

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE



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

NÁVRH VYSOKOotáčkového SYNCHRONNÍHO STROJE S PERMANENTNÍMI MAGNETY

DESIGN OF HIGH SPEED PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MACHINE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Daniel Příbyl

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Čestmír Ondrůšek, CSc.

BRNO 2020

Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika**

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Student: Daniel Přebyl

ID: 203420

Ročník: 3

Akademický rok: 2019/20

NÁZEV TÉMATU:

Návrh vysokootáčkového synchronního stroje s permanentními magnety

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Provedte literární rešerši.
2. Navrhněte vhodné řešení stroje 1,5 MW, 15000 ot/min, 3x7000 V.
3. Provedte elektromagnetický návrh stroje.
4. Vypočtete 2D průběh magnetického pole.
5. Provedte návrh hlavních rozměrů.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] Gieras, J.: Permanent magnet motor technology: design and applications. CRC Press, 2010.
- [2] High voltage Permanent Magnet Synchronous Motor. Dostupné z <http://www.ti.com/tool/HVPMSMMTR>
- [3] Bureš, P.: Návrh synchronního stroje s permanentními magnety. Dipl. Práce VUT, 2019.
- [4] Cigánek, L., Bauer, M.: Elektrické stroje a přístroje. Praha, SNTL 1957

Termín zadání: 3.2.2020

Termín odevzdání: 10.6.2020

Vedoucí práce: doc. Ing. Čestmír Ondrůšek, CSc.

doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

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

ABSTRAKT

Bakalářská práce se zabývá problematikou synchronních strojů s permanentními magnety. V práci je uveden princip funkce a řešení stroje. Dále je rozebráno vinutí statoru, možnosti umístění magnetů na rotor a seznámení se s používanými typy permanentních magnetů. V části řešení problému práce je proveden návrh synchronního stroje s permanentními magnety o výkonu 1,5 MW a jmenovitými otáčkami 15000 ot./min. Stroj je řešen s rotorem uvnitř a magnety umístěnými na povrchu. Řešení se zabývá návrhem rozměrů statoru včetně drážky, návrhem vinutí a návrhem permanentních magnetů. Celý analytický návrh byl porovnán s výsledky analýzy z programu RMXprt. Pro stroj byl vypočítán, metodou konečných prvků, průběh magnetického pole pomocí programu Ansys Maxwell. Pro stroj byly vypočteny kritické otáčky, při kterých a v blízkosti nich nemůže pracovat.

KLÍČOVÁ SLOVA

Vysokootáčkový synchronní stroj s permanentními magnety, PMSM, Neodymové magnety, RMXprt, Ansys Maxwell, Ansys Mechanical, Kritické otáčky

ABSTRACT

Bachelor's thesis is focused on problematic of synchronous machines with permanent magnets. In this thesis is described the principle of function and design solution of the machine. Furthermore it deals with stator winding, possibility of placing magnets on the rotor and used types of permanent magnets.

In the part of solution of the assignment of work is made design of synchronous machine with permanent magnets with output 1,5 MW and rated speed 15000 rpm. The machine is designed with inner rotor and magnets placed on surface. The solution includes design of dimensions of stator including design of slot, design of winding and design of permanent magnet. The whole analytical design was finally compared with the results of the analysis in the RMXprt program. For machine was calculated 2D magnetic field by finite element method in Ansys Maxwell. Finally was calculated critical speed.

KEYWORDS

High speed permanent magnet synchronous machine, PMSM, Neodymium magnets, RMXprt, Ansys Maxwell, Ansys Mechanical, Critical speed

PŘIBYL, Daniel. *Návrh vysokootáčkového synchronního stroje s permanentními magnety*. Brno, 2020, 70 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky. Vedoucí práce: doc. Ing. Čestmír Ondrůšek, CSc.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma „Návrh vysokootáčkového synchronního stroje s permanentními magnety“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno

.....

podpis autora

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu bakalářské práce panu doc. Ing. Čestmíru Ondrůškovi, CSc. za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci. Dále bych chtěl poděkovat panu Ing. Petru Klímovi za konzultace, cenné rady a seznámení s prostředím Ansys.

Obsah

Úvod	12
1 Synchronní motor s permanentními magnety (PMSM)	13
1.1 Princip funkce PMSM	13
2 Konstrukce PMSM	16
2.1 Stator	16
2.1.1 Statorové plechy	16
2.2 Vinutí statoru	16
2.2.1 Jednovrstvé vinutí	17
2.2.2 Dvouvrstvé vinutí	17
2.2.3 Soustředné vinutí	18
2.3 Rotor	19
2.3.1 S magnety na povrchu	19
2.3.2 Se zapuštěnými magnety	19
2.3.3 S vnořenými magnety	20
2.4 Permanentní magnety	20
2.4.1 Ferity	21
2.4.2 AlNiCo	21
2.4.3 Samarium–kobaltové magnety	21
2.4.4 Neodymové magnety	21
3 Návrh synchronního stroje s permanentními magnety	23
3.1 Výpočet stroje jako motor	23
3.1.1 Vinutí statoru	24
3.1.2 Délka statoru	24
3.1.3 Návrh drážky statoru a magnetického obvodu	25
3.1.4 Návrh permanentního magnetu	27
3.1.5 Ztráty ve vinutí	30
3.1.6 Ztráty v železe	32
3.1.7 Účinnost motoru	33
3.1.8 RMxprt	33
3.1.9 Úprava parametrů podle programu RMxprt	34
3.1.10 Výpočet 2D průběhu magnetického pole	37
3.1.11 Kritické otáčky	41
3.2 Výpočet stroje jako generátor	44
3.2.1 Rozměry statoru	45

3.2.2	Návrh drážky statoru a magnetického obvodu	45
3.2.3	Návrh permanentního magnetu	47
3.2.4	Ztráty ve vinutí	48
3.2.5	Ztráty v železe	50
3.2.6	Účinnost generátoru	50
3.2.7	RMxprt	51
3.2.8	Úprava parametrů podle programu RMxprt	51
3.2.9	Výpočet 2D průběhu magnetického pole	55
3.2.10	Kritické otáčky	58
3.3	Porovnání obou variant návrhu	61
	Závěr	63
	Literatura	64
	Seznam symbolů, veličin a zkratk	66
	Přílohy	69

Seznam obrázků

1.1	Provedení synchronního stroje s permanentními magnety [10]	13
1.2	Zátěžný úhel synchronního stroje [4]	14
2.1	Jednovrstvé vinutí statoru [11]	17
2.2	Dvouvrstvé vinutí statoru [11]	18
2.3	Soustředné vinutí [6]	18
2.4	Příklad rotoru s magnety na povrchu [8]	19
2.5	Příklad rotoru s vnořenými magnety [8]	20
2.6	Příklad rotoru s vnořenými „V“ magnety [19]	20
2.7	Neodymový magnet vystavený vlivu okolí po 5 měsících[14]	22
3.1	Okótovaná drážka statoru	26
3.2	Demagnetizační charakteristika N45UH [15]	27
3.3	Délka vinutí [17]	31
3.4	Průběh magnetické indukce pod jedním pólem	37
3.5	Rozložení magnetické indukce v motoru	38
3.6	Průběh magnetické indukce v polovině délky statorového zubu	38
3.7	Detailní pohled na rozložení magnetické indukce v statorovém zubu	39
3.8	Průběh magnetické indukce v statorovém jhu nad drážkou	39
3.9	Detailní pohled na rozložení magnetické indukce v statorovém jhu	40
3.10	Model hřídele motoru s rotorovou částí	41
3.11	Campbellův diagram	42
3.12	Model hřídele motoru s rotorovou částí	42
3.13	Campbellův diagram	43
3.14	Rozměry motoru	43
3.15	Okótovaná drážka statoru	46
3.16	Délka vinutí	49
3.17	Průběh magnetické indukce pod jedním pólem	55
3.18	Rozložení magnetické indukce v generátoru	55
3.19	Průběh magnetické indukce v polovině délky statorového zubu	56
3.20	Detailní pohled na rozložení magnetické indukce v statorovém zubu	56
3.21	Průběh magnetické indukce v statorovém jhu nad drážkou	57
3.22	Detailní pohled na rozložení magnetické indukce v statorovém jhu	57
3.23	Model hřídele generátoru s rotorovou částí	58
3.24	Campbellův diagram	59
3.25	Model hřídele generátoru s rotorovou částí	59
3.26	Campbellův diagram	60
3.27	Rozměry generátoru	60
3.28	Rozměry motoru	62

3.29 Rozměry generátoru	62
-----------------------------------	----

Seznam tabulek

3.1	Zadané parametry stroje	23
3.2	Vlastnosti magnetického materiálu N45UH při 20 °C	27
3.3	Koeficienty materiálu M235-35A	32
3.4	Srovnání vypočtených parametrů s parametry z RMxpřt	33
3.5	Srovnání upravených parametrů s parametry z RMxpřt	36
3.6	Parametry rotoru	41
3.7	Vlastnosti magnetického materiálu N45UH při 60 °C	47
3.8	Srovnání vypočtených parametrů s parametry z RMxpřt	51
3.9	Srovnání upravených parametrů s parametry z RMxpřt	54
3.10	Parametry rotoru	58
3.11	Tabulka srovnání parametrů variant návrhu	61

Úvod

Synchronní motory s permanentními magnety (PMSM), z anglického „Permanent magnet synchronous motor“, jsou v dnešní době velmi často využívány. Jsou rozšířeny do mnoha odvětví, používají se jak v malých domácích spotřebičích, tak i pro výkonově náročné operace, jako je například trakce. Příklad PMSM přímo souvisí s vývojem polovodičových měničů a materiálů pro permanentní magnety. [1][2]

Dříve nejpoužívanějším motorem byly stejnosměrné motory, díky své jednoduchosti a nízké ceně. Postupem času je v mnoho aplikacích začaly nahrazovat asynchronní motory nebo také synchronní stroje s permanentními magnety, které nabízejí větší efektivitu provozu a přesné řízení chodu. Rozvoj PMSM byl zřetelný až po zdokonalení polovodičových měničů a permanentních magnetů. Jelikož v dnešní době je snaha u všeho zvyšovat účinnost, tak postupem času začínají PMSM nahrazovat asynchronní motory. [1][3]

Jelikož na rotoru není umístěno vinutí, jsou schopny PMSM, při stejném objemu jako indukční motory, pracovat s vyšší účinností. Díky tomu může motor s vyšším výkonem mít menší rozměry. Nevýhodou oproti indukčním motorům zůstává jejich cena. [1]

Ve srovnání s kartáčovými synchronními motory je jejich údržba nenáročná, jelikož na rotoru není potřeba přivádět elektrickou energii a tím pádem odpadají náklady na údržbu sběracích kartáčů. S tím souvisí také to, že na rotoru není vinutí, tedy další snížení ztrát. Místo vinutí zde magnetické pole zajišťují permanentní magnety. Vinutí u PMSM se nachází pouze na statoru, na které je přivedeno napětí a pomocí něj se vytváří točivé magnetické pole. Toto řešení je výhodné kvůli ztrátám i kvůli ochlazení motoru. To že je umístěno vinutí na statoru a není na rotoru je výhodnější z hlediska spolehlivosti. Díky tomu, že na rotoru jsou umístěny permanentní magnety, získáváme konstantní magnetické pole rotoru. Při návrhu PMSM je důležitý zejména návrh magnetického obvodu. Od něj se odvíjí parametry a rozměry motoru. Cena je ovlivněna především návrhem magnetického obvodu a použitými permanentními magnety.

1 Synchronní motor s permanentními magnety (PMSM)

PMSM jsou bezkartáčové stroje, které jsou buzeny permanentními magnety namísto vinutí na rotoru. Permanentní magnety jsou na bázi vzácných zemin a jejich využití se začalo rozvíjet až s technologií jejich výroby a rozvojem polovodičových měničů. Jelikož se u PMSM nedokáže rotor sám z klidu vtáhnout do točivého magnetického pole statoru při jmenovitých otáčkách, používá se frekvenční měnič, aby se motor mohl, bez pomocného vinutí či vnějšího pomocného startu, sám rozběhnout. Frekvenční měnič nejenže zajišťuje plynulý start motoru a rotor je schopen následovat statorové magnetické pole, ale také řízení otáček. PMSM mají mnoho výhod, mezi které patří například velmi dobrý poměr mezi výkonem a velikostí, velká momentová zatížitelnost, s čímž souvisí přímé připojení pohonu bez převodu, menší moment setrvačnosti a velká účinnost. Mezi nevýhody PMSM patří vyšší cena, která je hlavně ovlivněna cenou permanentních magnetů.



Obr. 1.1: Provedení synchronního stroje s permanentními magnety [10]

1.1 Princip funkce PMSM

PMSM funguje stejně jako synchronní stroj s hladkým rotorem, s rozdílem buzení. Motor se skládá ze statoru a rotoru. Stator se skládá z plechů s drážkami pro vinutí. Vinutí je nejčastěji trojfázové a jednotlivé fáze jsou vůči sobě posunuty o 120° elektrických. Průchodem proudu je vytvářeno točivé magnetické pole, které působí na rotor. Na rotoru jsou umístěny permanentní magnety, které jsou vtahovány do točivého magnetického pole. Motor se otáčí synchronními otáčkami, které jsou závislé

na frekvenci napájecího napětí a počtu pólů. Synchronní úhlová rychlost je popsána vztahem:

$$\omega_s = \frac{2\pi f}{p}, \quad (1.1)$$

kde f je frekvence napájecího napětí a p je počet pólových dvojic statoru. Točivé magnetické pole i rotor se otáčejí synchronními otáčkami:

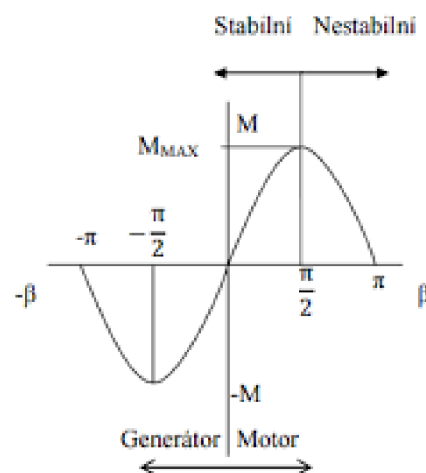
$$n_s = \frac{f}{p} \cdot 60, \quad (1.2)$$

které jsou vyjádřeny za minutu.

Moment PMSM je dán zátěžným úhlem, tím se rozumí vzájemný posun magnetických polí. Zátěžný úhel značíme β . Pokud je zátěžný úhel roven nule $\beta = 0$, tak je stroj nezatížen a pracuje naprázdno. Když je $\beta > 0$, tak stroj pracuje jako motor a když je $\beta < 0$, tak pracuje jako generátor. Stroj má moment zvratu v $\beta = \frac{\pi}{2}$, jelikož průběh momentu na zátěžném úhlu má funkci sinusovky. Moment při různém zatížení odpovídá vztahu:

$$M = \frac{U_1 \cdot U_0 \cdot m \cdot \sin \beta}{\omega_s \cdot X_s}, \quad (1.3)$$

kde U_1 je fázové napětí, U_0 je fázové napětí naprázdno, m počet fází a X_s synchronní reaktance stroje. Synchronní reaktance je složena z reaktance hlavní a rozptylové. Hlavní reaktance nebo také magnetizační reaktance kotvy představuje úbytek napětí v magnetizaci kotvy. Rozptylová reaktance představuje úbytek na vinutí kotvy. V obvodovém modelu dále najdeme odpor vinutí kotvy, ale ten se zanedbává, jelikož je mnohem menší než synchronní reaktance.



Obr. 1.2: Zátěžný úhel synchronního stroje [4]

Motory jsou napájeny sinusovými průběhy napětí. Sinusových průběhů proudů zde nejčastěji dosáhneme použitím pulsní šířkové modulace.

PMSM pro správnou funkci a řízení musí mít snímání polohy rotoru. Kvůli řízení momentu je zapotřebí co nejpřesnější snímání polohy rotoru. K snímání polohy se u motorů PMSM používají resolvers či inkrementální snímače.

2 Konstrukce PMSM

Jak už bylo výše zmíněno, PMSM se ve principu funkce od klasických synchronních strojů moc neliší. Stejně tak je tomu i u jeho konstrukce. Jeho hlavní odlišností je rotor. Na rotoru jsou místo vinutí umístěny permanentní magnety. Provedení, jak magnety na rotor umístit, je hned několik.

2.1 Stator

Stator PMSM se skládá z plechů, ve kterých jsou vytvořeny drážky pro statorové vinutí. Geometrie drážek se buďto navrhuje pro daný motor nebo bývá použita již z jiného navrženého motoru podobných parametrů.

2.1.1 Statorové plechy

Jako u jiných točivých strojů je stator tvořen vzájemně izolovanými elektrotechnickými plechy. Tyto plechy mohou mít různé magnetické a mechanické vlastnosti a pro návrh je tedy důležité jaký typ plechu zvolit. V praxi je volen plech s nejlepším průřezem zajištění příznivých parametrů a ekonomičnosti. Kvalita zpracování a tloušťka plechu mají velký vliv na ztráty v železe. Pro korektní výběr je třeba znát pracovní frekvenci stroje, od které se odvíjí hysterezní ztráty a ztráty vířivými proudy. V katalogu je tedy nutné se podívat na tvar magnetizační křivky a zastoupení měrných ztrát při různých frekvencích. Frekvence je velice důležitá, jelikož hysterezní ztráty lineárně rostou s frekvencí a ztráty vířivými proudy dokonce s jejím kvadrátem. Hysterezní ztráty jsou dány vlivem magnetické hystereze při cyklickém magnetování statoru. Ztráty vířivými proudy se dají redukovat správnou geometrií statorových plechů, a proto jsou využívány tenké vzájemně izolované plechy.

2.2 Vinutí statoru

Vinutí u střídavých točivých strojů se navrhuje tak, aby točivé pole, které tvoří, se co nejvíce podobalo sinusovému průběhu. Pro potlačení vyšších harmonických je potřeba volit větší počet drážek. Vinutí je tvořeno cívkami uloženými v drážkách. Tyto cívky se navíjejí z mědi, která je na povrchu izolovaná lakem. Každá cívka se skládá ze dvou stran a dvou čel. Vzdálenost cívkových stran je přibližně rovna pólové rozteči. Tuto vzdálenost nazýváme krokem cívky a označujeme y . Krok cívky se udává v počtu drážek. Například když máme krok cívky 5, tak to znamená, že mezi stranami cívky je 5 drážkových roztečí. Strany cívek jsou uloženy tak, že jedna

je v první drážce a druhá v šesté drážce. Počet drážek jednoho pólu je určen jako podíl celkového počtu drážek ku počtu pólů. Matematicky jako:

$$Q_p = \frac{Q}{2p}, \quad (2.1)$$

kde Q je celkový počet drážek statoru, $2p$ počet pólů a Q_p počet drážek připadající na jeden pól. Chceme-li vypočítat počet drážek na jednu fázi musíme výsledek podělit počtem fází:

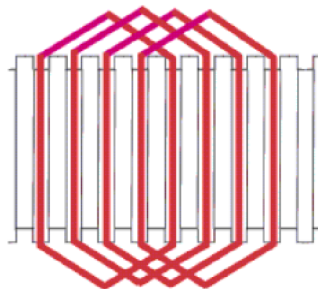
$$q = \frac{Q_p}{m}, \quad (2.2)$$

kde m je počet fází a q počet drážek na pól jedné fáze. [5]

Vinutí podle počtu vrstev dělíme na jednovrstvé a dvouvrstvé. Podle provedení na soustředné a vinutí rozložené. Podle počtu drážek na pól a fázi dělíme na vinutí s celistvým počtem drážek na pól a fázi a na vinutí zlomková.

2.2.1 Jednovrstvé vinutí

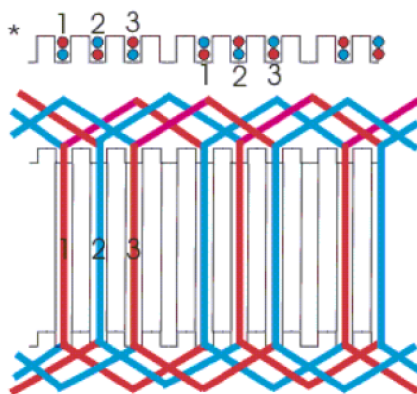
U jednovrstvého vinutí je počet cívek poloviční vůči počtu drážek. Je tomu z důvodu, že v jedné drážce se nachází strana pouze jedné cívky.



