



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 O VÝKONU 3 MW

DESIGN OF 3 MW HIGH-SPEED PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTOR

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Michal Bořil

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Ondřej Vítek, Ph.D.

BRNO 2020



Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Silnoproudá elektrotechnika a výkonová elektronika**

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Student: Bc. Michal Bořil

ID: 182749

Ročník: 2

Akademický rok: 2019/20

NÁZEV TÉMATU:

Návrh vysokootáčkového synchronního stroje s permanentními magnety o výkonu 3 MW

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Nastudujte problematiku vysokootáčkových synchronních strojů s PM velkého výkonu.
2. Na základě literatury proveďte elektromagnetický návrh stroje.
3. Vlastnosti navrženého stroje ověřte pomocí modelu v programu Ansys.
4. Výsledky vyhodnoťte.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] Hendershot, J. R. Jr., Miller, T.J.E. Design of Brushless Permanent-Magnet Motors. Oxford: Magna Physic Publishing and Clarendon Press, 1994.
- [2] PYRHONEN, Juha, JOKINEN, Tapani and HRABOVCOVA, Valerie. Design of Rotating Electrical Machines. 2nd edition. Wiley, 2013. 538 p. ISBN 978-1118581575.
- [3] PETROV, Georgij N. Elektrické stroje 2. Praha: Academia, 1982. 728 s.
- [4] Časopisecké a konferenční články z databáze IEEE Xplore.

Termín zadání: 3.2.2020

Termín odevzdání: 1.6.2020

Vedoucí práce: doc. Ing. Ondřej Vítek, Ph.D.

doc. Ing. Ondřej Vítek, Ph.D.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové 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 částí druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt

Tématem diplomové práce je návrh vysokootáčkového synchronního stroje s permanentními magnety o výkonu 3 MW. Práce je rozdělena na několik částí a obsahuje informace uvedené k tématu. V první části jsou uvedeny trendy a nové technologie vysokootáčkových elektrických strojů a dále je zde uvedena problematika a konstrukce vysokootáčkových synchronních strojů. Ve druhé části je analyticky navrhnout stroj ze zadaných hodnot, který je poté namodelován v programu RMXprt. Tento model motoru je následně upraven do takové podoby, aby dosáhl požadovaného výkonu 3 MW. V předposlední části je motor simulován programy, které jsou obsaženy v balíčku ANSYS Electronics Desktop, jsou to programy RMXprt a Maxwell. Upravený model motoru v RMXprt je simulován pomocí definovaných vzorců a následně převeden do Maxwellu 2D, kde je motor simulován pomocí metody konečných prvků. V poslední části jsou srovnané výsledky z analytického výpočtu s jinými vysokootáčkovými stroji. Dále se v poslední části srovnaly výsledky simulací z RMXprt a Maxwellu.

Abstract

The thesis theme is the design of 3 MW high-speed permanent magnet synchronous motor. The work is divided into several parts, and contains the information given on the topic. The first part lists trends and new technologies of high-speed electric machines, and the issues and construction of high-speed synchronous machines are also listed here. In the second part, the machine is analytically designed from the specified values, which is then modelled in the RMXprt program. In the penultimate part, the engine is simulated by programs that are included in the ANSYS Electronics Desktop package, they are RMXprt and Maxwell. The modified engine model in RMXprt is simulated using defined formulas and then converted to Maxwell 2D, where the engine is simulated using the finite element method. In the last part, the results from the analytical calculation are compared with other high-speed machines. In addition, the results of simulations from RMXprt and Maxwell were compared in the last part.

Klíčová slova

Synchronní stroj, vysokootáčkový stroj, technologie, stator, rotor, kritické oblasti návrhu, analytický výpočet, permanentní magnety, vinutí, drážky, statorové a rotorové jho, magnetický obvod, hmotnost, ztráty stroje a účinnost, RMxprt, Maxwell, metoda konečných prvků

Keywords

Synchronous machine, high-speed machine, technology, stator, rotor, critical design areas, analytical calculation, permanent magnets, windings, grooves, stator and rotor yoke, magnetic circuit, weight, machine loss and efficiency, RMxprt, Maxwell, finite element method

Bibliografická citace:

BOŘIL, Michal. *Návrh vysokootáčkového synchronního stroje s permanentními magnety o výkonu 3 MW*. Brno, 2020. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/127498>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky. Vedoucí práce Ondřej Vítek.

Prohlášení

„Prohlašuji, že svou závěrečnou práci na téma Návrh vysokootáčkového synchronního stroje s permanentními magnety o výkonu 3 MW jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího semestrální 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 závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si 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.

V Brně dne 29. května 2020

.....
podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu semestrální práce doc. Ing. Ondřeji Vítkovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

V Brně dne 29. května 2020

.....
podpis autora

Obsah

1	Úvod	1
2	Vysokootáčkové elektrické stroje	2
2.1	Trendy	2
2.2	Technologie.....	2
2.2.1	Automobilový průmysl	3
2.2.2	Materiál magnetických částí	4
3	Vysokootáčkový synchronní stroj.....	6
3.1	Vysokootáčkový synchronní stroj s permanentními magnety	6
3.2	Stator	7
3.3	Rotor	7
3.4	Kritické oblasti návrhu stroje	10
3.5	Srovnání vysokootáčkového asynchronního a synchronního stroje.....	12
4	Analytický návrh stroje	14
4.1	Úvod	14
4.2	Analytický výpočet.....	14
4.2.1	Rozměry rotoru	15
4.2.2	Rozměry statoru	20
4.2.3	Rozměry permanentních magnetů.....	26
4.2.4	Rozměry statorové drážky a návrh vinutí.....	33
4.2.5	Ztráty a účinnost stroje.....	39
5	Model vysokootáčkového stroje	44
5.1	ANSYS RMxpert.....	44
5.2	Simulace v RMxpertu	45
5.3	ANSYS Maxwell.....	48
5.4	Simulace v Maxwellu	49
6	Vyhodnocení výsledků.....	52
6.1	Vyhodnocení analytického výpočtu stroje.....	52
6.2	Vyhodnocení simulací modelu stroje.....	55
7	Závěr	57
	Literatura	59
	Seznam symbolů, veličin a zkratk.....	61
	Seznam příloh	64

Seznam obrázků

Obr. 2-1 Pohon složený z více vysokootáčkových elektrických motorů [4].....	3
Obr. 2-2 Slitiny pro rotorovou klec [4]	5
Obr. 2-3 Segmentové magnety [4].....	5
Obr. 3-1 Uspořádání rotoru pro synchronní stroj s permanentními magnety – část 1 [18].....	8
Obr. 3-2 Uspořádání rotoru pro synchronní stroj s permanentními magnety – část 2 [18].....	9
Obr. 3-3 Topologie procesu.....	11
Obr. 3-4 Deformace rotoru stroje pro první (zleva) a druhou (zprava) možnost ohnutí.....	11
Obr. 4-1 Srovnání obvodové rychlosti motorů	16
Obr. 4-2 Srovnání tangenciálního napětí motorů	18
Obr. 4-3 Srovnání mechanické konstanty motorů	19
Obr. 4-4 Magnetizační charakteristika oceli 41CrMo4.....	20
Obr. 4-5 Magnetizační charakteristika plechu M235-35A	25
Obr. 4-6 Hysterezní křivka magnetu Sm ₂ Co ₁₇ [9].....	29
Obr. 4-7 Vybrané druhy statorových drážek [10]	34
Obr. 4-8 Tvar M – drážky [10]	35
Obr. 5-1 Uživatelské rozhraní programu RMxpert.....	44
Obr. 5-2 Elektrický obvod modelu.....	49
Obr. 5-3 Síť elementů zkoumaného modelu.....	50
Obr. 6-1 Závislost momentu na čase z Maxwellu 2D	56

Seznam tabulek

Tab. 1 - Srovnání zrealizovaných vzorku [17]	15
Tab. 2 - Vlastnosti permanentního magnetu Sm ₂ Co ₁₇ při 120 °C	28
Tab. 3 - Rozměry M – drážky podle obr. 4-8.....	33
Tab. 4 - Měrné hysterezní a vířivé ztráty plechu M235 – 35A.....	39
Tab. 5 - Srovnání požadovaných hodnot s hodnotami z původní simulace stroje .	46
Tab. 6 - Srovnání simulací původního stroje se strojem se sníženým počtem vodičů	46
Tab. 7 - Srovnání simulací původního stroje se strojem s prodlouženou délkou ...	47
Tab. 8 - Srovnání simulací původního stroje se strojem se zkrácenou délkou	47
Tab. 9 - Srovnání simulací původního stroje se strojem se sníženým počtem vodičů a délkou svazku.....	47
Tab. 10 - Srovnání původní a výsledné simulace s požadovanými hodnotami	48
Tab. 11 - Srovnání již zrealizovaných strojů [17] se strojem s parametry od zadavatele (žlutý sloupeček) a s upraveným strojem (modrý sloupeček)	53
Tab. 12 - Porovnané výsledné veličiny	55

1 ÚVOD

Elektrické stroje jsou v dnešní době zcela běžná věc a používají se pro výrobu elektrické nebo mechanické energie. Do skupiny elektrických strojů patří transformátory a točivé stroje. Točivé stroje přeměňují mechanickou energii na elektrickou, nebo naopak podle toho, jestli se jedná o motor či generátor. Transformátory přeměňují střídavé napětí při stálém kmitočtu. Točivé stroje se dělí do různých kategorií, podle mnoha kritérií (např. podle počtu fází, podle druhu napětí atd.).

Asi polovina celosvětově vyrobené elektřiny se spotřebuje v elektrických motorech a její podíl v elektrických pohonech roste. Elektrické pohony poskytují pravděpodobně nejlepší vlastnosti řízení pro celou řadu procesů. Točivý moment elektrického motoru může být přesně řízen pomocí výkonové elektroniky. Důležité je, že řízený elektrický pohon může ušetřit značné množství energie. V budoucnu se pravděpodobně stanou elektrické pohony důležitou rolí v pohonu automobilů a pracovních strojů. Kvůli energetickým tokům mají elektrické pohony významný dopad na životní prostředí. Pokud jsou pohony špatně navrženy nebo neefektivně používány zatěžují zbytečně životní prostředí. Enviromentální hrozby jsou dobrým důvodem pro navrhování nových a účinných elektrických pohonů, které co nejméně zatěžují životní prostředí a splní účel použití [1].

Během posledních let vysokootáčkový stroj našel své užití v mnoha aplikacích. Vysokootáčkový stroj se začal používat díky pokroku ve výkonové elektronice, kde se vyřešil problém s regulací rychlosti pomocí použití frekvenčních měničů. Omezením převodové části došlo ke zmenšení mechanických ztrát. Vysokootáčkový stroj má mnoho výhod, ale i řadu nevýhod. Při velmi vysokých otáčkách se musí dávat více pozor na mechanickou pevnost rotoru. Důležitou součástí jsou i ložiska. Dalším problémem je napájení z frekvenčního měniče, protože masivní rotor je velice náchylný na vyšší harmonické. Nejrozšířenější vysokootáčkový motor je asynchronní motor, ale v poslední době se do popředí tlačí také synchronní motor s permanentními magnety.

2 VYSOKOOTÁČKOVÉ ELEKTRICKÉ STROJE

Vysokootáčkové elektrické stroje nemají jasně danou definici. Většinou se vysokootáčkové stroje definují podle obvodové rychlosti rotoru. V žádné literatuře není přesně uvedeno, jaká je spodní hranice otáček, kdy by se mohl stroj považovat za vysokootáčkový. V praxi se většinou uvažuje hodnota 10 000 otáček za minutu. Maximální otáčky stroje jsou omezeny převážně rozměry stroje. S rostoucím počtem otáček za minutu roste i mechanické namáhání stroje. Větší mechanické namáhání stroje je nežádoucí, a proto zmenšením rozměrů stroje se zmenší obvodová rychlost a tím i mechanické namáhání. Maximální otáčky stroje mohou být teoreticky libovolné, ale stroj nejde zmenšovat do nekonečna. U vysokootáčkových strojů se musí dávat pozor na otáčky, obvodovou rychlost rotoru, rozměry stroje a mechanické namáhání rotoru, které limituje otáčky stroje [2].

2.1 Trendy

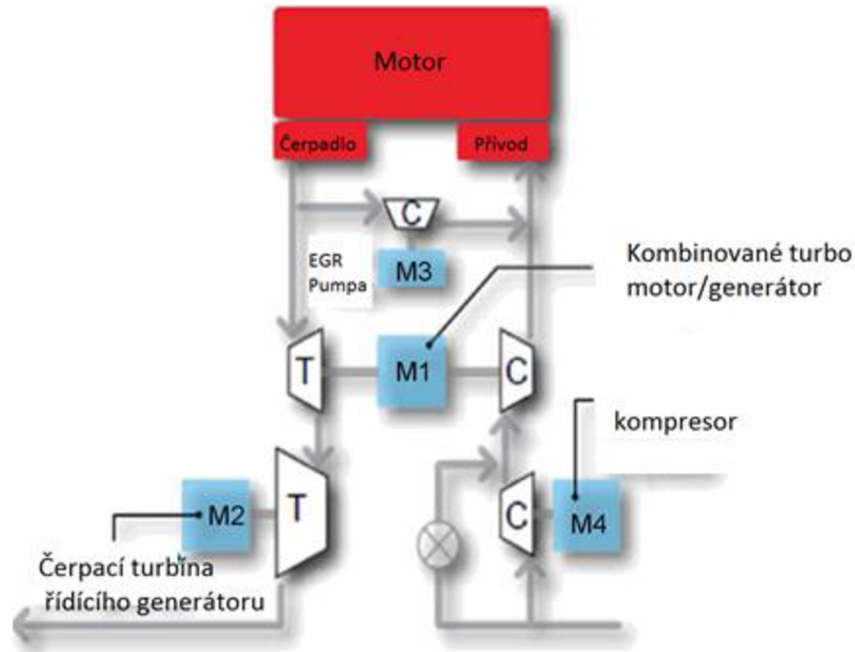
V současnosti, kdy doba velí ke snížení skleníkových plynů a omezení globálního oteplování, se snaží veškeré výrobní podniky snížit výskyt škodlivých plynů, které by mohly způsobit jejich výrobky. Strojní průmysl se také snaží vyrábět motory tak, aby měli co nejmenší dopad na životní prostředí. Trend směřuje čím dál více ke zmenšování rozměrů a hmotnosti a zvyšování účinnosti elektromechanických soustav a předpokládá se, že regulované vysokootáčkové elektrické stroje budou nadále nabývat na výzkumu. Vzhledem k širokému spektru otáček, výkonů a aplikací lze u těchto systému očekávat vývoj řady specifických regulačních metod. Kromě vysokootáčkových synchronních strojů lze předpokládat, že nadále budou nacházet uplatnění i vysokootáčkové asynchronní stroje [14].

2.2 Technologie

Mezi vysokootáčkové stroje se řadí turbodmychadla, motory vrtulníků, závodní motory a palivová čerpadla s typickou provozní rychlostí vyšší než 10 000 min⁻¹. Očekává se pokrok ve vysokorychlostních technologiích a v budoucnu využití těchto technologií v dopravních systémech. Vývoj a výzkum této oblasti je podpořen vývojem výkonových elektronických měničů, která umožňují ještě vyšší provozní frekvenci strojů. Tento výzkum ve spojení s vývojem měkkých a tvrdých magnetických materiálů, které jsou schopny odolat stále vyššímu mechanickému namáhání, se dají očekávat menší celkové ztráty, které mají pozitivní dopad na větší účinnosti stroje [4].

2.2.1 Automobilový průmysl

V automobilech se používají trakční stroje, které jsou integrovány do hybridních pohonných jednotek ke zlepšení palivové účinnosti. V poslední době ekologické instituce mají stále přísnější požadavky na emise. V poslední době začali výrobci automobilů zkoušet místo trakčních motorů vysokootáčkové stroje, které splňují požadavky na emise. Tyto motory se ještě v sériové výrobě neobjevily [4].



Obr. 2-1 Pohon složený z více vysokootáčkových elektrických motorů [4]

V konkrétní aplikaci [5] jsou použity 4 elektrické motory v prostoru mezi brzdovým systémem a ráfkem standardních kol. Každý motor se skládá ze statoru, kde je umístěno 20 drážek a z rotoru, který se skládá z 24 drážek. Přivede-li se na stator napětí, začne se přitahovat zub rotoru. Postupnou aktivací jednotlivých cívek na statoru dochází k roztočení rotoru a pohonu vozu. Pohyb je uskutečněn za pomoci reluktanční síly, která snižuje magnetický odpor mezi cívkou a rotorem. Jsou použity reluktanční motory, protože jsou známy pro svůj relativně vysoký výkon při nízké ceně. Tento typ motorů byl použit, protože vytváří předpoklad pro sériovou výrobu pro použití v různých modelech vozidel. Výkon jednotlivých zkoušených motorů se pohybuje okolo 25 kW. Vědci si slibují, že tato koncepce pohonu může být o 30-40 % levnější než u současně používaných pohonů. Kromě nákladů vědci vidí i významné přínosy pro životní prostředí. Nevýhodou těchto motorů je, že jsou neobvykle hlučné, a proto se vědci snaží odstranit i tuto negativní vlastnost a přivést stroj na nižší akustickou úroveň.

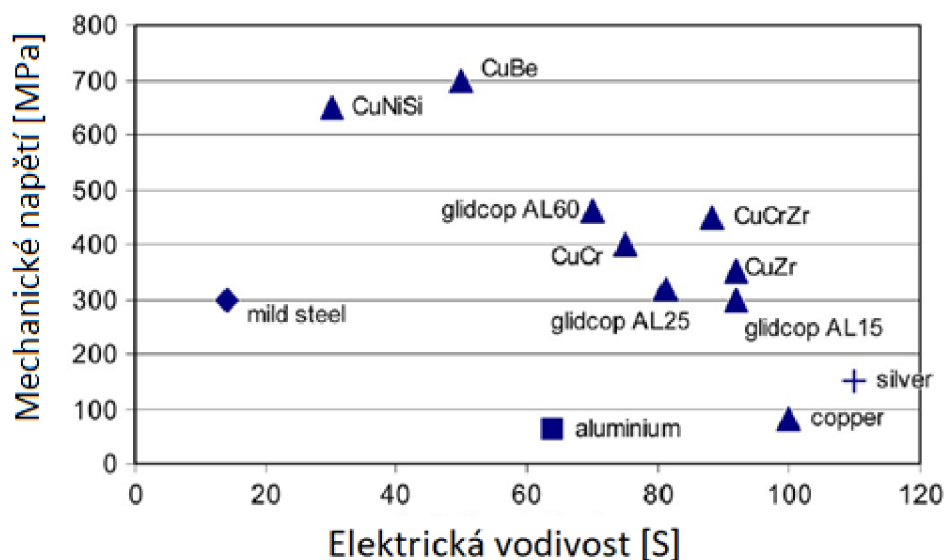
2.2.2 Materiál magnetických částí

Pro výrobu statoru a rotoru se používají různé materiály, avšak nejčastěji používané jsou slitiny křemík-železo (SiFe) a kobalt-železo (CoFe). Slitina CoFe umožňuje nejvyšší saturační magnetizaci nad 2 T. Skutečná hodnota saturační magnetizace slitiny CoFe závisí na době žíhání a teplotě žíhání, obecně řečeno čím lepší jsou mechanické vlastnosti žíhaného materiálu, tím je menší saturační magnetizace. Z pohledu porovnání mechanických vlastností slitin je saturační magnetizace asi o 20 % vyšší u CoFe než u slitiny SiFe. Slitina CoFe je výrazně dražší než slitina SiFe.

Dalším důležitým prvkem, na který se hledí při výběru, jsou ztráty v železe. Ztráty v železe jsou děleny na hlavní a dodatečné. Hlavní ztráty se skládají ze ztrát vířivými proudy a ztrát hysterezních, které jsou dány vlastnostmi použitého magnetického materiálu. Hysterezní ztráty jsou způsobeny přemagnetováním materiálu a ztráty vířivými proudy jsou ovlivněny plochou materiálu. Dodatečné ztráty jsou způsobeny kmitáním magnetického pole, které je vyvoláno vlivem nerovnoměrnosti vzduchové mezery způsobené drážkováním.

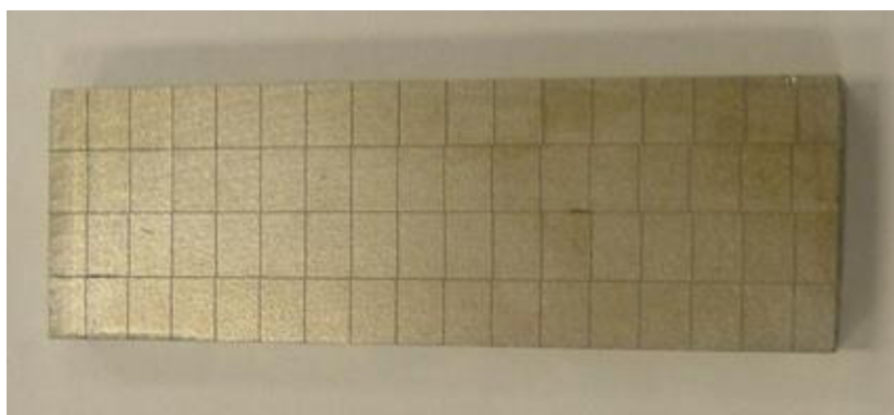
Poměrně často využívané oceli M270 – 35A a M235 – 35A s tloušťkou 0,35 mm slitiny SiFe se používají v trakčních strojích. Ve vysokootáčkových strojích se používají tenčí plechy ze slitiny SiFe, než je výška 0,35 mm. Používají se NO20 a Arnon7, kde se jejich tloušťka pohybuje v rozmezí od 0,17 mm do 0,2 mm.

