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	74
	SEZNAM OBRÁZKŮ	76
	SEZNAM TABULEK.....	79
	SEZNAM PŘÍLOH.....	80

ÚVOD

3D tisk se v dnešní době začíná čím dál více využívat pro malosériové výroby polymerních výrobků za účelem šetření nákladů potřebných k pořízení vstřikovací formy, popř. vstřikovacího stroje. Nejen malosériová výroba je ale uplatněním 3D tiskáren. Využití 3D tiskáren lze nalézt například ve výrobě prototypů, u kterých je nutné vidět jejich reálný tvar a rozměry (nestačí virtuální model). Metodou 3D tisku je možné docílit výrobků z velkého spektra materiálů od makroskopických rozměrů až po výtisky budov. Další výhodou je velká rozmanitost tvarů, které je možné 3D tiskem docílit oproti obrábění, či vstřikováním.

V neposlední řadě je třeba zmínit velkou mechanickou a teplotní odolnost některých tisknutelných materiálů, např. PEEK, PEI, POM, PA6 atp. nebo další speciální vlastnosti, jako jsou: elektrická vodivost, magnetické vlastnosti, fluorescence, termo-chromatičnost atd.

Elektromotory a jejich propojení s 3D tiskem je razantní. Ať už uvažujeme krokové motory pro přesné řízení pohybu v osách X, Y a Z, nebo bezkartáčové motory pro chlazení komponent 3D tiskárny. Dále zde můžeme spatřit také střídavé elektromotory vyšších výkonů, které otáčí vytlačovacím šnekem ve speciálních 3D tiskárnách, jež tisknou přímo z granulátu. Všechny výše zmíněné elektromotory jsou ale vyráběny konvenčně – nejčastěji je tvoří stator z vrstvených železo-křemíkových plechů pro co nejlepší efektivitu měděného vinutí a rotor z konvenčních kovů.

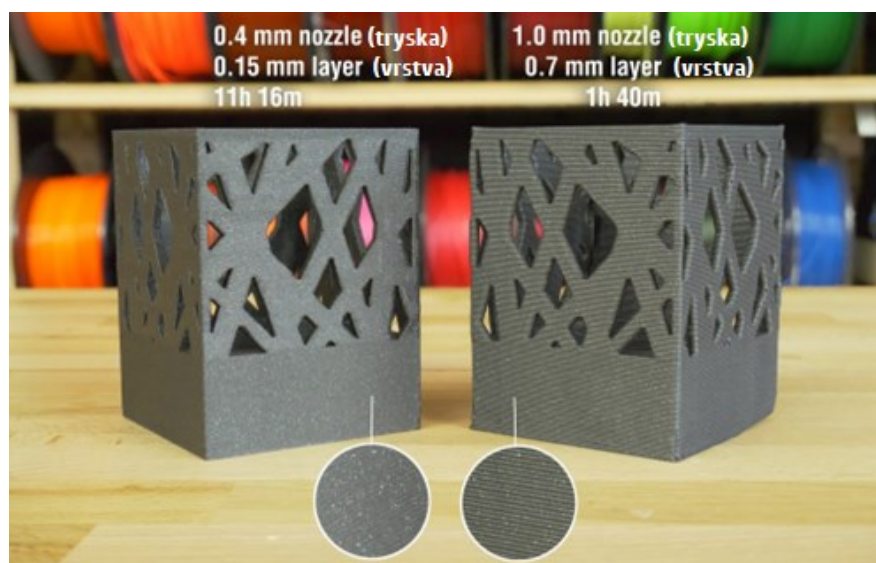
Cílem této bakalářské práce je poukázat na to, že je možné funkční bezkartáčový elektromotor vyrobit z části pomocí 3D tisku za účelem snížení výrobních nákladů a celkové hmotnosti sestavy motoru, což je žádoucí např. u dronů či letadel, u kterých se bezkartáčové motory používají jako pohonné jednotky.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 TECHNOLOGIE 3D TISKU A MATERIÁLY

Metoda výroby pomocí 3D tisku je aditivní technologií, která zpravidla ke zhotovení výrobku využívá přidávání materiálu ve vrstvách. Lze ji využít s materiály, které jsou tavitelné – plasty, kovy, (metoda FDM – Fused Deposition Modeling – plasty, případně SLS – Selective Laser Sintering – kovy), ale i tekuté polymery – epoxidová pryskyřice, která je ve vrstvách vytvrzována pomocí UV světla (metoda SLA – stereolitografie).

Jednotlivé metody a typy 3D tisku mají každá své výhody a nevýhody. Některé z metod mají lepší rozlišení tisku, díky čemuž jsou využívány v průmyslech, kde je kladen velký důraz na výslednou přesnost výtisku. Obecně ale platí, že čím přesnější má být výsledný výtisk, tím déle trvá, než se vytiskne. Rychlost tisku se dá tudíž zvýšit za cenu horší kvality, ale u některých typů tiskáren je tento atribut omezen. U SLA tiskárny, kde se výtisk vytvrzuje z pryskyřice, není možné nastavit příliš velkou výšky vrstvy – např. 0,4 mm, ale třeba u FDM tiskárny je rozsah výšky vrstev závislý na velikosti výstupního průměru používané trysky, přes kterou polymerní filament prochází a taví se. Průměry trysek u komerčních FDM tiskáren jsou v rozsahu od 0,1 mm do 1,2 mm v případě, že je tiskárna kompatibilní s průměrem filamentu 1,75 mm. U FDM tiskáren s využitím filamentu s průměrem 3 mm může být výstupní průměr trysky až 2 mm. Rozlišení tisku s tryskou o průměru 2 mm nebude téměř vůbec detailní, jelikož vrstvy budou viditelné velmi zřetelně. Průtok filamentu přes takovou trysku bude ale velmi vysoký, tudíž bude výtisk zhotoven rychleji, než by tomu bylo s menší tryskou. [1, 2, 3]



Obrázek 1 Porovnání kvality a rychlosti výtisků [4] (Převzato a upraveno.)

Další výhodou použití větších trysek je větší houževnatost výtisků. Test vrubové houževnatosti odhalil, že testovací tělíska vytištěná 0,6 mm tryskou absorbovaly až o 25,6 % více energie, než tělíska vytištěná 0,4 mm tryskou, přičemž zároveň tělíska vytištěná 0,25 mm tryskou absorbovaly o 3,6 % méně energie než ty vytištěné 0,4 mm tryskou.

Pro započatí 3D tisku je nejprve nutné mít připravený 3D model ve formátu STL, který je třeba načíst do softwaru zvaného slicer (např. Ultimaker Cura, PrusaSlicer, Simplify 3D). Slicer daný 3D model pomyslně „rozřeže“ na vrstvy a následně vytvoří G-kód, což je soubor příkazů čitelný pro 3D tiskárnu. V G-kódu jsou například příkazy o tom, jak moc má tiskárna zahřát trysku, aby bylo možné polymer uvést do plastického stavu a tisknout jím. Především jsou ale v G-kódu obsaženy příkazy, které uvádí tiskovou hlavu (hotend) do přesného pořadí pohybů v osách X, Y a Z tak, aby se docílilo požadovaného tvaru výtisku. [5, 6]

1.1 Historie 3D tisku

Počátky vzniku 3D tisku se datují k 80. letem 20. století v Japonsku. V roce 1981 se automobilový designér Hideo Kodama pokoušel přijít na způsob, jak rychle vyrábět tvarové prototypy. Vymyslel postup výroby přidávání materiálu po vrstvách za použití fotopolymeru – pryskyřice, která byla vytvrzována pomocí UV světla. I přesto, že se Kodamovi nepodařilo získat patent za tento způsob výroby, bývá často označován jako první vynálezce stereolitografie, kterou některé tiskárny používají dodnes.

O pět let později Charles Hull získal patent k výše zmiňované technologii výroby. Roku 1988 založil Hull firmu 3D Systems a téhož roku představili první komerční SLA 3D tiskárnu s názvem SLA-1.

V roce 1988 byla také patentována další aditivní technologie – SLS (Selective Laser Sintering), kterou vymyslel Carl Deckard z Texaské univerzity. Při této metodě se nevytvrzuje tekutý fotopolymer, nýbrž spéká kovový prášek pomocí laseru.

FDM (Fused Deposition Modeling) – metoda tisku, která funguje na principu tavení tiskové struny přes rozehřátou trysku byla patentována taktéž roku 1988. Zásluhy o patent drží Scott Crump. Metoda FDM neboli také FFF (Fused Filament Fabrication) je v dnešní době jednou z nejrozšířenějších. [7]

1.2 Typy 3D tiskáren

Existuje nespočet typů 3D tiskáren a technologií, které využívají. Liší se především ve způsobu, kterým nanáší vrstvy materiálu na sebe a na druhu materiálu, který využívají. Další diference může být jejich pořizovací cena, provozní náklady a například různá rychlost či kvalita tisku. V následujících kapitolách je pouze zlomek nejpoužívanějších a nejdostupnějších druhů 3D tiskáren a jejich popis. [8]

1.2.1 Stereolitografie

Stereolitografie (SLA), je první vynalezenou technologií 3D tisku. Jedná se zároveň o metodu, která má výsledný produkt neboli výtisk, nejpřesnější. Výška vrstvy je v rozmezí od 0,015 mm do 0,1 mm, tudíž je využití této metody vhodné pro výrobu velmi přesných prototypů, např. v stomatologii pro výrobu modelu chrupu. Pracuje na principu vytvrzování fotosenzitivního polymeru (obecně akrylátové pryskyřice) pomocí UV laserového paprsku. Tisková plocha, která je ze začátku tisku pokryta pryskyřicí, působí jako základna, na níž bude zhotoven výsledný produkt. Tisková hlava základnu poté ozáří jen na místech, kde je požadováno vytvrzení pryskyřice. Posléze se tisková plocha posune o vrstvu níže (příp. výše) a celý proces vytvrzování se opakuje. [8, 9, 10, 11]

1.2.2 Fused Deposition Modeling

Fused Deposition Modeling, zkráceně FDM, bývá také ekvivalentně nazýváno Fused Filament Fabrication (FFF). Překlad názvů odhalí, že se jedná o technologii 3D tisku, při které se taví polymer ve formě tiskové struny (prefabrikát s konstantním průřezem navinutý na nosné cívice). Vrstvení roztavené tiskové struny se provádí pomocí tiskové hlavy na dokonale rovnou tiskovou podložku, která se může jako při metodě SLA pohybovat nahoru a dolů, ale zpravidla se ve směru osy Z pohybuje u FDM tiskáren pouze tisková hlava. Tisková podložka může být vyhřívána na teplotu vhodnou k adhezi tisknutého materiálu na tiskovou podložku.

Tisková struna je u 3D tiskárny typu FDM dopravována do hotendu pomocí tzv. extruderu, díky čemuž dochází k tavení tiskové struny přes trysku, která má zpravidla několikanásobně menší výstupní průměr, než je průměr tavené tiskové struny. Nejčastější normalizovaný průměr tiskové struny je 1,75 mm, dále pak 2,85 mm a 3 mm. Výstupní průměr, tj. průměr trysky je nejčastěji 0,4 mm, ale pro dosažení detailnějšího výtisku je možné vyměnit trysku za takovou, s průměrem např. 0,1 mm. U snižování průměru trysky je nutno brát ohled na

tokové vlastnosti tisknutého polymeru a na obsah aditiv v něm. Naopak při tisknutí velkých výrobků, kde není kladen důraz na detail, nýbrž na rychlost zhotovení, je možné zvolit trysku s průměrem až 0,8 mm a více. Při zvyšování průměru trysky je omezujícím faktorem velikost průměru používané struny – u tiskárny se strunou průměru 1,75 mm není z hlediska funkčnosti možné použít trysku s výstupním průměrem 2 mm. Filament by se v takovém případě přes rozežřátou trysku neprotlačoval, nebylo by tak možné kontrolovaně extrudovat a vrstvit materiál na sebe. Extrudery potom můžeme dělit na dva typy: direct-drive (přímé vhánění filamentu do hotendu) a bowden extruder (navádění filamentu přes vodící trubičku). [11, 12, 13]

Direct-drive extruder značí to, že je filament vháněn do podsestavy hotendu přímo – nejkratší možnou dráhou od podávacího kolečka krokového motoru extruderu do hotendu tiskárny. V tomhle případě je nevýhodou velká hmotnost tiskové hlavy (ta se pohybuje při tisku zároveň s krokovým motorem, který protlačuje filament přes trysku). Problém s velkou hmotností tiskové hlavy se dá výrazně zredukovat výměnou krokového motoru za lehčí, ale musí mít zároveň dostatečně velký výkon k tomu, aby mohl vykonávat stejnou práci, jako předchozí krokový motor. Tento typ extruderu je velmi oblíbený při tisku extrémně pružných tiskových strun TPU s tvrdostí od 74 do 93 podle Shore A. [14]

Bowden extruder dle názvu využívá k dopravování filamentu do hotendu vodící trubičku – nejčastěji PTFE (polytetrafluorethylen) trubičku s vnějším průměrem 4 mm a vnitřním 2 mm. Extruder a jeho krokový motor je v tomhle případě samotnou nepohyblivou podsestavou mimo tiskovou hlavu. Tisková struna se díky podávacím kolečkům extruderu vhání do PTFE trubičky, jež je přes rychlospojky spojena s hotendem. PTFE trubička má za úkol navést filament až do trysky, o kterou se PTFE trubička opírá. Toto konstrukční řešení ukrývá jednu z největších nevýhod – a to, že PTFE trubička doléhá až na rozežřátou trysku, což může mít při teplotě nad 230 °C fatální následky při tisku. Při tak vysoké teplotě teflon ztrácí své kluzné vlastnosti a degraduje. Může tak docházet k ucpávání trysky a zároveň ke tvorbě toxických výparů. Právě zmíněný problém lze ale jednoduše vyřešit použitím celokovového hotendu, který ale vyžaduje specifický přístup při nastavování tisku ve sliceru (např. menší retrakci filamentu).

U celokovového hotendu PTFE trubička nepřichází do styku s rozežřátou částí, takže je tisk možný i při velmi vysokých teplotách – až k 500 °C viz. Creality Spider hotend. Bowden extruder má jako jednu z hlavních výhod jednoduchost údržby. Tiskárny, jenž ho využívají mají více prostoru pro tisk v ose Z (kvůli oddělenému motoru extruderu). Také může být

v některých případech použit k tisku, při kterém je potřeba tisknout rychle. Tisková hlava je totiž oproti direct-drive extruderu lehčí. Velkou nevýhodou je zde ale nespolehlivý tisk flexibilních filamentů, kvůli velké délce PTFE trubičky, přes kterou je nutné pružný filament protlačit, než se dostane do hotendu. Kvůli kontaktu tiskové struny s vnitřní stěnou PTFE trubičky totiž dochází ke tření, což má za důsledek nesprávné hodnoty extruze.

V každém případě je u FDM 3D tisku nutné dodržet stejné hodnoty extruze filamentu tzn. dá-li se 3D tiskárně příkaz, aby extrudovala přesně 100 mm filamentu, je nutné, aby extruder protlačil přes hotend přesně 100 mm filamentu, bez ohledu na to, jaký typ extruderu využívá. [11, 15, 16, 17,]

1.2.3 Selektivní laserové slinování

Selektivní laserové slinování (Selective Laser Sintering) je typ aditivní výroby, která využívá silný laser (např. CO₂ laser) jako zdroj energie ke spékání práškového materiálu (obvykle PA, PAEK, PS, TPE, nebo PC). Laser pulzně ozařuje body v prostoru definovaném 3D modelem a spojuje tak materiál dohromady, čímž vytváří pevnou strukturu. Prášek je ale většinou ohříván topnými články pod jeho teplotu tání, aby bylo pro laser snazší jej spékat. Tato technologie nevyžaduje žádné podpůrné struktury, protože neroztavený prášek podpírá součást během tisku. Po dokončení procesu tavení jedné vrstvy se nanese nová vrstva prášku a tento proces se opakuje vrstvu po vrstvě, dokud není díl dokončen. Selektivní laserové slinování je ideální pro komplexní a mechanicky odolné díly a je velmi oblíbená v oblasti malosériové výroby pomocí 3D tisku. K výrobě dílů je zapotřebí pouze prášek a laser, žádná pojiva nebo přísady. Je třeba podotknout, že je nemožné touto metodou vyrobit uzavřený a dutý předmět, jelikož by v něm zůstal nespéčený prášek. Nevýhoda při této metodě 3D tisku je proces zahřívání. Je totiž nutné přehřívat prášek, udržovat tisknutý výrobek při určité teplotě a zároveň je nejvíce energie spotřebováno pro provoz laseru. Proto se příkony SLS tiskáren pohybují běžně kolem 5 kW. [11, 18, 19]

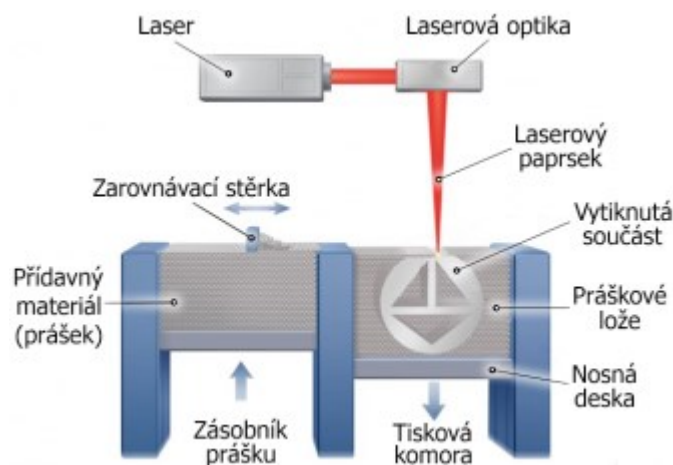
1.2.4 Selektivní laserové tavení

Selektivní laserové tavení (Selective Laser Melting neboli Direct Metal Laser Sintering) je technologií 3D tisku, která je velmi podobná technologii SLS s tím rozdílem, že nedochází pouze ke spékání prášku, ale přímo k úplnému tavení. Materiály spékaných prášků jsou vesměs kovového charakteru, především: hliník, měď, kobalt, chrom, titan, platina, ale i wolfram a různé kovové slitiny. Díky tomu, že je prášek přímo taven, má pak výsledný výrobek homogenní strukturu po celém svém objemu a velmi dobré mechanické vlastnosti.

Tisk z kovových prášků je ale nutno provádět v izolované komoře s přítomností inertních plynů, jako např. argon, dusík atp. Další diference od metody SLS je ta, že při převisech součástí nad 45° je nutné využít tiskových podpor v důsledku velkých teplotních gradientů. Mezi taveným a zbylým práškem může kvůli tomu vzniknout napětí způsobující deformace a nežádané ohýbání součástí. Proto jsou často používány podpory, aby jimi bylo možné odvádět teplo z kritických oblastí a bezpečně upevnit díl na tiskovou plochu.

Výhody této metody 3D tisku jsou: výroba komplexních součástí jinak nevyrobitelných, nízké množství odpadu oproti obrábění, velké spektrum použitelných materiálů.

Mezi nevýhody můžeme zařadit vysokou pořizovací cenu SLM tiskárny, ale také to, že lasery těchto typů tiskáren spotřebovávají velké množství elektrické energie. U některých výtisků jsou nutné dokončovací práce – zbavit výtisk podpor, zabrousit ostrá místa po podporách, odstranění neroztaveného prášku atd. [11, 20, 21, 22]



Obrázek 2 Schéma technologie 3D tisku SLM [23]

1.3 Nejpoužívanější FDM materiály

Materiálů pro 3D tisk metodou FDM je obrovské množství, od nejrozšířenějších tiskových strun z biologicky odbouratelných polymerů – kyseliny polymléčné (PLA), přes polymery hojně používané i při technologii vstřikování – např. ABS, PC, PP, PA6 až po high-tech polymery, jako jsou ku příkladu PEEK, PEI, PAEK, PVDF atp. Poslední zmíněná skupina high-tech polymerů avšak vyžaduje speciálních průmyslových 3D tiskáren, díky kterým je možné těmhle polymerům vytvořit ideální podmínky pro správnou tisknutelnost tj. např. celokovový hotend s tryskou z kalené oceli, vyhřívaná podložka umožňující teplotu až přes 120 °C, uzavřená temperovaná komora pro tisk, speciální vysoušecí zásobníky na

filament atd. Z předchozí věty je zřejmé, že čím odolnější polymer je, tím je jeho tisk náročnější.

Dalším odvětvím materiálů pro FDM jsou tiskové struny s různými plnivými, která mohou zlepšovat mechanické vlastnosti, mohou polymer činit vodivým nebo dokonce magnetickým. V následujících kapitolách budou popsány pouze některé z materiálů, které našly svoji vhodnost při 3D tisku bezkartáčových DC motorů. [11, 24, 25]

1.3.1 Kyselina polylactoná

Kyselina polylactoná neboli PLA (polylactic acid) se od většiny termoplastických polymerů liší tím, že se vyrábí z obnovitelných přírodních zdrojů. Hlavní surovinou pro výrobu PLA je rostlinná biomasa např. kukuřičný škrob, což PLA činí biologicky odbouratelným polymerem. Princip výroby spočívá v zahřátí škrobu na určitou teplotu, čímž se z něj extrahuje glukóza. Kvašením extrahované glukózy vzniknou monomery kyseliny mléčné, ze kterých se následnou termickou a katalytickou polymerací stane kyselina polylactoná. Získaný polymer se poté obvykle zpracovává ve formě granulí.

K výrobě filamentu pro FDM 3D tiskárny je nutné granulát roztavit ve vytlačovací stroji a přes vytlačovací hlavu s kruhovým otvorem extrudovat požadovaný průměr struny tak, aby měl jednotnou velikost průřezu s co nejmenší odchylkou. Struna se posléze navíjí na nosné cívky, které jsou nejčastěji zhotoveny pomocí vstřikováním z polystyrenu, polykarbonátu, ale i z polymerních recyklovaných směsí, případně z lisovaného papírového recyklátu. Filament je navinut na nosnou cívku, jelikož se nejčastěji distribuuje v gramáži 1 kg, ale i 2,5 kg i 5 kg. Takové množství struny je nutné při tisku odvíjet po malém množství v dlouhém časovém intervalu, čehož je snadné docílit díky odvíjení z cívek. [26, 27, 28, 29]

Filamenty z PLA jsou populární nejen kvůli nízké ceně a biologické odbouratelnosti, ale především kvůli snadné tisknutelnosti. Tisková teplota pro PLA se obvykle pohybuje mezi 190 až 220 °C. Při tisku s PLA je důležité udržovat konzistentní teplotu, aby se zajistilo rovnoměrné tavení a extruze materiálu. PLA lze tisknout přímo na neporézní podložku bez použití lepidla nebo jiných adheziv. Pro zajištění dobré přilnavosti je však dobré tiskovou podložku vyhřívat, a to na teplotu 40 až 60 °C, případně použít různá adheziva jako např. 3DLac.

U rychlosti tisku obecně platí, že pomalejší rychlost tisku vede ke kvalitnějšímu tisku, ale tisk s příliš nízkou rychlostí může vést ke křehkosti výtisku. Doporučená rychlost tisku pro PLA je obvykle mezi 40 až 80 mm/s. Při vyšší rychlosti tisku je dobré pak využít vyšší

teploty trysky, aby se docílilo snížení viskozity taveniny. Jedna z dalších výhod PLA je rychlé chladnutí taveniny, tudíž se dají tisknout tzv. přemostění. Jedná se o extruzi filamentu mezi dvěma nosnými body, kdy vytlačený filament z trysky zůstává ve vodorovné poloze (rovnoběžně s tiskovou podložkou). Díky dostatečnému chlazení výtisku je takhle možné přemostovat filament bez podpor až na vzdálenost několika centimetrů. [30, 31]

1.3.2 Polyethylentereftalát modifikovaný glykolem

Polyethylentereftalát modifikovaný glykolem (PET-G) je podobný polymeru PET, z něhož se pomocí vstřikování a vyfukování vyrábí PET lahve, do nichž se plní balené nápoje. Díky glykolu je snadno tisknutelný na 3D tiskárnách typu FDM. Jedná se o transparentní a průhledný materiál s vysokou pevností, tvrdostí a chemickou odolností. Mezi hlavní výhody PET-G patří dobrá propustnost světla, houževnatost a odolnost proti chemikáliím. Teplota trysky při tisku PET-G bývá v rozmezí 220 až 255 °C. Teplota tiskové podložky se pohybuje od 50 do 85 °C. I přesto, že PET-G má lepší adhezi k tiskové podložce a nepodléhá tzv. warpingu (odlepování od podložky) tolik, jako ABS, je nutné tiskovou podložku temperovat a zamezit proudění studeného vzduchu v okolí 3D tiskárny. Nedostatečná teplota tiskové podložky může vést k uvolnění počátečních vrstev výtisku od podložky, což není žádoucí a může tak dojít k znehodnocení tvarové přesnosti výtisku či k úplnému selhání tisku. [32]

Jednou z nevýhod tisku PET-G může být tzv. stringing. Jedná se o „tažení vlákna“ mezi jednotlivými dráhami trysky. Tento jev může být způsoben příliš vysokou teplotou trysky či špatným nastavením retrakce filamentu. Jelikož pojednáváme o materiálu, který má tendenci táhnout vlákno, je třeba retrakci filamentu nastavit na pomalejší rychlost a delší vzdálenost. Doporučená rychlost retrakce je 25 mm/s a vzdálenost retrakce filamentu by měla být 6 - 7 mm v případě bowdenového extruderu a 3 - 4 mm pro direct-drive extruder. Co se týče mechanických vlastností, Youngův modul PET-G se obvykle pohybuje v rozmezí 1,8 - 2,8 GPa, což znamená, že tento materiál má vyšší pružnost než například PLA nebo ABS, ale nižší než například nylon nebo PEEK. Je důležité poznamenat, že konkrétní hodnota Youngova modulu se může lišit v závislosti na výrobcu, kvalitě materiálu a metodě měření. [33]

Jsou-li vzaty v potaz praktické rozdíly, mezi PET a PET-G, většina z nich je ve prospěch polyethylentereftalátu modifikovaného glykolem, tedy PET-G. Na rozdíl od PET neobsahuje BPA a ftaláty, takže je více ekologický, lépe recyklovatelný a vhodný pro styk

s potravinami. PET-G má také na rozdíl od PET lepší průhlednost a odolnost vůči nárazu. Tyto vlastnosti činí PET-G vhodným materiálem pro výrobu např. bezpečnostních štítů či brýlí. Další z výhod PET-G je nižší zpracovatelská teplota, tudíž je možné jej zpracovávat rychleji a efektivněji než PET. [34, 35]

1.3.3 Akrylonitrilbutadienstyren

Akrylonitrilbutadienstyren (dále ABS) je semikrystalický polymer, který se hojně používá při vstřikování, vyfukování, extruzi, ale i v technologii 3D tisku FDM. Jeho široké spektrum využití se odvíjí z jeho nenáročné zpracovatelnosti a dostačujícím mechanickým vlastnostem. Teplota zpracování ABS se pohybuje v rozmezí od 230 °C do 260 °C. Na rozdíl od PLA se vyznačuje lepšími mechanickými vlastnostmi, tepelnou odolností, ale hůře se tiskne, jelikož se vyznačuje vyšší smrštitelností. 3D tisk ABS je proto vhodné provádět v uzavřeném prostoru za konstantní teploty okolí shodné s teplotou tiskové podložky, aby docházelo k rovnoměrnému chladnutí celého objemu výtisku. Výrobky z něj nejsou odolné polárním rozpouštědlům, např. acetonu. Jeden z možných typů post-processingu (následného zpracování) výtisků z ABS se dá provádět právě pomocí acetonu. Výtisk se vystaví výparům z acetonu po určitou dobu a výsledkem je dokonale hladký povrch výtisku (redukce viditelnosti tiskových vrstev). ABS je také možné tzv. svařovat zastudena pomocí acetonu. Požadované části z ABS se acetonem naleptají a můžou pak po přiložení k sobě vytvořit pevný nerozebíratelný spoj. [36, 37, 38]

