

**VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroenergetiky**

**Měření na axiálním generátoru malého výkonu
Measurement of Axial Generator of Low Power**

2012

Petr Kopřiva

Zadání bakalářské práce

Student: **Petr Kopřiva**
Studijní program: B2649 Elektrotechnika
Studijní obor: 3907R001 Elektroenergetika
Téma: **Měření na axiálním generátoru malého výkonu**
Measurement of Axial Generator of Low Power

Zásady pro vypracování:

1. Úvod
2. Provedte měření základních charakteristik naprázdno a nakrátko axiálního generátoru
3. Provedte měření generátoru při definované odporové zátěži
4. Závěrečná zhodnocení
5. Závěr

Seznam doporučené odborné literatury:


- KOPYLOV, Igor, Petrovič. Stavba elektrických strojů, 1988, SNTL/MIR
- CIGÁNEK, Ladislav. Stavba elektrických strojů, Praha, 1958, SNTL
- Katalogy a katalogové listy
- Odborné a technické www stránky
- Technické normy

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Petr Kačor, Ph.D.**

Datum zadání: 30.11.2011

Datum odevzdání: 04.05.2012



prof. Ing. Stanislav Rusek, CSc.
vedoucí katedry



prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

Dne: 29. 2. 2012



Kopriva

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Petru Kačorovi, Ph.D. za odbornou pomoc, cenné profesionální rady, připomínky, ochotu, pomoc s literaturou, vysvětlení nejasných záležitostí a metodické vedení práce.

Abstrakt

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na měření na axiálním generátoru malého výkonu. Ve zkratce popisuje jednotlivé typy konstrukcí a podrobněji pak typ generátoru s vnitřním statorem a dvojitým vnějším rotorem. Popisuje jeho konstrukci, použité materiály a výrobu. V souvislosti s vypracováním této práce byla provedena tři měření a to naprázdno, nakrátko a při odporové zátěži. Byly vyneseny základní charakteristiky pro jednotlivá měření a ty byly následně porovnány s teoretickými předpoklady.

Klíčová slova

Axiální generátor, měření naprázdno, měření nakrátko, měření při zatížení, permanentní magnety

Abstract

The present bachelor thesis is focused on measuring the axial generator of low power. In short describes different types of design and in more detail the type of generator with internal stator and twin external rotor. It describes its design, materials and production. In context of this work was made three measurements and no-load, short circuit and resistive load. Basic characteristics were plotted for each measurement and these were compared with theoretical assumptions.

Key words

Axial generator, no-load measurement, short circuit measurement, load measurement, permanent magnets

Seznam použitých zkratek a symbolů

$\cos \varphi$	Fázový posuv	-
n	Otáčky za minutu	$\text{Ot} \cdot \text{min}^{-1}$
p	Tlak	Pa
δ	Velikost vzduchové mezery	m
η	Účinnost	- (%)
ω	Úhlová rychlost	$\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$
T	Teplota	$^{\circ}\text{C}$
Al	Hliník	
B	Magnetická indukce	T
B	Bor	
Ba	Baryum	
Br	Remanentní magnetická indukce	
Co	Kobalt	
Fe	Železo	
H	Intenzita magnetického pole	$\text{A} \cdot \text{m}^{-1}$
Hc	Koercitivní síla	$\text{A} \cdot \text{m}^{-1}$
I	Elektrický proud	A
M	Krouticí moment	Nm
Nd	Neodym	
Ni	Níkl	
P	Výkop	W
Pb	Olovo	
PM	Permanentní magnet	
P_p	Příkon	W
Si	Křemík	
Sm	Samarium	
Sr	Stroncium	
U	Elektrické napětí	V
Φ	Magnetický tok	Wb
R	Odpor	Ω

Obsah

1	Úvod.....	1
2	Úvod do axiálních strojů	2
	2.1 Generátory	2
	2.2 Axiální stroje s permanentními magnety.....	2
	2.2.1 Stroje axiální oproti strojům s radiálním tokem	2
	2.2.2 Jednostranné stroje	4
	2.2.3 Oboustranné stroje s vnitřním plochým rotorem s permanentními magnety.....	5
	2.2.4 Oboustranné stroje s kruhovým vnitřním statorom	5
3	Materiál a výroba.....	6
	3.1 Statorová jádra.....	6
	3.1.1 Neorientovaná elektrotechnická ocel.....	6
	3.1.2 Měkké magnetické práškové složeniny	6
	3.2 Magnetický obvod rotoru	7
	3.2.1 Permanentní magnety	7
	3.3 Konstrukce generátoru s vnitřním statorom a dvojitým vnějším rotorem	10
	3.3.1 Magnetický obvod	10
	3.3.2 Vinutí statoru axiálního motoru s dvojitým vnějším rotorem.....	13
4	Měření generátoru	15
	4.1 Parametry generátoru	16
	4.2 Měřicí stanoviště	16
5	Měření naprázdno.....	17
	5.1 Rozbor	17
	5.2 Schéma zapojení.....	17
	5.3 Použité přístroje.....	17
	5.4 Postup měření	17
	5.5 Naměřené hodnoty	18
	5.6 Graf.....	19
	5.7 Závěr.....	19
6	Měření nakrátko	20
	6.1 Rozbor	20
	6.2 Schéma zapojení.....	20

6.3	Použité přístroje.....	20
6.4	Postup měření.....	20
6.5	Naměřené hodnoty:	21
6.6	Graf.....	21
6.7	Závěr.....	21
7	Měření při odporové zátěži.....	22
7.1	Rozbor	22
7.2	Schéma zapojení.....	22
7.3	Použité přístroje.....	22
7.4	Postup měření.....	23
7.5	Naměřené hodnoty	23
7.6	Příklad výpočtu.....	26
7.7	Graf.....	27
7.8	Závěr.....	27
8	Závěr.....	28
	Použitá literatura	29
	Seznam příloh.....	i

1 Úvod

V první části této práci se snažím podrobněji popsat axiální stroje. Popisuji zde jednotlivé typy konstrukcí, použití, porovnání se stroji s radiálním tokem, dále pak jejich výrobu a materiály, ze kterých jsou stroje vyráběny. Podrobněji se pak zaměřuji na generátor s vnitřním statorem a dvojitým vnějším rotorem, jelikož měřený generátor je tohoto typu. V další části této práce, jenž se zabývá přímo měřením, popisuji měřicí stanoviště a parametry měřeného generátoru a dále pak samotné měření základních charakteristik, jako je naprázdno, nakrátko a při zatížení.

2 Úvod do axiálních strojů

2.1 Generátory

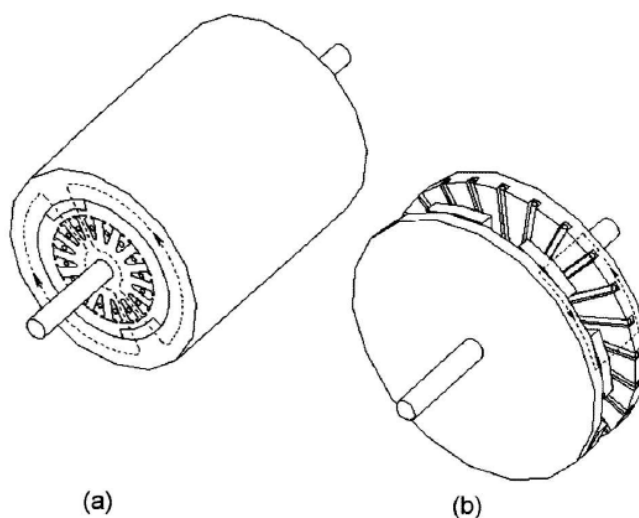
Generátor je elektrický stroj, který přeměňuje mechanickou energii na elektrickou. Jedná se o točivé stroje, které využívají točivé magnetické pole a cívky, ve kterých se za pomoci elektromagnetické indukce indukuje elektrické napětí. Základní dělení elektrických generátorů je podle toho jaký proud vytvářejí. Mohou to být alternátory, produkující střídavý proud, nebo dynamo na proud stejnosměrný.

2.2 Axiální stroje s permanentními magnety

V principu elektromagnetické konstrukce je axiální stroj s permanentními magnety obdobný jako stroj s radiálním tokem s válcovým rotorem. Z hlediska mechanického návrhu, tepelné analýzy a montáže jsou složitější. Axiální stroj s permanentními magnety, také nazývaný stroj s diskovým rotorem, je atraktivní alternativou k válcovému stroji s radiálním tokem, a to díky svému tvaru, ploché a kompaktní konstrukci a vysokou hustotou výkonu. Axiální stroje s permanentními magnety jsou zvláště vhodné pro elektrická vozidla, čerpadla, ventilátory, odstředivky, obráběcí stroje, a jiná průmyslová zařízení. Velké průměry rotoru s vysokým momentem setrvačnosti mohou být využity jako setrvačníky. Axiální stroje s permanentními magnety mohou také pracovat jako generátory malých a středních výkonů. Protože je možné umístit velké množství pólů, jsou stroje ideální jako pomaloběžné stroje, například trakční pohony, pohony výtahů nebo stroje do větrných elektráren. Plochý profil rotoru a statoru strojů umožňuje vytvářet různorodých a vzájemně zaměnitelných návrhů. Stroje mohou být navrženy s jednou vzduchovou mezerou nebo s více vzduchovými mezerami, s drážkami nebo bez nich. Axiální stroje s permanentními magnety malého výkonu jsou často koncipovány jako stroje bez drážek a s povrchovými magnety. [1]

2.2.1 Stroje axiální oproti strojům s radiálním tokem

S využitím nových materiálů, inovací ve výrobních technologiích a díky zlepšení technologií chlazení, je možné další zvyšování hustoty výkonu (výkon na hmotnost nebo objem) elektrických strojů. Axiální stroj s permanentními magnety má vyšší hustotu výkonu než stroj s radiálním tokem a je mnohem kompaktnější.