Obr. 2.1: Jednovrstvé vinutí statoru [11]

2.2.2 Dvouvrstvé vinutí

Pro dvouvrstvé vinutí platí, že počet cívek je roven počtu drážek. Jedna cívka zaplňuje v jedné drážce dolní polovinu a v druhé horní polovinu.

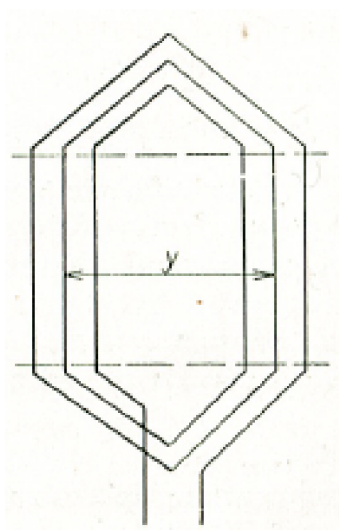


Obr. 2.2: Dvourstvé vinutí statoru [11]

2.2.3 Soustředné vinutí

Soustředné vinutí se stále častěji používá u PMSM. Jejich hlavní výhodou je kratší délka čel, a tedy větší aktivní část vinutí. Kratší čela mají za následek menší množství spotřebované mědi, což ovlivňuje pozitivním způsobem i ztráty ve vinutí. Platí také, že kdybychom zachovali objem stroje, ale použili rozložené vinutí, musel by být stator kratší, a tudíž by nám klesl i moment stroje. Takže se dá hovořit o zvýšení poměru momentu na objem stroje.

Cívky soustředného vinutí mají stejný střed a krok cívky není pro všechny stejný. Krokem cívky je tedy střední krok cívek jednoho svazku.



Obr. 2.3: Soustředné vinutí [6]

2.3 Rotor

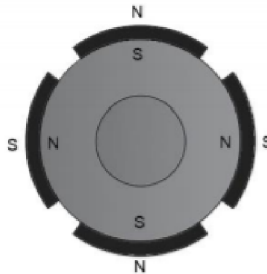
Rotor u synchronních strojů se obecně dělí do dvou kategorií. Provedení je buď s hladkým rotorem nebo s rotorem s vyniklými póly. Hladký rotor je používán pro aplikace s vysokými otáčkami a rotor se vyznačuje větší osovou délkou než průměrem. Rotor s vyniklými póly je naopak využíván pro pomaloběžné aplikace s velkým momentem. Konstrukce se vyznačuje kratší osovou délkou a větším počtem pólů.

Rotor u PMSM je osazen magnety, které jsou umístěny buď na povrchu nebo jsou v rotoru vnořeny. Rotor u PMSM je z plného materiálu nebo může být stejně jako u jiných točivých strojů složen z dynamových plechů.

2.3.1 S magnety na povrchu

V prvním případě jsou magnety připevněny na povrchu rotoru. Vzhledem k velkým odstředivým silám se používá, pro dodatečné upevnění magnetů, bandáž. Kvůli splnění podmínky mechanické pevnosti se rotor nehodí pro vysokootáčkové aplikace. Výhodou této varianty je vysoká magnetická indukce ve vzduchové mezeře.

Tvary magnetů jsou u této varianty obdélníkové. Tvar se volí dle požadovaného tvaru indukovaného napětí. Pro synchronní motory se používají tvary magnetů s vypouklým povrchem, které připomínají půloblouk, a to kvůli dodržení minimální výšky magnetu a lepšímu průběhu magnetické indukce. [8]



Obr. 2.4: Příklad rotoru s magnety na povrchu [8]

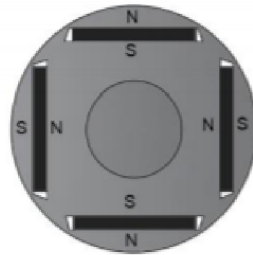
2.3.2 Se zapuštěnými magnety

Uložení magnetů uvnitř rotoru má výhody, jako je robustnost a lepší upevnění magnetů. U této varianty není třeba tolik řešit způsob upevnění magnetů. Pro zajištění mechanické pevnosti magnetů se volí lichoběžníkový tvar. Jelikož jsou magnety zapuštěny v rotoru, tak je rotor mechanicky hladký. To nám zajišťuje menší ztráty

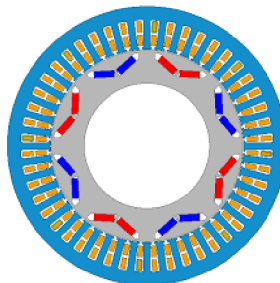
třením o vzduch oproti rotoru s magnety na povrchu. Tato varianta se používá pro servopohony.

2.3.3 S vnořenými magnety

Toto provedení je podobné provedení se zapuštěnými magnety s rozdílem v hloubce zanoření do rotoru. U vnořené varianty jsou magnety hlouběji uvnitř nebo mohou být úplně obklopeny materiálem rotoru. Výhodou této varianty uložení je největší mechanická odolnost připevnění magnetů. Proto je tato varianta vhodná pro vysokotáčkové aplikace. Nevýhodou je však složitější výroba.



Obr. 2.5: Příklad rotoru s vnořenými magnety [8]



Obr. 2.6: Příklad rotoru s vnořenými „V“ magnety [19]

2.4 Permanentní magnety

Permanentní magnety jsou nejdůležitější součástí u synchronních strojů buzených permanentními magnety. Pro výběr materiálu na permanentní magnety jsou důležité jeho vlastnosti, které přímo ovlivňují parametry stroje. Základním parametrem pro výběr jsou magnetické vlastnosti jako je magnetická indukce a koercitivní síla. Tyto parametry ale jsou spjaty s provozní teplotou. Tvarováním magnetu měníme tvar

magnetické indukce. Při návrhu tvaru magnetů musíme dbát zejména na výšku magnetů, která je spjata s odolností proti demagnetizaci. Magnetizace materiálů může probíhat ve dvou směrech, v radiálním a axiálním. Pro použití do elektrických strojů se používá radiální magnetování. [2]

V dnešní době se permanentní magnety vyrábí z těchto materiálů:

- feritové magnety
- AlNiCo magnety
- samarium–kobaltové magnety
- neodymové magnety

2.4.1 Ferity

Velmi často využívané magnety, hlavně díky jejich ceně. Jedná se o vůbec nejlevnější a nepoužívanější permanentní magnety. Nevýhodou magnetů je malá hodnota remanentní indukce a teplotní nestálost. Jeho chemická odolnost je naopak dobrá. Magnety jsou velice tvrdé a také křehké, při jejich výrobě se používají diamantové nástroje.

2.4.2 AlNiCo

Magnety sloučeniny hliník, nikl a kobalt jsou nejodolnějšími magnety vůči teplotě. Jejich magnetické vlastnosti jsou stálé až do 500 °C. To je činí velice vhodnými do aplikací s velkou provozní teplotou. Navíc jsou magnety vysoce odolné proti korozi. Do příchodu magnetů ze vzácných zemin byli nejsilnějšími magnety. Nevýhodou je nižší koercitivita a náchylnost k demagnetizaci.

2.4.3 Samarium–kobaltové magnety

Magnety typu samarium–kobalt byly, do nástupu neodymových magnetů, nejsilnějšími magnety. Vyznačují se velmi dobrými magnetickými vlastnostmi jako je vysoká remanence a dobrá odolnost proti vnější demagnetizaci. Magnety mají velkou koercitivní sílu. Jejich výhodami jsou odolnost proti korozi, magnety nepotřebují žádnou povrchovou úpravu, a odolnost vůči vysokým teplotám, provozní teplota magnetů se může pohybovat kolem 300 °C. Jejich nevýhodami je jejich křehkost, náchylnost ke štěpení a jejich vysoká cena. [13]

2.4.4 Neodymové magnety

V dnešní době nejsilnější magnety. Jedná se o sloučeninu neodymu, železa a boru, NdFeB. Magnety se vyznačují vysokou remanencí a koercitivitou. Magnety jsou

schopny unést až tisícinásobek své hmotnosti. Oproti předchozímu typu jsou lepší i z hlediska ceny, která je nižší. Stejně velký magnet jako u SmCo se dá koupit desetkrát levněji. [12] Nevýhodou neodymových magnetů je jejich náchylnost ke korozi. Proto se magnety ošetřují niklováním, zinkováním nebo pryskyřicí. Další nevýhodou je špatná teplotní odolnost a magnety začínají ztrácet své magnetické vlastnosti při vyšších teplotách, u některých je hraniční teplota už při 80 °C.



Obr. 2.7: Neodymový magnet vystavený vlivu okolí po 5 měsících[14]

3 Návrh synchronního stroje s permanentními magnety

Pro návrh synchronního stroje s permanentními magnety byly zadány parametry viz tabulka 3.1.

Tab. 3.1: Zadané parametry stroje

Počet drážek	Q	24
Počet fází	m	3
Počet pólů	$2p$	4
Počet vrstev vinutí		2
Činitel plnění drážky	k_{pCu}	0,4
Činitel vinutí	k_v	0,8
Činitel plnění železa	k_{pFe}	0,95
Jmenovité otáčky	n_n	15000 ot./min
Jmenovité sdružené napětí	U_s	7000 V
Jmenovitý výkon	P_n	1500 kW
Proudová hustota	σ	4 A/mm ²
Provozní teplota	ϑ_n	60 °C
Mechanické ztráty	ΔP_{mech}	70 kW
Střední hodnota magnetické indukce ve vzduchové mezeře	B_δ	0,6 T

Stroj byl navržen ve dvou variantách. První je využití stroje jako motor a druhá využití jako generátor. Pro obě varianty je společná maximální obvodová proudová hustota, která byla po dohodě s vedoucím práce zvolena $A = 80000$ A/m.

3.1 Výpočet stroje jako motor

Ze známého jmenovitého výkonu a jmenovitého napětí byl spočítán proud v jedné fázi. Účinnost byla zvolena 0,95 a účíník také 0,95.

$$I_f = \frac{P_n}{\sqrt{3} \cdot U_n \cdot \eta \cdot \cos \phi} = \frac{1,5 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 7000 \cdot 0,95 \cdot 0,95} = 137,1 \text{ A} \quad (3.1)$$

Moment při jmenovitých otáčkách.

$$M_n = \frac{P_n}{\omega_n} = \frac{1,5 \cdot 10^6 \cdot 60}{2\pi \cdot 15000} = 954,9 \text{ Nm} \quad (3.2)$$

3.1.1 Vinutí statoru

Počet závitů byl určen, pomocí vztahu z [6], na základě obvodové proudové hustoty. Pro návrh byl vnitřní průměr statoru zvolen $D_{si} = 160$ mm.

Počet závitů jedné fáze.

$$N_{1f} = \frac{\pi D_{si} A}{6 I_f} = \frac{\pi \cdot 0,16 \cdot 80000}{6 \cdot 137,1} = 48,9 \text{ závitů} \quad (3.3)$$

Určení počtu závitů na drážku se vypočítalo podle vztahu (3.5). Nejdříve ale výpočet počtu drážek na pól a fázi.

$$q = \frac{Q}{m \cdot 2p} = \frac{24}{3 \cdot 4} = 2 \text{ drážky} \quad (3.4)$$

$$N_{dr} = \frac{N_{1f}}{pq} = \frac{48,9}{2 \cdot 2} = 12,23 \text{ závitů} \quad (3.5)$$

Jelikož je použito dvouvrstvé vinutí, tak je zapotřebí výsledek zaokrouhlit na sudé číslo. Počet závitů v jedné drážce je tedy 12 a jedna cívka má 6 závitů. Upravený počet závitů na fázi je potom:

$$N_{1fs} = N_{drs} \cdot p \cdot q = 12 \cdot 2 \cdot 2 = 48 \text{ závitů.} \quad (3.6)$$

Následně byl spočten počet drátů ve svazku, které tvoří jeden vodič pro vinutí. Pro výpočet byl zvolen průměr drátu $d_{Cu} = 1,5$ mm. Průřez vodiče, při známém proudu a proudové hustotě, musí mít minimálně:

$$S_V = \frac{I_f}{\sigma} = \frac{137,1}{4} = 34,28 \text{ mm}^2. \quad (3.7)$$

Počet drátů tvořící jeden vodič:

$$N_V = \frac{S_V}{S_v} = \frac{4 \cdot S_V}{\pi \cdot d_{Cu}^2} = \frac{4 \cdot 34,28}{\pi \cdot 1,5^2} = 19,4 \doteq 20 \text{ drátů.} \quad (3.8)$$

Skutečná proudová hustota.

$$\sigma_s = \frac{I_f}{S_V N_V} = \frac{4 I_f}{\pi d_{Cu}^2 N_V} = \frac{4 \cdot 137,1}{\pi \cdot 1,5^2 \cdot 20} = 3,88 \text{ A/mm}^2. \quad (3.9)$$

3.1.2 Délka statoru

Následně z vypočítaného počtu závitů (3.6), byla vypočítána skutečná obvodová proudová hustota A . Počet závitů na fázi byl vyčíslen na 48.

$$A_s = \frac{6 I_f N_{1fs}}{\pi D_{si}} = \frac{6 \cdot 137,1 \cdot 48}{\pi \cdot 0,16} = 78552,5 \text{ A/m} \quad (3.10)$$

Pro výpočet délky statoru bylo zapotřebí spočítat Essonův činitel [5].

$$K_E = \frac{\pi^2}{\sqrt{2}} \cdot B_{\delta\text{mot}} \cdot A_s = \frac{\pi^2}{\sqrt{2}} \cdot 0,6 \cdot 78552,5 = 328924,3 \quad (3.11)$$

Délka statoru byla vypočítána ze vztahu (3.12) [5].

$$l_s = \frac{S_n \cdot 60}{K_E \cdot n_n \cdot D_{\text{si}}^2 \cdot k_{\text{pFe}}} = \frac{P_n \cdot 60}{\cos \phi \cdot K_E \cdot n_n \cdot D_{\text{si}}^2 \cdot k_{\text{pFe}}} = \frac{1,5 \cdot 10^6 \cdot 60}{0,95 \cdot 328924,3 \cdot 15000 \cdot 0,16^2 \cdot 0,95} = 789,5 \doteq 790 \text{ mm} \quad (3.12)$$

3.1.3 Návrh drážky statoru a magnetického obvodu

Při návrhu drážky se předběžně stanovila potřebná plocha drážky. Při plnění drážky $k_{\text{pCu}} = 0,4$ a 12 závitů na drážku, byla vypočítána předběžná plocha drážky.

$$S_{\text{drp}} = \frac{S_v N_v N_{\text{drs}}}{k_{\text{pCu}}} = \frac{\pi \cdot 1,5^2 \cdot 20 \cdot 12}{4 \cdot 0,4} = 1060 \text{ mm}^2 \quad (3.13)$$

Před určením samotných parametrů drážky bylo nutné navrhnout minimální šířku zubu statoru. K určení šířky zubu bylo třeba znát drážkovou rozteč.

$$\tau_{\text{dr}} = \frac{\pi D_{\text{si}}}{Q} = \frac{\pi \cdot 160}{24} = 20,9 \text{ mm} \quad (3.14)$$

Potřebná minimální šířka zubu statoru pro indukci 1,5 T.

$$b_z = \frac{B_\delta \tau_{\text{dr}}}{B_z k_{\text{pFe}}} = \frac{0,6 \cdot 20,9}{1,5 \cdot 0,95} = 8,8 \text{ mm} \quad (3.15)$$

Parametry drážky dle obrázku 3.1. Zvolenými parametry jsou h_{s0} a b_{s0} . $h_{s0} = 2 \text{ mm}$ a $b_{s0} = 5 \text{ mm}$. Hloubka drážky byla zvolena $h_d = 60 \text{ mm}$.

Výpočet šířky drážky u paty zubu.

$$b_{s2} = \frac{\pi (D_{\text{si}} + 2h_d) - Qb_z}{Q + \pi} = \frac{\pi (160 + 2 \cdot 60) - 24 \cdot 8,8}{24 + \pi} = 24,6 \text{ mm} \quad (3.16)$$

Výpočet šířky drážky v horní části zubu.

$$b_{s1} = \frac{\pi (D_{\text{si}} + 2h_0) - Qb_z}{Q - \pi} = \frac{\pi (160 + 2 \cdot 2) - 24 \cdot 8,8}{24 - \pi} = 14,5 \text{ mm} \quad (3.17)$$

Aktivní hloubka drážky.

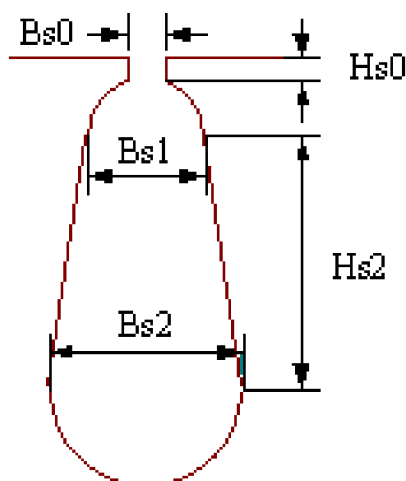
$$h_{s2} = h_d - \left(h_{s0} + \frac{b_{s1} + b_{s2}}{2} \right) = 60 - \left(2 + \frac{24,6 + 14,5}{2} \right) = 38,45 \text{ mm} \quad (3.18)$$

Celková plocha drážky.

$$\begin{aligned} S_{dr} &= h_{s2} b_{s1} + h_{s2} \frac{b_{s2} - b_{s1}}{2} + \frac{\pi b_{s2}^2}{4 \cdot 2} + \frac{\pi b_{s1}^2}{4 \cdot 2} = 38,45 \cdot 14,5 + \\ &38,45 \cdot \frac{24,6 - 14,5}{2} + \frac{\pi \cdot 24,6^2}{8} + \frac{\pi \cdot 14,5^2}{8} = 1072 \text{ mm}^2 \end{aligned} \quad (3.19)$$

Plnění drážky.

$$k_{pCu} = \frac{S_v N_v N_{drs}}{S_{dr}} = \frac{\pi \cdot 1,5^2 \cdot 13 \cdot 12}{4 \cdot 1072} \doteq 0,4 \quad (3.20)$$



Obr. 3.1: Okótovaná drážka statoru

Výpočet potřebné výšky jha statoru pro magnetickou indukci 1,5 T. Výpočet procentního úbytku napětí [6]:

$$\epsilon = 0,12 \sin \phi \cdot 100 = 0,12 \cdot 0,312 \cdot 100 = 3,7 \% \quad (3.21)$$

Frekvence napětí:

$$f = \frac{pn_n}{60} = \frac{2 \cdot 15000}{60} = 500 \text{ Hz.} \quad (3.22)$$

Magnetický tok jednoho pólu [6]:

$$\Phi = \frac{U_f (1 - \epsilon)}{4fN_{1fs}} = \frac{7000 \cdot (1 - 0,037)}{\sqrt{3} \cdot 4 \cdot 500 \cdot 48} = 40,5 \text{ mWb} \quad (3.23)$$

Výška jha statoru.

$$h_{js} = \frac{\Phi}{2B_{js}k_{pFe}l_s} = \frac{0,0405}{2 \cdot 1,5 \cdot 0,95 \cdot 0,79} = 18 \text{ mm} \quad (3.24)$$

Vnější průměr statoru.

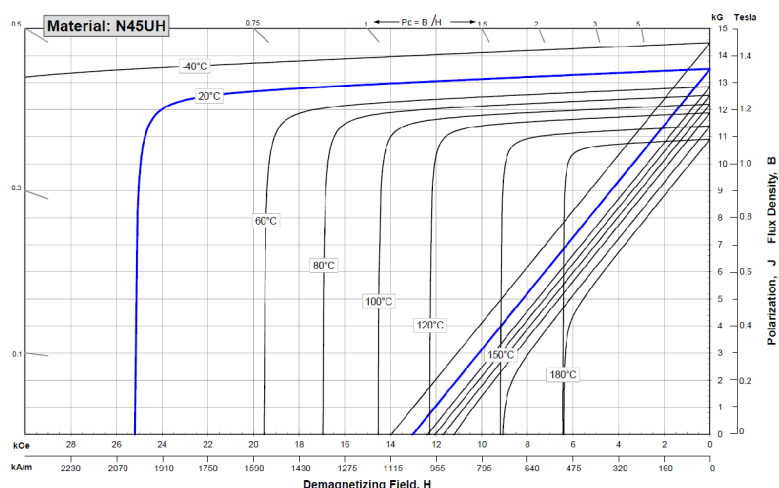
$$D_{so} = D_{si} + 2h_d + 2h_{js} = 160 + 2 \cdot 60 + 2 \cdot 18 = 316 \text{ mm} \quad (3.25)$$

3.1.4 Návrh permanentního magnetu

Pro návrh byl zvolen magnet N45UH na bázi vzácných zemin NdFeB od firmy Arnold magnetic technologies. Pro návrh je důležitá výška permanentního magnetu, která se navrhuje, tak aby se dosáhlo požadované magnetické indukce ve vzduchové mezeře. Zároveň musí být výška magnetu dostatečná, aby nedošlo k demagnetizaci magnetu.

