



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH  
TECHNOLOGIÍ**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

**ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A ELEKTRONIKY**

DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING

**VYSOKOOTÁČKOVÝ STROJ SE SPECIÁLNÍ  
KONSTRUKCÍ ROTORU**

HIGH-SPEED MACHINE WITH A SPECIAL ROTOR DESIGN

**TEZE DISERTAČNÍ PRÁCE**

SUMMARY OF DOCTORAL THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**Ing. Petr Klíma**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

ADVISOR

**doc. Ing. Ondřej Vítek, Ph.D.**

**BRNO 2024**

## ABSTRAKT

Vysokootáčkové stroje mají vzhledem k vysoké hustotě výkonu ve výzkumu značnou popularitu a pro mnoho aplikací nabízejí výborné technické řešení. Dosud však mezi těmito stroji chyběli z důvodu nízké mechanické odolnosti a výrobních omezení zástupci synchronních reluktančních strojů. Pro rozšíření možností vysokootáčkových strojů o tento typ strojů bylo vybráno řešení využívající progresivní technologii vícemateriálové aditivní výroby kovů. Na základě nových výrobních možností umožněných použitím této technologie byla upravena a inovována stávající topologie axiálně laminovaného anizotropního synchronního reluktančního rotoru. Díky tomu bylo navrženo řešení rotoru s využitím magnetických bariér s přirozeným tvarem siločár z nemagnetické nerezové oceli 316L v kombinaci s magneticky vodivou nerezovou ocelí 17-4PH. Dle provedených výpočtů byly predikovány vlastnosti tohoto řešení rotoru vykazující výbornou mechanickou odolnost a dobré elektromagnetické vlastnosti. Na základě těchto předpokladů byl proveden návrh a optimalizace vysokootáčkového reluktančního motoru s tímto rotorem a jmenovitými parametry 2 kW, 60 000 min<sup>-1</sup>. Pro usnadnění optimalizace bylo v jazyce Python vytvořeno množství skriptů a programů jako například optimalizační prostředí a logika využívající optimalizační algoritmus NSGA-II, skripty pro ovládání a zpracování elektromagnetických simulací pomocí metody konečných prvků a tepelný model spolu s grafickým rozhraním pro zjištění očekávaných teplot ve stroji. Na základě optimalizace byl vybrán výsledný stroj, který byl posléze vyroben. Během výroby byla změřena změna indukčnosti rotoru před a po tepelném zpracování a ověřena homogenita mikrotvrdomosti čela rotoru. Poté byly otestovány vlastnosti kompletního stroje statickými a dynamickými měřeními a bylo provedeno srovnání se simulacemi. Při měření stroje bylo dosaženo přibližně dvou třetin jmenovitých otáček kvůli nadměrným vibracím, což zapříčinilo nutnost ověření parametrů stroje při nižších než jmenovitých otáčkách. Tyto kroky však byly dostačující a díky nim byla úspěšně ověřena funkčnost a použitelnost navrhovaného řešení rotoru vysokootáčkového reluktančního stroje. Navíc se jedná o jeden z prvních publikovaných a změřených strojů s rotorem vyrobeným pomocí vícemateriálové aditivní výroby kovů. Díky tomu bylo představeno nové řešení obohacující možnosti těchto vysokootáčkových strojů, což je potvrzeno získáním patentu na toto řešení. Během této práce rovněž vyvstalo množství otázek a cest pro další výzkum.

## KLÍČOVÁ SLOVA

Axiálně laminovaný rotor, optimalizace, plný rotor, synchronní reluktanční rotor, vysokootáčkový motor, vícemateriálová aditivní výroba

## ABSTRACT

High-speed machines are widely popular in research due to their high power density, offering excellent technical solutions for many applications. However, synchronous reluctance machines have been absent from this group due to their low mechanical robustness and manufacturing limitations. To address these limitations and broaden the range of high-speed machine solutions, an advanced multi-material additive manufacturing technology of metals was selected. Leveraging the new production possibilities enabled by this technology, the existing topology of the axially laminated anisotropic synchronous reluctance rotor was modified and improved. This resulted in a new rotor design featuring magnetic barriers shaped according to natural flux lines made from non-magnetic 316L stainless steel combined with magnetically conductive 17-4PH stainless steel. Calculations predicted that this rotor design would provide excellent mechanical robustness and electromagnetic properties. Building on these predictions, a 2 kW, 60 000 min<sup>-1</sup> high-speed reluctance motor featuring this rotor was designed and optimized. To support the optimization process, various scripts and programs were developed in Python, including an optimization environment and logic using the NSGA-II optimization algorithm, scripts for controlling and processing electromagnetic simulations via the finite element method, and a thermal model with a graphical interface to estimate expected temperatures in the machine. Following this optimization, the final machine design was selected and subsequently manufactured. During manufacturing, the rotor's inductance was measured both before and after heat treatment, and the homogeneity of the rotor face's microhardness was verified. The complete machine's properties were then tested through static and dynamic measurements, with results compared against simulations. During the testing, the machine reached approximately two-thirds of its nominal speed due to excessive vibrations, requiring further performance verification at lower speeds. Nonetheless, these steps were sufficient to validate the functionality and feasibility of the proposed rotor design for the high-speed reluctance machine. Additionally, this is one of the first published and tested machines with a rotor manufactured using multi-material metal additive metal manufacturing. This work presents a novel solution that expands the possibilities for high-speed machines, as confirmed by the awarded patent for this design. Furthermore, the research raised numerous questions and opened new paths for further investigation.

## KEYWORDS

Axially laminated rotor, high-speed motor, multi-material additive manufacturing, optimization, solid rotor, synchronous reluctance motor

# Obsah

|  |           |
|--|-----------|
| <b>Úvod</b>  | <b>8</b>  |
| Motivace . . . . .   | 8         |
| Cíle práce . . . . .   | 9         |
| <b>1 Vysokootáčkové stroje</b>                                       | <b>10</b> |
| 1.1 Možnosti zlepšení stávajících vysokootáčkových strojů . . . . .  | 11        |
| 1.1.1 Kombinace bariérové a axiálně laminované anizotropní topologie | 11        |
| <b>2 Aditivní výroba kovů</b>  | <b>12</b> |
| 2.1 Druhy aditivní výroby . . . . .                                  | 12        |
| 2.1.1 Selective Laser Melting . . . . .                              | 12        |
| 2.2 Materiály v práškové aditivní výrobě . . . . .                   | 13        |
| 2.3 Použití aditivní výroby v elektrických strojích . . . . .        | 13        |
| 2.4 Výběr technologie výroby rotoru řešeného stroje . . . . .        | 13        |
| <b>3 Inovovaná topologie synchronního reluktančního stroje</b>       | <b>14</b> |
| 3.1 Topologie rotoru vyrobená pomocí aditivní technologie . . . . .  | 14        |
| 3.2 Zhodnocení řešené topologie . . . . .                            | 15        |
| <b>4 Optimalizace stroje</b>   | <b>17</b> |
| 4.1 Nastavení optimalizace . . . . .                                 | 17        |
| 4.2 Výsledky optimalizace . . . . .                                  | 19        |
| <b>5 Výroba stroje</b>   | <b>23</b> |
| 5.1 Statorový svazek . . . . .                                       | 23        |
| 5.2 Rotor . . . . .  | 24        |
| 5.2.1 Aditivně vyrobené aktivní části . . . . .                      | 25        |
| 5.2.2 Měření indukčností . . . . .                                   | 26        |
| 5.2.3 Měření mikrotvrdotí . . . . .                                  | 27        |
| 5.3 Zkompletovaný stroj . . . . .                                    | 28        |
| <b>6 Ověření vlastností stroje měřením</b>                           | <b>30</b> |
| 6.1 Statické měření . . . . .  | 30        |
| 6.2 Test maximálních otáček . . . . .                                | 31        |
| 6.2.1 Maximální otáčky . . . . .                                     | 31        |
| 6.2.2 Doběhová charakteristika . . . . .                             | 32        |
| 6.3 Test naprázdno . . . . .   | 33        |
| 6.4 Test při zatížení . . . . .                                      | 34        |

|   |           |
|---|-----------|
| 6.4.1 Srovnání měření se simulacemi . . . . . | 35        |
| <b>Závěr</b>                                  | <b>37</b> |
| <b>Literatura</b>                             | <b>41</b> |
| <b>Seznam autorových publikací</b>            | <b>51</b> |
| <b>Curriculum Vitae</b>                       | <b>53</b> |

# Seznam obrázků

|      |   |    |
|------|---|----|
| 1.1  | Přehled publikovaných vysokootáčkových strojů rozdělených dle typů  | 10 |
| 3.1  | Příklad <b>av!</b> topologie <b>ala!</b> s tvarovanými bariérami. . . . .                                     | 14 |
| 3.2  | Závislost momentu na permeabilitě magnetického a nemagnetického materiálu modelu. . . . .                     | 16 |
| 3.3  | Rozložení mechanického napětí v rotoru pro dané koeficienty teplotní roztažnosti materiálů . . . . .          | 16 |
| 4.1  | Optimalizované geometrické parametry stroje. . . . .  | 18 |
| 4.2  | Všechny stroje korektně vypočítané během optimalizace. . . . .  | 20 |
| 4.3  | Model a rozložení magnetické indukce stroje vybraného pro výrobu. . . . .                                     | 21 |
| 4.4  | Výsledky tepelného modelu vybraného stroje. . . . .   | 22 |
| 4.5  | Mechanické napětí von Mises v rotoru vybraného stroje . . . . .   | 22 |
| 4.6  | Campbellův diagram pro rotor řešeného stroje. . . . .   | 22 |
| 5.1  | Stav průběhu výroby obou strojů. . . . .  | 23 |
| 5.2  | Navinuté statorové svazky . . . . .   | 24 |
| 5.3  | Průřez pixelizované verze rotorové geometrie použité při výrobě technologií <b>slm!</b> . . . . .             | 25 |
| 5.4  | Postup výroby a měření rotoru. . . . .  | 25 |
| 5.5  | Rotory vyrobené <b>av!</b> . . . . .  | 26 |
| 5.6  | Měření indukčností sestavy rotor-stator. . . . .  | 26 |
| 5.7  | Srovnání změřené indukčnosti sestavy rotor-stator před a po tepelném zpracování . . . . .                     | 27 |
| 5.8  | Rotor s vyznačenými body, kde byla měřena mikrotvrdost. . . . .   | 27 |
| 5.9  | Snímek rozhraní pod mikroskopem. . . . .  | 29 |
| 5.10 | Vyrobený stroj s aktivní délkou 10 mm. . . . .  | 29 |
| 6.1  | Změřená indukčnost stroje . . . . .   | 30 |
| 6.2  | Spektrum amplitudy zrychlení vibrací při otáčkách 39 000 min <sup>-1</sup> ve všech měřených směrech. . . . . | 32 |
| 6.3  | Změřená doběhová charakteristika stroje . . . . .   | 33 |
| 6.4  | Závislost ztrát naprázdno na otáčkách a sycení. . . . .   | 34 |
| 6.5  | Měřicí pracoviště při měření zatěžovacích charakteristik do 15 000 min <sup>-1</sup>                          | 34 |
| 6.6  | Závislost účinnosti na momentu pro různé sycení motoru při daných otáčkách . . . . .                          | 35 |

# Seznam tabulek

|     |  |    |
|-----|--|----|
| 3.1 | Požadavky na materiálové vlastnosti magneticky vodivého a nevodi-<br>vého materiálu řešené topologie SynRM . . . . . | 15 |
| 4.1 | Přehled použitých materiálů stroje . . . . .   | 17 |
| 4.2 | Optimalizované parametry . . . . .   | 18 |
| 4.3 | Optimalizační cíle . . . . .   | 19 |
| 4.4 | Vstupní parametry výsledného stroje . . . . .  | 20 |
| 4.5 | Výstupní elektromagnetické parametry vybraného stroje . . . . .  | 21 |
| 5.1 | Změřená mikrotvrдость HV <sub>0,3</sub> (-) ve vybraných místech čela rotoru . . . . .                               | 28 |
| 6.1 | Porovnání očekávaných a změřených indukčností stroje . . . . .   | 31 |
| 6.2 | Srovnání finálního stroje dle simulací a dle měření při daných pod-<br>mínkách . . . . .                             | 36 |

# Úvod

## Motivace

Elektrické stroje tvoří nedílnou součást průmyslu i běžného života. Podílejí se velkou měrou jak na výrobě, tak na spotřebě elektrické energie. Zároveň umožňují rozsah pohybu od velkých vzdáleností v řádu stovek až tisíců kilometrů v trakčních aplikacích, tak zprostředkování pohybu po trajektoriích s přesností vyšší než na milimetry v robotických aplikacích. Díky těmto a dalším parametrům jsou elektrické motory hojně využívány v průmyslových aplikacích například na pohon pump, větráků, kompresorů a systémů pro manipulaci s materiály [1]. Mezi další příklady oblasti využití patří například doprava a jako ovládání různých zařízení.

V roce 2021 se elektrické stroje dle dat Eurostatu podílely na výrobě přibližně 94% elektrické energie v Evropské unii [2]. Z hlediska spotřeby se elektrické motory dle mezinárodní energetické agentury podílely v roce 2022 na spotřebě asi 65% elektrické energie v průmyslu [1]. Tyto statistiky ukazují jejich velký dopad na každodenní život, z čeho plyne důležitost zabývat se jejich studiem a jejich inovování.

V současné době se vývoj elektrických strojů zaměřuje na maximalizaci jejich účinnosti a výkonové hustoty. Právě podmínku velké výkonové hustoty velmi dobře splňují vysokootáčkové stroje a tak v posledních dekáдах přitahuje jejich vývoj značnou pozornost. Vysoké otáčky těchto strojů umožňují kromě již zmíněné produkce velkého výkonu při malých rozměrech a hmotnosti i možnost přímého připojení k zátěži bez nutnosti použití převodovky, čímž je možné zvýšit jednoduchost a spolehlivost systémů [3].

Při hledání nových inovací v oblasti těchto strojů je logické využití nejnovějších výrobních technologií. Jednou z takových technologií je aditivní výroba kovů (**av!**). V poslední době se objevují pokusy o aplikaci této technologie pro výrobu částí konvenčních elektrických strojů [4]. Takto vyrobené části zahrnují jak vinutí, tak kostru a magnetický obvod. Díky této technologii je kromě konvenčních tvarů jednotlivých částí možné vyrobit i tvary komplexnější, často jiným způsobem buď velmi obtížně, či úplně nevyrobitelné. Komplexnost těchto tvarů má za cíl nejčastěji zlepšení chlazení dané části, avšak využití zaměřené na hlavní funkci elektrických strojů často chybí. Z hlediska publikací je poměrně rozšířená **av!** z jednoho materiálu, avšak v poslední době se začíná rozšiřovat i výroba z více materiálů v jedné vrstvě [5].

Díky využití **av!** ve výrobě rotorů vysokootáčkových strojů by mohlo dojít k rozšíření možností při návrhu těchto strojů. Tyto možnosti by se mohly týkat jak vylepšení výsledných parametrů strojů, tak by mohly případně přinést novou využitelnou topologii. V konečném důsledku by tak mohlo touto inovací dojít k pozitivnímu

ovlivnění některých průmyslových aplikací.

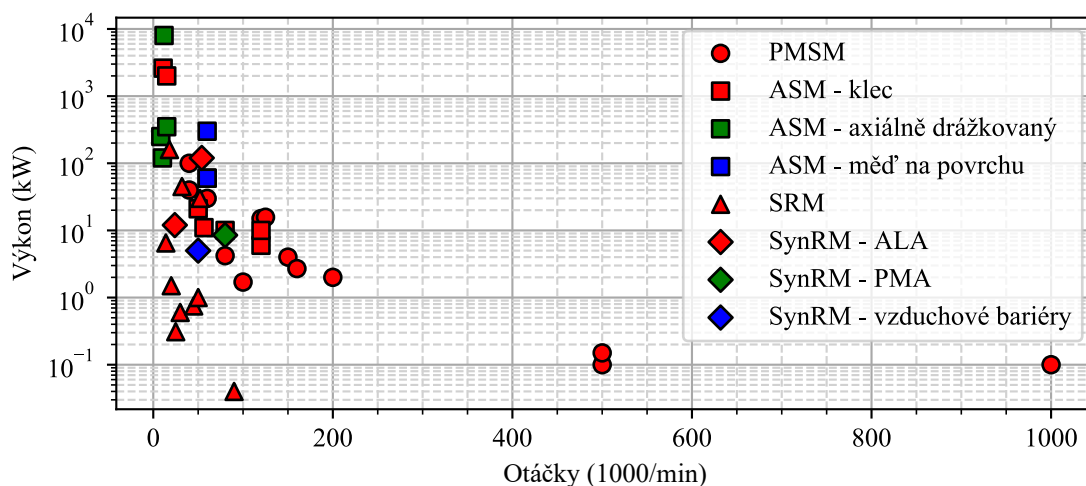
## **Cíle práce**

- Návrh vysokootáčkového stroje se zaměřením na zlepšení rotoru oproti stávajícímu stavu poznání pomocí aditivní výroby kovů.
- Ověření teoretických předpokladů pomocí multifyzikální analýzy.
- Optimalizace řešeného stroje.
- Ověření předpokladů a výpočtů měřením.

# 1 Vysokootáčkové stroje

Jako vysokootáčkové stroje se všeobecně považují stroje s obvodovou rychlostí rotoru převyšující 100 m/s [6]. Díky této vysoké obvodové rychlosti obvykle dosahují vyšších výkonových hustot než nízkootáčkové stroje. Zároveň je při jejich použití v aplikacích vyžadujících vysoké otáčky možné odstranění převodovky, čímž může být dosaženo jednoduššího a spolehlivějšího pohonného systému. Příklady typického využití těchto strojů jsou v průmyslových aplikacích například kompresory [7–9], vakuové vývěvy [10, 11] a obráběcí nástroje [12, 13], zatímco v leteckých aplikacích jsou využity například jako startér-generátory [14–16].