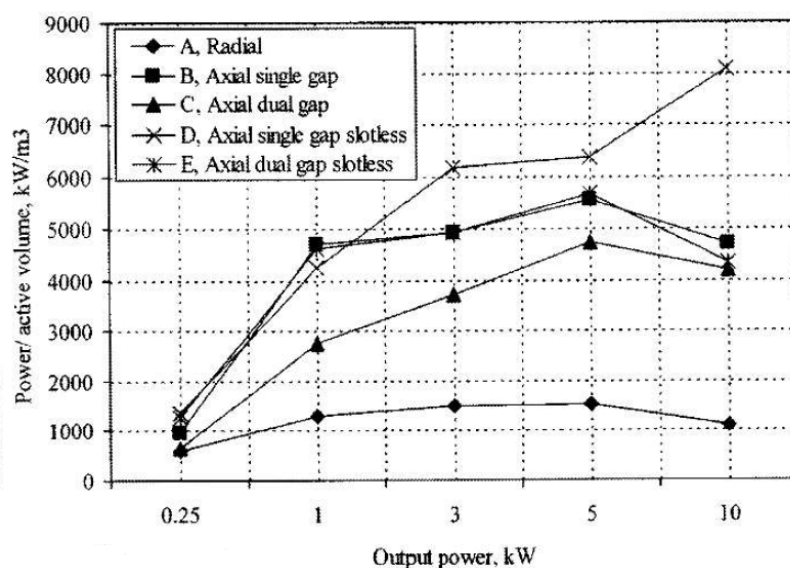
Obrázek 2-1 Porovnání a) radiální stroj s permanentními magnety, b) axiální stroj s permanentními magnety

Protože vnitřní průměr jádra stroje s axiálním tokem je obvykle mnohem větší, než je průměr hřídele, můžeme očekávat lepší ventilaci a chlazení. Obecně platí, že speciální vlastnosti axiálních strojů zapříčiňují, že jsou v některých aplikacích výhodnější než stroje radiální.

Výhody:

- axiální stroje mají mnohem větší poměr průměru k délce než radiální
- axiální stroje mají rovinnou a do jisté míry nastavitelnou vzduchovou mezeru
- správné navržení má za následek vyšší hustotu výkonu s úsporou materiálu
- stroje se dobře navrhují na požadavky jako je výkon a točivý moment
- mají větší vnější průměr jádra, tím pádem vyšší je počet pólů, které mohou být využity pro generování vysokých frekvencí, nebo pro pomalé pohony

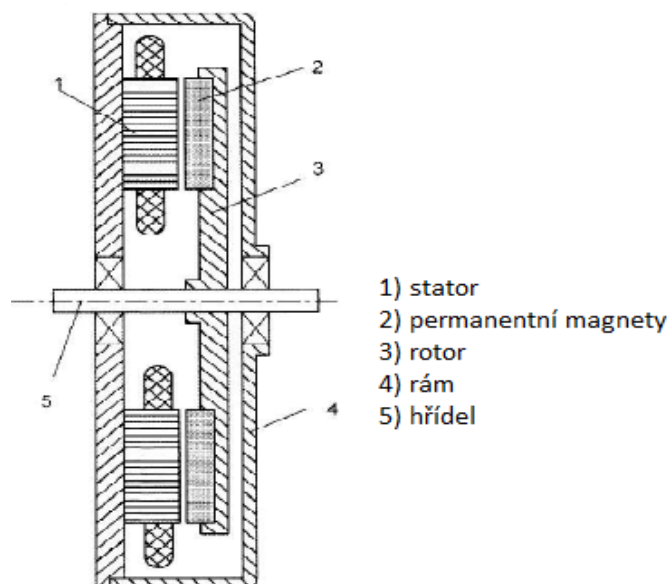
Z těchto důvodů jsou axiální stroje vhodné zejména pro servopohony, trakci, necentrální výrobu a různé jiné speciální aplikace, kde jejich vlastnosti nabízí různé výhody oproti konvenčním strojům pracujících s radiálním tokem. [1]



Obrázek 2-2 Srovnání výkonů na objem axiálních a radiálních strojů

2.2.2 Jednostranné stroje

Jednostranná konstrukce stroje s axiálním tokem je jednodušší než oboustranná, ale jejich točivý moment nižší. Obr. 2-3 ukazuje obvyklou stavbu střídavého jednostranného axiálního stroje s permanentními magnety na povrchu rotoru a statoru ze svazků elektrotechnických ocelových pásů. Má standardní rám a hřídel.



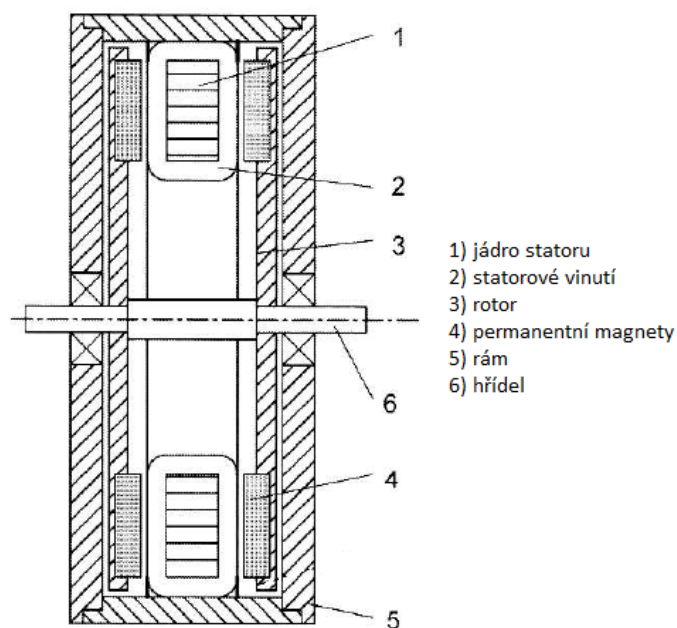
Obrázek 2-3 konstrukce jednostranného stroje

2.2.3 Oboustranné stroje s vnitřním plochým rotorem s permanentními magnety

V oboustranném stroji s rotorem s permanentními magnety se vinutí kotvy nachází na dvou jádrech statoru. Plochý rotor s magnety se otáčí mezi dvěma statory. Magnety jsou vloženy nebo lepeny na nemagnetickou kostru rotoru. Vzduchová mezera je velká, jelikož celková vzduchová mezera je rovna dvěma mechanickým mezerám plus tloušťce permanentních magnetů s relativní permeabilitou blíží se k jedné. Oboustranné stroje s paralelně zapojenými statory mohou fungovat, i když je jedno vinutí statoru poškozené. Na druhou stranu, přednostní sériového zapojení je, že vinutí vytváří stejně velké, ale opačně orientované síly.

2.2.4 Oboustranné stroje s kruhovým vnitřním statorem

Oboustranný stroj bývá vícefázový. Kotevní vinutí je usazené na povrchu feromagnetického statoru. V tomto stroji je kruhové jádro statoru tvořeno průběžnými ocelovými pásky. Celková vzduchová mezera je rovna součtu tloušťky vinutí statoru s izolací, mechanické mezery a tloušťky permanentních magnetů v axiálním směru. Oboustranný rotor nazývaný dvojitý rotor s permanentními magnety, se nachází na obou stranách statoru.



Obrázek 2-4 konstrukce oboustranného stroje s vnitřním statorem

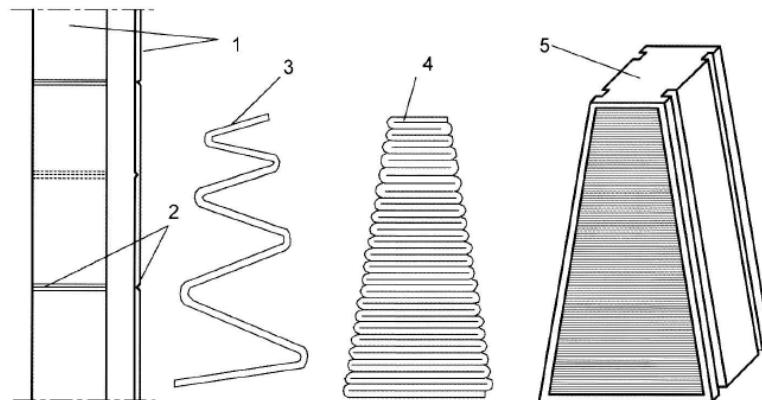
3 Materiál a výroba

3.1 Statorová jádra

Statorová jádra axiálních strojů jsou vyráběna z vrstvených ocelových plátů nebo měkkých magnetických práškových materiálů. Měkké magnetické práškové materiály zjednodušují výrobu a snižují výrobní náklady těchto strojů.

3.1.1 Neorientovaná elektrotechnická ocel

Většina vrstvených jader pro statory axiálních strojů je vyráběna z neorientovaných ocelových pásů o standardní tloušťce od 0,12 na 0,64 mm. Neorientovaná ocel je slitinou Fe a Si s náhodnou orientací krystalové mřížky. Magnetické vlastnosti jsou prakticky stejné v každém rovinném směru plechu nebo pásy. Sekundární rekrytalizace či žíhání za vysoké teploty není nezbytné. Plně zpracované neorientované elektrotechnické oceli jsou zcela zpracovány ve výrobě, připraveny k použití bez dalších úprav, nezbytných pro dosažení požadované magnetické kvality. Polo zpracované neorientované oceli jsou ty, které nebyly plně vyžehány ze strany výrobce oceli.