Tab. 3.2: Vlastnosti magnetického materiálu N45UH při 20 °C

Remanentní indukce	B_r	1350 mT
Koercitivní síla	H_{CB}	1023 kA/m
Minimální vlastní koercitivní síla	H_{CJ}	1910 kA/m
Maximální energetický součin	BH_{max}	358 kJ/m ³



Obr. 3.2: Demagnetizační charakteristika N45UH [15]

Návrh z hlediska požadované magnetické indukce ve vzduchové mezeře. Rovnice pro magnetické napětí permanentního magnetu.

$$4U_{\text{mPM}} = 4U_{\text{m}\delta} + 4U_{\text{mFe}} + U_{\text{mreakce}} \quad (3.26)$$

Při zanedbání vlivu reakce kotvy a úbytku na feromagnetických částech dostaneme rovnici ve tvaru (3.27).

$$U_{\text{mPM}} = U_{\text{m}\delta} \quad (3.27)$$

Magnetické napětí ve vzduchové mezeře.

$$U_{\text{m}\delta} = H_{\delta\text{max}} \cdot \delta \quad (3.28)$$

Pro výpočet maximální intenzity magnetického pole ve vzduchové mezeře $H_{\delta\text{max}}$ byl použit Carterův činitel, který vyjadřuje poměr mezi maximální a střední magnetickou indukcí ve vzduchové mezeře.

$$k_{\text{cart}} = \frac{B_{\delta\text{max}}}{B_{\delta}} \quad (3.29)$$

Pro výpočet Carterova činitele bylo nutné znát výšku vzduchové mezery.

Pólová rozteč.

$$\tau_p = \frac{\pi D_{\text{si}}}{2p} = \frac{\pi \cdot 160}{4} = 125,7 \text{ mm} \quad (3.30)$$

Vzduchová mezera. [6]

$$\delta = 0,35 \cdot 10^{-6} \tau_p \frac{A_s}{B_{\delta}} = 0,35 \cdot 10^{-6} \cdot 125,7 \cdot \frac{78552,5}{0,6} = 5,8 \text{ mm} \doteq 6 \text{ mm} \quad (3.31)$$

Činitel geometrických rozměrů pro určení Carterova činitele.

$$k_{\text{geo}} = \frac{\frac{b_0}{\delta}}{5 + \frac{b_0}{\delta}} = \frac{\frac{5}{6}}{5 + \frac{5}{6}} = 0,143 \quad (3.32)$$

Carterův činitel z geometrických rozměrů.

$$k_{\text{cart}} = \frac{\tau_{\text{dr}}}{\tau_{\text{dr}} - k_{\text{geo}}\delta} = \frac{20,9}{20,9 - 0,143 \cdot 6} = 1,043 \quad (3.33)$$

[16]

Maximální indukce ve vzduchové mezeře.

$$B_{\delta\text{max}} = B_{\delta} k_c = 0,6 \cdot 1,043 = 0,626 \text{ T} \quad (3.34)$$

Samotný výpočet výšky magnetu musí počítat s parametry při provozní teplotě, kterou je 60 °C. Pro tuto teplotu bude mít magnet remanentní indukci $B_{r60} = 1280$ mT a koercitivní sílu $H_{CB60} = 980$ kA/m.

Relativní permeabilita permanentního magnetu.

$$\mu_{rPM} = \frac{B_{r60}}{\mu_0 H_{CB60}} = \frac{1,28}{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 980 \cdot 10^3} = 1,039 \quad (3.35)$$

Pro zjednodušení výpočtu je předpoklad, že magnetická indukce permanentního magnetu je rovna magnetické indukci ve vzduchové mezeře. Tedy $B_{PM} \approx B_{\delta_{max}}$.

Potom tedy intenzita magnetického pole v permanentním magnetu odpovídá následujícímu vztahu.

$$H_{PM} = \frac{B_{PM} - B_{r60}}{\mu_0 \mu_{rPM}} = \frac{0,626 - 1,28}{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 1,039} = -500902 \text{ A/m} \quad (3.36)$$

Po dosazení do vztahu (3.27) bylo možné spočítat výška permanentního magnetu.

$$\mu_0 H_{PM} h_{PM} = B_{\delta_{max}} \cdot \delta \quad (3.37)$$

$$h_{PM} = \frac{B_{\delta_{max}} \cdot \delta}{\mu_0 H_{PM}} = \frac{0,626 \cdot 6}{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 500902} = 5,97 \text{ mm} \doteq 6 \text{ mm} \quad (3.38)$$

Kontrola výšky permanentního magnetu na demagnetizaci. Při maximálním zatížení generátoru je zátěžný úhel 90° a reakce kotvy je ve stroji největší. Riziko demagnetizace muselo tedy být zkontrolováno pro maximální zatížení.

Magnetické napětí reakce kotvy pro maximální zatížení. Odhadovaná přetížitelnost je 1,5.

$$U_{mreakce} = \frac{2}{3} \sqrt{2} I_f \frac{Q}{2p} N_{drs} \cdot 1,5 = \frac{2}{3} \sqrt{2} \cdot 137,1 \cdot \frac{24}{4} \cdot 12 \cdot 1,5 = 13960 \text{ A} \quad (3.39)$$

Intenzita magnetického pole v permanentním magnetu pro zvolenou minimální indukci 0,1 T.

$$H_{PM} = \frac{B_{PM} - B_{r60}}{\mu_0 \mu_{rPM}} = \frac{0,1 - 1,28}{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 1,039} = -903767 \text{ A/m} \quad (3.40)$$

Minimální potřebná výška permanentního magnetu.

$$h_{PM} = \left(\frac{B_{\delta_{max}} \cdot \delta}{\mu_0} + \frac{U_{mreakce}}{4} \right) \frac{1}{H_{PM}} = \left(\frac{0,1 \cdot 0,006}{4\pi \cdot 10^{-7}} + \frac{13960}{4} \right) \cdot \frac{1}{903767} = 4,3 \text{ mm} \quad (3.41)$$

Výška navržená pro požadovanou indukci ve vzduchové mezeře je vyšší než minimální výška magnetů pro odolnost proti demagnetizaci. Výška magnetů zůstává 6 mm.

Pro úplný návrh je zapotřebí také šířka magnetu. Pólové krytí bylo navrženo na celistvý násobek drážkové rozteče. Zároveň musí být menší než 180° elektrických, kterýmž odpovídá pólová rozteč.

Drážková rozteč v elektrických stupních.

$$\tau_u = \frac{360p}{Q} = \frac{360 \cdot 2}{24} = 30^\circ \text{ elektrických} \quad (3.42)$$

Šířka magnetu v elektrických stupních.

$$b_{PM} = k \cdot \tau_u = 5 \cdot 30 = 150^\circ \text{ elektrických} \quad (3.43)$$

Pólové krytí.

$$\alpha_{PM} = \frac{b_{PM}}{\tau_{pd}} = \frac{150}{180} = 0,833 \quad (3.44)$$

3.1.5 Ztráty ve vinutí

Pro výpočet ztrát ve vinutí bylo zapotřebí vypočítat celkovou délku vodiče, kterým protéká fázový proud. Jelikož drážka není stejně široká po celé své hloubce, ale postupně se rozšiřuje, tak je větší část vodičů ve spodní části drážky. Proto pro výpočet střední délky závitů bylo zvoleno umístění ve $2/3$ drážky.

Průměr statoru ve $2/3$ drážky.

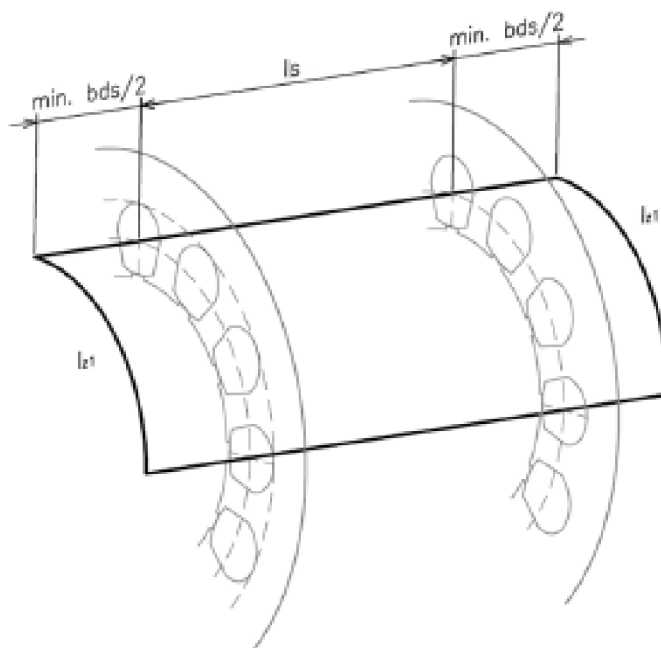
$$D_{ds} = D_{si} + 2h_{s0} + 2 \frac{2(h_d - h_{s0})}{3} = 160 + 2 \cdot 2 + 2 \cdot \frac{2 \cdot (60 - 2)}{3} = 241 \text{ mm} \quad (3.45)$$

Šířka drážky.

$$b_{ds} = \frac{\pi D_{ds}}{Q} - b_z = \frac{\pi \cdot 241}{24} - 8,8 = 22,7 \text{ mm} \quad (3.46)$$

Délka závitů cívk. Krok cívk byl navržen $y = 6$.

$$l_z = 2l_s + 2y \frac{\pi D_{ds}}{Q} + 4 \frac{b_{ds}}{2} = 2 \cdot 790 + 2 \cdot 6 \cdot \frac{\pi \cdot 241}{24} + 2 \cdot 22,7 = 2004 \text{ mm} \quad (3.47)$$



Obr. 3.3: Délka vinutí [17]

A následně spočtená celková délka vinutí.

$$l_v = m \cdot N_{1fs} \cdot l_z = 3 \cdot 48 \cdot 2004 = 288,58 \text{ m} \quad (3.48)$$

Rezistivita mědi při 20 °C je $\rho_{20} = 0,017241 \text{ } \Omega\text{mm}^2/\text{m}$ a teplotní součinitel odpovídá $\alpha = 0,00393 \text{ K}^{-1}$. [18]

Přepočet rezistivity odpovídající provozním podmínkám.

$$\rho_{60} = \rho_{20} (1 + \alpha \cdot \Delta\vartheta) = 0,017241 (1 + 0,00393 \cdot 40) = 0,019951 \text{ } \Omega\text{mm}^2/\text{m} \quad (3.49)$$

Průřez vodiče složeného z dílčích vodičů o průměru 1,5 mm.

$$S_{Vs} = \frac{\pi d_{Cu}^2 N_v}{4} = \frac{\pi \cdot 1,5^2 \cdot 20}{4} = 35,34 \text{ mm}^2 \quad (3.50)$$

Ztráty ve vinutí.

$$\Delta P_v = \rho_{60} \frac{l_v}{S_{Vs}} I_f^2 = 0,019951 \cdot \frac{288,58}{35,34} \cdot 137,1^2 = 3062,2 \text{ W} \quad (3.51)$$

3.1.6 Ztráty v železe

Pro návrh satorových plechů byl vybrán plech od firmy Cogent. Konkrétně plech cogent steel M235-35A, který byl vybrán na základě požadavků na malé ztráty a vzhledem k vysoké frekvenci napětí. Parametry pro výpočet ztrát jsou uvedeny v tabulce 3.3.

$$\Delta p_{\text{Fe}} = k_h f B^2 + k_c f^2 B^2 + k_e (fB)^{1,5} \quad (3.52)$$

Tab. 3.3: Koeficienty materiálu M235-35A

Koeficient hysterezních ztrát	k_h	$25,2362 \cdot 10^{-3} \text{ W/kg}$
Koeficient ztrát výřivými proudy	k_c	$46,5934 \cdot 10^{-6} \text{ W/kg}$
Koeficient dodatečných ztrát	k_e	0 W/kg

Poměrné ztráty v železe se vypočítaly podle vzorce (3.52), za magnetickou indukcí B byla dosazena hodnota 1,5 T.

$$\begin{aligned} \Delta p_{\text{Fe}} = k_h f B^2 + k_c f^2 B^2 + k_e (fB)^{1,5} &= 25,2362 \cdot 10^{-3} \cdot 500 \cdot 1,5^2 + \\ &46,5934 \cdot 10^{-6} \cdot 500^2 \cdot 1,5^2 + 0 \cdot (500 \cdot 1,5)^{1,5} = 54,6 \text{ W/kg} \end{aligned} \quad (3.53)$$

Objem satoru je plocha satorových plechů násobená délkou. Od mezikruží, vnější průměr a vnitřní průměr satoru, bylo potřeba odečíst drážky. Celková plocha jedné drážky je 1072 mm².

$$\begin{aligned} V_{\text{Fe}} &= \left(\frac{\pi D_{\text{so}}^2}{4} - \frac{\pi D_{\text{si}}^2}{4} - Q S_{\text{dr}} \right) l_s = \left(\frac{\pi \cdot 316^2}{4} - \frac{\pi \cdot 160^2}{4} - 24 \cdot 1072 \right) \cdot \\ &790 = 0,0257 \text{ m}^3 \end{aligned} \quad (3.54)$$

Hustota materiálu je 7600 kg/m³.

$$m_{\text{Fe}} = V_{\text{Fe}} \rho_{\text{Fe}} = 0,0256 \cdot 7600 = 195,3 \text{ kg} \quad (3.55)$$

Ztráty v železe.

$$\Delta P_{\text{Fe}} = \Delta p_{\text{Fe}} m_{\text{Fe}} = 54,6 \cdot 195,3 = 10663,4 \text{ W} \quad (3.56)$$

3.1.7 Účinnost motoru

Celkové ztráty.

$$\Delta P = \Delta P_{\text{Fe}} + \Delta P_{\text{v}} + \Delta P_{\text{mech}} = 10663,4 + 3062,2 + 70000 = 83725,6 \text{ W} \quad (3.57)$$

Účinnost motoru.

$$\eta = \frac{P_{\text{n}}}{P_{\text{n}} + \Delta P} \cdot 100 = \frac{1,5 \cdot 10^6}{1,5 \cdot 10^6 + 83725,6} \cdot 100 = 94,7\% \quad (3.58)$$

3.1.8 RMxpřt

Výpočty pomocí analytických vzorců byly následně porovnány s výsledky analýzy v programu Ansys RMxpřt. Do programu byly zadány všechny vypočítané parametry motoru.

Materiály pro stator a permanentní magnety byly do programu vloženy pomocí hodnot uvedených v datových listech jednotlivých materiálů.

Výsledky analýzy z programu RMxpřt srovnané s parametry určenými pomocí analytických vzorců viz tabulka 3.4.

Tab. 3.4: Srovnání vypočtených parametrů s parametry z RMxpřt

Veličina	Jednotky	Výpočet	RMxpřt	Rozdíl v %
I_{RMS}	[A]	137,1	140,9	2,8
S_{dr}	[m ²]	1072	1080	0,7
A	[A/m]	78552,5	80701,8	2,7
σ	[A/mm ²]	3,88	3,99	2,8
B_{δ}	[T]	0,6	0,55	-8,3
B_z	[T]	1,5	1,49	-0,7
B_{js}	[T]	1,5	1,36	-9,3
m_{Fe}	[kg]	195,3	184,7	-5,4
l_z	[m]	2004	2014	5
ΔP_{Fe}	[W]	10663,4	9670	-9,3
ΔP_{v}	[W]	3062,2	3362,4	9,8
η	[%]	94,7	94,8	0,1
β	[°]	-	51,7	-

3.1.9 Úprava parametrů podle programu RMxprt

Jak je vidět z tabulky 3.4, tak hlavní odchylkou mezi výpočtem a analýzou je magnetický obvod. Z tohoto důvodu bylo potřeba upravit výšku permanentních magnetů, tak aby ve vzduchové mezeře byla dosažena požadovaná indukce.

Nejdříve ale bylo nutné upravit magnetický obvod. Jelikož indukce v zubu by přesáhla požadovanou 1,5 T, je zapotřebí šířku zubu zvětšit. Šířka zubu je přímo závislá na magnetické indukci ve vzduchové mezeře, proto tedy původní šířka byla zvětšena násobkem poměru indukce požadované ve vzduchové mezeře k indukci ve vzduchové mezeře, která vyšla podle analýzy v programu RMxprt.

Upravená šířka zubu.

$$b_{zu} = b_z \cdot \frac{0,6}{0,55} = 8,8 \cdot \frac{0,6}{0,55} = 9,6 \text{ mm} \quad (3.59)$$

Úprava výšky jha statoru.

$$h_{jsu} = h_{js} \cdot \frac{1,36}{1,5} \cdot \frac{0,6}{0,55} = 18 \cdot \frac{1,36}{1,5} \cdot \frac{0,6}{0,55} = 17,8 \text{ mm} \quad (3.60)$$

Rozšířením zubu se zároveň zmenší statorová drážka. Z tohoto důvodu byla přepočítána i drážky se zvolenou větší hloubkou, $h_d = 62 \text{ mm}$ pro zachování požadované plochy.

Výpočet šířky drážky u paty zubu.

$$b_{s2} = \frac{\pi(D_{si} + 2h_d) - Qb_z}{Q + \pi} = \frac{\pi(160 + 2 \cdot 62) - 24 \cdot 9,6}{24 + \pi} = 24,3 \text{ mm} \quad (3.61)$$

Výpočet šířky drážky v horní části zubu.

$$b_{s1} = \frac{\pi(D_{si} + 2h_0) - Qb_z}{Q - \pi} = \frac{\pi(160 + 2 \cdot 2) - 24 \cdot 9,6}{24 - \pi} = 13,6 \text{ mm} \quad (3.62)$$

Aktivní hloubka drážky.

$$h_{s2} = h_d - \left(h_{s0} + \frac{b_{s1} + b_{s2}}{2} \right) = 62 - \left(2 + \frac{24,3 + 13,6}{2} \right) = 41,05 \text{ mm} \quad (3.63)$$

Celková plocha drážky.

$$S_{dr} = h_{s2}b_{s1} + h_{s2} \frac{b_{s2} - b_{s1}}{2} + \frac{\pi b_{s2}^2}{4 \cdot 2} + \frac{\pi b_{s1}^2}{4 \cdot 2} = 41,05 \cdot 13,6 + \\ 41,05 \cdot \frac{24,3 - 13,6}{2} + \frac{\pi \cdot 24,3^2}{8} + \frac{\pi \cdot 13,6^2}{8} = 1082,4 \text{ mm}^2 \quad (3.64)$$

Plnění drážky.

$$k_{pCu} = \frac{S_v N_v N_{drs}}{S_{dr}} = \frac{\pi \cdot 1,2^2 \cdot 29 \cdot 12}{4 \cdot 1082,4} = 0,39 \quad (3.65)$$

Po upravení magnetického obvodu byla zvětšena výška magnetů. Postupnou změnou výšky magnetů bylo dosaženo požadované indukce ve vzduchové mezeře. Výška magnetů byla tedy zvětšena na 7,3 mm.

Upravením drážky statoru došlo ke změně délky vinutí a váhy železa statoru. Proto byly přepočítány i ztráty.