Na obr. 1.1 je zobrazen přehled publikovaných vysokootáčkových strojů se jmenovitými hodnotami otáček a výkonu rozdělených dle typu stroje a rotorové topologie.



Obr. 1.1: Přehled publikovaných vysokootáčkových strojů rozdělených dle typů [7, 9, 16–56].

Z tohoto přehledu vyplývá, že nejvyšších pracovních otáček bylo dosud dosaženo se synchronním strojem s permanentními magnety (**pmsm!**) [29] a všeobecně lze tvrdit, že se tento typ stroje používá pro vyšší hodnoty otáček než ostatní stroje. Naproti tomu asynchronní motory (**asm!**) se používají spíše pro nižší otáčky, avšak s vyšším výstupním výkonem. Také spínané reluktanční motory (**srm!**) se rovněž používají pro aplikace s nižšími otáčkami, avšak s nižším výkonem. Poslední zmíněný typ, **synrm!**, je ve vysokootáčkových aplikacích zastoupen spíše okrajově.

## 1.1 Možnosti zlepšení stávajících vysokootáčkových strojů

Na základě literární rešerše o publikovaných řešeních vysokootáčkových strojů bylo provedeno vytipování potenciálu pro zlepšení u jednotlivých typů strojů. Na základě toho bylo určeno další zaměření této práce. Vzhledem k jednodušší výrobě a nižším nákladům na výrobu stroje pro ověření byly zkoumány možnosti zlepšení především u strojů s nižšími výkony.

Nejpopulárnější typ stroje pro vysokootáčkové aplikace s výkony v řádu jednotek až desítek kilowatt jsou **pmsm!** a to především z důvodu vysoké výkonové hustoty. Avšak vzhledem k velkému zaměření průmyslu a výzkumníků na tuto topologie je u nich poměrně malý prostor pro výrazné zlepšení.

Toto v kombinaci s riziky spojenými s možnými fluktuacemi cen a možnými problémy s dodávkami permanentních magnetů ze vzácných zemin nasměrovalo zaměření této práce na řešení nabízející alternativu tomuto typu stroje. Největší smysl dává nalezení alternativy zejména pro aplikace, kde má tato topologie slabá místa. Jedno z těchto slabých míst by mohly být aplikace s vysokou teplotou rotoru.

Následně byly tudíž zkoumány možnosti nalezení této alternativy v **asm!**, **srm!** a **synrm!**. Vzhledem k silné stránce **srm!** v podobě jednoduché topologie a napájení byl tento typ stroje zvolen jako nevhodný pro hledání vylepšení oproti stávajícímu stavu. Avšak u **asm!** a **synrm!** byly na základě literární rešerše stávajících topologií určeny následující možnosti zlepšení.

### 1.1.1 Kombinace bariérové a axiálně laminované anizotropní topologie

Poslední z navržených možných řešení je kombinace bariérové a **ala!** topologie **synrm!**. Při použití tohoto řešení by při výběru vhodných materiálů bylo možné dosažení mechanických vlastností rotoru blízkých vlastnostem plného válce. Jediný rozdílný požadavek na magnetický a nemagnetický materiál by byl na hodnotu relativní permeability, aby zůstal zachován rozdíl indukčností stroje v osách  $d$  a  $q$ . Při použití například magnetické a nemagnetické oceli by tudíž mělo být možné zvolit materiály s podobnou hodnotou koeficientu tepelné roztažnosti, díky čemuž by měl rotor vykazovat výbornou odolnost vůči zvýšené teplotě.

Díky kombinaci těchto topologií by bylo možné odstranění mechanické náchylnosti bariérové topologie, rozšíření možných tvarů bariér a zvýšení možného počtu pólů axiálně laminované anizotropní topologie. Zároveň by bylo možné odstranění můstků bariérové topologie, čímž by v závislosti na použitých materiálech mohlo být dosaženo vyšších poměrů indukčností v  $dq$  osách.

## 2 Aditivní výroba kovů

Navržená nová řešení rotorů vysokootáčkových strojů se týkají především odstranění tvarových a materiálových omezení při jejich výrobě. Vzhledem k velkým odstředivým silám působícím na rotory těchto strojů jsou kladeny velké nároky na přesnost těchto rotorů a v případě použití více materiálů i na kvalitu jejich spojení. U konvenční výroby subtraktivními metodami by to mohlo znamenat nevhodné náklady a problémovou opakovatelnost výroby.

Toto by však mohla vyřešit nově se rozšiřující technologie **av!** [57]. Na rozdíl od subtraktivních metod, kde je z výchozího polotovaru odstraněn přebytečný materiál, je v případě **av!** materiál přidáván a to pouze v těch místech, kde se má u finálního tvaru výrobku nacházet. Konkrétní provedení je závislé na použitém druhu této technologie [58]. Takto vyrobené výrobky mohou dosahovat unikátních tvarů a vlastností [59].

### 2.1 Druhy aditivní výroby

Existuje mnoho druhů výrobních procesů patřících do **av!**. Nejjednodušší rozdělení jednotlivých metod je podle formy, v jaké je do procesu dodáván kovový materiál - prášek, drát, či plech. Vzhledem k schopnosti výroby objektů s přesnějšími detaily se jako nejvhodnější metody pro výrobu elektrických strojů menších rozměrů jeví ty využívající prášek [60].

Metody **av!** z prášků lze rozdělit na Selective Laser Melting (**slm!**), Electron Beam Melting (**ebm!**), Direct Laser Metal Deposition (**dlmd!**) a Binder Jetting (**bjg!**).

#### 2.1.1 Selective Laser Melting

Vzhledem k širokému rozsahu použitelných materiálů (dobře svařitelné slitiny Al, Ti, Fe, Ni, Co, Cu) [61], možnosti více-materiálové výroby a dobré rozlišitelnosti je technologie **av! slm!** nejuniverzálnější metodou výroby. Hlavní částí postupu výroby je cyklický proces nanášení práškové vrstvy a následné tavení prášku lasery v daných místech [62].

Nevýhoda **slm!** je zejména pomalý proces výroby s vysokou spotřebou energie [63] a vysokými náklady na vstupní materiál ve formě prášku [64]. Zároveň je vzhledem ke komplexnímu způsobu výroby náročné odladění procesních parametrů pro dosažení dobrých výsledků tisku z daného materiálu [65]. To může být velkou výzvou zejména při vícemateriálové výrobě z materiálů požadujících různé procesní parametry.

## 2.2 Materiály v práškové aditivní výrobě

Pro práškovou **av!** se typicky používají prášky různých kovů po procesu atomizace. Tyto prášky jsou složeny z částic řádově o velikosti nízkých desítek  $\mu\text{m}$  [66]. K jejich získání je v procesu atomizace původní materiál nejprve roztaven, poté je tato tavenina rozdělena na malé kapky, které jsou rychle zchlazeny, což způsobí ztuhnutí do pevného skupenství ve formě prášku [67]. Jednotlivé metody atomizace se liší především způsobem tavení a rozdělení původního materiálu na tekuté kapky [68].

Principiálně může být jakýkoliv průmyslově využívaný kovový materiál přeměněn na formu atomizovaného prášku [69]. Nevýhoda této formy kovových materiálů je mnohonásobně vyšší pořizovací cena oproti materiálu ve formě drátů, tyčí a plechů. Umožňuje však výrobu pomocí práškové **av!**.

## 2.3 Použití aditivní výroby v elektrických strojích

Hlavní publikovaná použití **av!** v oblasti elektrických strojů se soustředí na výrobu vinutí a satorových svazků se speciální úpravou pro zlepšení chlazení [70]. Kromě toho bylo publikováno úspěšné použití při výrobě satorů [71, 72]. Úspěšná výroba a měření strojů s rotorem vyrobeným **av!** však byla dosud publikována jen zřídka. Jednalo se o rotor spínaného reluktančního stroje publikovaný v [73] a železo klecového rotoru **asm!** publikované v [74]. V obou těchto případech se jednalo o jednomateriálovou výrobu konvenčních rotorových topologií. Aplikace vícemateriálové **av!** v elektrických strojích a její využití v nových topologiích je tudíž prozatím poměrně neprozkoumaná oblast výzkumu a vývoje.

Při výrobě zmíněných rotorů a satorů byla jako materiál použita ocel s vysokým obsahem křemíku. Díky tomu bylo možné vyrobít části s vysokou relativní permeabilitou a vyšší hodnotou rezistivity.

## 2.4 Výběr technologie výroby rotoru řešeného stroje

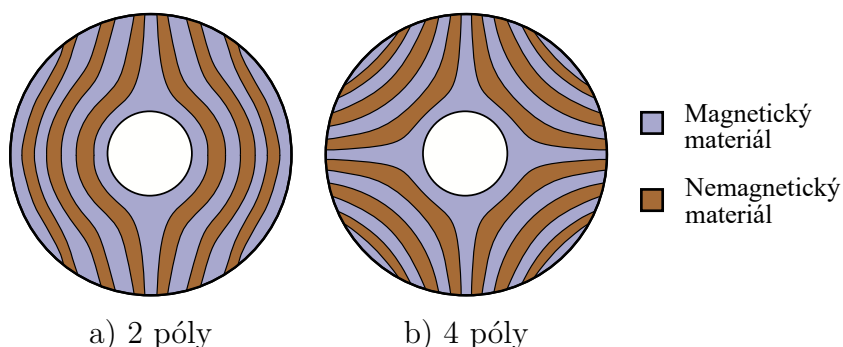
Na základě provedeného přehledu jednotlivých práškových technologií **av!** byl proveden výběr technologie pro pozdější výrobu rotoru řešeného stroje. Technologie **bjg!** nebyla použitelná vzhledem k nevhodnosti pro výrobu mechanicky namáhaných částí a technologie **ebm!** neposkytovala možnost použití vhodných magnetických materiálů. Obě z technologií **slm!** a **dlmd!** umožňovaly použití vhodných materiálů, avšak vzhledem ke komerční dostupnosti vícemateriálové výroby bylo zvoleno použití technologie **slm!**.

### 3 Inovovaná topologie synchronního reluktančního stroje

Na základě literární rešerše v kap. 1 a určení možných zlepšení topologií vysokootáčkových strojů bylo zvoleno zaměření zbytku práce na inovaci a spojení bariérové a axiálně laminované anizotropní topologie **synrm!**. Základním kamenem pro úspěšné spojení těchto topologií je volba vhodného způsobu výroby, který by toto spojení umožňoval. K tomu byla zvolena **av!** metodou **slm!**, díky které je umožněna značná volnost geometrie rotoru a výsledná mechanické spojení obou materiálů se blíží kvalitou svařování.

#### 3.1 Topologie rotoru vyrobená pomocí aditivní technologie

Díky zaměření se na technologii **av!** bylo možné vytvořit ideový návrh nové topologie. Jak již bylo zmíněno, ta spojuje především výhody topologie se vzduchovými bariérami a axiálně laminované anizotropní topologie. Průřez možné podoby této topologie v dvupólové a čtyřpólové variantě je zobrazen na obr. 3.1.



Obr. 3.1: Příklad **av!** topologie **ala!** s tvarovanými bariérami.

Magneticky vodivá část rotoru je z magnetické oceli, zatímco bariéry jsou tvořeny nemagnetickou ocelí. Díky **av!** lze bariéry rotoru libovolně tvarovat, například dle teoretického tvaru siločar v plném rotoru, což u konvenčně vyrobené axiálně laminované topologie není prakticky proveditelné. Jelikož jsou jednotlivé vrstvy rotoru pevně spojeny laserováním při výrobě, není potřeba řešit spoj například lepením, či šroubováním. Zároveň není nutná přítomnost můstků z magneticky vodivého materiálu, čímž je omezena magnetická vodivost v ose  $q$ .

Další výhodou této topologie je velká mechanická odolnost rotoru. Jelikož jsou oba použité materiály oceli, mají podobnou hustotu, teplotní roztažnost a modul

pružnosti. Zároveň mohou mít při vhodné volbě těchto ocelí vysokou mez kluzu v tahu. Díky těmto vlastnostem je tato topologie vhodná pro vysokootáčkové aplikace, kde vyniká odolností vůči odstředivým silám a dobrou tuhostí zvyšující kritické otáčky.

Jelikož je rotor této topologie z plného elektricky vodivého materiálu, lze očekávat oproti radiálně laminovaným rotorům značný vliv ztrát vířivými proudy na účinnost stroje a teplotu rotoru.

Topologie řešená v této práci je tvořena dvěma materiály, na které jsou kladeny různé požadavky na jejich vlastnosti. Tyto požadavky jsou zobrazeny v tab. 3.1. Dále jsou jednotlivé požadavky rozebrány v kapitolách zabývajících se elektromagnetickými a mechanickými vlastnostmi řešené topologie.

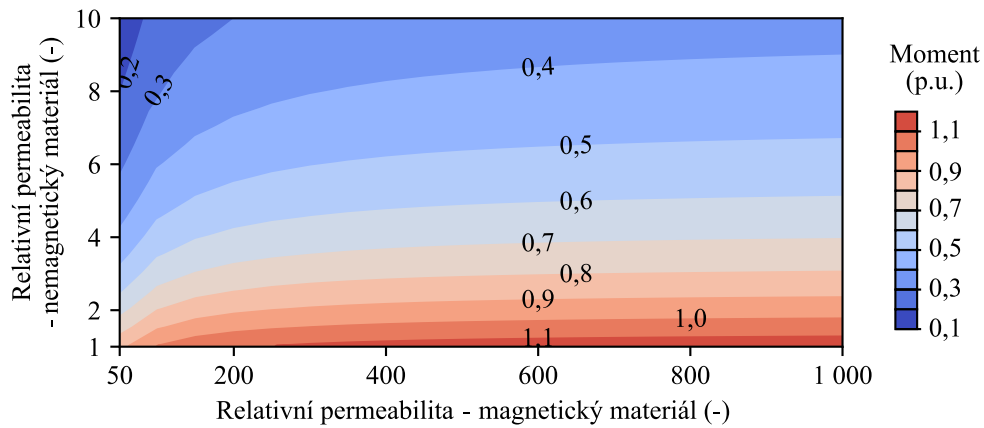
Tab. 3.1: Požadavky na materiálové vlastnosti magneticky vodivého a nevodivého materiálu řešené topologie SynRM

| Veličina                        | Jednotka          | Magnetický vodič | Magnetická bariera |
|---------------------------------|-------------------|------------------|--------------------|
| Permeabilita                    | -                 | Vysoká           | Nízká              |
| Elektrická vodivost             | MS/m              | Nízká            | Nízká              |
| Hustota                         | kg/m <sup>3</sup> |                  | Stejná             |
| Koeficient teplotní roztažnosti | 1/K               |                  | Stejný             |
| Mez kluzu                       | MPa               | Vysoká           | Vysoká             |

## 3.2 Zhodnocení řešené topologie

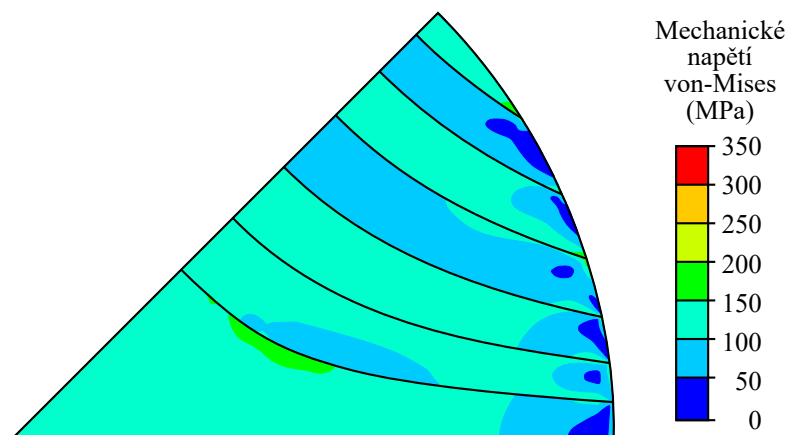
Na základě provedených elektromagnetických a mechanických výpočtů a analýz byly ukázány jevy vyskytující se při použití této topologie jako vysokootáčkový motor. Zároveň byly vytvořeny podklady pro následný návrh laboratorního vzorku stroje, na kterém by byly výpočty a předpoklady potvrzeny měřením.

Z hlediska momentu a účinnku stroje byl ověřen kritický požadavek na permeabilitu nemagnetického materiálu blízkou permeabilitě vakua, jak lze vidět na obr. 3.2. Další kritickou veličinou je radiální délka vzduchové mezery, která může značně potlačit ztráty vířivými proudy, avšak za cenu snížení momentu a účinnku stroje. Pro snížení ztrát vířivými proudy v rotoru je rovněž vhodné vybrat materiál s nízkou hodnotou elektrické vodivosti. Vzhledem k malému vlivu magnetických klínů na ztráty vířivými proudy bylo rozhodnuto o jejich nevyužití v testovacím stroji.



Obr. 3.2: Závislost momentu na permeabilitě magnetického a nemagnetického materiálu modelu.

Z mechanického hlediska byl ověřen zásadní vliv rozdílných teplotních roztažností na velikost mechanického napětí při vysoké teplotě rotoru, jak lze vidět na obr. 3.3. Vliv rozdílných hodnot hustoty a Youngova modulu pružnosti byl značně menší.



Obr. 3.3: Rozložení mechanického napětí v rotoru pro koeficient teplotní roztažnosti magnetického materiálu  $10 \cdot 10^{-6}/K$  a nemagnetického materiálu  $16 \cdot 10^{-6}/K$ .

Tyto poznatky byly později aplikovány při výběru materiálů rotoru a následném návrhu ověřovacího stroje. Vzhledem k potenciálu řešené topologie pro výrobu **av!** byla zpracována a podána patentová přihláška na český úřad průmyslového vlastnictví. Tato žádost byla přijata a 3.1.2024 byl udělen patent s názvem *Způsob výroby rotoru synchronního reluktančního motoru a rotor synchronního reluktančního motoru* dostupný v [75]. Udělení patentu ukazuje novost navrhovaného řešení **synrm!** a tématu dizertační práce.