U výběru materiálu pro rotorové tyče a spojovací kruhy se klade velký důraz na kvalitu. U vybraných materiálů je vyžadována velká odolnost proti vysokým teplotám, protože tyče kromě mechanické funkce zajišťují i vedení proudu a také elektromagnetickou funkci. Tyče zajišťují větší stabilitu rotoru a tím pomáhají odolat vyšším rychlostem stroje. Pro výrobu tyčí a kruhů se nepoužívá čistá měď, protože při vysokých teplotách se pomalu taví. Na obr. 2-3 je ukázáno několik různých slitin mědi s vysokou pevností. Graf mapuje různé materiály, které jsou uvažovány pro rotorovou klec z hlediska dvou nejdůležitějších parametrů při vysoké rychlosti (mechanické napětí a elektrická vodivost materiálu). Slitiny mědi mohou být ještě doplněny jinou slitinou, ale tato úprava je již velký zásah do struktury slitiny a může mít za následek významnou ztrátu vodivosti.



Obr. 2-2 Slitiny pro rotorovou klec [4]

Při vysoké rychlosti jsou namáhány i permanentní magnety. Pro snížení ztrát v rotoru se používají segmentové magnety. Permanentní magnety vysokootáčkových strojů mohou být složeny buď ze slitiny SmCo (Samarium-Cobalt) nebo z neodymových magnetů, přesněji NdFeB, které jsou směsí neodymu, železa a boru. Tyto magnety nabízejí nejlepší poměr ve srovnání užitečných vlastností a ceny. NdFeB magnety jsou v současné době nejsilnějším typem magnetu s vynikajícími magnetickými vlastnostmi a největší vnitřní energií. Nevýhodou magnetů je že snadno korodují a mají malou teplotní odolnost oproti magnetům samarium-kobalt. Proti korozi magnetů se provádí ochrana povrchu doplňkovým plastovým povrstvením [4].



Obr. 2-3 Segmentové magnety [4]

3 VYSOKOOTÁČKOVÝ SYNCHRONNÍ STROJ

Synchronní elektrický stroj se řadí mezi elektrické točivé stroje. Stroje se dělí na synchronní motory, synchronní kompenzátory a synchronní generátory tzv. alternátory. Elektrická energie dodávaná do distribuční sítě se získává ze synchronních generátorů. Synchronní kompenzátor se používá ke zlepšení účinníku v síti. Svůj název mají odvozený od toho, že se jejich rotor otáčí stejnou (synchronní) rychlostí jako točivé magnetické pole statoru. Synchronní stroje se převážně používají pro výrobu elektrické energie. V současnosti se používají jako zdroje elektrické energie u letadel a v elektrocentrálách. Nevýhodou stroje je, že se při přímém připojení na síť sami z klidu nerozběhnou.

3.1 Vysokootáčkový synchronní stroj s permanentními magnety

Vysokootáčkové synchronní stroje s permanentními magnety patří mezi kategorie moderních strojů. Vhodné použití těchto strojů je v nízkoenergetických vakuových čerpadlech a v kompresorech. Obecně mohou být použity v průmyslových aplikacích. Vysokootáčkové stroje nabízí velkou řadu výhod, např. vysoká účinnost systému, ale hlavně umožňuje přímé propojení mezi elektrickou a pracovní částí bez použití převodovky. Díky této výhodě volí tento stroj výrobci turbín, dmýchadel, obráběcích strojů a plynových kompresorů za poslední desetiletí. Roste více projektů mezi akademickou obcí a průmyslem. Obecně není nikde uvedený přesný postup návrhu vysokootáčkového synchronního stroje s permanentními magnety, protože každý stroj je navržen podle konkrétních požadavků zadavatele [4].

Pro řízení strojů s permanentními magnety, které dosáhnou 60000 až 70000 min⁻¹, lze použít standardní řízení synchronních strojů a v jednodušších případech metodu elektronické komutace, které vycházejí z vyhodnocování šesti poloh rotoru stroje za jednu otáčku ve spojení s obdélníkovým formováním napětí a proudů ve fázích. Pro větší kvalitu řízení se používají metody založené na principu vektorové regulace momentu se sinusovou šířkově pulzní modulací. Pro řízení strojů, které dosahují řádově stovek tisíc min⁻¹, lze použít jednoduchou metodu frekvenčního řízení bez zpětné vazby podle kritéria $U/f = \text{kont.}$ Tato metoda se nejčastěji používá pro řízení vysokootáčkových asynchronních strojů a je principiálně použitelná pro synchronní stroje, avšak stroje, které nemají tlumící vinutí, způsobuje kmity rotoru okolo rovnovážné polohy. Výhodnější je použít řízení vysokootáčkového pohonu s implementovanou stabilizací, tj. metoda, který využívá informace o činném výkonu stroje. Tato metoda může být použita ve dvou variantách – bez zpětnovazební regulace proudu a se zpětnovazební regulací proudu [14].

3.2 Stator

Stator synchronního stroje se do větší míry podobá statorům ve strojích asynchronních. Ve statoru jsou vytvořeny drážky pro vinutí, které je nejčastěji třífázové. Konstrukce statoru je tvořena svazkem vzájemně izolovaných plechů. Návrh statoru u stroje s permanentními magnety se většinou navrhuje obdobně jako u jiných točivých strojů, kde jsou rozhodující vlastnosti plechů. Avšak v praxi je rozhodující, zda motor bude navrhnout nákladnějším způsobem, nebo méně nákladným. Dražší způsob spočívá v tom, že se vytvoří zcela nová geometrie plechu s nejlepšími parametry pro daný motor, nebo se použijí již běžně sériově vyráběné plechy. Existuje také i jiná varianta, kdy je stator složen z jednotlivých segmentů. Stator je utvořen kombinací segmentů, které se skládají z jha statoru a statorového zubu, okolo něž je navinuto vinutí.

Statorové plechy točivého stroje jsou tvořeny tenkými vzájemně izolovanými plechy. Typ těchto plechů se musí volit vždy co nejvhodnější, protože každý typ plechu má jiné magnetické vlastnosti a tyto vlastnosti jsou rozhodující. Správně zvolený typ plechů může snížit ztráty vířivými proudy a hysterezní ztráty, anebo aspoň ovlivnit.

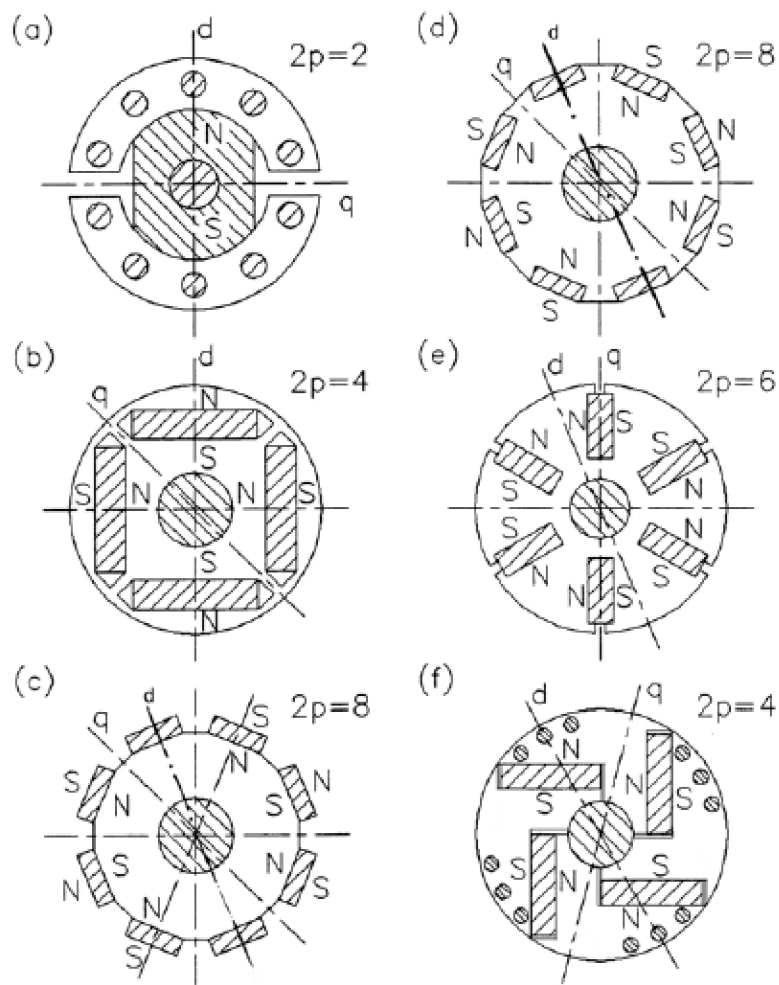
Důležitou součástí je i tvar a velikost jednotlivých geometrických prvků. Je nutné dodržovat minimální velikosti statorových zubů a jeho jha s ohledem na velikost magnetické indukce, aby nedocházelo k přesycení stroje [23].

3.3 Rotor

U synchronního stroje může být rotor proveden, buď jako hladký rotor nebo rotor s vyniklými póly. Rotor s vyniklými póly se používá u pomaloběžných strojů s požadavkem na velký moment a hladký rotor se používá u rychloběžných strojů s vyšším poměrem rotorové délky ku průměru rotoru. U synchronních strojů s permanentními magnety mohou být magnety uloženy na povrchu nebo vnořeny do geometrie rotoru. Rotor u těchto strojů může být složen z dynamových plechů nebo z plného materiálu. Výhodou těchto strojů je, že rotorové jho už nebývá natolik sycené, aby velikost magnetické indukce v rotorovém jhu představovala takový problém. Existují dva typy provedení rotoru – vnější a vnitřní rotor [23].

Provedení rotorů se dá rozdělit i podle uložení magnetů. Mohou být děleny na základě provozních vlastností, požadovaném průběhu indukovaného napětí a lepším tvarováním magnetů se může docílit lepší vlastností. Magnety se dají umístit buď na povrch rotoru, anebo mohou být vloženy pod povrch rotoru. Ve speciálních případech mohou být magnety různě prostorově pootočený. Z jakého materiálu se skládají magnety je pojednáváno již v kap. 2.2.2. Existují dva technologické postupy umístování magnetů na rotor. První možností je umístění

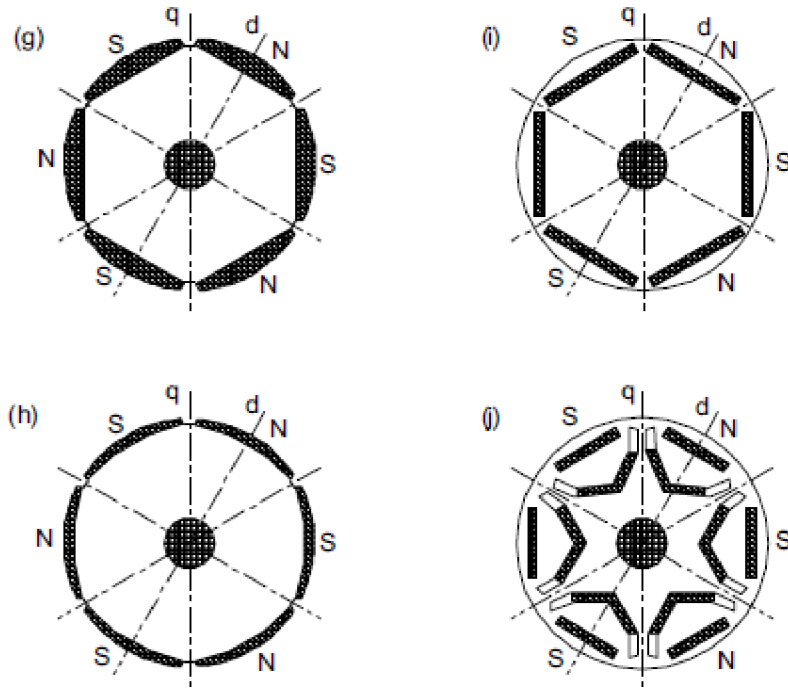
magnetů v nezmagnetizovaném stavu a až poté je zmagnetovat. Druhou možností je usadit magnety na rotor už zmagnetované. Tento způsob je komplikovaný z hlediska působení magnetických sil. Takové usazování se používá při malosériové výrobě. Konstrukčně nejjednoduššími a nejčastějšími jsou stroje v permanentními magnety na povrchu. Výhodou tohoto uspořádání je, že magnetický tok není ovlivňován žádným materiálem mezi permanentními magnety a vzduchovou mezerou. Nevýhoda uspořádání je malá mechanická pevnost, kterou lze vylepšit bandáží nasazenou na povrchu magnetů a chránit magnety proti mechanickým vlivům. Rotor s magnety uvnitř je má uloženy v mělkých drážkách. Tento způsob uložení je mechanicky pevnější než předešlý způsob, kde jsou magnety uloženy na povrchu rotoru. Toto uložení chrání magnety proti odstředivým silám, ale indukované napětí motoru je nižší z důvodu většího rozptylového magnetického toku do železa rotoru než při použití varianty uložených magnetů na povrchu rotoru. Uložené magnety uvnitř rotoru jsou náročnější na výrobní proces v porovnání s ostatními rotory.



Obr. 3-1 Uspořádání rotoru pro synchronní stroj s permanentními magnety - část 1 [18]

Rotory s permanentními magnety synchronních strojů mohou mít tato uspořádání [18]:

- Klasické uspořádání s dvěma póly (rotor F. Mirrella, patent US2543639 přidělený společnosti General Electric) (obr. 3-1 a)
- Rotor s vnitřním magnetem – čtyřpólové uspořádání (obr. 3-1 b)
- Rotor s povrchovým magnetem – osmipólové uspořádání (obr. 3-1 c)
- Rotor s vloženým magnetem – osmipólové uspořádání (obr. 3-1 d)
- Rotor s vloženými magnety symetricky rozloženými – šestipólové uspořádání (obr. 3-1 e)
- Rotor s vloženými magnety asymetricky rozloženými (patent German 1173178 přidělený společnosti Siemens) - rotor nazývaný také „Siemosyn“ (obr. 3-1 f)
- Rotor s magnety uspořádanými jako tzv. na bochník chleba (obr. 3-1 g)
- Rotor s tzv. kulatými magnety (obr. 3-1 h)
- Rotor s vloženými šesti magnety (obr. 3-1 i)
- Rotor s vloženými dvouvrstvými magnety (skládané magnety) (obr. 3-1 j)



Obr. 3-2 Uspořádání rotoru pro synchronní stroj s permanentními magnety - část 2 [18]

Nejjednodušší provedení z výrobního hlediska splňují magnety na povrchu rotoru. Zásadní problém je, že vyžadují přísné podmínky mechanické pevnosti. Tento problém se řeší bandáží, která pomáhá držet magnety. Takové uspořádání se zatím velice málo používá u vysokootáčkových strojů. Výhodou tohoto uspořádání je, že se dosáhne vysoké magnetické indukce ve vzduchové mezeře. Tvar magnetů na povrchu rotoru může být všelijaký, např. obdélníkový, bochníkový atd.

Druhý způsob uložení magnetů je vložení magnetů do drážek rotoru, které jsou již vytvořeny právě pro tyto magnety (obr 3-1 d). Toto provedení vytváří hladký rotorový povrch, který snižuje ztráty způsobené třením. Nevýhodou toho uspořádání je větší podíl rozptylu magnetického toku a provedení se používá pro servopohony.

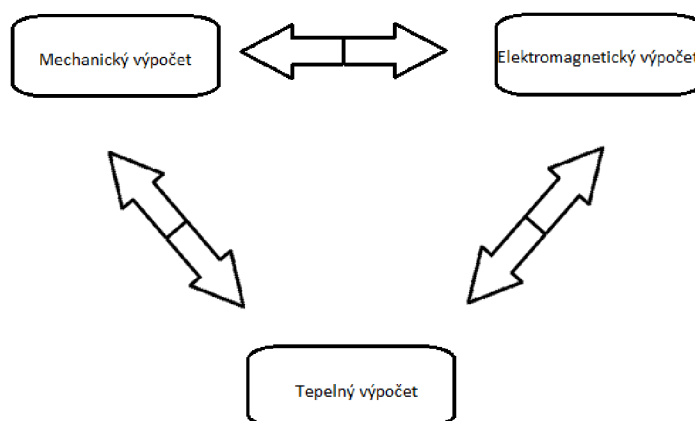
Rotor s vnořenými magnety (obr. 3-1 e) má magnety uloženy hlouběji oproti rotoru se zapuštěnými magnety. Tvar a natočení magnetů závisí na požadavcích konstruktéra. Výhoda tohoto provedení, že má nejlepší mechanickou odolnost. Toto uložení je nejvhodnější pro vysokootáčková aplikace. Nevýhodou je složitější výroba.

Při návrhu hraje velkou roli i výběr materiálu, z čeho bude tvořen permanentní magnet. Při výběru materiálu jsou rozhodující tři parametry, na které se uživatel většinou dívá. Je to remanentní indukce B_r , koercitivní síla H_c a teplotní odolnost. Remanentní indukce charakterizuje zbytkovou magnetizaci, kterou si feromagnetický materiál uschová po předešlém působení vnějšího magnetického pole. Koercitivní síla vyjadřuje určitou odolnost daného feromagnetického materiálu vůči demagnetizačním polím, která se v jeho okolí mohou vyskytnout [24]. V dnešní době se permanentní magnety mohou vyrábět z těchto materiálů:

- Magnety ze slitiny Samarium-Cobalt (SmCo)
- Magnety z neodymových materiálů
- Magnety na bázi keramických oxidů

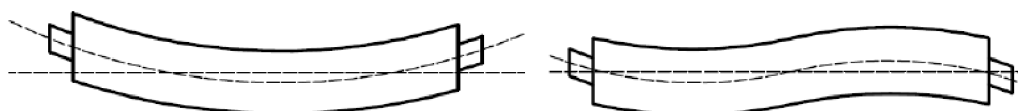
3.4 Kritické oblasti návrhu stroje

Maximální otáčky stroje jsou omezovány několika parametry a konstruktér musí při návrhu stroje plnit několik požadavků. Tyto parametry jsou kritické otáčky, mechanické namáhání a teplota. Uvedené parametry nejsou závislé jenom na výkonu a otáčkách, ale i na velikosti stroje, elektrickém a magnetickém zatížení. Všechny tyto problematické části ovlivňují volbu materiálu a rozměry stroje. Každý požadavek má své vhodné řešení a návrh stroje se musí provádět ve vzájemné interakci [2].



Obr. 3-3 Topologie procesu

Kritické otáčky omezují maximální délku rotoru. Kritické otáčky nastávají tehdy, když dosáhnou hodnoty jedné z mechanických rezonančních frekvencí. Tyto otáčky způsobují dva typy deformací. První možnost nastane tehdy, když stroj dosáhne nejnižších kritických otáček a dojde k ohnutí rotoru ve dvou uzlech. Druhá možnost nastane tehdy, když rotor dosáhne druhé kritické rychlosti a dojde k ohnutí rotoru stroje ve třech uzlech. Stroj může pracovat pod prvními otáčkami, nebo mezi kritickými otáčkami, což má za následek zmenšení oblasti pracovních otáček. Poměr délky rotoru ku průměru je volen tak, aby motor mohl pracovat pod prvními kritickými otáčkami [1] [2].



Obr. 3-4 Deformace rotoru stroje pro první (zleva) a druhou (zprava) možnost ohnutí

Tepelné namáhání je limitující problém pro veškeré stroje. Tepelné chování stroje se projevuje na velikosti a ztrátách stroje. Největší důraz je kladen na velkou hustotu výkonu, což má za následek ovlivnění velikosti stroje. Při velké hustotě výkonu je kladen důraz na chlazení stroje. Maximální oteplení stroje je omezováno maximální teplotou vinutí a maximální teplota je určena podle třídy izolace. Při práci vysokootáčkového stroje mají největší vliv na výkon stroje ztráty v železe a ztráty mechanické. U vysokootáčkových strojů jsou většinou menší ztráty v mědi statoru z důvodu menšího odporu vinutí oproti konvenčně vyráběným strojům. Obecně ale platí, že u standartních strojů jsou menší celkové ztráty než u vysokootáčkových. Jsou dvě možnosti, jak snížit ztráty v železe. První možnost je použití tenčích nízko ztrátových plechů. U těchto strojů se používají plechy o tloušťce 0,35 mm a menší,

tzn. čím menší plechy budou použity, tím menší budou ztráty v železe. Druhá možnost je zmenšení magnetické indukce ve jhu a zubech statoru. Magnetická indukce bývá u vysokootáčkových strojů výrazně menší než u běžně vyráběných strojů. Ztráty třením jsou závislé na obvodové rychlosti a průměru rotoru, a proto je lepší používat dlouhé štíhlé rotory, kde je jejich délka ale limitována kritickými otáčkami [1] [13].

Při návrhu stroje se musí brát v úvahu působení odstředivé síly na rotor. Musí se dbát na to, aby všechny mechanicky namáhané části rotoru byly pod hranicí maximálního dovoleného namáhání použitých materiálu v rotoru. Rotor musí být odolný vůči mechanickému namáhání (odstředivé síle), která je závislá na otáčkách a vzniká, když se rotor otáčí kolem své axiální osy. Při určitých otáčkách dosáhne mechanické namáhání určité hodnoty, a potom dojde k destrukci materiálu, které je již nezvratné [13].