1.3.4 Kopolyester

Kopolyester neboli CPE je termoplastický polymer, který se používá v mnoha průmyslových odvětvích. Je to polymer vytvořený ze dvou nebo více monomerů, které jsou spojeny pomocí chemických vazeb. CPE má mnoho vynikajících vlastností, jako jsou např. odolnost vůči vysokým teplotám, chemikáliím a UV záření. Tento polymer má také vynikající mechanické vlastnosti. Kopolyester je obecně považován za zdravotně nezávadný materiál, jelikož neobsahuje toxický bisfenol-A. Tento materiál obsahuje bio-monomer, který je recyklovatelný. Z tohoto důvodu je CPE šetrný k životnímu prostředí. Výrobce Fillamentum dokonce garantuje u všech jeho barevných variant CPE bezpečnost ve styku s potravinami. Tisknutelnost CPE není příliš jednoduchá, jelikož může docházet k warpingu a nadměrné tekutosti materiálu. Pro zamezení příliš vysoké tekutosti materiálu je vhodné tisknout doporučenou teplotu (tj. 255–275 °C) pouze první vrstvu. Posléze je vhodné teplotu snížit na cca 235 °C. (Snížení teploty tisku po dokončení první vrstvy lze nastavit např. ve sliceru

Ultimaker Cura, aby nebylo nutné snižovat teplotu manuálně během tisku.) Doporučená teplota podložky je v rozmezí 70 až 85 °C, ale kvůli výše zmíněnému warpingu je také vhodné na podložku aplikovat přípravek pro lepší adhezi výtisku. CPE je při správném nastavení teplot tisku dobře tisknutelným materiálem i na 3D tiskárně bez zakrytování. [39, 40, 41]

1.3.5 Polyamid 6

Polyamid 6 neboli PA6, je termoplastický materiál z odvětví polyamidů (známější pod obchodním názvem Nylon), který má široké spektrum využití v průmyslu díky svým vlastnostem. PA6 má vysokou pevnost, tuhost a tvrdost, přičemž zůstává zároveň relativně odolný vůči opotřebení a tření. Díky těmto vlastnostem se PA6 často používá pro výrobu součástí a dílů pro automobilový průmysl, elektroniku, sportovní vybavení a další aplikace, kde jsou požadovány vysoké pevnostní vlastnosti a odolnost proti opotřebení. PA6 je také vynikající alternativou ke kovům a jiným tradičním materiálům v mnoha aplikacích, kde se požadují lehkost a snadná zpracovatelnost. Výhodou PA6 je recyklovatelnost. Při procesu recyklace se materiál roztaví a následně se zpracovává do nových vláken, popřípadě granulí. Je nutno zmínit, že při tepelném zpracování polyamidu 6, dochází k uvolňování škodlivých plynů a částic, jako jsou oxid uhelnatý, oxid dusný, formaldehyd atd. Tyto látky mohou mít negativní vliv na zdraví pracovníků, pokud je vdechují v kritickém množství. Proto je důležité provádět zpracování polyamidu 6 v dobře větraných prostorech nebo s použitím odpovídajících ochranných prostředků, jako jsou respirátory či ochranné rukavice. 3D tisk PA6 je náročný kvůli objemovému smršťování (warpingu). Proto je nutné jej tisknout na tiskovou plochu vyhřívanou na 70 až 110 °C. Ideální tisknutelnost PA6 lze zajistit použitím 3D tiskárny v uzavřené komoře, kde bude díky vyšší vnitřní teplotě zamezeno warpingu. Teplota trysky se může lišit dle doporučení výrobce, ale obvykle se pohybuje v rozsahu od 230 do 285 °C. Pro správnou tisknutelnost PA6 je také nutné dbát na suchost filamentu. Polyamid je známý také svou hygroskopičností a v případě nesprávného skladování může dojít k navlhnutí materiálu, který je pak nutno sušit. [13, 42, 43, 44, 45]

1.3.6 Polybutyltereftalát

Polybutyltereftalát (PBT) je termoplast, který se hojně používá pro výrobu elektrotechnických komponent vstřikováním. Můžou z něj být vyrobeny např.: konektory, zásuvky, vypínače, kryty elektrospotřebičů, pláště motorů, části spalovacích systémů atp. Na trhu jsou k dispozici varianty tohoto materiálu s aditivy, které zaručují velmi rychlou

krystalizaci, což je žádoucí u vstřikování. PBT má také nízký koeficient teplotní roztažnosti a nízkou nasákavost. Vyznačuje se dobrou pevností, dobrými kluznými vlastnostmi, a mimořádně dobrou tepelnou odolností – až do 150 °C, není-li mechanicky namáhán. V opačném případě může dojít k jeho deformaci již při nižší teplotě. Tisknutelnost tohoto materiálu není příliš náročná, pokud se nastaví správná teplota extruze filamentu a podložky. Prodejce doporučuje nastavení teplot jako při tisku PET-G. Teplota trysky by se měla pohybovat v rozsahu 230 až 240 °C a teplota podložky by měla být 70 °C. [46, 47, 48]

1.3.7 Plniva ve filamentech

Tiskové struny jsou vyráběny z různých polymerů a mohou dodatečně obsahovat různé druhy plniv, která pomáhají vylepšit jejich vlastnosti. Nejčastěji používané typy plniv v tiskových strunách jsou:

- Skelná vlákna – Skelná vlákna se přidávají do tiskových strun zejména pro zvýšení pevnosti a tvrdosti materiálu. Struny s tímto plnivem jsou odolnější vůči destrukci ohybem, tudíž jsou zároveň méně náchylné k deformacím.
- Dřevěný prach – Tento typ plniv se používá pro tiskové struny, které mají vypadat jako dřevo nebo mít dřevěnou texturu. Tiskové struny s tímto plnivem jsou také lehké a snadno obrobitelné. Díky jejich získané textuře povrchu je také možné je snadno lakovat nebo barvit.
- Kovové prášky – Kovové prášky se přidávají do tiskových strun pro vytvoření kovového vzhledu. Filamenty s tímto plnivem jsou také odolnější vůči nárazu a otěru. Některé kovy mohou činit tiskové struny feromagnetickými – např. Iron PLA od výrobce Proto-Pasta. Přidáním některých kovů do polymerní matrice, lze získat tepelně a elektricky vodivé vlastnosti.
- Uhlíková plniva – Mezi tato plniva spadají různé uhlíkové strukturální varianty, jako třeba vlákna, saze nebo tzv. nanotrubičky. Používají se zejména pro zvýšení pevnosti a tuhosti tiskových strun, nebo také pro získání elektricky vodivých vlastností u výtisků, proto ale musí dojít k překročení tzv. perkolační koncentrace. Uhlíková vlákna jsou také velmi lehká a mají vysokou odolnost proti chemikáliím a teplu. Uhlíková plniva lze do polymerní matrice přidat vložením aditiva do rozpuštěného polymeru, následnou homogenizací, a odstranění rozpouštědla sušením.

- Nadouvadla – Nadouvadla neboli pěnicí činidla se do filamentů přidávají za účelem snížení hmotnosti výtisku, což může být žádoucí například u RC modelů nebo při prototypování s důrazem na nízkou hmotnost. Toto plnivo ve filamentu způsobí vznik mnoha malých vzduchových bublinek, čímž výtisk ztratí hmotnost, ale může nabýt na objemu.
- Pigmenty – Pigmenty jsou nejrozšířenější příměsí při výrobě filamentu pro FDM 3D tisk. Slouží k obarvení tiskové struny. Jedná se o příměs, která se do polymeru přidává za účelem zlepšení estetického dojmu. Některé z pigmentů mohou mít abrazivní účinky, např. TiO_2 , jenž se využívá pro dosažení bílé barvy. [49, 50, 51, 52, 53, 54, 55]

Výrobci tiskových strun mohou kombinovat různá plniva, aby dosáhli požadovaných vlastností pro specifické aplikace. Je ale třeba brát v potaz, že většina z výše zmíněných plniv může mít abrazivní účinky, a proto je vhodné k jejich tisku zvolit trysku, která je více odolná vůči abrazi (oproti mosazné trysce). Jedná se o trysky z titanu, z oceli (kalené) nebo třeba mosazné trysky s rubínovou vložkou. Jednotlivé materiály trysek mají své pro a proti.

Nejpoužívanější trysky jsou právě trysky mosazné, a to kvůli jejich dobré cenové dostupnosti a pro jejich výbornou tepelnou vodivost. U trysek z tvrdších materiálů, jako např. nerezová ocel nebo titan, nedochází k opotřebení tak rychle, jako u trysek z mosazi, nýbrž distribuce tepla je paradoxně u těchto abrazi-odolnějších materiálů horší. Tryska s dobrou tepelnou vodivostí, která je zároveň vnitřně odolná vůči abrazi, je variantou mosazné trysky s tím rozdílem, že vnitřek trysky je z rubínu. Tuhle variantu mosazné trysky vymyslel švédský inženýr Anders Olsson z univerzity Uppsala. Bylo zjištěno, že tryška s rubínovou vložkou nenese žádné známky opotřebení, ani po extruzi 8 kg filamentu plněného uhlíkovými vlákny. U trysek z kalené oceli po extruzi 4 kg toho stejného filamentu bylo vidět, že došlo ke značnému opotřebení. Současná cena mosazných trysek s rubínovou vložkou, se v ČR pohybuje od 1500 Kč a výše. [56, 57, 58, 59, 60]



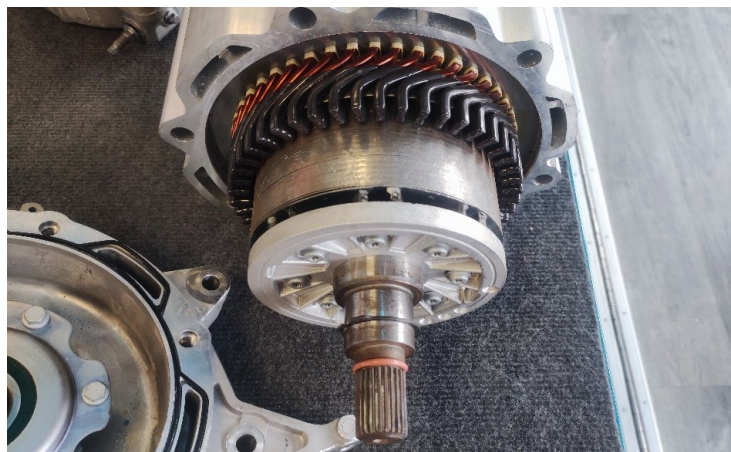
Obrázek 3 Mosazná tryska 0,4mm (vlevo) [foto autora]; Mosazná tryska s rubínovou vložkou (vpravo) [61]

2 ELEKTROMOTORY A JEJICH POUŽITÍ

Elektromotory jsou stroje, které primárně přeměňují elektrickou energii na energii mechanickou – rotační pohyb jejich hřídele v důsledku interakce permanentních magnetů a proměnlivého magnetického pole, jenž je vyvoláváno elektrickým proudem, který prochází vinutím motoru. [62]

Typy elektromotorů můžeme rozdělit na stejnosměrné a střídavé dle typu proudu, který využívají k provozu. Každý typ motoru nachází využití pro specifickou funkci. V praxi můžeme motory nalézt téměř v každém komplexním přístroji, který ke své funkci využívá elektřiny. Například v mobilním telefonu můžeme najít stejnosměrný bezjádrový elektromotor, který je zde osazen za účelem otáčení závaží pro tvorbu vibrací. V počítačích a laptotech jsou dále bezkartáčové stejnosměrné motory, jejichž součástí rotoru jsou vrtule s lopatkami, tudíž plní funkci chlazení důležitých komponent zmíněných zařízení. Můžeme se ale přesunout i do výrobního průmyslu, kde nacházíme těžké třífázové elektromotory na střídavý proud. Zde mají tyto elektromotory dostatek výkonu a krouticího momentu k pohonu převodovek či k přímému pohonu výrobních linek. [63]

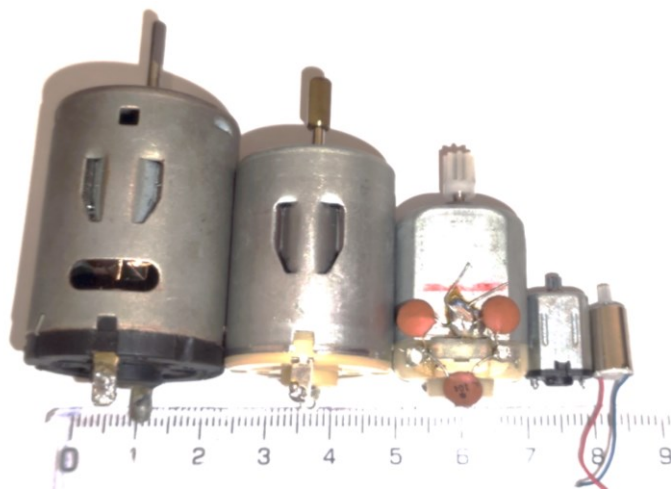
V neposlední řadě je nutné zmínit trend 21. století, a to jsou automobily s elektropohonem. Tyto automobily využívají nejčastěji reluktančních asynchronních elektromotorů, které se pyšní účinnostmi 95-98 % oproti spalovacím motorům, které mají účinnost pouhých 35-40 % přičemž použití elektromotoru dovoluje absenci dalších těžkých komponent automobilu – převodovky, spojky, výfukového potrubí atd. Nevýhodou elektromobilů může být velká hmotnost pohonného akumulátoru, jeho malá kapacita a také krátká životnost. Elektromotory v automobilech ale nabízí podobný výkon, jako motory spalovací, a to při několikanásobně menší hmotnosti sestavy motoru. [64]



Obrázek 4 Elektromotor o výkonu 100 kW používaný automobilkou Citroën [foto autora]

2.1 Stejnosměrné elektromotory

Stejnosměrný motor (DC motor) je elektromotor, který využívá stejnosměrný elektrický proud pro generování rotačního pohybu. Stejnosměrný proud je produktem baterií, palivových článků či generátorů s usměrňovacími můstky. Tento typ motoru se často používá v průmyslu, strojírenství a v mnoha jiných aplikacích. Stejnosměrné motory jsou velmi jednoduché konstrukce a skládají se z několika základních komponent. Mezi tyto komponenty patří: rotor, stator, magnety a u kartáčových elektromotorů také komutátor a kartáče.



Obrázek 5 Variace stejnosměrných elektromotorů [foto autora]

Rotor je otáčivá část motoru, která je obvykle tvořena permanentními magnety, elektromagnety nebo vrstvenými plechy s vinutím a hřídelí. Stator je pevná část motoru, která obsahuje cívky nebo permanentní magnety, které generují magnetické pole. U kartáčových stejnosměrných elektromotorů je navíc komutátor, což je zařízení, které slouží k souvislému měnění polarity elektrického proudu ve vinutí, se kterým je spojeno. To způsobuje otáčení rotoru v jednom směru. Kartáče jsou kontaktní body, které umožňují přenos elektrického proudu na komutátor.

Hlavním rozdílem mezi kartáčovým a bezkartáčovým DC motorem je způsob, jakým pracují a způsob, jakým jsou regulovány jejich otáčky. [65, 66]

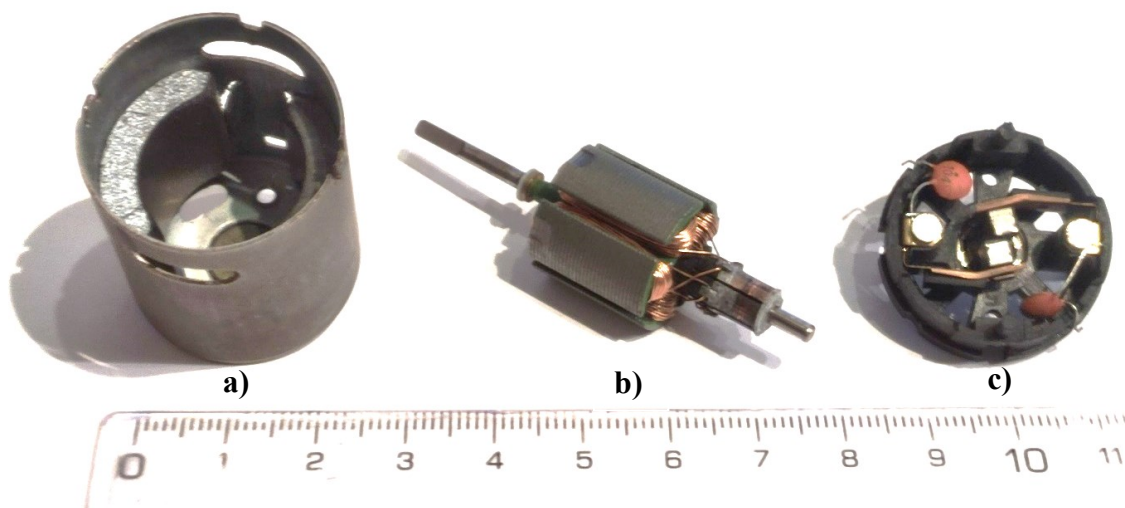
2.1.1 Kartáčové elektromotory

Kartáčové stejnosměrné motory obsahují kartáče a komutátor pro přepínání polarity proudu procházejícího cívkami motoru. Kartáče jsou obvykle vyrobeny z grafitu nebo uhlíku a jsou

v kontaktu s komutátorem, což je segmentovaný kovový kroužek, který se otáčí spolu s rotorem.

Protože mezi kartáči a komutátorem dochází k mechanickému tření, navíc se jedná o elektrický kontakt, nelze je mazat. Dochází tak během provozu motoru k mechanickému opotřebení kartáčů a komutátoru. Toto opotřebení nakonec dosáhne bodu, kdy motor přestane fungovat. Mnoho kartáčových motorů – zejména těch velkých – má vyměnitelné kartáče, které jsou navrženy tak, aby udržely dobrý kontakt i při tření a zahřívání. I u motorů s výměnnými kartáči se nakonec komutátor opotřebuje natolik, že je nutné vyměnit celý rotor.

Jakmile se do motoru přivede stejnosměrné napětí, přeneso se přes kartáče do komutátoru a dojde tak k pootočení rotoru. Když se rotor s komutátorem otáčí, dochází tak k cyklickému přepínání toku elektrického proudu v jednotlivých cívkách. Díky tomu se v cívkách indukuje elektromagnetické pole, a to má za následek interakci s magnetickým polem permanentních magnetů, které jsou nejčastěji umístěny v plášti motoru a jejich magnetické pole je neměnné. U některých větších kartáčových elektromotorů je místo permanentních magnetů využíváno elektromagnetů, tudíž je rotor i stator tvořen cívkami. [67]

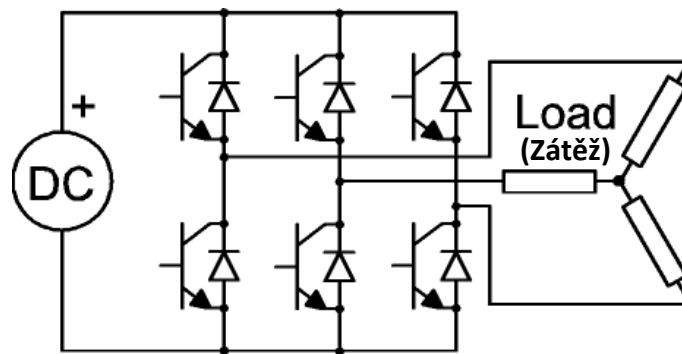


Obrázek 6 Rozložený DC motor – a) Plášť motoru s permanentními magnety; b) Podsestava hřídele, rotoru s vinutím a komutátoru; c) Zadní kryt motoru s uhlíkovými kartáči [foto autora]

2.1.2 Bezkartáčové DC elektromotory

Bezkartáčové elektromotory na stejnosměrný proud, taktéž EC motory jsou stroje využívané k pohonu bezpilotních letounů, dronů, elektrokol, elektromobilů, ale i ke chlazení různých polovodičových součástek vzduchem. Princip jejich funkce spočívá v přeměně elektrické

energie v otáčivý pohyb za pomoci proměnlivého magnetického pole jejich hlavní komponenty – statoru. Dále je v tomto typu motorů klíčový rotor, který je vždy osazen sudým počtem magnetů s alternující polaritou. Aby bylo na statoru vytvořeno proměnlivé elektromagnetické pole, je zapotřebí externí přístroj mezi zdrojem napětí a motorem – regulátor (také ESC, střídač), jenž ze stejnosměrného napětí vyvine impulzy podobné střídavému napětí. Jelikož bezkartáčové motory neobsahují komutátor, ani kartáče, je třeba změnu polarity na cívkách měnit právě regulátorem k tomu určeným.



Obrázek 7 Třífázový střídač – schéma [68] (Převzato a upraveno.)

Některé bezkartáčové elektromotory disponují třemi kontaktními vodiči. Je tomu tak u BLDC (Brushless Direct Current) motorů, které se používají například v modelářství jako pohonná jednotka. Tyto motory mohou dosahovat výkonu až 10 kW, což můžeme považovat za náhradu spalovacího motoru s kubickým objemem 150 cm³. Tyto motory mají většinou vinutí zakončené do trojúhelníka, aby se dosáhlo vyšších otáček motoru. Pokud je majoritní veličinou točivý moment, pak má motor vinutí zakončené do hvězdy. Motory s vinutím zakončeným do trojúhelníka tedy dosahují o $\sqrt{3}$ více otáček na volt a o $\sqrt{3}$ menší kroutící moment, než motory se stejným vinutím zakončeným do hvězdy a naopak. [69, 70, 71]



Obrázek 8 Variace BLDC motorů pro pohon RC modelů [foto autora]

U BLDC motorů se často setkáváme s veličinou, která má jednotku KV. Jedná se o otáčky na volt. Výrobci raději udávají u svých motorů tuhle hodnotu, jelikož BLDC motory mohou mít velký rozsah provozního napětí. Obecně platí, čím menší je BLDC motor, tím vyšší KV může mít. Nutno zmínit, že výsledné otáčky na volt se u BLDC motorů mohou lišit v závislosti na jejich vinutí. Vyšší otáčky na volt mohou být dosaženy snížením počtu závitů na cívkách statoru a zakončením vinutí do trojúhelníka. Snížení počtu závitů na cívkách může kromě zvýšení KV vést k většímu zahřívání motoru a snížit tak celkový kroutící moment motoru. [72, 73, 74, 75]



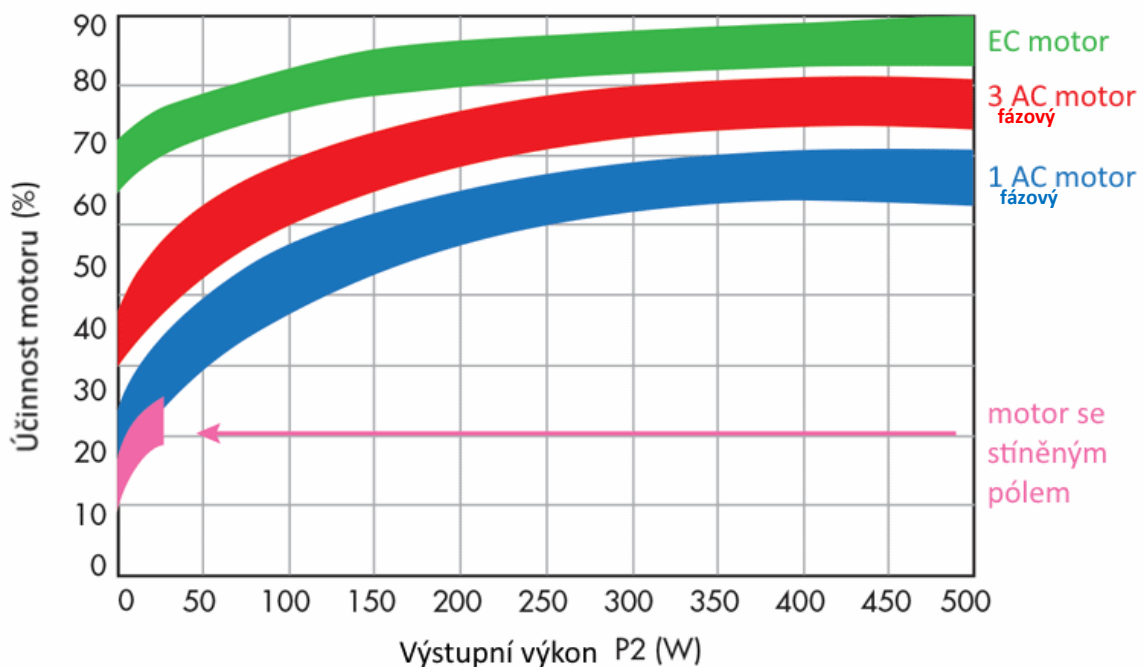
Obrázek 9 BLDC motor 0703 20000KV (vlevo) [90]; BLDC motor RET 30 - 65KV pro paramotor (vpravo) [76]

Další atribut, který nesou BLDC motory označuje konfiguraci magnetů ku cívkám. Značí se obvykle formátem *XXNYYP* např. 14N12P. Konkrétně 14N znamená, že stator má 14 slotů pro vinutí přičemž 12P znamená, že rotor obsahuje 12 magnetů. Počty slotů na statoru a pólů na rotoru ovlivňují výkonnostní charakteristiky motoru, včetně točivého momentu, otáček na volt a účinnosti. Pro optimalizaci výkonu pro konkrétní aplikaci lze zvolit specifickou konfiguraci magnetů a cívek.

Prodejci každý BLDC motor rozlišují především podle jeho celkové velikosti či podle velikosti statoru. Tyto parametry jsou udávány v názvu motoru v podobě čísla s formátem *XXYY* kde *XX* značí průměr rotoru nebo statoru v milimetrech a *YY* značí délku rotoru nebo statoru v milimetrech. Někteří prodejci udávají obě velikosti, což je nejpřívětivější, např. 2820 (3542). Toto označení znamená, že stator má velikost $\varnothing 28 \times 20$ mm a celkový rozměr motoru (bez kabeláže a hřídele) je $\varnothing 35 \times 42$ mm. [77, 78, 79]

2.2 Střídavé elektromotory

Střídavé elektromotory jsou nejrozšířenějším typem elektromotorů a používají se v aplikacích, jako jsou čerpadla, ventilátory, kompresory atd. Z jejich názvu vyplývá, že k jejich provozu se využívá střídavý proud. Můžeme je dle principu funkce rozdělit na synchronní a asynchronní, dále pak na jednofázové a třífázové. Synchronní motory se používají ve vysoce přesných aplikacích, jako je robotika a automatizace. Jelikož není rotor asynchronního elektromotoru nijak elektricky spojen se státorem, výkon se do rotoru přenáší pomocí elektromagnetické indukce ze statoru, proto se často asynchronní motory nazývají indukční motory. U střídavých elektromotorů vyšších výkonů (nad 4 kW) se můžeme setkat s adaptivním přepínáním zapojení cívek. Při rozběhu motoru, kdy je proud nejvyšší, je nutné dosáhnout co největšího kroučícího momentu, proto je potřeba motor rozbíhat v zapojení do hvězdy. Po dosažení provozních otáček se vinutí může přepojit do trojúhelníka. U vinutí střídavých elektromotorů platí stejně jako u BLDC motorů, že při statorovém vinutí do trojúhelníka je dosaženo $\sqrt{3}$ -krát vyšších provozních otáček motoru, ale zároveň je odběr proudu $\sqrt{3}$ -krát větší. Naopak u vinutí do hvězdy je dosaženo $\sqrt{3}$ -krát většího kroučícího momentu, což je při rozběhu elektromotoru žádoucí. [80, 81]



Obrázek 10 Graf závislosti účinnosti elektromotorů na jejich výstupním výkonu [82]

2.2.1 Synchronní

Synchronní motory jsou stroje konstrukcí podobné asynchronním motorům. Póly jejich rotoru bývají tvořeny buď permanentními magnety nebo cívkami napájenými stejnosměrným proudem. Název tohoto typu motoru symbolizuje to, že rychlost otáčení rotoru je shodná s frekvencí proudu přiváděného do motoru. Díky tomu v synchronním elektromotoru nevzniká tzv. skluz. Absence skluzu je hlavním rozdílem oproti asynchronnímu elektromotoru. Synchronní motory pro regulaci otáček potřebují frekvenční měnič a můžou fungovat také jako AC generátor (alternátor). [80, 81]

2.2.2 Asynchronní

Třífázové asynchronní elektromotory patří mezi nejpoužívanější pohonné jednotky v průmyslu. Jsou levné, jejich otáčky jsou snadno regulovatelné a mají jednoduchou konstrukci. Výkony těchto elektromotorů se pohybují od desítek wattů po megawatty. Asynchronní motory mají většinou cívky umístěny ve statoru. V rotoru je nejčastěji umístěno vinutí, ve kterém se rotací elektromagnetického pole ze statoru indukují proudy, čímž vznikne vlastní magnetické pole rotoru. Interakcí těchto magnetických polí se rotor otáčí. V důsledku principu funkce asynchronního motoru vzniká skluz – rotor se vždy musí točit pomaleji než elektromagnetické pole vytvářené vinutím statoru. Rychlost tohoto elektromotoru můžeme řídit např. změnou počtu pólových párů, změnou vstupního napětí, ale i změnou frekvence vstupního proudu stejně jako u synchronních motorů. [71, 83]



Obrázek 11 Asynchronní elektromotor [84]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

3 POUŽITÉ VYBAVENÍ A MATERIÁLY

Mezi použité vybavení k 3D tisku patří tiskárna Ender 3 od značky Creality a také průmyslová 3D tiskárna Delta 4070 WASP. Obě zmíněné 3D tiskárny pracují s technologií typu FDM, liší se zejména typem extruderu, způsobem pohybu tiskové hlavy, velikostí a v neposlední řadě – cenou. Pořizovací cena 3D tiskárny Ender 3 byla v červenci roku 2022 3199 Kč, což tiskárnu učinilo velmi dostupnou pro domácí použití a dostačující pro 3D tisk komponent bezkartáčových motorů. Jelikož ale 3D tiskárna Ender 3 nemá ve standardní výbavě zakrytování, není vhodná pro tisk materiálů s objemovou nestálostí, jako například ABS, ASA, PA6, PC-ABS atp. Tato 3D tiskárna i přes její nízkou pořizovací cenu zvládne tisknout velmi precizně z komoditních materiálů, především PLA, PET-G, CPE, ale za určitých podmínek i ABS, a to rychlostí až 200 mm/s.