## 4 Optimalizace stroje

Vzhledem k úspěšnému ověření funkčnosti řešené topologie pomocí elektromagnetických a mechanických simulací bylo přistoupeno k návrhu stroje pro výrobu a pozdější ověření měřením. Přehled použitých materiálů jednotlivých částí stroje je v tab. 4.1

Tab. 4.1: Přehled použitých materiálů stroje

| Součást         |              | Materiál |
|-----------------|--------------|----------|
| Statorový plech |              | M270-35A |
| Vodič vinutí    |              | Měď      |
| Materiál rotoru | magnetický   | 17-4PH   |
|                 | nemagnetický | 316L     |
| Hřídel          |              | 1.0580   |
| Kostra          |              | Hliník   |

Řešený vysokootáčkový **synrm!** byl optimalizován s využitím elektromagnetického a tepelného modelu. Z důvodu předpokladu dobré mechanické odolnosti rotoru bylo mechanické namáhání ověřeno pouze na finálním návrhu.

Vzhledem ke složitosti použité geometrie a požadavku dobré přesnosti bylo pro získání elektromagnetických parametrů řešeného stroje zvoleno použití **mkp!** v programu Ansys Maxwell.

### 4.1 Nastavení optimalizace

Použitím optimalizačního algoritmu **nsgaii!**, elektromagnetického modelu využívajícího **mkp!**, tepelného modelu využívajícího metodu tepelné sítě a vytvořené struktury optimalizace byla provedena optimalizace řešeného vysokootáčkového **synrm!** s vícemateriálovým **av!** plným rotorem.

Cílové parametry optimalizovaného **synrm!** byly:

- Použití **av!** při výrobě rotoru
- Jmenovité otáčky  $60\,000\text{ min}^{-1}$
- Délka rotoru max. 40 mm
- Teplota rotoru max.  $200^{\circ}\text{C}$

#### Optimalizované parametry stroje

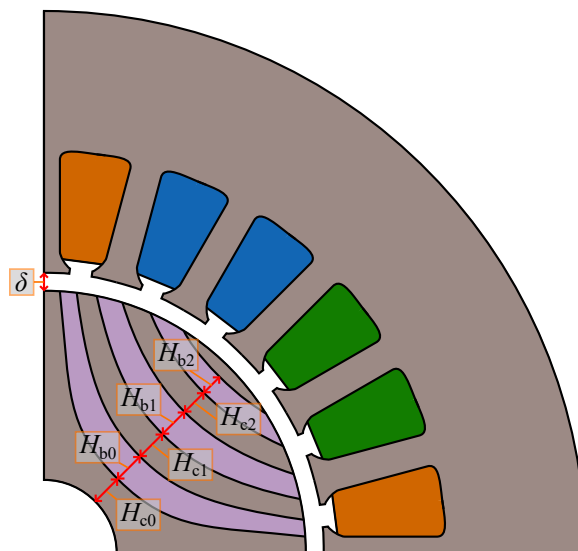
Výčet optimalizovaných parametrů stroje spolu s rozsahem jejich hodnot a krokem je zobrazen v tab. 4.2. Výběr minimálních a maximálních hodnot jednotlivých para-

metrů byl proveden za využití zkušeností s daným typem stroje, pokusných výpočtů a geometrických omezení. Optimalizované rozměrové parametry jsou graficky zobrazeny na obr. 4.1.

Parametr proudu statorovým vinutím odpovídá celkovému proudu všemi vodiči statorové drážky. Díky tomu bylo možné určit počet vodičů v drážce až po optimalizaci. Hlavním určujícím počtu vodičů poté byla maximální velikost napětí dostupného měniče.

Tab. 4.2: Optimalizované parametry

| Parametr                    | Označení | Jednotka | Rozsah |      | Krok |
|-----------------------------|----------|----------|--------|------|------|
|                             |          |          | min.   | max. |      |
| Proud statorovým vinutím    | $I$      | A        | 125    | 280  | 0,1  |
| Délka vzduchové mezery      | $\delta$ | mm       | 0,5    | 2,5  | 0,01 |
| Výška vodivé části rotoru 0 | $H_{c0}$ | mm       | 0,5    | 3,0  | 0,05 |
| Výška vodivé části rotoru 1 | $H_{c1}$ | mm       | 1,5    | 4,0  | 0,05 |
| Výška vodivé části rotoru 2 | $H_{c2}$ | mm       | 1,5    | 4,0  | 0,05 |
| Výška bariéry rotoru 0      | $H_{b0}$ | mm       | 1,5    | 5,0  | 0,05 |
| Výška bariéry rotoru 1      | $H_{b1}$ | mm       | 1,5    | 5,0  | 0,05 |
| Výška bariéry rotoru 2      | $H_{b2}$ | mm       | 1,5    | 5,0  | 0,05 |



Obr. 4.1: Optimalizované geometrické parametry stroje.

## Optimalizační cíle

Použité optimalizační cíle byly dány požadovanými cílovými parametry stroje. Optimalizačními cíli byla tudíž maximalizace mechanického momentu, účinnosti a účinníku při současné minimalizaci teploty povrchu rotoru a zvlnění momentu při použití daného statoru o délce 40 mm. Pro umožnění vhodnějšího výběru finálního návrhu stroje bylo dále sledováno několik výstupních parametrů jako ztráty a teploty ve stroji. Přehled cílů optimalizace je uveden v tab. 4.3.

Tab. 4.3: Optimalizační cíle

| Parametr               | Jednotka | Cíl  | Omezení hodnoty |      |
|------------------------|----------|------|-----------------|------|
|                        |          |      | min.            | max. |
| Moment                 | Nm       | max. | 0,2             |      |
| Účinnost               | %        | max. |                 |      |
| Účinník                | -        | max. |                 |      |
| Teplota povrchu rotoru | °C       | min. |                 | 200  |
| Zvlnění momentu        | -        | min. |                 |      |

## 4.2 Výsledky optimalizace

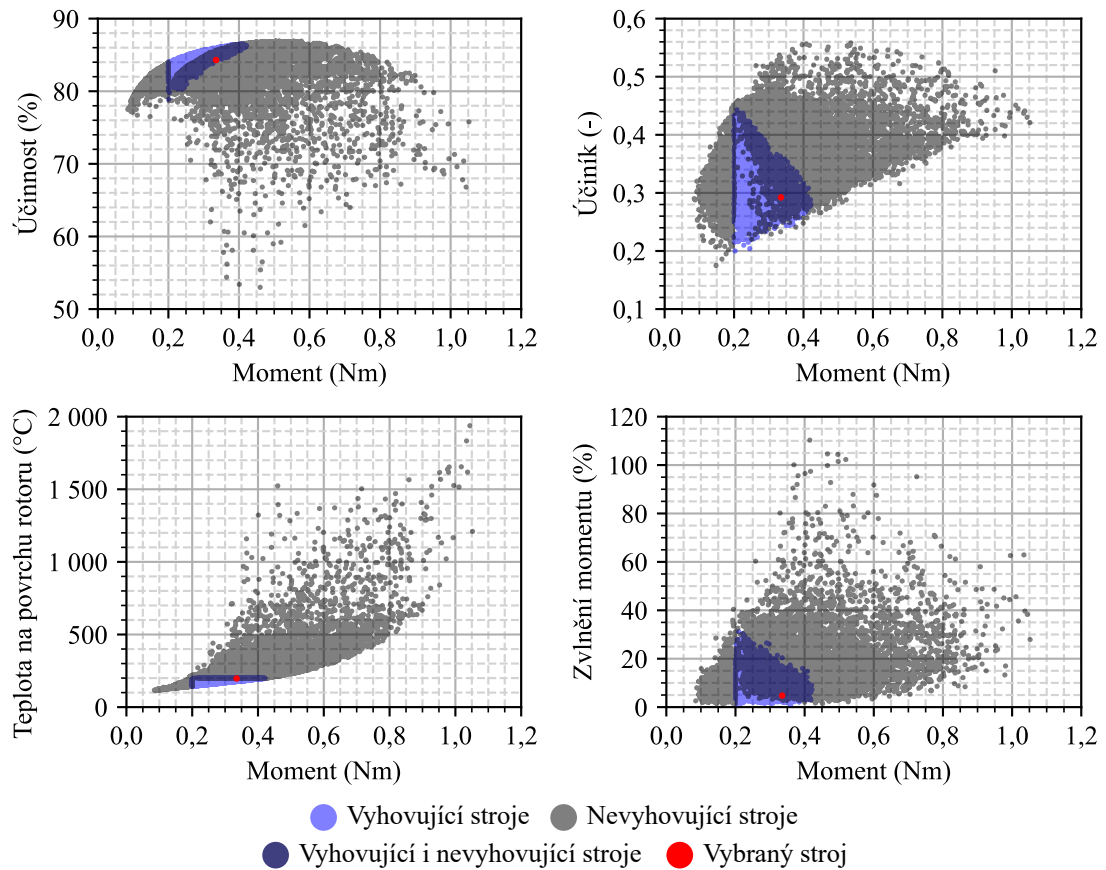
Pro optimalizaci byl využit počítač s procesorem AMD Ryzen 9 5950X s 32 logickými procesory a 64 GB RAM. Díky paralelním výpočtům transientní elektromagnetické analýzy s proudovým napájením s počtem elementů sítě kolem 10 500 a použití analytického tepelného modelu byla celková doba optimalizace přibližně 12 dní.

Na obr. 4.2 jsou zobrazeny všechny korektně spočítané stroje během celého průběhu optimalizace. Jedinců vyhovujících podmínkám minimálního momentu a maximální teploty bylo 4 474, nevyhovujících 10 647.

### Výsledný stroj vybraný z optimalizace

Po ukončení optimalizace byl z nabízené množiny vyhovujících jedinců vybrán stroj pro výrobu a ověření funkčnosti topologie využívající **av!**. Výběr byl proveden jak na základě sledovaných hodnot výstupů optimalizace, tak na základě optického posouzení vhodnosti geometrie, dané především dostatečnou tloušťkou bariér omezenou **av!**. Další kritérium bylo vhodné rozložení ztrát ve stroji. Výsledné vstupní parametry vybraného stroje jsou zobrazeny v tab. 4.4.

Ještě před zahájením výroby byla pro ověření správnosti výpočtů optimalizace a vhodnosti stroje znovu provedena elektromagnetická, tepelná a mechanická analýza.



Obr. 4.2: Všechny stroje korektně vypočítané během optimalizace.

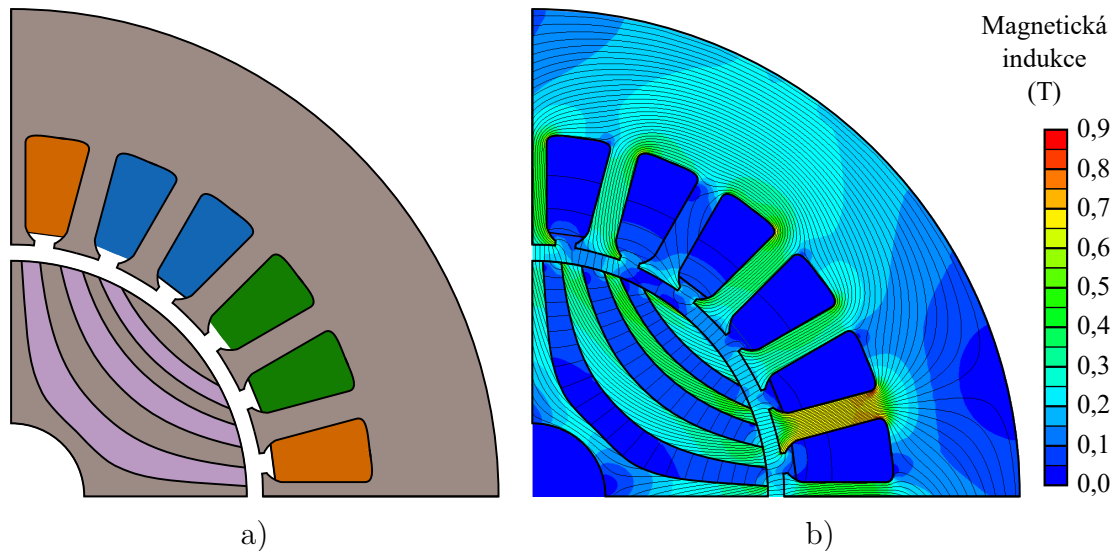
Tab. 4.4: Vstupní parametry výsledného stroje

| $I$<br>(A) | $\delta$<br>(mm) | $H_{c0}$<br>(mm) | $H_{c1}$<br>(mm) | $H_{c2}$<br>(mm) | $H_{b0}$<br>(mm) | $H_{b1}$<br>(mm) | $H_{b2}$<br>(mm) |
|------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| 226,0      | 2,00             | 2,30             | 3,80             | 2,05             | 3,85             | 3,25             | 2,20             |

**Elektromagnetická analýza** Elektromagnetický model výsledného stroje spolu s rozložením magnetické indukce ve jmenovitém stavu jsou zobrazeny na obr. 4.3.

Amplituda magnetické indukce ve vzduchové mezeře dosahuje velikosti přibližně 0,22 T. Tato nízká hodnota v kombinaci se vzduchovou mezerou o velikosti 2 mm snižuje ztráty vířivými proudy na povrchu rotoru a zvlnění momentu. Cenou za toto snížení je nižší hustota výkonu stroje a nízká hodnota účinníku, ze které pramení vyšší ztráty ve statorovém vinutí.

Přehled elektromagnetických parametrů vybraného stroje spolu s analyticky určenými mechanickými ztrátami je uveden v tab. 4.5. Dle výpočtů dosahuje stroj ve jmenovitém stavu účinnosti 85%.



Obr. 4.3: Stroj vybraný pro výrobu: a) model, b) rozložení magnetické indukce a magnetické siločáry při jmenovitých otáčkách  $60\,000\text{ min}^{-1}$  a výkonu  $2\text{ kW}$ .

Tab. 4.5: Výstupní elektromagnetické parametry vybraného stroje

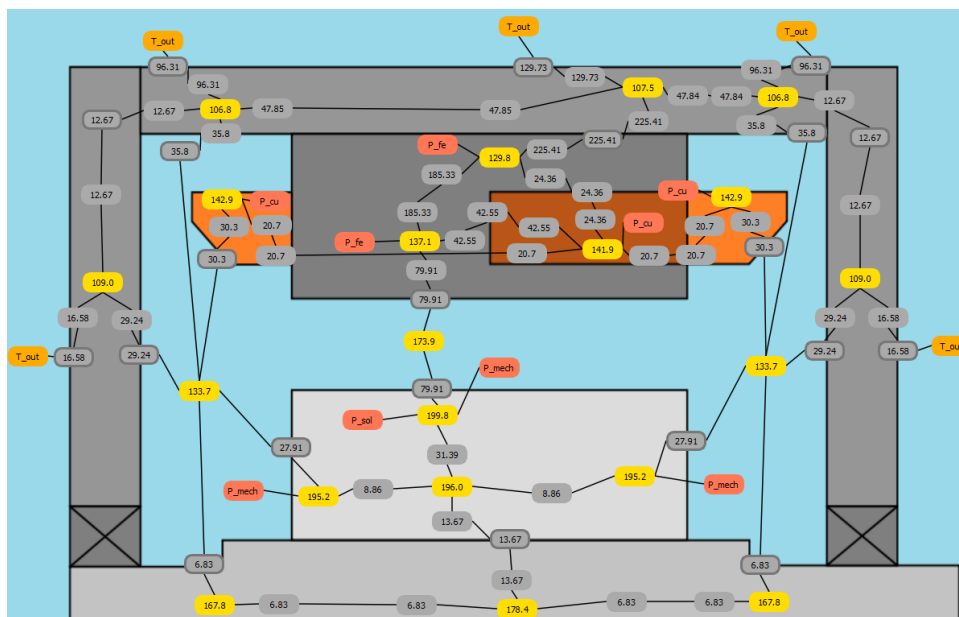
| Moment<br>(mNm) | Výkon<br>(W) | Účinnost<br>(%) | Účinník<br>(-) | Ztráty     |               |              |              |                |
|-----------------|--------------|-----------------|----------------|------------|---------------|--------------|--------------|----------------|
|                 |              |                 |                | Měď<br>(W) | Železo<br>(W) | Rotor<br>(W) | Mech.<br>(W) | Celkové<br>(W) |
| 322             | 2023,2       | 85,0            | 0,292          | 127,5      | 78,6          | 65,0         | 84,4         | 355,5          |

**Tepelná analýza** Na základě výsledků elektromagnetické analýzy byla provedena tepelná analýza za ustáleného jmenovitého stavu s výsledky zobrazenými na obr. 4.4.

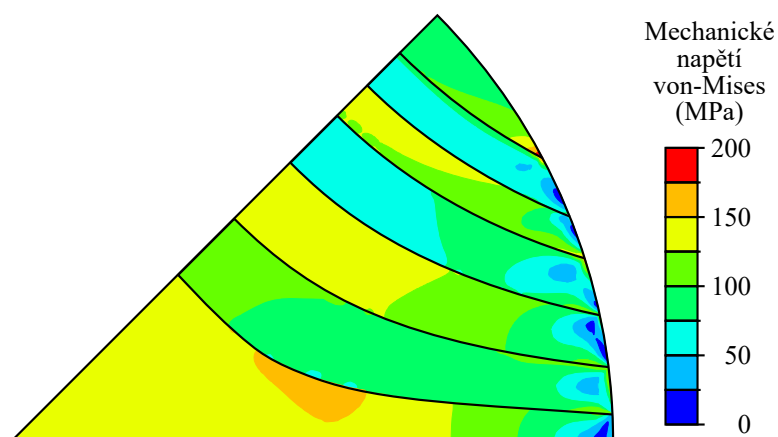
**Analýza statického zatížení** Dále bylo provedeno ověření mechanického namáhání odstředivými silami a zvýšenou teplotou. Rozložení mechanického napětí při jmenovitém stavu,  $60\,000\text{ min}^{-1}$  a  $200^\circ\text{C}$ , je zobrazeno na obr. 4.5.