Ztráty ve vinutí

Průměr statoru ve 2/3 drážky.

$$D_{ds} = D_{si} + 2h_{s0} + 2 \frac{2(h_d - h_{s0})}{3} = 160 + 2 \cdot 2 + 2 \cdot \frac{2 \cdot (62 - 2)}{3} = 244 \text{ mm} \quad (3.66)$$

Šířka drážky.

$$b_{ds} = \frac{\pi D_{ds}}{Q} - b_z = \frac{\pi \cdot 244}{24} - 9,6 = 22,3 \text{ mm} \quad (3.67)$$

Délka závitu cívky.

$$l_z = 2l_s + 2y \frac{\pi D_{ds}}{Q} + 4 \frac{b_{ds}}{2} = 2 \cdot 790 + 2 \cdot 6 \cdot \frac{\pi \cdot 244}{24} + 2 \cdot 22,3 = 2007,9 \text{ mm} \quad (3.68)$$

A následně spočtená celková délka vinutí.

$$l_v = m \cdot N_{ifs} \cdot l_z = 3 \cdot 48 \cdot 2007,9 = 289,14 \text{ m} \quad (3.69)$$

Ztráty ve vinutí.

$$\Delta P_v = \rho_{60} \frac{l_v}{S_{Vs}} I_f^2 = 0,019951 \cdot \frac{289,14}{35,34} \cdot 137,1^2 = 3068,2 \text{ W} \quad (3.70)$$

Ztráty v železe

Vnější průměr statoru.

$$D_{so} = D_{si} + 2h_d + 2h_{js} = 160 + 2 \cdot 62 + 2 \cdot 17,8 = 319,6 \text{ mm} \quad (3.71)$$

Objem statoru.

$$V_{Fe} = \left(\frac{\pi D_{so}^2}{4} - \frac{\pi D_{si}^2}{4} - QS_{dr} \right) l_s = \left(\frac{\pi \cdot 319,6^2}{4} - \frac{\pi \cdot 160^2}{4} - 24 \cdot 1082,4 \right) \cdot 790 = 0,027 \text{ m}^3 \quad (3.72)$$

Váha statoru.

$$m_{\text{Fe}} = V_{\text{Fe}}\rho_{\text{Fe}} = 0,027 \cdot 7600 = 205,2 \text{ kg} \quad (3.73)$$

Ztráty v železe.

$$\Delta P_{\text{Fe}} = \Delta p_{\text{Fe}}m_{\text{Fe}} = 54,6 \cdot 205,2 = 11203,9 \text{ W} \quad (3.74)$$

Účinnost motoru

Celkové ztráty motoru.

$$\Delta P = \Delta P_{\text{Fe}} + \Delta P_{\text{v}} + \Delta P_{\text{mech}} = 11203,9 + 3068,2 + 70000 = 84272,1 \text{ W} \quad (3.75)$$

Účinnost motoru.

$$\eta = \frac{P_{\text{n}}}{P_{\text{n}} + \Delta P} \cdot 100 = \frac{1,5 \cdot 10^6}{1,5 \cdot 10^6 + 84272,1} \cdot 100 = 94,7\% \quad (3.76)$$

RMxprt s upravenými parametry

Tab. 3.5: Srovnání upravených parametrů s parametry z RMxprt

Veličina	Jednotky	Výpočet	RMxprt	Rozdíl v %
I_{RMS}	[A]	137,1	133,8	-2,4
S_{dr}	[m ²]	1082,4	1090,8	0,8
A	[A/m]	78552,5	76635,5	-2,4
σ	[A/mm ²]	3,88	3,78	-2,6
B_{δ}	[T]	0,6	0,61	1,7
B_z	[T]	1,5	1,5	0
B_{js}	[T]	1,5	1,5	0
m_{Fe}	[kg]	205,2	193,6	-5,7
l_z	[m]	2007,9	2009,2	0,1
ΔP_{Fe}	[W]	11203,9	11573,1	3,3
ΔP_{v}	[W]	3068,2	3024,4	-1,4
η	[%]	94,7	94,7	0
β	[°]	–	42,5	–

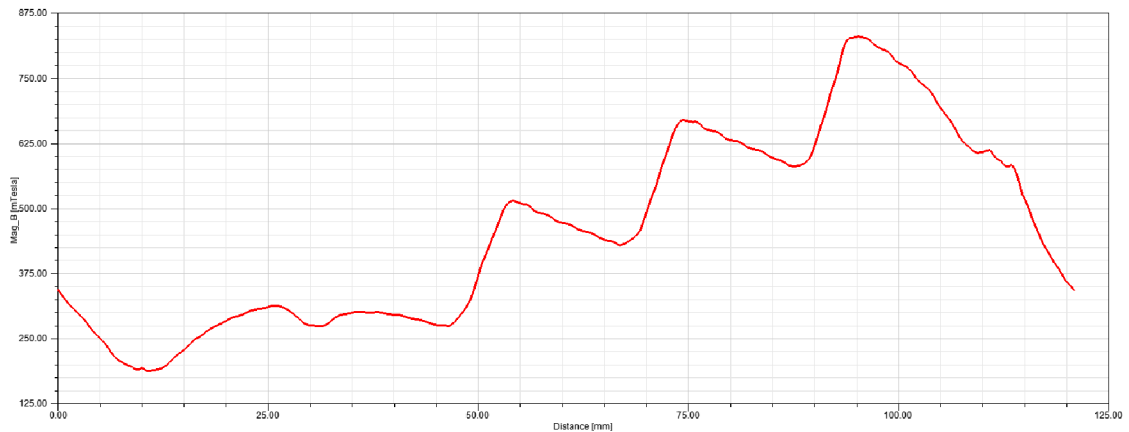
Rozdíly mezi vypočtenými parametry a analýzou pomocí programu jsou nyní minimální. Rozdíl ve fázovém proudu může být způsoben lepším účínkem než byl ve

výpočtu zvolen. Hlavní rozdíl, který je ve váze železa statoru, je nejspíše způsoben chybným uvažováním při výpočtu a nezapočítáním do plochy drážky výřezu pro vklad vinutí.

3.1.10 Výpočet 2D průběhu magnetického pole

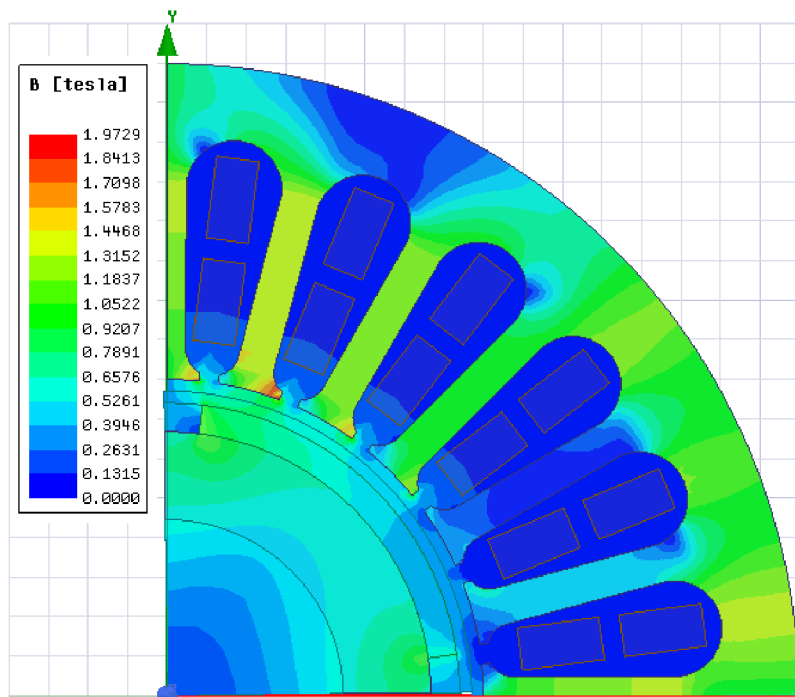
Výpočet průběhu magnetické pole byl proveden pomocí programu Ansys Maxwell 2D. Do programu byly zadány parametry stroje a program metodou konečných prvků provedl výpočet magnetického pole.

Na obrázku 3.4 lze vidět průběh magnetické indukce pod jedním pólem.



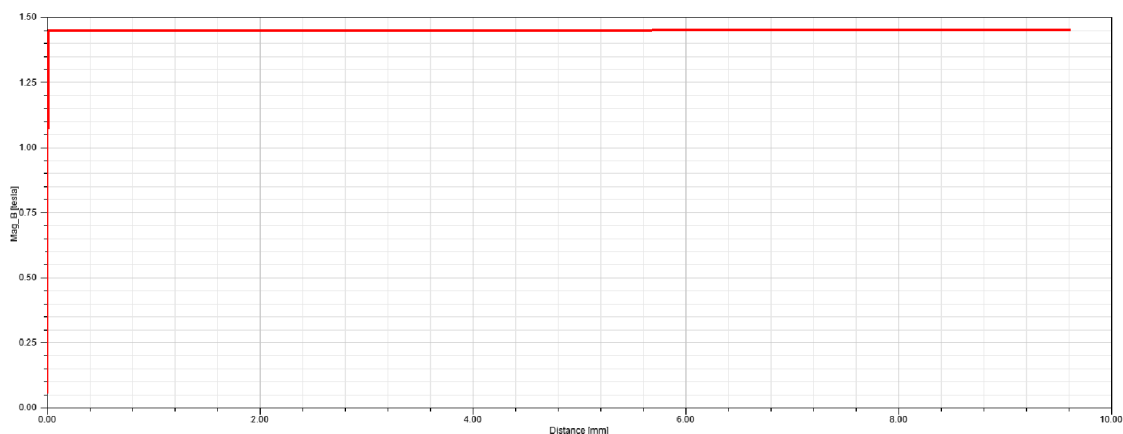
Obr. 3.4: Průběh magnetické indukce pod jedním pólem

Na obrázku 3.5 lze vidět rozložení magnetické indukce v motoru. Na první pohled si lze všimnout, že se na jejím rozložení uplatňuje reakce kotvy a proto konce zubů, kde se sčítá vliv reakce kotvy s magnetickým tokem magnetů, jsou přesycovány. Avšak hodnota magnetické indukce v žádném místě nepřevyšuje 2 T.

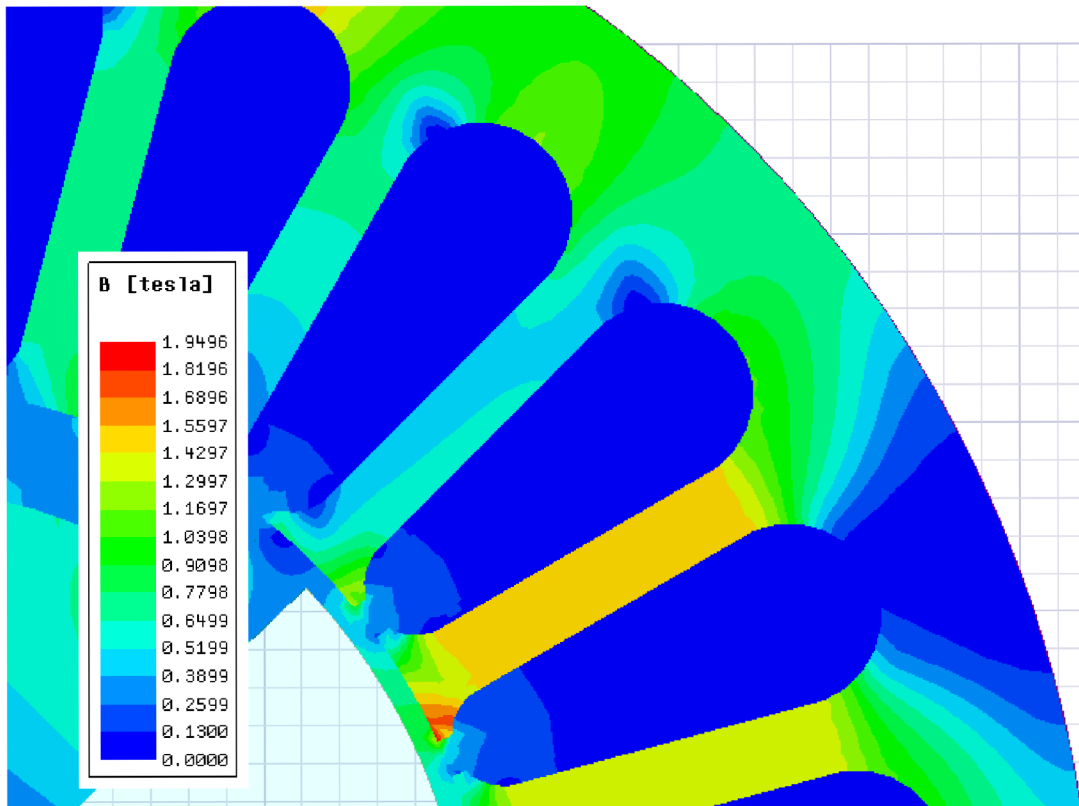


Obr. 3.5: Rozložení magnetické indukce v motoru

Z průběhu magnetické indukce v zubu lze vidět, že nebylo dosaženo požadované indukce 1,5 T, ale hodnota dle analýzy vyšla 1,45 T. Tento fakt má vliv na výkon motoru a tedy i na zátěžný úhel při kterém stroj pracuje na jmenovitém výkonu. Zátěžný úhel tedy bude větší než podle analýzy v RMxrt.

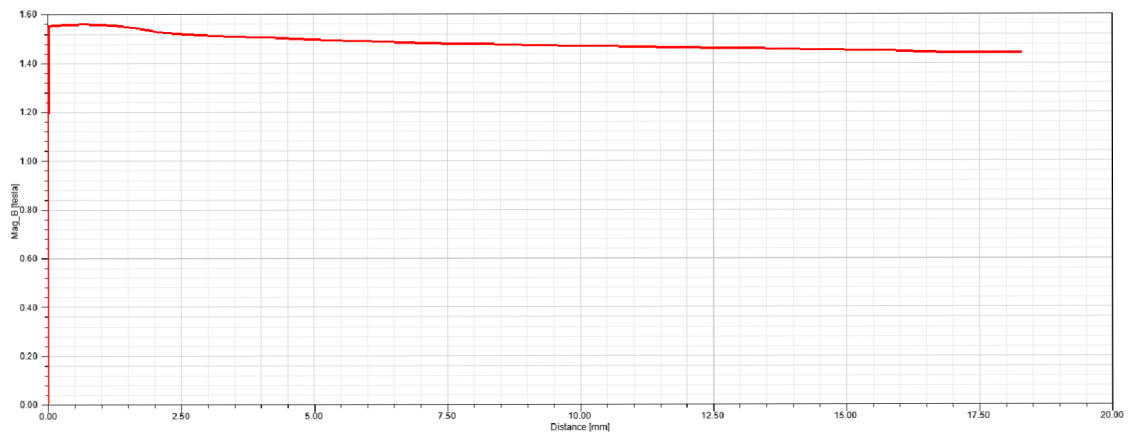


Obr. 3.6: Průběh magnetické indukce v polovině délky statorového zubu

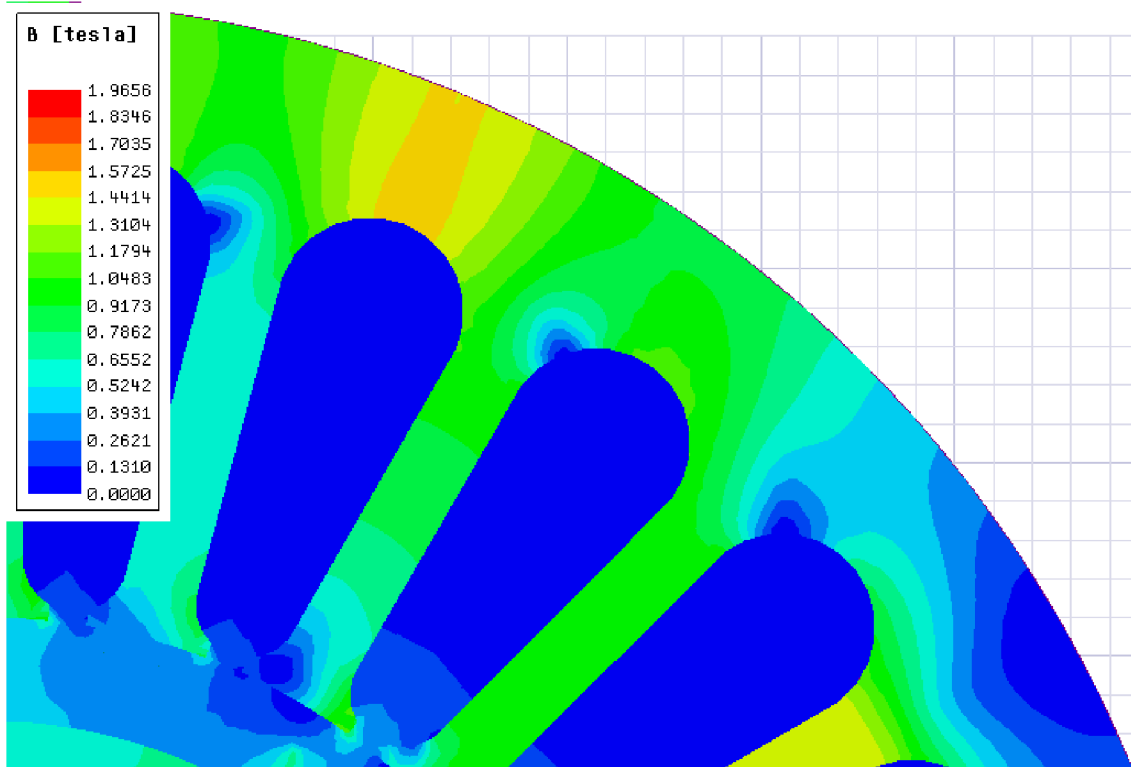


Obr. 3.7: Detailní pohled na rozložení magnetické indukce v statorovém zubu

Průběh magnetické indukce ve jhu se také liší od ideálního průběhu. Lze vidět, že na vnějším okraji statoru je hodnota magnetické indukce nižší než v místech blízkých drážce. Hodnota magnetické indukce se pohybuje v rozmezí 1,44 – 1,56 T.



Obr. 3.8: Průběh magnetické indukce v statorovém jhu nad drážkou



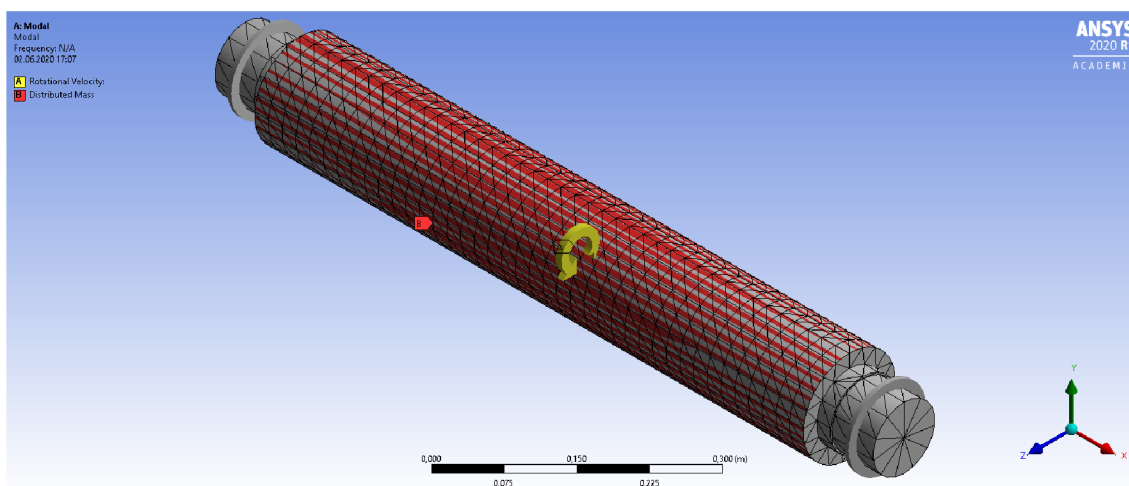
Obr. 3.9: Detailní pohled na rozložení magnetické indukce v satorovém jhu

3.1.11 Kritické otáčky

Pro návrh stroje byly vypočteny kritické otáčky pomocí programu Ansys Mechanical. Pro výpočet byly důležité parametry rotoru. Volbou byl průměr hřídele a částečně délka, která se skládá z délky rotoru, délky pod čely vinutí a délky pro uchycení v ložiscích. Délka pod čely vinutí byla zvolena 30 mm a délka uchycení v ložiscích 60 mm.