Obrázek 3-1 Segment statorového jádra skládaný z ocelového pásu

Na obr. 3-1 popisky znamenají: 1- ocelový pás, 2- drážka 3- skládání ocelového pásu, 4- slisování pásu, 5- hotový segment

3.1.2 Měkké magnetické práškové složeniny

Prášková metalurgie se používá při výrobě feromagnetických jader malých elektrických strojů nebo feromagnetických jader se složitými tvary. Měkké magnetické práškové materiály jsou složeny z železného prášku, dielektrika (epoxidové pryskyřice) a výplně (sklo nebo uhlíková vlákna) pro mechanické upevnění. Práškové směsi pro feromagnetická jádra elektrických strojů a přístrojů mohou být rozděleny na

- dielektromagnetické a magnetodielektrické směsi
- magnetické sintry

Dielektromagnetické a magnetodielektrické jsou pojmenovány podle složek, ze kterých se skládají: feromagnetických, (převážně železný prášek) a dielektrických (většinou epoxidové pryskyřice) [1]

Mezi hlavní úkoly dielektrických materiálů je izolace a vázání feromagnetických částic. V praxi, složeniny obsahující až 2% (na jejich hmotnost) dielektrických materiálů, jsou považovány za dielektromagnetické. Ty s vyšším obsahem dielektrického materiálu jsou považovány za magnetodielektrické.

3.2 Magnetický obvod rotoru

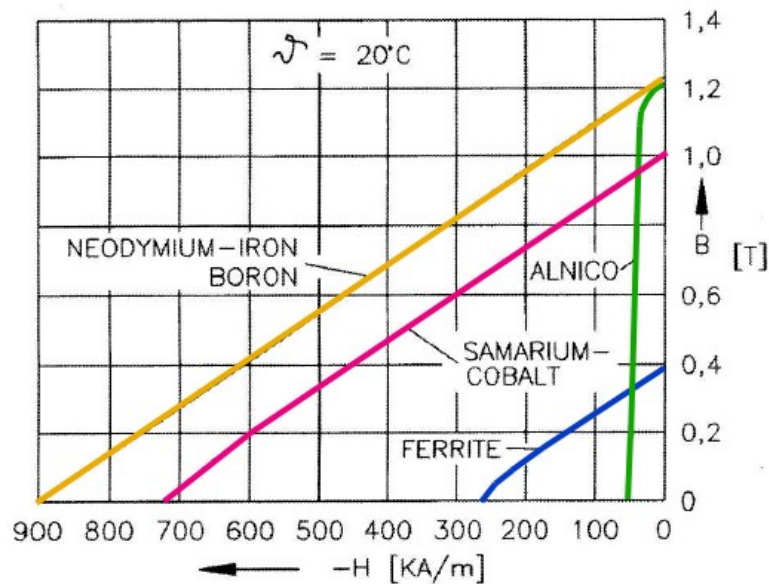
Magnetické obvody rotorů se skládají z permanentních magnetů a z ocelových podložek nebo disků. Vzduchová mezera je poněkud větší než u podobných strojů s radiálním tokem. Za normálních okolností jsou povrchové magnety lepeny do opěrných prstenů s dutinou stejného tvaru jako magnety, nebo přímo na rotorový disk. Pro lepení magnetů a opěrných kroužků se používají epoxidová, akrylátová nebo silikonová lepidla. Minimální požadovaná pevnost lepidel je 20 MPa.

3.2.1 Permanentní magnety

Permanentní magnety mohou produkovat magnetický tok ve vzduchové mezeře bez použití vinutí a bez ztrát elektrické energie. Stejně jako jakýkoliv jiný feromagnetický materiál můžeme permanentní magnet popsat jeho B-H hysterezní smyčkou. PM jsou magneticky tvrdé materiály, což znamená, že má širokou hysterezní smyčku. Základem pro hodnocení permanentních magnetů je část jejich hysterezní smyčky, která se nachází v levém horním kvadrantu, tzv. demagnetizační křivka.

Tři základní typy magnetů používané v elektrických motorech:

- Alnico (Al, Ni, Co, Fe)
- Magneticky tvrdé ferity (barnaté a strontnaté ferity)
- Magnety ze vzácných zemin



Obrázek 3-2 Demagnetizační křivka různých typu permanentních magnetů

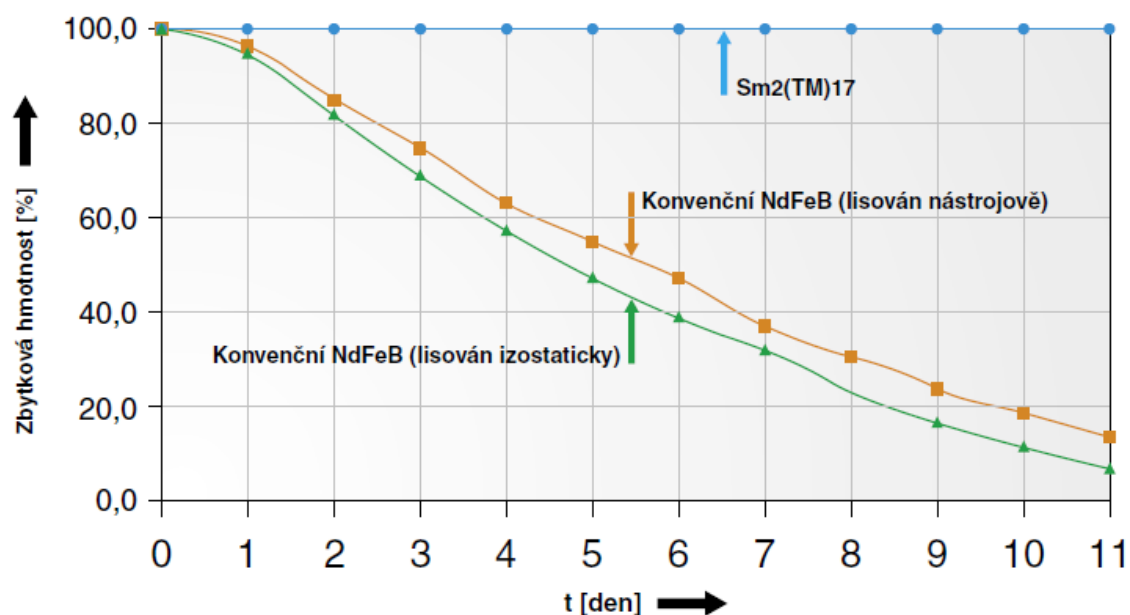
Alnico magnety ovládly trh s motory v rozmezí od několika W do 150 kW v období od 40. do 60. let minulého století. Mezi hlavní výhody těchto magnetů patří vysoká magnetická remanentní indukce a nízké teplotní koeficienty. Teplotní koeficient B_r je 0.02% na 1°C a maximální provozní teplota je 520°C . Bohužel, koercitivní síla je nízká a demagnetizační křivka je velmi nelineární. Proto je velmi snadné nejen magnetizovat, ale i demagnetizovat. Alnico byl používán ve stejnosměrných komutátorových motorech diskového typu s relativně velkými vzduchovými mezerami.

Barnaté a strontnaté ferity, vyráběné práškovou metalurgií, byly vynalezeny v 50. letech minulého století. Jejich chemické složení může být vyjádřeno jako MO_x6 (Fe_2O_3), kde M je Ba, Sr nebo Pb. Feritové magnety mohou být vyráběny jako izotropní a anizotropní. Izotropní magnety mají ve všech směrech téměř stejné magnetické vlastnosti. Tyto magnety jsou lisovány bez přítomnosti magnetického pole z izotropních materiálů. Nemají žádnou přednostní osu magnetizace, takže mohou být magnetovány v jedné ze tří os podle potřeby. Kdežto anizotropní mají dobré magnetické vlastnosti pouze v jednom směru a tj. právě v přednostní ose magnetizace. Prioritní osu magnetování získávají právě tím, že jsou lisovány v magnetickém poli. V jiné ose než v této magnetovány nemohou být. Používají se obdobně jako magnety izotropní, avšak při stejném objemu dosahují většího magnetického toku a některé typy mají hodnotu remanentní magnetické indukce až 1,5 - 2 krát vyšší. U anizotropních magnetů je prioritní směr magnetování totožný se směrem orientace magnetizace. Ferity mají vyšší koercitivní sílu než Alnico, ale zároveň mají nižší remanentní magnetickou indukce. Teplotní koeficienty jsou relativně vysoké, tj. koeficient B_r je $0,20\% / ^\circ\text{C}$ a koeficient H_c je $0,27\text{--}0,4\% / ^\circ\text{C}$. Maximální provozní teplota je 450°C . Mezi hlavní výhody feritů patří jejich nízká cena a velmi vysoký elektrický odpor, což prakticky znamená, že v jejich objemu nevznikají skoro žádné

ztráty způsobené vířivými proudy. Barnaté ferity se běžně používají v malých komutátorových motorech pro automobily (ventilátory, stěrače, čerpadla, atd.) a například v elektrických hračkách.