**Analýza kritických otáček** Vzhledem k vysokým otáčkám navrženého stroje byla navíc provedena kontrola kritických otáček pomocí modální analýzy **mkp!**. Obr. 4.6 zobrazuje Campbellův diagram pro rotor řešeného stroje. Tento diagram ukazuje hodnotu a řád kritických otáček.

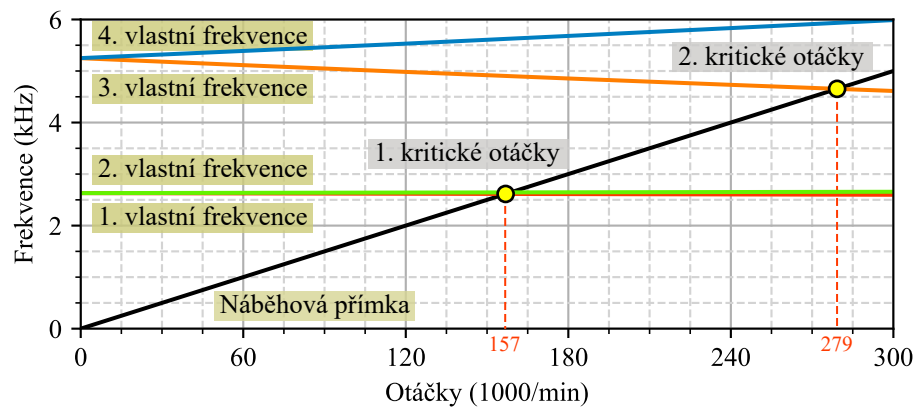
První kritické otáčky by dle simulací měly nastat při  $156\,700\text{ min}^{-1}$ , což je dostatečně vzdáleno od jmenovitých otáček  $60\,000\text{ min}^{-1}$ . Simulace však byly provedeny pro nekonečnou tuhost ložisek, jelikož přesná tuhost ložisek použitých nebyla známá.



Obr. 4.4: Výsledky tepelného modelu vybraného stroje.



Obr. 4.5: Mechanické napětí von Mises v rotoru vybraného stroje při  $60\,000\text{ min}^{-1}$  a  $200^\circ\text{C}$ .



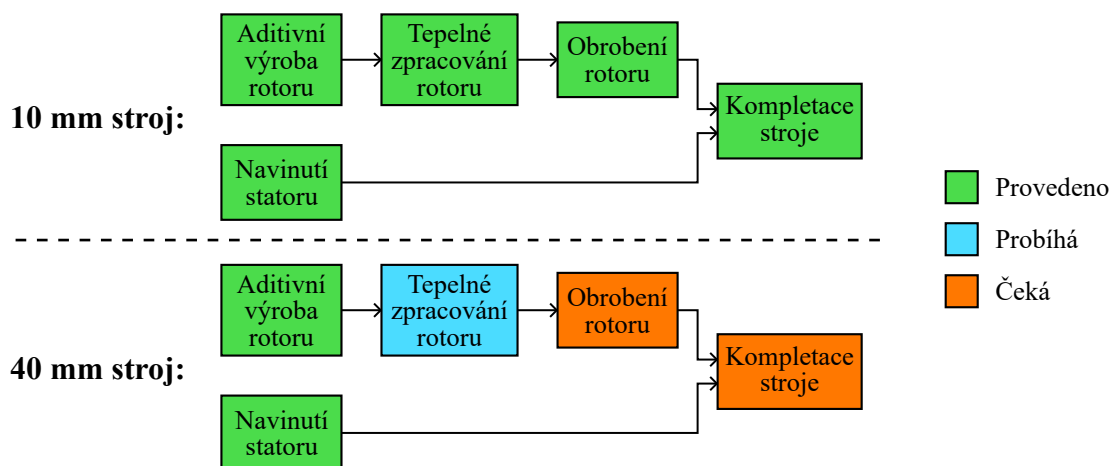
Obr. 4.6: Campbellův diagram pro rotor řešeného stroje.

## 5 Výroba stroje

Na základě provedené optimalizace a následné analýzy popsané v předchozí kapitole byl určen stroj pro výrobu s cílem praktického ověření uvedených předpokladů a výpočtů. Výroba stroje byla rozdělena na výrobu statoru, rotoru a finální kompletaci.

Při poptávce **av!** rotoru s axiální délkou 40 mm byla rovněž obdržena nabídka na současnou výrobu kratšího rotoru s délkou 10 mm. Tudíž bylo přistoupeno k výrobě obou těchto délek s tím, že využití kratšího rotoru by byl zejména na otestování výrobního postupu a ověření mechanické odolnosti rotoru. Pokud by při výrobě či testech kratšího rotoru došlo k jeho poškození či jiným problémům, došlo by k úpravám postupu výroby či testování rotoru s plnou délkou.

Vzhledem k tomuto postupu a časovým možnostem však nebylo do doby dokončení dizertační práce možné provést všechny kroky výroby a kompletace stroje s délkou rotoru 40 mm. Aktuální stav a průběh výroby obou strojů je zobrazen na obr. 5.1.



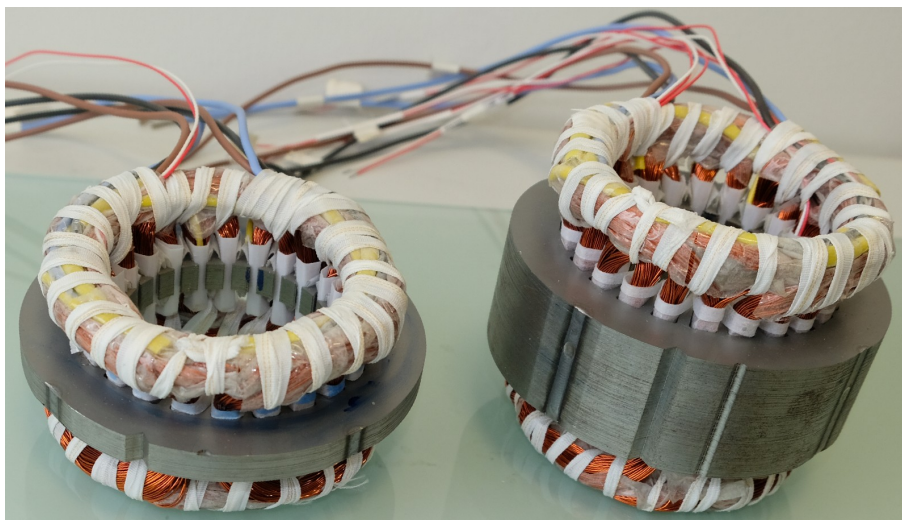
Obr. 5.1: Stav průběhu výroby obou strojů.

### 5.1 Statorový svazek

Jelikož byl stroj při optimalizaci definován s jedním vodičem v drážce, bylo nutné před zahájením samotné výroby statoru dodefinovat počet závitů statorového vinutí.

Počet vodičů byl definován především s ohledem na maximální hodnotu napájecího napětí danou měničem (400 V). Průřez vodiče byl určen dosažitelným plněním statorové drážky a pro omezení vlivu skin a proximity efektu a jednodušší výrobě byly vodiče složeny z paralelních drátů.

Obr. 5.2 ukazuje navinuté statorové svazky obou axiálních délek. Tyto svazky byly ještě před kompletací strojů využity pro měření indukčností před a po tepelném zpracování rotoru.



Obr. 5.2: Navinuté statorové svazky (vlevo svazek s axiální délkou 10 mm, vpravo s axiální délkou 40 mm).

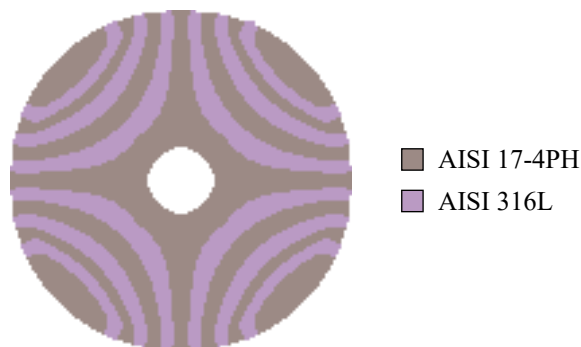
Oproti činiteli plnění drážky mědi uvažovanému při optimalizaci o hodnotě 0,39 dosahoval reálný činitel plnění zejména z důvodu zjednodušení a zrychlení výroby hodnoty 0,33. Z tohoto důvodu byl reálný odpor stroje a tím i ztráty v mědi oproti původním předpokladům vyšší.

Vinutí stroje s 10 mm rotorem bylo navrženo tak, aby maximální napětí měniče bylo dosaženo až při 90 000 ot/min. Díky tomu by mělo být umožněno případné testování kratšího rotoru až do obvodové rychlosti přibližně 270 m/s při zachování sycení.

## 5.2 Rotor

Rotor obou strojů byl vyráběn pomocí technologie **slm!**. Vzhledem k možnostem použité tiskárny a technologie nanášení prášků obou použitých materiálů bylo nutné převedení hladké rotorové geometrie použité při elektromagnetických výpočtech (obr. 4.3) na pixelizovanou verzi s velikostí pixelu 0,5mm x 0,5mm. Vzhledem k průměru rotoru 58 mm bylo toto rozlišení výroby považováno za dostatečné s předpokladem minimálního ovlivnění výsledných vlastností vyrobených rotorů. Pixelizovaná verze rotorové geometrie použitá při výrobě je zobrazena na obr. 5.3.

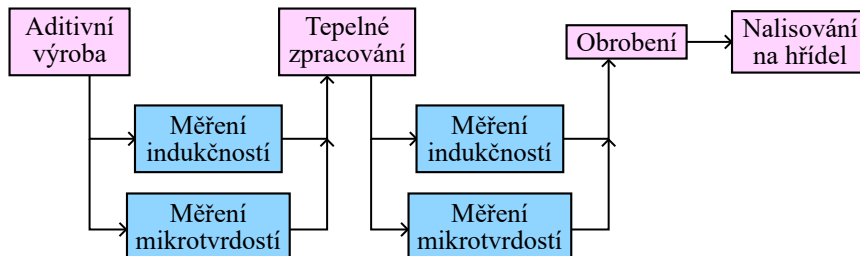
Pro omezení možného ovlivnění vlastností materiálu na okrajích a zajištění výroby s přesnými rozměry byly rotory vyrobeny s větším vnějším průměrem a menším



Obr. 5.3: Průřez pixelizované verze rotorové geometrie použité při výrobě technologií **slm!**.

vnitřním průměrem. Na finální rozměry byly rotory obrobena až po tepelném zpracování. Jako tepelné zpracování bylo použito to s označením HT-2.

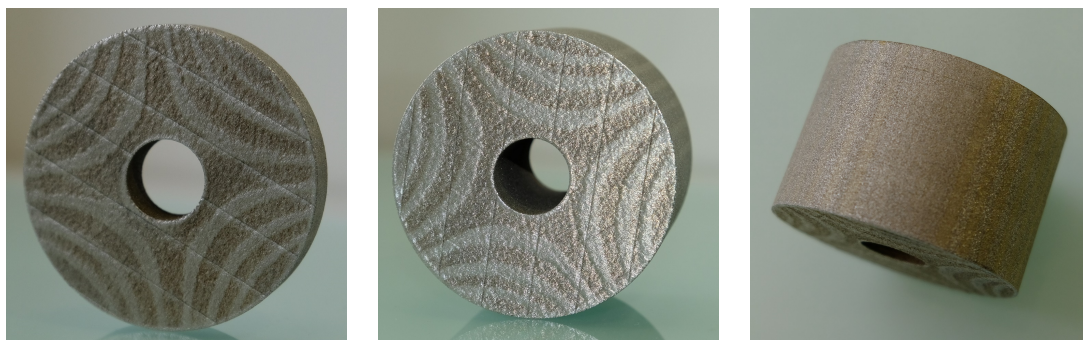
Pro ověření vlivu tepelného zpracování na magnetické a mechanické parametry vyrobených rotorů bylo provedeno měření indukčností a mikrotvrdostí před a po něm. Poté následovalo obrobení na finální rozměry, jelikož byly rotory vyrobeny s větším vnějším průměrem a menším vnitřním průměrem pro omezení možného ovlivnění vlastností materiálu na okrajích a zajištění výroby s přesnými rozměry. Přehled postupu výroby a měření rotorů je zobrazen na obr. 5.4.



Obr. 5.4: Postup výroby a měření rotoru.

### 5.2.1 Aditivně vyrobené aktivní části

Pro výrobu rotorů bylo využito komerčních služeb **av!** od soukromé společnosti. Oba rotory vyrobené **av!** ve stavu bez tepelného zpracování jsou zobrazeny na obr. 5.5. Na první pohled oba rotory tvarem bariér odpovídají geometrii z obr. 5.3 a nevykazují zjevné anomálie či strukturální defekty. Zároveň při přiložení permanentního magnetu docházelo k vniku přitažlivých sil, z čehož šlo usuzovat kladnou magnetickou susceptibilitu části rotoru.



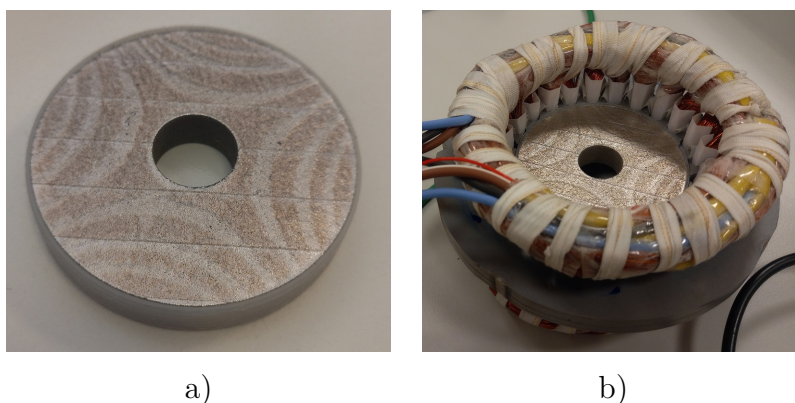
rotor - 10 mm

rotor - 40 mm

Obr. 5.5: Rotory vyrobené av!.

### 5.2.2 Měření indukčnosti

Pro kvantifikaci vlivu následného tepelného zpracování na magnetické vlastnosti rotoru bylo provedeno měření indukčnosti. Pro fixaci rotoru ve statoru během měření byla vyrobena objímka rotoru z materiálu silon (polyamid PA6). Jedná se o magneticky i elektricky nevodivý materiál neovlivňující měření.



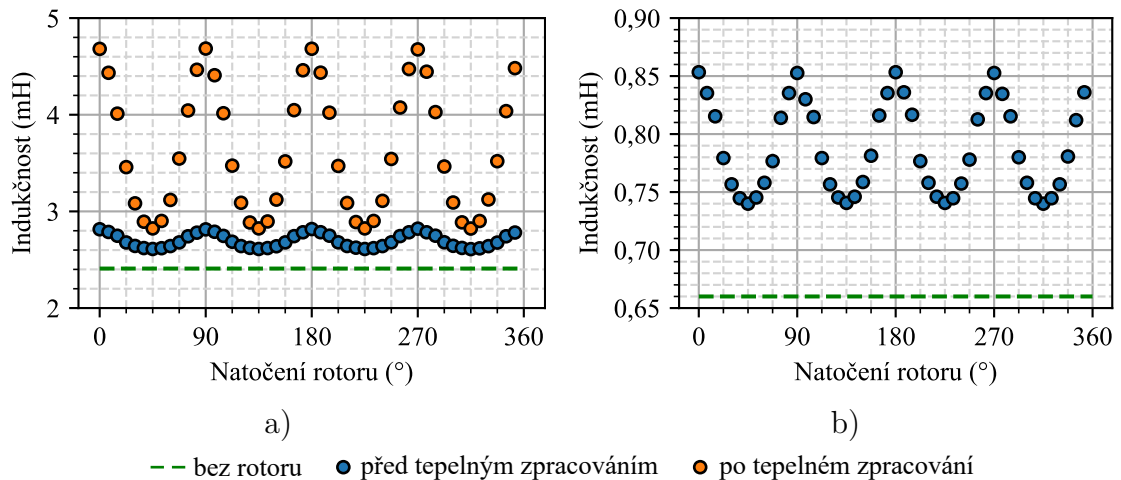
a)

b)

Obr. 5.6: Měření indukčnosti sestavy rotor-stator. a) Rotor se silonovou objímkou, b) Rotor vložený ve statoru.

Měření indukčnosti v závislosti na natočení rotoru bylo provedeno vložením rotoru do statoru při daném úhlu a změření reaktivní složky výkonu. Rotor byl nastavován ručně dle referenční čáry na objímce v ose-d, která byla natočena vždy na střed zubu či drážky. Statorové vinutí bylo zapojeno do hvězdy a proud tímto vinutím byl nastavován napájecím napětím a reostatem. Srovnání změřených indukčností v závislosti na natočení rotoru vůči statoru při napájení střídavým proudem 2 A, 50 Hz je zobrazeno na obr. 5.7. Za pozornost stojí poměrně vysoká hodnota indukčnosti bez přítomnosti rotoru způsobená s největší pravděpodobností velkým poměrem délky čel vinutí vůči aktivní délce stroje. Dále je vidět velký pozitivní vliv

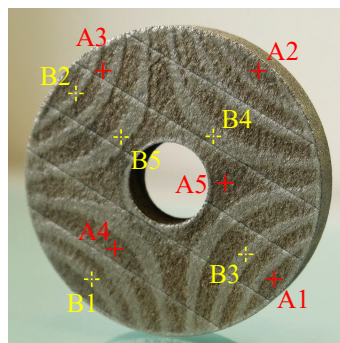
tepelného zpracování na vyniklost stroje, kdy u 10 mm stroje dosahuje tato veličina bez tepelného zpracování hodnoty 1,08, zatímco po něm 1,66. U 40 mm stroje dosahuje vyniklost před tepelným zpracováním hodnoty 1,15.