Obrázek 12 FDM 3D tiskárna Creality Ender 3 [85]

Pro tisk součástí, které bylo nutné vytisknout z materiálů teplotně či mechanicky odolných, bylo použito průmyslové 3D tiskárny Delta 4070 WASP, která disponuje ocelovou tiskovou podložkou, částečně uzavíratelný tiskový prostor, direct-drive extruder a pohyb hotendu pomocí tří nepružných ramen, jejichž kombinace pohybů dokáže tiskovou hlavu rozpohybovat v ose X, Y a zároveň Z. Pro pohyb každého z ramene má tiskárna zabudované 3 krokové motory s precizní přesností pohybu. Tyto krokové motory disponují ozubeným pastorkem, aby byly schopny pohybovat ozubenými řemeny, které plní funkci pohybu

rameny. Právě kvůli možnosti tisku v částečně uzavřeném temperovaném prostoru a ocelové tiskové podložce je tato 3D tiskárna vhodná k tisku PA6, PC-ABS, PBT či HT-PETG.



Obrázek 13 Termokamera E5-XT značky Flir [86]

K provádění analýzy materiálů pomocí zjišťování jejich teplot skelného přechodu a teplot tání byl použit kalorimetr Pyris 1 DSC. Tyto analýzy byly provedeny za účelem ověření kvality materiálů a byly provedeny pro každý materiál jednou, jelikož jsou časově náročné. Zjištěné teploty byly porovnány s hodnotami uvedenými v materiálových listech testovaných vzorků. Pro pořizování snímků u tepelného namáhání motorů byla použita termokamera Flir E5-XT. Měření otáček motorů bylo provedeno pomocí bezkontaktního digitálního otáčkoměru DT-2234C+. Pro přesnou regulaci napětí aplikovaného na motory bylo využito laboratorního zdroje Rohde & Schwarz HMC8043. Mechanické zkoušky byly provedeny pomocí rázového kladiva Zwick 5113 a trhačích přístrojů Testometric MT350-5CT.

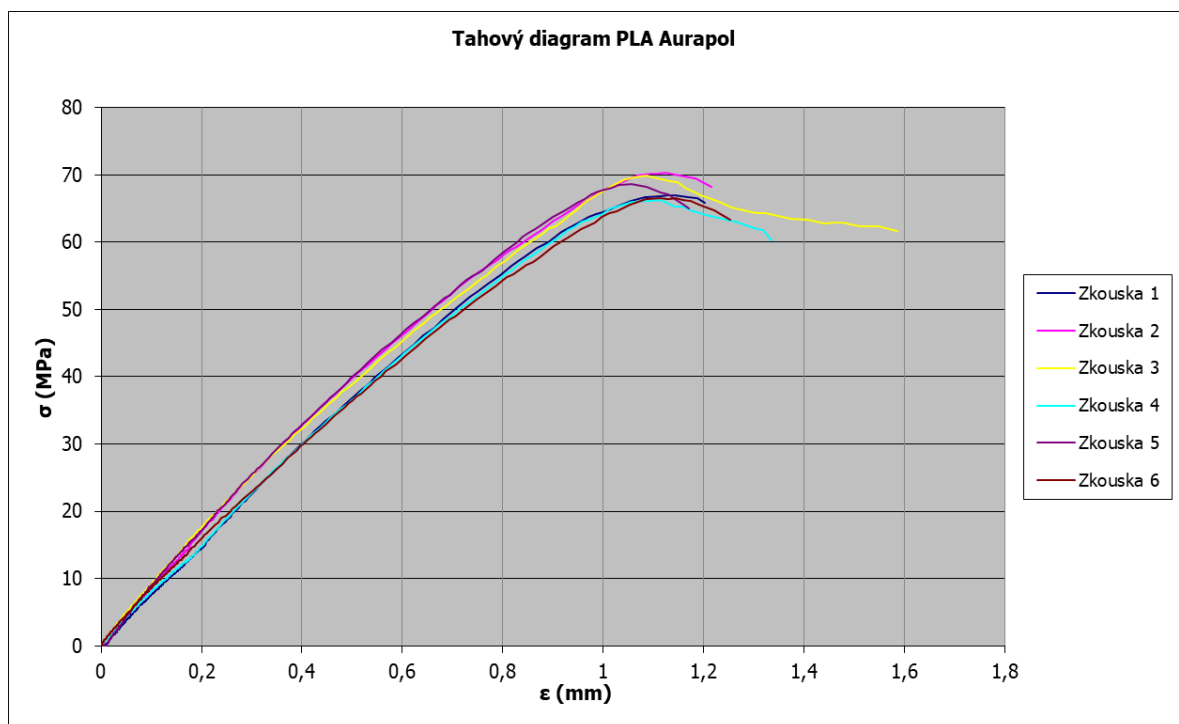
3.1 Natural PLA Aurapol

Materiál PLA od české firmy Aurapol je vyráběn z virgin granulátu bez přidaných recyklátů a barviv. Disponuje mimořádně dobrou pevností v tahu – 50 MPa a Youngův modul tohoto materiálu činí 3,5 GPa. Jedná se ale o hodnoty udávané výrobcem a nejspíše nejsou měřeny na testovacích tělískách zhotovených 3D tiskem, jelikož mechanické zkoušky tohoto materiálu resultovaly v nižší hodnoty, protože byla testovací tělíska vyrobena pomocí 3D tisku metodou FDM.

Tento materiál byl využit k tisku některých mechanicky namáhaných součástí, jako je rotor. Tato součást plní v BLDC motoru funkci rotace a zároveň v ní jsou vlepeny neodymové magnety, které rotor činí hmotnějším. Rotor je tedy namáhán odstředivou silou, proto je nutné zajistit jeho dostatečnou tuhost a pevnost tak, aby nedošlo k fatálnímu roztržení rotoru za chodu motoru. Rotor musí být také pevně spojený s hřídelí, která je uložena v ložiskách. Pro správný spoj rotoru s hřídelí je nutné rotor vytisknout s ideálním rozměrem díry pro pevný a kolmý spoj s hřídelí, případně posléze pevnost a kolmost spoje zajistit přídatnou součástí (např. použití stavěcího šroubu – tzv. červíku). Při kompletaci elektromotorů byly použity pouze komerční magnety, tudíž nebylo nutné měřit jejich magnetické vlastnosti. Pro zjištění orientační síly magnetů bylo vycházeno z katalogových listů výrobce.

3.1.1 Mechanické zkoušky PLA

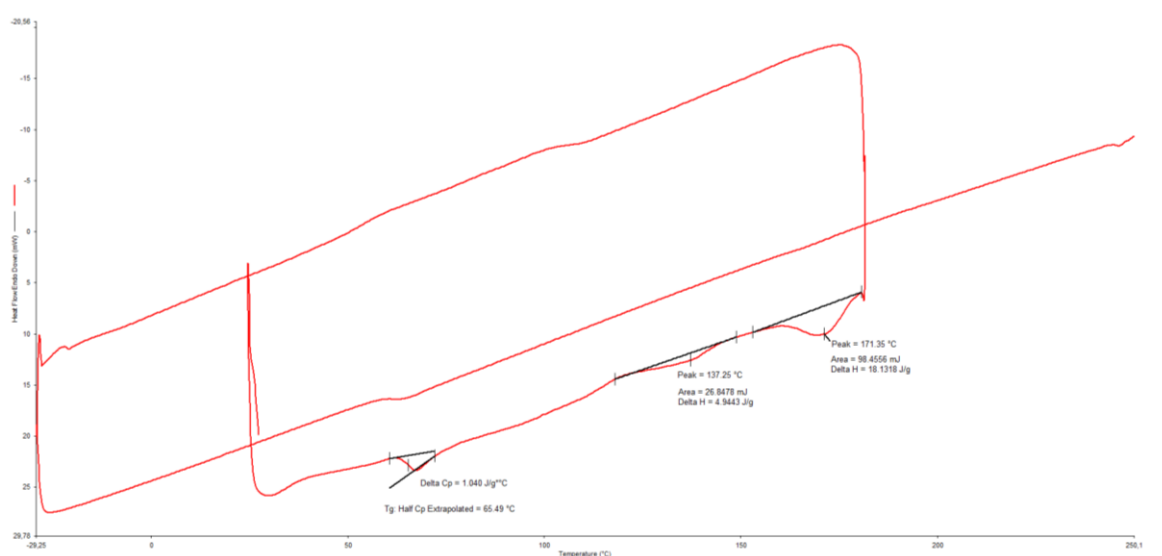
Na zařízení Testometric MT350-5CT bylo provedeno celkem 6 tahových zkoušek dle ISO 179, které jsou vyobrazeny v grafu s označením Obrázek 14. Z naměřených dat, které trhací stroj vyhodnotil bylo zjištěno, že průměrná hodnota maximálního napětí byla 68 MPa, průměrná hodnota Youngova modulu byla 893,4 MPa a průměrná tažnost při přetrhu byla necelých 13 %.



Obrázek 14 Graf závislosti napětí na poměrném prodloužení pro PLA Aurapol

3.1.2 DSC analýza PLA

Na kalorimetru Pyris 1 DSC byl analyzován vzorek natural PLA od firmy Aurapol. Analýza proběhla u všech polymerů stylem ohřevu (tavením) vzorku, chlazením a znovu ohřevem a chlazením. První ohřev slouží ke smazání tzv. teplotní historie, která vzniká při prvotním zpracování polymeru u výrobce. Výsledkem analýzy je graf zobrazený na Obrázku 15. Důležité body křivky grafu jsou nazývány tzv. peaky (vrcholy) a jsou znázorněním různých fyzikálních změn v materiálu. První peak vznikl při teplotě 65,49 °C a znázorňuje oblast skelného přechodu. Druhý peak na teplotě 137,25 °C znázorňuje oblast studené krystalizace a posledním peakem při teplotě 171,35 °C pozorujeme teplotu tání zkoušeného vzorku.

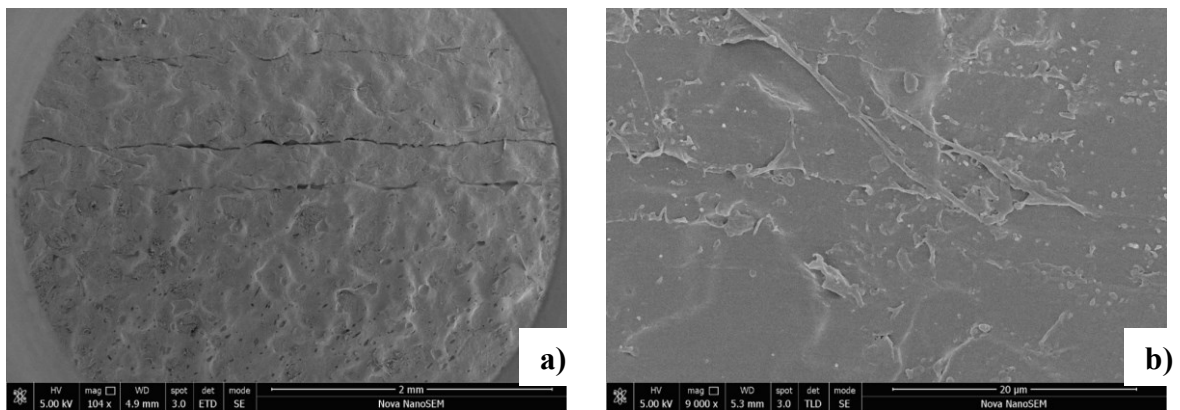


Obrázek 15 Graf závislosti tepelného toku na teplotě pro PLA Aurapol

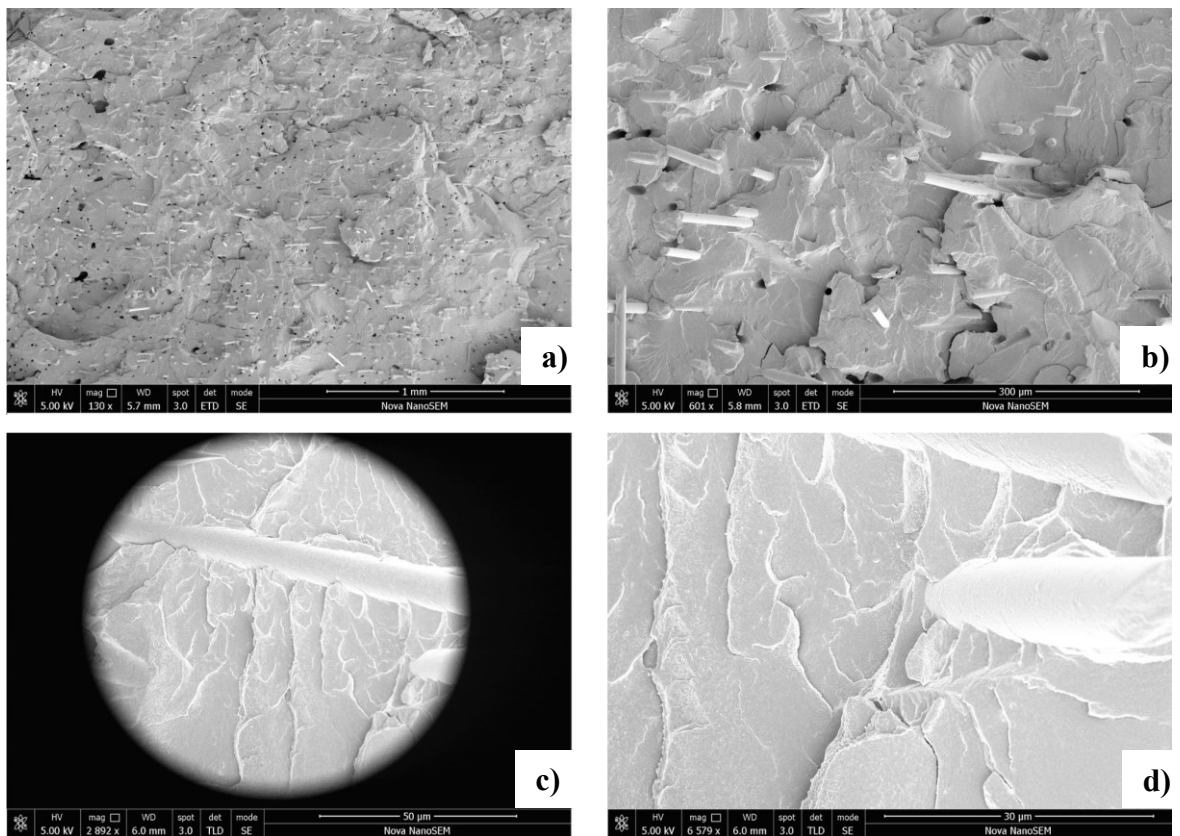
3.2 PBT Lankeda

Polybutyltereftalát je vhodným materiálem pro aplikaci v elektrotechnice díky dobrým izolačním vlastnostem, a především kvůli dostačující tepelné odolnosti. Výrobce udává tepelnou odolnost až do 150 °C, pokud není mechanicky namáhán. Proto byl tento materiál zvolen ke zhotovení těla motoru, na kterém je nasunut navinutý stator a zároveň v něm jsou nalisována ložiska. Tělo motoru musí mít vyšší tepelnou odolnost z důvodu, že vinutí motoru, kterým prochází elektrický proud, disponuje tepelnými ztrátami, které většinou vedou ke zvýšení teploty statoru. Jelikož je stator přímo spojen s tělem motoru (a fixován proti pootočení), dochází tak k přestupu tepla z kovu v tomto případě do polymeru. Z toho

důvodu je nutné tělo motoru zhotovit z tepelně odolného polymeru. Obvykle je tato součást BLDC motorů zhotovena z hliníku, který je nutné obrábět na CNC strojích a vzniká tak velké množství odpadu (kovových třísek). Hliník má také oproti PBT vyšší hustotu, což vede k vyšší hmotnosti motoru. Hustota slitiny hliníku 6061 je cca 2700 kg/m^3 , přičemž hustota PBT je 1310 kg/m^3 . Z porovnání hustot vyplývá, že pomocí 3D tisku lze tělo BLDC motoru zhotovit s více než dvojnásobně nižší hmotností. Pro ukázkou unikátní struktury PBT byly pořízeny SEM snímky povrchu a lomu výtisku.



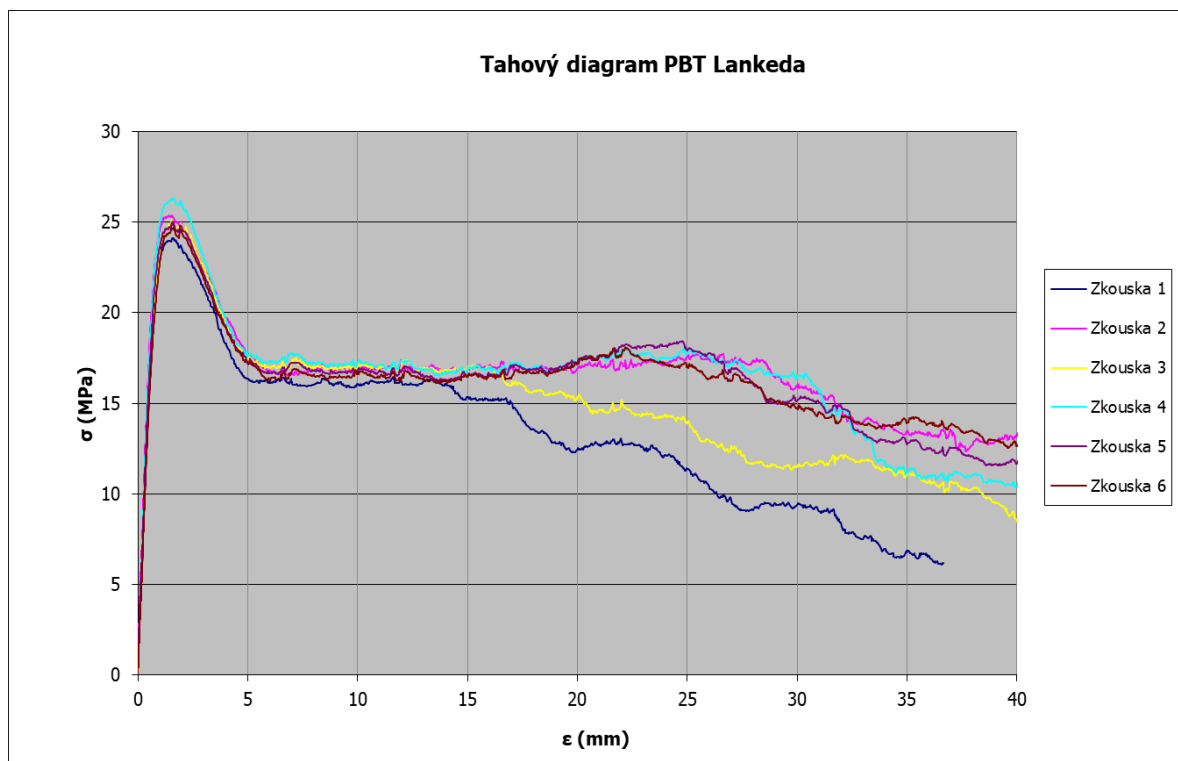
Obrázek 16 SEM – Mikroskopie povrchu výtisku z PBT Lankeda: a) Měřítko 2 mm; b) Měřítko 20 µm



Obrázek 17 SEM – Mikroskopie lomu výtisku z PBT Lankeda: a) Měřítko 1 mm; b) Měřítko 300 µm; c) Měřítko 50 µm; d) Měřítko 30 µm

3.2.1 Mechanické zkoušky PBT

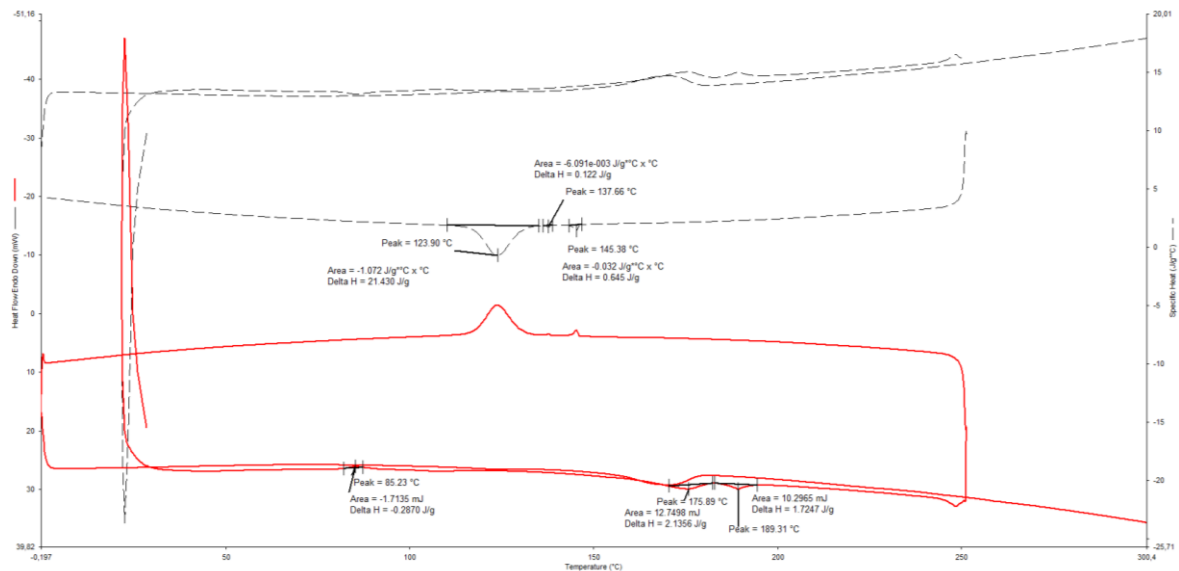
Na zařízení Testometric MT350-5CT bylo provedeno celkem 6 tahových zkoušek dle ISO 179, které jsou vyobrazeny v grafu s označením Obrázek 18. Z naměřených dat, které trhací stroj vyhodnotil bylo zjištěno, že průměrná hodnota maximálního napětí byla 25 MPa, průměrná hodnota Youngova modulu byla 380,6 MPa a průměrná tažnost při přetrhu byla 504 %. Již při 3D tisku s tímto materiálem byla pozorována mimořádně velká tažnost a pružnost filamentu. Proto je materiál použit pouze pro součásti, které nejsou nijak extrémně namáhány.



Obrázek 18 Graf závislosti napětí na poměrném prodloužení pro PBT Lankeda

3.2.2 DSC analýza PBT

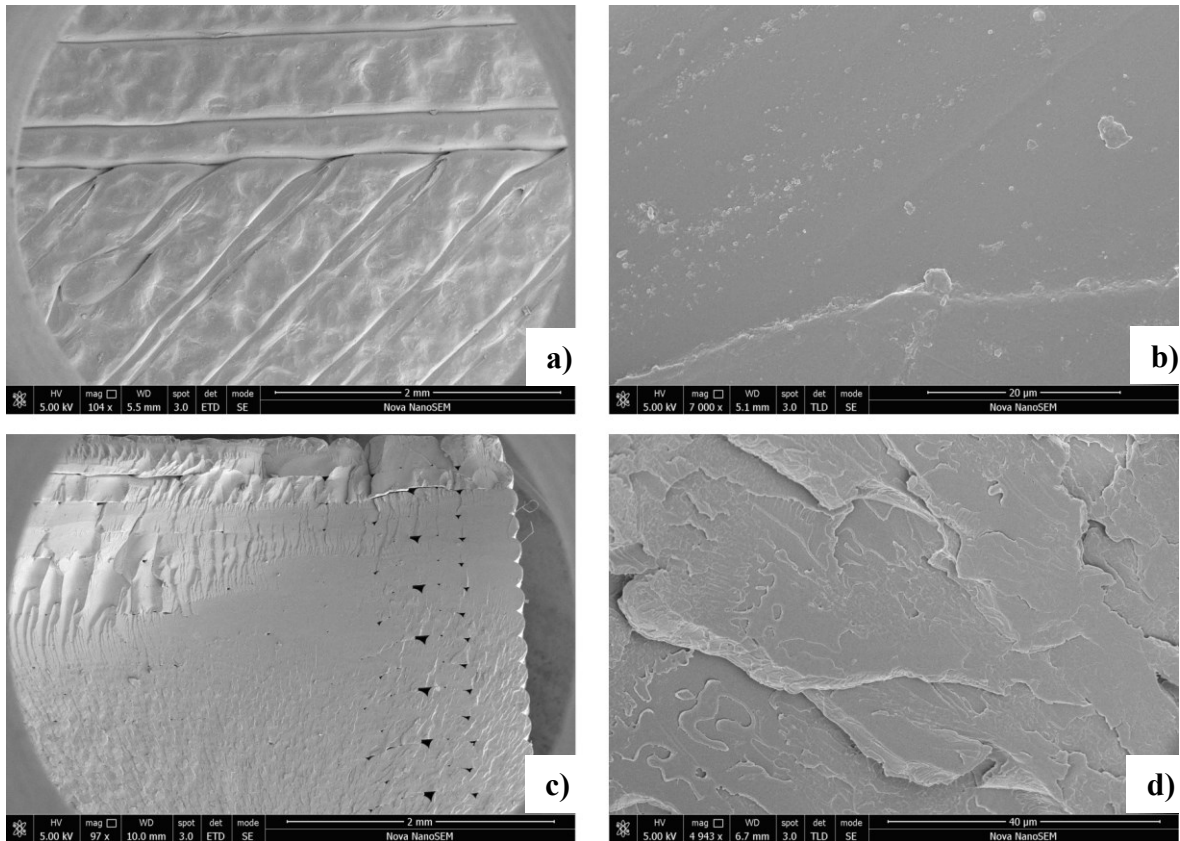
Na kalorimetru Pyris 1 DSC byl analyzován vzorek natural PBT od firmy Lankeda. Výsledkem analýzy je graf zobrazený na Obrázku 19. První peak vznikl při teplotě 85,23 °C a znázorňuje oblast skelného přechodu. Druhý peak na teplotě 175,89 °C znázorňuje oblast tání T_{m1} , přičemž na teplotě 189,31 °C pozorujeme teplotu tání T_{m2} . Více teplot tání se zde nachází, protože jednotlivé složky polymeru – polybutylen a tereftalát nemusí mít totožnou teplotu tání, proto jsou výsledkem DSC analýzy dvě teploty tání. Peak s teplotou 123,9 °C je pak dominantním peakem oblasti krystalizace při ochlazování polymeru.