První generace permanentních magnetů vzácných zemin, tj. slitiny založené na složení SmCo_5 byl komerčně vyráběny od počátku 70. let (vynalezeny 60. letech). Jejich výhodou je vysoká remanentní indukce, vysoké koercitivní síly, lineární demagnetizační křivka a nízký teplotní koeficient. Koeficient B_r je 0,02 až 0,045% / °C a teplotní koeficient H_c je 0.14 - 0.40% / °C. Maximální provozní teplota je 300 až 350 °C. [1]

V posledních letech, kdy byla objevena druhá generace magnetů vzácných zemin na bázi levného neodymu, byla dosažena velká úspora nákladů. Nd je mnohem hojnější prvek vzácných zemin, než Sm. NdFeB magnety, které jsou nyní vyráběny v hojném počtu, mají lepší magnetické vlastnosti než SmCo, ale bohužel jen při pokojové teplotě. Demagnetizační křivka a zejména koercitivní síla je silně teplotně závislá. Teplotní koeficient B_r je 0,09 - 0.15% / °C a teplotní koeficient H_c je 0,40 až - 0,80% / °C. Maximální provozní teplota je 250 °C. NdFeB je také náchylný na korozi. V oxidační atmosféře v autoklávu (130°C, 3 bar, nasycená vodní pára) byl ve srovnání s materiály SmCo zjištěn 100 až 1000 násobný úbytek jejich hmotnosti. [1,2]

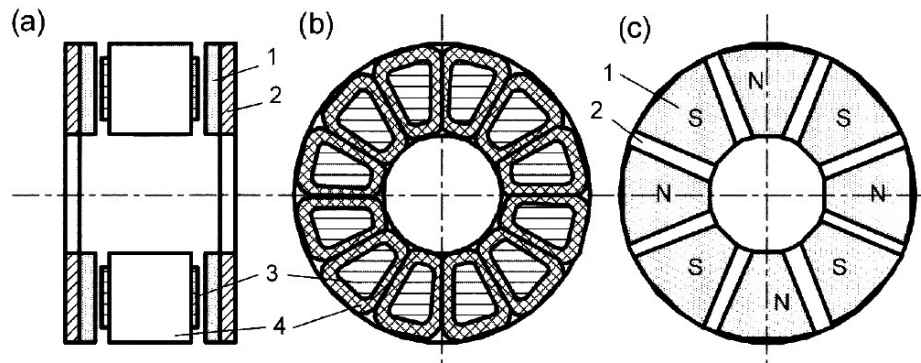


Obrázek 3-3 Korozní chování konvenčního NdFeB v autoklávu při 130°C a 3 bar v nasycené vodní páře. Stupnice obsahuje od 0 do 100%.

Tyto magnety mají velký potenciál pro zlepšení poměru ceny a výkonu pro mnoho aplikací. Z tohoto důvodu budou v budoucnu ve strojích s permanentními magnety nejčastěji používány.

3.3 Konstrukce generátoru s vnitřním statorem a dvojitým vnějším rotorem

Generátor, na němž je prováděno měření, je axiální stroj s vnitřním statorem a dvojitým vnějším rotorem.



Obrázek 3-4 Axiální stroj s vnitřním statorem a dvojitým vnějším rotorem

Na obr. 3-5 popisky znamenají: 1 – permanentní magnety, 2 – jádro rotoru, 3 – póly statoru ($2p=8$), 4 – vinutí statoru.

Výpočetní metodika návrhu základních rozměrů a hlavních parametrů asynchronních či synchronních strojů s radiálním magnetickým polem je poměrně dobře zmapovaná a vychází z vnitřního výkonu stroje, který je úměrný jeho kubatuře - D^2L , kde D je vnitřní průměr statoru a L je délka statorového svazku. [3]

Toto nelze tvrdit u strojů s axiálním magnetickým tokem. Nejdůležitějším rozměrem pro tyto stroje je vnější průměr rotoru - D_{OUT} , který je v kubické závislosti s výstupním výkonem stroje. Výpočetní metodiku, určující základní rozměry a parametry axiálního stroje, použijeme pro hrubý návrh magnetického obvodu stroje a vlastní výpočet základních rozměrů upřesníme pomocí konečno-prvkových metod (FEM) na základě numerického modelu magnetického obvodu.

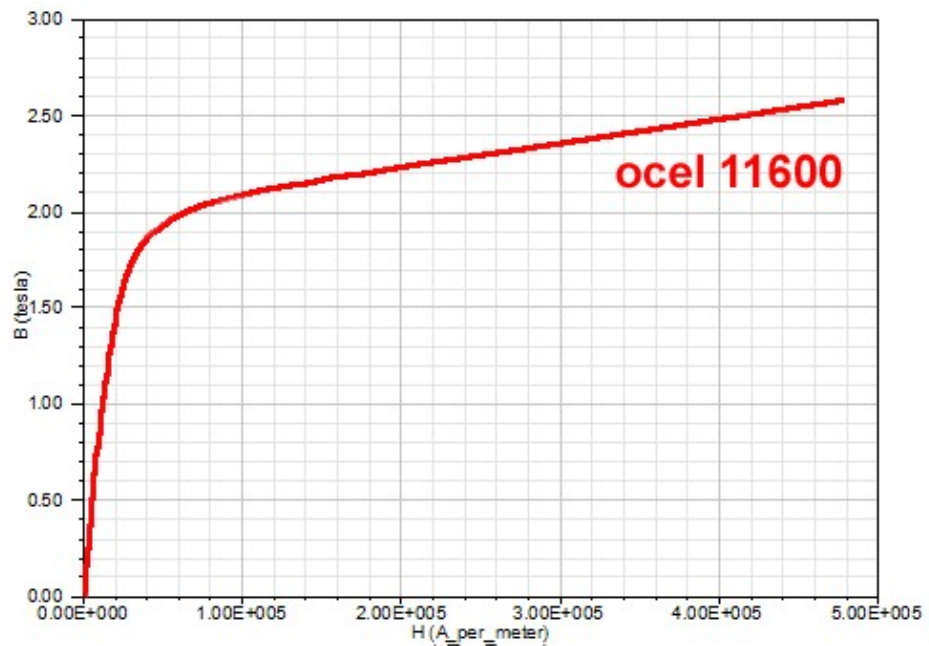
3.3.1 Magnetický obvod

Magnetický obvod axiálního stroje s dvojitým vnějším rotorem se skládá z rotoru a statoru, magnetický tok Φ se uzavírá přes dvojitou vzduchovou mezeru, která je obvykle malá, cca do $\delta = 5\text{mm}$.

Vnější rotor je zhotoven z magneticky vodivého materiálu (ocel). Na vnitřních stranách rotoru jsou připevněny permanentní magnety, které mají obvykle tvar kruhové výseče. Po obvodu rotoru se polarita magnetů postupně střídá: N – S – N – S ... atd., dokud není dosaženo potřebného počtu pólů. Rotor na druhé straně je ze stejného materiálu, avšak polarity magnetů jsou opačné, oproti magnetům jim náležících z druhého disku tedy S – N – S – N ... atd. To má za následek, že po přiblížení obou

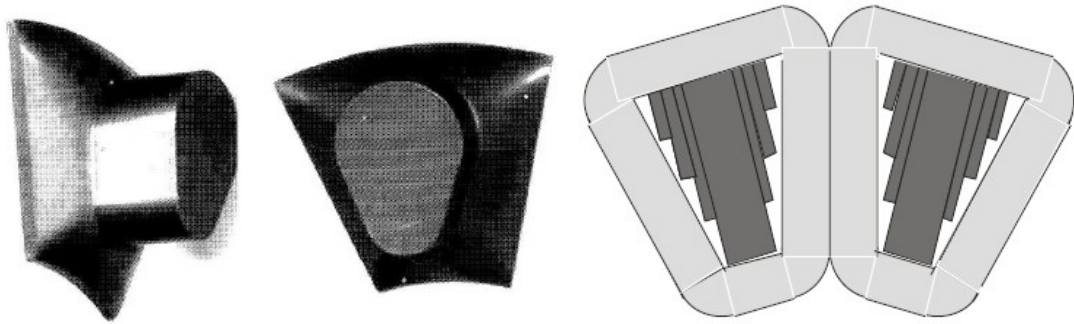
rotorů k sobě se magnetické pole uzavírá přes vyniklé póly statoru a tím se posiluje. Aby nedocházelo k velkému rozptylu magnetického pole na vnější straně rotoru, nesmí být rotor stroje příliš tenký. Jelikož je axiální přitažlivá síla magnetů obrovská, musí se dbát také na mechanickou pevnost a tuhost obou disků, jinak by tato síla mohla mít za následek deformaci.

Pro výpočet magnetického obvodu je nezbytná B-H charakteristika použitého materiálu rotoru. Tato ocel má zaručené magnetické vlastnosti a je běžně používaným konstrukčním materiálem, ze kterého se vyrábí magnetické obvody elektrických strojů.



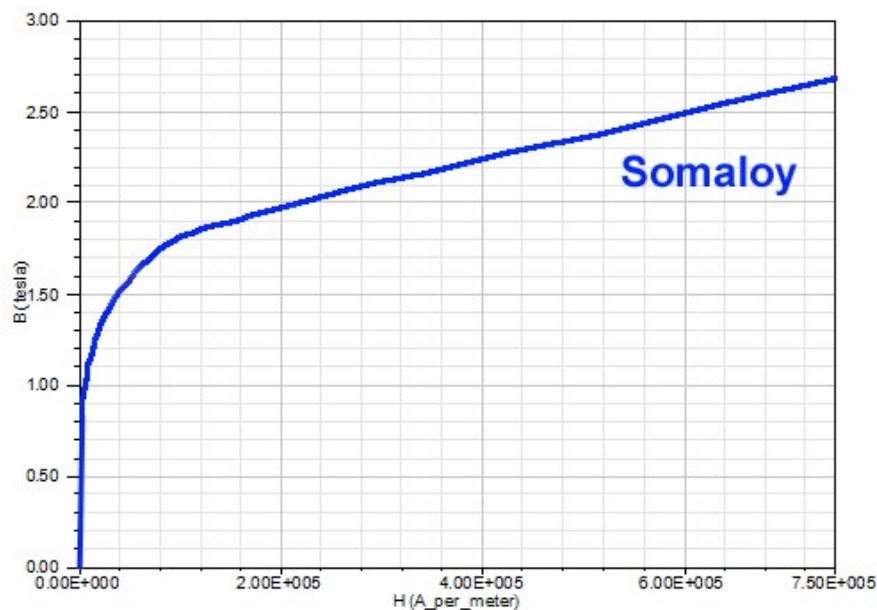
Obrázek 3-6 B-H magnetizační charakteristika oceli 11600

Vnitřní stator je nejčastěji tvořen vyniklými póly, na nichž je umístěno obvykle třífázové statorové vinutí. U mnoha-pólového provedení axiálního stroje je napájecí frekvence, na rozdíl od běžných strojů, vysoká, a proto je potřeba použít vhodný typ materiálu statoru, ovšem s ohledem na ztráty vířivými proudy, aby byly co nejmenší. Dva nejpoužívanější materiály na výrobu statoru jsou, materiál vytvořen práškovou technologií (Somaloy), kdy je možno odlít v lisovací formě požadovaný tvar, nebo druhá možnost, kdy je stator složen z tenkých, různě odstupňovaných plechů pro elektrotechniku do potřebného tvaru pólového nástavce. Doporučená tloušťka plechů je do 0,2 mm, aby při vyšších frekvencích byly minimalizovány ztráty způsobené vířivými proudy. [1]



Obrázek 3-7 Pólové nástavce statoru zhotoveny a) z materiálu Somaloy, b) skládáním plechů

Pro výpočet magnetického toku axiálního stroje je opět jako pro materiál rotoru, tak i pro materiál stator důležitá $B - H$ magnetizační charakteristika, tedy materiálu Somaloy.