3.5 Srovnání vysokootáčkového asynchronního a synchronního stroje

Hlavní rozdíl mezi těmito stroji je jejich výskyt použití. Oproti vysokootáčkovým synchronním strojům se častěji používaly vysokootáčkové asynchronní stroje, avšak průmysl se stále vyvíjí a tím i výzkum těchto strojů, a proto se začínají čím dál více na trhu vyskytovat synchronní stroje.

Vysokootáčkové asynchronní stroje se uplatňují převážně díky své jednoduchosti, robustnosti a tepelné odolnosti. Tyto motory se vyrábí převážně s klecí nakrátko nebo plným rotorem. Pro vysoké obvodové rychlosti se používají stroje s plným rotorem, protože mají mohutnou sestavu. Nevýhodou je, že tyto motory jsou zatíženy vysokými rotorovými ztrátami způsobenými vířivými proudy, které jsou úměrné druhé mocnině frekvence. Pro nižší obvodové rychlosti se používá druhý typ [15].

Vysokootáčkové synchronní stroje s permanentními magnety dosahují vyšší hustoty výkonu a vyšších účinností. Nevýhodou těchto strojů jsou malé obvodové rychlosti. Díky používání magneticky tvrdých materiálů ze speciálních slitin (viz. kap. 2.2.2) na permanentní magnety se při výrobě magnetů synchronních strojů výrazně zmenší rozměry oproti strojům asynchronním pro stejný výkon a otáčky. Zmenšení bývá většinou až trojnásobné. Optimální řešení pro minimalizaci rozměrů a hmotnosti stroje je určeno podle kritických oblastí. Další rozdíl mezi těmito motory je v maximálních otáčkách.

Zásadní vlastnosti při návrhu konstrukce vysokootáčkového stroje [14]:

- Požadavky na mechanickou pevnost a vyvážení rotoru – u synchronních strojů s permanentními magnety je komplikovanější skrz bandáž magnetů
- Vysokootáčkové motory (hlavně asynchronní motory) se dodávají v tzv. vestavném provedení – motor se montuje jako uživatelská integrace do poháněného zařízení
- Častý problém s provedením mechanických vazeb, a proto je rotor řešen většinou se společnou hřídelí
- Čím větší jsou jmenovité otáčky motoru, tím menší je jmenovitý moment
- S rostoucími otáčkami a frekvencí výrazně rostou mechanické ztráty a ztráty v železe
- Pro napájení se používají vysoké spínací frekvence šířkově pulzní modulace měniče

4 ANALYTICKÝ NÁVRH STROJE

4.1 Úvod

Analytický návrh stroje se používá pro výpočet důležitých parametrů, které jsou tzv. odrazovým můstkem pro výrobu zkušebního stroje a slouží také pro lepší představu návrhářům. V současné době existuje několik obecných postupů pro návrh elektrických strojů. Každá varianta na návrh pohlíží z jiného hlediska a má svůj speciální postup návrhu. Každý postup výpočtu parametrů se snaží docílit, co nejpřesnějších výsledků. Při řešení skutečného elektrického stroje se nerespektují obvykle všechny podrobnosti, ale používají se zjednodušené postupy. Vypočítané parametry a veličiny se nemohou brát jako konečné. Veškeré nedostatky výpočtu se odstraňují ve zkušebnách až při zkušebním provozu. V praxi se používají korekční faktory, které mají výsledek co nejvíce přiblížit požadovaným hodnotám, aby se odstranily nedostatky výpočtů [7].

Tato kapitola je zaměřena na analytický návrh vysokootáčkového synchronního stroje s permanentními magnety. Půjde o základní výpočet hlavních parametrů stroje, jež budou dále použity pro analýzu zkoumaného stroje v programu RMXprt a následně Maxwell 2D.

4.2 Analytický výpočet

Výpočet se zaměřuje na geometrický návrh magnetického obvodu, celkový magnetický návrh a návrh vinutí. Nebudou se detailně řešit strojírenské problémy (materiálové pevnostní výpočty, ložiska atd.). Vstupní parametry dodané zadavatelem pro návrh stroje jsou následující:

- Jmenovitý moment: $M_n = 1942 \text{ Nm}$
- Jmenovité otáčky: $n_n = 15000 \text{ min}^{-1}$
- Výkon: $P = 3000 \text{ kW}$
- Prvotní odhad – vnější průměr svazku statoru: $D_{vnej} = 700 \text{ mm}$
- Prvotní odhad – vnitřní průměr svazku statoru: $D_{vnit} = 420 \text{ mm}$
- Vnější průměr rotoru: $D_r = 415 \text{ mm}$
- Vzduchová mezera: $l_\delta = 2,5 \text{ mm}$
- Prvotní odhad – axiální délka stroje: $l = 435 \text{ mm}$
- Proud stroje: $I = 295 \text{ A}$
- Napájecí napětí: $U_n = 7 \text{ kV}$
- Indukované napětí: $U_i = 4,04 \text{ kV}$

4.2.1 Rozměry rotoru

Vstupní parametry stroje jsou pouze hrubý prvotní odhad dodaný zadavatelem, od kterého se odvíjí návrh stroje. Postup návrhu elektrického stroje musí být zvolen vhodně již na začátku, protože správně zvolená postup má zásadní vliv na spolehlivost stroje. Při návrhu vysokootáčkového stroje musí návrhář brát ohled na kritické oblasti při návrhu stroje, které jsou stěžejní pro funkčnost stroje. Správně navržený stroj musí vyhovět mechanickým, elektromagnetickým a tepelným nárokům. Vzhledem k těmto požadavkům jsou často vysokootáčkové stroje na hranici technických a technologických možností. Celý návrh vypadá jako iterační proces. Při návrhu synchronního stroje hraje roli hodně faktorů, jako třeba volba uspořádání permanentních magnetů. Vysokootáčkový stroj se bude navrhovat s permanentními magenty na povrchu, ale existuje i řada jiných uspořádání, např. rotor s válcovým magnetem v rotoru nebo rotor s permanentními magenty na povrchu v Halbachově uspořádání. Při výpočtu vysokootáčkového stroje se začíná návrhem rozměrů rotoru a určení empirických hodnot mechanické konstanty a tangenciálního napětí [16].

V současné době nejsou nikde definované vhodné hodnoty mechanické konstanty a tangenciálního napětí, takže se musí prozatím vycházet z hodnot strojů, které už byly zrealizované a porovnávat s vypočtenými hodnotami. Vypočtené hodnoty budou porovnávány s hodnotami z publikace [17], kde je 6 vzorků motoru od 20 MW po 100 kW. V tab. č. 1 jsou veškeré známé údaje o vzorcích z publikace a tabulka bude průběžně doplněna o vypočítané hodnoty počítaného stroje.

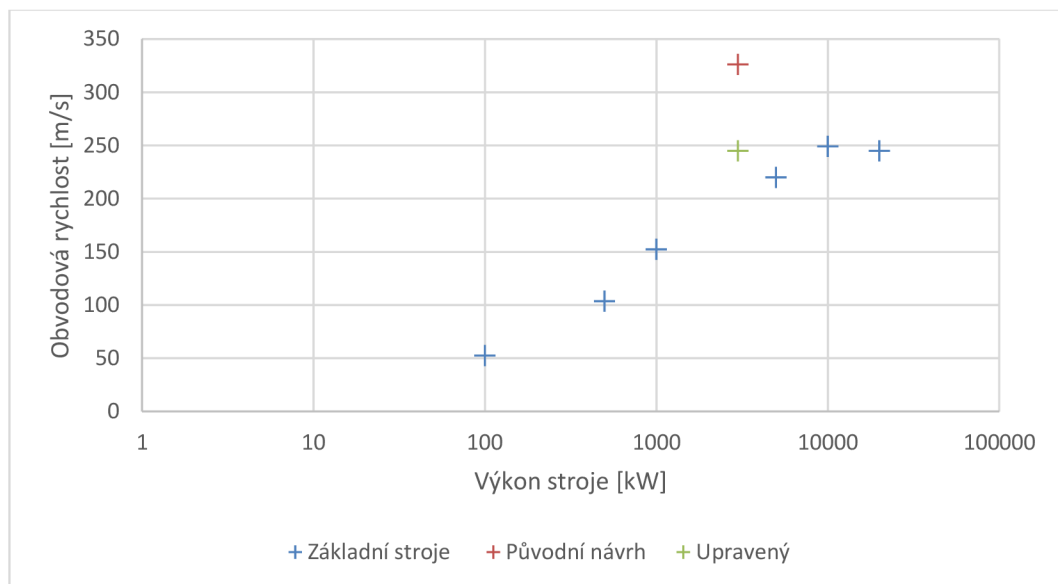
Tab. 1 - Srovnání zrealizovaných vzorku [17]

Výkon stroje [MW]	20	10	5	1	0,5	0,1
Délka rotoru [m]	1,3	0,7	0,5	0,3	0,2	0,1
Vnější průměr statoru [m]	0,7	0,6	0,6	0,4	0,3	0,2
Poměr průměru rotoru ku délce stroje	0,36	0,68	0,84	0,97	0,99	1
Vnější průměr rotoru [m]	0,468	0,476	0,42	0,291	0,198	0,1
Výška PM [mm]	7,7	8,2	5,1	1,3	0,8	0,2
Hmotnost PM [kg]	185	105	55	13	8	2
Magnetická indukce v mezeře [T]	0,4	0,4	0,5	0,5	0,5	0,5
Účinnost [%]	94	92	87	84	86	84
Mechanická konstanta [kWs/m ³]	7,024	6,305	5,669	3,936	6,377	10
Tangenciální napětí [kPa]	42,7	38,33	34,46	23,93	38,77	60,79
Moment [Nm]	19098	9549	4774	954	477	95
Obvodová rychlost [m/s]	245	249	219	152	1003	52

Pro výpočet zmíněných konstant je potřeba, ještě před jejich výpočtem určit jiné důležité veličiny. Při návrhu stroje je podstatné dodržet několik omezujících faktorů, aby stroj mohl správně fungovat. Podle literatury [17] je první omezující faktor při návrhu rotoru obvodová rychlost. Obvodová rychlost stroje by neměla přesáhnout 250 ms^{-1} . V tomto případě byla zvolena obvodová rychlost

$$v = 245 \text{ ms}^{-1}, \quad (4.1)$$

na které jsou závislé výpočty vzduchové mezery a průměr rotoru. Tato velikost byla zvolena proto, aby se při výpočtu průměru rotoru a poměru vnějšího průměru rotoru ku délce rotoru dodrželo rozmezí daných veličin v tab. 1. Při návrhu stroje se budou, pokud možno počítané parametry, které jsou uvedeny v tab. 1, pohybovat v rozmezí hodnot strojů pro 5 MW a 1 MW. Dané rozmezí je voleno záměrně, protože zvolené stroje již byly odsimulované a výsledky byly vyhovující.



Obr. 4-1 Srovnání obvodové rychlosti motorů

Délka vzduchové mezery

$$l_{\delta} = A + \frac{D_r}{B} + \frac{v}{C} = 0,7 + \frac{312}{100} + \frac{246}{600} \quad (4.2)$$

$$l_{\delta} = 4,23 \text{ mm},$$

kde D_r je průměr rotoru (výpočet znázorněn v dalším průběhu práce), v je obvodová rychlost stroje a písmena A, B a C jsou konstanty a dle [16] a [18] mohou být voleny v tomto rozmezí

- A – konstanta volená v rozmezí 0,7 mm až 1,5 mm,
- B – konstanta volená v rozmezí 50 mm až 100 mm
- C – konstanta volená v rozmezí 300 ms⁻¹ až 600 ms⁻¹

Zvolené konstanty ve vzorci 4.2 jsou voleny dle vypočtené vzduchové mezery z již odzkoušeného stroje o výkonu 20 MW [17]. Vzduchová mezera by se u vysokootáčkových strojů podobného výkonu měla pohybovat mezi 4 mm až 5 mm.

Pro ověření správné velikosti vzduchové mezery, lze vypočítat minimální délku mezery

$$l_{min} = 0,0002 + 0,003 \sqrt{\frac{D_r \cdot l}{2}}$$

$$l_{min} = 0,0002 + 0,003 \sqrt{\frac{312 \cdot 374}{2}} \quad (4.3)$$

$$l_{min} = 0,93 \text{ mm},$$

kde D_r je průměr rotoru a l je axiální délka stroje, kde výpočet délky je znázorněn v dalším průběhu práce [17].

Průměr rotoru

$$D_r = \frac{v \cdot 60}{\pi \cdot n} = \frac{245 \cdot 60}{\pi \cdot 15000} = 312 \text{ mm}, \quad (4.4)$$

kde v je obvodová rychlost stroje a n jsou otáčky stroje [16]. U vysokootáčkových strojů je ideální, aby průměr rotoru nepřesáhl průměr 0,5 m [17].

Tangenciální napětí bylo zvoleno v rozmezí, dle tab. 1

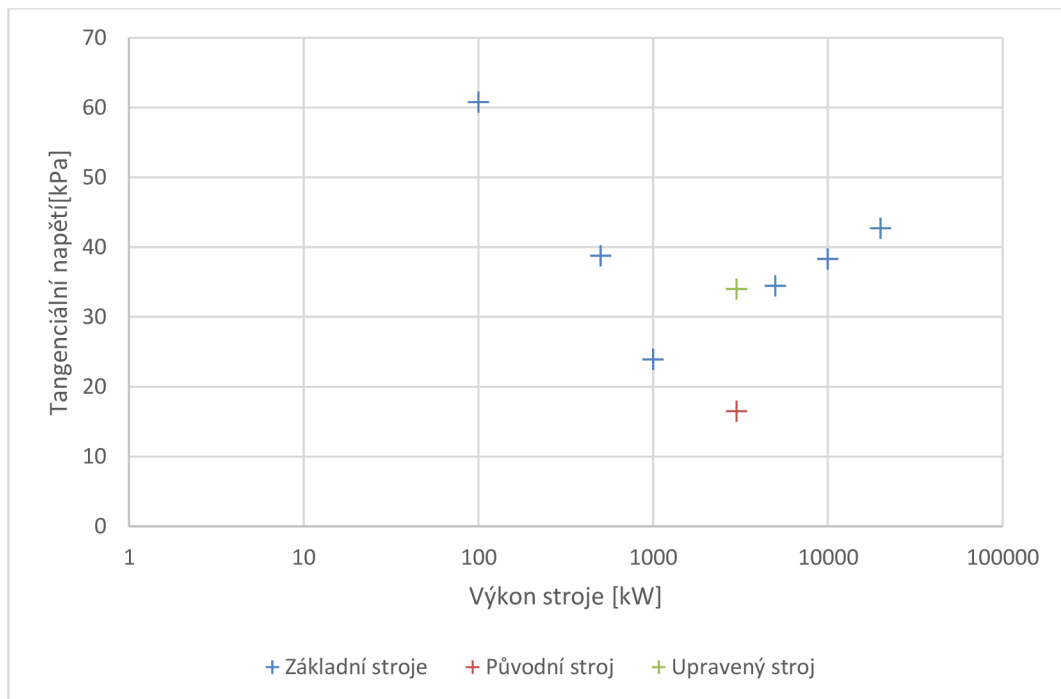
$$\sigma_{tan} = 34 \text{ kPa} \quad (4.5)$$

Na základě zvoleného tangenciálního napětí, lze ze vzorce pro napětí vypočítat délku stroje

$$l = \frac{\sigma_{tan}}{2 \cdot M \cdot (\pi \cdot r^2)} = \frac{34\,000}{2 \cdot 1942 \cdot (\pi \cdot 0,156^2)} \quad (4.6)$$

$$l = 374 \text{ mm}$$

kde σ_{tan} je tangenciální napětí, M je moment motoru a r je poloměr rotoru [16].



Obr. 4-2 Srovnání tangenciálního napětí motorů

Poměr průměru rotoru ku délce rotoru

$$p = \frac{D_r}{l} = \frac{312}{374} = 0,84 [-], \quad (4.7)$$

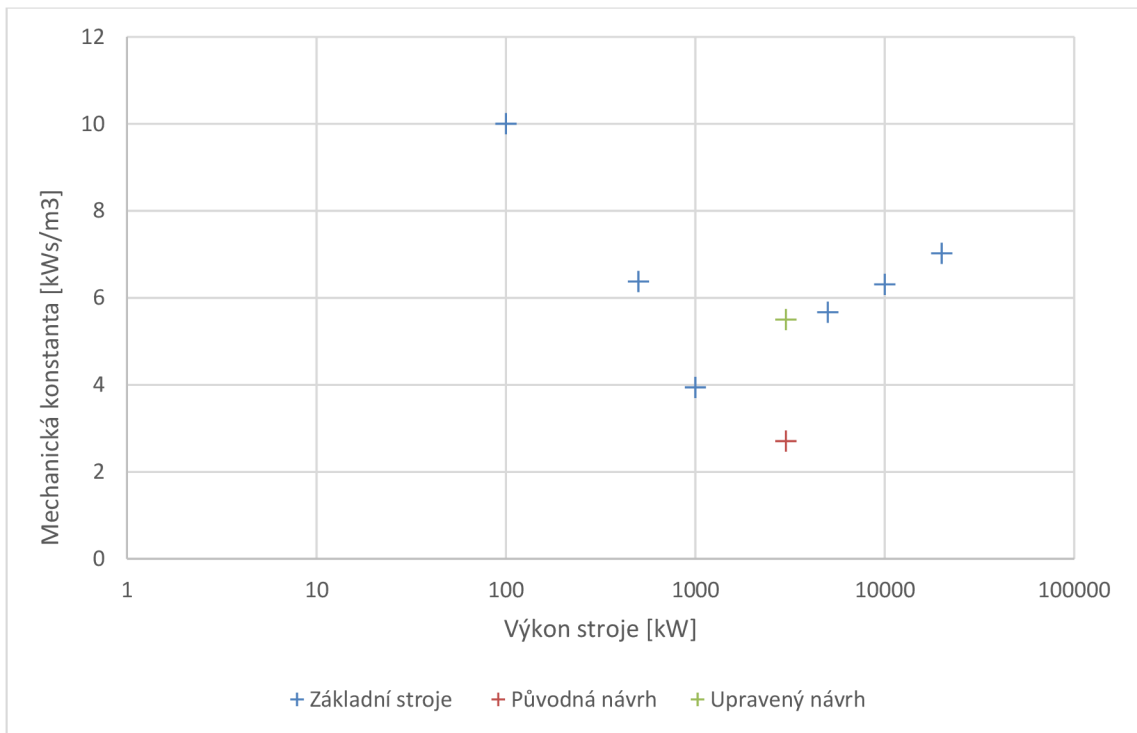
kde D_r je průměr rotoru a l je délka rotoru. Musí být zvolena vhodná velikost poměru, protože tento poměr silně ovlivňuje moment a účinnost navrhovaného motoru.

Mechanická konstanta

$$C_{mech} = \frac{P}{D_r^2 \cdot l \cdot n} = \frac{3000}{0,312^2 \cdot 0,374 \cdot 15000} \quad (4.8)$$

$$C_{mech} = 5,5 \text{ kWsm}^{-3},$$

kde P je výkon motoru, D_r je průměr rotoru, l je délka rotoru a n jsou otáčky stroje.



Obr. 4-3 Srovnání mechanické konstanty motorů

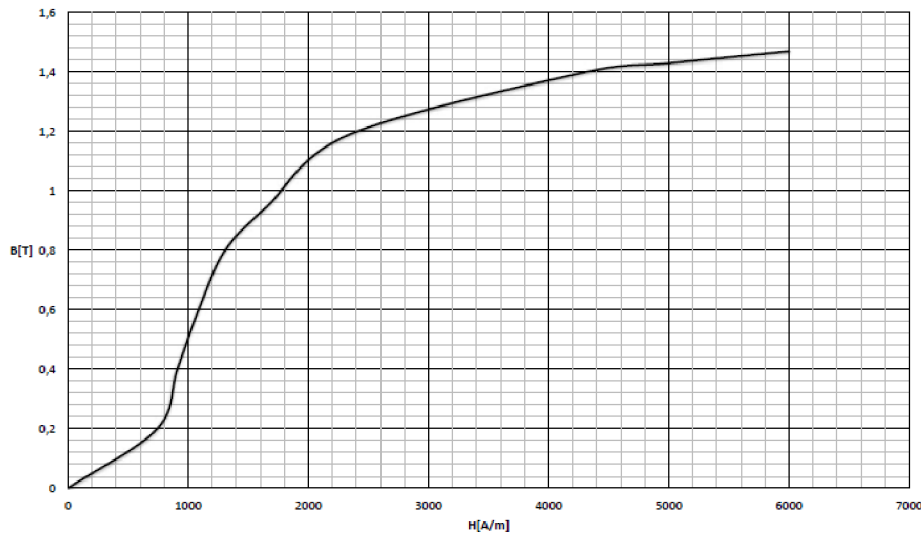
Objem rotoru

$$V_r = \pi \cdot \left(\frac{D_r}{2}\right)^2 \cdot l = \pi \cdot \left(\frac{0,312}{2}\right)^2 \cdot 0,374 \quad (4.9)$$

$$V_r = 0,029 \text{ m}^3,$$

kde D_r je průměr rotoru a l je délka rotoru.

Rotor bude celistvý z plného materiálu s permanentními magnety na povrchu. Bude použita ocel 41CrMo4, která je vhodná pro tuto aplikaci. Tato slitina se používá většinou pro povrchové kalení. Užívá se na velmi namáhané strojní součásti a součásti silničních motorových vozidel, kde se požaduje při vysoké pevnosti i vyšší houževnatosti, zejména hřídele a spojovací součásti.