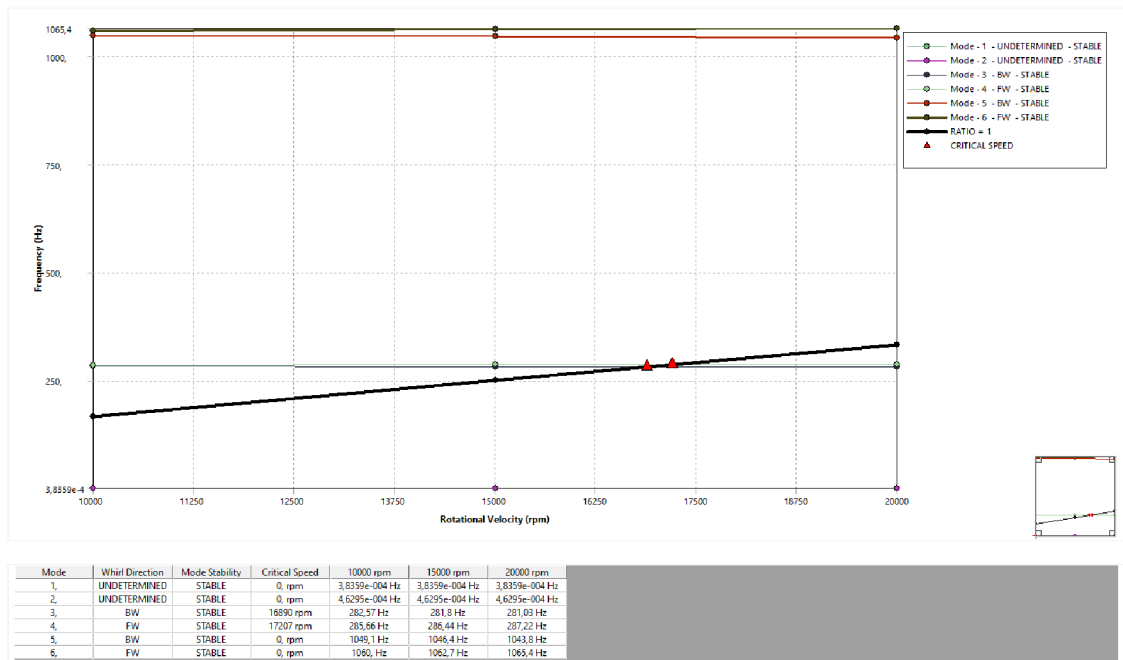
Tab. 3.6: Parametry rotoru

Veličina	Jednotky	Hodnota
Délka rotorového svazku	[mm]	800
Délka hřídele	[mm]	980
Průměr rotoru	[mm]	148
Průměr rotoru bez magnetů	[mm]	133,4
Průměr hřídele	[mm]	90
Váha permanentních magnetů	[kg]	15,91



Obr. 3.10: Model hřídele motoru s rotorovou částí

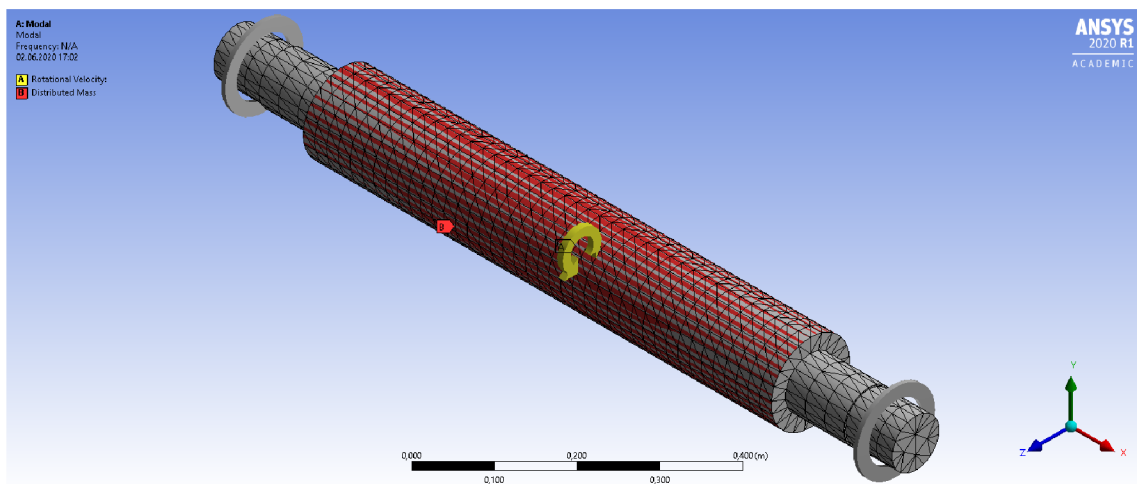
Z Campbellova diagramu lze vidět výsledky výpočtu kritických otáček. Pro zadaný model vyšly okolo 17000 ot./min. Abychom ale zajistili bezpečný chod motoru měl by být bezpečnostní koeficient alespoň 1,3. Takové koeficientu zde model nedosahuje, proto je třeba model upravit.



Obr. 3.11: Campbellův diagram

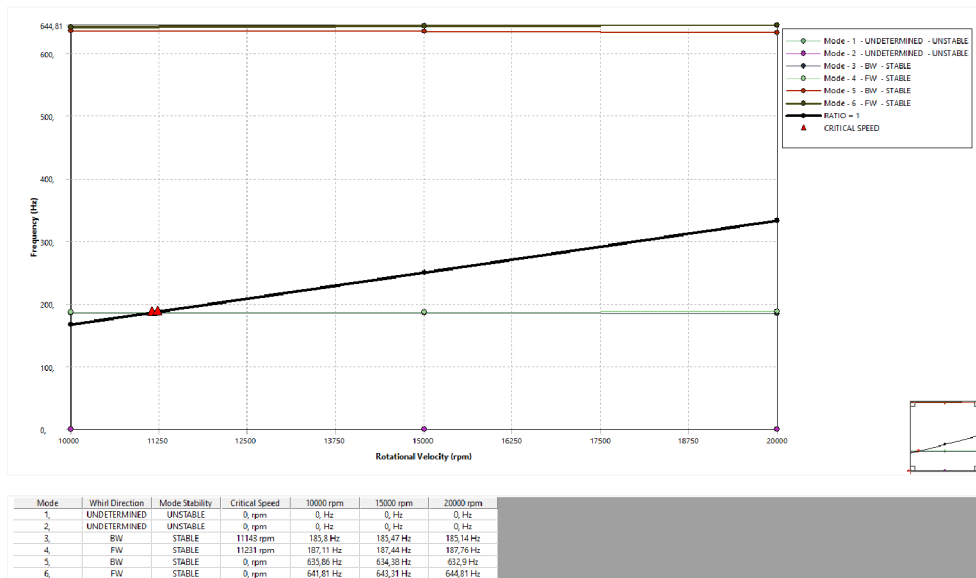
Úprava modelu znamená změnu délky hřídele a změnu jejího průměru. Zmenšení délky a zvětšením průměru bychom mohli dosáhnout vyšších kritických otáček, ale i tak bychom se nedostali s kritickými otáčkami natolik vysoko, abychom dodrželi bezpečnostní koeficient. Proto bylo nutné jít cestou zmenšení průměru a prodloužením délky hřídele a provozovat tak motor nad prvními kritickými otáčkami.

Délka hřídele byla upravena na 1160 mm a průměr na 80 mm.

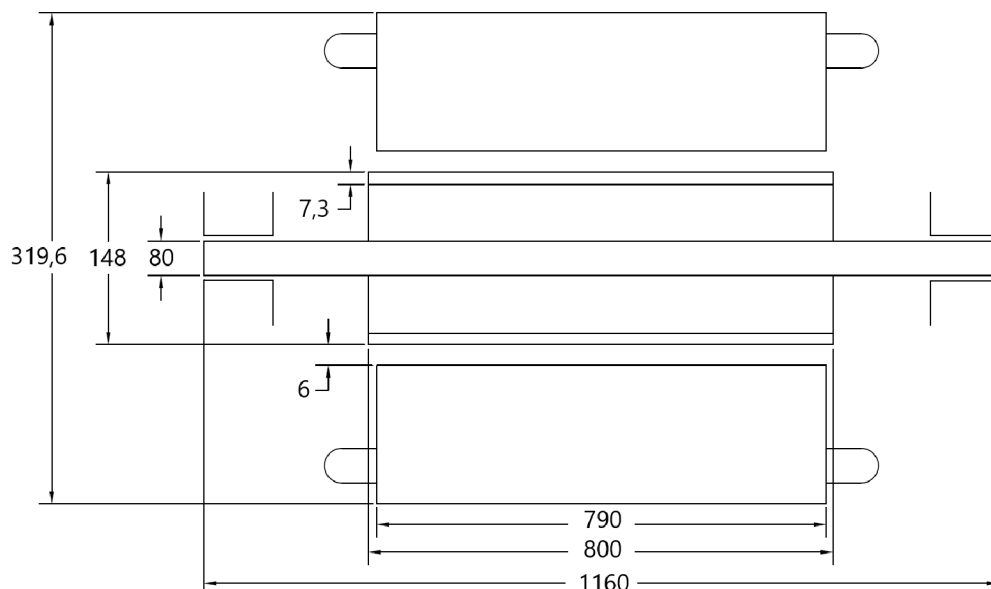


Obr. 3.12: Model hřídele motoru s rotorovou částí

Po úpravě hřídele se kritické otáčky dostaly na hodnotu okolo 11200 ot./min, což už je dostatečně vzdáleno od otáček provozních. Při rozběhu ale bude nutné vhodně přejet první kritické otáčky. Druhé kritické otáčky jsou od provozních otáček vzdáleny natolik, že ani v tabulce nejsou přímo vypsány. Podle frekvence vychází okolo 38000 ot./min.



Obr. 3.13: Campbellův diagram



Obr. 3.14: Rozměry motoru

3.2 Výpočet stroje jako generátor

Moment synchronních strojů je závislý na mnoha faktorech, jako je například synchronní reaktance nebo magnetická indukce ve vzduchové mezeře. Synchronní reaktance je závislá na počtu závitů vinutí a pro zvětšení zátěžného úhlu, by bylo potřeba zvětšit počet závitů. Tato varianta by vedla k vyšším ztrátám ve vinutí a vyšším nákladům na výrobu. Možnost zmenšení magnetické indukce ve vzduchové mezeře je výhodnější, jelikož menší indukce dosáhneme zmenšením výšky permanentních magnetů, což by mohlo příznivě ovlivnit výrobní náklady.

$$M = \frac{U_1 \cdot U_0 \cdot m \cdot \sin \beta}{\omega_s \cdot X_s} \quad (3.77)$$

Výpočet magnetické indukce pro zmenšení maximálního momentu stroje. Zátěžný úhel pro generátor byl zvolen 60° a u motoru vyšel $42,5^\circ$.

$$B_\delta = 0,6 \cdot \frac{\sin 42,5^\circ}{\sin 60^\circ} = 0,47 \text{ T} \quad (3.78)$$

Počet závitů vinutí zůstal stejný jako u návrhu pro motor, ale změní se průřez vodiče, jelikož bude protékat menší proud.

$$I_f = \frac{P_n}{\sqrt{3} \cdot U_n \cdot \cos \phi} = \frac{1,5 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 7000 \cdot 0,95} = 130,2 \text{ A} \quad (3.79)$$

Průřez jednoho závitu vinutí.

$$S_V = \frac{I_f}{\sigma} = \frac{130,2}{4} = 32,55 \text{ mm}^2. \quad (3.80)$$

Průměr drátu byl zvolen $d_{Cu} = 1,2 \text{ mm}$. Počet drátů tvořící jeden vodič:

$$N_v = \frac{S_V}{S_v} = \frac{4 \cdot S_V}{\pi \cdot d_{Cu}^2} = \frac{4 \cdot 32,55}{\pi \cdot 1,2^2} = 28,78 \doteq 29 \text{ drátů}. \quad (3.81)$$

Skutečná proudová hustota.

$$\sigma_s = \frac{I_f}{S_{Vs}} = \frac{4I_f}{\pi d_{Cu}^2 N_v} = \frac{4 \cdot 130,2}{\pi \cdot 1,2^2 \cdot 29} = 3,97 \text{ A/mm}^2. \quad (3.82)$$

3.2.1 Rozměry statoru

Vnitřní průměr statoru byl zachován, ale i tak se proudová hustota změnila vlivem menšího fázové proudy. Délka stroje se musela také přepočítat, jelikož je na obvodové proudové hustotě závislá.

Obvodová proudová hustota.

$$A_s = \frac{6I_f N_{1fs}}{\pi D_{si}} = \frac{6 \cdot 130,2 \cdot 48}{\pi \cdot 0,16} = 74599,1 \text{ A/m} \quad (3.83)$$

Essonův činitel.

$$K_E = \frac{\pi^2}{\sqrt{2}} \cdot B_\delta \cdot A_s = \frac{\pi^2}{\sqrt{2}} \cdot 0,47 \cdot 74599,1 = 244559 \quad (3.84)$$

Délka statoru.

$$l_s = \frac{S_n \cdot 60}{K_E \cdot n_n \cdot D_{si}^2 \cdot k_{pFe}} = \frac{P_n \cdot 60}{\cos \phi \cdot K_E \cdot n_n \cdot D_{si}^2 \cdot k_{pFe}} = \frac{1,5 \cdot 10^6 \cdot 60}{0,95 \cdot 244559 \cdot 15000 \cdot 0,16^2 \cdot 0,95} = 1062 \doteq 1065 \text{ mm} \quad (3.85)$$

3.2.2 Návrh drážky statoru a magnetického obvodu

Předběžná plocha drážky. $k_{pCu} = 0,4$

$$S_{drp} = \frac{S_v N_v N_{drs}}{k_{pCu}} = \frac{\pi \cdot 1,2^2 \cdot 29 \cdot 12}{4 \cdot 0,4} = 984 \text{ mm}^2 \quad (3.86)$$

Drážková rozteč.

$$\tau_{dr} = \frac{\pi D_{si}}{Q} = \frac{\pi \cdot 160}{24} = 20,9 \text{ mm} \quad (3.87)$$

Potřebná minimální šířka zubu statoru pro indukci 1,5 T.

$$b_z = \frac{B_\delta \tau_{dr}}{B_z k_{pFe}} = \frac{0,47 \cdot 20,9}{1,5 \cdot 0,95} = 6,9 \text{ mm} \quad (3.88)$$

Parametry drážky dle obrázku 3.15. h_{s0} a b_{s0} jsou zvoleny stejně jako při návrhu pro motor. $h_{s0} = 2 \text{ mm}$ a $b_{s0} = 5 \text{ mm}$. Hloubka drážky byla zvolena vzhledem k požadované ploše $h_d = 55 \text{ mm}$.

Výpočet šířky drážky u paty zubu.

$$b_{s2} = \frac{\pi (D_{si} + 2h_d) - Qb_z}{Q + \pi} = \frac{\pi (160 + 2 \cdot 55) - 24 \cdot 6,9}{24 + \pi} = 25,1 \text{ mm} \quad (3.89)$$

Výpočet šířky drážky v horní části zubu.

$$b_{s1} = \frac{\pi(D_{si} + 2h_0) - Qb_z}{Q - \pi} = \frac{\pi(160 + 2 \cdot 2) - 24 \cdot 6,9}{24 - \pi} = 16,7 \text{ mm} \quad (3.90)$$

Aktivní hloubka drážky.

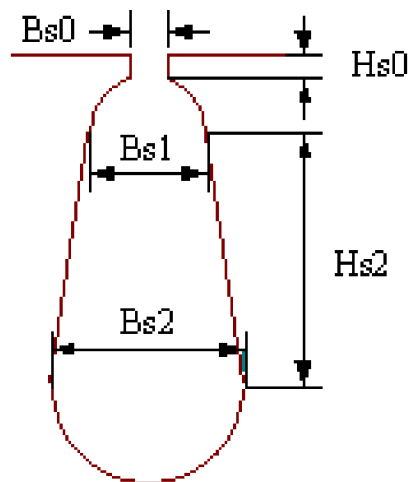
$$h_{s2} = h_d - \left(h_{s0} + \frac{b_{s1} + b_{s2}}{2} \right) = 55 - \left(2 + \frac{25,1 + 16,7}{2} \right) = 32,1 \text{ mm} \quad (3.91)$$

Celková plocha drážky.

$$S_{dr} = h_{s2}b_{s1} + h_{s2} \frac{b_{s2} - b_{s1}}{2} + \frac{\pi b_{s2}^2}{4 \cdot 2} + \frac{\pi b_{s1}^2}{4 \cdot 2} = 32,1 \cdot 16,7 + 32,1 \cdot \frac{25,1 - 16,7}{2} + \frac{\pi \cdot 25,1^2}{8} + \frac{\pi \cdot 16,7^2}{8} = 1027,8 \text{ mm}^2 \quad (3.92)$$

Plnění drážky.

$$k_{pCu} = \frac{S_v N_v N_{drs}}{S_{dr}} = \frac{\pi \cdot 1,2^2 \cdot 29 \cdot 12}{4 \cdot 1027,8} = 0,38 \quad (3.93)$$



Obr. 3.15: Okótovaná drážka statoru

Výška jha statoru pro magnetické sycení 1,5 T. Procentní úbytek napětí i frekvence napětí jsou stejné jako u návrhu pro motor.

Magnetický tok jednoho pólu [6]:

$$\Phi = \frac{U_f(1 + \epsilon)}{4fN_{1fs}} = \frac{7000 \cdot (1 + 0,037)}{\sqrt{3} \cdot 4 \cdot 500 \cdot 48} = 43,7 \text{ mWb} \quad (3.94)$$

Výška jha statoru. Pro jho je volena indukce 1,5 T.

$$h_{js} = \frac{\Phi}{2B_{js}k_{pFe}l_s} = \frac{0,0437}{2 \cdot 1,5 \cdot 0,95 \cdot 1,065} = 14,4 \text{ mm} \quad (3.95)$$

Vnější průměr statoru.

$$D_{so} = D_{si} + 2h_d + 2h_{js} = 160 + 2 \cdot 55 + 2 \cdot 14,4 = 298,8 \text{ mm} \quad (3.96)$$

3.2.3 Návrh permanentního magnetu

Pro návrh byl zvolen stejný magnet jako při návrhu jako motor, tedy N45UH.

Tab. 3.7: Vlastnosti magnetického materiálu N45UH při 60 °C

Remanentní indukce	B_r	1280 mT
Koercitivní síla	H_{CB}	980 kA/m

Pólová rozteč.

$$\tau_p = \frac{\pi D_{si}}{2p} = \frac{\pi \cdot 160}{4} = 125,7 \text{ mm} \quad (3.97)$$

Vzduchová mezera byla zachována na 6 mm.

Činitel geometrických rozměrů pro určení Carterova činitele.

$$k_{geo} = \frac{\frac{b_0}{\delta}}{5 + \frac{b_0}{\delta}} = \frac{\frac{5}{6}}{5 + \frac{5}{6}} = 0,143 \quad (3.98)$$

Carterův činitel z geometrických rozměrů.

$$k_{cart} = \frac{\tau_{dr}}{\tau_{dr} - k_{geo}\delta} = \frac{20,9}{20,9 - 0,143 \cdot 6} = 1,043 \quad (3.99)$$

Maximální indukce ve vzduchové mezeře.

$$B_{\delta\max} = B_{\delta}k_c = 0,47 \cdot 1,043 = 0,49 \text{ T} \quad (3.100)$$

Relativní permeabilita permanentního magnetu je 1,039.

Zjednodušení výpočtu: $B_{PM} \approx B_{\delta\max}$.

Intenzita magnetického pole v permanentním magnetu.

$$H_{\text{PM}} = \frac{B_{\text{PM}} - B_{\text{r60}}}{\mu_0 \mu_{\text{rPM}}} = \frac{0,49 - 1,28}{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 1,039} = -607990 \text{ A/m} \quad (3.101)$$

Výška permanentního magnetu.

$$h_{\text{PM}} = \frac{B_{\delta\text{max}} \cdot \delta}{\mu_0 H_{\text{PM}}} = \frac{0,49 \cdot 6}{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 607990} = 3,85 \text{ mm} \quad (3.102)$$

Kontrola výšky permanentního magnetu na demagnetizaci. Při maximálním zatížení generátoru bude reakce kotvy ve stroji největší. Riziko demagnetizace muselo tedy být zkontrolováno pro maximální zatížení.