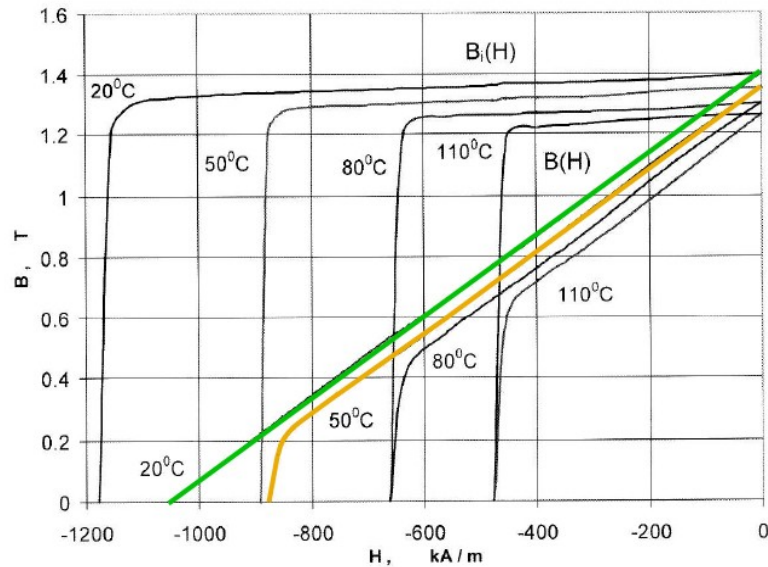
Obrázek 3-8 $B-H$ magnetizační charakteristika materiálu pólů, Somaloy

Magnety, které jsou používány pro vytváření magnetického pole rotoru, patří do skupiny tzv. magnetů vzácných zemin a nesou označení NdFeB s následnou identifikací např. N35, N42, N52. Toto označení představuje kvalitu jejich magnetizace, což znamená, jak velké mohou dosáhnout koerzivní síly H_c a remanentní magnetické indukce B_r . [2]

V dnešní době umožňuje technologie dosahovat velmi vysokých hodnot H_c a B_r na jednotku objemu, což zapříčinilo jejich hojné používání jako budící magnety v elektrických strojích. Parametry magnetu jsou silně závislé na teplotě, tudíž není možno zanedbat oteplení axiálního stroje a

počítat s ním při návrhu i přesto, že rotor axiálního stroje zabírá poměrně velkou plochu a navíc, při otáčení rotoru dochází k velmi dobré ventilaci a odvodu tepla do okolí. [1]

Z následujícího obrázku je patrná závislost parametrů H_C a B_R na teplotě PM.



Obrázek 3-9 Demagnetizační charakteristika magnetu NdFeB N48

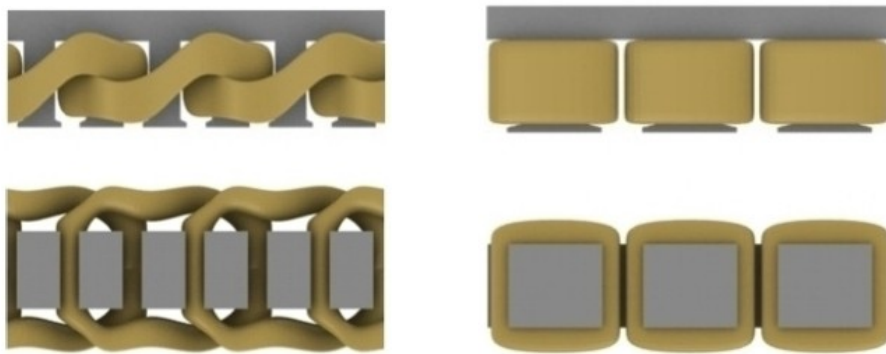
3.3.2 Vinutí statoru axiálního motoru s dvojitým vnějším rotorem

Vinutí, které vytváří točivé magnetické pole, je u axiálního stroje s dvojitým vnějším rotorem uloženo na statorových pólech. Vinutí je nejčastěji provedeno izolovaným měděným vodičem, kruhového nebo profilovaného tvaru. Téměř všechny výrobky z mědi se pro elektrotechnický průmysl zhotovují válcováním, lisováním nebo tažením. Tažením lze získat vodiče o průměru od 0,005mm, pásy o tloušťce od 0,1 mm a fólie o tloušťce od 0,008 mm. Poměrně velká elektrická vodivost hliníku umožňuje jeho široké použití v elektrotechnice. Jeho důležitou vlastností je jeho nízká hustota a nízká tavná teplota, velmi dobrá plastičnost, pevná a velmi tenká vrstva oxidu na povrchu, jenž ho chrání proti korozi. Je velmi dobře zpracovatelný tlakem, z čehož vyplývá, že z něho lze zhotovit různé výrobky jako plechy, dráty, pásy, tenké folie a lisované součásti. Hustota hliníku je přibližně 3,3 krát menší než u mědi, a je ho rezistivita asi 1,7 krát větší. Z těchto dvou hodnot je vidět, že na jednotku hmotnosti má hliník dvakrát větší využitelnost než měď. Stříbro, jehož rezistivita je o 4% nižší než rezistivita mědi, se v elektrických strojích, díky své ceně, téměř nepoužívá. Při použití profilovaného vodiče získáme lepší plnění cívky, na druhou stranu u kruhového vodiče lépe provádí vlastní navinutí cívky. Při větších průměrech vodiče – nad 1,5mm se vinutí, díky tuhosti vodiče,

provádí značně obtížně. Je proto lépe celkový průřez rozdělit na několik dílčích menších průřezů a vinutí tak provést paralelními vodiči. [1,3]

Mechanické upevnění lze provést např. lepením, snáze se však zpevnění vinutí provádí jeho ponořením do epoxidové pryskyřice.

Na statoru stroje je uloženo 3f vinutí nejčastěji v drážkách či navinuto na pólových nástavcích. V případě použití pólů na statoru je vhodné použít soustředné vinutí. Na následujícím obrázku je vidět provedení rozloženého a soustředného vinutí uložené v drážkách a na pólech.



Obrázek 3-10 Vinutí rozložené v drážkách a vinutí soustředné

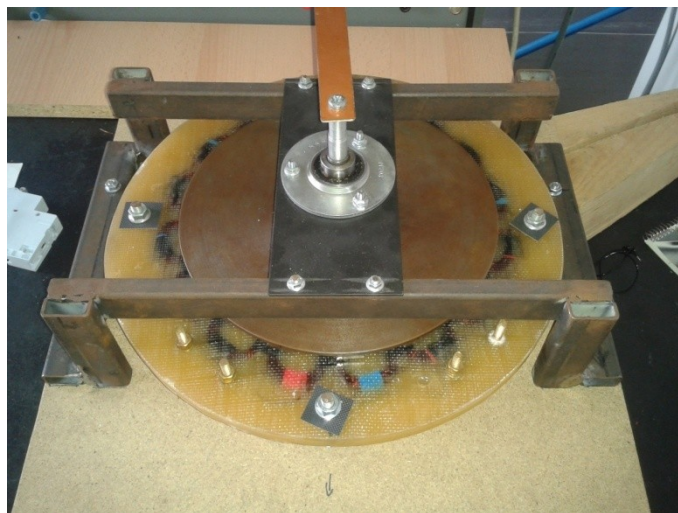
Při průchodu proudu vznikají ve vinutí ztráty, tyto ztráty se projevují oteplením cívek statoru. Odvod tepla je značně snížen, protože cívky statoru leží uvnitř dvou diskových rotorů. Při použití velké proudové hustoty, která je u velkých strojů obvyklá, je potřeba řešit odvod tepla nuceným chlazením. Stator tedy někdy bývá vůči okolí neprodyšně uzavřen a kolem cívek statoru protéká chladicí kapalina, která ztrátové teplo vznikající ve vinutí odvádí. [1]

4 Měření generátoru

Měřený generátor je konstrukce s vnitřním statorem a dvojitým vnějším rotorem. Dvojitý vnější rotor je tvořen ocelovými disky, na obou je nalepeno 16 magnetu NdFeB o rozměrech 42x20x5 mm. Jedná se tedy o 16-ti pólový stroj. Stator je tvořen vzduchovými cívkami. Ty jsou zality do epoxidové pryskyřice opět ve tvaru disku. Stator je pak umístěn mezi rotorové disky.