Obr. 4-4 Magnetizační charakteristika oceli 41CrMo4

Hmotnost rotoru je

$$m_r = V_r \cdot \rho_r = 0,029 \cdot 7850 = 227,65 \text{ kg}, \quad (4.10)$$

kde V_r je objem rotoru a ρ_r je hustota materiálu 41CrMo4.

4.2.2 Rozměry statoru

Pro výpočet rozměrů statoru existuje velké množství analytických výpočtů. V této kapitole budou rozměry statoru počítané dle lit. [18] a [21]. Pro tento stroj je zvolena magnetická indukce v mezeře na 0,5 T.

Magnetická indukce ve vzduchové mezeře stroje

$$B_\delta = 0,5 \text{ T} \quad (4.11)$$

Výstupní koeficient

$$\sigma_p = 0,5 \cdot \pi^2 \cdot k_{w1} \cdot A \cdot B \cdot \cos\varphi \quad (4.12)$$

$$\sigma_p = 0,5 \cdot \pi^2 \cdot 0,96 \cdot 115000 \cdot 0,5 \cdot 1$$

$$\sigma_p = 272401 \text{ VAsm}^{-1},$$

kde k_{w1} je koeficient vinutí, A je lineární proudová hustota, B je magnetická indukce ve vzduchové mezeře a $\cos\varphi$ je účinník stroje. Statorový činitel vinutí k_{w1} pro třífázové, čtyřpólové stroje dosahuje podle typu vinutí většinou 0,96. Lineární proudová hustota pro malé výkonové stroje se pohybuje obvykle okolo hodnoty 10000 Am^{-1} , pro středně veliké výkonové stroje většinou okolo hodnoty 55000 Am^{-1} a pro výkonově veliké stroje většinou okolo hodnoty 110000 Am^{-1} . Hodnota účinníku $\cos\varphi$ je volena podle prvotního odhadu z datasheetu stroje.

Převod otáček za minutu na otáčky za sekundu

$$n = \frac{15000}{60} = 250 \text{ s}^{-1} \quad (4.13)$$

Násobek druhé mocniny vnitřního průměru statoru a délky stroje

$$D_{vnit}^2 \cdot l = \frac{P \cdot \varepsilon}{\sigma_p \cdot n} = \frac{15000 \cdot 0,93}{272401 \cdot 250} = 0,041 \text{ m}^3, \quad (4.14)$$

kde P je výkon stroje, ε je poměr elektromotorické síly k výstupnímu napětí, σ_p je výstupní koeficient a n jsou otáčky stroje za sekundu. ε se volí v rozmezí od 0,6 až 0,95, dle lit. [18].

Vnitřní průměr statoru

$$D_{vnit} = \sqrt{\frac{D_{vnit}^2 \cdot l}{l}} = \sqrt{\frac{0,041}{0,374}} = 0,331 \text{ m}, \quad (4.15)$$

kde $D_{vnit}^2 \cdot l$ násobek druhé mocniny vnitřního průměru statoru a délky stroje a l je délka stroje.

Při volbě počtu pólů se musí brát na zřetel rozteč cívek daného vinutí, praktičnost navíjení a frekvence napájecího napětí. Při zvoleném ručním vsypávání vinutí je zvolena čtyřpólová varianta

$$2p = 4 \quad (4.16)$$

Pólová rozteč

$$\tau = \frac{\pi \cdot D_{vnit}}{2p} = \frac{\pi \cdot 0,331}{4} = 0,26 \text{ m}, \quad (4.17)$$

kde D_{vnit} je vnitřní průměr statoru a $2p$ je počet pólů.

Magnetická indukce v jhu statoru se v prvním analytickém návrhu může pohybovat mezi 1 – 1,5 T [19]. Byla zvolena tato hodnota

$$B_{sjha} = 1,0 \text{ T} \quad (4.18)$$

Výška statorového jha

$$h_{sjha} = \frac{B_{\delta} \cdot \pi \cdot D_{vnit}}{2 \cdot B_{sjha} \cdot 2p} = \frac{0,5 \cdot \pi \cdot 0,331}{2 \cdot 1 \cdot 4} \quad (4.19)$$

$$h_{sjha} = 0,065 \text{ m} = 65 \text{ mm},$$

kde B_{δ} je magnetická indukce ve vzduchové mezeře, D_{vnit} je vnitřní průměr statoru, B_{sjha} je magnetická indukce v jhu statoru a $2p$ je počet pólů stroje [19].

Vnější průměr statoru

$$D_{vnej} = \frac{D_{vnit}}{s_r} = \frac{0,331}{0,55} = 0,602 \text{ m}, \quad (4.20)$$

kde D_{vnit} je vnitřní průměr statoru a s_r (split ratio) je poměr vnějšího průměru rotoru (včetně vzduchové mezery) ku vnějšímu průměru statoru. Tento poměr se používá pro velmi hrubý odhad celkové velikosti statoru. Typická hodnota poměru pro střídavý motor se pohybuje v rozsahu 0,55 - 0,65. Pro spínané reluktanční motory jsou používány spíše menší hodnoty. U stejnosměrných komutátorových

motorů je tato hodnota obvykle o něco vyšší. Lepší způsob, jak získat typické hodnoty, jsou už na zkušenostech návrhového inženýra [20].

Výška statoru

$$h_{stat} = \frac{D_{vnej} - D_{vmit}}{2} = \frac{0,602 - 0,331}{2} \quad (4.21)$$

$$h_{stat} = 0,135 \text{ m} = 135 \text{ mm},$$

kde D_{vmit} je vnitřní průměr statoru a D_{vnej} je vnější průměr statoru.

Výška statorového zubu

$$h_z = h_{stat} - h_{sjha} = 135 - 65 = 70 \text{ mm}, \quad (4.22)$$

kde h_{stat} je výška statoru a h_{sjha} je výška statorového jha.

Prvotní odhad u čtyřpólového stroje je takový, že jsou určeny čtyři drážky na pól a fázi, a proto je počet drážek ve statoru

$$Q = m \cdot q \cdot 2p = 3 \cdot 4 \cdot 4 = 48 \text{ drážek}, \quad (4.23)$$

kde m je počet fází stroje, q je počet drážek na pól a fázi a $2p$ je počet pólů stroje.

Drážkový krok

$$\tau_s = \pi \cdot \frac{D_{vmit}}{Q} = \pi \cdot \frac{0,331}{48} = 0,022 \text{ m} = 22 \text{ mm}, \quad (4.24)$$

kde D_{vmit} je vnitřní průměr statoru a Q je počet drážek statoru.

Zvolená magnetická indukce ve statorovém zubu [21]

$$B_z = 1,1 \text{ T} \quad (4.25)$$

Šířka statorového zubu, která je závislá na požadovaném sycení magnetického obvodu naprázdno, lze vypočítat takto

$$w_t = \frac{B_\delta \cdot \tau_s \cdot l}{B_z \cdot l} = \frac{0,5 \cdot 0,022 \cdot 0,374}{1,1 \cdot 0,374} \quad (4.26)$$

$$w_t = 0,0099 \text{ m} = 9,9 \text{ mm},$$

kde B_δ je magnetická indukce ve vzduchové mezeře, τ_s je drážkový krok, l je délka svazku a B_z je magnetická indukce ve statorovém zubu. Šířka zubu závisí na počtu drážek ve statoru a na použitém magnetickém materiálu statorového plechu. Pokud je uvažována laminace statorových plechů je axiální délka zubu stejná jako délka rotoru. V případě celistvého statoru je axiální délka rotoru větší než axiální délka zubu [21].

Objem zubů

$$V_z = l \cdot \left(h_{stat} - \frac{B_\delta \cdot \pi \cdot D_{vnit}}{2 \cdot B_{sjha} \cdot 2p} \right) \cdot \frac{B_\delta \cdot \pi \cdot D_{vnit}}{B_z} \quad (4.27)$$

$$V_z = 0,374 \cdot \left(0,135 - \frac{0,5 \cdot \pi \cdot 0,331}{2 \cdot 1 \cdot 4} \right) \cdot \frac{0,5 \cdot \pi \cdot 0,331}{1,1}$$

$$V_z = 0,012 \text{ m}^3,$$

kde l je délka svazku, h_{stat} je výška statoru, B_{sjha} je magnetická indukce statorového jha, B_δ je magnetická indukce ve vzduchové mezeře, D_{vnit} je vnitřní průměr statoru a $2p$ je počet pólů stroje.

Objem statorového jha

$$V_{sjha} = \pi \cdot l \cdot \left(\frac{D_{vnej}^2}{4} - \frac{(D_{vnit} + h_z)^2}{4} \right) \quad (4.28)$$

$$V_{sjha} = \pi \cdot 0,374 \cdot \left(\frac{0,602^2}{4} - \frac{(0,331 + 0,07)^2}{4} \right)$$

$$V_{sjha} = 0,059 \text{ m}^3,$$

kde l je délka svazku, D_{vnej} je vnější průměr statoru, D_{vnit} je vnitřní průměr statoru a h_z je výška statorového zubu.

Obvod vnitřní strany statoru

$$O_{vs} = \pi \cdot D_{vmit} = \pi \cdot 0,331 = 1,04 \text{ m}, \quad (4.29)$$

kde D_{vmit} je vnitřní průměr statoru.

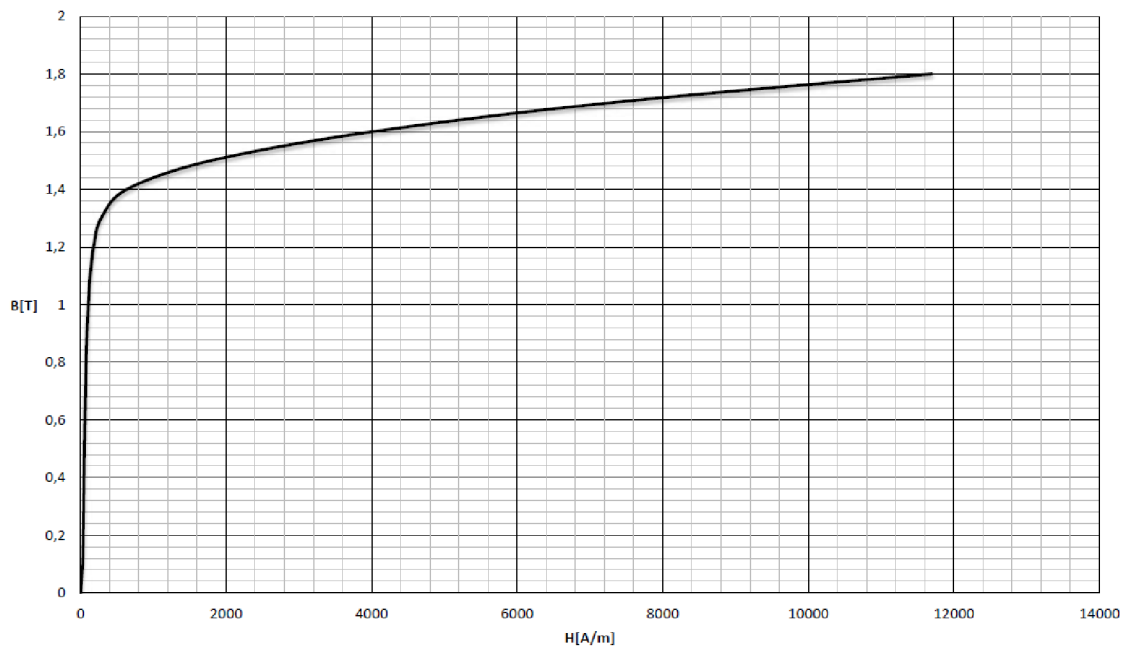
Šířka otevření statorové drážky

$$l_z = \frac{O_{vs} - w_t \cdot Q}{Q} = \frac{1,04 - 0,0099 \cdot 48}{48} \quad (4.30)$$
$$l_z = 0,0118 \text{ m} = 11,8 \text{ mm},$$

kde O_{vs} je vnitřní obvod statoru, w_t je šířka statorového zubu a Q je počet statorových drážek.

V dnešní době existuje mnoho druhů plechů a veškeré informace se vždy zjistí v katalogu od výrobce daného plechu. Hlavně vířivé a měrné hysterezní ztráty se u různých výrobců většinou liší, a proto použití neznámého materiálu může být pro výrobce docela riskantní. Většinou platí, že čím tenčí plech, tím menší vířivé ztráty. Vířivé ztráty se vypočítají ze vztahu zahrnující měrný odpor daného materiálu [6].

Svazek statoru bude složen z dynamového plechu M235-35A od firmy SURA (švédská firma Surahammar Bruk z roku 2008).



Obr. 4-5 Magnetizační charakteristika plechu M235-35A

Hmotnost statorového jha

$$m_{sjha} = V_{sjha} \cdot \rho_{M235} = 0,059 \cdot 7800 \quad (4.31)$$

$$m_{sjha} = 460,2 \text{ kg},$$

kde V_{sjha} je objem statorového jha a ρ_{M235} je hustota plechu M235-35A.

Hmotnost statorového zubu

$$m_z = V_z \cdot \rho_{M235} = 0,012 \cdot 7800 \quad (4.32)$$

$$m_z = 93,6 \text{ kg},$$

kde V_z je objem statorového zubu a ρ_{M235} je hustota plechu M235-35A.

4.2.3 Rozměry permanentních magnetů

Permanentní magnety jsou důležitou součástí strojů a mají za úkol nahradit budící vinutí. Při návrhu stroje s permanentními magnety je tato část jedna z nejdůležitějších. Využití PM u synchronních strojů vzrostlo až s vývojem materiálů na bázi vzácných zemin. Při použití magnetů místo budícího vinutí se ztrácí možnost řídit toto pole, avšak dnešní pokrok ve výkonové elektronice a další prvky z této oblasti právě u těchto strojů umožňují demagnetizaci, tzn. řešení, jak řídit budící pole.

V této kapitole bude ukázán návrh permanentních magnetů dvěma způsoby. První návrh bude proveden dle [18] a následně bude provedena kontrola výpočtu PM podle [22].

Efektivní hodnota pólového krytí

$$b_p = \tau \cdot \alpha_i = 0,26 \cdot 0,5 = 0,13 \text{ m}, \quad (4.33)$$

kde τ je pólová rozteč a α_i je obloukový koeficient. Předpokládá obloukový koeficient $\alpha_i = 0,5$ dle [18].

Koeficient c_a je

$$c_a = 1 - \frac{d_p}{l_\delta} = 1 - \frac{0,5}{4,23} = 0,88, \quad (4.34)$$

kde l_δ je délka vzduchové mezery a d_p je koeficient, který má být zhruba osmkrát menší než vzduchová mezera.

Tvarový faktor v d - ose je

$$k_{fd} = \frac{1}{\pi} (\alpha_r \cdot \pi + \sin(\alpha_r \cdot \pi) + c_a (\pi - \alpha_r \cdot \pi - \sin(\alpha_r \cdot \pi)))$$
$$k_{fd} = \frac{1}{\pi} \cdot (2\pi + \sin(2\pi) + 0,88 \cdot (\pi - 2\pi - \sin(2\pi))) \quad (4.35)$$

$$k_{fd} = 1,12,$$

kde α_r je kruhový koeficient a c_a je koeficient. Kruhový koeficient je $\alpha_r = 2$ dle lit. [18].

Tvarový činitel je

$$k_f = \frac{4}{\pi} \sin \frac{\alpha_r \cdot \pi}{2} = \frac{4}{\pi} \sin \frac{2\pi}{2} = 0,7, \quad (4.36)$$

kde α_r je kruhový koeficient. Tvarový činitel se musí pohybovat v rozmezí hodnot 0,7 – 1,3.

Činitel reakce kotvy v d-ose

$$k_{ad} = \frac{k_{fd}}{k_f} = \frac{1,12}{0,7} = 1,6, \quad (4.37)$$

kde k_{fd} je tvarový faktor v d – ose a k_f je tvarový činitel.

Koeficient c_v je tedy

$$c_v = \frac{2 \cdot k_{oc} \cdot k_f \cdot k_{ad} \cdot (1 + \epsilon)}{\pi^2 \cdot \xi}$$

$$c_v = \frac{2 \cdot 0,11 \cdot 0,7 \cdot 1,6 \cdot (1 + 0,93)}{\pi^2 \cdot 0,7} \quad (4.38)$$

$$c_v = 0,069,$$

kde k_{oc} je faktor přetížení, k_f je tvarový činitel, k_{ad} činitel reakce kotvy v d-ose, ϵ je koeficient funkčnosti a ξ je koeficient využití. Koeficient funkčnosti se musí pohybovat v rozmezí 0,6 – 0,95, kde pro rychloběžné stroje se pohybuje koeficient u horní hranice rozmezí. Koeficient využití se musí pohybovat v rozmezí 0,3 – 0,7, kde hodnota se musí pohybovat u horní hranice jako v předešlém případě.

Při návrhu stroje byl zvolen materiál permanentních magnetů. Materiál magnetů je ze slitiny Samarium – Cobalt přesněji $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ od firmy Arnold Magnetic Technologies. Parametry zvoleného materiálu při pracovní teplotě 125 °C jsou následovné

Tab. 2 - Vlastnosti permanentního magnetu $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ při 120 °C

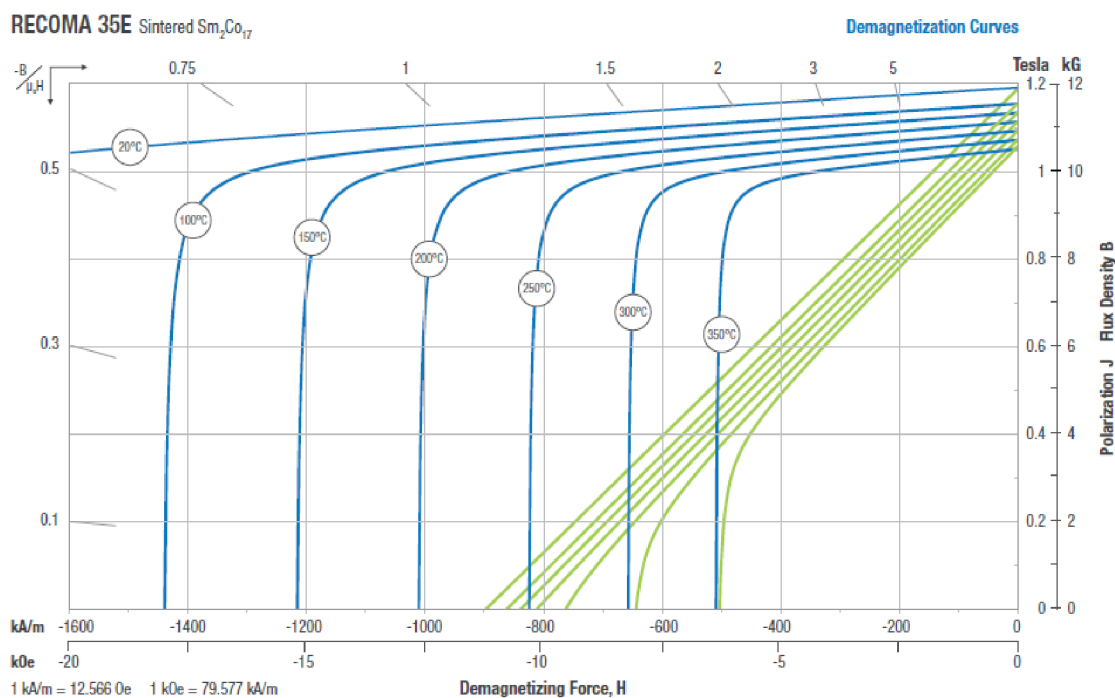
Remanentní indukce	$B_r = 1,15 \text{ T}$
Koercitivní síla	$H_c = 860 \text{ kAm}^{-1}$
Maximální koercitivní síla	$H_{cj} = 1330 \text{ kAm}^{-1}$

Objem magnetů

$$V_M = c_v \frac{P}{f \cdot B_r \cdot H_c} = 0,069 \cdot \frac{3000000}{50 \cdot 1,15 \cdot 8600000} \quad (4.39)$$

$$V_M = 0,0042 \text{ m}^3,$$

kde c_v je koeficient, P je výkon stroje, f je frekvence, B_r je remanentní indukce zvoleného magnetu a H_c je koercitivní síla zvoleného magnetu.



Obr. 4-6 Hysterezní křivka magnetu Sm2Co17 [9]

Při zvolených parametrech je nyní potřeba zjistit výšku permanentních magnetů. Správný návrh permanentního magnetu je důležitým krokem ovlivňující správný chod celého stroje. Při normálním provozu je pole magnetu do jisté míry oslabováno reakčním polem a výška se volí s jistou rezervou, aby se zabránilo hrozící trvalé demagnetizaci průchodem příliš velkého proudu. Obecně známo je, že čím vyšší je výška magnetů, tím vyšší je odolnost magnetu proti demagnetizaci.

Výška permanentních magnetů kruhového tvaru

$$l_{PM} = \frac{V_M}{2p \cdot \alpha_r \cdot \tau \cdot l} = \frac{0,0042}{4 \cdot 2 \cdot 0,26 \cdot 0,374} \quad (4.40)$$

$$l_{PM} = 0,00536 \text{ m} = 5,36 \text{ mm} ,$$

kde V_M je objem magnetů, $2p$ je počet pólů stroje, α_i je kruhový koeficient, τ je pólová rozteč a l je délka svazku.