Magnetické napětí reakce kotvy pro maximální zatížení.

$$U_{\text{mreakce}} = \frac{2}{3} \sqrt{2} I_f \frac{Q}{2p} N_{\text{drs}} \frac{\sin(90^\circ)}{\sin(60^\circ)} = \frac{2}{3} \sqrt{2} \cdot 130,2 \cdot \frac{24}{4} \cdot 12 \cdot \frac{\sin(90^\circ)}{\sin(60^\circ)} = 10206 \text{ A} \quad (3.103)$$

Intenzita magnetického pole v permanentním magnetu pro zvolenou minimální indukci 0,1 T.

$$H_{\text{PM}} = \frac{B_{\text{PM}} - B_{\text{r60}}}{\mu_0 \mu_{\text{rPM}}} = \frac{0,1 - 1,28}{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 1,039} = -903767 \text{ A/m} \quad (3.104)$$

Minimální potřebná výška permanentního magnetu.

$$h_{\text{PM}} = \left(\frac{B_{\delta\text{max}} \cdot \delta}{\mu_0} + \frac{U_{\text{mreakce}}}{4} \right) \frac{1}{H_{\text{PM}}} = \left(\frac{0,1 \cdot 0,006}{4\pi \cdot 10^{-7}} + \frac{10206}{4} \right) \cdot \frac{1}{903767} = 3,35 \text{ mm} \quad (3.105)$$

Minimální potřebná výška magnetu je nižší než potřebná výška magnetu pro dosažení magnetické indukce ve vzduchové mezeře, takže výšku magnetů není třeba upravovat. Pólové krytí bude stejné jako u návrhu pro motor, tedy $\alpha_{\text{PM}} = 0,833$.

3.2.4 Ztráty ve vinutí

Pro výpočet ztrát ve vinutí bylo zapotřebí vypočítat celkovou délku vodiče, kterým protéká fázový proud.

Průměr statoru do 2/3 drážky.

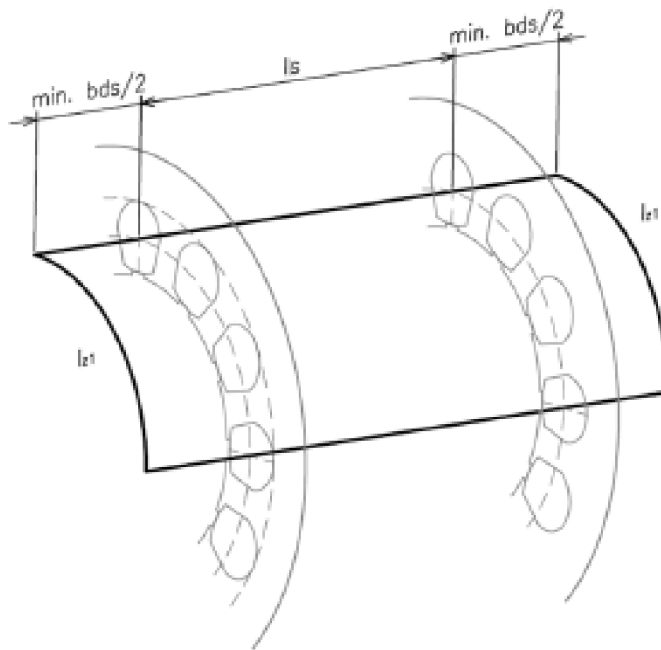
$$D_{\text{ds}} = D_{\text{si}} + 2h_{\text{s0}} + 2 \frac{2(h_{\text{d}} - h_{\text{s0}})}{3} = 160 + 2 \cdot 2 + 2 \cdot \frac{2 \cdot (55 - 2)}{3} = 235 \text{ mm} \quad (3.106)$$

Šířka drážky.

$$b_{ds} = \frac{\pi D_{ds}}{Q} - b_z = \frac{\pi \cdot 235}{24} - 6,9 = 23,9 \text{ mm} \quad (3.107)$$

Délka závitů cívky. Krok cívky byl navržen $y = 6$.

$$l_z = 2l_s + 2y \frac{\pi D_{ds}}{Q} + 4 \frac{b_{ds}}{2} = 2 \cdot 1065 + 2 \cdot 6 \cdot \frac{\pi \cdot 235}{24} + 2 \cdot 23,9 = 2546,9 \text{ mm} \quad (3.108)$$



Obr. 3.16: Délka vinutí

Celková délka vinutí.

$$l_v = m \cdot N_{ifs} \cdot l_z = 3 \cdot 48 \cdot 2546,9 = 366,75 \text{ m} \quad (3.109)$$

Rezistivita mědi při 60 °C je $\rho_{60} = 0,019951 \text{ } \Omega\text{mm}^2/\text{m}$.

Průřez vodiče složeného z dílčích vodičů o průměru 1,2 mm.

$$S_{Vs} = \frac{\pi d_{Cu}^2 N_v}{4} = \frac{\pi \cdot 1,2^2 \cdot 29}{4} = 32,8 \text{ mm}^2 \quad (3.110)$$

Ztráty ve vinutí.

$$\Delta P_v = \rho_{60} \frac{l_v}{S_{Vs}} I_f^2 = 0,019951 \cdot \frac{366,75}{32,8} \cdot 130,2^2 = 3781,7 \text{ W} \quad (3.111)$$

3.2.5 Ztráty v železe

Statorový plech byl zvolen stejný jako u návrhu stroje jako motor.
Poměrné ztráty v železe.

$$\begin{aligned}\Delta p_{\text{Fe}} = k_h f B^2 + k_c f^2 B^2 + k_e (f B)^{1,5} &= 25,2362 \cdot 10^{-3} \cdot 500 \cdot 1,5^2 + \\ &46,5934 \cdot 10^{-6} \cdot 500^2 \cdot 1,5^2 + 0 \cdot (500 \cdot 1,5)^{1,5} = 54,6 \text{ W/kg}\end{aligned}\quad (3.112)$$

Objem statoru.

$$\begin{aligned}V_{\text{Fe}} &= \left(\frac{\pi D_{\text{so}}^2}{4} - \frac{\pi D_{\text{si}}^2}{4} - Q S_{\text{dr}} \right) l_s = \left(\frac{\pi \cdot 298,8^2}{4} - \frac{\pi \cdot 160^2}{4} - 24 \cdot 1027,8 \right) \cdot \\ &1065 = 0,027 \text{ m}^3\end{aligned}\quad (3.113)$$

Hmotnost železa statoru.

$$m_{\text{Fe}} = V_{\text{Fe}} \rho_{\text{Fe}} = 0,027 \cdot 7600 = 205,2 \text{ kg}\quad (3.114)$$

Ztráty v železe.

$$\Delta P_{\text{Fe}} = \Delta p_{\text{Fe}} m_{\text{Fe}} = 54,6 \cdot 205,2 = 11203,9 \text{ W}\quad (3.115)$$

3.2.6 Účinnost generátoru

Celkové ztráty.

$$\Delta P = \Delta P_{\text{Fe}} + \Delta P_v + \Delta P_{\text{mech}} = 11203,9 + 3781,7 + 70000 = 84985,6 \text{ W}\quad (3.116)$$

Účinnost generátoru.

$$\eta = \frac{P_n}{P_n + \Delta P} \cdot 100 = \frac{1,5 \cdot 10^6}{1,5 \cdot 10^6 + 84985,6} \cdot 100 = 94,6\% \quad (3.117)$$

3.2.7 RMxprt

Výpočty pomocí analytických vzorců byly následně porovnány s výsledky návrhu dle programu Ansys RMxprt. Do programu byly zadány vypočítané rozměry generátoru.

Materiály pro stator a permanentní magnety byly do programu vloženy pomocí hodnot, uvedených v datových listech jednotlivých materiálů.

Výsledky analýzy z programu RMxprt srovnané s parametry určenými pomocí analytických vzorců viz tabulka 3.8.

Tab. 3.8: Srovnání vypočtených parametrů s parametry z RMxprt

Veličina	Jednotky	Výpočet	RMxprt	Rozdíl v %
I_{RMS}	[A]	130,2	192,6	47,9
$\cos \phi$	[-]	0,95	0,61	-35,8
S_{dr}	[m ²]	1027,8	1036,5	0,8
A	[A/m]	74599,1	110352	48
σ	[A/mm ²]	3,97	5,87	47,9
B_{δ}	[T]	0,47	0,44	-6,4
B_z	[T]	1,5	1,4	-6,7
B_{js}	[T]	1,5	1,27	-15,3
m_{Fe}	[kg]	205,2	193,3	-5,8
l_z	[m]	2546,9	2579,9	1,3
ΔP_{Fe}	[W]	11203,9	8771	-21,7
ΔP_v	[W]	3781,7	8676,5	229,4
η	[%]	94,6	94,2	-0,4
β	[°]	-	90	-

3.2.8 Úprava parametrů podle programu RMxprt

Jak je vidět z tabulky 3.8, tak velká odchylka mezi výpočtem a analýzou je v proudu procházející vinutím. Na velikost proudu má velký vliv magnetická indukce v okolí drážky a účinník. Je tedy potřeba upravit magnetický obvod. Bylo potřeba upravit výšku permanentních magnetů pro dosažení požadované indukce.

Zprvu byl upraven magnetický obvod. Indukce v zubu je závislá na indukci ve vzduchové mezeře a proto bylo nutné přepočítat šířku zubu, tak aby bylo dosaženo indukce 1,5 T. Na magnetické indukci ve vzduchové mezeře je také závislá výška jha statoru.

Úprava šířky zubu statoru.

$$b_{zu} = b_z \cdot \frac{1,4}{1,5} \cdot \frac{0,47}{0,44} = 6,9 \cdot \frac{1,4}{1,5} \cdot \frac{0,47}{0,44} = 6,9 \text{ mm} \quad (3.118)$$

Úprava výšky jha statoru.

$$h_{jsu} = h_{js} \cdot \frac{1,27}{1,5} \cdot \frac{0,47}{0,44} = 14,4 \cdot \frac{1,27}{1,5} \cdot \frac{0,47}{0,44} = 13 \text{ mm} \quad (3.119)$$

Pro dosažení požadované magnetické indukce ve vzduchové mezeře byla v programu Rmxprt postupně zvyšována výška magnetů. Požadované indukce se dosáhlo při výšce permanentních magnetů $h_{PM} = 4,45 \text{ mm}$.

Dalším velkým rozdílem mezi výpočtem a analýzou v programu byl fázový proud, respektive účinník. Pro dosažení lepšího účinníku a snížení fázového proudu bylo potřeba upravit délku stroje.

$$l_{su} = l_s \cdot \frac{0,95}{0,61} = 1065 \cdot \frac{0,95}{0,61} = 1658 \doteq 1660 \text{ mm} \quad (3.120)$$

Ztráty ve vinutí

Délka závitu cívky.

$$l_z = 2l_s + 2y \frac{\pi D_{ds}}{Q} + 4 \frac{b_{ds}}{2} = 2 \cdot 1660 + 2 \cdot 6 \cdot \frac{\pi \cdot 235}{24} + 2 \cdot 23,9 = 3736,9 \text{ mm} \quad (3.121)$$

A následně spočtená celková délka vinutí.

$$l_v = m \cdot N_{ifs} \cdot l_z = 3 \cdot 48 \cdot 3736,9 = 538,11 \text{ m} \quad (3.122)$$

Ztráty ve vinutí.

$$\Delta P_v = \rho_{60} \frac{l_v}{S_{Vs}} I_f^2 = 0,019951 \cdot \frac{538,11}{32,8} \cdot 130,2^2 = 5548,6 \text{ W} \quad (3.123)$$

Ztráty v železe

Vnější průměr statoru.

$$D_{so} = D_{si} + 2h_d + 2h_{js} = 160 + 2 \cdot 55 + 2 \cdot 13 = 296 \text{ mm} \quad (3.124)$$

Objem statoru.

$$V_{Fe} = \left(\frac{\pi D_{so}^2}{4} - \frac{\pi D_{si}^2}{4} - Q S_{dr} \right) l_s = \left(\frac{\pi \cdot 296^2}{4} - \frac{\pi \cdot 160^2}{4} - 24 \cdot 1027,8 \right) \cdot 1660 = 0,0399 \text{ m}^3 \quad (3.125)$$

Váha statoru.

$$m_{\text{Fe}} = V_{\text{Fe}}\rho_{\text{Fe}} = 0,0399 \cdot 7600 = 303,2 \text{ kg} \quad (3.126)$$

Ztráty v železe.

$$\Delta P_{\text{Fe}} = \Delta p_{\text{Fe}}m_{\text{Fe}} = 54,6 \cdot 303,2 = 16554,7 \text{ W} \quad (3.127)$$

Účinnost genrátoru

Celkové ztráty generátoru.

$$\Delta P = \Delta P_{\text{Fe}} + \Delta P_{\text{v}} + \Delta P_{\text{mech}} = 16554,7 + 5548,6 + 70000 = 92103,3 \text{ W} \quad (3.128)$$

Účinnost generátoru.

$$\eta = \frac{P_{\text{n}}}{P_{\text{n}} + \Delta P} \cdot 100 = \frac{1,5 \cdot 10^6}{1,5 \cdot 10^6 + 92103,3} \cdot 100 = 94,2\% \quad (3.129)$$

RMxprt s upravenými parametry

Tab. 3.9: Srovnání upravených parametrů s parametry z RMxprt

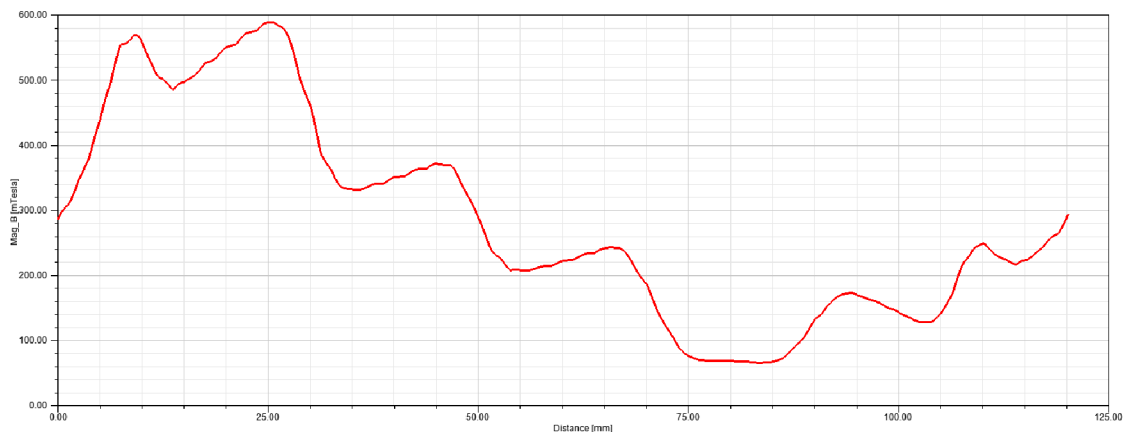
Veličina	Jednotky	Výpočet	RMxprt	Rozdíl v %
I_{RMS}	[A]	130,2	130,7	0,4
$\cos \phi$	[-]	0,95	0,95	0
S_{dr}	[m ²]	1027,8	1036,5	0,8
A	[A/m]	74599,1	74868,9	0,4
σ	[A/mm ²]	3,97	3,98	0,3
B_{δ}	[T]	0,47	0,47	0
B_z	[T]	1,5	1,5	0
B_{js}	[T]	1,5	1,48	-1,3
m_{Fe}	[kg]	303,2	285,6	-5,8
l_z	[m]	3736,9	3769,9	0,9
ΔP_{Fe}	[W]	16554,7	16527,7	-0,2
ΔP_v	[W]	5548,6	5836	5,2
η	[%]	94,2	94,2	0
β	[°]	-	66,8	-

Nyní, jak je vidět z tabulky 3.9, se vypočtené parametry generátoru a parametry z analýzy programem zásadně neliší. Rozdíl ve váze stroje bude nejspíše způsoben chybným uvažováním ve výpočtu a nezapočítáním výřezu pro vklad vinutí do plochy drážky. Rozdílná délka závitu může být způsobena rozdílným uvažováním délky čel vinutí. Vyšší fázový proud může být způsoben menší magnetickou indukcí v statorovém jhu.

3.2.9 Výpočet 2D průběhu magnetického pole

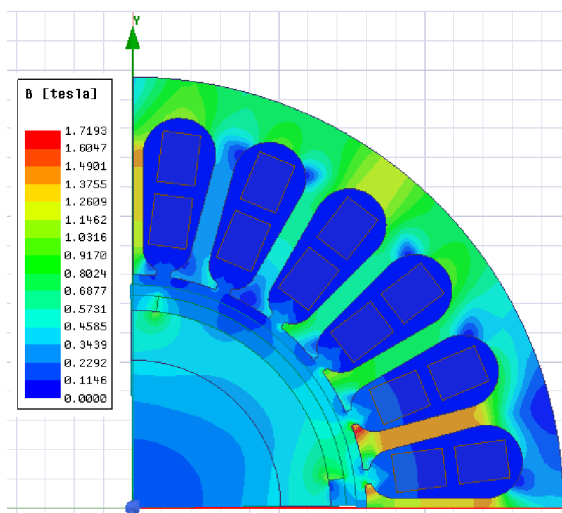
Výpočet průběhu magnetického pole byl proveden pomocí programu Ansys Maxwell 2D. Do programu byly zadány parametry stroje a program metodou konečných prvků provedl výpočet magnetického pole.

Na obrázku 3.17 lze vidět průběh magnetické indukce pod jedním pólem.



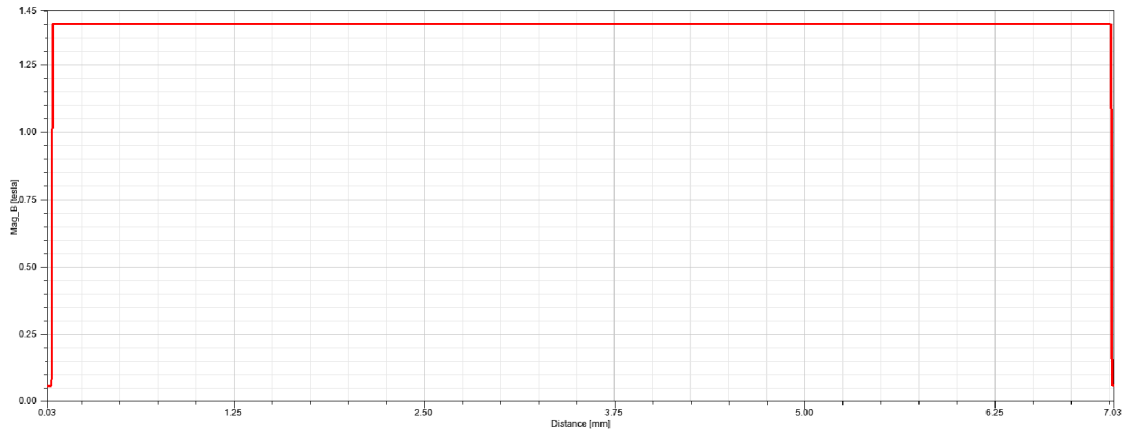
Obr. 3.17: Průběh magnetické indukce pod jedním pólem

Na obrázku 3.18 lze vidět rozložení magnetické indukce v generátoru. Na jejím rozložení se uplatňuje reakce kotvy a proto jsou konce zubů, na jedné polovině pólu, přesycovány. Maximální hodnota magnetické indukce ve stroji dosahuje 1,72 T.