Obr. 5.7: Srovnání změřené indukčnosti sestavy rotor-stator před a po tepelném zpracování při napájení střídavým proudem o frekvenci 50 Hz v závislosti na natočení rotoru. a) Aktivní délka 10 mm při proudu 2,0 A, b) Aktivní délka 40 mm při proudu 7,5 A.

### 5.2.3 Měření mikrotvrdostí

Pro ověření mechanické odolnosti 10mm rotoru a vlivu tepelného zpracování na ni bylo provedeno měření mikrotvrdostí. Na čele rotoru bylo vybráno několik testovacích bodů rovnoměrně rozprostřených po celé ploše a v oblastech obou materiálů pro dobrou charakterizaci a možnost posouzení homogenity. Tyto body jsou zobrazeny na obr. 5.8.



Obr. 5.8: Rotor s vyznačenými body, kde byla měřena mikrotvrdost.

Naměřené hodnoty mikrotvrdotí jsou zobrazeny v tab. 5.1. Jak lze z těchto dat vyčíst, má tepelné zpracování kromě uvolnění vnitřních mechanických napětí i pozitivní vliv v podobě vytvrzení materiálu 17-4PH. Ten díky tomu dosahuje výrazně vyšší hodnoty meze pevnosti než bez tepelného zpracování. Změřené tvrdosti obou materiálů vykazují nízké hodnoty směrodatné odchylky pevnosti, z čehož lze usuzovat dobrou homogenitu mechanických i magnetických vlastností. Zároveň je velikost meze pevnosti obou materiálů, vyplývající z naměřených hodnot tvrdosti, blízká hodnotám udávaným v [76] po podobném tepelném zpracování.

Tab. 5.1: Změřená mikrotvrdot HV0,3 (-) ve vybraných místech čela rotoru

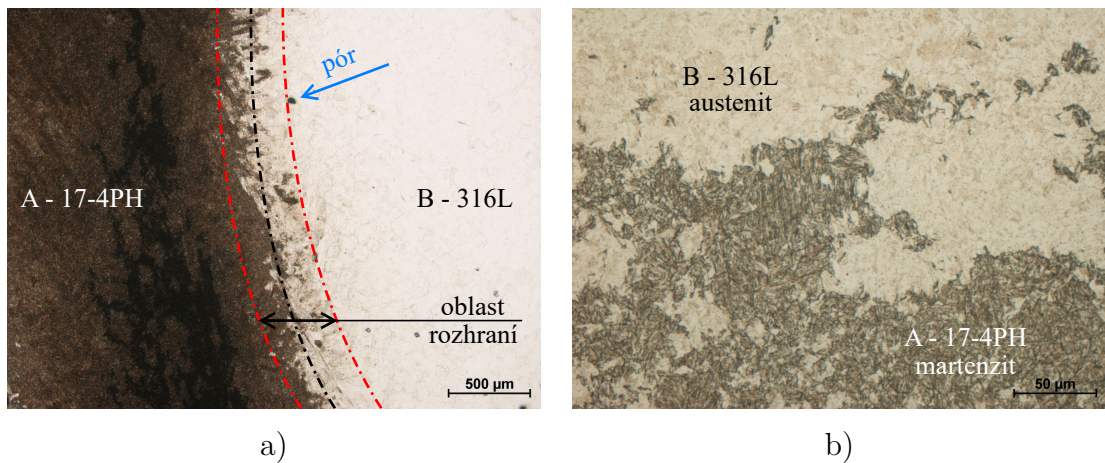
| Materiál /<br>Měřený bod | Před tepelným zpracováním |        | Po tepelném zpracování |        |
|--------------------------|---------------------------|--------|------------------------|--------|
|                          | A-17-4PH                  | B-316L | A-17-4PH               | B-316L |
| 1                        | 254                       | 241    | 375                    | 192    |
| 2                        | 270                       | 243    | 338                    | 201    |
| 3                        | 258                       | 249    | 357                    | 205    |
| 4                        | 262                       | 231    | 367                    | 203    |
| 5                        | 243                       | 246    | 361                    | 207    |
| Průměr                   | 257,4                     | 242,0  | 359,6                  | 201,6  |
| Směrodatná odchylka      | 10,0                      | 6,9    | 13,8                   | 5,8    |

Kromě měření mikrotvrdoti bylo zkoumáno rozhraní obou materiálů a jejich mikrostruktura. Čelo aktivní části rotoru bylo po tepelném zpracování vyleštěno a vyleptáno pro vizuální oddělení částí s odlišnými materiály. Obr. 5.9 zobrazuje snímek rozhraní na tomto čele a jeho detail. Absence větších pórů či jiných strukturálních defektů poukazuje na dobrou kvalitu tohoto rozhraní, z čehož plyne potenciál pro dobrou mechanickou odolnost rotoru při provozu stroje.

### 5.3 Zkompletovaný stroj

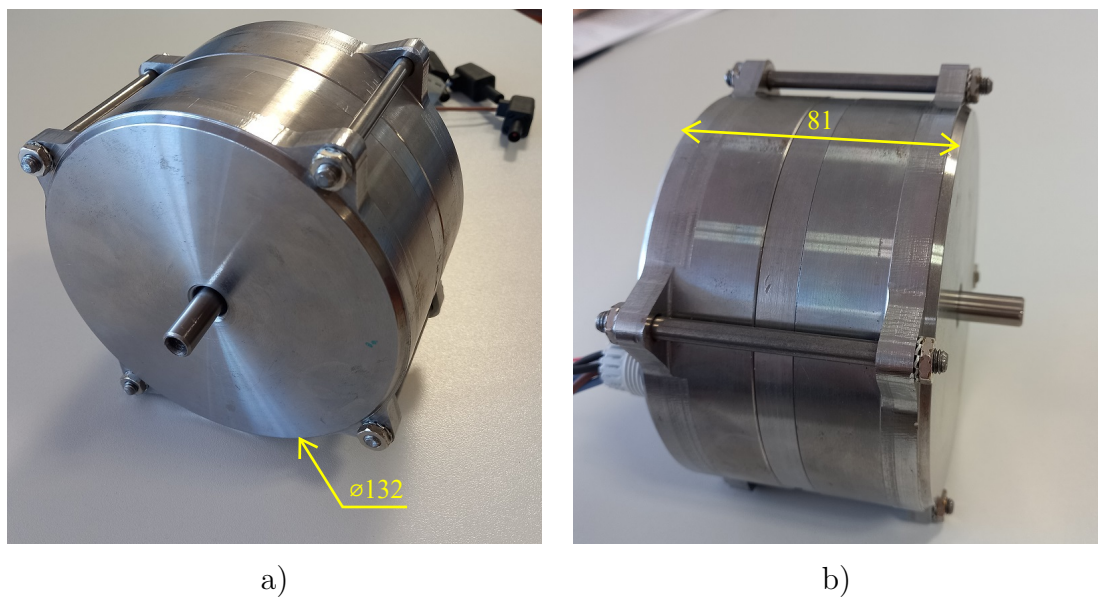
Po navinutí a impregnaci statoru, dokončení výroby rotoru a výrobě kostry s ložiskovými štíty byl 10mm stroj zkompletován. Změna oproti původní návrhové verzi nastala u materiálu kostry a ložiskových štítů. Ty byly z důvodů na straně výrobce vyrobeny z konstrukční oceli. Díky tomu lze očekávat horší odvod tepla ze stroje a z důvodu vyšší permeability této oceli i pravděpodobné zvýšení ztrát vířivými proudy v kostře a vyšší rozptylovou indukčnost čel vinutí.

Další změnou bylo to, že přes původní předpoklad uchycení stroje přes přírubu, bylo při výrobě přistoupeno k použití kostry bez úchytných míst. Fixace stroje při



Obr. 5.9: Snímek rozhraní pod mikroskopem. a) přehled, b) detail.

provozu byla tudíž nakonec řešena stažením ke stolu ocelovými U-segментy. Fotky stroje spolu s vyznačenými hlavními rozměry jsou zobrazeny na obr. 5.10.



Obr. 5.10: Vyrobený stroj s aktivní délkou 10 mm. a) Čelní pohled, b) boční pohled. Rozměry v mm.

## 6 Ověření vlastností stroje měřením

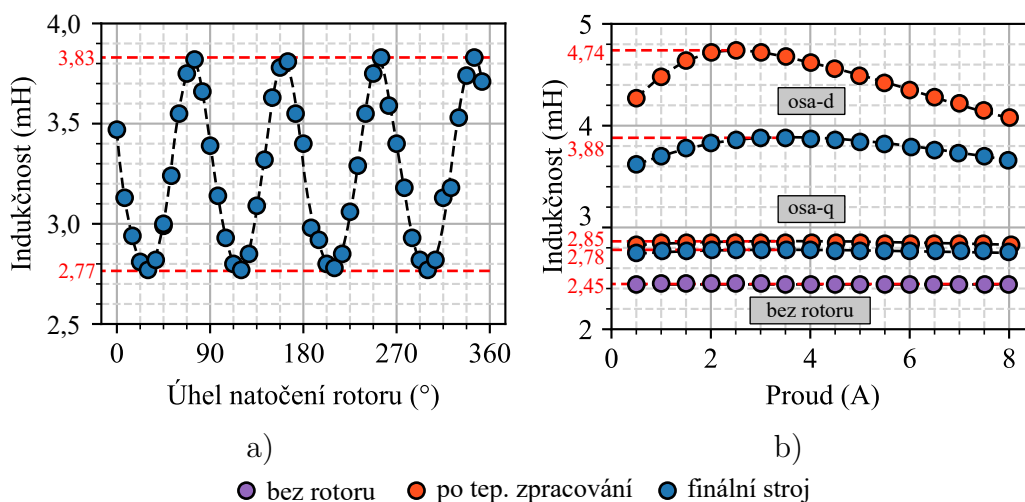
Pro ověření funkčnosti řešené topologie a použitelnosti **av!** při její výrobě byl vyrobený stroj podstoupen měření a testování. Mechanická odolnost rotoru byla ověřena zkouškami maximálních dosažitelných otáček bez poškození rotoru a elektromagnetické vlastnosti měřením naprázdno a při zatížení.

### 6.1 Statické měření

Před zahájením dynamického testování bylo provedeno statické měření odporu statorového vinutí a indukčnosti stroje.

**Odpor vinutí** Odpor jednotlivých fází vinutí byl změřen miliohmmetrem Cropico 4002. Hodnoty všech fází dosahují velmi podobných hodnot, tudíž lze předpokládat jejich dobrou symetrii. Při použití výpočtů a činitele plnění z optimalizace dosahoval předpokládaný odpor při teplotě 20°C hodnoty 0,867  $\Omega$ . Při stejné teplotě a použití reálného činitele plnění dosahuje předpokládaný odpor 1,002  $\Omega$ , což je velmi blízká hodnota hodnotám skutečně změřeným.

**Indukčnost stroje** Jelikož je u reluktančního stroje princip produkce momentu založen na rozdílné indukčnosti v osách d a q, bylo dalším krokem jejich změření. Obr. 6.1 zobrazuje závislost indukčnosti jedné fáze na natočení rotoru.



Obr. 6.1: Změřená indukčnost stroje: a) závislost na natočení rotoru při proudu 2 A, b) závislost na proudu bez rotoru a při natočení rotoru ve směru magnetického toku osou-d, respektive osou-q.

Vzhledem k malému poměru délky aktivní části stroje vůči jeho průměru tvoří většinu indukčnosti statorového vinutí rozptylová indukčnost čel vinutí. Toto spojeno s velkou vzduchovou mezerou určuje nízkou hodnotu vyniklosti stroje dosahující hodnoty 1,38 při 2 A. Pro srovnání změřených a vypočtených indukčností byly provedeny dodatečné výpočty při napájecím proudu 2 A. Výsledné hodnoty jsou zobrazeny v tab. 6.1,  $\mu_{r\_nm}$  označuje relativní permeabilitu nemagnetického materiálu v 2D **mkp!** modelu.

Tab. 6.1: Porovnání očekávaných a změřených indukčností stroje

| Indukčnost        | Bez rotoru |            | Osa-d | Osa-q               |                     |
|-------------------|------------|------------|-------|---------------------|---------------------|
|                   | Původní    | Oprava čel |       | $\mu_{r\_nm} = 1,8$ | $\mu_{r\_nm} = 1,0$ |
| Čel (mH)          | 0,91       | 1,73       | 1,73  | 1,73                | 1,73                |
| 2D Modelu (mH)    | 0,72       | 0,72       | 2,16  | 1,27                | 1,00                |
| Celková (mH)      | 1,63       | 2,45       | 3,89  | 3,00                | 2,73                |
| Změřená (mH)      | 2,45       | 2,45       | 3,83  | 2,78                | 2,78                |
| Rel. odchylka (%) | -33,3      | -          | 1,6   | 7,9                 | -1,8                |

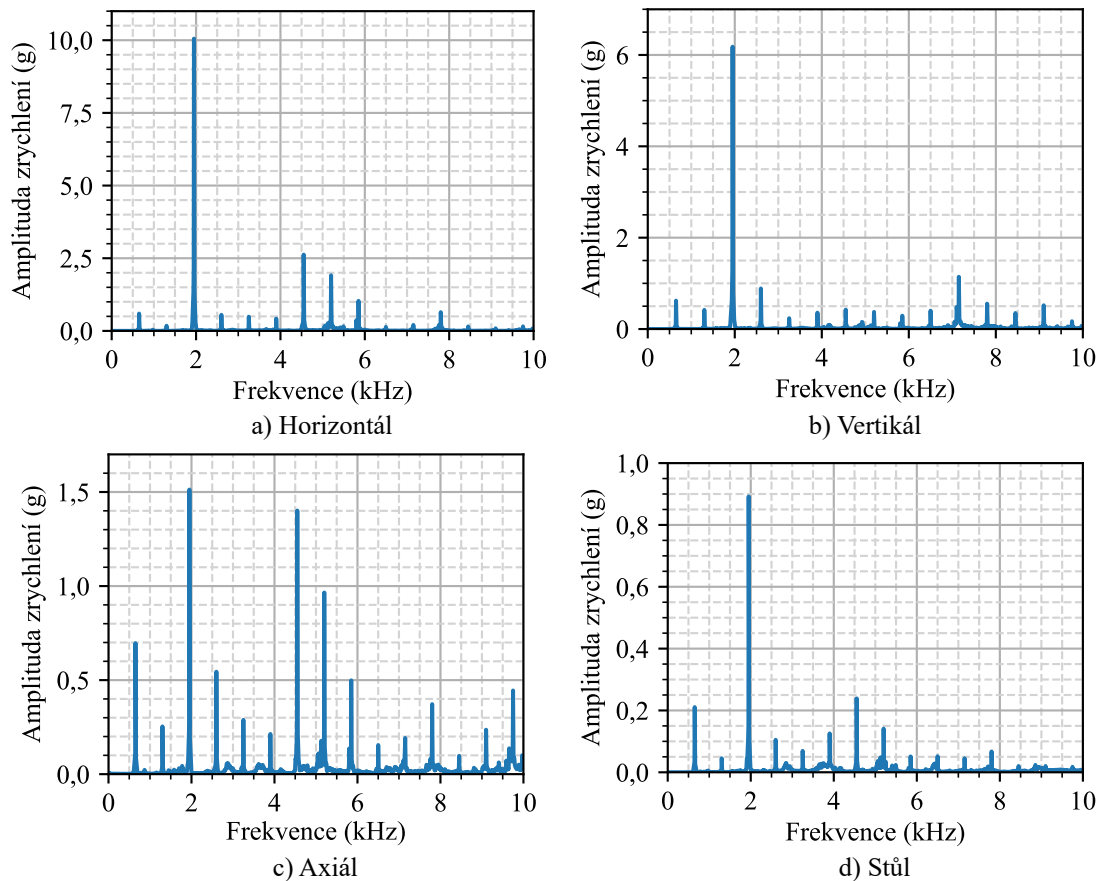
Skutečné rozložení indukčností je obtížné na základě dostupných informací určit s vyšší přesností. Po zvýšení hodnoty rozptylové indukčnosti čel však byla očekávaná velikost celkové indukčnosti velmi blízká měřeným hodnotám, což naznačuje dobrou shodu použitého elektromagnetického modelu s vyrobeným strojem.

## 6.2 Test maximálních otáček

Po statických měřeních stroje bylo přistoupeno k testování maximálních dosažitelných otáček se současným měření vibrací. Při testování byl pro napájení stroje použit měnič HS71-064-00340A s maximální výstupní frekvencí pracovní harmonické 3 kHz. Vzhledem k absenci čidla otáček měřeného stroje byl měnič provozován v otevřené smyčce.

### 6.2.1 Maximální otáčky

Pro měření vibrací byly využity tři akcelerometry umístěné na uchycení kostry stroje a jeden umístěný na stole, ke kterému bylo uchycení stroje připevněné. Měření bylo provedeno zvyšováním otáček při sledování vibrací. Maximální dosažené otáčky byly  $39\,000\text{ min}^{-1}$ . Při těchto otáček již dosahovala amplituda zrychlení vibrací horizontálním směrem až hodnot 10g, což bylo vyhodnoceno jako nepřijatelná hodnota. Spektrum amplitudy zrychlení vibrací při ustálených otáčkách  $39\,000\text{ min}^{-1}$  ve všech měřených směrech je zobrazeno na obr. 6.2.



Obr. 6.2: Spektrum amplitudy zrychlení vibrací při otáčkách  $39\,000\text{ min}^{-1}$  ve všech měřených směrech.