Obrázek 4-1 dvojitý vnější rotor



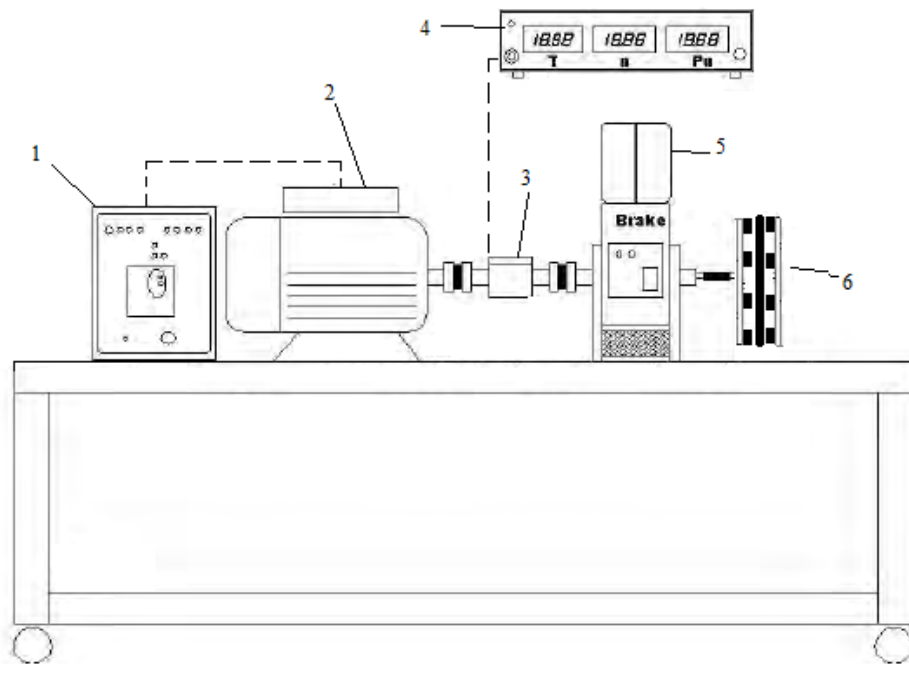
Obrázek 4-2 Statorové vinutí zalité v epoxidové pryskyřici vložené mezi rotorové disky

4.1 Parametry generátoru

Rozměr magnetu:	$L \times W \times T =$	42×20×5 mm
Délka vodiče pod magnetem:	$l_v =$	2×0,042m
Magnetická indukce ve vzduchové mezeře:	$B_{\max} =$	0,32T
Průměr rotoru:	$D_R =$	242mm
Střední průměr uložení magnetů na rotoru:	$D_{Rmg} =$	200mm
Jmenovité otáčky rotoru:	$n_{ROT} =$	375 ot/min

4.2 Měřicí stanoviště

Měřicím stanovištěm byla sestava od společnosti Langlois a skládala se z asynchronního motoru o výkonu 3kW. Tento motor byl řízen frekvenčním měničem. Hřídel motoru je spojena se senzorem točivého momentu CR3-100-V2. K senzoru je připojena jednotka se třemi digitálními displeji, ukazující mechanické veličiny jako točivý moment, otáčky a užitečná energie. Dynamometr je vložen na hřídeli mezi motorem a práškovou brzdou, která při měření nebyla použita. Po ní už následuje měřený axiální generátor, který byl ke hřídeli přidělán pomocí zahradní hadice, což se při měření nakrátko ukázalo jako nedostatečně pevný spoj.[5]



Obrázek 4-3 Měřicí stanoviště

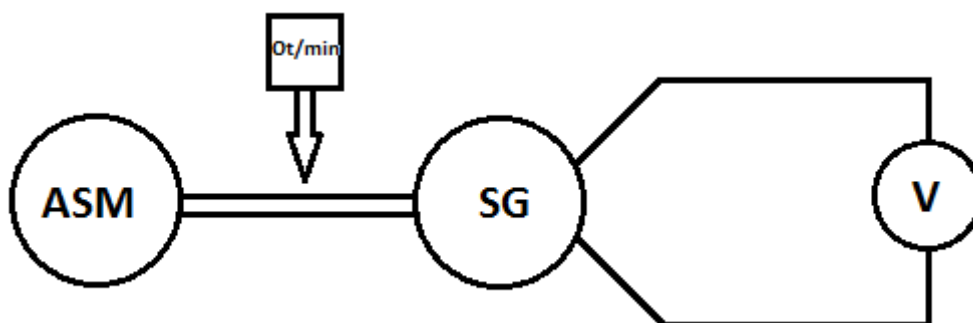
Na obr. 3-3 popisky znamenají: 1- frekvenční měnič, 2- asynchronní motor, 3- dynamometr, 4- prášková brzda, 5- prášková brzda, 6 axiální generátor

5 Měření naprázdno

5.1 Rozbor

Při měření naprázdno je výstup z generátoru nezátížen a na svorkách se měří napětí naprázdno v závislosti na otáčkách generátoru. Generátorem je otáčeno pomocí asynchronního motoru, který je řízen frekvenčním měničem. Výsledná charakteristika by měla mít přímkový tvar, jelikož je vinutí statoru tvořeno pouze vzduchovou cívkou. Proto nedochází k žádnému magnetickému přesycení. Charakteristikou naprázdno ověřujeme správnost výpočtu, provedení stroje i použitého materiálu. Slouží také pro kontrolu vinutí.

5.2 Schéma zapojení



5.3 Použité přístroje

Označení	Přístroj	Výrobce, typ	Výrobní číslo	Poznámka
V	Multimetr	Unitest, Hexagon 520	13311718	
Ot/min	Otáčkoměr	PROVA	RM-1501	
M	Asynchronní motor	Langlois		3kW ; 6,6A ; 50Hz ; 400V ; $\cos\varphi = 0,79$; 1420 Ot/min

5.4 Postup měření

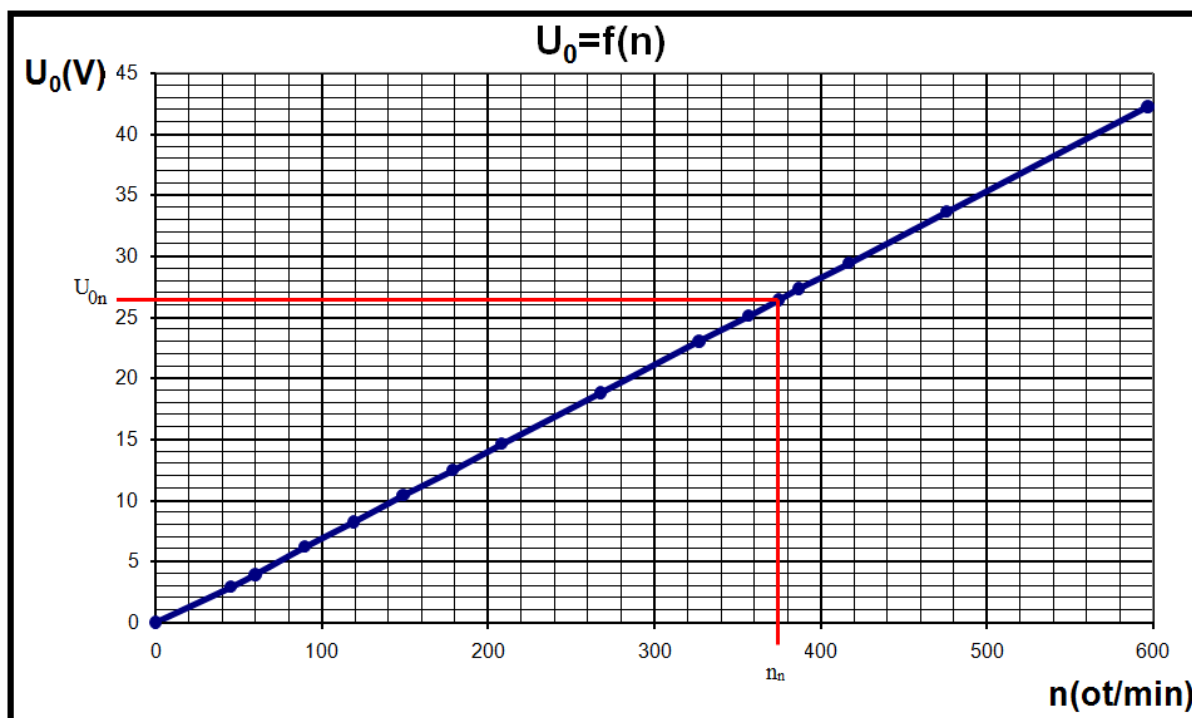
1. Provedl jsem zapojení dle schématu.
2. Postupně jsem od nuly zvyšoval otáčky na asynchronním motoru pomocí frekvenčního měniče.

3. Pro každou nastavenou hodnotu otáček jsem odečetl napětí naprázdno a zapsal do tabulky.
Hodnota otáček se zjišťovala pomocí bezkontaktního otáčkoměru.

5.5 Naměřené hodnoty

n(ot/min)	$U_0(V)$
0	0
45	2,9
60	3,9
90	6,2
119	8,2
149	10,4
179	12,5
208	14,6
268	18,8
327	23
357	25,1
375	26,4
387	27,3
417	29,4
476	33,6
597	42,2

5.6 Graf



5.7 Závěr

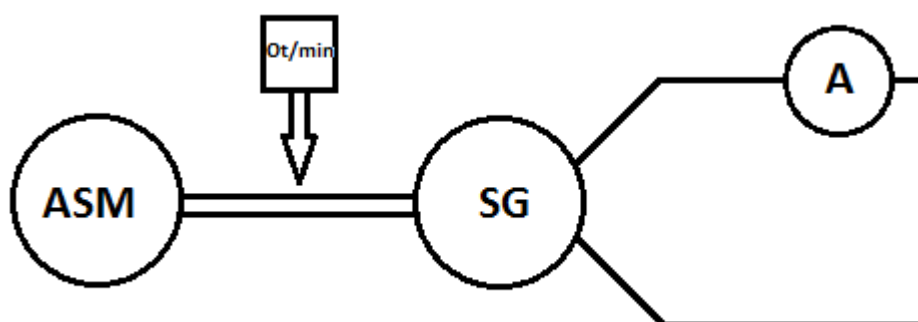
Z grafu je vidět, že napětí naprázdno na otáčkách rotoru má lineární závislost, což odpovídá teoretickému předpokladu. Z grafu lze dále vyčíst, že při jmenovitých otáčkách, což je 375 otáček za minutu, je napětí naprázdno přibližně 26V.