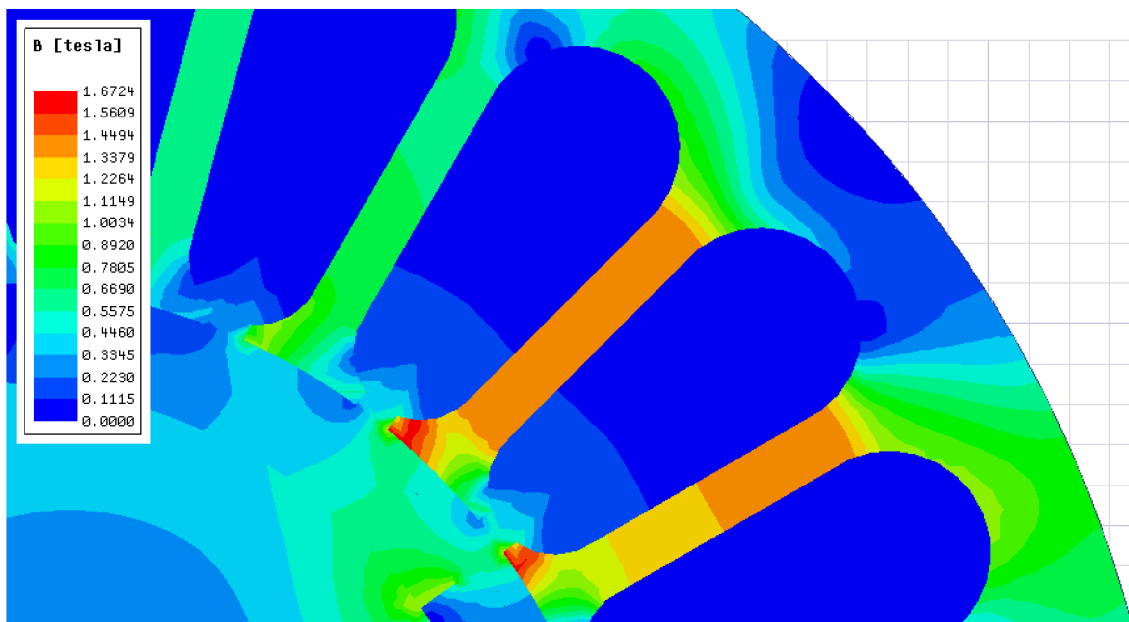


Obr. 3.18: Rozložení magnetické indukce v generátoru

Z průběhu magnetické indukce v zubu lze vidět, že hodnota nesouhlasí s výslednou hodnotou z analýzy v programu Rmxprt. V Rmxprt vyšla hodnota indukce 1,5 T, ale hodnota dle analýzy v programu Maxwell vyšla 1,4 T. Generátor tedy při jmenovitém výkonu pracuje s větším zátěžným úhlem.

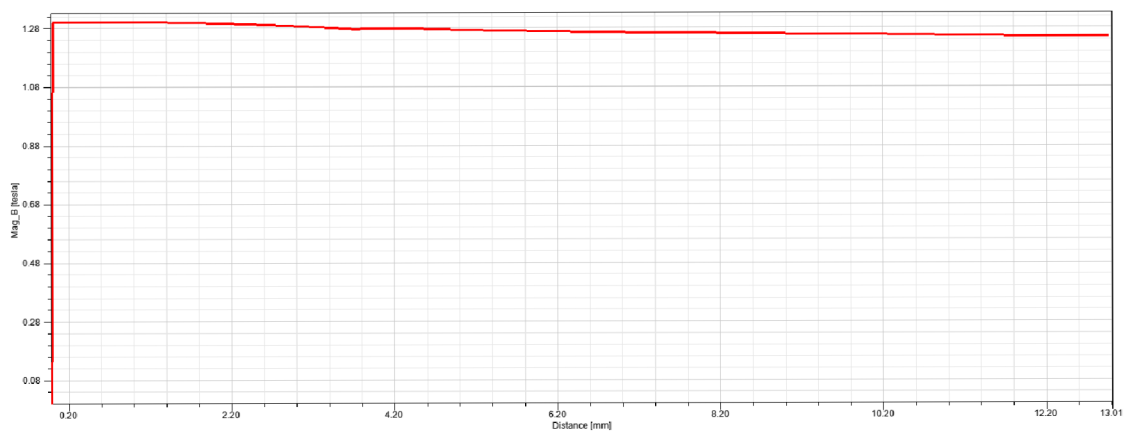


Obr. 3.19: Průběh magnetické indukce v polovině délky statorového zubu

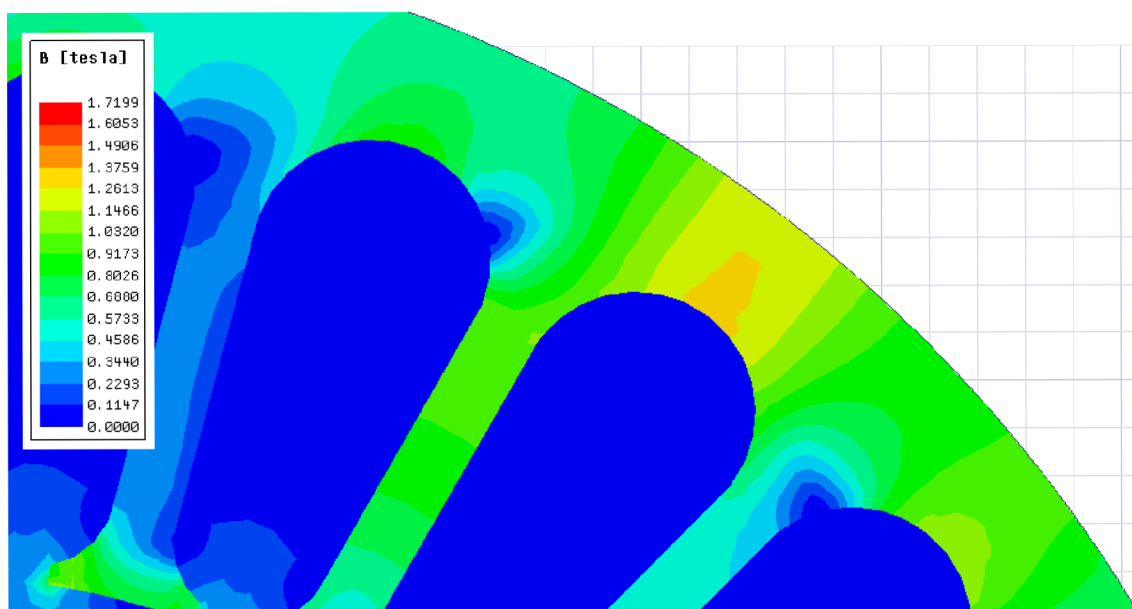


Obr. 3.20: Detailní pohled na rozložení magnetické indukce v statorovém zubu

Průběh magnetické indukce ve jhu stejně jako v zubu nedosahuje požadovaných hodnot. Magnetická indukce zde není rovnoměrně rozložena a vyšších hodnot dosahuje blíže středu stroje. Maximální hodnota magnetické indukce je 1,3 T.



Obr. 3.21: Průběh magnetické indukce v satorovém jhu nad drážkou



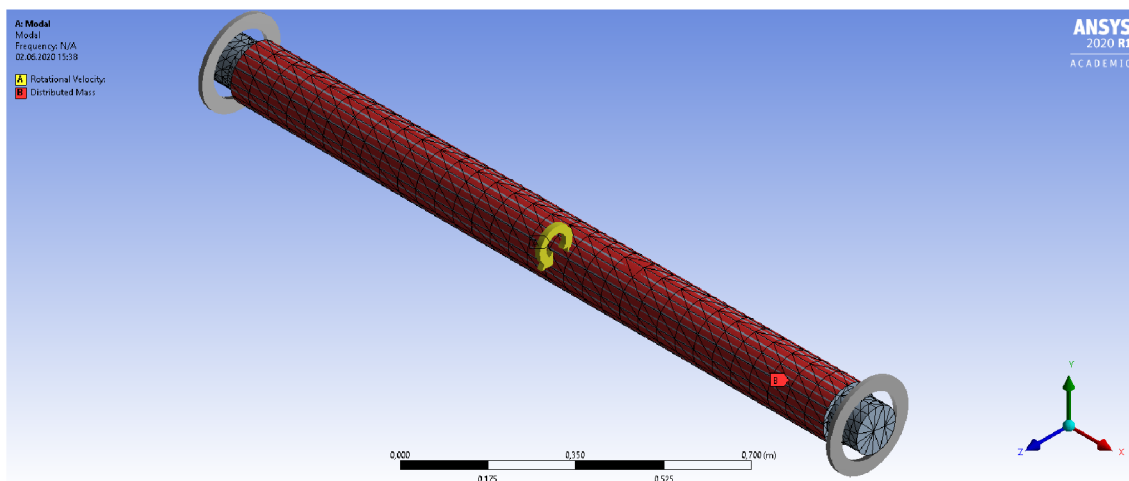
Obr. 3.22: Detailní pohled na rozložení magnetické indukce v satorovém jhu

3.2.10 Kritické otáčky

Pro návrh stroje byly vypočteny kritické otáčky pomocí programu Ansys Mechanical. Pro výpočet byly důležité parametry rotoru. Zvolenými parametry jsou délka hřídele a její průměr. Místo pro čela vinutí byla nahrazeno délkou 20 mm a pro uchycení na ložiska byla zvolena délka 60 mm.

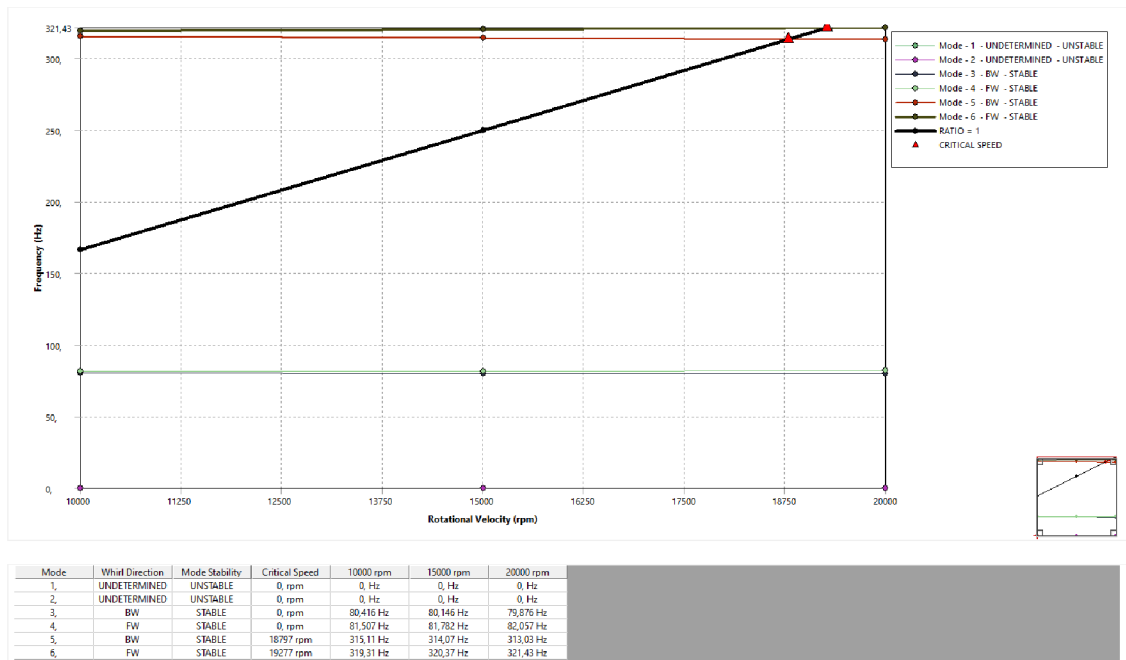
Tab. 3.10: Parametry rotoru

Veličina	Jednotky	Hodnota
Délka rotorového svazku	[mm]	1670
Délka hřídele	[mm]	1830
Průměr rotoru	[mm]	148
Průměr rotoru bez magnetů	[mm]	139,1
Průměr hřídele	[mm]	110
Váha permanentních magnetů	[kg]	20,66



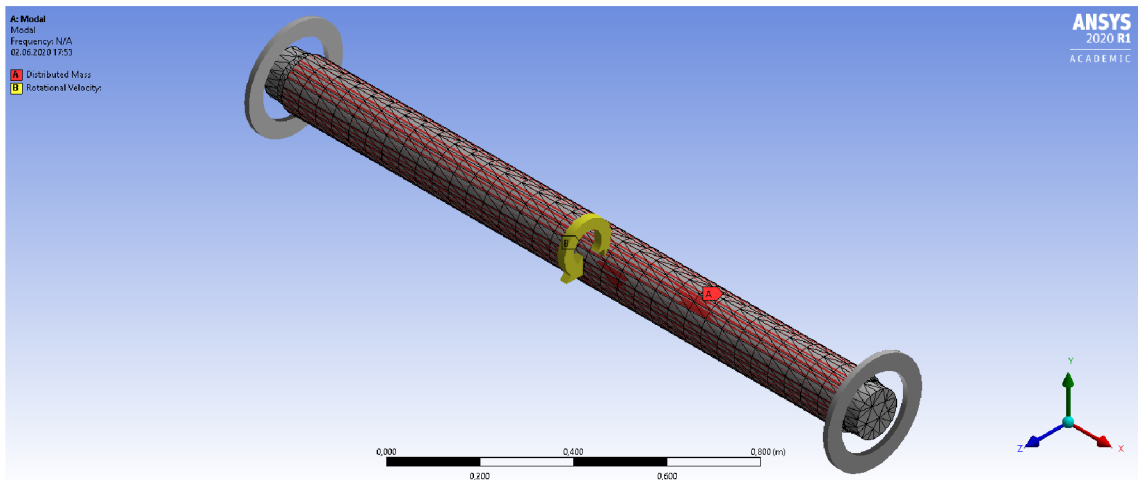
Obr. 3.23: Model hřídele generátoru s rotorovou částí

Jak je vidět z Campbellova diagramu, tak s provozními otáčkami se nacházíme nad prvními kritickými otáčkami a zároveň pod druhými kritickými otáčkami. Pro splnění bezpečnostního koeficientu je potřeba dostat kritické otáčky ještě o něco málo výš.



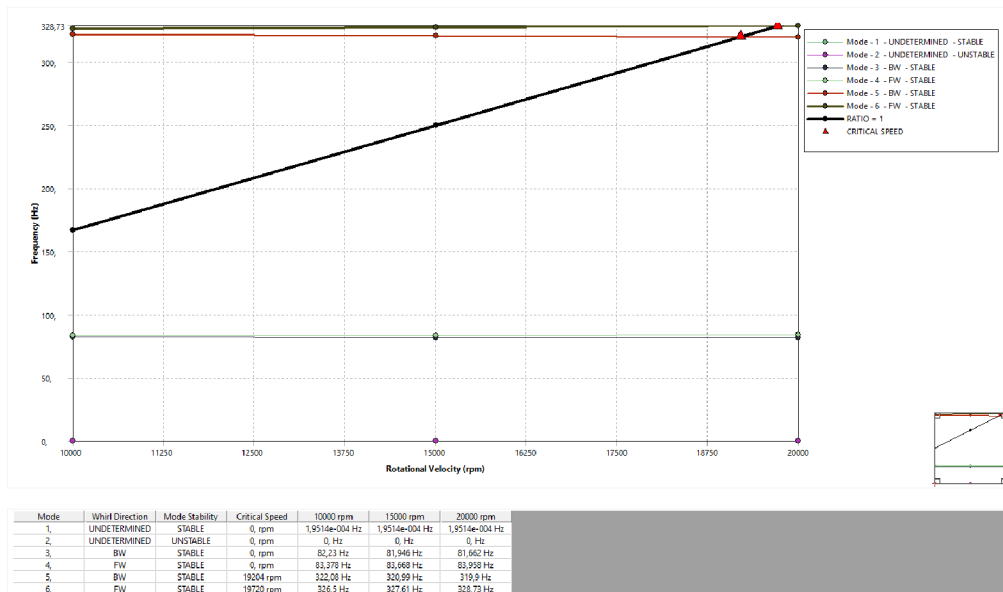
Obr. 3.24: Campbellův diagram

Pro navýšení druhých kritických otáček byla délka hřídele upravena na 1790 mm a zároveň byl průměr hřídele navýšen na 120 mm.

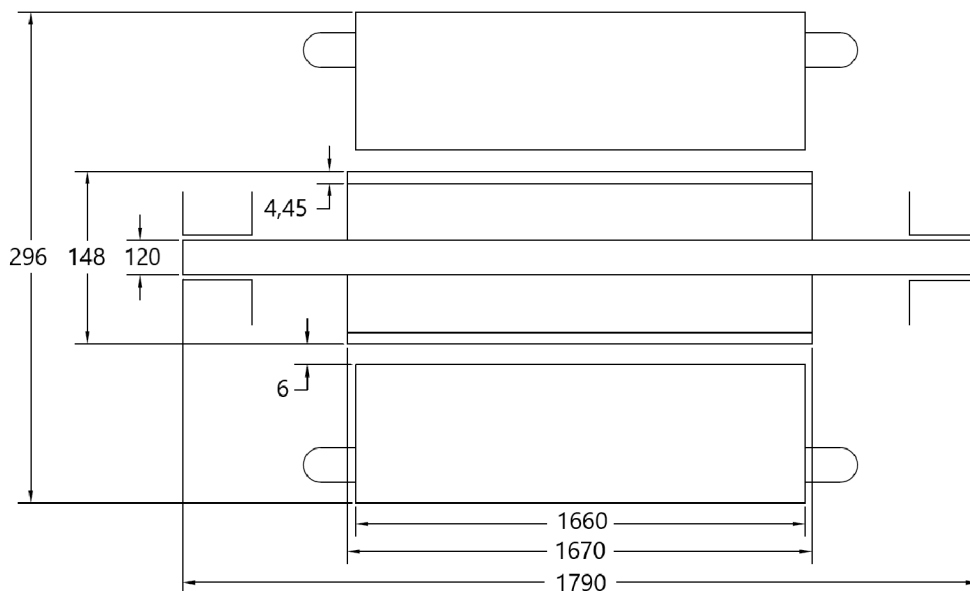


Obr. 3.25: Model hřídele generátoru s rotorovou částí

Nyní po úpravě lze vidět, že druhé kritické otáčky jsou dostatečně vzdáleny pro bezpečný provoz stroje. Druhé kritické otáčky se pohybují okolo 19500 ot./min. První kritické otáčky jsou pro tento model nedůležité, jelikož se při rozběhu přejdou a jsou velice nízko oproti otáčkám provozním, odpovídají zhruba 5000 ot./min.