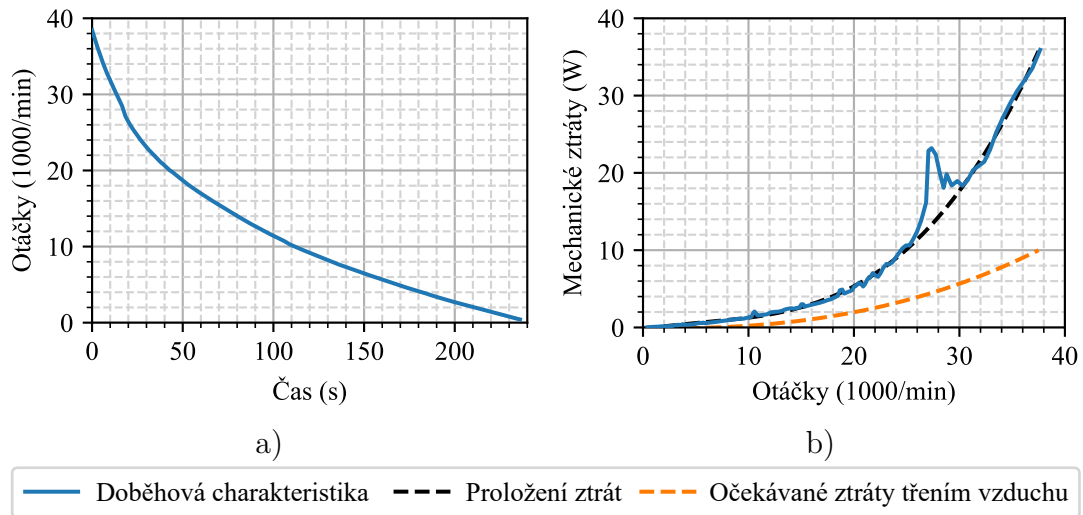
Vzhledem k tomu, že k nejvyšším vibracím dochází na 3. otáčkové harmonické, se nedá předpokládat, že by hlavním zdrojem vibrací byla rotorová nevývaha. U té by měla být dominantní 1. otáčková harmonická. V průběhu zpracování dizertace nebyl zdroj tohoto jevu určen.

## 6.2.2 Doběhová charakteristika

Měření vibrací při doběhu stroje bylo rovněž využito při zjišťování mechanických ztrát měřením doběhové charakteristiky, kdy byly z vibrací první otáčkové harmonické určeny aktuální otáčky stroje. Doběhová charakteristika stroje a určené mechanické ztráty v závislosti na otáčkách jsou zobrazeny na obr. 6.3.

Při porovnání očekávaných ztrát třením vzduchu a změřených mechanických ztrát je vidět značný rozdíl. Při výpočtu mechanických ztrát během optimalizace byla předpokládána dominance ztrát třením vzduchu vůči ztrátám v ložiskách, které byly ve výpočtech zanedbány.

Z vibrací vyskytujících se při doběhu lze rovněž určit, zda je původ vibrací na



Obr. 6.3: Změřená doběhová charakteristika stroje: a) závislost otáček na čase, b) závislost mechanických ztrát na otáčkách.

obr. 6.2 mechanického či elektromagnetického původu. Amplituda zrychlení dosahuje podobných hodnot a frekvencí jako při napájení stroji, z čeho lze usuzovat mechanický původ vibrací.

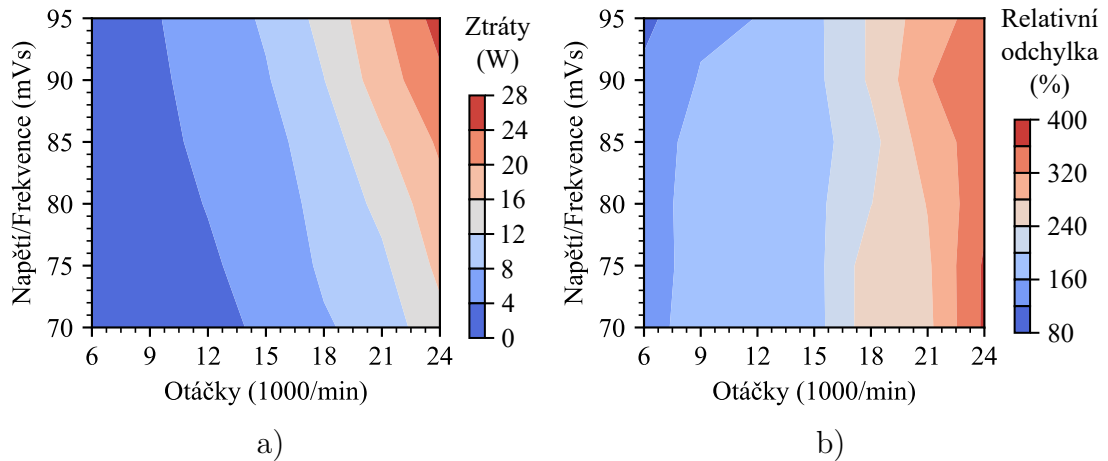
Při doběhu dochází přibližně při 27 000  $\text{min}^{-1}$  k vybuzení vysokých hodnot vibrací ve všech měřených směrech. Rovněž krátce dochází k vybuzení meziharmónických frekvencí otáčkové harmonické. Tento jev se nepodařilo určit, ale s největší pravděpodobností způsobuje zvýšené mechanické ztráty zjištěné z doběhové charakteristiky při těchto otáčkách.

### 6.3 Test naprázdno

Po zjištění mechanických ztrát v závislosti na otáčkách bylo provedeno měření naprázdno s cílem určení ztrát v železe a ztrát vířivými proudy v rotoru. Tyto ztráty byly určeny z příkonu po odečtení mechanických ztrát a ztrát v mědi. Ztráty v mědi byly vypočteny z měřených proudů a odporu vinutí s aktuální teplotou.

Měření bylo provedeno od 6 000 do 24 000  $\text{min}^{-1}$  s různými hodnotami sycení stroje, daných poměrem napětí a frekvence. Z naměřených hodnot příkonu byly následně dopočtené ztráty v železe, vířivými proudy v rotoru a dodatečné ztráty. Suma těchto ztrát pro různé otáčky a sycení je zobrazena spolu s relativní odchylkou těchto ztrát vůči hodnotám očekávaných dle simulací na obr. 6.4.

Z hodnot relativní odchylky vyplývá značná chyba odhadu těchto ztrát simulací **mkp!**. Zároveň lze pozorovat zvětšování této odchylky s rostoucími otáčkami, což naznačuje, že skutečná strmost růstu těchto ztrát s frekvencí je vyšší než očeká-

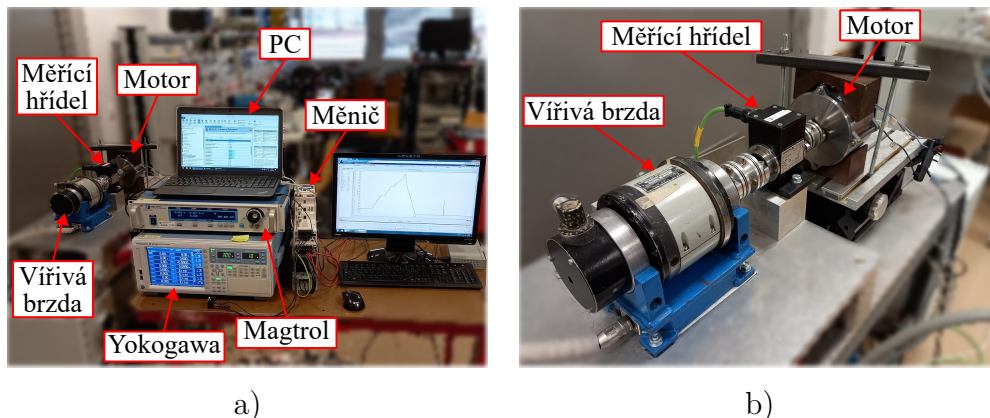


Obr. 6.4: Závislost ztrát naprázdno na otáčkách a sycení. a) Ztráty v železe, v rotoru a dodatečné ztráty určené z příkonu po odečtení ztrát ve vinutí a mechanických ztrát, b) relativní odchylka těchto ztrát vůči očekávání na základě simulací.

vaná. Navíc lze pozorovat minimální vliv sycení na tuto odchylku. Jedno z možných vysvětlení těchto fenoménů je použití magnetické kostry, ve které mohou zejména při vyšších frekvencích vznikat nezanedbatelné ztráty vířivými proudy. Jelikož bylo původně zamýšleno použití hliníkové kostry, byly tyto ztráty očekávány značně nižší.

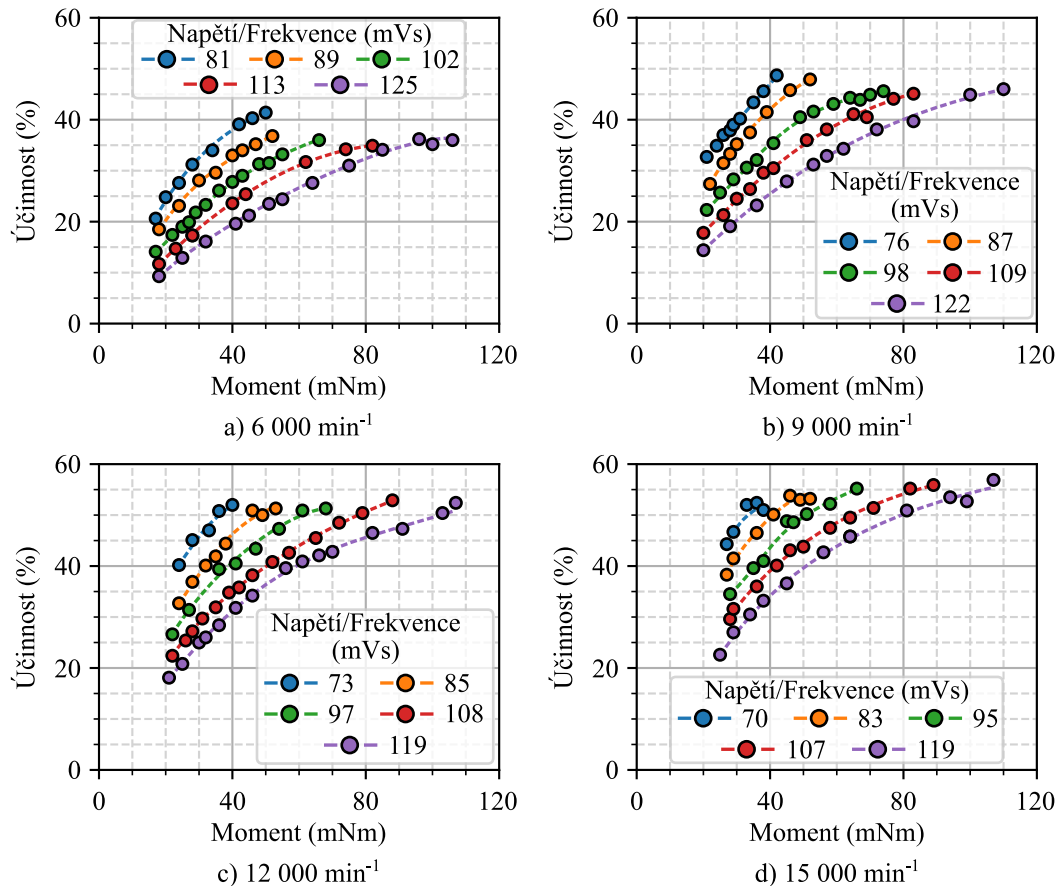
## 6.4 Test při zatížení

Po testu maximálních otáček a zkouškách naprázdno byl motor přemístěn na pracoviště s měřicí hřídelí a vířivou brzdou, kde bylo provedeno měření zatěžovacích charakteristik. Toto pracoviště je zobrazeno na obr. 6.5. Cílem provedených testů bylo zjistit maximální moment stroje při daném sycení a účinnost stroje.



Obr. 6.5: Měřící pracoviště při měření zatěžovacích charakteristik do  $15\,000\text{ min}^{-1}$ : a) celkový pohled, b) detail měřící sestavy.

Změřené závislosti účinnosti na zatěžovacím momentu při různých hodnotách sycení a otáčkách jsou zobrazeny na obr. 6.6.



Obr. 6.6: Závislost účinnosti na momentu pro různé sycení motoru při otáčkách od 6 000 min<sup>-1</sup> do 15 000 min<sup>-1</sup>.

Vzhledem k nízkým otáčkám vůči jmenovitým převládají ztráty ve vinutí statoru a měřené účinnosti tak nedosahovaly vysokých hodnot. Dalším faktorem byl provoz měniče v otevřené smyčce, který zapříčiňuje nízkou účinnost při nižších momentech. Nejvyšší dosažený moment stroje byl přibližně 110 mNm při odebíraném proudu 5,5 A. Nejvyšší změřená účinnost byla 55,9 % při 15 000 min<sup>-1</sup>, odebíraném proudu 5,0 A a poměru napětí a frekvence 107 mVs.

### 6.4.1 Srovnání měření se simulacemi

Pro porovnání očekávaných parametrů stroje dle simulací s měřením byl vybrán pracovní bod při nejvyšších změřených otáčkách a jmenovitém momentu stroje. Vzhledem ke čtvrtinové aktivní délce měřeného stroje oproti původnímu návrhu dle optimalizace je jmenovitý moment 80,5 mNm. Srovnání bylo provedeno pro nejbližší změřený bod z charakteristik na obr. 6.6 s momentem 82 mNm při otáčkách 15 000 min<sup>-1</sup> a je zobrazeno v tab. 6.2.

Tab. 6.2: Srovnání finálního stroje dle simulací a dle měření při  $15\,000\text{ min}^{-1}$ , jmenovitým momentu a s teplotou vinutí přibližně  $86^\circ\text{C}$

| Veličina | Jednotka   | mkp!  | Změřeno | Odchylka |          |       |
|----------|------------|-------|---------|----------|----------|-------|
|          |            |       |         | Abs.     | Rel. (%) |       |
| Moment   | mNm        | 82    | 82      | -        | -        |       |
| Výkon    | W          | 128,8 | 128,8   | -        | -        |       |
| Příkon   | W          | 211,7 | 233,5   | +21,8    | +10,3    |       |
| Účinnost | %          | 60,8  | 55,2    | -5,6     | -9,2     |       |
| Účíník   | -          | 0,321 | 0,297   | -0,024   | -7,5     |       |
| Proud    | A          | 4,86  | 4,88    | +0,02    | +0,4     |       |
| Napětí   | V          | 45,3  | 53,7    | +8,4     | +18,5    |       |
|          | Měď        | W     | 77,7    | 92,9     | +15,2    | +19,6 |
|          | Železo     | W     | 2,1     | 8,8      | +4,6     | +110  |
| Ztráty   | Rotor      | W     | 2,1     |          |          |       |
|          | Mechanické | W     | 1,0     | 3,0      | +2,0     | +200  |
|          | Celkové    | W     | 82,9    | 104,7    | +21,8    | +26,3 |

Vyrobený motor je dle simulací i měření schopný produkovat jmenovitý moment při shodném proudu statorovým vinutím, avšak především z důvodu vyšší reálné rozptylové indukčnosti čel vinutí je k tomu potřebné přibližně o 18,5 % větší svorkové napětí. Reálné ztráty stroje byly celkově o 26,3 % vyšší.

I přes nižší účinnost však stroj dokázal dosáhnout požadovaného momentu při stejném proudu vinutím, čímž byla ověřena funkčnost rotorové topologie. Odchylky vůči původním očekáváním byly způsobeny zejména statorovým vinutím.

# Závěr

Tato disertační práce se zabývala inovativním řešením rotoru vysokootáčkového **synrm!** s pomocí **av!**.

Nejprve byla provedena rešerše stávajících publikovaných řešení vysokootáčkových strojů a byly popsány jednotlivé druhy těchto strojů spolu s jejich vlastnostmi a omezeními. Na základě těchto omezení bylo vytipováno několik možných inovací, ze kterých se nejvíc perspektivně jevílo zaměření na rotor **synrm!**. U něj se nabízelo aplikování **av!** pro vytvoření řešení kombinujícího vlastnosti bariérové topologie a **ala!**.

Dále byla uvedena technologie **av!** se zaměřením na metody využívající tvorbu výrobků z prášků. Vzhledem ke komerční dostupnosti, možnosti vícemateriálové výroby a široké nabídce materiálů byla nakonec zvolena pro výrobu nového řešení **synrm!** metoda **slm!**.

Následně byl popsán princip řešení topologie spolu s požadavky na použité materiály. Tento princip je založen na kombinaci magnetického a nemagnetického materiálu, která dosahuje z mechanického pohledu, díky **av!**, výborných mechanických vlastností podobným plnému homogennímu válci. Z elektromagnetického pohledu je díky použití nemagnetických bariér s tvarem kopírujícím tvar přirozených siločar dosaženo vytvoření magnetické vyniklosti, na jejímž principu fungují reluktanční stroje. Na základě fyzikálních principů, později podložených simulacemi **mkp!**, byly určeny požadavky na použité materiály pro dosažení těchto vlastností. Mezi tyto požadavky patří z elektromagnetického hlediska vysoká permeabilita magneticky vodivého materiálu, nízká permeabilita materiálu magnetické bariéry a co nejnižší elektrická vodivost obou materiálů. Z mechanického hlediska je u obou materiálů nejdůležitější blízká hodnota koeficientů tepelných roztažností, dále podobná hustota a vysoká mez kluzu. Na základě provedených výpočtů byla podána žádost o patent řešení topologie a jejího způsobu výroby, jehož udělení potvrdilo novost navrhovaného řešení rotoru.

Pro ověření toho, zda stroj s tímto řešením rotoru vyrobený **av!** skutečně dosahuje předpokládaných parametrů, bylo rozhodnuto o výrobě tohoto stroje pro následné měření. Jako magnetický materiál byla zvolena vytvrditelná nerezová ocel 17-4PH, jako nemagnetický materiál austenitická nerezová ocel 316L. Před návrhem stroje bylo provedeno měření magnetických vlastností oceli 17-4PH. Po **av!** vzorku a měření se ukázalo jako kritické tepelné zpracování, které mělo značný pozitivní vliv na jeho permeabilitu.

Pro návrh stroje byla vybrána optimalizace s využitím genetického algoritmu **nsgaii!** spojená s elektromagnetickým a tepelným modelem. Optimalizační algoritmus byl naprogramován v jazyce Python a pro nastavení celé optimalizace a

sledování průběžných výsledků bylo vytvořeno grafické rozhraní. Elektromagnetický model byl řešen pomocí **mkp!**, jehož výsledky byly zpracovány pomocí skriptů a předány jako vstup pro tepelný model. Pro definici tepelného modelu bylo rovněž vytvořeno grafické rozhraní a jeho výpočty probíhaly rovněž s využitím vytvořených skriptů v jazyce Python.