6 Měření nakrátko

6.1 Rozbor

Při měření nakrátko jsou výstupní svorky generátoru zkratovány a měří se proud nakrátko v závislosti na otáčkách rotoru. Generátorem je opět otáčeno pomocí asynchronního motoru, který je řízen frekvenčním měničem.

6.2 Schéma zapojení



6.3 Použité přístroje

Označení	Přístroj	Výrobce, typ	Výrobní číslo	Poznámka
V	Multimetr	Unitest, Hexagon 520	13311718	
Ot/min	Otáčkoměr	PROVA	RM-1501	
M	Asynchronní motor	Langlois		3kW ; 6,6A ; 50Hz ; 400V ; $\cos\varphi = 0,79$; 1420 Ot/min

6.4 Postup měření

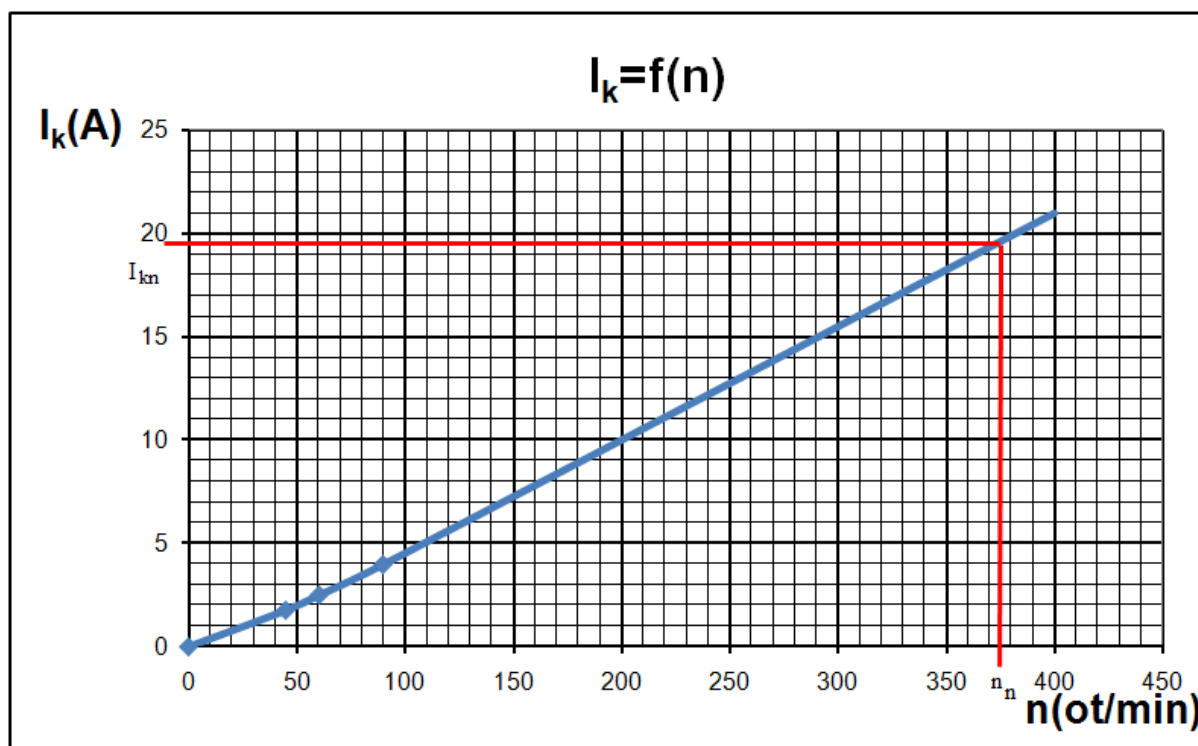
1. Provedl jsem zapojení dle schématu.
2. Postupně jsem zvyšoval otáčky od 0 na asynchronním motoru pomocí frekvenčního měniče.
3. Pro každou nastavenou hodnotu otáček jsem odečetl proud nakrátko a zapsal do tabulky.

Hodnota otáček se zjišťovala pomocí bezkontaktního otáčkoměru.

6.5 Naměřené hodnoty:

n(ot/min)	$I_k(A)$
0	0
45	1,78
60	2,5
90	4

6.6 Graf



6.7 Závěr

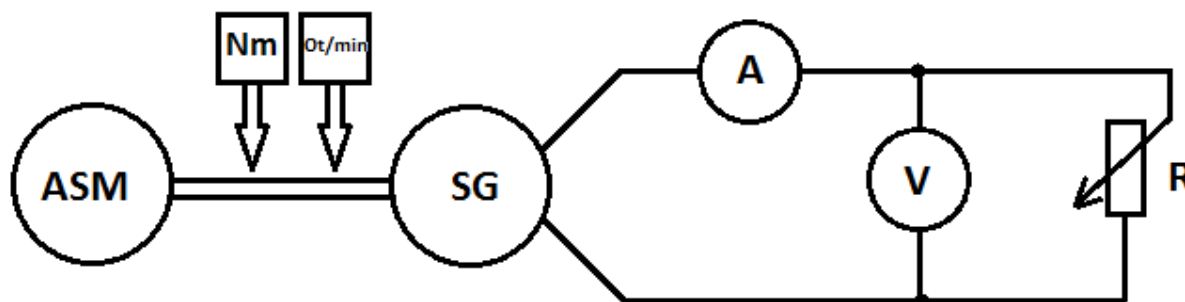
Z grafu je vidět, že závislost proudu nakrátko na otáčkách je opět lineární. Bylo změřeno pouze pár hodnot na začátku charakteristiky, jelikož při vyšších otáčkách byl krouticí moment natolik veliký, že se protácel mechanický spoj mezi hřídelí poháněcího mechanismu a měřeného axiálního generátoru. Ovšem jelikož víme, že průběh je lineární, můžeme charakteristiku proložit přímkou, a tím zjistit následující hodnoty. Pro jmenovité otáčky stroje je proud nakrátko roven přibližně 19,5 A.

7 Měření při odporové zátěži

7.1 Rozbor

Při měření při odporové zátěži lze provést měření účinnosti. Tím můžeme ověřit výpočet a provedení stroje, ale také si můžeme udělat jasnou představu o chování stroje v provozu. U menších generátorů můžeme snadno měřit elektrický výkon a příkon. Elektrický výkon se měří dostatečně přesně elektrickými měřicími přístroji (voltmetr a ampérmetr). A spočítá se jako $P = U \cdot I \cdot \cos \varphi$. $\cos \varphi$ lze považovat za 1, jelikož se jedná o čistě odporovou zátěž. Pro zjištění mechanického příkonu použijeme dynamometr měřící mechanický moment a otáčkoměr pro zjištění otáček. Pro pohon generátoru je opět použit asynchronní motor. Výsledný příkon pak určíme $P_p = M \cdot \omega$, kde $\omega = \frac{2 \cdot \pi \cdot n}{60}$. Z hodnot mechanického příkonu a elektrického výkonu lze pak spočítat účinnost stroje v procentech jako $\eta = \frac{P}{P_p} \cdot 100$ pro různé otáčky. Tato metoda je vhodná pro stroje do výkonu 80% až 90%. [4]

7.2 Schéma zapojení



7.3 Použité přístroje

Označení	Přístroj	Výrobce, typ	Výrobní číslo	Poznámka
V	Multimetr	Unitest, Hexagon 320	13311735	
A	Multimetr	Unitest, Hexagon 520	13311718	
Ot/min	Otáčkoměr	PROVA	RM-1501	

M	Asynchronní motor	Langlois		3kW ; 6,6A ; 50Hz ; 400V cosφ=0,79 ; 1420 Ot/min
Nm	Dynamometr	Langlois; CR-3100-V2		Dynamometr M _{max} = 100Nm
R	Posuvný odpor			R ₁ - 105 Ω ; 2,5 A
R	Posuvný odpor			R ₂ - 140 Ω ; 1,4 A
R	Posuvný odpor			R ₃ - 9,2 Ω ; 8 A

7.4 Postup měření

1. Provedl jsem zapojení dle schématu.
2. Na asynchronním motoru jsem nastavil pomocí frekvenčního měniče konstantní otáčky.
3. Postupně jsem generátor zatěžoval regulací a kombinování tří posuvných odporů.
4. Pro každou hodnotu momentu jsem odečítal a zapisoval do tabulky napětí a proud na svorkách generátoru a otáčky na hřídeli.
5. Toto měření jsem opakoval pro hodnoty otáček 45, 75, 150, 300, 375, 600.