Obrázek 19 Graf závislosti tepelného toku na teplotě pro PBT Lankeda

3.3 CPE HG100 Fillamentum

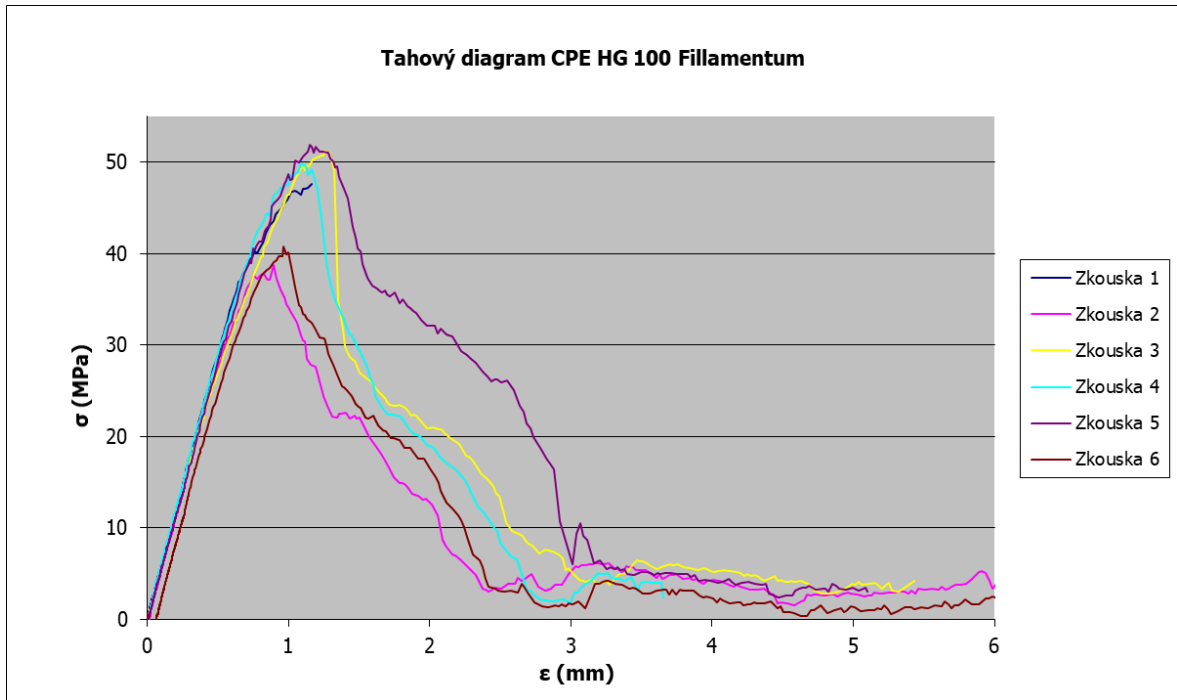
Tento polymer od české firmy Fillamentum měl při doporučené tiskové teplotě příliš nízkou viskozitu. Již při 250 °C docházelo k tzv. over-extruzi. Výtisk vykazoval tvarové nedokonalosti způsobené přílišnou tekutostí materiálu. Proto byla doporučená teplota nastavena jen pro první vrstvu výtisku, aby byla zaručena dokonalá přilnavost k tiskové podložce. Během tisku se teplota snížila na hodnotu 235 °C, kdy měl materiál dostatečně nízkou viskozitu, aby bylo možné jej protlačit tryskou a vrstvit jej. Alternativním řešením by mohlo být snížení průtoku ve sliceru, avšak snížení teploty během tisku s CPE je běžným postupem i ostatních uživatelů tohoto materiálu. Tento materiál byl využit k tisku spojovacích prvků a také rotoru pro jeho vysokou houževnatost a dobrou pevností mezi vrstvami výtisku. Youngův modul CPE HG100 je 1860 MPa a pevnost v tahu činí 48 MPa. Tyto hodnoty udávané výrobcem jsou jen orientační a při mechanických zkouškách na vytištěných testovacích tělíscích hraje roli teplota, při které byl materiál tisknut. Výrobce ku příkladu udává, že tento materiál při zkoušce vrubové houževnatosti nebyl přeražen, nýbrž testovací tělíscika tisknutá při teplotě 235 °C přeražena byla. U tohoto materiálu byly pořízeny SEM snímky povrchu a lomu.



Obrázek 20 SEM – Mikroskopie CPE HG100 Fillamentum: a) Povrch výtisku (měřítko 2 mm); b) Povrch výtisku (měřítko 20 μm); c) Lom (měřítko 2 mm); d) Lom (měřítko 40 μm)

3.3.1 Mechanické zkoušky CPE HG100

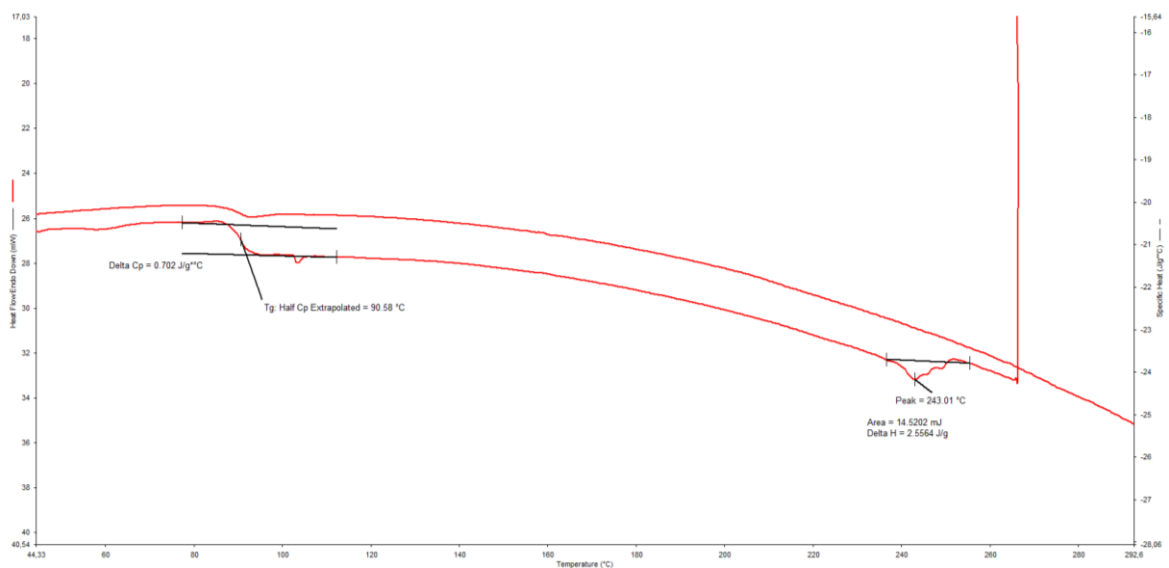
Na zařízení Testometric MT350-5CT bylo provedeno celkem 6 tahových zkoušek dle ISO 179, které jsou vyobrazeny v grafu s označením Obrázek 21. Z naměřených dat, které trhací stroj vyhodnotil bylo zjištěno, že průměrná hodnota maximálního napětí byla 46,7 MPa, průměrná hodnota Youngova modulu byla 828,4 MPa a průměrná tažnost při přetrhu byla 46,6 %. Modul pružnosti tohoto materiálu byl nepatrně menší od modulu pružnosti PLA značky Aurapol, ale vykazoval vyšší tažnost při přetrhu. Bylo tedy usouzeno, že tento materiál je dostatečně pevný a zároveň houževnatý. Proto byl zvolen v aplikaci 3D tisku rotoru, který je při vysokých otáčkách namáhám velkou odstředivou silou.



Obrázek 21 závislosti napětí na poměrném prodloužení pro CPE HG100 Filamentum

3.3.2 DSC analýza CPE HG100

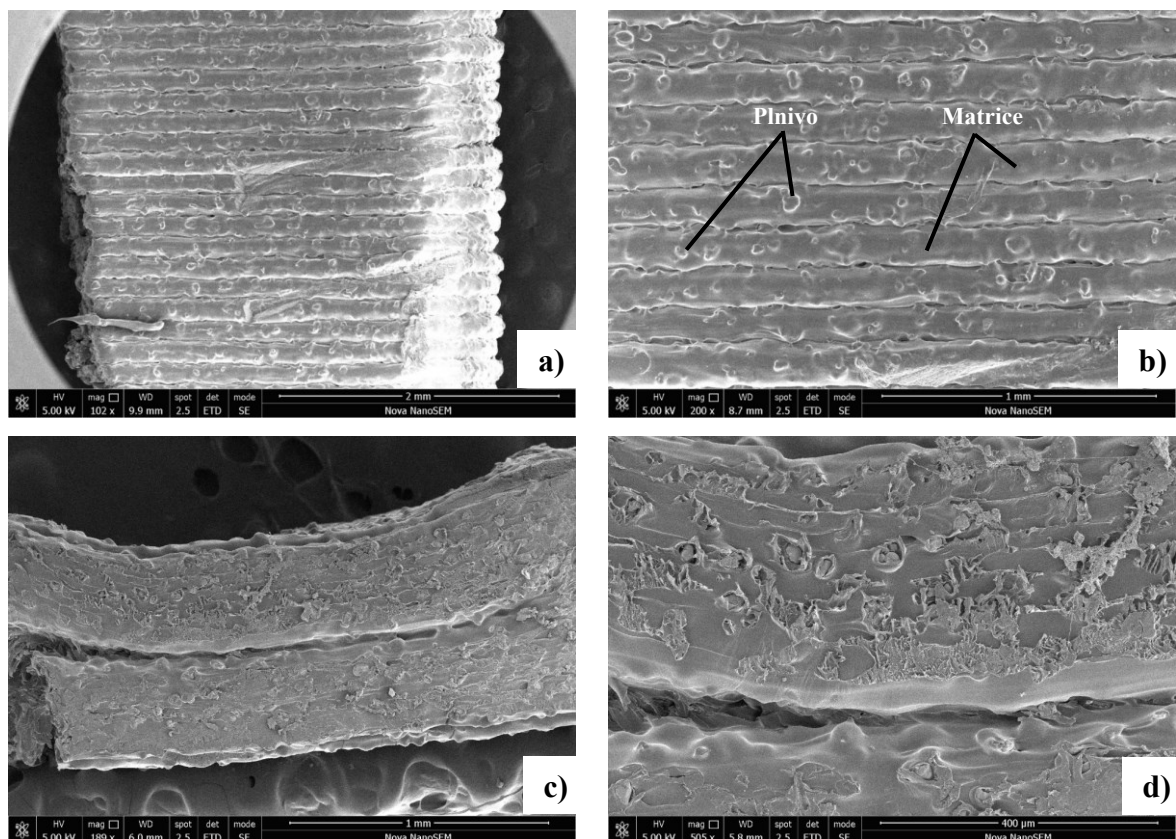
Na kalorimetru Pyris 1 DSC byl analyzován vzorek CPE HG100 od firmy Filamentum. Výsledkem analýzy je graf zobrazený na Obrázku 22. První peak vznikl při teplotě 90,58 °C a znázorňuje oblast skelného přechodu. Druhý peak na teplotě 243,01 °C znázorňuje teplotu tání zkoušeného vzorku.



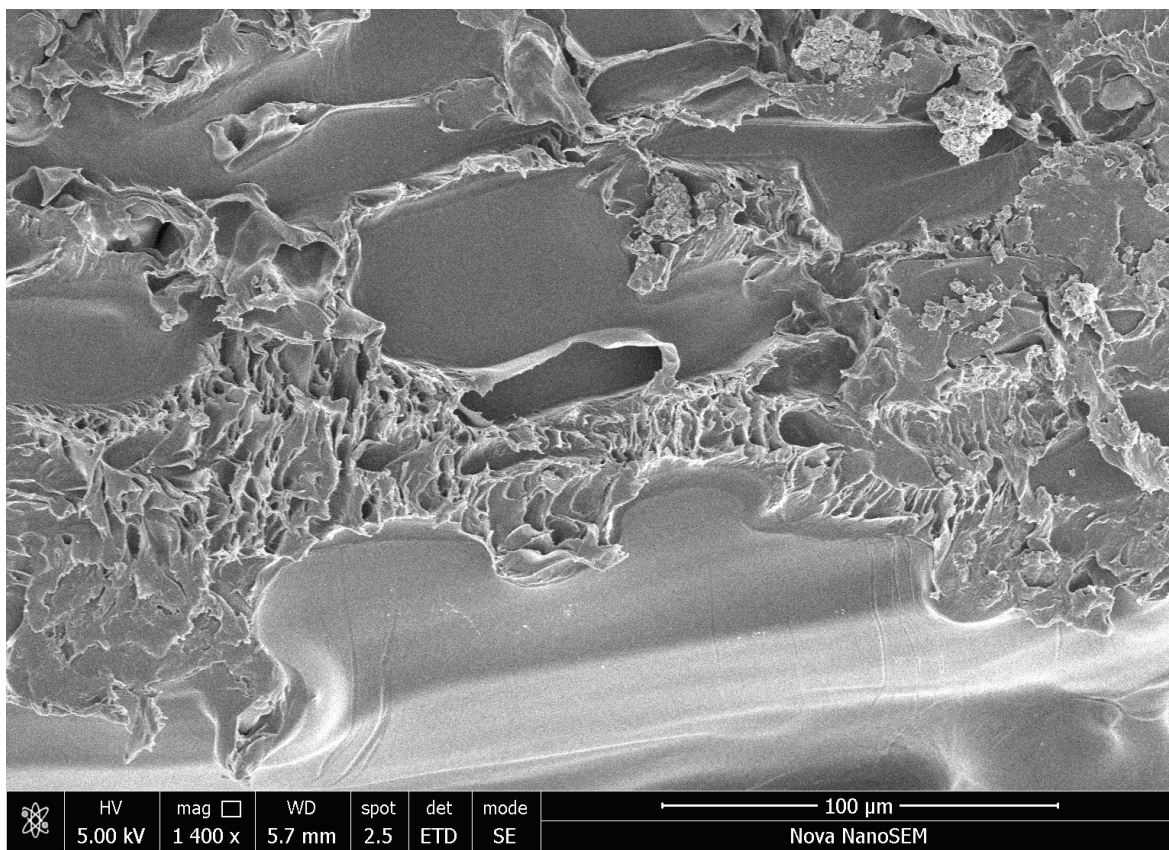
Obrázek 22 Graf závislosti tepelného toku na teplotě pro CPE HG100 Filamentum

3.4 Železem plněné PLA Protopasta

Jedná se o speciální typ PLA od amerického výrobce Protopasta obsahuje železný prach a to až 45 %. Zbýlých 55 % tvoří matrice – PLA. Díky obsahu železa je tento tiskový materiál feromagnetický. Prodejce tento filament charakterizuje jako designový, ale právě díky feromagnetickým vlastnostem byl využit pro 3D tisk některých statorů. Při porovnávání výkonu motorů s konvenčním státorem a se státorem vytisknutým z feromagnetického PLA bylo zjištěno, že výkon motoru je v případě konvenčního statoru mnohonásobně vyšší než u motoru s vytištěným státorem. To je nejspíše způsobeno tím, že použitý filament není plně kovový, nýbrž jen z části. Dalším problémem je příliš nízká tepelná odolnost tohoto filamentu. Již při teplotě nad 60 °C docházelo k deformacím, což není u bezkartáčových elektromotorů přípustné. Při zkoušce tahem bylo zjištěno, že se jedná o velmi křehký materiál s pevností nižší než u materiálu PLA bez přidaných plniv. Průměrná hodnota Youngova modulu je 0,6 GPa, což je zhruba o 0,3 GPa méně, než u PLA vyrobeného z virgin granulátu bez plniv a pigmentů. Jelikož se jedná o materiál s plnivem, byly pořízeny SEM snímky povrchu a lomu na vytištěném tělese z tohoto materiálu.



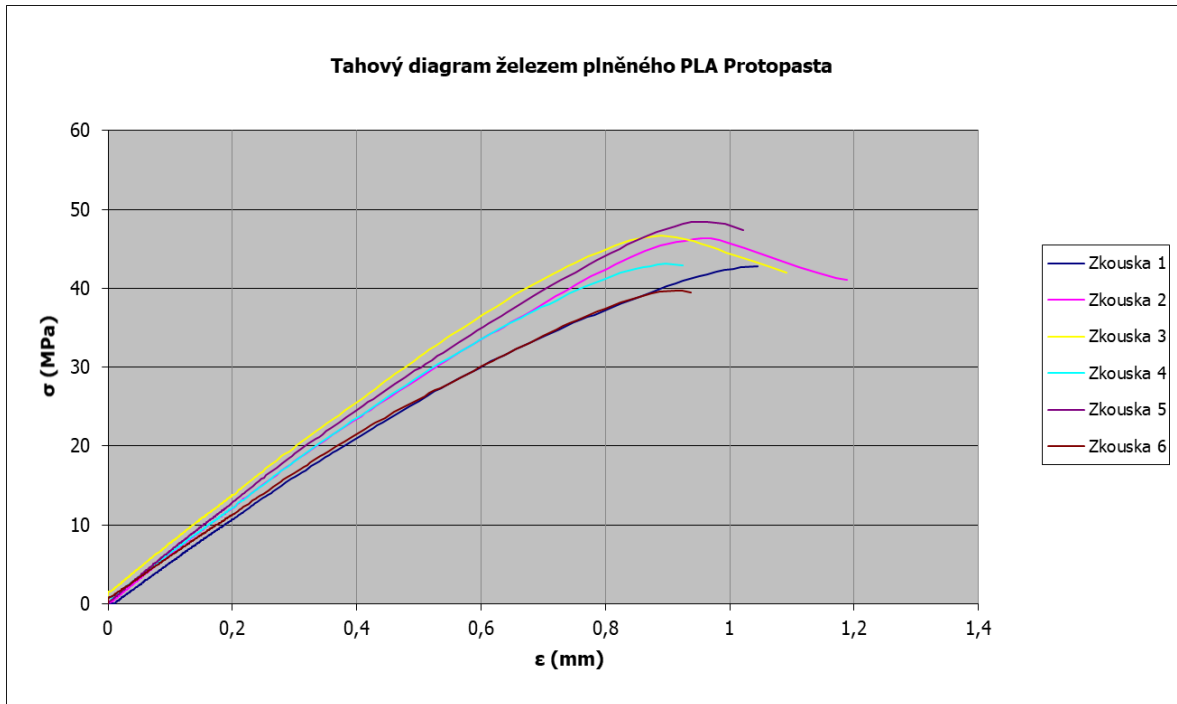
Obrázek 23 SEM – Mikroskopie železem plněného PLA: a) Povrch výtisku (měřítko 2 mm); b) Povrch výtisku (měřítko 1 mm); c) Lom (měřítko 1 mm); d) Lom (měřítko 400 μm)



Obrázek 24 SEM – Mikroskopie lomu železem plněného PLA (měřítko 100 µm)

3.4.1 Mechanické zkoušky železem plněného PLA

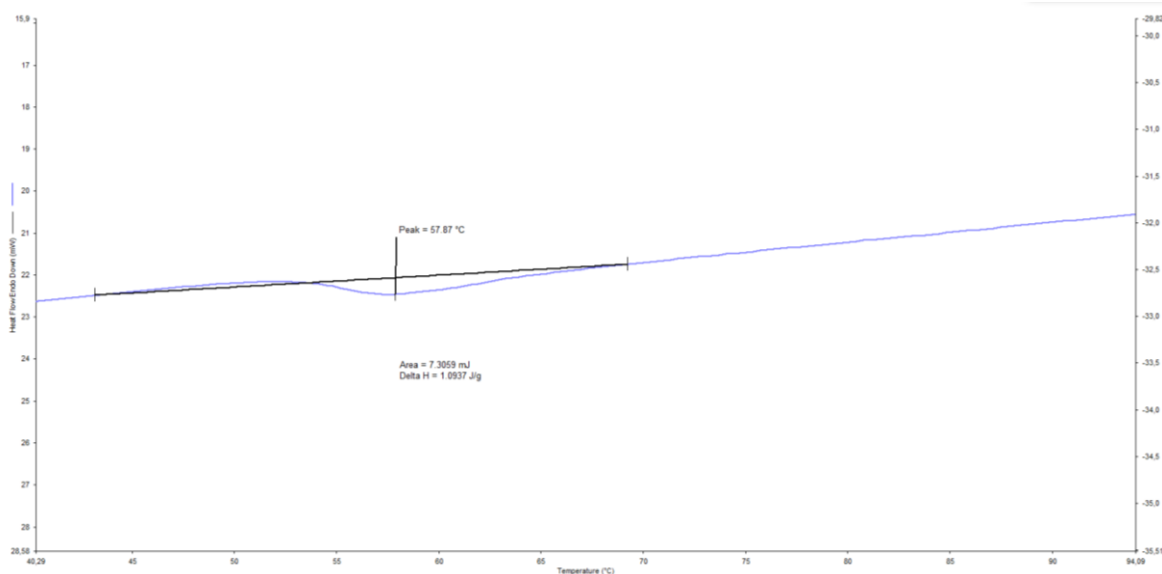
Na zařízení Testometric MT350-5CT bylo provedeno celkem 6 tahových zkoušek dle ISO 179, které jsou vyobrazeny v grafu s označením Obrázek 25. Z naměřených dat, které trhací stroj vyhodnotil bylo zjištěno, že průměrná hodnota maximálního napětí byla 44,5 MPa, průměrná hodnota Youngova modulu byla 601,8 MPa a průměrná tažnost při přetrhu byla 10,3 %. Nízká tažnost činí tento materiál nejkřehčím testovaným materiálem. Tohoto materiálu bylo použito v některých případech statoru, kde nedochází k žádnému mechanickému namáhání, avšak u motoru 3N4P byl jeden z rotorů experimentálně vytištěn z tohoto materiálu. Otáčkoměrem bylo naměřeno přes 15 500 min⁻¹, ale i přesto byl materiál rotoru dostatečně pevný a mechanicky neselhal.



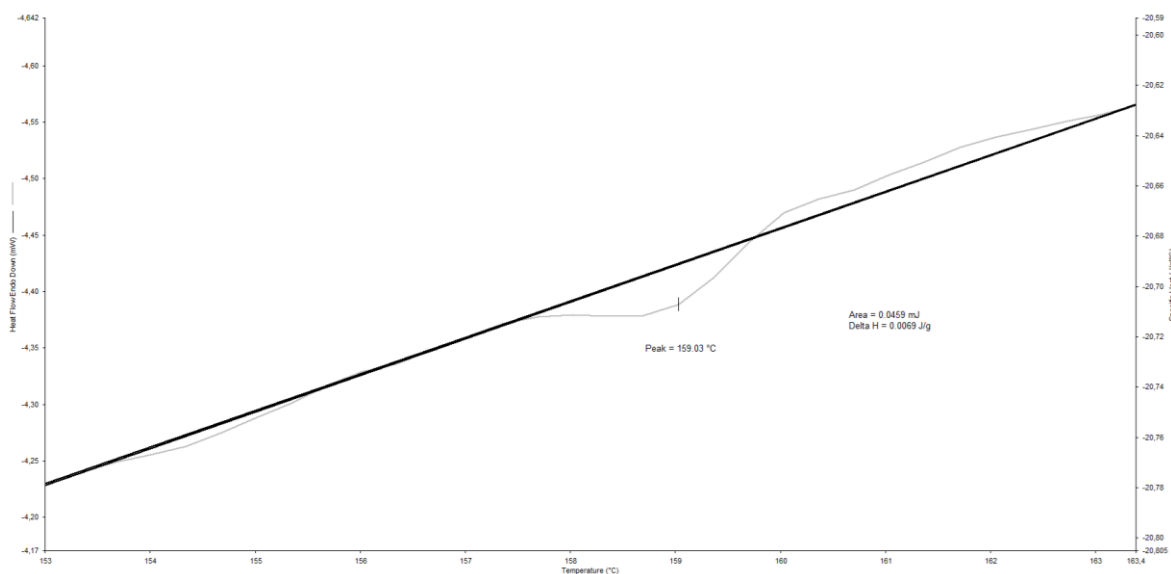
Obrázek 25 Graf závislosti napětí na poměrném prodloužení pro železem plněné PLA Protopasta

3.4.2 DSC analýza železem plněného PLA

Na kalorimetru Pyris 1 DSC byl analyzován vzorek železem plněného PLA od firmy Protopasta. Výsledkem analýzy jsou grafy zobrazené na Obrázku 26 a 27. První peak vznikl při teplotě 57,87 °C a znázorňuje teplotu skelného přechodu. Druhý peak na teplotě 159,03 °C znázorňuje teplotu tání zkoušeného vzorku. I přesto, že je tento materiál plněný železem a jeví se při mechanických zkouškách jako relativně pevný, jeho matrice a plniva jej činí vzorkem s nejnižší teplotou tání ze všech analyzovaných vzorků.