Hmotnost permanentních magnetů je

$$m_{PM} = V_M \cdot \rho_{PM} = 0,0042 \cdot 8300 = 34,6 \text{ kg}, \quad (4.41)$$

kde V_M je objem magnetů a ρ_{PM} je hustota materiálu $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ permanentních magnetů.

Při navržené velikosti vzduchové mezery a permanentních magnetů byla zvolena velikost bandáže na hodnotu 0,5 mm, zbývá tedy 2,23 mm na skutečnou vzduchovou mezeru.

Ověření výpočtu velikosti permanentních magnetů dle lit. [22]. V závěru musí být provedena kontrola výšky permanentního magnetu vzhledem k jeho možné nevratné demagnetizaci reakčním magnetickým polem při maximálním proudu. Střední hodnota magnetické indukce pod pólem zůstane většinou stejná, avšak může dojít na některém místě vzduchové mezery, a tedy i na povrchu rotoru s permanentními magnety k silnému poklesu magnetické indukce, až může nastat nevratná demagnetizace postižené části.

Střední poloměr vzduchové mezery

$$r_\delta = \frac{D_{vnit} - l_\delta}{2} = \frac{0,331 - 0,00423}{2} = 0,16 \text{ m}, \quad (4.42)$$

kde D_{vnit} je vnitřní průměr statoru a l_δ je délka vzduchové mezery.

Drážková rozteč na středním poloměru vzduchové mezery

$$\tau_{sd} = \frac{2 \cdot \pi \cdot r_\delta}{Q} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 0,16}{48} = 0,021 \text{ m}, \quad (4.43)$$

kde r_δ je střední poloměr vzduchové mezery a Q je počet statorových drážek.

Konstanta κ

$$\kappa = \frac{\frac{l_z}{l_\delta}}{5 + \frac{l_z}{l_\delta}} = \frac{\frac{11,8}{4,23}}{5 + \frac{11,8}{4,23}} = 0,36 [-], \quad (4.44)$$

kde l_z je šířka otevření statorové drážky a l_δ je délka vzduchové mezery.

Carterův činitel se může vypočíst pomocí geometrických rozměrů

$$k_c = \frac{\tau_{sd}}{\tau_{sd} - \kappa \cdot l_z} = \frac{0,021}{0,021 - 0,36 \cdot 0,0118} \quad (4.45)$$

$$k_c = 1,25 [-],$$

kde τ_{sd} je drážková rozteč na středním poloměru vzduchové mezery, κ je konstanta a l_z je šířka otevření statorové drážky.

Magnetická indukce po zubem statoru

$$B_{\delta max} = k_c \cdot B_{\delta} = 1,25 \cdot 0,5 = 0,62 T, \quad (4.46)$$

kde k_c je carterův činitel a B_{δ} je magnetická indukce ve vzduchové mezeře stroje.

Permeabilita permanentního magnetu při teplotě 125 °C

$$\mu_{rPM} = \frac{B_r}{\mu_0 \cdot H_c} = \frac{1,15}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 860000} = 1,06, \quad (4.47)$$

kde B_r je remanentní indukce, H_c je koercitivní síla a μ_0 je permeabilita vakua.

Magnetická indukce ve vzduchové mezeře musí být dosažena pomocí pracovního bodu permanentního magnetu, který tuto indukci ovlivňuje. U rotoru s permanentními magnety na povrchu, lze říct, že magnetická indukce pod zubem statoru je rovna s magnetickou indukcí permanentních magnetů. Tyto magnetické indukce se mohou lišit kvůli různým polůměrům magnetu a vzduchové mezery, avšak odchylka je malá, až zanedbatelná [22].

Platí tedy

$$B_{PM} = B_{\delta max}, \quad (4.48)$$

kde B_{PM} je magnetická indukce permanentního magnetu a $B_{\delta max}$ je magnetická indukce po zubem statoru.

Intenzita magnetického pole permanentního magnetu

$$H_{PM} = \frac{B_{PM} - B_r}{\mu_0 \cdot \mu_{rPM}} = \frac{0,62 - 1,15}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 1,06} \quad (4.49)$$

$$H_{PM} = -393692 \text{ Am}^{-1} = -393,7 \text{ kAm}^{-1},$$

kde B_{PM} je magnetická indukce permanentního magnetu, B_r je remanentní indukce, μ_0 je permeabilita vakua a μ_{rPM} permeabilita permanentního magnetu při teplotě 125 °C.

Výška permanentních magnetů

$$l_{PM} = \frac{B_{\delta max} \cdot l_{\delta}}{\mu_0 \cdot H_{PM}} = \frac{0,62 \cdot 0,0118}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 393692} \quad (4.50)$$

$$l_{PM} = 0,00533 \text{ m} = 5,33 \text{ mm},$$

kde $B_{\delta max}$ je magnetická indukce po zubem statoru, l_{δ} je délka vzduchové mezery, μ_0 je permeabilita vakua a H_{PM} intenzita magnetického pole permanentního magnetu.

Ověření dimenzování magnetu proti trvalé demagnetizace při maximálním proudu

Magnetické napětí

$$U_{mreakce} = \frac{I}{2p} \cdot \frac{I_k}{I_n} = \frac{40050}{4} \cdot 2 = 20025 \text{ A}, \quad (4.51)$$

kde I je celkový proud stroje, $2p$ je počet pólů stroje a $\frac{I_k}{I_n}$ je proudové přetížení.

Intenzita mag. pole permanentního magnetu

$$H_{PMk} = \frac{B_{\delta min} - B_r}{\mu_0 \cdot \mu_{rPM}} = \frac{0,05 - 1,15}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 1,06} \quad (4.52)$$

$$H_{PMk} = -885608 \text{ Am}^{-1} = -885,6 \text{ kAm}^{-1},$$

kde $B_{\delta min}$ je minimální magnetická indukce ve vzduchové mezeře, B_r je remanentní indukce, μ_0 je permeabilita vakua a μ_{rPM} relativní permeabilita permanentního magnetu při teplotě 125 °C.

Výška magnetu

$$l_{PMk} = \frac{1}{H_{PMk}} \cdot \left(\frac{B_{\delta min}}{\mu_0} \cdot l_{\delta} + \frac{U_{mkreakce}}{2} \right)$$

$$l_{PMk} = \frac{1}{885608} \cdot \left(\frac{0,05}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}} \cdot 0,0118 + \frac{20025,25}{2} \right) \quad (4.53)$$

$$l_{PMk} = 8,92 \text{ mm},$$

kde H_{PMk} je intenzita mag. pole permanentního magnetu, $B_{\delta min}$ je minimální magnetická indukce ve vzduchové mezeře, μ_0 je permeabilita vakua a $U_{mkreakce}$ je magnetické napětí. Vypočtená minimální výška magnetu přesáhla výšku permanentního magnetu určenou pomocí analytického výpočtu, a proto byla v dalším průběhu práce volena výška 9 mm.

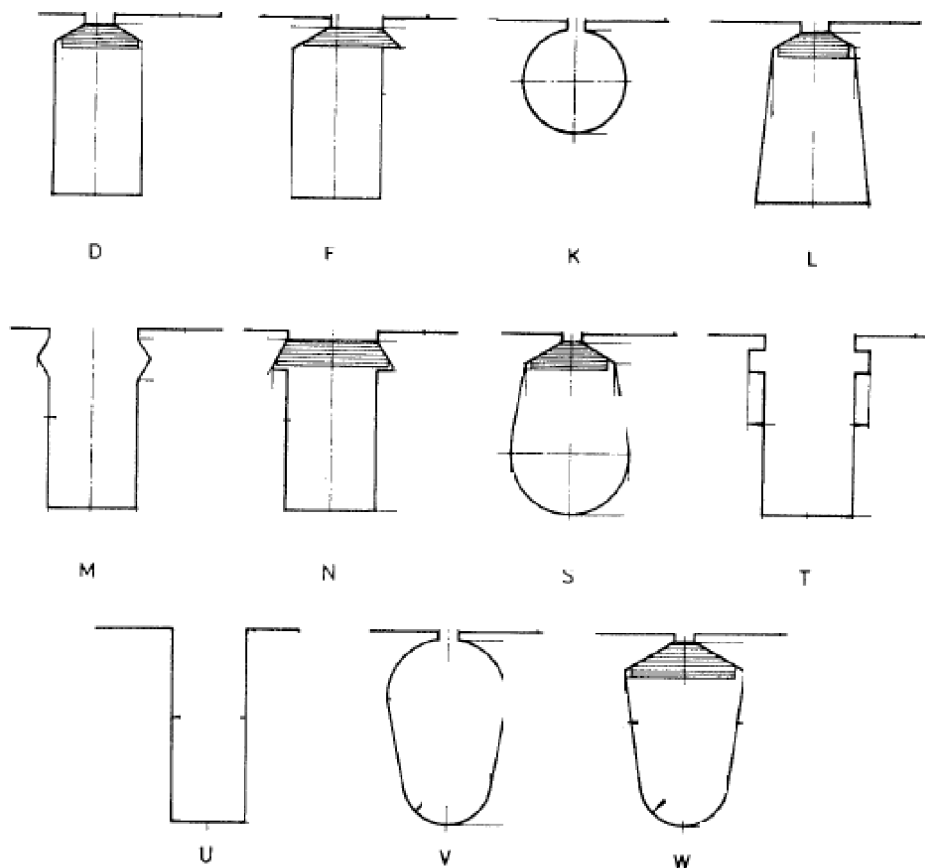
4.2.4 Rozměry statorové drážky a návrh vinutí

V této kapitole bude navržen počet vodičů na jednu drážku, rozměry statorové drážky, počet závitů v sérii a průřez vodiče. V prvním kroku byly zvoleny rozměry statorové drážky podle lit. [10]. Již z dřívějšího výpočtu podle vzorce 4-29 víme, že šířka otevření statorové drážky je $l_z = 11,8 \text{ mm}$, a proto volíme rozměry nejbližší vyšší této hodnotě.

Nejprve se musí zvolit tvar drážky. Při návrhu nejrůznějších druhů elektrických točivých strojů se volí z široké škály tvarů drážek, viz. obr. 4-7. U synchronních strojů velkého výkonu s permanentními magnety se většinou volí M – drážka, viz obr. 4-8.

Tab. 3 - Rozměry M – drážky podle obr. 4-8

	Rozměry M – drážky
b ₀ [mm]	11,8
b ₁ [mm]	12
h ₀ [mm]	0,7
h ₁ [mm]	4
x ₁ [mm]	1,4
h ₂ [mm]	65,7



Obr. 4-7 Vybrané druhy statorových drážek [10]

Výška drážky je stejná jako výška statorového zubu

$$h_z = h_d = 70 \text{ mm}, \quad (4.54)$$

kde h_z je výška zubu a h_d je výška drážky.

Průřez statorové drážky

$$S_d = h_2 \cdot b_1 = 65,7 \cdot 12 = 788,8 \text{ mm}^2, \quad (4.55)$$

kde h_2 a b_1 jsou rozměry statorové drážky.

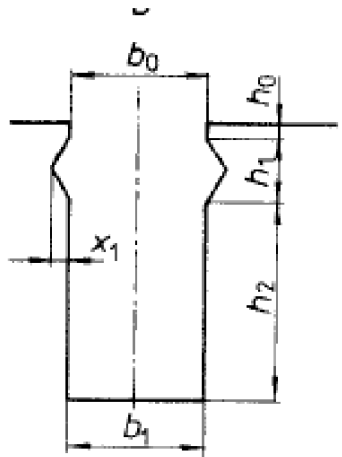
Činitel plnění mědi, který byl volen na základě porovnání výkonově stejných strojů

$$k_{pcu} = 0,5 [-] \quad (4.56)$$

Průřez mědi ve statorové drážce ovlivněn činitelem plnění

$$S_{dcu} = \frac{S_d}{k_{pcu}} = \frac{788,8}{0,5} = 394,4 \text{ mm}^2, \quad (4.57)$$

kde S_d je průřez statorové drážky a k_{pcu} je činitel plnění mědi.



Obr. 4-8 Tvar M - drážky [10]

Úhlová rychlost

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot \frac{n}{60} = 2 \cdot \pi \cdot \frac{15000}{60} = 1570,4 \text{ rads}^{-1}, \quad (4.58)$$

kde n jsou otáčky stroje.

Zde je uveden výpočet vinutí podle lit. [1].

Fázové napětí

$$U_f = \frac{U}{\sqrt{3}} = \frac{7000}{\sqrt{3}} = 4041 \text{ V} \quad (4.59)$$

Činitel vinutí

$$k_{w(v)} = \frac{2 \cdot \sin\left(v \cdot \frac{\pi}{2}\right) \cdot \sin\left(\frac{v \cdot \pi}{m \cdot 2}\right)}{\frac{Q}{m \cdot p} \cdot \sin\left(v \cdot \pi \cdot \frac{p}{Q}\right)}$$

$$k_{w(1)} = \frac{2 \cdot \sin\left(1 \cdot \frac{\pi}{2}\right) \cdot \sin\left(\frac{1 \cdot \pi}{3 \cdot 2}\right)}{\frac{48}{3 \cdot 2} \cdot \sin\left(1 \cdot \pi \cdot \frac{2}{48}\right)} \quad (4.60)$$

$$k_{w(1)} = 0,95,$$

kde W_{tp} je krok cívky, m je počet fází, Q je počet statorových drážek a p je počet pólových dvojic.

Počet závitů v sérii

$$N_z = \frac{\sqrt{2} \cdot U_f}{\omega \cdot k_{w(1)} \cdot \alpha_{PM} \cdot B_{\delta max} \cdot \tau \cdot l}$$

$$N_z = \frac{\sqrt{2} \cdot 4041}{1570,8 \cdot 0,95 \cdot 0,8 \cdot 0,62 \cdot 0,26 \cdot 0,374} \quad (4.61)$$

$$N_z = 59 \text{ závitů v sérii,}$$

kde U_f je fázové napětí, ω je úhlová rychlost, $k_{w(1)}$ je činitel vinutí, α_{PM} je přibližně relativní šířka magnetu, $B_{\delta max}$ je magnetická indukce po zubem statoru, τ je pólová rozteč a l je délka svazku.

Počet paralelních větví

$$a = 1 \quad (4.62)$$

Počet vodičů v drážce

$$z = 2 \cdot a \cdot m \cdot \frac{N_z}{Q} = 2 \cdot 1 \cdot 3 \cdot \frac{59}{48} \approx 7 \text{ vodičů,} \quad (4.63)$$

kde a je počet paralelních větví, m je počet fází, N_z je počet závitů v sérii a Q je počet statorových drážek.

Průřez jednoho vodiče

$$S_v = \frac{S_{acu}}{z} = \frac{394,4}{7} = 56,3 \text{ mm}^2, \quad (4.64)$$

kde S_{acu} je průřez mědi a z je počet vodičů v drážce.

Podle lit. [10] a podle stávající platné normy ČSN 42 8308 byla určena podle průřezu vodiče šířka a délka vodiče

$$\text{šířka vodiče } \times \text{ výška vodiče} = [11,2 \times 5] \text{ mm} \quad (4.65)$$

U tohoto stroje bylo zvoleno standartní zapojení do hvězdy. Při určení velikosti vodiče se může vypočítat proudová hustota. Proudová hustota se volí v rozsahu 3 Amm^{-2} až asi 20 Amm^{-2} . Obecně platí, že u velkých strojů se volí menší proudová hustota a u menších strojů se volí větší proudová hustota. Tohle je dáno skutečností, že ztrátový výkon ve vinutí roste úměrně třetí mocnině lineárních rozměrů, zatímco chladící povrch je úměrný pouze druhé mocnině těchto rozměrů. Velikost proudové hustoty také závisí na tzv. zatěžovacím činiteli stroje. Běží-li stroj s velkým fázovým proudem kratší dobu, než je velikost tepelné časové konstanty vinutí, nestačí se vinutí ohřát na nebezpečnou mez, proto se může volit vysoká proudová hustota při zmíněné hranici, přičemž typickým příkladem je startér spalovacího motoru auta. Nevýhodou této volby je, že vzrostou ohmické ztráty ve vinutí a poklesne účinnost tohoto stroje. Dolní zmíněná hranice se používá u velkých strojů, které běží trvale, tzn. mají delší dobu běhu, než je tepelná časová konstanta vinutí. Dále se volí, když se při návrhu snaží o minimalizaci ztrát hluboko pod hranici, při níž už není vinutí stroje ohrožováno tepelně. Nevýhodou této volby je, že při snížení ohmických ztrát dojde k nárůstu rozměru vinutí a tím potom i velikosti stroje a jeho hmotnosti [6].

U vysokootáčkových strojů se nejčastěji používá rozložené vinutí (jednovrstvé), anebo soustředěné vinutí (jednovrstvé a dvouvrstvé). Soustředěné vinutí oproti rozloženému vinutí má výhodu, že čela vinutí se nepřehýbají. V tomto stroji bylo zvoleno rozložené jednovrstvé vinutí, tudíž všechny cívky ve vinutí každé fáze jsou zapojeny do série [6].

Proudová hustota vodiče

$$\sigma = \frac{I}{S_v} = \frac{295}{56,3} = 5,24 \text{ Amm}^2, \quad (4.66)$$

kde I je proud stroje a S_v je průřez vodiče.

Střední poloměr drážek

$$r_{dr} = D_r + l_\delta + h_d = \frac{0,312}{2} + 0,00423 + 0,070 \quad (4.67)$$

$$r_{dr} = 0,195 \text{ m}$$

kde D_r je průměr rotoru, l_δ je délka vzduchové mezery a h_d je výška drážky.

Délka oblouku s poloměrem r_{dr} odpovídající pólové rozteči

$$l_{obl} = \frac{2 \cdot \pi \cdot r_{dr}}{2p} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 0,195}{4} = 0,31 \text{ m}, \quad (4.68)$$

kde r_{dr} je střední poloměr drážek a $2p$ je počet pólů stroje.

Odhadnutá délka čel

$$l_\zeta = 2 \cdot l_{obl} = 2 \cdot 0,31 = 0,62 \text{ m}, \quad (4.69)$$

kde l_{obl} je délka oblouku.

Objem všech drážek

$$V_{dr} = S_d \cdot l \cdot Q = 0,0007888 \cdot 0,347 \cdot 48 \quad (4.70)$$

$$V_{dr} = 0,014 \text{ m}^3,$$

kde S_d je průřez statorové drážky, l je délka svazku a Q je počet statorových drážek.

Objem celého vinutí včetně čel (prozatím s plněním plně drážky)

$$V_v = V_{dr} + Q \cdot (l_\zeta \cdot S_d) \quad (4.71)$$

$$V_v = 0,014 + 48 \cdot (0,62 \cdot 0,0007888)$$

$$V_v = 0,0374 \text{ m}^3,$$

kde V_{dr} je objem všech drážek, Q je počet statorových drážek, l_ζ je délka čel a S_d je průřez statorové drážky.

Objem mědi

$$V_{cu} = V_v \cdot k_{pcu} = 0,0374 \cdot 0,5 = 0,0187 \text{ m}^3, \quad (4.72)$$

kde V_v je objem celého vinutí a k_{pcu} je činitel plnění mědi.

Hmotnost mědi vinutí

$$m_{cu} = \rho_{cu} \cdot V_{cu} = 8900 \cdot 0,0187 = 166,4 \text{ kg}, \quad (4.73)$$

kde V_{cu} je objem mědi a ρ_{cu} je hustota mědi.

4.2.5 Ztráty a účinnost stroje

V této kapitole budou vypočteny důležité ztráty synchronního stroje, které povedou k výpočtu celkové účinnosti vysokootáčkového stroje dle [6] a [10]. Svazek statoru se budou skládat z plechu M235-35A, kde jsou určeny měrné hysterezní a vířivé ztráty, viz. tab. 4.

Tab. 4 - Měrné hysterezní a vířivé ztráty plechu M235 - 35A

	[W/kg]		B [T]	f [Hz]
p_h	1,78	Při	1,5	50
p_v	0,66		1	50

Kmitočet magnetování při maximálních otáčkách

$$f = \frac{n}{60} \cdot \frac{2p}{2} = \frac{15000}{60} \cdot \frac{4}{2} = 500 \text{ Hz}, \quad (4.74)$$

kde n jsou otáčky stroje a $2p$ je počet pólů stroje.

Hysterezní ztráty v jho statoru

$$\Delta P_{hJHO} = p_h \cdot \frac{f}{f_0} \cdot \left(\frac{B_{sjha}}{B_0} \right)^2 \cdot m_{sjha}$$
$$\Delta P_{hJHO} = 1,78 \cdot \frac{500}{50} \cdot \left(\frac{1}{1,5} \right)^2 \cdot 460,2 \quad (4.75)$$

$$\Delta P_{hJHO} = 4,6 \text{ kW},$$

kde p_h jsou měrné hysterezní ztráty, f je kmitočet magnetování při maximálních otáčkách, f_0 je frekvence pro měrné hysterezní ztráty, B_{JHO} je indukce ve statorovém jhu, B_0 je indukce pro měrné hysterezní ztráty a m_{sjha} je hmotnost statorového jha.

Hysterezní ztráty v zubech statoru

$$\Delta P_{hz} = p_h \cdot \frac{f}{f_0} \cdot \left(\frac{B_z}{B_0} \right)^2 \cdot m_z$$
$$\Delta P_{hz} = 1,78 \cdot \frac{500}{50} \cdot \left(\frac{1,1}{1,5} \right)^2 \cdot 93,6 \quad (4.76)$$

$$\Delta P_{hz} = 1,13 \text{ kW},$$

kde p_h jsou měrné hysterezní ztráty, f je kmitočet magnetování při maximálních otáčkách, f_0 je frekvence pro měrné hysterezní ztráty, B_z je indukce statorového zubu, B_0 je indukce pro měrné hysterezní ztráty a m_z je hmotnost statorových zubů.