S využitím takto strukturované a automatizované optimalizace byl řešený stroj optimalizován. Jelikož bylo rozhodnuto o použití již vyrobeného, a zatím nenavi- nutého, statorového svazku, týkaly se optimalizované parametry statorového vinutí a rotorové geometrie. Cílem optimalizace bylo navržení stroje s maximální účinností při minimálním zvlnění momentu, minimální teplotou a maximální účinností a účínku. Tento stroj nebyl zamýšlen pro konkrétní aplikaci, ale čistě pro ověření funkčnosti topologie. Cílená obvodová rychlost rotoru byla 180 m/s.

Na základě výstupů z optimalizace byl zvolen stroj s jmenovitým bodem 2 kW při otáčkách  $60\,000\text{ min}^{-1}$ . Specifikem stroje bylo poměrně nízké sycení a velká vzduchová mezera dosahující radiální délky 2 mm. Tyto parametry byly dané poměrně velkými ztrátami vířivými proudy očekávanými na povrchu plného rotoru, jehož teplota dosahovala dle očekávání až  $200^{\circ}\text{C}$ . Pro toto řešení bylo provedeno ověření statického namáhání odstředivými silami a tepelnou roztažností a kontrola kritických otáček.

Po optimalizaci a ověření mechaniky bylo přistoupeno k výrobě dvou strojů s rotory se stejnou geometrií, ale dvěma axiálními délkami. Kratší 10mm rotor byl zamýšlen zejména pro ověření postupu výroby a testu maximálních otáček až do  $90\,000\text{ min}^{-1}$ , delší 40mm rotor byl zamýšlen pro ověření elektromagnetických vlastností očekávaných dle optimalizace. Oba rotory byly vyrobeny **av!** v kooperaci s komerční společností, nakonec však došlo ke zdržení při tepelném zpracování delšího rotoru a tak byl kompletně vyroben jen stroj s kratším rotorem. Pro ověření vlivu tepelného zpracování na magnetické vlastnosti rotoru bylo provedeno měření indukčností před a po tepelném zpracování a byl potvrzen její značný nárůst po tepelném zpracování. Dále bylo ve spolupráci se strojní fakultou provedeno měření mikrotvrdotí, což ověřilo homogenitu a dosažení očekávané hodnoty tvrdosti. Nemagnetický materiál dosahoval po tepelném zpracování průměrné hodnoty meze pevnosti 640 MPa, zatímco magnetický materiál 1155 MPa. Po těchto prvotních měřeních při výrobě byl rotor obroben na finální rozměry a byla provedena finální kompletace stroje.

Poté bylo provedeno měření a srovnání parametrů vyrobeného stroje s očekávanými parametry dle modelů použitých při optimalizaci. Nižší reálná hodnota činitele plnění statorových drážek způsobila o 18% vyšší než očekávaný odpor. Měření indukčností ukázalo značně vyšší rozptylovou indukčnost čel statorového vinutí než dle analytického odhadu, což způsobilo nutnost vyššího napájecího napětí pro dosažení

jmenovitého sycení stroje. Indukčnost aktivní části odpovídala návrhu. Vzhledem ke krátké délce a vysokému podílu rozptylové indukčnosti čel dosahovala finální vyniklost hodnoty přibližně 1,38.

Dále byl proveden test maximálních otáček se současným měřením vibrací. Maximální dosažené otáčky byly  $39\,000\text{ min}^{-1}$ , což odpovídá 65% jmenovitých otáček. Při těchto otáčkách dosahuje obvodová rychlost 120 m/s, což řadí stroj do kategorie vysokootáčkových. Vyšší otáčky nebyly testovány z důvodu hodnot zrychlení vibrací v horizontálním směru až 10 g, což bylo vyhodnoceno jako nebezpečné. Při rozložení spektra těchto vibrací byla ve všech měřených směrech dominantní 3. harmonická složka, což neodpovídá nevyváze, špatným ložiskům či jiným očekávatelným jevům. Zdroj těchto vibrací se nepodařilo určit, což dává podklady k dalšímu zkoumání stroje. Pro určení mechanických ztrát byla změřena doběhová charakteristika po odpojení frekvenčního měniče, během které nastal přibližně při  $27\,000\text{ min}^{-1}$  nárůst ztrát a vibrací z důvodu rezonance. Z vypočtených mechanických ztrát mimo rezonanci bylo určeno, že jsou přibližně 3 krát vyšší než očekávané ztráty třením vzduchu. To lze vysvětlit zanedbáním ztrát v ložiskách, které byly z důvodu složitosti a absence dostupných empirických dat těchto ztrát u podobného stroje při návrhu zanedbány.

Na závěr bylo provedeno měření s frekvenčním měničem v otevřené smyčce do otáček  $24\,000\text{ min}^{-1}$  naprázdno a do  $15\,000\text{ min}^{-1}$  při zatížení. Tyto měření ukázaly přibližně dvojnásobné ztráty v železe statoru a na povrchu rotoru než jaké byly odhadované, způsobené nejspíše zhoršením parametrů použitých materiálů výrobou. Měření při čtvrtinových otáčkách vůči jmenovitým bylo ověřeno dosažení jmenovitého momentu při očekávané velikosti proudu, což ukazuje schopnost tohoto řešení rotoru produkovat moment. Měřený výkon snížený z důvodu nižších otáček při jmenovitém momentu byl 128,8 W s účinností 55,2 % a účínkem 0,297. Nízká měřená účinnost stroje byla dána nízkými otáčkami a krátkou axiální délkou stroje, způsobující vysoký podíl ztrát v mědi na celkových ztrátách.

I přes dosažení pouze 65 % jmenovitých otáček byla potvrzena funkčnost navrženého řešení rotoru **synrm!** vyrobeného pomocí vícemateriálové **av!**. Dle provedené literární rešerše je to první publikovaný rotor vysokootáčkového stroje vyrobený vícemateriálovou **av!**. Díky tomu se otevírá cesta pro využití **av!** v této oblasti výzkumu a ukazuje se možnost jejího praktického využití, což může ovlivnit i další topologie a typy strojů.

## Budoucí práce

Vzhledem k nedokončení stroje s 40mm rotorem je nejbližším logickým krokem dokončení tohoto stroje a ověření jeho mechanických a elektromagnetických vlastností. To by mohlo pomoci ověřit opakovatelnost dosažených výsledků.

Dalším krokem by dále mělo být zjištění příčiny vibrací při vyšších otáčkách. K tomu by mohl být s výhodou využit druhý stroj, který by mohl ukázat absenci či potvrzení výskytu těchto vibrací.

Následný krok by mohl být rovněž zaměřen na omezení ztrát vířivými proudy na povrchu rotoru jiným způsobem než velkou radiální délkou vzduchové mezery, či nízkou hodnotou sycení. Díky tomu by mohla být zvýšena výkonová hustota při použití této topologie a zároveň by mohlo dojít ke zlepšení účinníku. Toho by mohlo být dosaženo například použitím radiálních drážek na povrchu rotoru, či nalezení způsobu laminace rotoru při zachování mechanické pevnosti.

V neposlední řadě by mohla být pozornost zaměřena na nalezení magnetického materiálu s vyšší hodnotou relativní permeability pro zvýšení dosažitelné vyniklosti stroje. Navíc by mohla být nalezena kombinace materiálů s menším rozdílem koeficientů tepelné roztažnosti pro zvýšení odolnosti vůči vyšším teplotám rotoru a zvýšení bezpečnosti.

Posledním navrženým krokem je aplikace získaných poznatků z vícemateriálové **av!** rotoru a inovace dalších topologií ostatních typů strojů.

# Literatura

- [1] International Energy Agency: *World Energy Outlook 2023*. IEA Publications, 2023, doi:10.1787/827374a6-en.
- [2] Eurostat Statistics Explained: *Electricity production, consumption and market overview*. Online. Aktual. 08.2024. Eurostat. Dostupné z: [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Electricity\\_production,\\_consumption\\_and\\_market\\_overview#Market\\_shares](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Electricity_production,_consumption_and_market_overview#Market_shares). [cit. 2024-09-10].
- [3] Gerada, D.; Mebarki, A.; Brown, N. L.; aj.: High-Speed Electrical Machines: Technologies, Trends, and Developments. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, ročník 61, č. 6, 2014: s. 2946–2959, doi:10.1109/TIE.2013.2286777.
- [4] Wu, F.; EL-Refaie, A. M.: Toward Additively Manufactured Electrical Machines: Opportunities and Challenges. *IEEE Transactions on Industry Applications*, ročník 56, č. 2, 2020: s. 1306–1320, doi:10.1109/TIA.2019.2960250.
- [5] Nazir, A.; Gokcekaya, O.; Md Masum Billah, K.; aj.: Multi-material additive manufacturing: A systematic review of design, properties, applications, challenges, and 3D printing of materials and cellular metamaterials. *Materials & Design*, ročník 226, 2023: str. 111661, ISSN 0264-1275, doi:10.1016/j.matdes.2023.111661.
- [6] Binder, A.; Schneider, T.: High-speed inverter-fed AC drives. In *Proceedings of the 2007 International Aegean Conference on Electrical Machines and Power Electronics*, 2007, s. 9–16, doi:10.1109/ACEMP.2007.4510476.
- [7] Pyrhonen, J.; Nerg, J.; Kurronen, P.; aj.: High-Speed High-Output Solid-Rotor Induction-Motor Technology for Gas Compression. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, ročník 57, č. 1, 2010: s. 272–280, doi:10.1109/TIE.2009.2021595.
- [8] Gerada, D.; Mebarki, A.; Brown, N. L.; aj.: Design Aspects of High-Speed High-Power-Density Laminated-Rotor Induction Machines. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, ročník 58, č. 9, 2011: s. 4039–4047, doi:10.1109/TIE.2010.2098364.
- [9] Soong, W.; Kliman, G.; Johnson, R.; aj.: Novel high-speed induction motor for a commercial centrifugal compressor. *IEEE Transactions on Industry Applications*, ročník 36, č. 3, 2000: s. 706–713, doi:10.1109/28.845043.

- [10] Huang, Z.; Han, B.; Le, Y.: Multidisciplinary Design Strategies for Turbomolecular Pumps With Ultrahigh Vacuum Performance. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, ročník 66, č. 12, 2019: s. 9549–9558, doi:10.1109/TIE.2019.2891440.
- [11] Boglietti, A.; Bojoi, R. I.; Cavagnino, A.; aj.: Analysis and Modeling of Rotor Slot Enclosure Effects in High-Speed Induction Motors. *IEEE Transactions on Industry Applications*, ročník 48, č. 4, 2012: s. 1279–1287, doi:10.1109/TIA.2012.2199270.
- [12] Zwysig, C.; Kolar, J. W.; Round, S. D.: Megasppeed Drive Systems: Pushing Beyond 1 Million r/min. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, ročník 14, č. 5, 2009: s. 564–574, doi:10.1109/TMECH.2008.2009310.
- [13] Honda, Y.; Yokote, S.; Higaki, T.; aj.: Using the Halbach magnet array to develop an ultrahigh-speed spindle motor for machine tools. In *IAS '97. Conference Record of the 1997 IEEE Industry Applications Conference Thirty-Second IAS Annual Meeting*, ročník 1, 1997, s. 56–60 vol.1, doi:10.1109/IAS.1997.643008.
- [14] Guo, F.; Yang, T.; Diab, A. M.; aj.: Hybrid Active Modulation Strategy for Three-Level Neutral-Point-Clamped Converters in High-Speed Aerospace Drives. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, ročník 70, č. 4, 2023: s. 3449–3460, doi:10.1109/TIE.2022.3176309.
- [15] Nøland, J. K.; Leandro, M.; Suul, J. A.; aj.: High-Power Machines and Starter-Generator Topologies for More Electric Aircraft: A Technology Outlook. *IEEE Access*, ročník 8, 2020: s. 130104–130123, doi:10.1109/ACCESS.2020.3007791.
- [16] Borg Bartolo, J.; Degano, M.; Espina, J.; aj.: Design and Initial Testing of a High-Speed 45-kW Switched Reluctance Drive for Aerospace Application. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, ročník 64, č. 2, 2017: s. 988–997, doi:10.1109/TIE.2016.2618342.
- [17] Binder, A.; Schneider, T.; Klohr, M.: Fixation of buried and surface-mounted magnets in high-speed permanent-magnet synchronous machines. *IEEE Transactions on Industry Applications*, ročník 42, č. 4, 2006: s. 1031–1037, doi:10.1109/TIA.2006.876072.
- [18] Ismagilov, F. R.; Vavilov, V. Y.; Ayguzina, V. V.; aj.: 100-kW High-Speed Electric Motor for the Air Conditioning System of More Electric Aircrafts. In *Proceedings of the 2020 International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, ročník 1, 2020, s. 559–564, doi:10.1109/ICEM49940.2020.9270997.

- [19] Xu, S.; Liu, X.; Le, Y.: Electromagnetic Design of a High-Speed Solid Cylindrical Permanent-Magnet Motor Equipped With Active Magnetic Bearings. *IEEE Transactions on Magnetics*, ročník 53, č. 8, 2017: s. 1–15, doi:10.1109/TMAG.2017.2695540.
- [20] Gallicchio, G.; Nardo, M. D.; Palmieri, M.; aj.: Surface Permanent Magnet Synchronous Machines: High Speed Design and Limits. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, ročník 38, č. 2, 2023: s. 1311–1324, doi:10.1109/TEC.2022.3225224.
- [21] Fu, Y.; Takemoto, M.; Ogasawra, S.; aj.: Investigation of Efficiency Enhancement of an Ultra-High-Speed Bearingless Motor at 100,000 r/min by High Switching Frequency Using SiC-MOSFET. In *Proceedings of the 2018 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, 2018, s. 2306–2313, doi:10.1109/ECCE.2018.8557396.
- [22] Hong, D.-K.; Woo, B.-C.; Lee, J.-Y.; aj.: Ultra High Speed Motor Supported by Air Foil Bearings for Air Blower Cooling Fuel Cells. *IEEE Transactions on Magnetics*, ročník 48, č. 2, 2012: s. 871–874, doi:10.1109/TMAG.2011.2174209.
- [23] Ou, J.; Liu, Y.; Doppelbauer, M.: Comparison Study of a Surface-Mounted PM Rotor and an Interior PM Rotor Made From Amorphous Metal of High-Speed Motors. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, ročník 68, č. 10, 2021: s. 9148–9159, doi:10.1109/TIE.2020.3026305.
- [24] Lim, M.-S.; Kim, J.-M.; Hwang, Y.-S.; aj.: Design of an Ultra-High-Speed Permanent-Magnet Motor for an Electric Turbocharger Considering Speed Response Characteristics. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, ročník 22, č. 2, 2017: s. 774–784, doi:10.1109/TMECH.2016.2634160.
- [25] Noguchi, T.; Takata, Y.; Yamashita, Y.; aj.: 160,000-r/min, 2.7-kW Electric Drive of Supercharger for Automobiles. In *Proceedings of the 2005 International Conference on Power Electronics and Drives Systems*, ročník 2, 2005, s. 1380–1385, doi:10.1109/PEDS.2005.1619904.
- [26] Pfister, P.-D.; Perriard, Y.: Very-High-Speed Slotless Permanent-Magnet Motors: Analytical Modeling, Optimization, Design, and Torque Measurement Methods. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, ročník 57, č. 1, 2010: s. 296–303, doi:10.1109/TIE.2009.2027919.

- [27] Zwyszig, C.; Kolar, J.; Thaler, W.; aj.: Design of a 100 W, 500000 rpm permanent-magnet generator for mesoscale gas turbines. In *Fourtieth IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2005 Industry Applications Conference, 2005.*, ročník 1, 2005, s. 253–260 Vol. 1, doi:10.1109/IAS.2005.1518318.
- [28] Krähenbühl, D.; Zwyszig, C.; Weser, H.; aj.: A Miniature 500 000-r/min Electrically Driven Turbocompressor. *IEEE Transactions on Industry Applications*, ročník 46, č. 6, 2010: s. 2459–2466, doi:10.1109/TIA.2010.2073673.
- [29] Zwyszig, C.; Kolar, J. W.; Round, S. D.: Megasppeed Drive Systems: Pushing Beyond 1 Million r/min. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, ročník 14, č. 5, 2009: s. 564–574, doi:10.1109/TMECH.2008.2009310.
- [30] Wood, B.; Olsen, C.; Hartzo, G.; aj.: Development of an 11000-r/min 3500-HP induction motor and adjustable-speed drive for refinery service. *IEEE Transactions on Industry Applications*, ročník 33, č. 3, 1997: s. 815–825, doi:10.1109/28.585875.
- [31] Caprio, M.; Lelos, V.; Herbst, J.; aj.: Advanced Induction Motor Endring Design Features for High Speed Applications. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Electric Machines and Drives, 2005.*, 2005, s. 993–998, doi:10.1109/IEMDC.2005.195843.
- [32] Kim, Y.-K.; Choi, M.-C.; Suh, K.-H.; aj.: High-speed induction motor development for small centrifugal compressor. In *ICEMS'2001. Proceedings of the Fifth International Conference on Electrical Machines and Systems (IEEE Cat. No.01EX501)*, ročník 2, 2001, s. 891–894 vol.2, doi:10.1109/ICEMS.2001.971821.
- [33] Gerada, D.; Mebarki, A.; Brown, N. L.; aj.: Design, modelling and testing of a high speed induction machine drive. In *Proceedings of the 2012 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, 2012, s. 4649–4655, doi:10.1109/ECCE.2012.6342188.
- [34] Barta, J.; Uzhegov, N.; Losak, P.; aj.: Squirrel-Cage Rotor Design and Manufacturing for High-Speed Applications. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, ročník 66, č. 9, 2019: s. 6768–6778, doi:10.1109/TIE.2018.2879285.
- [35] Gerada, D.; Huang, X.; Zhang, C.; aj.: Electrical Machines for Automotive Electrically Assisted Turbocharging. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, ročník 23, č. 5, 2018: s. 2054–2065, doi:10.1109/TMECH.2018.2849081.