Obrázek 26 Graf závislosti tepelného toku na teplotě pro železem plněné PLA – Oblast teploty skelného přechodu

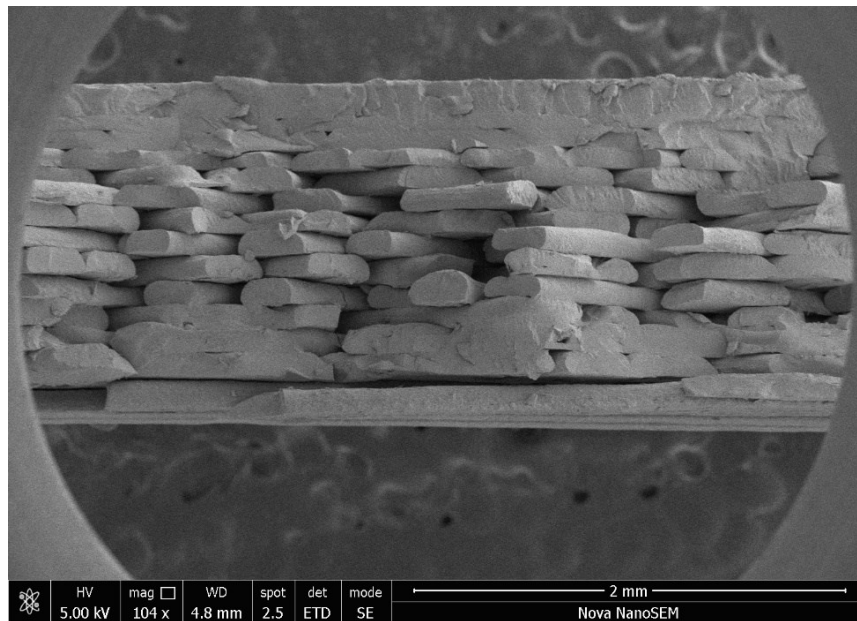


Obrázek 27 Graf závislosti tepelného toku na teplotě pro železem plněné PLA – Oblast teploty tání

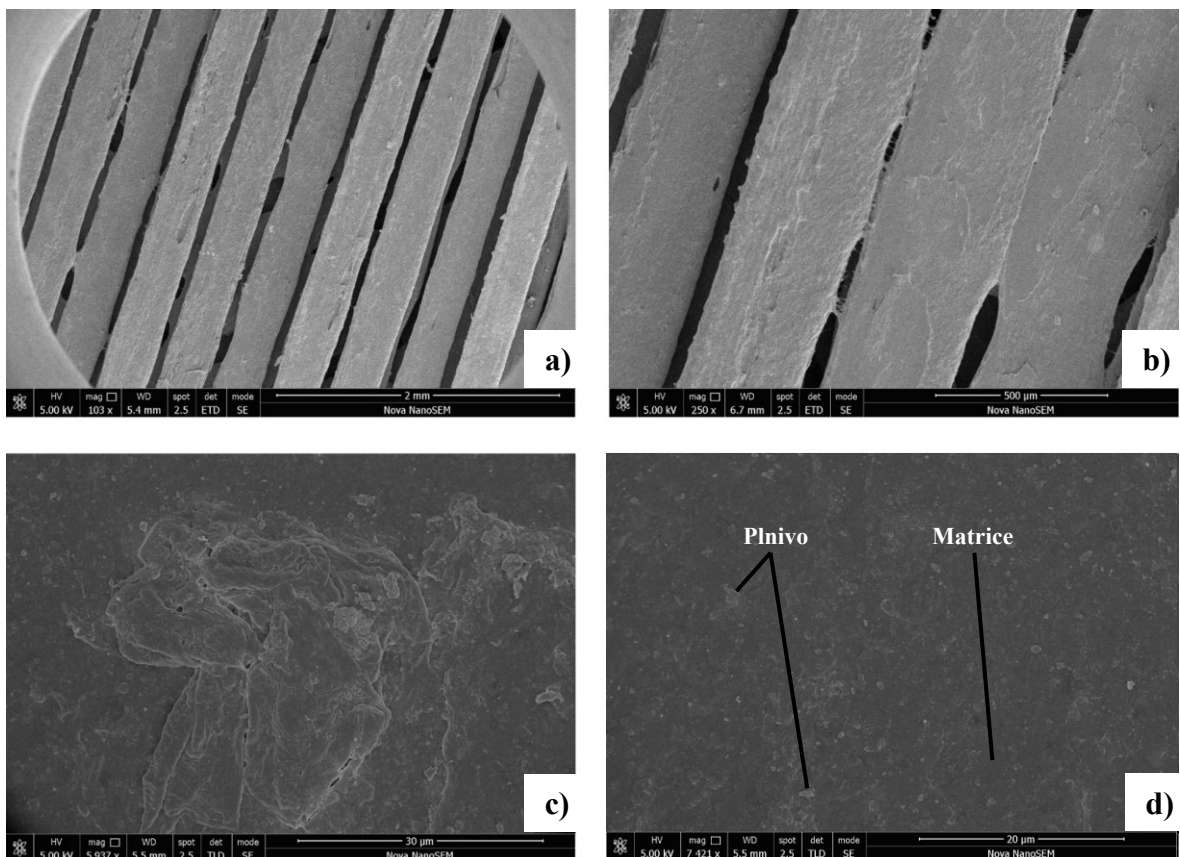
3.5 Uhlíkem plněné ABS Lankeda

Speciální typ vodivého filamentu ABS plněného uhlíkovými sazemi byl použit pouze kvůli jeho vyšší tepelné odolnosti v případě 3D tisku statoru pro motor 3N4P. I přesto, že byl z tohoto důvodu použit, nebylo dosaženo tak vysoké teploty při provozu motoru, aby došlo k jeho měknutí. Bylo také zjištěno, že uhlíková příměs nemá žádný dopad na zlepšení magnetického toku uvnitř motoru. Je to způsobeno tím, že plnivo není feromagnetické, nýbrž

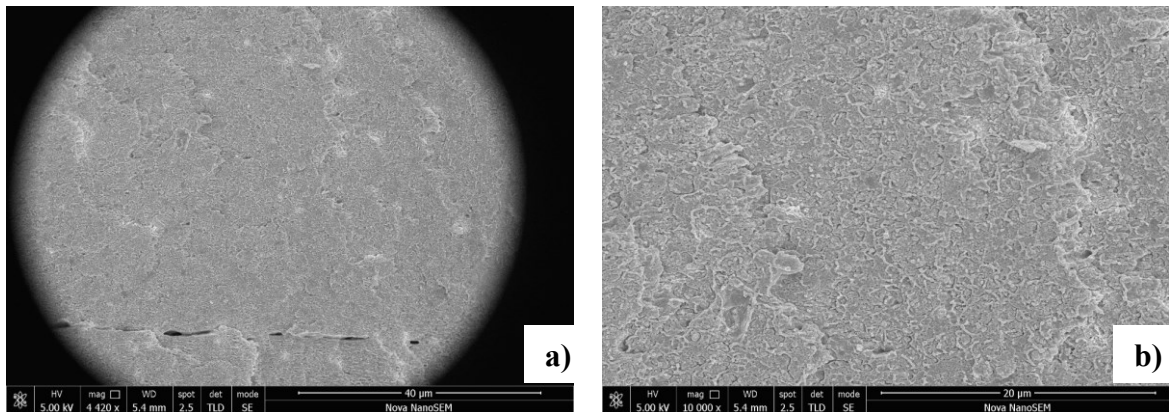
pouze elektricky vodivé. Pro názorné zobrazení uhlíkového plniva v matrici ABS byly pořízeny SEM snímky povrchu a lomu daného materiálu.



Obrázek 28 SEM – Mikroskopie lomu uhlíkem plněného ABS (měřítko 2 mm)



Obrázek 29 SEM – Mikroskopie povrchu výtisku z uhlíkem plněného ABS:
a) Měřítko 2 mm; b) Měřítko 500 μm; c) Měřítko 30 μm; d) Měřítko 20 μm



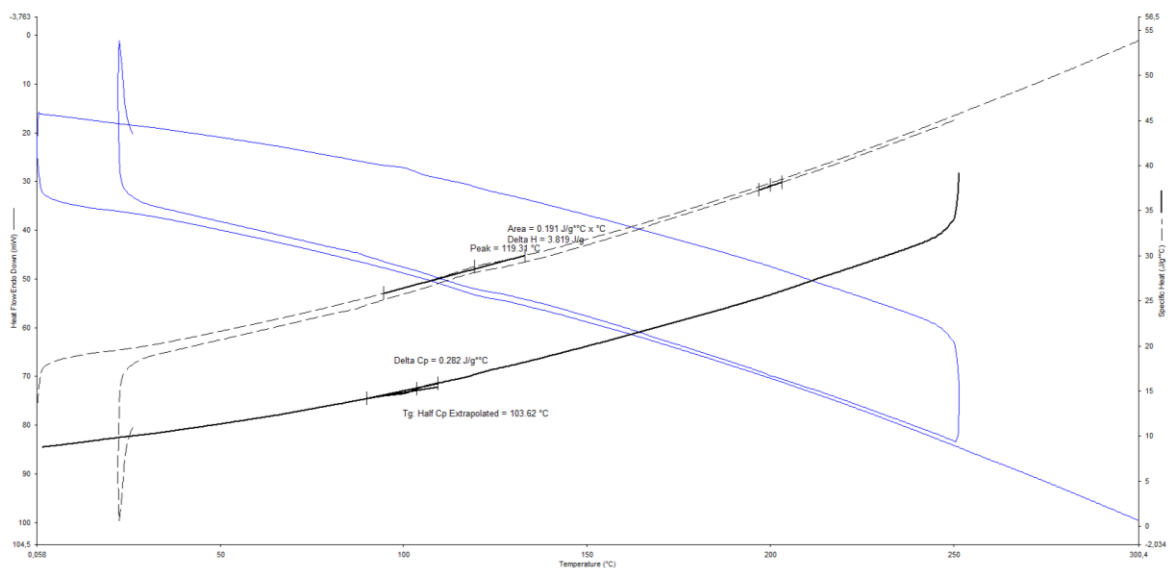
Obrázek 30 SEM – Mikroskopie lomu uhlíkem plněného ABS: a) Měřítko 40 µm;
b) Měřítko 20 µm

3.5.1 Mechanické zkoušky uhlíkem plněného ABS

Pro tento materiál nebyly provedeny mechanické zkoušky z důvodu nevyužití pro mechanicky namáhané součásti a nepřílišné využití při 3D tisku komponent BLDC motorů.

3.5.2 DSC analýza uhlíkem plněného ABS

Na kalorimetru Pyris 1 DSC byl analyzován vzorek uhlíkem plněného ABS od firmy Lankeda. Výsledkem analýzy je graf vyobrazený na Obrázku 31. Přechodová oblast byla analyzována na teplotě 103,62 °C a znázorňuje oblast skelného přechodu.



Obrázek 31 Graf závislosti tepelného toku na teplotě pro uhlíkem plněné ABS Lankeda

4 KOMPLETACE MOTORŮ

Ke kompletaci motorů bylo třeba obstarat si klíčové komponenty, bez kterých by se BLDC motor nemohl obejít. Jsou mezi nimi: měděné dráty, neodymové magnety, hřídele, příslušná ložiska, případně také konvenční stator z vrstvených plechů. Zbývající komponenty, jako je rotor, tělo motoru (uložení pro ložiska) či v některých případech stator, byly nahrazeny výrobou pomocí 3D tisku využívajícího technologii FDM. V případě menších modelů (do \varnothing 40 mm) byla zvolena hřídel s průměrem 2 mm a dvě příslušná ložiska. U modelů motorů nad \varnothing 40 mm bylo použito hřídele o průměru 3 mm. V případě motorů s využitím konvenčních statorů (velikosti 4030 a 6008) byla zvolena hřídel 6 mm, aby se minimalizovalo házení hřídele. Tyto motory, kde je stator konvenční, mají mimořádně vysokou účinnost a výkon. Z tohoto důvodu je nutné zajistit, aby byly takové motory správně vyvážené, ať už z hlediska dimenzování funkčních prvků, tak i z hlediska materiálů použitých k jejich zhotovení.

4.1 Vinutí

K navíjení bylo použito výhradně měděných drátů pro jejich výbornou elektrickou a tepelnou vodivost a nízký elektrický odpor. Aby nedocházelo ke zkratu mezi jednotlivými závitů, bylo nutno obstarat lakem izolované měděné dráty. U prvních modelů motorů se třemi cívkami statoru bylo vinutí provedeno experimentálně tak, aby byly sloty cívek co nejvíce zaplněny měděným drátem. Pokud by byly cívky navinuty příliš řídko, mohlo by docházet k nežádoucímu přehřívání vinutí a motor by nemusel být schopen provozu. Cena, za kterou byly měděné dráty pro navíjení zakoupeny byla 550 Kč/kg. Bylo použito drátů o průměru 0,15 mm, 0,2 mm, 0,6 mm a 0,7 mm. Statory motorů byly navíjeny ručně dle příslušných schémat z univerzálního generátoru schémat pro navíjení BLDC motorů. [88]

Počet magnetů a závitů vinutí byl volen s ohledem na konstrukční proveditelnost, ale především dle doporučení výrobce statorů. Vinutí bylo u motorů s nekonvenčním státorem zakončováno do hvězdy spájením konců drátů 1., 2. a 3. fáze. U motorů s konvenčním státorem bylo vinutí zakončeno do trojúhelníka, a to spájením vývodů: začátku 1. fáze s koncem 3. fáze; začátku 2. fáze s koncem 1. fáze; začátku 3. fáze s koncem 2. fáze.

5 KOMPONENTY BLDC MOTORŮ A 3D TISK

Některé komponenty bezkartáčových DC motorů mohou být nahrazeny lehčími, levnějšími a snáze vyrobitelnými komponenty. Je ale nutné brát v potaz, že některé z komponent jsou 3D tiskem obtížně vyrobitelné. Ku příkladu ložiska je lepší zachovat konvenční (3D tisk kuliček či válečků je náročný kvůli nepřesnostem a vytisknutá pouzdra pro ně by se opotřebila mnohem rychleji, než pouzdra z tvrzené oceli). Ze stejného důvodu je lepší použít ocelovou, popř. titanovou hřídel.

Dalšími dvěma 3D tiskem nenahraditelnými komponentami BLDC motorů jsou magnety a vinutí. Magnety v těchto motorech jsou nejčastěji z neodymové slitiny (NdFeB) či samarium-kobaltu (SmCo). Neodymové magnety jsou schopny unést až tisícinásobek své hmotnosti, zatímco samarium-kobaltové magnety jsou odolné vysokým teplotám, až do 350 °C. Některé neodymové magnety mohou ztratit svůj magnetismus již po překročení 80 °C.

Co se týče vinutí, nejčastěji je použito měděných drátů s lakovaným či smaltovaným povrchem, aby byly izolovány. Existuje již filament, který obsahuje částičky mědi a je schopen vést elektrický proud, avšak tak nízký proud, že by nebylo možné jej použít jako náhradu měděných drátů. Také by byl nejspíše problém s izolací takového vinutí.

Z komponent, které nahradit 3D tiskem lze jsou např.: rotor, stator a tělo motoru (osazení pro stator a ložiska). Během praktického experimentování bylo zjištěno, že stator také není ideální součástí BLDC motoru, kterou je dobré nahrazovat 3D tiskem, ale je to možné. Statory motorů jsou totiž obvykle lepené z vrstvených plechů z křemíkové oceli kvůli co nejlepší účinnosti a snížení negativních účinků vířivých proudů. Původní nápad pro toto téma bakalářské práce byl takový, že stator by mohlo být možné zhotovit pomocí 3D tisku, protože také dochází k vrstvení filamentu. I přesto, že byl použit železem plněný filament PLA značky Proto-Pasta, nebylo možné docílit takového výkonu, jako u konvenčně vyrobeného statoru. Výkon motoru se statorem nahrazeným 3D tiskem, byl cca 25x nižší než u původního statoru. Pokud se takový motor po určité době zatíží, může vlivem teploty dojít k nevratné deformaci jeho statoru.

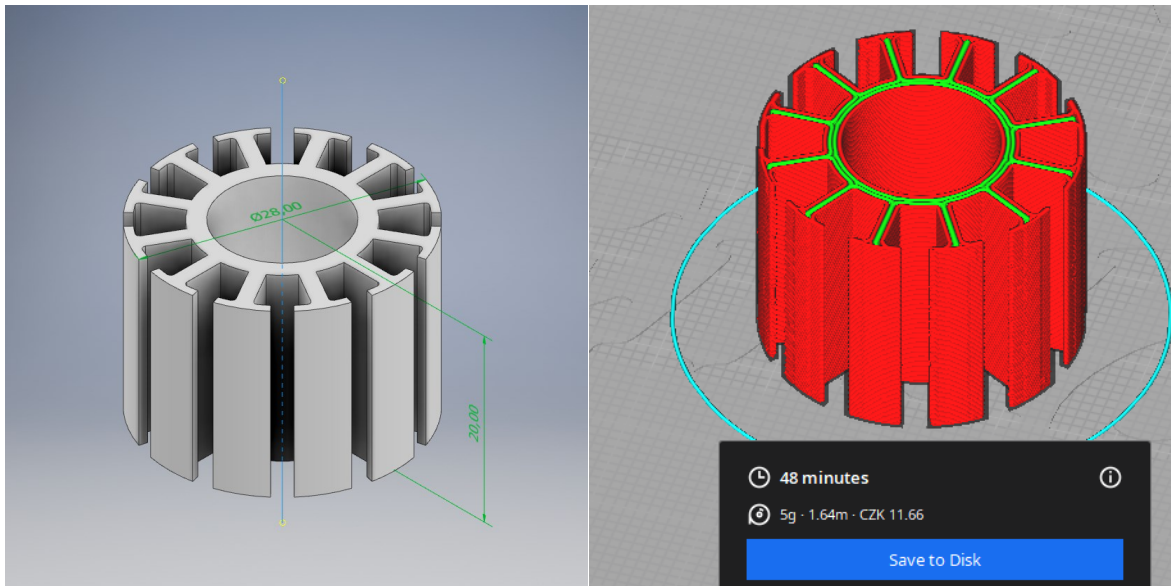
5.1 Stator konvenčního motoru 3542 (2820)

Stator tohoto modelu je originálně lepený z plechů transformátorové oceli tloušťky 0,35 mm. Během provozu motoru se průchodem elektrického proudu generují ve statoru vířivé proudy, které jsou nežádoucí. Zmíněné proudy snižují účinnost a zvyšují hlučnost a zahřívání motoru. Stator tohoto motoru s označením vnější velikosti 3542 má rozměry $\text{Ø}28 \times 20 \text{ mm}$ a obsahuje čtrnáct slotů pro vinutí. Konfigurace čtrnácti slotů a dvanácti magnetů je velmi obvyklá v bezkartáčových elektromotorech používaných pro pohon RC modelů.



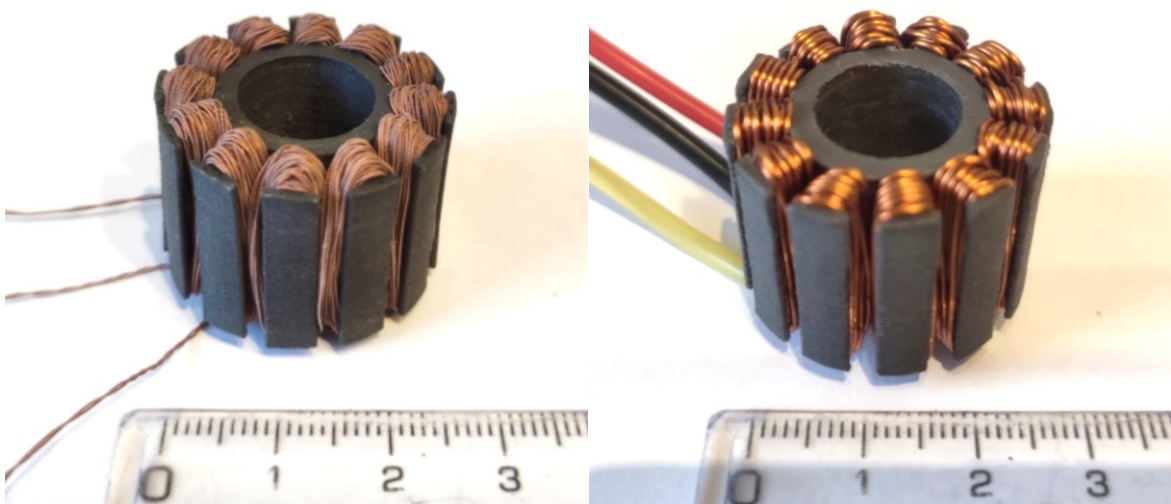
Obrázek 32 Konvenční motor 3542 (2820)

Tento stator nebylo náročné odměřit, vymodelovat v programu Inventor a následně vytisknout. Byl zvolen materiál PLA plněný železnými částicemi pro zaručení feromagnetismu. Již před tiskem se dalo pomocí magnetu ověřit, že je filament feromagnetický. Pokud by byl zvolen jiný materiál bez feromagnetického plniva, měla by být účinnost vinutí teoreticky nižší. Jelikož je momentálně toto Iron-PLA jediným FDM filamentem s feromagnetickými částicemi, který je dostupný na trhu, byl zvolen k nahrazení statoru pomocí 3D tisku. Pokud by bylo dostupné na trhu například ABS s totožným plnivem, bylo by lepší zvolit takový materiál kvůli lepší teplotní odolnosti.



Obrázek 33 Stator 2820 v programu Autodesk Inventor (vlevo); Stator 2820 ve sliceru Ultimaker Cura s přesnou kalkulací ceny, spotřeby filamentu a dobou tisku při výšce vrstvy 0,2 mm (vpravo)

Po vytištění a zvážení statoru bylo zjištěno, že výtisk je téměř o 30 g lehčí než konvenční stator. Vytištěný stator 2820 byl navinut jediným měděným drátem s 12 závitů na cívku a vinutí bylo ukončeno do konfigurace hvězda. Druhá varianta byla navinuta taktéž jediným drátem, ale v jednom slotu bylo 60 závitů takovým drátem. Vinutí bylo ale v tomto případě ukončeno do trojúhelníka. První stator tedy obsahuje celkem 144 závitů a druhý 720.



Obrázek 34 Jemné vinutí do trojúhelníka (vlevo); Hrubé vinutí do hvězdy (vpravo)

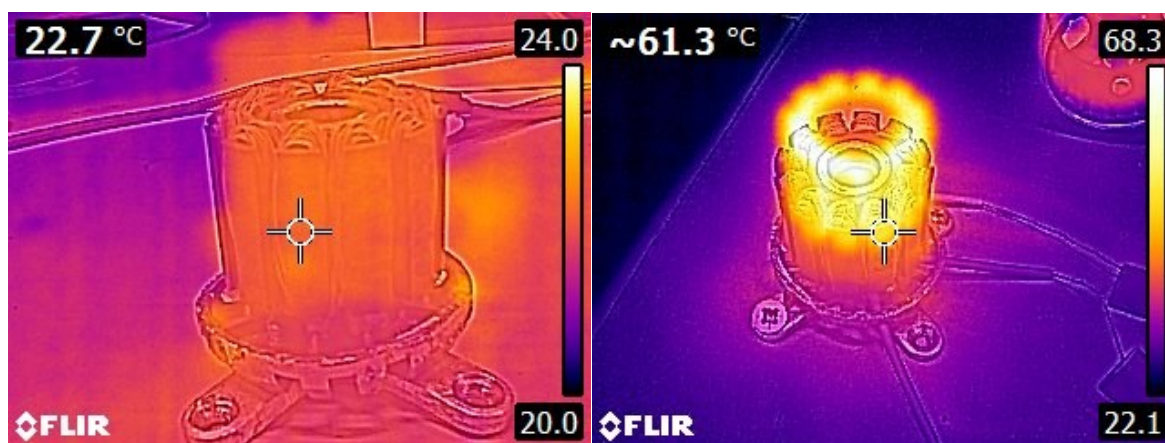
Motor byl testován pomocí laboratorního zdroje, na kterém bylo napětí nastaveno v rozsahu od 7,4 V do 14,8 V, což je napětí odpovídající dvou až čtyř článkové Li-pol baterii. Při provozu motoru s vytištěným statorem nedocházelo k přílišnému zahřívání vinutí, ale po aplikaci zátěže v podobě vrtule se motor po několika minutách zahřál na nepříjemnou teplotu, což vedlo k deformaci statoru a následnému zadření motoru, a to v obou případech kdy v prvním bylo užito statoru s vinutím najemno a ve druhém nahrubo.

5.1.1 Průběh teploty statoru s jemným vinutím

Stator s jemným vinutím a 60 závitů na cívku dosahoval při zátěži výkonu 15,1 W. Vypočítaná hodnota otáček na volt je zhruba 670 KV. Stator vytisknutý z feromagnetického PLA nápor zátěže nevydržel a působením teploty se zdeformoval.

Tabulka 1 Časový průběh provozu motoru se statorem s jemným vinutím

t [min]	U [V]	n [min ⁻¹]	T [°C]	P [W]	Poznámka
0	12,6	8445	23,5	2,3	Motor naprázdno
3	12,6	8445	27,6	2,3	Mírný nárůst teploty
6	12,6	4144	33,6	12,6	Aplikace zátěže
9	14,8	9996	29,7	2,8	Zvýšení napětí
12	14,8	7365	35,1	10	Pokles otáček vlivem teploty
15	14,8	2284	61,3	15,1	Překročení T_g materiálu – zadření motoru



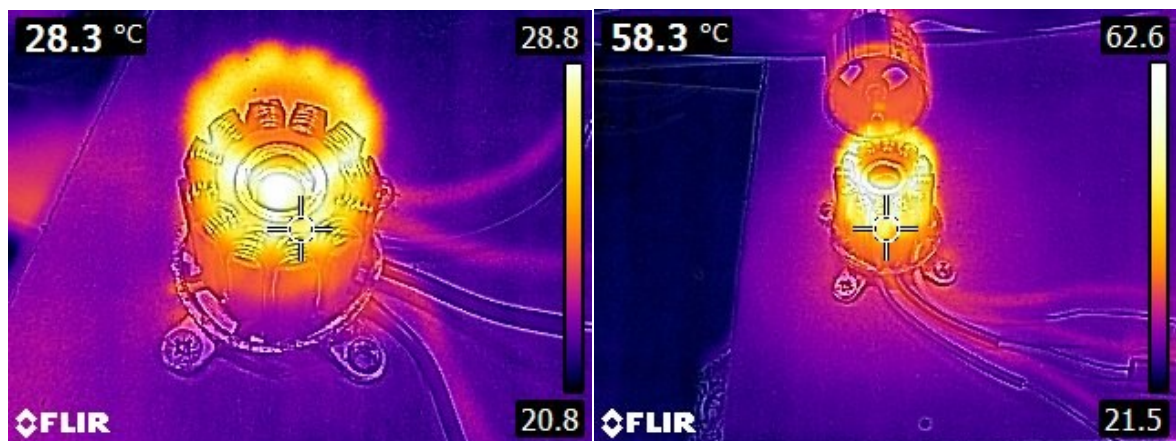
Obrázek 35 Snímky statoru s jemným vinutím z termokamery Flir – Před uvedením do provozu (vlevo); Po 15 minutách provozu (vpravo)

5.1.2 Průběh teploty statoru s hrubým vinutím

Stator s hrubým vinutím a 12 závitů na cívku dosahoval při zátěži výkonu 14,5 W. Vypočítaná hodnota otáček na volt je zhruba 1350 KV. Stator vytisknutý z feromagnetického PLA nápor zátěže nevydržel a působením teploty se zdeformoval. Proto by bylo obtížné najít pro tištěný stator z tohoto materiálu uplatnění v praxi. Muselo by se jednat o aplikaci s nízkou aplikací zátěže na motor nebo s dostatečným chlazením statoru.