Hysterezní ztráty ve statoru

$$\Delta P_h = \Delta P_{hJHO} + \Delta P_{hz} = 4,6 + 1,13 = 5,73 \text{ kW}, \quad (4.77)$$

kde ΔP_{hJHO} jsou hysterezní ztráty v jho statoru a ΔP_{hz} jsou hysterezní ztráty v zubech statoru.

Vířivé ztráty ve jhu statoru

$$\Delta P_{vJHO} = p_v \cdot \left(\frac{f}{f_0} \right)^2 \cdot \left(\frac{B_{sjha}}{B_0} \right)^2 \cdot m_{sjha}$$
$$\Delta P_{vJHO} = 0,66 \cdot \left(\frac{500}{50} \right)^2 \cdot \left(\frac{1}{1,5} \right)^2 \cdot 460,2 \quad (4.78)$$

$$\Delta P_{vJHO} = 42,3 \text{ kW},$$

kde p_v jsou měrné vířivé ztráty, f je kmitočet magnetování při maximálních otáčkách, f_0 je frekvence pro měrné vířivé ztráty, B_{JHO} je indukce ve statorovém jhu, B_0 je indukce pro měrné vířivé ztráty a m_{sjha} je hmotnost statorového jha.

Vířivé ztráty v zubech statoru

$$\Delta P_{vz} = p_v \cdot \left(\frac{f}{f_0}\right)^2 \cdot \left(\frac{B_z}{B_0}\right)^2 \cdot m_z$$

$$\Delta P_{vz} = 0,66 \cdot \left(\frac{500}{50}\right)^2 \cdot \left(\frac{1,1}{1,5}\right)^2 \cdot 93,6 \quad (4.79)$$

$$\Delta P_{vz} = 10,4 \text{ kW},$$

kde p_v jsou měrné vířivé ztráty, f je kmitočet magnetování při maximálních otáčkách, f_0 je frekvence pro měrné vířivé ztráty, B_z je indukce ve statorovém zubu, B_0 je indukce pro měrné vířivé ztráty a m_z je hmotnost statorových zubů.

Vířivé ztráty ve statoru

$$\Delta P_v = \Delta P_{vJHO} + \Delta P_{vz} = 42,3 + 10,4 = 52,7 \text{ kW}, \quad (4.80)$$

kde ΔP_{vJHO} jsou vířivé ztráty v jhu statoru a ΔP_{vz} vířivé ztráty v zubech statoru.

Ztráty ve statorovém železe

$$\Delta P_{fe} = \Delta P_h + \Delta P_v = 5,73 + 52,7 = 58,43 \text{ kW}, \quad (4.81)$$

kde ΔP_v jsou vířivé ztráty ve statoru a ΔP_h jsou hysterezní ztráty ve statoru.

Dodatečné ztráty vznikají při chodu naprázdno, tak i při zatížení. Ztráty při chodu naprázdno vznikají na povrchu permanentních magnetů důsledkem kolísání indukce, které nastává vlivem drážkování statoru. Dodatečné ztráty při zatížení vznikají ve statorovém vinutí vlivem vířivých proudů i v železe statoru i na magnetech rotoru vlivem vyšších harmonických magnetického pole kotvy [10].

Dodatečné ztráty tohoto stroje dle [10] jsou

$$\Delta P_d = 0,004 \cdot P = 0,004 \cdot 3000000 = 12 \text{ kW}, \quad (4.82)$$

kde P je výkon stroje.

Mechanické ztráty, které jsou způsobené třením v ložiskách a ventilačními ztrátami

$$\Delta P_{mech} = 3,68 \cdot p \cdot \left(\frac{v}{40}\right)^3 \cdot \sqrt{l}$$

$$\Delta P_{mech} = 3,68 \cdot 2 \cdot \left(\frac{245}{40}\right)^3 \cdot \sqrt{0,374} \quad (4.83)$$

$$\Delta P_{mech} = 1,1 \text{ kW},$$

kde p je počet pólových dvojic, v je obvodová rychlost stroje a l je délka stroje.

Střední délka závitu statorového vinutí

$$l_{zstř} \cong 2 \cdot (l + D_{vnej}) = 2 \cdot (0,374 + 0,602)$$

$$l_{zstř} \cong 1,95 \text{ m} \quad (4.84)$$

kde l je délka svazku a D_{vnej} je vnější průměr statoru.

Rezistivita mědi při 125 °C

$$\rho_{125} = \rho_0 \cdot (1 + \alpha \cdot t)$$

$$\rho_{125} = 1,75e - 8 \cdot (1 + 0,0068 \cdot 125) \quad (4.85)$$

$$\rho_{125} = 32,4 \text{ n}\Omega\text{m},$$

kde ρ_0 je rezistivita mědi při 20 °C, α je teplotní koeficient odporu a t je teplota.

Odpor statorového vinutí

$$R_{cu} = \frac{\rho_{125} \cdot N \cdot l_{zstř}}{S_v \cdot a}$$

$$R_{cu} = \frac{32,4 \cdot 10^{-9} \cdot 59 \cdot 1,95}{56,3 \cdot 10^{-6} \cdot 1} \quad (4.86)$$

$$R_{cu} = 0,018 \Omega,$$

kde ρ_{125} rezistivita mědi při 125 °C, N je počet závitů v sérii, $l_{zstř}$ je střední délka závitu statorového vinutí, S_v je průřez vodiče a a je počet paralelních větví.

Ztráty ve statorovém vinutí

$$\Delta P_{cu} = 3 \cdot R_{cu} \cdot I^2 = 3 \cdot 0,018 \cdot 295^2 = 4,7kW, \quad (4.87)$$

kde R_{cu} je odpor statorového vinutí a I je proud stroje.

Celkové ztráty stroje

$$\Delta P = \Delta P_{cu} + \Delta P_{mech} + \Delta P_{fe} + \Delta P_d$$

$$\Delta P = 4,7 + 1,1 + 58,43 + 12 \quad (4.88)$$

$$\Delta P = 76,2 kW,$$

kde ΔP_{cu} jsou ztráty ve statorovém vinutí, ΔP_{mech} jsou mechanické ztráty, ΔP_{fe} jsou ztráty ve statorovém železe a ΔP_d jsou dodatečné ztráty.

Účinnost stroje

$$\eta = 1 - \frac{\Delta P}{\Delta P + P} = 1 - \frac{76,2}{76,2 + 3000} = 97,5 \%, \quad (4.89)$$

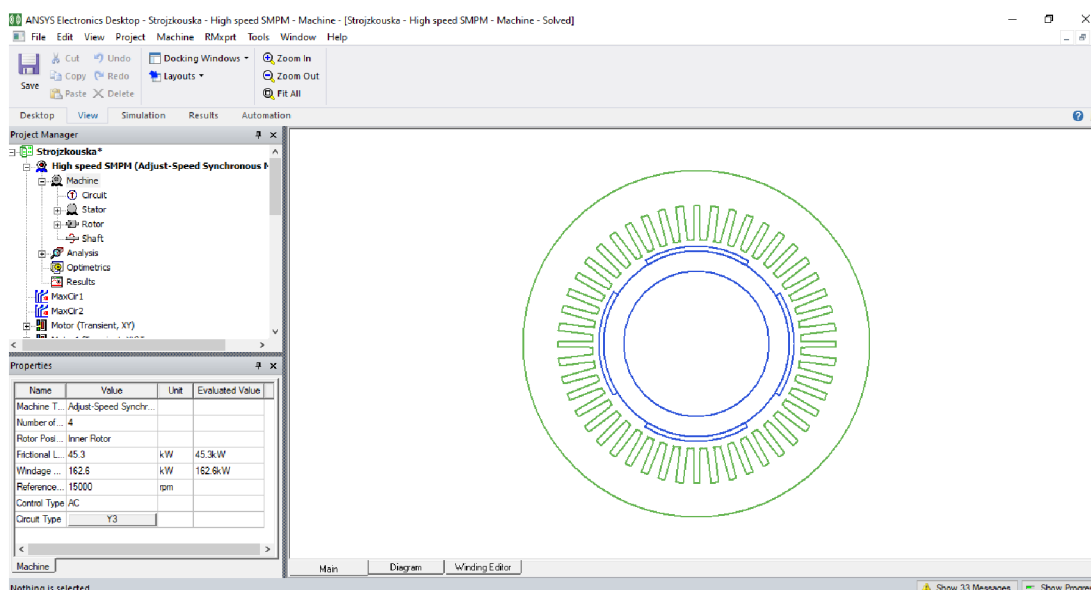
kde ΔP jsou celkové ztráty stroje a P je výkon stroje.

5 MODEL VYSOKOotáČKOVÉHO STROJE

V této kapitole jsou popsány simulační programy balíčku Ansys Electronics desktop, zejména RMXprt a Maxwell, ve kterých probíhala simulace zkoumaného motoru. V RMXprt probíhala simulace pomocí analytického výpočtu podle doposud známých vzorců a v Maxwellu probíhala simulace pomocí metody konečných prvků. Dále zde je popsán průběh změn parametrů z analytického výpočtu, kde tyto úpravy byly provedeny na modelu motoru v RMXprt, tak aby byl dosažen požadovaný výkon a další požadované parametry stroje. Tato úprava byla provedena i u modelu v Maxwellu, aby výsledek simulace byl reálný a model mohl být srovnáván s ostatními simulacemi.

5.1 ANSYS RMXprt

ANSYS RMXprt (Rotation Machine expert) je speciální program pro optimalizaci a návrh točivých elektrických strojů. Program je součástí balíčku ANSYS Electronic Desktop, který obsahuje i další programy pro simulaci a výpočet točivých a netočivých strojů. Návrháři elektrických strojů a generátorů pomocí nástroje ANSYS RMXprt vylepšují své projekty. Společně Maxwell a RMXprt vytvářejí přizpůsobený nástroj pro rychlý a efektivní návrh strojů. Pomocí klasické teorie analytických návrhů motorů a ekvivalentních metod magnetického obvodu může RMXprt vypočítat výkon stroje, provést počáteční rozhodnutí o velikosti a provést desítky analýz.



Obr. 5-1 Uživatelské rozhraní programu RMXprt

Klíčovou výhodou RMXprt je dále jeho schopnost automaticky nastavit kompletní projekt pro FEM analýzu (Maxwell) včetně geometrie, materiálů a okrajových podmínek. RMXprt automaticky generuje model celého stroje nebo jednotlivé části stroje s ohledem na nelinearity a předává je dál, kde lze dosáhnout další analýzy elektrických pohonů. Podobným způsobem RMXprt nastaví model napájení elektrického stroje jako samostatnou součást v pracovní části, která bude spojena s odpovídajícím modelem sníženého pořadí elektrických strojů.

Program využívá znalosti náhradních schémat a obsahuje předem definované šablony různých strojů, jaké jsou např. jednofázové nebo třífázové synchronní, asynchronní, stejnosměrné stroje atd. Uživateli nabízí pohodlné rozhraní a výhodou programu je také knihovna materiálů, v níž jsou zahrnuty některé potřebné a dostupné materiály pro magnetické části, tak i pro mechanické části stroje [11].

5.2 Simulace v RMXprtu

Při návrhu stroje pomocí analytického výpočtu byl výpočet zaměřen na elektromagnetický návrh stroje. V návrhu jsou vypočteny rozměry statoru, rotoru, permanentních magnetů, statorových drážek a navrženo statorové vinutí. Dále se počítaly jednotlivé ztráty a je vypočítána i celková účinnost stroje. Princip celého návrhu stroje je spíše navržen z pohledu kritických oblastí než z pohledu elektromagnetických vlastností. Tato část je řešena spíše až při simulaci v Maxwellu.

Parametry a veličiny vypočítané při analytickém návrhu stroje, viz. kap. 4, byly vloženy do zvoleného modelu v RMXprtu. Přímo v nabídce RMXprtu se může volit z několika předdefinovaných šablon pro synchronní motor. Jsou zde možnosti jako třífázový synchronní stroj a synchronní stroj s proměnnými otáčkami. Pro vysokootáčkový stroj byla zvolena šablona synchronní stroj s proměnnými otáčkami. V modelu stroje se dá zvolit z několika předdefinovaných šablon jednotlivých částí, které si může uživatel jednoduše změnit podle své potřeby. V případě tohoto stroje byla nadefinována vlastní drážka, protože program nenabízí zvolený typ drážky (M – drážka). Výhodou programu je knihovna materiálů pro různé části strojů. Zvolené materiály statorových plechů, statorového vinutí, permanentních magnetů a celistvého rotoru se musely dodatečně definovat v knihovně RMXprt.

Pro simulaci s parametry z analytického výpočtu bylo zjištěno, že výsledek neodpovídá požadovaným hodnotám a stroj musel být pozměněn do jiné podoby. Původní model stroje nemohl dosáhnout požadovaného výkonu 3 MW, protože zátěžný úhel stroje byl přes 90°. Maximální výkon stroje byl pouze 2,21 MW a příkon zhruba 2,29 MW. Z tohoto důvodu muselo dojít k úpravě stroje, aby zátěžný úhel stroje klesl pod 90° a model stroje mohl dosáhnout požadovaného výkonu 3 MW.

Muselo dojít k takovým úpravám, aby došlo ke snížení indukovaného napětí, zvýšení proudu a dosažení požadovaného výkonu. Tyto požadované úpravy dokáže ovlivnit změna počtu vodičů v drážce v závislosti na velikosti délky svazku. Každá úprava byla vyzkoušena zvlášť, aby se zjistilo, jak stroj na jednotlivé změny reaguje.

Tab. 5 - Srovnání požadovaných hodnot s hodnotami z původní simulace stroje

	Původní simulace	Požadované hodnoty
U_i [kV]	4,62	4,04
I [A]	254	295
P [MW]	2,21	3

Provedené jednotlivé změny

- Snížení počtu vodičů – počet vodičů byl snížen z původních 7 vodičů na 4 vodiče. Při této změně nastalo snížení indukovaného napětí a zvýšení proudu oproti původní simulaci. Výkon stroje dosáhl požadované hodnoty, avšak proud přesáhl požadovanou hodnotu a napětí naopak kleslo pod uvažovanou mez. V důsledku snížení počtu vodičů byl upraven i průřez vodiče, aby byl splněn činitel plnění 0,5. Délka svazku zůstala zachována.

Tab. 6 - Srovnání simulací původního stroje se strojem se sníženým počtem vodičů

	Původní simulace	Upravená simulace	Požadované hodnoty
U_i [kV]	4,62	2,69	4,04
I [A]	254	423	295
P [MW]	2,21	3	3
N [-]	7	4	-
l [mm]	374	374	-

- Prodloužení délky svazku – délka svazku byla prodloužena z původních 374 mm na 400 mm. Při této změně nastalo zvýšení indukovaného napětí. Počet vodičů v drážce zůstal zachován. Proud zůstal menší v porovnání s požadovanou hodnotou a napětí přesáhlo požadovanou hodnotu.

Tab. 7 - Srovnání simulací původního stroje se strojem s prodlouženou délkou

	Původní simulace	Upravená simulace	Požadované hodnoty
U_i [kV]	4,62	6,2	4,04
I [A]	254	238	295
P [MW]	2,21	2,21	3
N [-]	7	7	-
l [mm]	374	400	-

- Snížení délky svazku – délka svazku byla snížena z původních 374 mm na 330 mm. Při této změně nastalo snížení indukovaného napětí a zvýšení proudu. Počet vodičů v drážce zůstal zachován. Při této změně se indukované napětí a proud přiblížil k požadovaným hodnotám.

Tab. 8 - Srovnání simulací původního stroje se strojem se zkrácenou délkou

	Původní simulace	Upravená simulace	Požadované hodnoty
U_i [kV]	4,62	4,26	4,04
I [A]	254	265	295
P [MW]	2,21	2,21	3
N [-]	7	7	-
l [mm]	374	330	-

- Snížení délky svazku a snížení počtu vodičů – při kombinaci snížení počtu vodičů a délky svazku se dosáhlo požadovaného výkonu 3 MW, avšak se snížilo napětí pod požadovanou hodnotu a proud vzrostl nad požadovanou mez, a proto se muselo napětí a proud doladit ještě další úpravou.

Tab. 9 - Srovnání simulací původního stroje se strojem se sníženým počtem vodičů a délkou svazku

	Původní simulace	Upravená simulace	Požadované hodnoty
U_i [kV]	4,62	2,38	4,04
I [A]	254	436	295
P [MW]	2,21	3	3
N [-]	7	4	-
l [mm]	374	330	-

Vždy po každé úpravě se změnil výkon, napětí i proud. Při správné kombinaci těchto úprav se dospělo k dosažení požadovaného výkonu a k přiblížení k požadovaným hodnotám napětí a proudu. K nalezení ideálního stavu stroje v programu RMXprt posloužilo zvětšení výšky permanentních magnetů.

Tab. 10 - Srovnání původní a výsledné simulace s požadovanými hodnotami

	Původní simulace	Upravená simulace	Požadované hodnoty
U_i [kV]	4,62	3,91	4,04
I [A]	254	308	295
P [MW]	2,21	3	3
B_δ [T]	0,55	0,68	0,5
N [-]	7	4	-
l [mm]	374	330	-
l_{PM} [mm]	5,36	9	-

Po provedení výše zmíněných úprav (tab. 10) došlo ke snížení indukovaného napětí o 0,71 kV. Proud se zvýšil o 54 A a výkon dosáhl požadované hodnoty 3 MW. Při snížení počtu vodičů se zmenší indukované napětí a zvýší se proud. Zkrácením délky svazku dojde ke zmenšení indukovaného napětí a proud nepatrně vzroste. Zvětšením tloušťky permanentních magnetů má za následek zvětšení indukovaného napětí a zmenšení proudu, avšak dojde k nárůstu magnetické indukce v mezeře, oproti hodnotě, která je volena při analytickém výpočtu.

5.3 ANSYS Maxwell

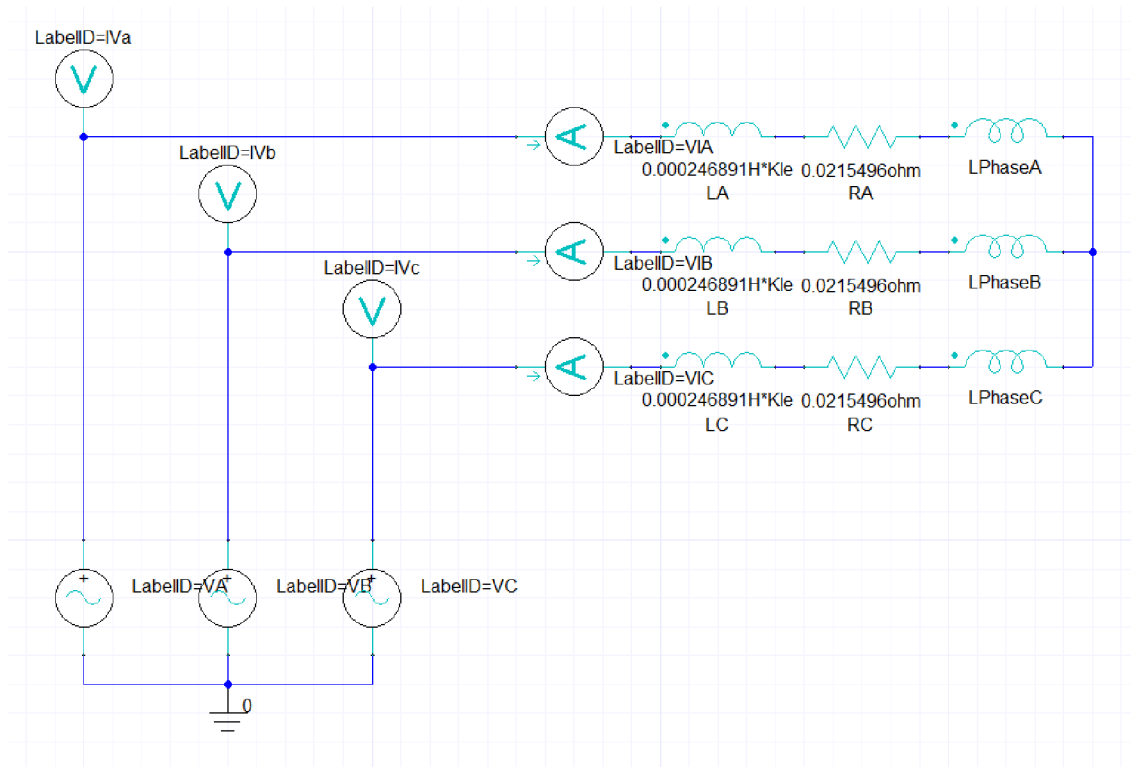
ANSYS Maxwell je špičkový simulační software pro elektromagnetické pole, pro návrh a analýzu elektrických motorů, akčních členů, senzorů, transformátorů a dalších elektromagnetických a elektromechanických zařízení. S tímto programem může uživatel přesně charakterizovat nelineární pohyb elektromechanických součástí a jejich účinky na návrh pohonného obvodu a řídicího systému. Využitím pokročilých simulačních řešení elektromagnetického pole a jejich plynulým propojením s technologií simulace integrovaných obvodů a systémů může uživatel lépe chápat výkon elektromechanických systémů předtím, než postaví prototyp stroje. Je navrhnut pro simulace nízkofrekvenčních polí. Program je založen na metodě konečných prvků, kterou program využívá na výpočet analýz, studií optimalizace elektromagnetických a elektromechanických zařízení (transformátory, motory, senzory, magnety atd.). Tento virtuální elektromagnetický simulační program poskytuje důležitou konkurenční výhodu, pro snížení nákladů

a zlepšení výkonu. Nabízí rovněž nástroje pro parametrizaci nebo optimalizaci navrženého systému.