- [36] Huppunen, J.: *High-Speed Solid-Rotor Induction Machine – Electromagnetic Calculation and Design*. Dizertační práce, Lappeenranta University of Technology, 2004.
- [37] Pyrhonen, J.; Nerg, J.; Kurronen, P.; aj.: High-Speed High-Output Solid-Rotor Induction-Motor Technology for Gas Compression. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, ročník 57, č. 1, 2010: s. 272–280, doi:10.1109/TIE.2009.2021595.
- [38] Smirnov, A.; Uzhegov, N.; Sillanpää, T.; aj.: High-Speed Electrical Machine with Active Magnetic Bearing System Optimization. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, ročník 64, č. 12, 2017: s. 9876–9885, doi:10.1109/TIE.2017.2716875.
- [39] Lähteenmäki, J.: *Design and Voltage Supply of High-Speed Induction Machines*. Dizertační práce, Helsinki University of Technology, 2002.
- [40] Gieras, J. F.; Saari, J.: Performance Calculation for a High-Speed Solid-Rotor Induction Motor. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, ročník 59, č. 6, 2012: s. 2689–2700, doi:10.1109/TIE.2011.2160516.
- [41] Raminosa, T.; Blunier, B.; Fodorean, D.; aj.: Design and Optimization of a Switched Reluctance Motor Driving a Compressor for a PEM Fuel-Cell System for Automotive Applications. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, ročník 57, č. 9, 2010: s. 2988–2997, doi:10.1109/TIE.2010.2041133.
- [42] Gan, C.; Chen, Y.; Cui, X.; aj.: Comprehensive Investigation of Loss Calculation and Sequential Iterative Fluid-Solid Coupling Schemes for High-Speed Switched Reluctance Motors. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, ročník 36, č. 2, 2021: s. 671–681, doi:10.1109/TEC.2020.3023039.
- [43] Liu, Z.; Cao, X.; Cai, J.: A Magnetic Bearing Switched Reluctance Motor With Simultaneous Excitation by a Modified Half-Bridge Converter. *IEEE Transactions on Magnetics*, ročník 55, č. 10, 2019: s. 1–5, doi:10.1109/TMAG.2019.2921725.
- [44] Tang, Y.; He, Y.; Wang, F.; aj.: Voltage-Sourced Converter Fed High-Speed Switched Reluctance Motor Drive System With Energy Feedback and Near-Unity Power Factor. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, ročník 69, č. 4, 2022: s. 3460–3470, doi:10.1109/TIE.2021.3073304.
- [45] Lee, D.-H.; Pham, T. H.; Ahn, J.-W.: Design and Operation Characteristics of Four-Two Pole High-Speed SRM for Torque Ripple Reduction. *IEEE*

- Transactions on Industrial Electronics*, ročník 60, č. 9, 2013: s. 3637–3643, doi: 10.1109/TIE.2012.2208432.
- [46] Korkosz, M.; Bogusz, P.; Prokop, J.: Complex Performance Analysis and Comparative Study of Very High-Speed Switched Reluctance Motors. *IEEE Transactions on Magnetics*, ročník 55, č. 8, 2019: s. 1–14, doi:10.1109/TMAG.2019.2910492.
- [47] Dang, J.; Rhett Mayor, J.; Semidey, S. A.; aj.: Practical Considerations for the Design and Construction of a High-Speed SRM With a Flux-Bridge Rotor. *IEEE Transactions on Industry Applications*, ročník 51, č. 6, 2015: s. 4515–4520, doi:10.1109/TIA.2015.2445813.
- [48] Ferreira, C.; Jones, S.; Heglund, W.; aj.: Detailed design of a 30-kW switched reluctance starter/generator system for a gas turbine engine application. *IEEE Transactions on Industry Applications*, ročník 31, č. 3, 1995: s. 553–561, doi: 10.1109/28.382116.
- [49] Gong, C.; Habetler, T.: Design and Experimental Analysis of an Ultra-High Speed Switched Reluctance Machine With Aerostatic Bearings. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, ročník 9, č. 2, 2023: s. 2255–2266, doi:10.1109/TTE.2022.3222481.
- [50] Credo, A.; Kurvinen, E.; Petrov, I.; aj.: Materials Applicable to an Axially-Laminated Synchronous Reluctance Machine Considering Mechanical and Electromagnetic Aspects. *IEEE Transactions on Industry Applications*, ročník 60, č. 1, 2024: s. 153–163, doi:10.1109/TIA.2023.3309285.
- [51] Abramenko, V.; Petrov, I.; Nerg, J.; aj.: Synchronous Reluctance Motors With an Axially Laminated Anisotropic Rotor as an Alternative in High-Speed Applications. *IEEE Access*, ročník 8, 2020: s. 29149–29158, doi:10.1109/ACCESS.2020.2971685.
- [52] Park, J.-D.; Kalev, C.; Hofmann, H. F.: Analysis and Reduction of Time Harmonic Rotor Loss in Solid-Rotor Synchronous Reluctance Drive. *IEEE Transactions on Power Electronics*, ročník 23, č. 2, 2008: s. 985–992, doi: 10.1109/TPEL.2007.915622.
- [53] Di Nardo, M.; Gallicchio, G.; Palmieri, M.; aj.: High Speed Permanent Magnet Assisted Synchronous Reluctance Machines – Part II: Performance Boundaries. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, ročník 37, č. 4, 2022: s. 2567–2577, doi:10.1109/TEC.2022.3176383.

- [54] Gallicchio, G.; Di Nardo, M.; Palmieri, M.; aj.: High Speed Synchronous Reluctance Machines: Modeling, Design and Limits. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, ročník 37, č. 1, 2022: s. 585–597, doi:10.1109/TEC.2021.3086879.
- [55] Palmieri, M.; Perta, M.; Cupertino, F.: Design of a 50.000-r/min Synchronous Reluctance Machine for an Aeronautic Diesel Engine Compressor. *IEEE Transactions on Industry Applications*, ročník 52, č. 5, 2016: s. 3831–3838, doi:10.1109/TIA.2016.2571681.
- [56] Zhang, Y.; McLoone, S.; Cao, W.; aj.: Power Loss and Thermal Analysis of a MW High-Speed Permanent Magnet Synchronous Machine. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, ročník 32, č. 4, 2017: s. 1468–1478, doi:10.1109/TEC.2017.2710159.
- [57] Garibaldi, M.; Gerada, C.; Ashcroft, I.; aj.: The Impact of Additive Manufacturing on the Development of Electrical Machines for MEA Applications: A Feasibility Study. In *MEA2015 More Electric Aircraft*, Toulouse, France, 2015.
- [58] Chaudhary, V.; Mantri, S.; Ramanujan, R.; aj.: Additive manufacturing of magnetic materials. *Progress in Materials Science*, ročník 114, 2020: str. 100688, ISSN 0079-6425, doi:10.1016/j.pmatsci.2020.100688.
- [59] Lee, J.-Y.; An, J.; Chua, C. K.: Fundamentals and applications of 3D printing for novel materials. *Applied Materials Today*, ročník 7, 2017: s. 120–133, ISSN 2352-9407, doi:10.1016/j.apmt.2017.02.004.
- [60] Wrobel, R.; Mecrow, B.: A Comprehensive Review of Additive Manufacturing in Construction of Electrical Machines. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, ročník 35, č. 2, 2020: s. 1054–1064, doi:10.1109/TEC.2020.2964942.
- [61] Gokuldoss, P. K.; Kolla, S.; Eckert, J.: Additive Manufacturing Processes: Selective Laser Melting, Electron Beam Melting and Binder Jetting—Selection Guidelines. *Materials*, ročník 10, č. 6, 2017, ISSN 1996-1944, doi:10.3390/ma10060672.
- [62] Schleifenbaum, H.; Meiners, W.; Wissenbach, K.; aj.: Individualized production by means of high power Selective Laser Melting. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, ročník 2, č. 3, 2010: s. 161–169, ISSN 1755-5817, doi:10.1016/j.cirpj.2010.03.005, sustainable Development of Manufacturing Systems.
- [63] Liu, Z.; Li, C.; Fang, X.; aj.: Energy Consumption in Additive Manufacturing of Metal Parts. *Procedia Manufacturing*, ročník 26, 2018: s. 834–845, ISSN

- 2351-9789, doi:10.1016/j.promfg.2018.07.104, 46th SME North American Manufacturing Research Conference, NAMRC 46, Texas, USA.
- [64] Cacace, S.; Semeraro, Q.: Influence of the atomization medium on the properties of stainless steel SLM parts. *Additive Manufacturing*, ročník 36, 2020: str. 101509, ISSN 2214-8604, doi:10.1016/j.addma.2020.101509.
- [65] Nandhakumar, R.; Venkatesan, K.: A process parameters review on selective laser melting-based additive manufacturing of single and multi-material: Microstructure, physical properties, tribological, and surface roughness. *Materials Today Communications*, ročník 35, 2023: str. 105538, ISSN 2352-4928, doi:10.1016/j.mtcomm.2023.105538.
- [66] Slotwinski, J. A.; Garboczi, E. J.; Stutzman, P. E.; aj.: Characterization of metal powders used for additive manufacturing. *Journal of research of the National Institute of Standards and Technology*, ročník 119, č. 1, 2014: s. 460–493, ISSN 2165-7254.
- [67] Ting, J.; Connor, J.; Ridder, S.: High-speed cinematography of gas-metal atomization. *Materials Science and Engineering: A*, ročník 390, č. 1, 2005: s. 452–460, ISSN 0921-5093, doi:10.1016/j.msea.2004.08.060.
- [68] Wallner, S.: Powder Production Technologies. *BHM. Berg- und hüttenmännische Monatshefte*, ročník 164, č. 3, 2019: s. 108–111, ISSN 0005-8912.
- [69] Neikov, O. D.: Atomization and Granulation. In *Handbook of Non-Ferrous Metal Powders*, Elsevier, 2009, ISBN 9781856174220, s. 125–185.
- [70] Wu, F.; EL-Refaie, A. M.: Toward Additively Manufactured Electrical Machines: Opportunities and Challenges. *IEEE Transactions on Industry Applications*, ročník 56, č. 2, 2020: s. 1306–1320, doi:10.1109/TIA.2019.2960250.
- [71] Nishanth, F.; Goodall, A. D.; Todd, I.; aj.: Characterization of an Axial Flux Machine With an Additively Manufactured Stator. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, ročník 38, č. 4, 2023: s. 2717–2729, doi:10.1109/TEC.2023.3285539.
- [72] Mix, T.; Gröninger, M.; Jin, Z.; aj.: Additive Manufacturing of Low Loss Electrical Steel Sheets for High Efficiency Electrical Devices. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, ročník 9, č. 4, 2023: s. 5226–5231, doi:10.1109/TTE.2023.3298488.

- [73] Gargalis, L.; Madonna, V.; Giangrande, P.; aj.: Additive Manufacturing and Testing of a Soft Magnetic Rotor for a Switched Reluctance Motor. *IEEE Access*, ročník 8, 2020: s. 206982–206991, doi:10.1109/ACCESS.2020.3037190.
- [74] Tiismus, H.; Kallaste, A.; Naseer, M. U.; aj.: Design and Performance of Laser Additively Manufactured Core Induction Motor. *IEEE Access*, ročník 10, 2022: s. 50137–50152, doi:10.1109/ACCESS.2022.3173317.
- [75] VUT v Brně (CZ): *Způsob výroby rotoru synchronního reluktančního motoru a rotor synchronního reluktančního motoru*. Přihl.: 17.11.2022. Uděl.: 22.11.2023. Patentový spis CZ 309876 B6. Dostupné z: [https://isdv.upv.gov.cz/webapp/resdb.print\\_detail.det?pspis=PT/2022-482](https://isdv.upv.gov.cz/webapp/resdb.print_detail.det?pspis=PT/2022-482) [cit. 2024-09-10].
- [76] Tascioglu, E.; Karabulut, Y.; Kaynak, Y.: Influence of heat treatment temperature on the microstructural, mechanical, and wear behavior of 316L stainless steel fabricated by laser powder bed additive manufacturing. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, ročník 107, 2020: s. 1947–1956, doi:10.1007/s00170-020-04972-0.



# Seznam autorových publikací

## K tématu disertační práce

- [A1] Klima, P.; Barta, J.; Koutny, D.; Vitek, O.: High-Speed Synchronous Reluctance Machine Rotor Using Multi-Material Additive Manufacturing. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2024, ISSN: 1558-0059, Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/TEC.2024.3475512>.
- [A2] Sizonenko, V.; Vitek, O.; Klíma, P.; Bianchi, N.: Design and Optimization of PMSynRM with Short-circuit Fault Tolerance. *2024 International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, [cit. 2024-09-10, dosud nezveřejněno].
- [A3] VUT v Brně (CZ): *Způsob výroby rotoru synchronního reluktančního motoru a rotor synchronního reluktančního motoru*. Přihl.: 17.11.2022, Uděl.: 22.11.2023, Patentový spis CZ 309876 B6, Dostupné z: [https://isdv.upv.gov.cz/webapp/resdb.print\\_detail\\_det?pspis=PT/2022-482](https://isdv.upv.gov.cz/webapp/resdb.print_detail_det?pspis=PT/2022-482), [cit. 2024-09-10].
- [A4] Klima, P.; Rura, D.; Vitek, O.: Analysis and Reduction of Eddy Current Losses in High-Speed Solid Outer Rotor Induction Machine. *2022 International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, 2022, s. 1022-1026, ISBN: 978-1-6654-1432-6, Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/ICEM51905.2022.9910785>.
- [A5] Klíma, P.; Ondrůšek, Č.; Mach, M.: Návrh vysokootáčkového asynchronního motoru. *Elektrorevue - Internetový časopis* (<http://www.elektrorevue.cz>), ročník 23, č. 2, 2021: s. 49-54, ISSN: 1213-1539, Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/214146>.
- [A6] Klima, P.; Ondrusek, C.; Mach, M.; Losak, P.: Effect of solid rotor slit dimensions on electromagnetical and mechanical properties of induction machine. *2020 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2020 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC/ICE3CPS Europe)*, 2020, s. 706-709, ISBN: 978-1-7281-7455-6, Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/EEEIC/ICPSEurope49358.2020.9160598>.

## Mimo téma disertační práce

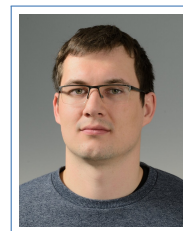
- [A7] Pribulla, D.; Klima, P.: Analysis of Permanent Magnet Segmentation Influence on Eddy-Current Losses in High-Speed PM Synchronous Machine. *In Proceedings I of the 29th Student EEICT 2023*, 2023, s. 317-321, ISBN 978-80-214-6153-6.
- [A8] Rura, D.; Barta, J.; Klima, P.: Design and Analysis of Homopolar Electrodynamic Bearing with Radial Magnets. *2022 International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, 2022, s. 321-327, ISBN: 978-1-6654-1432-6, Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/ICEM51905.2022.9910773>.

- [A9] Klima, P.; Vitek, O.: Influence of the magnet shape on the rotor eddy-current losses in the outer rotor permanent magnet synchronous motor. *In Proceedings I of the 28th Student EEICT 2022*, 2022. s. 326-330, ISBN: 978-80-214-6029-4.
- [A10] Klima, P.: Copper Losses in Parallel Wires and Litz Wire in Permanent Magnet Synchronnous Machine. *In Proceedings I of the 27th Student EEICT 2021*, 2021. s. 529-533, ISBN: 978-80-214-5942-7.
- [A11] Klima, P. Comparison of copper losses of litz wire and parallel wires in high speed induction motor. *In Proceedings I of the 26th Student EEICT 2020*, 2020, s. 408-412, ISBN: 978-80-214-5867-3.

# Ing. Petr Klíma

## Životopis

Luční 1207/29  
591 01 Žďár nad Sázavou  
Česká republika  
☎ +420 736 165 259  
✉ [petklima85@gmail.com](mailto:petklima85@gmail.com)  
Dat. narození 8.5.1995



### Vzdělání

- 2019–dnes **Doktorské studium**, *Vysoké učení technické - Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií*, Brno.  
Disertační práce na téma: „Vysokootáčkový stroj pro speciální použití“
- 2017–2019 **Titul inženýr**, *Vysoké učení technické - Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií*, Brno.  
Diplomová práce na téma: „Skin efekt ve vysokootáčkových elektrických strojích“
- 2014–2017 **Titul bakalář**, *Vysoké učení technické - Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií*, Brno.  
Bakalářská práce na téma: „Malý třífázový asynchronní motor“

### Pracovní zkušenosti

- 2024–dnes **Výzkumný pracovník**, *PZK Brno a.s.*, Brno.  
Výzkum a měření magnetických vlastností permanentních magnetů, elektromagnetické výpočty, technická podpora.
- 2019–2024 **Výzkumný pracovník**, *VUT v Brně, Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky*, Brno.  
Návrh, optimalizace a měření elektrických strojů, tvorba elektromagnetických a mechanických modelů elektrických strojů v programech využívajících metodu konečných prvků, vytváření skriptů v jazyce Python.
- 2020–2022 **Laboratorní pracovník**, *Akademie věd České republiky, Ústav fyziky materiálů*, Brno.  
Měření magnetických vlastností materiálů toroidní metodou.
- 2019 **Pomocný projektant**, *DEL a.s.*, Žďár nad Sázavou.  
Kreslení rozvaděčů v EPLAN.
- 2016, 2017, 2018 **Programátor robotů**, *DEL a.s.*, Žďár nad Sázavou.  
Programování průmyslových robotů KUKA a FANUC, oživování svařovacích buněk.

### Stáže v zahraničí

- říjen–prosinec 2023 **Stáž na univerzitě v Linci**, *Institut elektrických pohonů a výkonové elektroniky*, Johannes Kepler University Linz.  
Studium a měření tepelné závislosti elektrického odporu elektrotechnických plechů.