Tabulka 2 Časový průběh provozu motoru se státorem s hrubým vinutím

t [min]	U [V]	n [min ⁻¹]	T [°C]	P [W]	Poznámka
0	7,4	7736	28,3	3,6	Motor naprázdno
3	7,4	6529	34,5	10,2	Pokles otáček vlivem zahřívání
6	12,6	17676	34,8	14,5	Zvýšení napětí
9	11,1	14772	36,7	10,7	Motor naprázdno
12	11,1	4258	58,3	12,2	Překročení T_g materiálu – zadření motoru

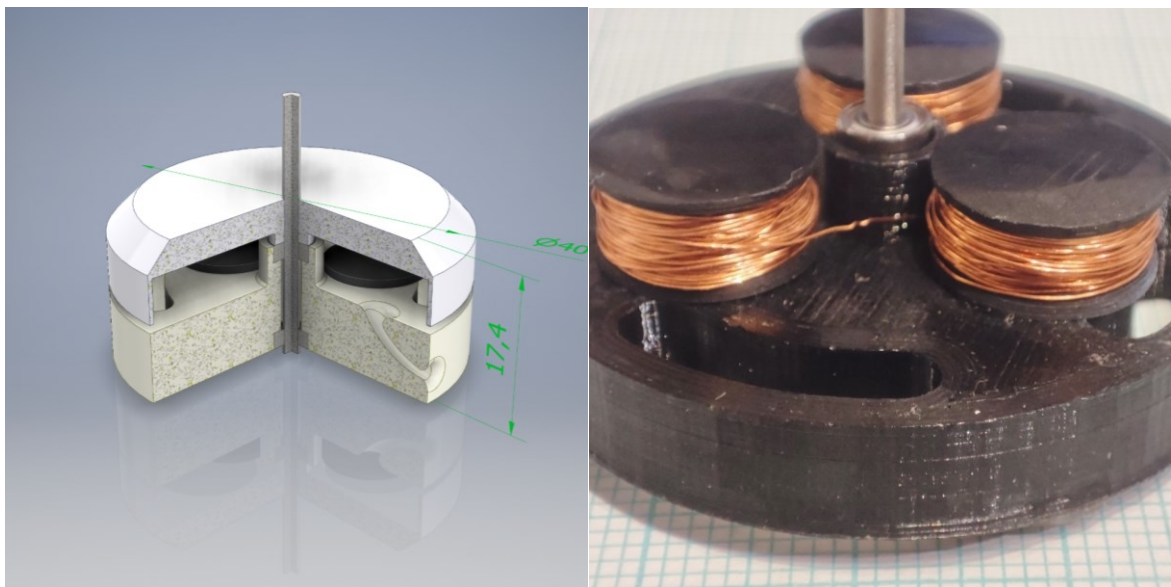


Obrázek 36 Snímky statoru s hrubým vinutím z termokamery Flir – Během provozu na 7,4 V naprázdno (vlevo); Po 12 minutách provozu (vpravo)

5.2 Axiální motor 3N4P

Jedná se o model motoru zhotovený z větší části 3D tiskem. Pomocí 3D tisku je nahrazeno tělo (uložení ložisek), stator i rotor. Z označení vyplývá, že motor má pouze 3 cívky a 4 magnety. Plně vytisknuté motory byly přednostně s konfigurací vinutí do hvězdy, aby bylo dosaženo většího kroutícího momentu. I přesto, že bylo zvoleno vinutí do hvězdy, nebyl kroutící moment z počátku natolik velký, aby roztočil rotor svépomocí. Tento nedostatek kroutícího momentu je nejspíše způsoben příliš malým počtem cívek a kvůli neferomagnetickému statoru. Tělo motoru je zhotoveno z PLA, jelikož slouží pouze k uložení ložisek a cívek statoru. Není tedy nijak kriticky mechanicky, ani tepelně

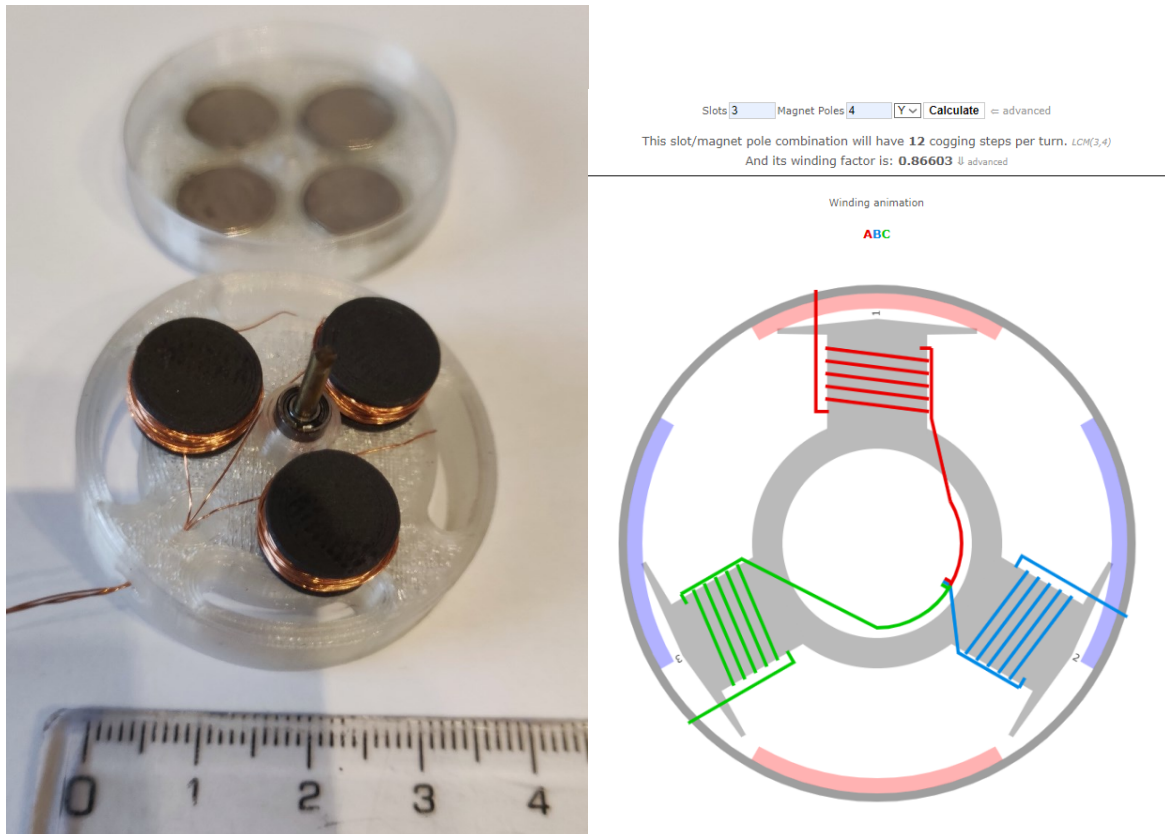
namáháno. Materiál statoru je vytisknutý z ABS značky Lankeda s uhlíkovým plnivem. Tento materiál byl zvolen kvůli své vyšší tepelné odolnosti na rozdíl od PLA. Jelikož jeho plnivo není feromagnetické, jako materiál statoru takhle nijak nepřispívá k zvýšení účinku magnetického pole. Při provozu motoru bylo zjištěno, že se vinutí téměř nezahřívá. Z tohoto důvodu byl později zhotoven totožný motor se statorem z PLA se železným plnivem.



Obrázek 37 Řez 3D modelem motoru 3N4P (vlevo); Detailní pohled na stator motoru 3N4P (vpravo)

5.2.1 Varianta s magnety Ø12 x 2 mm

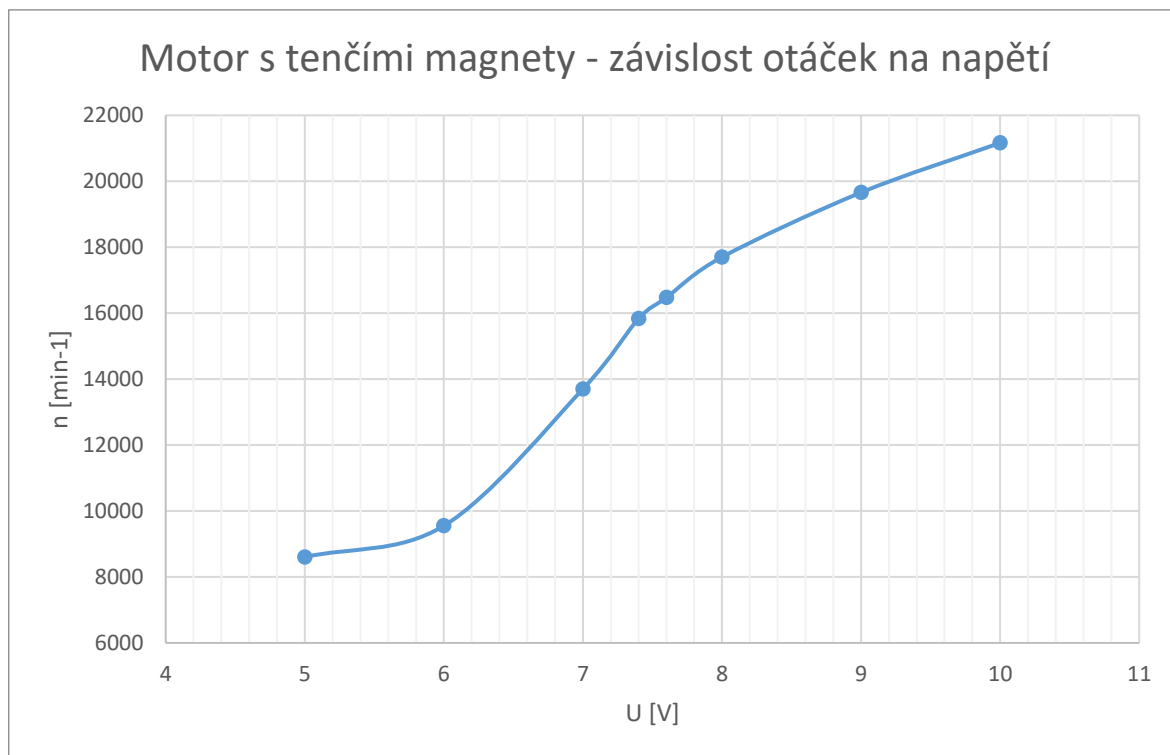
První provozuschopný motor s konfigurací 3N4P měl rotor osazený magnety Ø12 x 2 mm. Orientační přídržná síla magnetů je 15,7 N. Tyto magnety mají dostatečně velkou sílu pro udržení motoru v chodu. Při výrobě motoru bylo nutné dbát na souosost a těsnost děr pro ložiska a pro hřídel, aby nedocházelo k házení při provozu. Házení rotoru by mohlo při vysokých otáčkách způsobit nežádoucí vibrace a vést tak k poškození uložení ložisek či rotoru. Stator byl navinut 200 závitů na cívku, motor tak obsahuje celkem 600 závitů drátu 0,2 mm. Vinutí bylo ukončeno do hvězdy, ale i přesto nebyl motor schopen samovolné rotace. Design statoru obsahuje prvek, který by nebylo možné vyrobit nijak jinak než 3D tiskem. Tento prvek je oblouková díra pro vývody kontaktních vodičů. Graf na obrázku 40 znázorňuje nelineární vzrůst otáček v závislosti na napětí. Mírný pokles křivky v bodě 7,5 V je nejspíše způsoben zahříváním vodičů, které vede ke snížení účinnosti motoru. Maximální naměřená hodnota otáček byla 21 164 min⁻¹.



Obrázek 38 Motor 3N4P rozložený na rotor a stator (vlevo); Schéma zapojení vinutí motorů 3N4P (vpravo) [88]

Tabulka 3 Časový průběh provozu motoru 3N4P s magnety $\varnothing 12 \times 2$ mm

t [min]	U [V]	n [min^{-1}]	P [W]	I [mA]	KV
0	5	8603	0,6	120	1720,6
2	6	9552	0,7	116,7	1592
4	7	13703	0,9	128,6	1957,6
6	7,4	15834	0,9	121,6	2139,7
8	7,6	16474	1	132,8	2226,2
10	8	17701	1,7	212,5	2212,6
12	9	19660	1,6	177,8	2184,4
14	10	21164	1,8	180	2116,4
Průměr					2018,6875



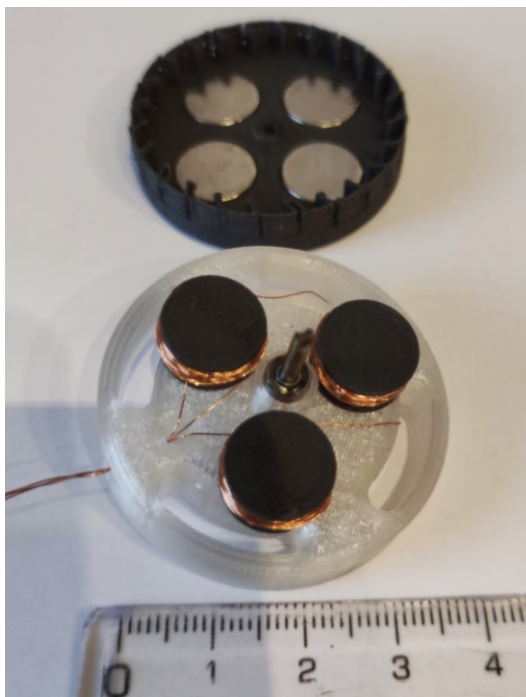
Obrázek 39 Graf závislosti otáček na napětí pro motor 3N4P s tenčími magnety

5.2.2 Varianta s magnety Ø12 x 4 mm

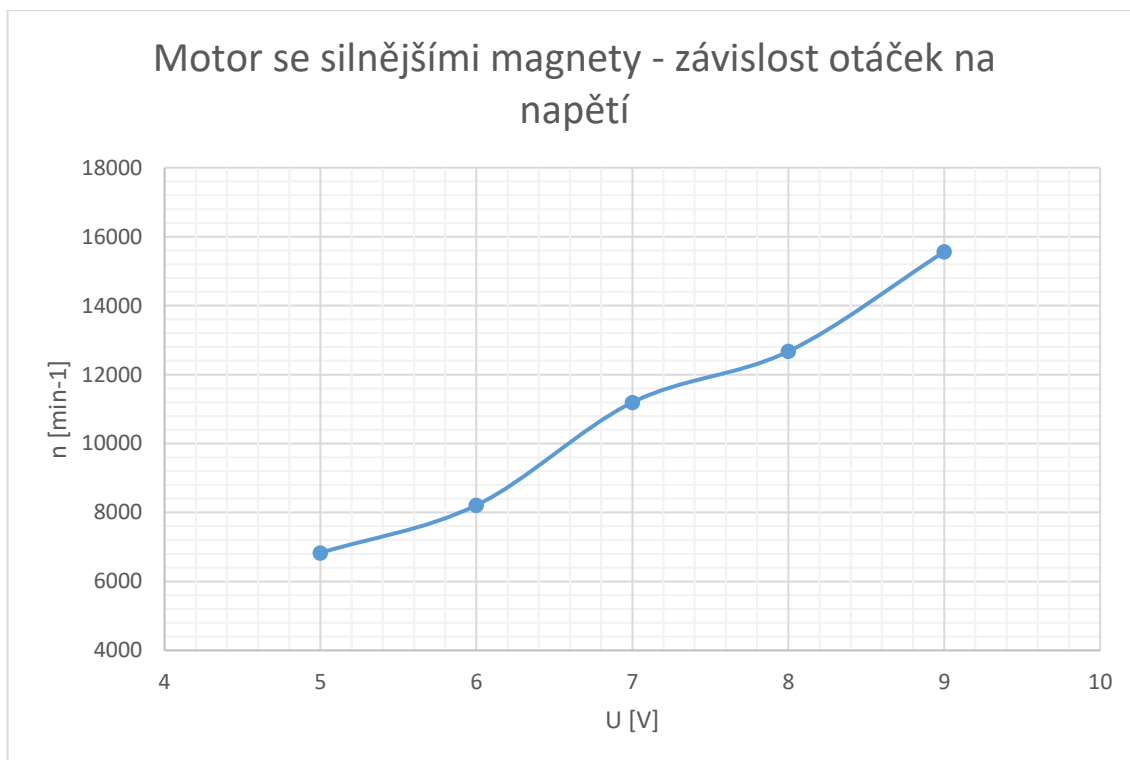
V této verzi bylo použito stejného statoru a vinutí. Byl optimalizován design rotoru pro lepší chlazení vinutí – byly vymodelovány lopatky jakožto součást rotoru. Rotor byl vytisknut z feromagnetického PLA pro zvýšení efektivity magnetů. Byly použity neodymové magnety o průměru 12 mm a výšce 4 mm, což při provozu motoru vedlo k nestabilnímu chodu a motor bylo obtížné udržet při konstantních otáčkách. Jednotlivý magnet má orientační přídržnou sílu 27,5 N, což je pravděpodobně příliš velká síla pro aplikaci v tak malém motoru. Z naměřených hodnot byla spočítána hodnota KV, která byla o cca 500 nižší než u motoru s magnety Ø12 x 2 mm. Tento fakt potvrzuje to, že magnety o tloušťce 4 mm jsou pro tento typ motoru příliš silné.

Tabulka 4 Časový průběh provozu motoru 3N4P s magnety Ø12 x 4 mm

t [min]	U [V]	n [min ⁻¹]	P [W]	I [mA]	KV
0	5	6828	0,6	120,0	1365,6
3	6	8210	0,7	116,7	1368,3
6	7	11192	1	142,9	1598,9
9	8	12670	1,6	200,0	1583,8
12	9	15561	2,1	233,3	1729,0
Průměr					1529,1



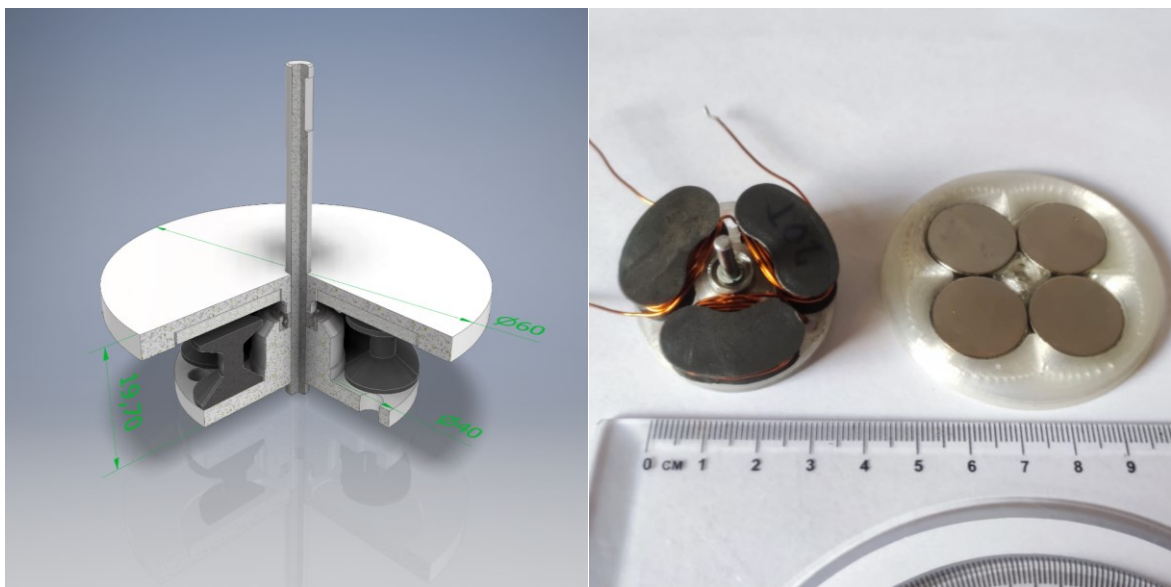
Obrázek 40 Rozložený motor 3N4P s rotorem ze železem plněného PLA a s magnety
 $\text{Ø}12 \times 4 \text{ mm}$



Obrázek 41 Graf závislosti otáček na napětí pro motor 3N4P se silnějšími magnety

5.2.3 Varianta s magnety $\varnothing 20 \times 2$ mm

Poslední zhotovenou variantou motoru s konfigurací 3N4P je diskový (axiální) motor s magnety $\varnothing 20 \times 2$ mm a statorom ve tvaru oblé drážky. Stator se jako předchozího motoru skládá ze tří částí, které jsou zhotoveny pomocí 3D tisku z materiálu PLA s železným plnivem. Motor je navinut „nahrubo“ čímž je myšleno, že vinutí je z jednoho tlustého drátu, který učinil tento motor velmi vysokootáčkovým. Každá z cívek statoru obsahuje 20 závitů měděného drátu tloušťky 0,7 mm. Při uvedení motoru do chodu je třeba počáteční roztočení, jelikož má motor příliš málo pólů a cívek. Proto motor nemá dostatek kroučícího momentu k samovolnému roztočení, ale jakmile mu externí silou něco pomůže k rotaci, v mžiku dosáhne velmi vysokých otáček. Rozjezd motoru není plynulý, protože jak již bylo řečeno, malý počet pólů a závitů vinutí činí motor nevyváženým z hlediska otáček ku kroučícímu momentu. Problematika tohoto motoru by se dala jednoduše vyřešit „zjemněním“ vinutí, tj. více závitů s tenčím drátem nebo navýšením pólů cívek a magnetů. To by ale vyžadovalo větší rozměr motoru a zároveň vyšší výrobní náklady.

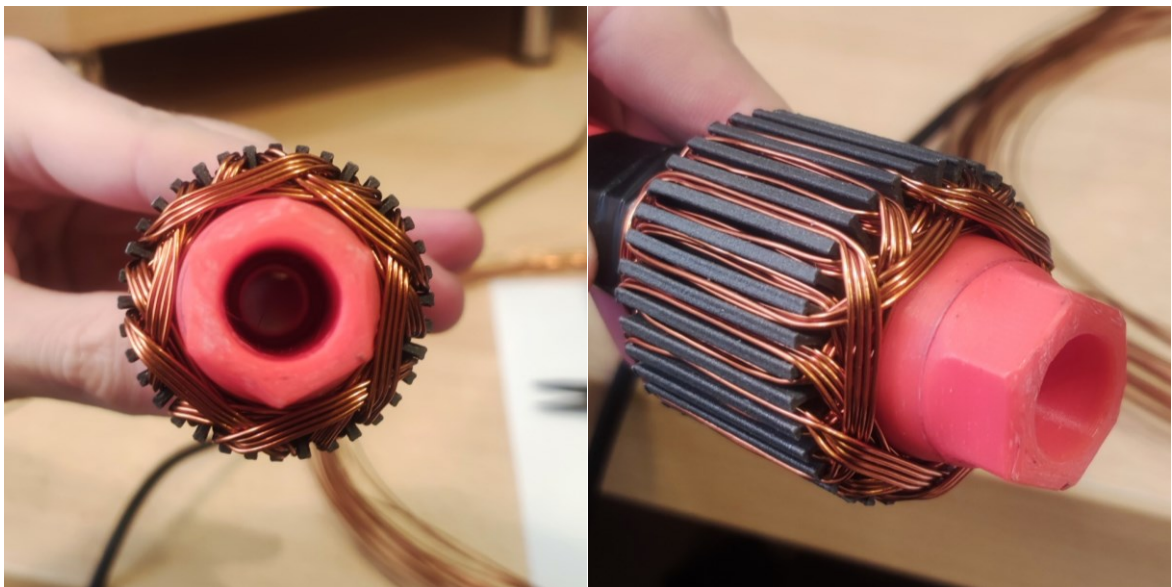


Obrázek 42 Řez 3D modelem motoru 3N4P s magnety $\varnothing 20 \times 2$ mm (vlevo); Stator a rotor motoru 3N4P s magnety $\varnothing 20 \times 2$ mm (vpravo)

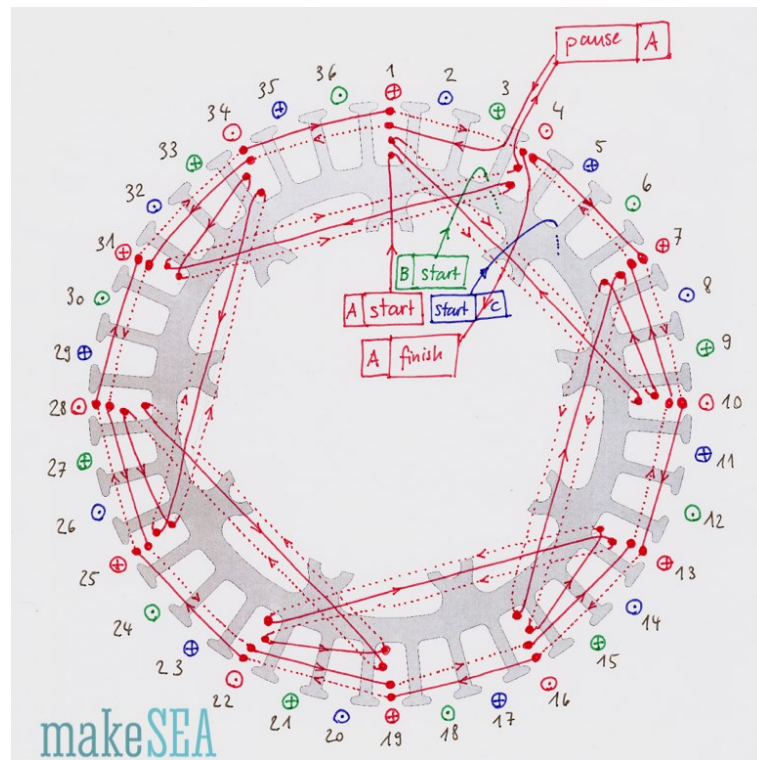
5.3 Radiální motor dle Laimera [87]

Model bezkartáčového motoru od jeho tvůrce Christophera Laimera disponuje tištěným statorom i rotorem. Jeho stator je zhotoven ze železem plněného PLA a obsahuje 36 slotů pro vinutí cívek. Vinutí bylo ale navinuto dle příslušného schématu, kde se cívky navíjejí

přes sebe. Závěrem navíjení by měl vzniknout hvězdicovitý obrazec, který indikuje, že bylo vinutí provedeno správně. Tento typ motoru má při rozjezdu dostatek kroutícího momentu k samovolnému započetí rotace i přesto, že má nekonvenční stator vytištěný z feromagnetického PLA. Je to způsobeno právě speciálním schématem navíjení, které Laimer využívá také u jeho tištěného 600 W elektromotoru, který disponuje Halbachovým uspořádáním magnetů v rotoru. Díky tzv. Halbachovu poli má rotor silnější magnetické pole, než by tomu bylo u obyčejného uspořádání magnetů, kde se jen střídají jejich póly. Halbachovo pole obsahuje přídatné magnety mezi těmi hlavními. Ty přídatné jsou pootočené o 90° tak, aby bylo uvnitř rotoru magnetické pole zesíleno a zevnějšku zeslabeno. Důsledkem toho má motor mnohem větší účinnost a výkon. Pro tento model Laimerova motoru byly použity neodymové magnety s rozměrem 30 x 10 x 2 mm. Rotor je zhotoven z PLA a tělo motoru z PBT. Motor po několika měřeních vykazuje 2000 KV. Kvůli házivosti ložisek a méně kvalitní hřídeli nebyl motor z bezpečnosti testován pod zátěží. Motor naprázdno při 10 V nevykazoval kritické známky zahřívání. Vinutí dosahovalo maximální teploty 28,1 °C.



Obrázek 43 Horní pohled na navinutý stator motoru dle Laimera (vlevo);
Izometrický pohled na navinutý stator motoru dle Laimera (vpravo)



Obrázek 44 Schéma zapojení vinutí statoru pro motor dle Laimera [87]

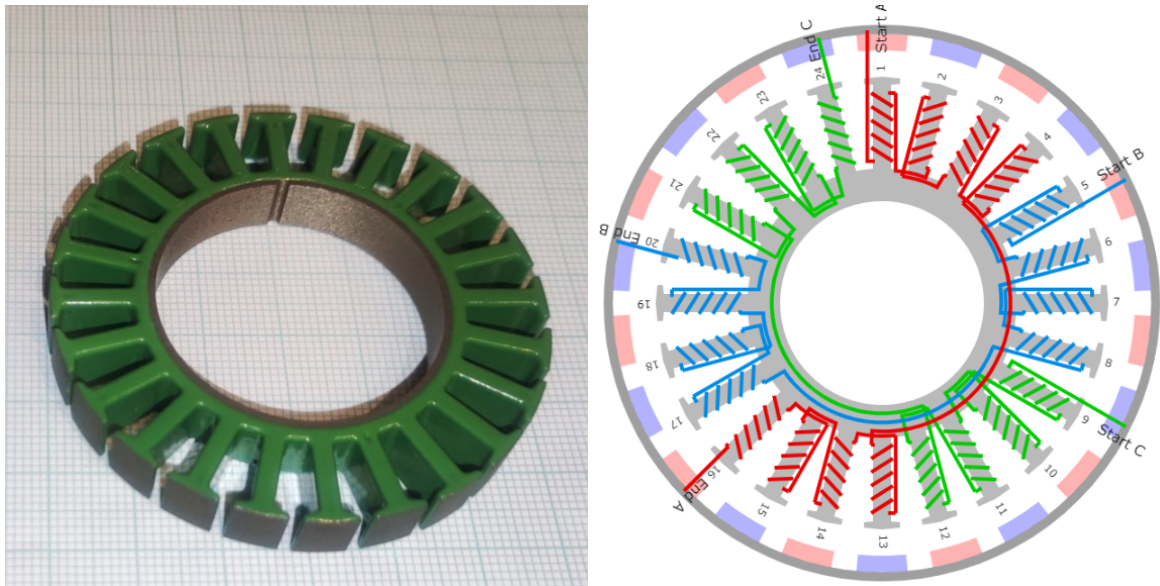


Obrázek 45 Snímek statoru dle Laimera z termokamery Flir

5.4 Radiální motor s konvenčním státorem 6008

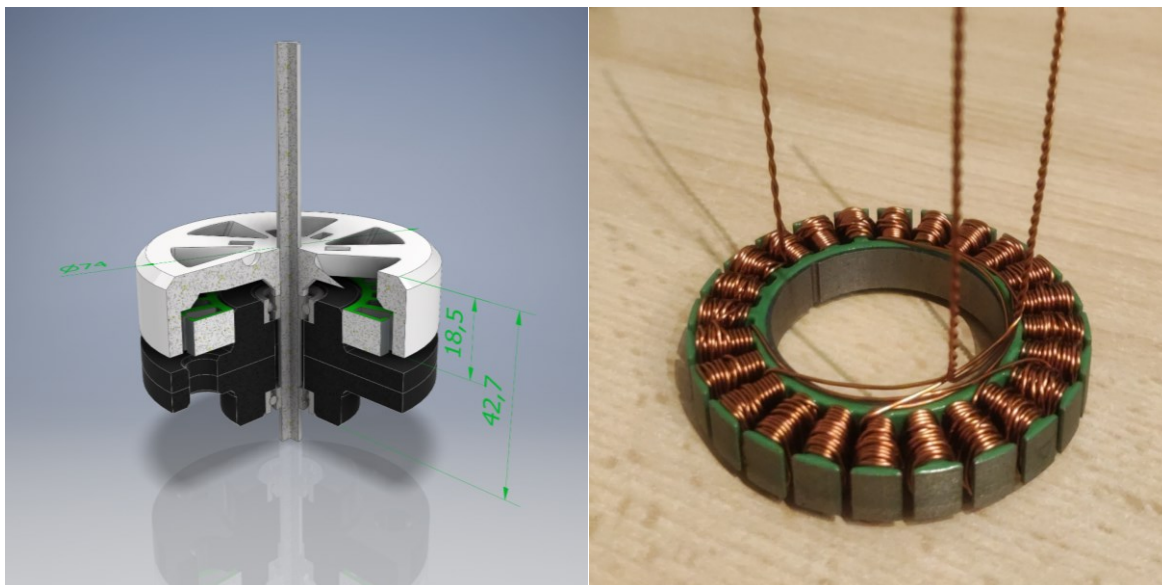
U tohoto motoru je možné vycházet ze dvou konstrukčních konfigurací 24N22P nebo 24N28P. Konfigurace 24N22P má nepatrně větší procentuální faktor vinutí, než 24N28P a ke zhotovení vyžaduje pouze 22 magnetů, což vyhovuje návrhu rotoru. Použití 22 magnetů je také hodnota doporučená výrobcem statoru. Stator byl navinut lakovaným měděným drátem o průměru 0,6 mm. Bylo zvoleno 20 závitů na cívku, tudíž se stator obohatil celkem o 480 závitů vinutí. Konfigurace vinutí byla ukončena do trojúhelníka spájením příslušných

drátů. Pokud by bylo vinutí ukončeno do hvězdy, bylo by dosaženo příliš malých otáček na volt, což není nutné. Po aplikaci 15 V bylo na tomto motoru otáčkoměrem naměřeno 3250 min^{-1} , což odpovídá přibližně 220 KV. V případě statoru navinutého do trojúhelníka by měl mít motor dostatečně velký kroutící moment k jeho provozu, protože má konvenční (vrstvený) stator z 0,2 mm tlustých plechů z transformátorové oceli. Tento fakt zaručuje nejlepší možnou účinnost indukovaného elektromagnetického pole ve statoru.