Program Maxwell ve svém rozhraní zahrnuje simulaci obvodů a systémů, elektromagnetický a elektrostatický řešič, rozhraní s odborným designem pro elektrické stroje a transformátory. Výhodou programu je možnost vložit geometrii standartních CAD formátů nebo z jiných balíčků Ansys. Obsahuje generátor výpočetní sítě, který využívá auto adaptivní proces tvorby sítě. Program generuje kvalitní výpočetní síť na libovolné geometrii s lokálním zjemněním. V nabídce programu rovněž nechybí knihovna materiálů jako tomu je v RMXprt. V knihovně si může uživatel sám nadefinovat vlastní materiály, anebo upravit nelinearity materiálu např. BH křivku, hysterezní smyčku apod. [12].

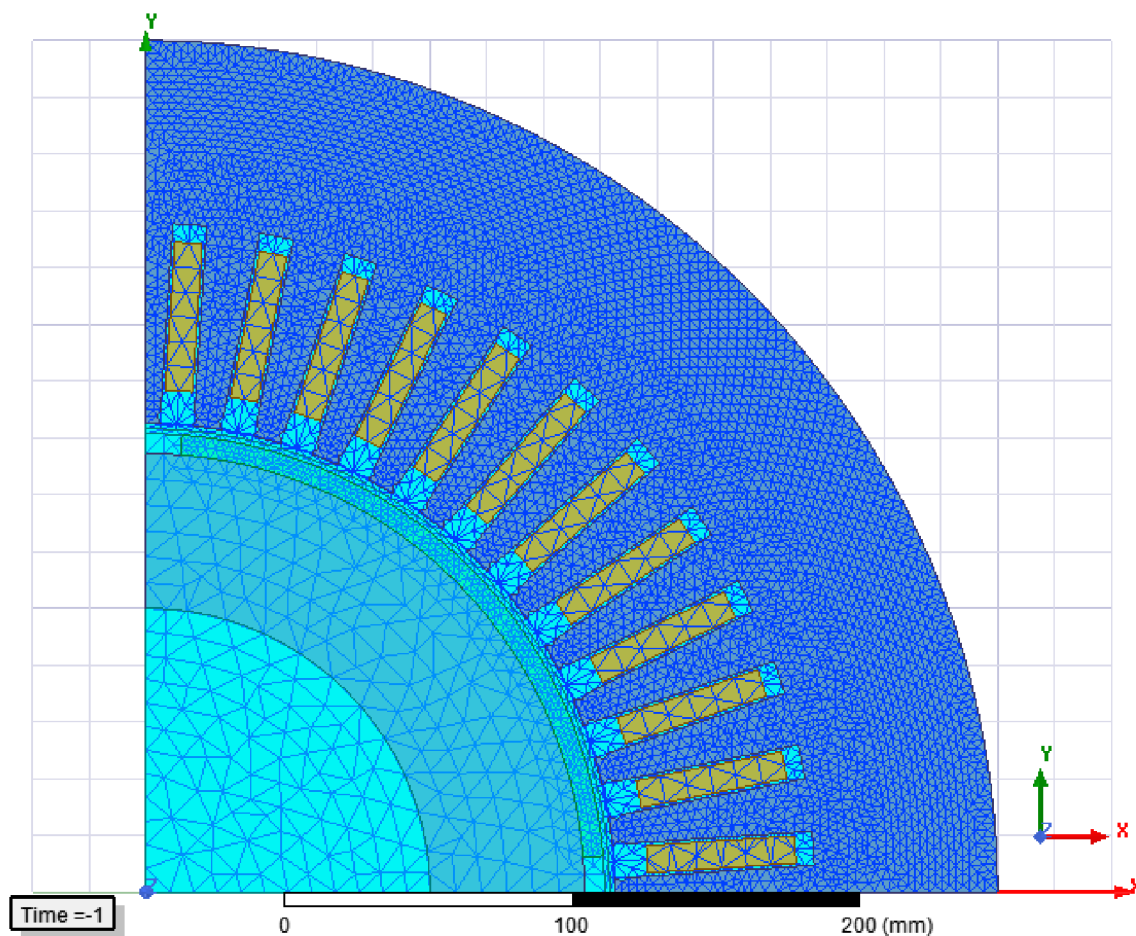
5.4 Simulace v Maxwellu

Jak již bylo zmíněno v kap. 5.2 byl upravený model v RMXprt převezen s veškerou geometrií do simulačního programu Maxwell 2D. Veškeré nastavení, které bylo provedeno v RMXprt, bylo součástí převodu, tj. nastavení všech materiálů, geometrie stroje, atd. Při vytvoření modelu v Maxwellu 2D se vytvoří i elektrický obvod (obr. 5-3), který koresponduje s modelem stroje.



Obr. 5-2 Elektrický obvod modelu

Před spuštěním simulace se musí ve stroji nastavit kvalita sítě, podle kterých program simuluje zkoumaný stroj. Tyto elementy se nastavují pomocí funkce mesh, která určuje hustotu elementů na jednotlivých částech stroje. Uživatel si každou část sítě stroje může samostatně zahustit. V tomto případě se zvláště meshovaly tyto části: stator, celistvý rotor, permanentní magnety, vinutí a vzduch. Nejvíce zahuštěná síť elementů je ve statoru, v permanentních magnetech a ve vzduchové mezeře. Platí obecně, že čím více je hustší síť elementů, tím delší je proces simulace, ale výsledky jsou přesnější. Na obr. 5-4 jde vidět nastavená síť elementů konkrétního stroje.



Obr. 5-3 Síť elementů zkoumaného modelu

Po optimálním vymeshování modelu se ještě musí v nastavení určit v jakých částech bude probíhat simulování jednotlivých ztrát. V nastavení vlivu vířivých proudů se v tomto případě zaškrtnulo zkoumání rotoru a permanentních magnetů a v nastavení ztrát v železe zkoumání statoru. V nastavení se musí ještě před spuštěním simulace nadefinovat délka simulace a krok simulace. V tomto případě byl krok simulace nastaven po 2 μ s do konečného času 0,15 s. Po skončení simulace musí být docíleno toho, aby simulovaný výkon dosáhl požadované hodnoty,

tj. 3 MW. Následně se musí rovnat rozdíl mezi příkonem a výkonem stroje se součtem všech jednotlivých simulovaných ztrát stroje. Po dokončení simulace nebylo této podmínky dosaženo, a proto se musela v nastavení pootočit výchozí pozice rotoru. V případě tohoto simulovaného stroje byla výchozí pozice nastavena na 15° . Až po otočení pozice o $200,5^\circ$ simulace dosáhla příznivějších výsledků. Konečná pozice rotoru byla tudíž nastavena na $215,5^\circ$. V tomto případě byl součet všech ztrát větší než rozdíl mezi příkonem a výkonem. Pro odstranění rozdílu mezi těmito hodnotami existuje v Maxwellu 2D funkce zpětného vlivu ztrát v železe na magnetické poli. Teoreticky tato funkce navýší rozdíl ztrát k příkonu a simulace bude přesnější s lepšími výsledky. U tohoto stroje při použití zapnutého výpočtu zpětného vlivu ztrát v železe na magnetickém poli proběhla simulace neúspěšně, protože simulační program měl problém s nelineární BH charakteristikou použitých materiálů. Tento problém byl vyřešen tak, že rozdíl mezi celkovými ztrátami a rozdílem příkonu a výkonu byl následně navýšen u příkonu. V důsledku toho se změna projevila pouze v příkonu a neprojevila se v dalších veličinách.

6 VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ

V této kapitole budou srovnány všechny dosažené výsledky. Motor byl nejprve navrhnout analyticky a poté upraven v programu RMXprt, aby výsledky simulace tohoto stroje byly srovnatelné s požadovanými hodnotami. V první podkapitole bude srovnán stroj, který byl navrhnout při analytickém výpočtu s motory v tab. 1. V programu Ansys Electronics Desktop je balíček simulačních programů, který obsahuje RMXprt a Maxwell. Výhodou tohoto programu je, že vytvořený model v RMXprt, který jde jednoduše exportovat do programu Maxwell. Vytvořený a upravený model stroje byl převeden do Maxwellu a simulován. Dosažené výsledky ze simulací v RMXprt a Maxwellu jsou srovnány v druhé podkapitole.

6.1 Vyhodnocení analytického výpočtu stroje

Na úplném začátku návrhu stroje byly zadány prvotní parametry od zadavatele, které nebyly odzkoušeny a nevědělo se, zdali stroj těchto parametrů dosáhne. V současné době, kdy se vysokootáčkové stroje začínají čím dál více vyskytovat v průmyslu, ještě nejsou tak rozšířené, aby byly sepsány publikace s daným návodem, jak navrhnout vysokootáčkový stroj s vysokou účinností. Průběžným zkoumáním, již zrealizovaných strojů existuje pár poznatků, jak správně začít při návrhu vysokootáčkového stroje. V tomto případě se vzalo v potaz již několik odzkoušených strojů z publikace [17], které byly použity jako odrazový můstek pro návrh stroje se zadanými prvotními parametry, popřípadě pozměněnými, aby stroj dosáhl požadovaných parametrů.

V tab. 11 jsou srovnány stroje z uvedené literatury a dva návrhy strojů. První stroj (žlutý sloupeček) je navržen podle parametrů od zadavatele a druhý stroj (modrý sloupeček) je navržen podle upravených parametrů. Zde jsou stroje srovnány podle výkonů od největšího po nejmenší výkon. Společně s výkony jsou zde dostupné informace z čerpané literatury, kde na základě těchto informací byly navrženy tyto motory. Pro jednoduchost při popisu bude používáno označení A pro stroj s prvotními parametry a B pro stroj s upravenými parametry.

Při návrhu vysokootáčkového stroje se vycházelo z toho, aby se vypočtené parametry pohybovaly v rozmezí hodnot výkonové nejbližších motorů, tj. v rozmezí 5 MW a 1 MW stroje. V tabulce jde vidět, že v posloupnosti od výkonově největšího po nejmenší motor všechny zvolené parametry buď rostou, nebo klesají, až na pár výjimek, které jsou konstantní.

Tab. 11 - Srovnání již zrealizovaných strojů [17] se strojem s parametry od zadavatele (žlutý sloupeček) a s upraveným strojem (modrý sloupeček)

P [MW]	20	10	5	3	3	1	0,5	0,1
l [m]	1,3	0,7	0,5	0,435	0,374	0,3	0,2	0,1
D_{vnej} [m]	0,7	0,6	0,6	0,7	0,6	0,4	0,3	0,2
p [-]	0,36	0,68	0,84	0,95	0,84	0,97	0,99	1
D_r [m]	0,468	0,476	0,42	0,415	0,312	0,291	0,198	0,1
l_{PM} [mm]	7,7	8,2	5,1	3,55	5,36	1,3	0,8	0,2
m_{PM} [kg]	185	105	55	24	35	13	8	2
B_δ [T]	0,4	0,4	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
η [%]	94	92	87	97	97,5	84	86	84
C_{mech} [kWs/m ³]	7,024	6,305	5,669	2,7	5,5	3,936	6,377	10
σ_{tan} [kPa]	42,7	38,33	34,5	16,5	34	24	38,77	60,79
M [Nm]	19098	9549	4774	1942	1942	954	477	95
v [m/s]	245	249	219	326	245	152	100,3	52

Při výpočtu stroje existuje pár oblastí, které jsou zvláště důležité pro návrh stroje. O těchto oblastech je pojednáváno v kap. 3.4. Jsou to kritické oblasti návrhu stroje, na které si musí každý konstruktér dát pozor. Řeč je o kritických otáčkách rotoru, mechanickém a tepelném namáhání stroje. Při přesáhnutí kritických otáček může dojít k deformaci rotoru. Při zadaných parametrech v počátku výpočtu bylo zjištěno, že vypočtená obvodová rychlost stroje A je výrazně větší než rychlost stroje s nejvyšším výkonem, a také byla překročena doporučená maximální obvodová rychlost pro vysokootáčkové stroje, která je $v = 250 \text{ ms}^{-1}$ (dle [17]). Při překročení této rychlosti, by mohlo dojít k deformaci rotoru a mělo by to za následek destrukci stroje. V tomto případě muselo dojít k určitým geometrickým úpravám, aby se předešlo těmto nedostatkům. Obvodová rychlost se musela snížit, aby se dostala pod uvedenou hranici. Vzorec pro obvodovou rychlost je následující

$$v = \frac{\pi \cdot D_r \cdot n}{60}, \quad (6.1)$$

kde tato rychlost závisí na otáčkách stroje n a na průměru rotoru D_r . Pro zmenšení této rychlosti při konstantních otáčkách stroje ($n = 15000 \text{ min}^{-1}$) byla jediná možnost zmenšit průměr rotoru. Problém je v tom, že průměr rotoru se nesmí libovolně zmenšit. Omezující faktor pro zmenšení je poměr průměru rotoru ku délce rotoru, který by měl být zachován v již zmíněném rozmezí v tab. 11(0,84-0,97). Tento poměr je další podmínka pro správný návrh geometrie rotoru, protože při snižování tohoto poměru se snižují kritické otáčky rotoru.

Nová navrhnutá obvodová rychlost je

$$v = 245 \text{ ms}^{-1}, \quad (6.2)$$

kde pro tuto rychlost byl analyticky vypočten stroj s novými rozměry. V tomto případě se jedná již o stroj B. Při návrhu vysokootáčkového stroje se vyskytují ještě další důležité parametry, které souvisí s dimenzováním stroje a jsou nezbytné pro výpočet. Jedná se o tangenciální napětí a mechanickou konstantu. Při určení a výpočtu těchto konstant byla dodržena stejná myšlenka, jako v předchozím kroku, a to dodržení daného rozmezí, aby stroj mohl být realizovatelný. Po výpočtu průměru rotoru stroje B bylo zvoleno tangenciální napětí

$$\sigma_{tan} = 34 \text{ kPa}, \quad (6.3)$$

tedy v rozmezí od 24 kPa do 34,5 kPa. Ze vzorce (viz. 4.6), z kterého se vypočítá tangenciální napětí, byla určena délka svazku B. Hodnota zvoleného napětí byla dána opět tak, aby poměr průměru rotoru ku délce svazku byl zachován ve zvoleném rozmezí. Pro ověření, zda byly všechny zmíněné veličiny správně voleny, posloužil výpočet mechanické konstanty. Mechanická konstanta je závislá na výkonu a otáčkách stroje, délce a průměru rotoru (vzorec viz. 4.8.). Dvě veličiny, otáčky a výkon stroje, jsou dané od samého počátku návrhu stroje a musí být dodrženy, a proto se mohl měnit pouze průměr a délka rotoru, oproti původnímu návrhu stroje A. Při zvolených velikostech vyšla hodnota mechanické konstanty takto

$$C_{mech} = 5,5 \text{ kWsm}^{-3}, \quad (6.4)$$

kde po shlédnutí rozmezí v tab. 11, které je od $3,936 \text{ kWsm}^{-3}$ do $5,669 \text{ kWsm}^{-3}$, je patrné, že se vypočtená hodnota vyskytuje v daném rozmezí. Tento zvolený teoretický postup návrhu není zcela ideální, protože se po realizaci stroje musí stroj odzkoušet ještě ve zkušebně a stále může dojít k deformaci rotoru nebo k jinému závažnému problému. Prvotní zvolené parametry stroje A musely být změněny z důvodů, který je vysvětlen výše v této kapitole. Dále celý návrh stroje B je uveden v předešlé kapitole 4.2. Analytický výpočet se zabýval návrhem geometrie celého stroje, magnetického návrhu stroje až po určení jednotlivých ztrát a účinnosti motoru. Tyto vypočtené hodnoty už nemohly být srovnány s jinými stroji, protože tyto hodnoty již nebyly v literatuře k dispozici. Veškeré možné srovnatelné parametry jsou uvedeny v tab. 11. Navržený motor B má účinnost 97,5 %. Stroj A

s původně navrženými hodnotami má také účinnost srovnatelnou se strojem B, avšak tento stroj nespĺňuje podmínky pro správný návrh.

Tepelný výpočet stroje je zdoluhavý výpočet, při kterém by se zjistilo, zdali by stroj vydržel tepelnému namáhání. Toto namáhání se projevuje hlavně na velikosti a ztrátách stroje. Oteplení stroje je omezováno maximální teplotou vinutí a ta je určena podle třídy izolace. U mechanického namáhání výpočet zjišťuje, zdali zvolené materiály motoru vydrží mechanické namáhání odstředivých sil při běhu stroje. Při přesáhnutí mechanické pevnosti materiálů stroje může dojít k destrukci stroje.

6.2 Vyhodnocení simulací modelu stroje

V závěrečné podkapitole jsou srovnány výsledky simulací z RMxpřtu a Maxwellu 2D. Jedná se o model stroje, který je upravený v RMxpřtu do podoby, jak již je popsáno v kap. 5.2. Jedná se o rozdílný model, oproti stroji vypočtený analytickým výpočtem. Je pozměněný z toho důvodu, aby model stroje v programu dosáhl požadovaného výkonu 3MW. Liší se ve výšce permanentních magnetů, počtu vodičů v drážce a délce rotoru. Výška permanentních magnetů je změněna z původních 5,36 mm na 9 mm. Počet vodičů je snížěn z původních 7 na 4 vodiče v drážce a délka rotoru je snížena z 374 mm na 330 mm. Totožný model vytvořený RMxpřtem je i v Maxwellu. V tab. 12 jsou srovnané výsledky těchto simulací a je zde i uveden procentuální rozdíl jednotlivých parametrů.

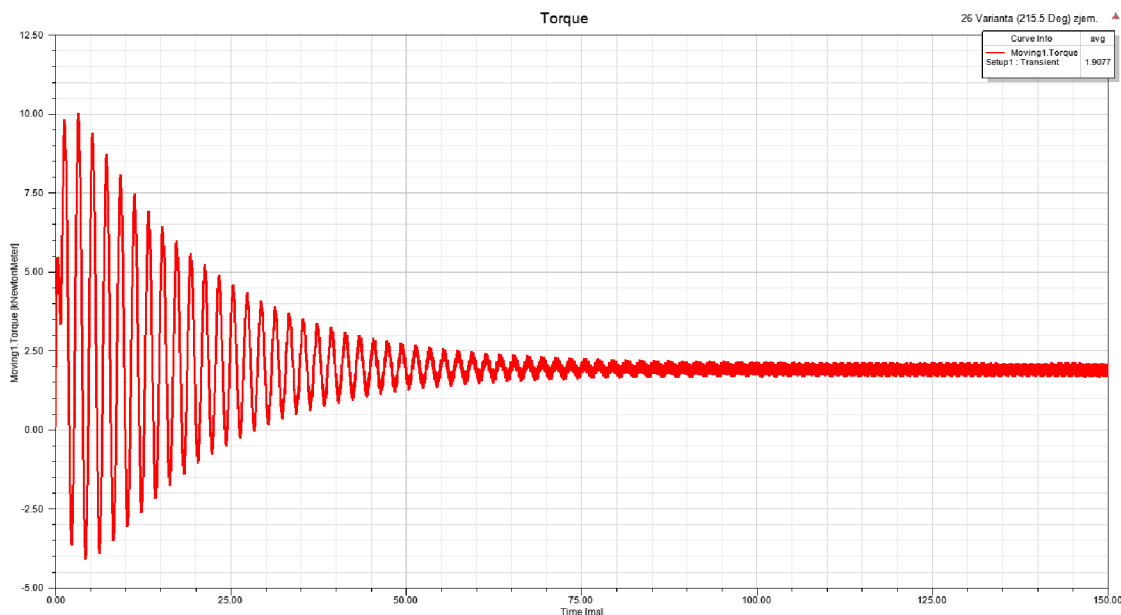
Tab. 12 - Porovnané výsledné veličiny

	RMxpřt	Maxwell	Rozdíl [%]
U_{if} [kV]	3,91	3,82	2,3
I [A]	308	299	2,9
M [Nm]	1910	1907	0,2
η [%]	97,5	96,8	0,7
P_1 [MW]	3,08	3,09	0,4
P_2 [MW]	3,00	2,99	0,3
ΔP [kW]	77,0	97,51	21
ΔP_{FE} [kW]*	57,8	78,8	27
ΔP_{CU} [kW]	6,1	5,8	5
ΔP_{mech} [kW]	1,1	1,1	0
ΔP_d [kW]	12	11,81	2

*uvažován koeficient opracování $k_f = 1,5$ [25]

Hodnoty simulace v RMXprt byly získány na základě nadefinovaných vztahů v programu a hodnoty simulace v Maxwellu 2D byly získány pomocí metody konečných prvků. Výsledné hodnoty z RMXprt se zobrazují v jednoduchém datasheetu a z Maxwellu se zobrazují jako závislost určité veličiny na čase. Odečtené hodnoty ze závislostí se určují až v ustálené části grafu. Proud a napětí se odečítá jako efektivní hodnota a zbylé veličiny se odečítají jako střední hodnota. U ztrát v železe je uvažován koeficient opracování pro přesnější výsledky.