Obr. 3.26: Campbellův diagram

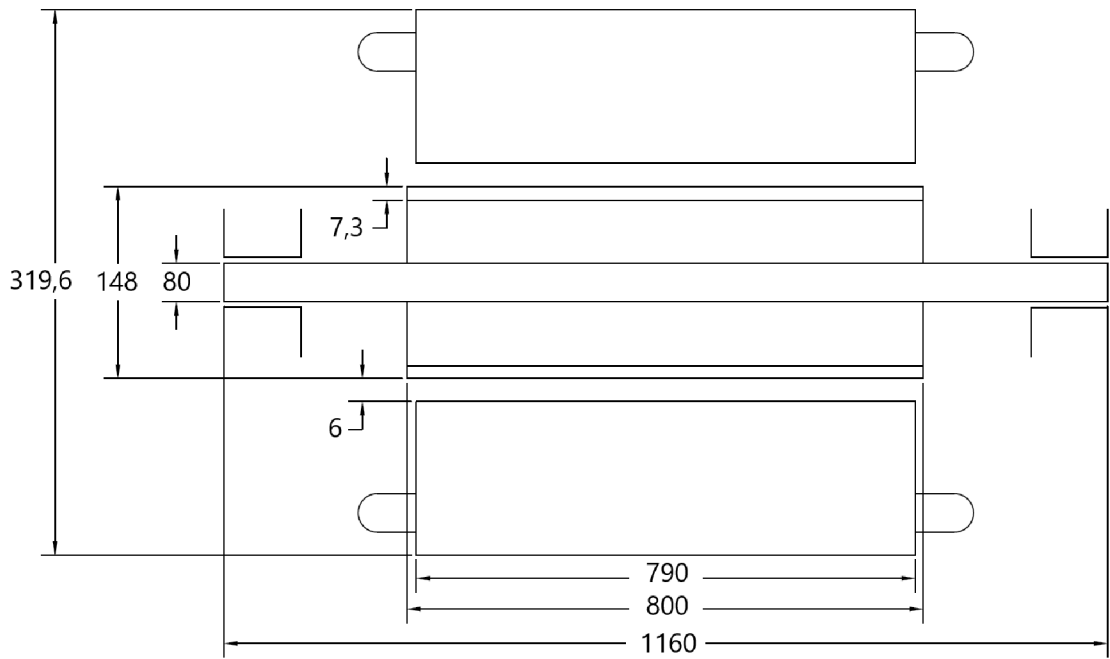


Obr. 3.27: Rozměry generátoru

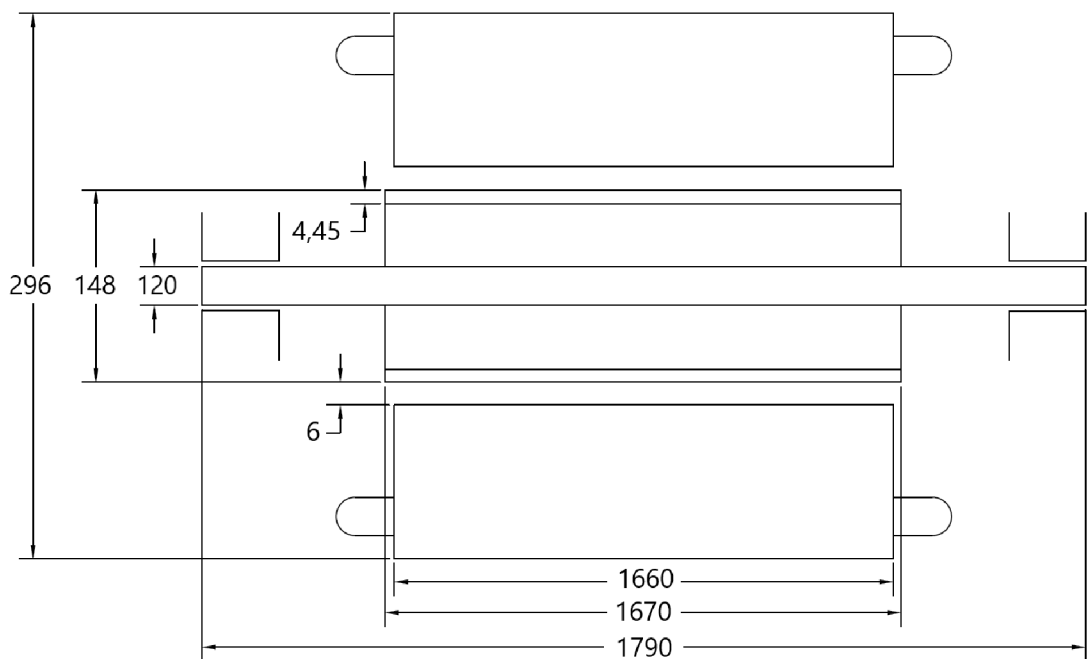
3.3 Porovnání obou variant návrhu

Tab. 3.11: Tabulka srovnání parametrů variant návrhu

Veličina	Jednotky	Motor	Generátor
Vnější průměr statoru	[mm]	319,6	296
Vnitřní průměr statoru	[mm]	160	160
Vnější průměr rotoru	[mm]	148	148
Průměr hřídele	[mm]	90	120
Délka statoru	[mm]	790	1660
Délka rotoru	[mm]	800	1670
Délka hřídele	[mm]	1160	1790
Výška vzduchové mezery	[mm]	6	6
Výška magnetů	[mm]	7,3	4,45
Počet závitů na fázi	[-]	48	48
Počet vodičů na závit	[-]	20	29
Průměr vodiče	[mm]	1,5	1,2
Plocha drážky	[mm ²]	1090,8	1036,5
Šířka zubu	[mm]	9,6	6,9
Váha mědi	[kg]	91	158,5
Váha permanentních magnetů	[kg]	15,9	20,7
Váha železa statoru	[kg]	193,6	285,6
Fázový proud	[A]	133,8	130,7
Obvodová proudová hustota	[A/m]	76635,5	74868,9
Proudová hustota ve vinutí	[A/mm ²]	3,78	3,98
Ztráty v železe	[W]	11573,1	16567,7
Ztráty ve vinutí	[W]	3024,4	5836
Účinnost	[%]	94,7	94,2
Zátěžný úhel	[°]	42,5	66,8



Obr. 3.28: Rozměry motoru



Obr. 3.29: Rozměry generátoru

Závěr

Cílem bakalářské práce bylo provést návrh elektrického točivého stroje. Na začátku práce byla provedena literární rešerše, která se zabývá principem funkce a provedením konstrukce stroje. Jsou rozebrány možnosti vinutí statoru, materiály permanentních magnetů a možnosti jejich uchycení na rotoru.

Návrh byl proveden pro dvě možnosti využití, jako motor a generátor. Pro oba návrhy bylo zvoleno uchycení magnetů na povrchu a materiál magnetů ze vzácných zemin, NdFeB. Návrh vinutí vycházel z obvodové proudové hustoty, která byla zvolena po dohodě s vedoucím práce. Ze spočítaného proudu byl vypočten potřebný průřez vinutí. Na základě vinutí byla navržena statorová drážka, která je také závislá na návrhu šířky zubu statoru. Šířka zubu a výška jha statoru byla navrhována na magnetickou indukci 1,5 T. Výška permanentního magnetu byla navrhována z hlediska požadované magnetické indukce ve vzduchové mezeře a následně byla ověřena na působení reakce kotvy, tak aby nedošlo k trvalé demagnetizaci. Po provedení základního návrhu byly vypočítány ztráty stroje a jeho účinnost.

U obou variant byly výsledky analytického výpočtu srovnány s výsledkem analýzy v programu RMXprt. Po srovnání prvotních návrhů došlo u obou variant k úpravě strojů, tak aby bylo dosaženo optimálnějších výsledků. Porovnání návrhů i s analýzou v Rmxprt viz tabulka 3.11. Následně byl pomocí programu Ansys Maxwell vypočítán průběh magnetického pole. Posledním výpočtem byly kritické otáčky, které byly vypočítány pomocí programu Ansys Mechanical. Z hlediska kritických otáček je varianta návrhu motor s rezervou proveditelná a neměl by být problém s umístěním ložisek a jejich možnou kolizí s některou částí statoru. U varianty návrhu generátor by ovšem mohlo ke kolizi dojít, jelikož v návrhu je počítáno s minimální možnou délkou čel a hřídel nebylo možné navrhnout delší kvůli kritickým otáčkám. Pro rozhodnutí zda je druhá varianta proveditelná, by bylo nutné provést detailnější rozbor.

Literatura

- [1] NOVÁK, Jaroslav. *Uplatnění synchronních strojů v dopravní technice (1. část)*. *ELEKTRO* [online]. 2006, **2006**(6) [cit. 2019-11-30]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/uplatnenisynchronnich-stroju-v-dopravni-technice-1-cast-13092>
- [2] GIERAS, Jacek. *Permanent magnet motor technology: design and applications*. 3rd ed. Boca Raton: CRC Press, 2010. ISBN 978-1-4200-6440-7
- [3] WELANDER, Peter. *Střídavé motory s permanentními magnety* [online]. 2010 [cit. 2019-11-30]. Dostupné z: <http://www.controlengcesko.com/hlavnimenu/artikuly/artikul/article/stridave-motory-s-permanentnimi-magnety/>
- [4] KOŘISTKA, P. *Simulace provozních stavů synchronního generátoru v ostrovním provozu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2012. 56 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Rostislav Huzlík
- [5] ONDRŮŠEK, Č. *Elektrické stroje*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií.
- [6] CIGÁNEK, L. a M. BAUER. *Elektrické stroje a přístroje*. Druhé vydání. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1957.
- [7] POKORNÝ, Karel *Stavba elektrických strojů I*. Brno: Státní nakladatelství technické literatury, 1981.
- [8] BUREŠ, Petr *Návrh synchronního stroje s permanentními magnety* [online]. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2018 [cit. 2019-12-01]. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Ondřej Vítek, Ph.D. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/www-base/zav-prace-soubor-verejne.php?file-id=172082>
- [9] VEG, L. *Návrh synchronního stroje s vyniklými póly* [online]. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni fakulta , Fakulta elektrotechnická, 2013 [cit. 2020-01-04]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/107768712-Bakalarska-prace-zapadoceska-univerzita-v-plzni-fakulta-elektrotechnicka-navrh-synchronniho-stroje-s-vyniklymi-poly.html>
- [10] High Voltage Permanent Magnet Synchronous Motor. *Texas Instrument* [online]. [cit. 2019-12-01]. Dostupné z: <http://www.ti.com/tool/HVPMSTMTR>

- [11] Navíjení armatury Pole Pitch Cívka Span Commutator Pitch. *Riverglennapts* [online]. [cit. 2019-12-02]. Dostupné z: <https://riverglennapts.com/cs/dc-generator/255-armature-winding-pole-pitch-coil-span-commutator-pitch.html>
- [12] E-shop s magnety. *MAGSY* [online]. [cit. 2019-12-03]. Dostupné z: <https://e-shop.magsy.cz/>
- [13] Samarium-cobalt magnet. *ipfs.io* [online]. [cit. 2019-12-03]. Dostupné z: <https://ipfs.io/ipfs/QmXoypizjW3WknFiJnKLwHCXWo6uco/wiki/Samarium-cobalt-magnet.html>
- [14] NdFeB corrosion. *Wikimedia commons* [online]. [cit. 2019-12-03]. Dostupné z: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:NdFeB-corrosion.jpg>
- [15] Sintered Neodymium-Iron-Boron Magnets. *Arnold magnetic technologies* [online]. [cit. 2020-04-24]. Dostupné z: <https://www.arnoldmagnetics.com/wp-content/uploads/2017/11/N45UH-151021.pdf>
- [16] JIRÁSEK, T. *Výpočet přídatných ztrát asynchronního stroje* [online]. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2010 [cit. 2019-12-27]. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Čestmír Ondrůšek, CSc. Dostupné z: <https://core.ac.uk/download/pdf/30280848.pdf>
- [17] VÍTEK, Ondřej. *Výpočet magnetického obvodu BLDC motoru s permanentními magnety*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2012.
- [18] ORSÁGOVÁ, J. *Rozvodná zařízení*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2015.
- [19] DALCALI, A. *OPTIMAL DESIGN OF HIGH-PERFORMANCE INTERIOR PM MOTOR FOR ELECTRIC VEHICLE* [online]. Bandırma: Department of Electronics and Communication Engineering, Faculty of Engineering and Natural Sciences, Bandırma Onyedi Eylül University, 2018 [cit. 2020-01-03]. Dostupné z: <https://dergipark.org.tr/en/download/article-file/628726>

Seznam symbolů, veličin a zkratek

A	Obvodová proudová hustota
A_s	Přepočítaná obvodová proudová hustota
b_{s0}	Šířka vsypu drážky
b_{s1}	Šířka drážky v horní části zubu
b_{s2}	Šířka drážky u paty zubu
b_{ds}	Šířka drážky statoru
b_{PM}	Šířka permanentního magnetu
b_z	Šířka zubu statoru
b_{zu}	Upravená šířka zubu statoru
B_{js}	Magnetická indukce ve jhu statoru
B_{PM}	Magnetická indukce v permanentním magnetu
B_r	Remanentní indukce
B_{r60}	Remanentní indukce při 60 °C
B_z	Magnetická indukce v zubu statoru
B_δ	Magnetická indukce ve vzduchové mezeře
$B_{\delta\max}$	Maximální magnetická indukce ve vzduchové mezeře
BH_{\max}	Maximální energetický součin
$\cos \phi$	Účinník odběru proudu
d_{Cu}	Průměr drátu z mědi
D_{ds}	Průměr statoru ve 2/3 drážky
D_{ro}	Vnější průměr rotoru
D_{si}	Vnitřní průměr statoru
D_{so}	Vnější průměr statoru
f	Frekvence napětí
h_{s0}	Výška vsypu drážky
h_{s2}	Aktivní hloubka drážky
h_d	Celková hloubka drážky
h_{js}	Výška jha statoru
h_{jsu}	Upravená výška jha statoru
h_{PM}	Výška permanentního magnetu
H_{CB}	Koercitivní síla
H_{CB60}	Koercitivní síla při 60 °C
H_{CJ}	Minimální vlastní koercitivní síla
H_{PM}	Intenzita magnetického pole v permanentním magnetu
$H_{\delta\max}$	Intenzita magnetického pole ve vzduchové mezeře
I_f	Fázový proud
I_{RMS}	Efektivní hodnota proudu

k_c	Koeficient ztrát výřivými proudy
k_{cart}	Carterův činitel
k_e	Koeficient dodatečných ztrát
k_{geo}	Činitel geometrických rozměrů
k_h	Koeficient hysterezních ztrát
k_{pCU}	Činitel plnění drážky
k_{pFe}	Činitel plnění železa
k_v	pouze ukázka vyhrazeného místa
K_E	Essonův činitel
l_s	Délka statoru
l_{su}	Upravená délka statoru
l_v	Délka vinutí
l_z	Délka závitů
m	Počet fází
m_{Fe}	Váha železa statoru
M_n	Jmenovitý moment
n_n	Jmenovité otáčky
n_s	Synchronní otáčky
N_{1f}	Počet závitů na fázi
N_{1fs}	Přepočtený počet závitů na fázi
N_{dr}	Počet závitů v drážce
N_{drs}	Upravený počet závitů v drážku
NdFeB	Neodym–železo–bor
p	Počet pólových dvojic
P_n	Jmenovitý výkon
PMSM	Synchronní motor s permanentními magnety
q	Počet drážek na pól a fázi
Q	Počet drážek
Q_p	Počet drážek na pól
S_{dr}	Celkový obsah drážky
S_{drp}	Předběžný obsah drážky
S_n	Jmenovitý příkon
S_v	Průřez drátu
S_V	Průřez vodiče
S_{Vs}	Skutečný průřez vodiče
U_0	Fázové napětí naprázdno
U_1	Fázové napětí
U_f	Fázové napětí
U_{mFe}	Úbytek na feromagnetických částech

U_{mPM}	Magnetické napětí permanentního magnetu
U_{reakce}	Reakce kotvy
$U_{\text{m}\delta}$	Magnetické napětí ve vzduchové mezeře
U_{s}	Sdružené napětí
V_{Fe}	Objem železa statoru
X_{s}	Synchronní reaktance
y	Krok cívky
α	Teplotní součinitel
α_{PM}	Pólové krytí
β	Zátěžný úhel
δ	Výška vzduchové mezery
Δp_{Fe}	Poměrné ztráty v železe
ΔP	Celkové ztráty výkonu
ΔP_{Fe}	Ztráty v železe
ΔP_{mech}	Mechanické ztráty
ΔP_{v}	Ztráty ve vinutí
$\Delta \vartheta$	Rozdíl teplot
ϵ	Procentní úbytek napětí
η	Účinnost
ϑ_{n}	Provozní teplota
μ_0	Permeabilita vakua
μ_{rPM}	Relativní permeabilita permanentního magnetu
π	Ludolfovo číslo
ρ_{20}	Rezistivita při 20 °C
ρ_{60}	Rezistivita při 60 °C
ρ_{Fe}	Hustota železa
σ	Proudová hustota
σ_{s}	Skutečná proudová hustota
τ_{dr}	Drážková rozteč
τ_{p}	Pólová rozteč
τ_{pd}	Pólová rozteč v elektrických stupních
τ_{u}	Drážková rozteč v elektrických stupních
Φ	Magnetický tok
ω_{n}	Jmenovitá úhlová rychlost
ω_{s}	Synchronní úhlová rychlost

Přílohy

Datové listy k materiálu M235-35A

Typical data for SURA® M235-35A

T	W/kg at 50 Hz	VA/kg at 50 Hz	A/m at 50 Hz	W/kg at 100 Hz	W/kg at 200 Hz	W/kg at 400 Hz	W/kg at 1000 Hz	W/kg at 2500 Hz
0,1	0,02	0,05	24,7	0,04	0,08	0,19	0,93	3,89
0,2	0,06	0,14	32,6	0,14	0,32	0,87	3,55	14,3
0,3	0,11	0,24	38,1	0,30	0,73	1,88	7,45	29,6
0,4	0,20	0,37	43,1	0,49	1,21	3,17	12,3	50,2
0,5	0,29	0,51	48,2	0,71	1,78	4,73	18,5	76,7
0,6	0,38	0,67	53,9	0,97	2,44	6,56	25,8	110
0,7	0,50	0,87	60,7	1,25	3,19	8,67	34,6	153
0,8	0,62	1,09	68,8	1,57	4,03	11,0	45,0	205
0,9	0,77	1,36	79,3	1,92	4,97	13,8	57,2	270
1,0	0,92	1,71	93,7	2,31	6,01	16,9	71,5	349
1,1	1,10	2,17	115	2,75	7,19	20,3	88,3	
1,2	1,31	2,89	156	3,26	8,54	24,3		
1,3	1,56	4,45	260	3,88	10,1	28,9		
1,4	1,92	10,3	690	4,67	12,2	34,8		
1,5	2,25	32,4	1950	5,54	14,4	41,2		
1,6	2,53	84,6	4410					
1,7	2,75	162	7630					
1,8	2,94	274	12000					

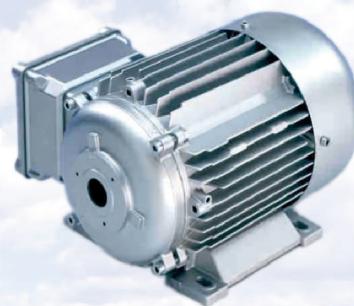
Loss at 1.5 T , 50 Hz, W/kg	2,25
Loss at 1.0 T , 50 Hz, W/kg	0,92
Anisotropy of loss, %	10

Magnetic polarization at 50 Hz	
H = 2500 A/m, T	1,53
H = 5000 A/m, T	1,64
H = 10000 A/m, T	1,76

Coercivity (DC), A/m	35
Relative permeability at 1.5 T	610
Resistivity, $\mu\Omega\text{cm}$	59

Yield strength, N/mm ²	460
Tensile strength, N/mm ²	580
Young's modulus, RD, N/mm ²	185 000
Young's modulus, TD, N/mm ²	200 000
Hardness HV5 (VPN)	220

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



June 2008

Datové listy k materiálu N45UH



N45UH

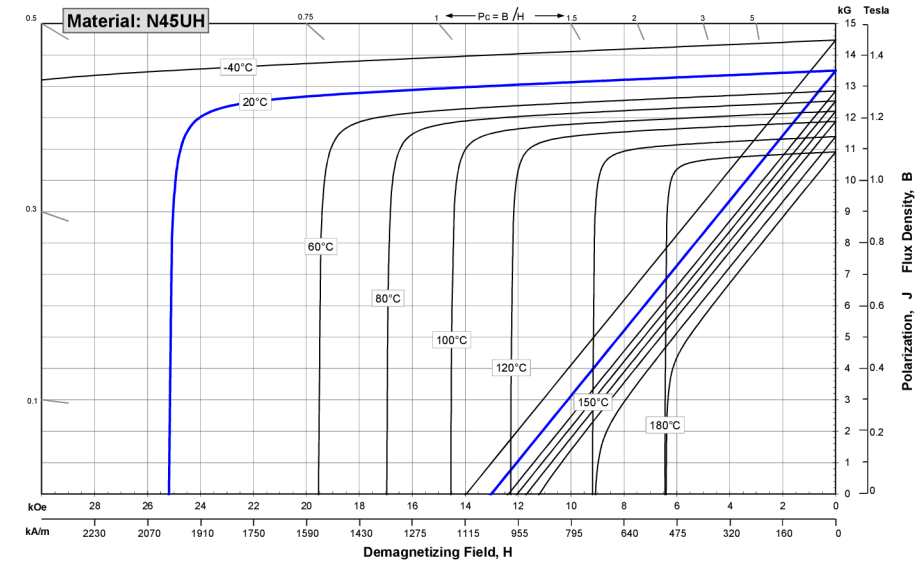
Sintered Neodymium-Iron-Boron Magnets

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

Characteristic	Units	Magnetic Properties		
		min.	nominal	max.
Br , Residual Induction	Gauss	13,200	13,500	13,800
	mT	1320	1350	1380
H_{CB} , Coercivity	Oersteds	12,500	12,850	13,200
	kA/m	995	1023	1050
H_{ciJ} , Intrinsic Coercivity	Oersteds	24,000		
	kA/m	1,910		
BHmax , Maximum Energy Product	MGOe	43	45	47
	kJ/m ³	342	358	374

Characteristic	Units	Thermal Properties	
		C //	C ⊥
Reversible Temperature Coefficients ⁽¹⁾			
	of Induction, α(Br)	%/°C	-0.120
	of Coercivity, α(H _{cj})	%/°C	-0.465
Coefficient of Thermal Expansion ⁽²⁾	ΔL/L per °C x 10 ⁻⁵	7.5	-0.1
Thermal Conductivity	W / (m · K)		7.6
Specific Heat ⁽³⁾	J / (kg · K)		460
Curie Temperature, T _c	°C		310
Other Properties	Flexural Strength	psi	41,300
		MPa	285
	Density	g/cm ³	7.5
	Hardness, Vickers	Hv	620
Electrical Resistivity, ρ	μΩ · cm		180

Notes: (1) Coefficients measured between 20 and 180 °C
(2) Between 20 and 200 °C
(3) Between 20 and 140 °C



1 kA/m = 12.566 Oe 1 kOe = 79.577 kA/m

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