Obrázek 46 Konvenční stator 6008 bez vinutí (vlevo); Schéma zapojení vinutí pro stator 6008 při použití 22 magnetů v rotoru [88]

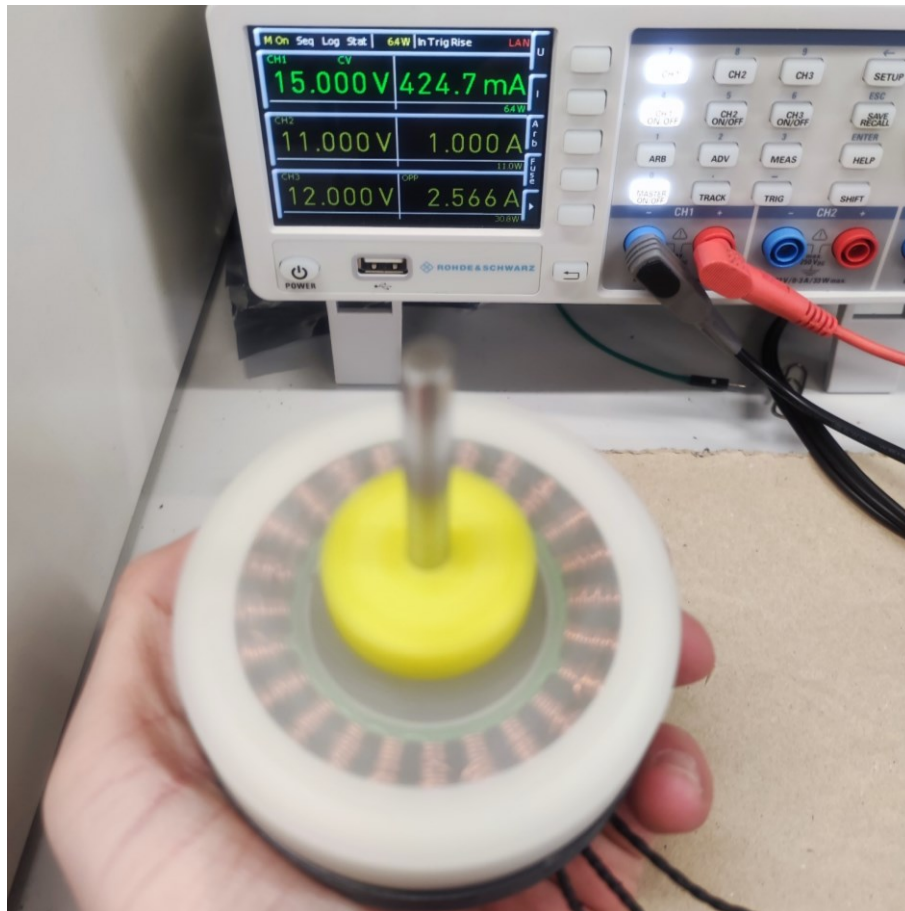
Tělo pro uložení ložisek a hřídele se skládá ze dvou symetrických polovin, díky čemuž bylo tělo motoru možné vytisknout za cca 1,5 h a ušetřit tak filament, který by byl potřeba k tisku podpor, kdyby bylo tělo z jedné části. Tyto dvě poloviny těla byly následně spojeny pomocí vytištěných šroubů a matic z CPE. K tisku těla byl použit materiál PBT, který se vyznačuje mimořádně dobrou tvarovou stálostí i při teplotě $150 \text{ }^\circ\text{C}$, není-li mechanicky namáhán. Po spojení symetrických polovin těla motoru se do nich nalisovala ložiska a nasadil na ně navinutý stator. Ložiska byla zvolena kuličková jednořadá s plechovým zakrytíváním. Jejich označení je 606ZZ a jejich vnitřní rozměr je 6 mm, což je zároveň průměr hřídele. Hřídel tvoří hlazená ocelová tyč.



Obrázek 47 Řez 3D modelem motoru 6008 (vlevo); Stator 6008 s vinutím ukončeným do trojúhelníka (vpravo)

Pro rotor byl zvolen materiál PLA bez přidaných pigmentů. Tento filament od české firmy Aurapol dosáhl na trhacím přístroji nejlepších hodnot Youngova modulu a to téměř 1 GPa. Hned po vytisknutí bylo do rotoru vlepeno 22 magnetů pomocí kyanoakrylátového lepidla. Bylo nutno dodržet střídání pólů magnetů tak, aby magnetické pole alternovalo, jinak by nedošlo k interakci s proměnlivým magnetickým polem při chodu motoru a motor by byl nefunkční.

Pro upevnění hřídele k rotoru byl vytištěn pomocný díl z CPE se dvěma dírami pro stavěcí šrouby a zároveň se šesti výběžky ve tvaru Woodroofových per. Tyto pera slouží k přenášení krouticího momentu z rotoru do hřídele, protože rotor je opatřen šesti drážkami, se kterými se hřídel pevně spojí.



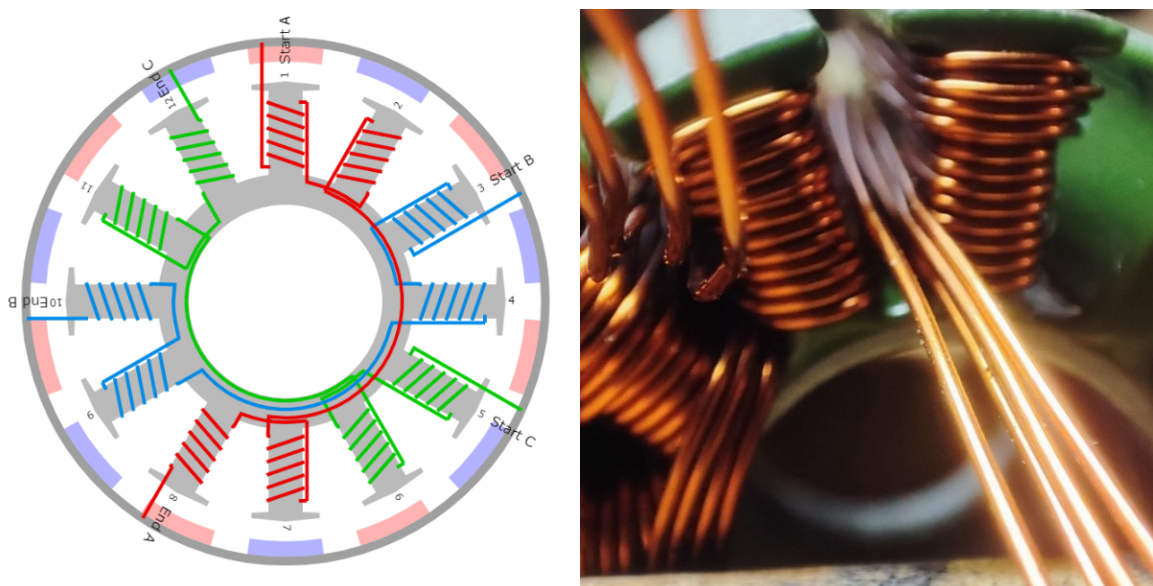
Obrázek 48 Provoz motoru 6008 při 15 V

5.5 Radiální motor s konvenčním statorem 4030

Tento motor byl zhotoven s jádrem (stator) o rozměrech 40 x 30 mm. Po dotázání výrobce na možný způsob vinutí byl zvolen svazek čtyř měděných drátů o průměru 0,6 mm. S tímto pevným a nepříliš poddajným svazkem drátů byl stator navinut čtyřmi závity na cívku dle doporučeného schématu a vinutí bylo ukončeno do trojúhelníka. Podle výrobce by měl motor s takovým vinutím mít přibližně 1500 KV (změřená hodnota je 1300 KV). Stator po navinutí nabyl na hmotnosti o 42 g. Celková hmotnost statoru s vinutím je 154 g.

Kvůli špatné dostupnosti neodymových magnetů s ideální velikostí byl vymodelován rotor s deseti sloty pro magnety o rozměrech 30 x 10 x 1 mm. Stator se dvanácti cívkami bývá nejčastěji v konfiguraci 12N14P, ale pro experimentální účely byla zvolena i konfigurace 12N10P, což by mělo resultovat ve vyšší provozní otáčce motoru. Platí zde pravidlo – čím méně magnetů rotor obsahuje, tím rychleji se musí otáčet, aby „stíhal“ reagovat na proměnlivé magnetické pole vyvolané cívkami vinutí. Při provozu motoru s rotorem osazeným deseti magnety bylo dosaženo vyšších otáček na volt, ale jen do určitého napětí.

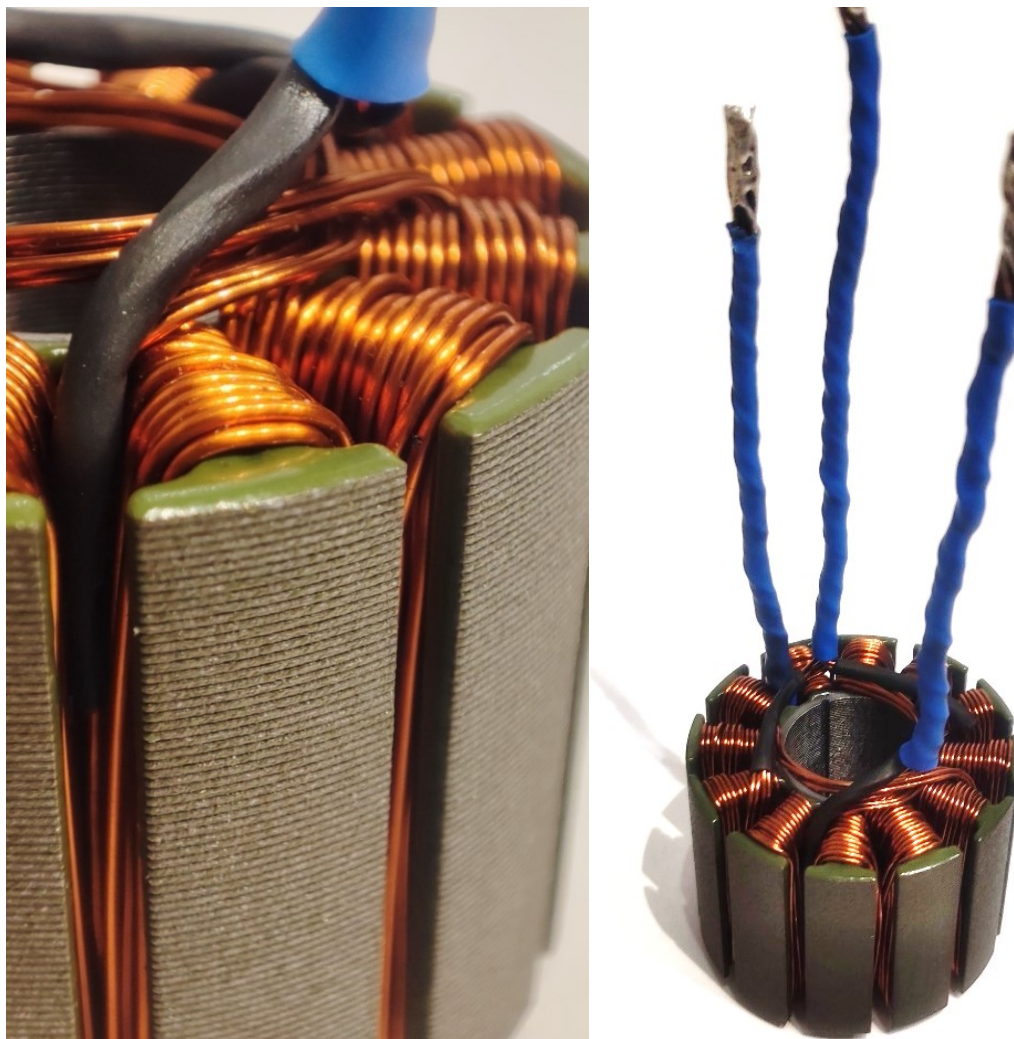
Motor byl funkční jen při použití dvou až tříčlánkové baterie Li-pol. Při pokusu o start motoru na čtyřčlánkovou baterii (16,8 V) již motor nebylo možné roztočit.



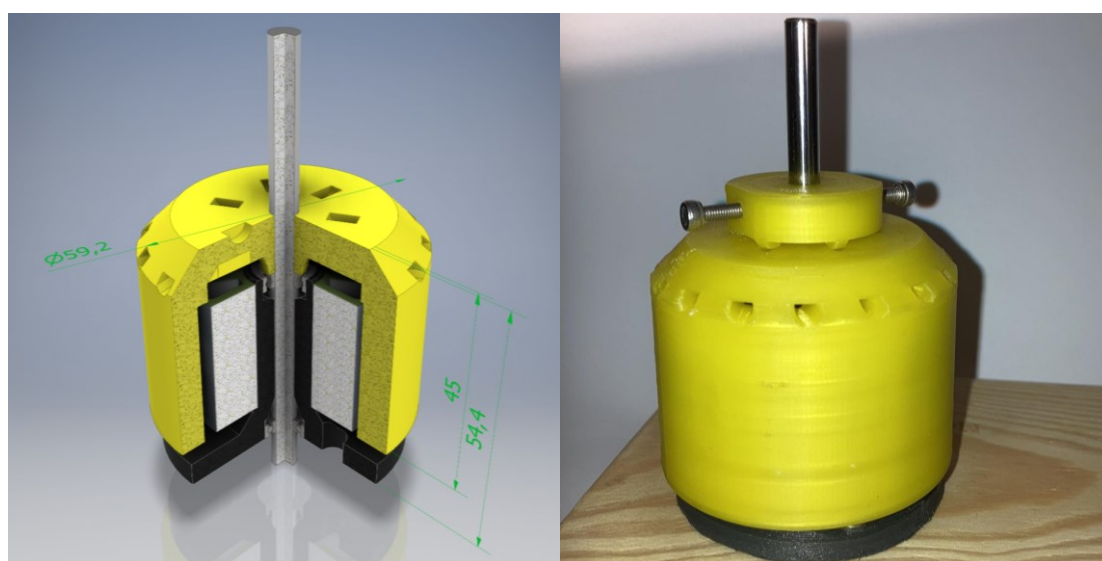
Obrázek 49 Schéma zapojení vinutí statoru 4030 při použití 14 magnetů v rotoru (vlevo);
Průběh navíjení svazkem čtyř 0,6 mm drátů (vpravo)

Dále byl vymodelován také rotor se čtrnácti sloty pro magnety, jelikož byly prodejcem unimagnet.cz nabídnuty atypické magnety s rozměrem 32 x 8 x 2 mm. Tyto magnety užší o 2 mm můžou být osazeny do rotoru tak, aniž by se překrývaly, což byl důvod, proč nebylo možné vymodelovat rotor s čtrnácti sloty pro magnety široké 10 mm.

Motor se statorem 4030 byl posléze zatížen šestičlánkovou Li-pol baterií (cca 25 V) a zátěže v podobě desetipalcové vrtule. Jelikož jsou Li-pol baterie schopny produkovat dostatečně velký proud, bylo motor možné roztočit na více než 13 500 otáček za minutu s okamžitým výkonem 1,2 kW. I přes takovou zátěž rotor zůstal vcelku a stator nejevil známky kritického zahřívání – ve vinutí nedošlo ke zkratu, tudíž je motor i nadále provozuschopný.



Obrázek 50 Makroskopický pohled na vinutí a strukturu statoru 4030 (vlevo); Celkový pohled na navinutý stator do trojúhelníka (vpravo)



Obrázek 51 Řez 3D modelem motoru 4030 (vlevo); Kompletní motor 4030 12N14P (vpravo)

ZÁVĚR

Cílem této bakalářské práce bylo vyrobit funkční model bezkartáčového elektromotoru na stejnosměrný proud s využitím 3D tisku. Bylo využito pouze metody FDM a touto cestou se povedlo zhotovit několik funkčních elektromotorů. Jejich výkon se lišil především v závislosti na materiálu statoru. V případě vytištěného statoru bylo zjištěno, že motor dosahuje mnohonásobně nižšího výkonu, než kdyby bylo zachováno konvenčního statoru. Jelikož stator vytištěný z feromagnetického PLA selhal v důsledku zahřívání, bylo by velmi obtížné a riskantní takový stator implementovat v elektromotorech v praxi. Závěrem zhotovování statoru 3D tiskem je sice razantní snížení hmotnosti motoru, ale také razantní snížení výkonu, a tudíž i kroutícího momentu. Proto by motory s vytištěným státorem nemohly pohánět vozidla či převodovky, ale mohly by mít dostatečný výkon například ke chlazení.

Po zjištění faktu, že stator z vrstvených plechů je doposud nenahraditelný, byly vymodelovány a vytištěny dva bezkartáčové motory s konvenčními statory o velikosti 6008 a 4030. Jejich těla pro uložení ložisek a usazení statoru byla vytištěna z PBT, který má z dostupných materiálů nejlepší tepelnou odolnost, což je při kontaktu se státorem důležité – při průchodu elektrického proudu vinutím motoru totiž vzniká kromě elektromagnetického pole také teplo. V případě motoru se státorem 6008 byl rotor zhotoven z PLA, které při mechanické zkoušce tahem vykazovalo mimořádně vysoký Youngův modul – až 1 GPa. Vysoká hodnota Youngova modulu znamená, že materiál není příliš pružný, nýbrž křehký. Z tohoto důvodu byl pro motor se státorem 4030 rotor zhotoven z CPE, které je dle výsledků z mechanických zkoušek více houževnatým materiálem. Motor s označením 4030 totiž dosahuje mnohem vyšších provozních otáček, než motor 6008, což je způsobeno především menším počtem magnetů, cívek a závitů vinutí.

Kalkulace cen (vč. DPH) byly provedeny pro vybrané motory 4030 a 6008. Cena za konvenční součásti (stator, magnety, hřídel a ložiska), zakoupené ke kompletaci motoru 4030 byla 800 Kč a cena za materiál potřebný k 3D tisku komponent téhož motoru byla 145 Kč. Celková cena za motor 4030 tedy činí 945 Kč. U motoru 6008 byly celkové náklady na konvenční součásti 477 Kč a 3D tisk komponent motoru 6008 stál 128 Kč, což je celkem 605 Kč. Ceny materiálů jsou vztaženy na cenu 298 Kč/kg za PLA, 1169 Kč/kg za CPE a 1398 Kč/kg za PBT. Výsledné ceny motorů jsou zhruba třikrát nižší, než ceny konvenčních produktů.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] HORVATH, Joan and Rich CAMERON. *Mastering 3D printing: A guide to modeling, printing, and prototyping*. 2. ed. Berlin, Germany: APress, 2020. ISBN 9781484258415.
- [2] PRUSA, Josef. *Getting started with RepRap: 3D printing on your desktop*. Sebastopol, CA: Maker Media, 2013. ISBN 9781457182969.
- [3] ZUKAS, Victoria. *An Introduction to 3D Printing*. Sarasota, FL: First Edition Design Publishing, 2015. ISBN 9781622878970.
- [4] Pencil holder. In: *Prusa3d.com* [online] [Cit. 02.03.2023]. Dostupné z: <https://cdn.blog.prusa3d.com/wp-content/uploads/2018/06/stojanek.jpg>
- [5] ZUZA, Mikolas. Everything about nozzles with a different diameter. In: *Original Prusa 3D Printers* [online]. 7. 6. 2018 [Cit. 02.03.2023]. Dostupné z: https://blog.prusa3d.com/everything-about-nozzles-with-a-different-diameter_8344/
- [6] What is 3D printing? How does a 3D printer work? Learn. In: *3D Printing* [online]. 5. 6. 2012 [Cit. 02.03.2023]. Dostupné z: <https://3dprinting.com/what-is-3d-printing/>
- [7] ALEXANDRA. When was 3D printing invented? The history of 3D printing. In: *BCN3D Technologies* [online]. 15. 5. 2020 [Cit. 02.03.2023]. Dostupné z: <https://www.bcn3d.com/the-history-of-3d-printing-when-was-3d-printing-invented/>
- [8] Typy tiskáren a rozdíly mezi nimi. In: *Prusa3d.com* [online] [Cit. 02.03.2023]. Dostupné z: https://help.prusa3d.com/cs/article/typy-tiskaren-a-rozdily-mezi-nimi_112464
- [9] SLA. In: *Cvut.cz* [online] [Cit. 02.03.2023]. Dostupné z: <https://www.fs.cvut.cz/ostatni/sekce-3dtisk/3dtisk/moznosti-3dtisk/rozdeleni-technologie-3dtisk/sla-3dtisk/>
- [10] Anon., [b.r.]. All3dp.com [online] [Cit. 03.05.2023]. Dostupné z: <https://all3dp.com/2/sla-vs-fdm-is-resin-3d-printing-faster/>
- [11] BOURELL, David, Jean Pierre KRUTH, Ming LEU, Gideon LEVY, David ROSEN, Allison M. BEESE and Adam CLARE, 2017. Materials for additive manufacturing. *CIRP annals ... manufacturing technology* [online]. 66(2), 659–681. ISSN 0007-8506. Dostupné z: doi:10.1016/j.cirp.2017.05.009

- [12] What is 3D printing - Simply explained. In: *All3dp.com* [online] [Cit. 02.03.2023]. Dostupné z: <https://all3dp.com/2/fused-deposition-modeling-fdm-3d-printing-simply-explained/>
- [13] DWAMENA, Michael, [b.r.]. Are 3D printer filament fumes toxic? PLA, ABS & safety tips – 3D printerly. *3dprinterly.com* [online] [Cit. 14.04.2023]. Dostupné z: <https://3dprinterly.com/is-3d-printer-filament-toxic-pla-abs-safety-tips/>
- [14] 3DPRINTEROS. What is the best flexible filament for my 3D printing needs? – My3DMatter study. In: *3D Control Systems* [online]. 8. 4. 2020 [Cit. 02.03.2023]. Dostupné z: <https://www.3dprinterros.com/articles/what-is-the-best-flexible-filament-for-my-3d-printing-needs-my3dmatter-study>
- [15] Direct drive vs. bowden extruder. In: *All3dp.com* [online] [Cit. 02.03.2023]. Dostupné z: <https://all3dp.com/2/direct-vs-bowden-extruder-technology-shootout/>
- [16] Extruder calibration: How to calibrate E-steps. In: *All3dp.com* [online] [Cit. 02.03.2023]. Dostupné z: <https://all3dp.com/2/extruder-calibration-6-easy-steps-2/>
- [17] Spider High-temperature Hotend. In: *Creativity3dofficial.com* [online] [Cit. 02.03.2023]. Dostupné z: <https://www.creativity3dofficial.com/products/spider-high-temperature-hotend>
- [18] Selective laser sintering (SLS) 3D printing. In: *Eos.info* [online] [Cit. 02.03.2023]. Dostupné z: https://www.eos.info/en/industrial-3d-printing/additive-manufacturing-how-it-works/sls-3d-printing?utm_source=google&utm_medium=cpc&utm_campaign=generic_EMEA&utm_content=wyn&utm_term=sls%203d%20printing&utm_campaign=%5Bwyn%5D+Generic+%5BEMEA%5D+%5BS%5D&utm_source=adwords&utm_medium=ppc&hsa_acc=3851378066&hsa_cam=13565635632&hsa_grp=124293387792&hsa_ad=528503361737&hsa_src=g&hsa_tgt=kwd-14042172638&hsa_kw=sls%203d%20printing&hsa_mt=p&hsa_net=adwords&hsa_ver=3&gclid=Cj0KCQiAnsqdBhCGARIsAAyjYjTgjYrmUlcBmdwE9bLuxYIu4Ar2pDqGW8l4GiGa1LEBThG-uADP2s0aAozmEALw_wcB
- [19] VISUALIO. SLS (Selective Laser Sintering). In: *Cotu.cz* [online] [Cit. 13.03.2023]. Dostupné z: <https://www.cotu.cz/blog/126/sls-selective-laser-sintering>