Největší procentuální rozdíl u veličin nastal u celkových a jednotlivých ztrát. Celkové ztráty se liší o 20,51 kW, tj. o 21 %. Největší procentuální rozdíl u jednotlivých ztrát nastal u ztrát v železe, které se liší o 21 kW, tj. o 27 %. Ztráty mechanické se u simulací neliší, protože jsou voleny na začátku simulace a jsou určeny již analytickým výpočtem. Ztráty v mědi se liší z důvodu jiného vypočteného proudu u jednotlivých simulací a liší se o 0,3 kW, tj. o 5 %. Po ztrátách se nejvíce liší proud strojů. Proud stroje z RMXprt je o 2,9 % větší než proud modelu stroje v Maxwellu. Model z Maxwellu má proud 299 A. Indukované fázové napětí se liší o 0,09 kV, tj. o 2,3 %. Nejmenší rozdíl nastal u momentu, kde procentuální rozdíl činil 0,2 %, tj. o 3 Nm. Účinnost stroje v RMXprt je 97,5 % a účinnost stroje z Maxwellu 96,8 %.



Obr. 6-1 Závislost momentu na čase z Maxwellu 2D

7 ZÁVĚR

Hlavním cílem této diplomové práce byl návrh vysokootáčkového synchronního stroje s permanentními magnety o velkém výkonu (3 MW) a srovnání provedených simulací tohoto stroje. Práce byla řešena pomocí analytického výpočtu a simulacemi daného modelu ve zvolených simulačních programech.

Teoretická část je zaměřena na obecnou teorii vysokootáčkových synchronních strojů. V první kapitole je pojednáváno o vývoji a trendu těchto elektrických strojů. Dále jsou zde uvedeny technologie a současné využití zmíněných strojů v průmyslu. V druhé kapitole jsou uvedeny základní informace o vysokootáčkových synchronních strojích s permanentními magnety. Kapitola popisuje složení jednotlivých částí stroje a popisuje nejkritičtější oblasti návrhu. V poslední podkapitole této části jsou srovnány vysokootáčkové synchronní a asynchronní stroje a zmíněny jejich výhody a nevýhody.

V praktické části se diplomová práce zabývá návrhem synchronního stroje s PM, analytickým výpočtem tohoto motoru, simulacemi provedené v simulačních programech a vyhodnocení výsledků. Výpočet je zaměřen na rozměry statoru, rotoru, permanentních magnetů, statorové drážky, statorového vinutí a účinnost stroje. Vstupní parametry pro návrh stroje byly dodané zadavatelem. Při návrhu stroje bylo zjištěno, že zadané parametry nesplňují podmínky pro vhodný návrh a při reálném provozu stroje se zadanými parametry, by mohlo dojít k destrukci stroje. Z tohoto důvodu byly vstupní parametry upraveny do takové podoby, aby navržený stroj splnil podmínky a mohl být funkční. Účinnost analyticky navrženého stroje vyšla 97,5 %.

Ve čtvrté kapitole jsou popsány simulace modelu navrženého stroje. Simulace probíhaly v programu RMxpert a Maxwellu 2D. Stroj s vypočtenými parametry byl simulován v programu RMxpert, kde bylo zjištěno, že motor nedosáhne požadovaného výkonu 3 MW. Byl dosažen pouze maximální výkon 2,21 MW. Z tohoto důvodu musely být pozměněny některé části stroje v simulaci. Byl upraven počet vodičů v drážce, délka svazku a výška permanentních magnetů, které vedly ke zvýšení výkonu modelu. Počet vodičů byl snížen z původně navržených 7 vodičů na 4 vodiče v drážce, a proto byly změněny i rozměry vodiče, aby byl dodržen zvolený činitel plnění drážky. Délka svazku byla zkrácena z 374 mm na 330 mm a výška permanentních magnetů zvětšena z původních 5,36 mm na 9 mm. Po těchto úpravách dosáhl model stroje požadovaného výkonu. Účinnost simulovaného modelu stroje v RMxpert byla 97,5 %. Tento model byl následně převeden do simulačního programu Maxwell, který pracuje na principu metody konečných prvků. Zde byly provedeny taková nastavení, aby stroj mohl být správně simulován i v tomto programu. Jednalo se především o nalezení ideálního natočení

rotoru a dostatečně zahuštěné elementy jednotlivých částí stroje. Délka simulace byla nastavena na 0,15 s krokem 2 μ s.

V poslední části práce jsou vyhodnocené veškeré výsledky získané v průběhu práce. V první části je navržený stroj s upravenými vstupními parametry srovnán s již odzkoušenými stroji podobného výkonu v tab. 11. V této tabulce jsou vypsány veškeré parametry, které byly k dispozici pro srovnání s navrženým strojem. Ve druhé části jsou srovnané simulace stroje, který má upravené parametry oproti stroji, který byl analyticky navržen. Simulace byly provedeny v programech RMxpert a Maxwell. Simulovaný stroj v Maxwellu má účinnost 96,8 % v porovnání se simulací v RMxpertu, kde účinnost simulovaného stroje byla o 0,7 % vyšší.

Literatura

- [1] PYRHÖNEN, J., JOKINEN, T., HRABAVCOVÁ, V. *Design of rotating electrical machines*, second edition. © 2014 John Wiley & Sons, Ltd. Published 2014 by John Wiley & Sons, Ltd.
- [2] A. Borisavljevic Limits, modeling and design of high – speed permanent magnet machines. S.1.: [s.n.], 2011. ISBN 9789085708377
- [3] World Energy Council (2013). *World Energy Resources 2013 A Survey*. [Online.] [Retrieved 22 October 2019]
Dostupné z: <https://www.worldenergy.org>
- [4] D. Gerada, A. Mebarki, N. Brown, C. Gerada, A. Cavagnino, and A. Boglietti. High-Speed electrical machines: Technologies, trends, and developments. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 61, no. 6, pp. 2946-2959, June 2014.
- [5] SANDER, Christian. *Referat Kommunikation und Marketing Presse – und Öffentlichkeitsarbeit* [online]. Köln, 2019 [cit. 22.10.2019]. Dostupné z: <https://www.th-koeln.de/hochschule/ein-elektromotor-in-jedem-rad-68864.php>
- [6] VOREL, Pavel. *Synchronní stroje s permanentními magnety*. Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2005, 109 s. ISBN 80-7204-417-6.
- [7] BRÁZDA, Miroslav a Rudolf STÁŇA. *Výpočet asynchronního motoru*. Brno: Výzkumný a vývojový ústav elektrických strojů točivých, 1973.
- [8] HENDERSHOT, J.R. a T.J.E. MILLER. *Design of Brushless Permanent-Magnet motors*. USA: Oxford University Press,. 1995. p. 584. ISBN 978-0198593898.
- [9] ARNOLD MAGNETIC TECHNOLOGIES CORPORATION. *Recoma catalog* [online]. 2019 [cit. 19.12.2019]. Dostupné z: <https://www.arnoldmagnetics.com/wp-content/uploads/2017/10/Recoma-Combined-160301.pdf>
- [10] KOPYLOV, Igor Petrovič. *Stavba elektrických strojů: celostátní vysokoškolská učebnice pro elektrotechnické fakulty vysokých škol technických*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1988.
- [11] ANSYS *RMxprt* [online]. Canonsburg: ANSYS, Inc., ©2019 [cit. 28.12.2019]. Dostupné z: <https://www.ansys.com/products/electronics/ansys-rmxprt>
- [12] ANSYS *Maxwell* [online]. Canonsburg: ANSYS, Inc., ©2019 [cit. 28.12.2019]. Dostupné z: <https://www.ansys.com/products/electronics/ansys-maxwell>
- [13] JUSSI LÄHTEENMÄKI. *Design and voltage supply of high-speed induction machines*. Helsinky: Finnish Academies of Technology, 2002. ISBN 9516666078
- [14] NOVÁK, Jaroslav, NOVÁK, Martin a CHYSKÝ, Jan. Řízení vysokootáčkových synchronních strojů. *Elektro*. Praha: FCC PUBLIC, 2011, 6(7), 6-9.

- [15] ŠOLC, Martin. *Návrh vysokootáčkového elektrického stroje*. Brno, 2019. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/117008>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky. Vedoucí práce Martin Mach.
- [16] BÁRTA, J. *Návrh elektrického stroje 6kW, 120 000 ot/min pro turbo – cirkulátor hélia*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2018. 115 s. Vedoucí disertační práce doc. Ing. Čestmír Ondrůšek, CSc..
- [17] BOGOMOLOV, M.D. (2013). *Concept study of 20 MW high – speed permanent magnet synchronous motor for marine propulsion*. Eindhoven: Technische Universiteit Eindhoven.
- [18] GIERAS, Jacek Franciszek. *Permanent magnet motor technology: design and applications*. 3rd ed. Boca Raton: CRC Press, c2010, xiv, 612 s. Third Edition. ISBN 978-1-4200-6440-7.
- [19] KURFURST, J. *Optimalizace stroje s permanentními magnety na rotoru pomocí umělé inteligence*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2013, 132s. Vedoucí dizertační práce doc. Ing. Čestmír Ondrůšek, CSc.
- [20] THE MILLER. *SPEED's Electric Machines: An outline of some of the theory in the SPEED software for electric machine design with problem and solutions*. Univesrity of Glasgow, 2002-2009.
- [21] BIANCHI, N.; BOLOGNANI, S.; FRARE, P.; , "Design criteria for high – efficiency SPM synchronous motors," *Energy Conversion IEEE Transactions on*, vol. 21, no.2, pp. 396 – 404, June 2006 ISSN 0885-8969
- [22] VÍTEK, Ondřej. *Výpočet magnetického obvodu BLCD motoru s permanentními magnety: Studijní podklady* [online]. Brno, 2012 [cit. 2020-03-28].
- [23] BUREŠ, P. *Návrh synchronního stroje s permanentními magnety*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2018. 89s. Vedoucí práce: doc. Ing. Ondřej Vítek, Ph.D.
- [24] HRABOVCOVÁ, Valéria, Ladislav JANOUŠEK, Pavol RAFAJDUS a Miroslav LIČKO. *Moderné elektrické stroje*. Žilina: EDIS, 2001. ISBN 80-7100-809-5.
- [25] BRÁZDA, Miroslav a Rudolf STÁŇA. *Výpočet asynchronního motoru*. Brno: Výzkumný a vývojový ústav elektrických strojů točivých, 1973.

Seznam symbolů, veličin a zkratek

l_{δ}	-	Vzduchová mezera	[mm]
ΔP_h	-	Hysterezní ztráty	[W]
ΔP_{cu}	-	Ztráty ve vinutí	[W]
ΔP_d	-	Dodatečné ztráty	[W]
ΔP_{fe}	-	Ztráty ve statorovém železe	[W]
ΔP_v	-	Vířivé ztráty ve statoru	[W]
C_{mech}	-	Mechanická konstanta	[kWsm ⁻³]
H_{PM}	-	Intenzita permanentního magnetu	[kAm ⁻¹]
N_z	-	Počet závitů v sérii	[-]
R_{cu}	-	Odpor statorového vinutí	[Ω]
$U_{mreakce}$	-	Magnetické napětí	[A]
V_r	-	Objem rotoru	[m ³]
b_p	-	Efektivní hodnota pólového krytí	[m]
c_a	-	Koeficient	[-]
c_v	-	Koeficient	[-]
k_{ad}	-	Činitel reakce kotvy v D – ose	[-]
k_c	-	Carterův činitel	[-]
k_f	-	Tvarový činitel	[-]
k_{fd}	-	Tvarový faktor v D – ose	[-]
k_{pcu}	-	Činitel plnění mědi	[-]
$k_{w(v)}$	-	Činitel vinutí	[-]
l_{PM}	-	Výška permanentních magnetů	[m]
l_{min}	-	Minimální délka vzduchové mezery	[mm]
l_z	-	Šířka otevření statorové drážky	[m]
r_{δ}	-	Střední poloměr vzduchové mezery	[m]
w_t	-	Šířka statorového zubu	[m]
μ_0	-	Permeabilita	[Hm ⁻¹]
μ_{rPM}	-	Permeabilita permanentního magnetu	[-]

ρ_{125}	-	Rezistivita mědi	[Ωm]
σ_p	-	Výstupní koeficient	[$VAsm^{-1}$]
σ_{tan}	-	Tangenciální napětí	[Pa]
τ_{sd}	-	Drážková rozteč na středním poloměru vzduchové mezery	[m]
ΔP_{mech}	-	Mechanické ztráty	[W]
ΔP	-	Celkové ztráty	[W]
$2p$	-	Počet pólů	[-]
a	-	Šířka zubu	[mm]
A	-	Počet paralelních větví	[-]
B	-	Magnetická indukce	[T]
b	-	Šířka drážky	[mm]
c	-	Délka drážky	[mm]
$CoFe$	-	Kobalt – železo	[-]
D_r	-	Vnější průměr rotoru	[mm]
D_{vnej}	-	Vnější průměr statoru	[mm]
D_{vnit}	-	Vnitřní průměr statoru	[mm]
f	-	Frekvence	[Hz]
F	-	Magnetické napětí	[A]
h	-	Výška	[mm]
H_c	-	Koercitivní síla	[kAm^{-1}]
I	-	Proud	[A]
k_{pl}	-	Činitel plnění	[-]
l	-	Délka stroje	[mm]
m	-	Váha	[kg]
m	-	Hmotnost	[kg]
M_n	-	Jmenovitý moment	[Nm]
N	-	Počet vodičů na pól a fázi	[-]
n	-	Otáčky	[s^{-1}]
$NdFeB$	-	Neodymové magnety	[-]
n_n	-	Jmenovité otáčky	[min^{-1}]

O	-	Obvod	[m]
P	-	Výkon	[W]
p	-	Počet pólů	[-]
Q	-	Počet drážek	[-]
r	-	Poloměr	[mm]
S	-	Průřez	[mm ²]
$SiFe$	-	Křemík – železo	[-]
U	-	Napětí	[V]
U_i	-	Indukované napětí	[T]
V	-	Objem	[m ³]
v	-	Úhlová rychlost	[ms ⁻¹]
Z	-	Počet vodičů v drážce	[-]
η	-	Účinnost	[%]
κ	-	Konstanta	[-]
σ	-	Proudová hustota	[Amm ⁻²]
ω	-	Úhlová rychlost	[rads ⁻¹]
η	-	Účinnost	[%]
τ	-	Pólová rozteč	[m]

Seznam příloh

Příloha A – Datasheet oceli M235-35A

Příloha B – Datasheet oceli 41CrMo4

Příloha C – Datasheet magnetu Sm₂Co₁₇

Příloha 1. – Výsledky provedených simulací

Příloha A – Datasheet oceli 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

Příloha B – Datasheet oceli 41CrMo4

ČSN 41 5142		Cr–Mo ocel k zušlechťování				OCEL	
STN 41 5142		a povrchovému kalení				15 142	
Chemické složení [hm. %]							
C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	P	S
0,38–0,45	0,50–0,80	0,17–0,37	0,90–1,20	max 0,50	0,15–0,30	max 0,035	max 0,035
Polotovary							
[1] tyče válcované za tepla							
[2] výkovky							
Mechanické vlastnosti							
Polotovary	[1]						
Rozměr t, d [mm]	–	40 ¹⁾	≤ 16	16-40	40-100	100-160	
Stav	.3	.7					
Mez kluzu R_e nebo R_p 0,2 [MPa] min	–	765	883	765	637	559	
Mez pevnosti R_m [MPa]	–	981-1 177	1 079-1 275	981-1 177	883-1 079	785-932	
Tažnost A_5 [%] min podél	–	11	10	11	12	13	
Kontrakce Z [%] min	–	45	40	45	50	55	
Vrubová houževnatost KCU 3 [J.cm ⁻²] min	–	49	–				
Tvrdost HB	max 217	300-359	–	–	–	–	
Modul pružnosti E [GPa]	216						
Modul pružnosti ve smyku G [GPa]	83						
Polotovary	[2]						
Rozměr t, d [mm]	≤ 250		250-500		≤ 250		
Stav	.6				.7		
Mez kluzu R_e nebo R_p 0,2 [MPa] min	539		490		569		
Mez pevnosti R_m [MPa] min	735		686		785		
Tažnost A_5 [%] min	podél 14 tang. 11		podél 15 tang. 12		podél 13 tang. 11		
Vrubová houževnatost KCU 3 [J.cm ⁻²] min	podél 39,2 tang. 34,3		podél 39,2 tang. 29,4		podél 34,3 tang. 29,4		
Mez kluzu R_p 0,2 [MPa] min při 300 °C	431		392		441		
Mez kluzu R_p 0,2 [MPa] za zvýš. teplot	20 °C	100 °C	200 °C	250 °C	300 °C	350 °C	400 °C
	765	740	690	650	610	540	455
	560	535	490	460	430	395	355
Fyzikální vlastnosti							
Hustota ρ [kg.m ⁻³]	Měrná tepelná kapacita c_p [J.kg ⁻¹ .K ⁻¹]	Teplotní součinitel roztažnosti α [K ⁻¹]		Tepelná vodivost λ_t [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]		Rezistivita ρ [Ω.m]	
7 850	–	11,1.10 ⁻⁶		42		190.10 ⁻⁹	

Příloha C – Datasheet permanentních magnetů SM₂Co₁₇

RECOMA® 35E

Record Breaking Performance at Higher Temperatures

Magnetic Properties

Characteristic	Units	Min.	Nominal
Br	Gauss	11,700	11,900
Residual Induction	Tesla	1.170	1.190
H _{cb}	Oersteds	10,810	11,060
Coercivity	kA/m	860	880
H _{ci}	Oersteds	21,000	23,000
Intrinsic Coercivity	kA/m	1,710	1,800
BHmax	MG0e	32.0	33.3
Max. Energy Product	kJ/m ³	255	265

Thermal Properties

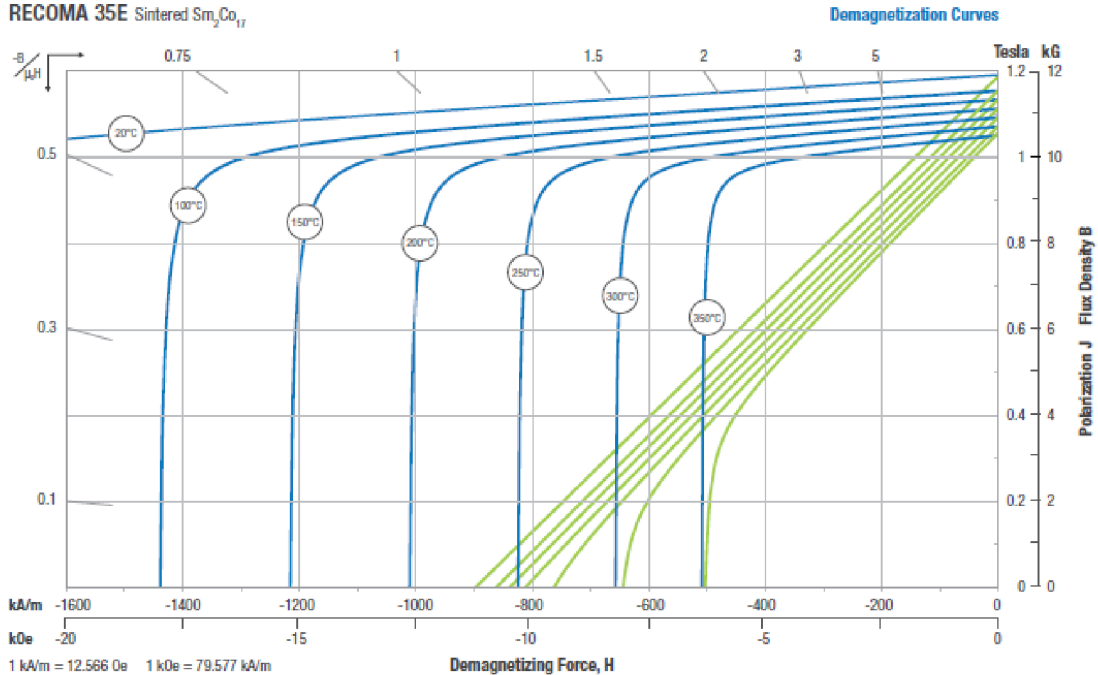
Characteristic	Units	C//1 C ₁
Reversible Temp. Coefficients ⁽¹⁾ of Induction, α(Br) of Coercivity, α(H _{ci})	%/°C	-0.035 -0.25
Coefficient of Thermal Expansion ⁽²⁾	ΔL/L/°Cx10 ⁻⁶	11 13
Thermal Conductivity	W/m-°C	10
Specific Heat ⁽³⁾	J/(kg•K)	350
Max. Recommended Use Temp.	°C	300
Curie Temperature, T _c	°C	820

Other Properties

Characteristic	Units	C//1 C ₁
Flexural Strength	psi MPa	17,400 120
Compressive Strength	psi MPa	116,000 800
Young's Modulus	GPa	140
Density	Mg/m ³	8.3
Hardness, Vickers	Hv	600
Electrical Resistivity, ρ	μΩ • cm	90

⁽¹⁾ Coefficients measured between 20 and 200 °C ⁽²⁾ Between 20 and 200 °C ⁽³⁾ Between 20 and 150 °C

RECOMA 35E Sintered Sm₂Co₁₇



ARNOLD MAGNETIC TECHNOLOGIES | US: 585.385.9010 infoNA@arnoldmagnetics.com | arnoldmagnetics.com
UK: (+44) (0) 1909 772021 infoUK@arnoldmagnetics.com | CH: (+41) (0) 56 464 21 00 infoEU@arnoldmagnetics.com