- [20] VISUALIO. SLM (Selective Laser Melting). In: *Cotu.cz* [online] [Cit. 02.03.2023]. Dostupné z: <https://www.cotu.cz/blog/118/slm-selective-laser-melting>
- [21] Selective Laser Melting / SLM 3D Printing: The Ultimate Guide. In: *All3dp.com* [online] [Cit. 02.03.2023]. Dostupné z: <https://all3dp.com/1/selective-laser-melting-guide/>
- [22] Selective laser melting technology. In: *Hanaamt.com* [online]. 17. 3. 2020 [Cit. 02.03.2023]. Dostupné z: <https://hanaamt.com/powder-production/slm-pbf/>
- [23] Anon., [b.r.]. *Vshcdn.net* [online] [Cit. 08.05.2023]. Dostupné z: [https://technickytydenik.vshcdn.net/obrazek/5e8a38510548e/obr.-1-princip-metody-dmls-a-slm-\(1\)_334x230.png](https://technickytydenik.vshcdn.net/obrazek/5e8a38510548e/obr.-1-princip-metody-dmls-a-slm-(1)_334x230.png)
- [24] 3D MANUFAKTURA S.R.O. Raise3D E2CF – 3D tiskárna pro karbonem vyztužené filamenty. In: *eshop.3dmanufaktura.cz* [online] [Cit. 02.03.2023]. Dostupné z: https://eshop.3dmanufaktura.cz/raise3d-e2cf---idex-3d-tiskarna-pro-kompozitni-materialy/?gclid=CjwKCAiAh9qdBhAOEiwAvxIok2X0lrsmoBdlioFi5A5ULVGCNxn9T2HMSV2SC7piCCzSgBTEh9IW3BoCvzYQAvD_BwE
- [25] PAEK filaments in 3D printing. In: *Filament2print.com* [online] [Cit. 02.03.2023]. Dostupné z: https://filament2print.com/gb/blog/39_pae-k-filaments-3d-printing.html
- [26] DOLEŽAL, Pavel. Informace o bioplastu PLA. In: *Eko-plasty.cz* [online] [Cit. 02.03.2023]. Dostupné z: <https://www.eko-plasty.cz/bioplasty-pla/>
- [27] KOLTZENBURG, Sebastian, Michael MASKOS and Oskar NUYKEN. *Polymer chemistry*. Karl HUGHES, tran. 1. ed. Berlin, Germany: Springer, 2018. ISBN 9783662492796.
- [28] NIAOUNAKIS, Michael. *Biopolymers: Processing and products*. William Andrew, 2014. ISBN 9780323279383.
- [29] ROGERS, Tony. Everything you need to know about polylactic Acid (PLA). In: *Creativemechanisms.com* [online] [Cit. 02.03.2023]. Dostupné z: <https://www.creativemechanisms.com/blog/learn-about-poly-lactic-acid-pla-prototypes>
- [30] LOKESH, N. et al. Evaluation on effect of printing process parameter through Taguchi approach on mechanical properties of 3D printed PLA specimens using FDM at constant printing temperature. *Materials today: proceedings*. 2022, vol. 52, pp. 1288–1293. ISSN 2214-7853. DOI: 10.1016/j.matpr.2021.11.054

- [31] REDWOOD, Ben, Filemon SCHÖFFER and Brian GARRET. *The 3D Printing Handbook: Technologies, design and applications*. 2018. ISBN 9789082748505.
- [32] FLYNT, Joseph, 2018. PETG filament: Properties, how to use, and best brands. *3D Insider* [online] [Cit. 14.04.2023]. Dostupné z: <https://3dinsider.com/petg-filament/>
- [33] Anon., [b.r.]. The Best PETG Print Settings for Perfect Results. *All3dp.com* [online] [Cit. 14.04.2023]. Dostupné z: <https://all3dp.com/2/petg-print-settings-how-to-find-the-best-settings-for-petg/>
- [34] Anon., [b.r.]. What is PETG (Polyethylene Terephthalate Glycol). *Laird Plastics* [online] [Cit. 14.04.2023]. Dostupné z: <https://lairdplastics.com/resources/what-is-petg-polyethylene-terephthalate-glycol/>
- [35] TOOR, Ravi, [b.r.]. PET vs PETg filament – what’s the difference? [online]. [Cit. 14.04.2023]. Dostupné z: <https://www.filamentive.com/pet-vs-petg-filament-whats-the-difference/>
- [36] Anon., [b.r.]. Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS Plastic): Uses, properties & structure. *Specialchem.com* [online] [Cit. 14.04.2023]. Dostupné z: <https://omnexus.specialchem.com/selection-guide/acrylonitrile-butadiene-styrene-abs-plastic>
- [37] RIGSBY, Mike, ed., [b.r.]. *The Beginner’s Guide to 3D Printing: Making Your Digital Designs Tangible*.
- [38] SALIM, Mohd A., Zarif H. TERMITI and Adzni Md SAAD, 2019. Mechanical properties on ABS/PLA materials for geospatial imaging printed product using 3D printer technology. In: *Reference Module in Materials Science and Materials Engineering*. B.m.: Elsevier. ISBN 9780128035818.
- [39] Anon., [b.r.]. CPE HG100 “lemonade translucent.” *Fillamentum.com* [online] [Cit. 14.04.2023]. Dostupné z: <https://shop.fillamentum.com/collections/cpe-filament/products/cpe-hg100-lemonade-translucent>
- [40] D, Astm, [b.r.]. CPE HG100 Physical properties Typical Value Test Method Test Condition Material density 1,25 g/cm³ ASTM D792 Melt flow index 1,6 g/10 min. *Fillamentumautomotive.com* [online] [Cit. 14.04.2023]. Dostupné z: http://www.fillamentumautomotive.com/wp-content/uploads/2020/10/Technical-Data-Sheet_CPE-HG100_03012019.pdf

- [41] TIM, 2021. CPE (PETG) - my trick to 3D print it beautifully and more. *Core Electronics* [online] [Cit. 14.04.2023]. Dostupné z: <https://core-electronics.com.au/guides/cpe-trick-for-better-3d-prints/>
- [42] Anon., 2016. Nylon (PA). *materialpro3d.cz* [online] [Cit. 14.04.2023]. Dostupné z: <https://www.materialpro3d.cz/materialovy-slovník/nylon/>
- [43] Anon., [b.r.]. PA6 – extrudovaný polyamid. *Techplasty.cz* [online] [Cit. 14.04.2023]. Dostupné z: <https://www.techplasty.cz/material/polyamid/pa6-extrudovany-polyamid>
- [44] Anon., 2021c. Vše o nylonu – jaké má vlastnosti, jak prát nylon a mnoho dalšího! *Modniblog.cz* [online]. [Cit. 14.04.2023]. Dostupné z: <https://modniblog.cz/pruvodce-materialy-vse-o-nylonu/>
- [45] Anon., [b.r.]. Polyamid (Nylon). *Prusa3d.com* [online] [Cit. 14.04.2023]. Dostupné z: https://help.prusa3d.com/cs/article/polyamid-nylon_167188
- [46] Anon., [b.r.]. PBT filament Lankeda. *elegant3d.cz* [online] [Cit. 14.04.2023]. Dostupné z: <https://www.elegant3d.cz/PBT-filament-cerna-1-75-mm-1-kg-d768.htm>
- [47] Anon., [b.r.]. PBT. *Resinex.cz* [online] [Cit. 14.04.2023]. Dostupné z: <https://www.resinex.cz/polymerove-typy/pbt.html>
- [48] MILLSAPS, Bridget, 2021. Custom 3D printing with PBT: Five key learning points. *Shapeways Blog* [online] [Cit. 14.04.2023]. Dostupné z: <https://www.shapeways.com/blog/archives/42080-custom-3d-printing-with-pbt-five-key-learning-points.html>
- [49] Anon., [b.r.]. Iron-filled metal composite PLA. *ProtoPlant, makers of Proto-pasta* [online] [Cit. 14.04.2023]. Dostupné z: <https://www.proto-pasta.com/products/magnetic-iron-pla>
- [50] Anon., [b.r.]. PolyLight 1.0 - LW PLA –. *3DLabPrint* [online] [Cit. 14.04.2023]. Dostupné z: <https://3dlabprint.com/shop/polylight-1-0-lw-pla-filament/>
- [51] Anon., [b.r.]. Složení polymerů – přísady. *Publi.cz* [online] [Cit. 14.04.2023]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/180/05.html>
- [52] Anon., [b.r.]. WOOD Filament. *materialpro3d.cz* [online] [Cit. 14.04.2023]. Dostupné z: <https://www.materialpro3d.cz/wood/>

- [53] DANG, Zhi-Min and Ming-Sheng ZHENG, 2018. Multiphase/multicomponent dielectric polymer materials with high permittivity and high breakdown strength. In: *Dielectric Polymer Materials for High-Density Energy Storage*. B.m.: Elsevier, p. 247–287.
- [54] HANON, Muammel M. and László ZSIDAI, 2021. Comprehending the role of process parameters and filament color on the structure and tribological performance of 3D printed PLA. *Journal of materials research and technology* [online]. **15**, 647–660. ISSN 2238-7854. Dostupné z: doi:10.1016/j.jmrt.2021.08.061
- [55] PODSIADŁY, Bartłomiej, Piotr MATUSZEWSKI, Andrzej SKALSKI and Marcin SŁOMA, 2021. Carbon nanotube-based composite filaments for 3D printing of structural and conductive elements. *Applied sciences (Basel, Switzerland)* [online]. **11**(3), 1272 [Cit. 14.04.2023]. ISSN 2076-3417. Dostupné z: doi:10.3390/app11031272
- [56] 3DPRINTBEGINNER, 2020. Ultimate 3D printer nozzle comparison. *3D Print Beginner* [online]. B.m.: 3DPrintBeginner [Cit. 14.04.2023]. Dostupné z: <https://3dprintbeginner.com/ultimate-3d-printer-nozzle-comparison/>
- [57] Anon., 2021a. Olsson nozzle - wear comparison. *The Olsson Line* [online] [Cit. 14.04.2023]. Dostupné z: <https://olssonline.com/faq/>
- [58] Anon., 2021b. *Průvodce tryskami 3D tiskárny* [online] [Cit. 14.04.2023]. Dostupné z: <https://www.3djake.cz/info/poradce/pruvodce-tryskami-3d-tiskarny>
- [59] Anon., [b.r.]. Rubínová tryska 0,4 / 1,75 mm Rubby. *Na3d.cz* [online] [Cit. 14.04.2023]. Dostupné z: <https://www.na3d.cz/p/3151/rubinova-tryska-04-175-mm>
- [60] KITCHEN, C. N. C., 2019. *HOW MUCH abrasive filaments damage your nozzle!* [online]. B.m.: Youtube [Cit. 14.04.2023]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=uvlMeTnjriQ>
- [61] Anon., [b.r.]. RUBY NOZZLE PNG. *Plentymarkets.com* [online] [Cit. 14.04.2023]. Dostupné z: <https://cdn03.plentymarkets.com/ioseuwg7moqp/item/images/23861/full/The-Olsson-Ruby-Nozzle-2-85-mm---0-4-mm-23861.png>
- [62] Anon., [b.r.]. *Electric motor – Construction of induction motors* [online]. Dostupné z: <https://www.britannica.com/technology/electric-motor>
- [63] S2 STUDIO S. R. O.-INTERNETOVÉ SLUŽBY, GRAFIKA, Výroba REKLAMY, MARKETING and Info(at)s2studio CZ, [b.r.]. Jaké existují typy

- elektromotorů? *Elektromotory-tesnohlidek.cz* [online] [Cit. 14.04.2023]. Dostupné z: <https://www.elektromotory-tesnohlidek.cz/novinky/jake-existuji-typy-elektromotoru>
- [64] Anon., 2020. Revoluční motor pro elektromobily? *Elektrickevozy.cz* [online] [Cit. 14.04.2023]. Dostupné z: <https://elektrickevozy.cz/clanky/revolucni-motor-pro-elektromobily>
- [65] Anon., [b.r.]. Everything you need to know about DC motors. *Rs-online.com* [online] [Cit. 14.04.2023]. Dostupné z: <https://ie.rs-online.com/web/generalDisplay.html?id=ideas-and-advice/dc-motors-guide>
- [66] THE EDITORS OF ENCYCLOPEDIA BRITANNICA, 2022. *direct current* [online]. Dostupné z: <https://www.britannica.com/science/direct-current>
- [67] Millett, P. (n.d.). *Brushless vs brushed DC motors: When and why to choose one over the other*. *Monolithicpower.com*. [Cit. 24.04.2023] Dostupné z: <https://www.monolithicpower.com/en/brushless-vs-brushed-dc-motors>
- [68] *Třífázový střídač.png*. (n.d.). *Wikimedia.org*. [Cit. 24.04.2023] Dostupné z: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/c/c4/3-phase_inverter_cjc.png
- [69] *Turnigy RotoMax 150cc size brushless outrunner motor*. (n.d.). *Hobbyking*. [Cit. 24.04.2023] Dostupné z: https://hobbyking.com/en_us/turnigy-rotomax-150cc-size-brushless-outrunner-motor.html?__store=en_us
- [70] (N.d.). *Digikey.com*. [Cit. 24.04.2023] Dostupné z: <https://www.digikey.com/en/articles/how-to-power-and-control-brushless-dc-motors>
- [71] MYPS and S.R.O, [b.r.]. Jaký je rozdíl mezi AC, DC a EC motory? *E-konstrukter.cz* [online] [Cit. 02.05.2023]. Dostupné z: <https://e-konstrukter.cz/novinka/jaky-je-rozdil-mezi-ac-dc-a-ec-motory>
- [72] All, S. (n.d.-a). *Brushless Motor Kv Rating explained*. [Cit. 24.04.2023] Dostupné z: <https://dronenodes.com/brushless-motor-kv-rating-explained/>
- [73] *Does a lower kv (RPM per volt) rate mean a higher torque force and lower RPM with given electric currents in brushless motors?* (n.d.). *Quora*. [Cit. 24.04.2023] Dostupné z: <https://www.quora.com/Does-a-lower-kv-RPM-per-volt-rate-mean-a-higher-torque-force-and-lower-RPM-with-given-electric-currents-in-brushless-motors>

- [74] *How to calculate the torque constant for a BLDC motor.* (n.d.). Electrical Engineering Stack Exchange. [Cit. 24.04.2023] Dostupné z: <https://electronics.stackexchange.com/questions/531406/how-to-calculate-the-torque-constant-for-a-bldc-motor>
- [75] *Tutorial: How to measure the KV of a brushless motor.* (n.d.). Fishpepper.de. [Cit. 24.04.2023] Dostupné z: <https://fishpepper.de/2017/10/17/tutorial-how-to-measure-the-kv-of-a-brushless-motor/>
- [76] *RET series.* (2017, March 12). Rotex Electric. <http://www.rotexelectric.eu/products/bldc-motors/ret-series/>
- [77] Abramov, A. (2021, December 13). *Everything about Brushless Motors in details.* Ronix Mag; Ronix Tools. <https://ronixtools.com/en/blog/everything-about-brushless-motors/>
- [78] All, S. (n.d.-b). *Drone motor fundamentals – how brushless motor works – drone nodes.* [Cit. 24.04.2023] Dostupné z: <https://dronenodes.com/drone-motors-brushless-guide/>
- [79] Reid, J. (2017, February 21). *Multicopter motor guide.* RotorDrone. <https://www.rotordronepro.com/guide-multicopter-motors/>
- [80] Anon., [b.r.]. Přehled typů elektrických motorů Elektrické motory mohou být děleny podle různých hledisek, například: • podle tvaru (viz obr. 1) o patkové, přírubové a vestavné • podle způsobu chlazení, bez chlazení u motorů nejnižších výkonů, s vlastní ventilací pro otevřené motory a s cizí ventilací • podle krytí (odolnost proti vlhkosti, prachu apod.) • podle napájecího napětí na. *Spslan.cz* [online] [Cit. 02.05.2023]. Dostupné z: <https://www.spslan.cz/files/1cc2eb91316dd52bf50dd77e977caa60.pdf>
- [81] CHMELÍK, Doc Ing Karel, [b.r.]. ASYNCHRONNÍ A SYNCHRONNÍ ELEKTRICKÉ STROJE. *Vsb.cz* [online] [Cit. 02.05.2023]. Dostupné z: <https://homel.vsb.cz/~ber30/stroje/AMaSMstroje.pdf>
- [82] Anon., [b.r.]. *E-konstrukter.cz* [online] [Cit. 02.05.2023]. Dostupné z: <https://e-konstrukter.cz/files/gallery/ucinnost-motoru.gif>
- [83] Anon., [b.r.]. *Hellebrand.cz* [online] [Cit. 02.05.2023]. Dostupné z: http://skola.hellebrand.cz/text0910/ele/motory_str.pdf

- [84] Anon., [b.r.]. *Odkarla.cz* [online] [Cit. 02.05.2023]. Dostupné z: https://obrazky.odkarla.cz/d9/d1/mez-mohelnice-asynchronni-motor/1080x1080/mez-mohelnice-asynchronni-motor_1.jpg
- [85] Anon., [b.r.]. *Datacomp.sk* [online] [Cit. 02.05.2023]. Dostupné z: <https://datacomp.sk/img.asp?stiid=406985>
- [86] Anon., [b.r.]. Termokamera FLIR E5xt (předváděcí kamera). *W-Technika* [online] [Cit. 02.05.2023]. Dostupné z: https://www.w-technika.cz/termokamera-flir-e5xt-predvadeci-kamera.html?gclid=CjwKCAjw9J2iBhBPEiwAErwpeRHpDuYV2sJFZ8zw3L9uPL0vziVZWoWyT_ReqHObzbChHEXQU-gXNxoCYhYQAvD_BwE
- [87] Anon., [b.r.]. Brushless motor – makeSEA. *Makesea.com* [online] [Cit. 02.05.2023]. Dostupné z: <https://community.makesea.com/web/claimer/brushless-motor>
- [88] Anon., [b.r.]. *bavaria-direct.co.za*. *Bavaria-direct.co.za* [online] [Cit. 02.05.2023]. Dostupné z: <https://www.bavaria-direct.co.za/scheme/calculator/>
- [89] Micro BLDC motor (n.d.). *Aliexpress.com*. [Cit. 24.04.2023] Dostupné z: https://img.alicdn.com/imgextra/i2/50458907/TB2j0P7dvBNTKJjSszcXXbO2VXa_!!50458907.jpg

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

3D	Trojrozměrný
ABS	Akrylonitrilbutadienstyren
ASA	Akrylonitrilstyrenakrylát
BLDC	Bezkartáčový motor na stejnosměrný proud (Brushless DC Motor)
BPA	Bisfenol-A
CF15	15 % Uhlíkových vláken (Carbon fibre)
cm ³	Jednotka objemu
CNC	Počítačové numerické řízení (Computerized Numerical Control)
DC	Stejnosměrný proud (Direct Current)
DMLS	Přímé sintrování kovů laserem (Direct Metal Laser Sintering)
DSC	Diferenční skenovací kalorimetrie
EC	Elektronicky komutovaný
ESC	Elektronické ovládání rychlosti (Electronic Speed Control)
FDM	Fused Deposition Modeling
FFF	Fused Filament Fabrication
FLIR	Registrovaná ochranná známka společnosti Teledyne FLIR, LLC
GPa	Gigapascal
kg/m ³	Jednotka hustoty
KV	Otáčky na volt
kW	Jednotka výkonu
Li-pol	Lithium-polymerový akumulátor
MPa	Megapascal
PA	Polyamid
PA6	Polyamid 6
PAEK	Polyaryletherketon

PBT	Polybutylentereftalát
PC	Polykarbonát
PC-ABS	Polykarbonát-akrylonitrilbutadienstyren
PEEK	Polyetheretherketon
PEI	Polyetherimid
PET	Polyethylentereftalát
PET-G	Polyethylentereftalát modifikovaný glykolem
PLA	Kyselina polymléčná
POM	Polyoxymethylen
PP	Polypropylen
PS	Polystyren
PTFE	Polytetrafluorethylen
PVDF	Polyvinylidenfluorid
min ⁻¹	Jednotka otáček za minutu
RC	Rádiem řízené (Radio Controlled)
SEM	Rastrovací elektronový mikroskop (Scanning Electron Microscope)
SLA	Stereolitografie
SLM	Selektivní laserové tavení
SLS	Selektivní laserové sintrování
STL	Surface Tessellation Language
TPE	Termoplastický elastomer
TPU	Termoplastický polyuretan
UV	Ultrafialový

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 Porovnání kvality a rychlosti výtisků [4] (Převzato a upraveno.).....	11
Obrázek 2 Schéma technologie 3D tisku SLM [23].....	16
Obrázek 3 Mosazná tryska 0,4mm (vlevo) [foto autora]; Mosazná tryska s rubínovou vložkou (vpravo) [61]	22
Obrázek 4 Elektromotor o výkonu 100 kW používaný automobilkou Citroën [foto autora]	23
Obrázek 5 Variace stejnosměrných elektromotorů [foto autora].....	24
Obrázek 6 Rozložený DC motor – a) Plášť motoru s permanentními magnety; b) Podstava hřídele, rotoru s vinutím a komutátoru; c) Zadní kryt motoru s uhlíkovými kartáči [foto autora]	25
Obrázek 7 Třífázový střídač – schéma [68] (Převzato a upraveno.)	26
Obrázek 8 Variace BLDC motorů pro pohon RC modelů [foto autora]	26
Obrázek 9 BLDC motor 0703 20000KV (vlevo) [90]; BLDC motor RET 30 - 65KV pro paramotor (vpravo) [76].....	27
Obrázek 10 Graf závislosti účinnosti elektromotorů na jejich výstupním výkonu [82]	28
Obrázek 11 Asynchronní elektromotor [84]	29
Obrázek 12 FDM 3D tiskárna Creality Ender 3 [85].....	31
Obrázek 13 Termokamera E5-XT značky Flir [86].....	32
Obrázek 14 Graf závislosti napětí na poměrném prodloužení pro PLA Aurapol.....	33
Obrázek 15 Graf závislosti tepelného toku na teplotě pro PLA Aurapol	34
Obrázek 16 SEM – Mikroskopie povrchu výtisku z PBT Lankeda: a) Měřítko 2 mm; b) Měřítko 20 μm	35
Obrázek 17 SEM – Mikroskopie lomu výtisku z PBT Lankeda: a) Měřítko 1 mm; b) Měřítko 300 μm ; c) Měřítko 50 μm ; d) Měřítko 30 μm	35
Obrázek 18 Graf závislosti napětí na poměrném prodloužení pro PBT Lankeda	36
Obrázek 19 Graf závislosti tepelného toku na teplotě pro PBT Lankeda.....	37
Obrázek 20 SEM – Mikroskopie CPE HG100 Fillamentum: a) Povrch výtisku (měřítko 2 mm); b) Povrch výtisku (měřítko 20 μm); c) Lom (měřítko 2 mm); d) Lom (měřítko 40 μm)	38
Obrázek 21 závislosti napětí na poměrném prodloužení pro CPE HG100 Fillamentum	39
Obrázek 22 Graf závislosti tepelného toku na teplotě pro CPE HG100 Fillamentum	39
Obrázek 23 SEM – Mikroskopie železem plněného PLA: a) Povrch výtisku (měřítko 2 mm); b) Povrch výtisku (měřítko 1 mm); c) Lom (měřítko 1 mm); d) Lom (měřítko 400 μm) ...	40
Obrázek 24 SEM – Mikroskopie lomu železem plněného PLA (měřítko 100 μm)	41
Obrázek 25 Graf závislosti napětí na poměrném prodloužení pro železem plněné PLA Protopasta.....	42

Obrázek 26 Graf závislosti tepelného toku na teplotě pro železem plněné PLA – Oblast teploty skelného přechodu	43
Obrázek 27 Graf závislosti tepelného toku na teplotě pro železem plněné PLA – Oblast teploty tání	43
Obrázek 28 SEM – Mikroskopie lomu uhlíkem plněného ABS (měřítko 2 mm)	44
Obrázek 29 SEM – Mikroskopie povrchu výtisku z uhlíkem plněného ABS: a) Měřítka 2 mm; b) Měřítka 500 μm ; c) Měřítka 30 μm ; d) Měřítka 20 μm	44
Obrázek 30 SEM – Mikroskopie lomu uhlíkem plněného ABS: a) Měřítka 40 μm ; b) Měřítka 20 μm	45
Obrázek 31 Graf závislosti tepelného toku na teplotě pro uhlíkem plněné ABS Lankeda .	45
Obrázek 32 Konvenční motor 3542 (2820)	48
Obrázek 33 Stator 2820 v programu Autodesk Inventor (vlevo); Stator 2820 ve sliceru Ultimaker Cura s přesnou kalkulací ceny, spotřeby filamentu a dobou tisku při výšce vrstvy 0,2 mm (vpravo)	49
Obrázek 34 Jemné vinutí do trojúhelníka (vlevo); Hrubé vinutí do hvězdy (vpravo).....	49
Obrázek 35 Snímky statoru s jemným vinutím z termokamery Flir – Před uvedením do provozu (vlevo); Po 15 minutách provozu (vpravo).....	50
Obrázek 36 Snímky statoru s hrubým vinutím z termokamery Flir – Během provozu na 7,4 V naprázdno (vlevo); Po 12 minutách provozu (vpravo)	51
Obrázek 37 Řez 3D modelem motoru 3N4P (vlevo); Detailní pohled na stator motoru 3N4P (vpravo).....	52
Obrázek 38 Motor 3N4P rozložený na rotor a stator (vlevo); Schéma zapojení vinutí motorů 3N4P (vpravo) [88].....	53
Obrázek 39 Graf závislosti otáček na napětí pro motor 3N4P s tenčími magnety	54
Obrázek 40 Rozložený motor 3N4P s rotorem ze železem plněného PLA a s magnety $\varnothing 12 \times 4 \text{ mm}$	55
Obrázek 41 Graf závislosti otáček na napětí pro motor 3N4P se silnějšími magnety	55
Obrázek 42 Řez 3D modelem motoru 3N4P s magnety $\varnothing 20 \times 2 \text{ mm}$ (vlevo); Stator a rotor motoru 3N4P s magnety $\varnothing 20 \times 2 \text{ mm}$ (vpravo).....	56
Obrázek 43 Horní pohled na navinutý stator motoru dle Laimera (vlevo); Izometrický pohled na navinutý stator motoru dle Laimera (vpravo)	57
Obrázek 44 Schéma zapojení vinutí statoru pro motor dle Laimera [87].....	58
Obrázek 45 Snímek statoru dle Laimera z termokamery Flir.....	58
Obrázek 46 Konvenční stator 6008 bez vinutí (vlevo); Schéma zapojení vinutí pro stator 6008 při použití 22 magnetů v rotoru [88].....	59
Obrázek 47 Řez 3D modelem motoru 6008 (vlevo); Stator 6008 s vinutím ukončeným do trojúhelníka (vpravo)	60
Obrázek 48 Provoz motoru 6008 při 15 V.....	61
Obrázek 49 Schéma zapojení vinutí statoru 4030 při použití 14 magnetů v rotoru (vlevo); Průběh navíjení svazkem čtyř 0,6 mm drátů (vpravo).....	62

Obrázek 50 Makroskopický pohled na vinutí a strukturu statoru 4030 (vlevo); Celkový pohled na navinutý stator do trojúhelníka (vpravo).....	63
Obrázek 51 Řez 3D modelem motoru 4030 (vlevo); Kompletní motor 4030 12N14P (vpravo)	63

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 Časový průběh provozu motoru se statorem s jemným vnutím	50
Tabulka 2 Časový průběh provozu motoru se statorem s hrubým vnutím	51
Tabulka 3 Časový průběh provozu motoru 3N4P s magnety Ø12 x 2 mm	53
Tabulka 4 Časový průběh provozu motoru 3N4P s magnety Ø12 x 4 mm	54

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha P I:	Výkres 00-000-01 – Spojka hřídele a rotoru
Příloha P II:	Výkres 01-000-00 – Stator 2820
Příloha P III:	Výkres 02-000-00 – Tělo motoru 6008
Příloha P IV:	Výkres 02-001-00 – Motor 6008 sestava
Příloha P V:	Výkres 02-002-00 – Rotor 6008
Příloha P VI:	Výkres 03-000-00 – Tělo motoru 3N4P 20 mm
Příloha P VII:	Výkres 03-001-00 – Rotor 3N4P 20x2 mm
Příloha P VIII:	Výkres 03-002-00 – Oblý stator
Příloha P IX:	Výkres 03-003-00 – Motor 3N4P 20 mm sestava
Příloha P X:	Výkres 04-000-00 – Kulatý stator 12 mm
Příloha P XI:	Výkres 04-001-00 – Tělo motoru 3N4P 12 mm
Příloha P XII:	Výkres 04-002-00 – Rotor 3N4P 12 mm
Příloha P XIII:	Výkres 04-003-00 – Hřídel 2 mm
Příloha P XIV:	Výkres 04-004-00 – 3N4P rotor 12x4 mm magnety
Příloha P XV:	Výkres 04-005-00 – Motor 3N4P 12 mm sestava
Příloha P XVI:	Výkres 05-000-00 – Motor 4030 sestava
Příloha P XVII:	Výkres 05-001-00 – Tělo motoru 4030
Příloha P XVIII:	Výkres 05-002-00 – Rotor 4030
Příloha P XIX:	Výsledky zkoušky rázové houževnatosti
Příloha P XX:	3D modely