7.5 Naměřené hodnoty

Tabulka 7-1 Hodnoty pro měření zatěžovacích charakteristik při 45 otáčkách za minutu

n(ot/min)	U ₁ (V)	I ₁ (A)	M(Nm)	ω(rad/s)	P _p (W)	P(W)	η(%)
45,0	2,8	0,1	0,2	4,7	1,1	0,3	29,7
44,0	2,7	0,3	0,4	4,6	1,8	0,8	46,0
44,0	2,5	0,5	0,5	4,6	2,3	1,2	51,0
43,0	2,4	0,7	0,7	4,5	3,0	1,5	51,3
42,0	2,2	0,9	0,8	4,4	3,5	1,9	53,9
42,0	2,1	1,0	1,0	4,4	4,4	2,1	48,5
41,0	1,9	1,2	1,2	4,3	5,2	2,3	45,4
40,0	1,7	1,5	1,4	4,2	6,0	2,5	41,5
38,0	1,2	2,0	2,0	4,0	7,8	2,4	31,4
36,0	0,9	2,3	2,3	3,8	8,7	2,0	23,4

Tabulka 7-2 Hodnoty pro měření zatěžovacích charakteristik při 75 otáčkách za minutu

n(ot/min)	U ₁ (V)	I ₁ (A)	M(Nm)	ω (rad/s)	P _p (W)	P(W)	η (%)
75	5	0,1	0,22	7,9	1,7	0,5	28,9
74	4,8	0,3	0,39	7,7	3,0	1,4	47,6
73	4,5	0,55	0,6	7,6	4,6	2,5	54,0
72	4,4	0,65	0,73	7,5	5,5	2,9	52,0
72	4,3	0,78	0,85	7,5	6,4	3,4	52,3
71	4,1	0,97	1,02	7,4	7,6	4,0	52,4
70	3,96	1,16	1,2	7,3	8,8	4,6	52,2
69	3,75	1,39	1,36	7,2	9,8	5,2	53,0
67	3,48	1,7	1,62	7,0	11,4	5,9	52,0
65	3,1	2,09	2	6,8	13,6	6,5	47,6
63	2,7	2,45	2,36	6,6	15,6	6,6	42,5

Tabulka 7-3 Hodnoty pro měření zatěžovacích charakteristik při 150 otáčkách za minutu

n(ot/min)	U ₁ (V)	I ₁ (A)	M(Nm)	ω (rad/s)	P _p (W)	P(W)	η (%)
150	10,3	0,14	0,29	15,7	4,6	1,4	31,7
148	10,17	0,29	0,42	15,5	6,5	2,9	45,3
147	10,03	0,42	0,54	15,4	8,3	4,2	50,7
146	9,99	0,55	0,6	15,3	9,2	5,5	59,9
145	9,7	0,78	0,83	15,2	12,6	7,6	60,0
144	9,5	0,96	0,95	15,1	14,3	9,1	63,7
143	9,3	1,15	1,15	15,0	17,2	10,7	62,1
142	9,1	1,39	1,38	14,9	20,5	12,6	61,6
140	8,79	1,65	1,58	14,7	23,2	14,5	62,6
137	8,4	2	1,94	14,3	27,8	16,8	60,4
133	7,8	2,5	2,36	13,9	32,9	19,5	59,3

Tabulka 7-4 Hodnoty pro měření zatěžovacích charakteristik při 300 otáčkách za minutu

n(ot/min)	U ₁ (V)	I ₁ (A)	M(Nm)	ω (rad/s)	P _p (W)	P(W)	η (%)
300	20,9	0,16	0,4	31,4	12,6	3,3	26,6
295	20,7	0,38	0,59	30,9	18,2	7,9	43,2
294	20,5	0,57	0,75	30,8	23,1	11,7	50,6
292	20,2	0,85	0,99	30,6	30,3	17,2	56,7
291	20	1,06	1,15	30,5	35,0	21,2	60,5
290	19,8	1,25	1,31	30,4	39,8	24,8	62,2
287	19,3	1,6	1,68	30,1	50,5	30,9	61,2
282	18,6	2,24	2,2	29,5	65,0	41,7	64,1

Tabulka 7-5 Hodnoty pro měření zatěžovacích charakteristik při jmenovitých otáčkách

n(ot/min)	U ₁ (V)	I ₁ (A)	M(Nm)	ω (rad/s)	P _p (W)	P(W)	η (%)
375	26,8	0,13	0,4	39,3	15,7	3,5	22,2
375	26,7	0,24	0,5	39,3	19,6	6,4	32,6
375	26,5	0,45	0,7	39,3	27,5	11,9	43,4
374	26,2	0,68	0,9	39,2	35,2	17,8	50,5
371	25,8	1,02	1,18	38,9	45,8	26,3	57,4
370	25,5	1,29	1,4	38,7	54,2	32,9	60,6
366	25	1,7	1,8	38,3	69,0	42,5	61,6
363	24,6	2,15	2,2	38,0	83,6	52,9	63,2

Tabulka 7-6 Hodnoty pro měření zatěžovacích charakteristik při 600 otáčkách za minutu

n(ot/min)	U ₁ (V)	I ₁ (A)	M(Nm)	ω (rad/s)	P _p (W)	P(W)	η (%)
600	42,5	0,21	0,6	62,8	37,7	8,9	23,7
595	42,36	0,34	0,72	62,3	44,9	14,4	32,1
594	42,23	0,48	0,83	62,2	51,6	20,3	39,3
593	42,1	0,57	0,9	62,1	55,9	24,0	42,9
592	41,7	0,95	1,23	62,0	76,3	39,6	52,0
588	41,35	1,25	1,5	61,6	92,4	51,7	56,0
587	40,9	1,54	1,74	61,5	107,0	63,0	58,9
585	40,6	1,82	2	61,3	122,5	73,9	60,3
581	40,2	2,16	2,29	60,8	139,3	86,8	62,3
574	39,3	2,8	2,8	60,1	168,3	110,0	65,4

7.6 Příklad výpočtu

$$\varpi = \frac{2 \cdot \pi \cdot n}{60}$$

$$\varpi = \frac{2 \cdot \pi \cdot 600}{60}$$

$$\underline{\underline{\varpi = 62,8 \text{ rad/s}}}$$

$$P = U \cdot I \cdot \cos \varphi$$

$$P = 42,5 \cdot 0,21 \cdot 1$$

$$\underline{\underline{P = 8,9 \text{ W}}}$$

$$P_p = M \cdot \varpi$$

$$P_p = 0,6 \cdot 62,8$$

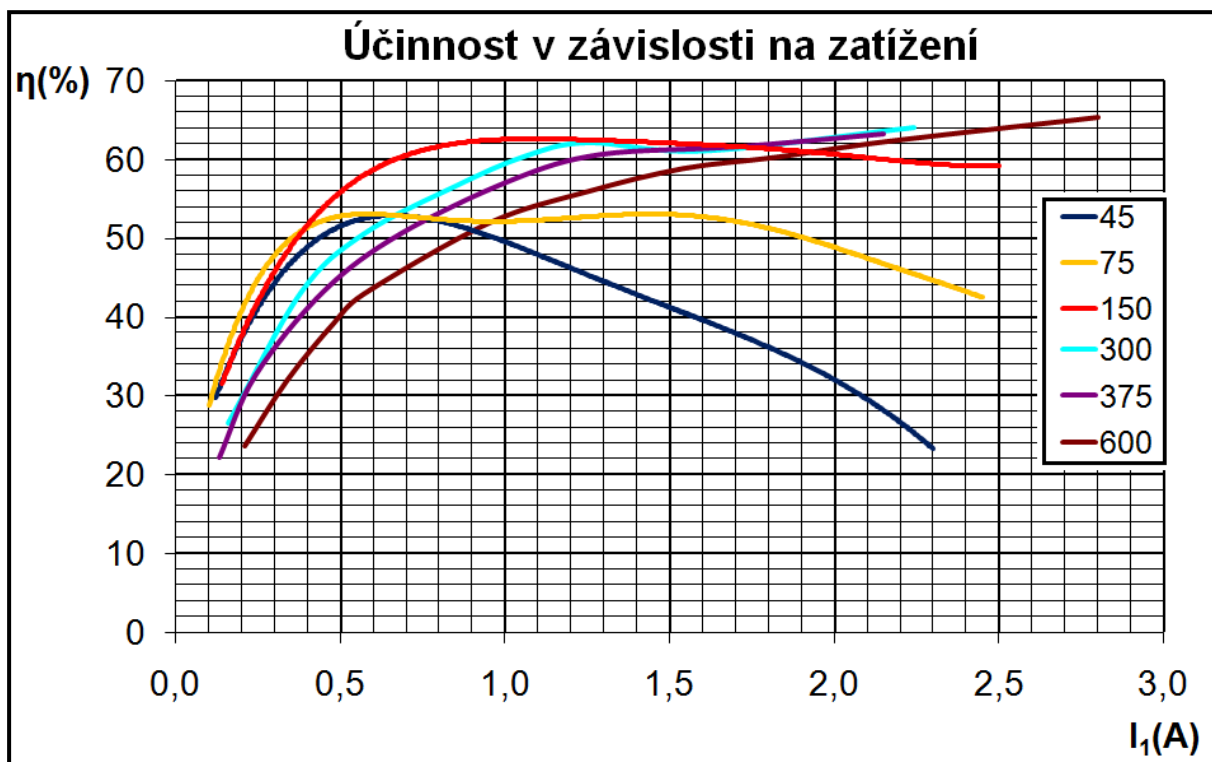
$$\underline{\underline{P_p = 37,7 \text{ W}}}$$

$$\eta = \frac{P}{P_p} \cdot 100$$

$$\eta = \frac{8,9}{37,7} \cdot 100$$

$$\underline{\underline{\eta = 23,7\%}}$$

7.7 Graf



7.8 Závěr

Ztráty statorového jádra, tj. hysterezní ztráty a ztráty vířivými proudy u axiálních generátorů bez železného jádra neexistují. Ztráty v permanentních magnetech a rotorových ocelových kotoučích jsou zanedbatelné. Z grafu je vidět, že při téměř konstantních otáčkách, do určité hodnoty zatížení účinnost roste a posléze klesá. Bohužel při měření se nepodařilo naprosto konstantní otáčky poháněcího motoru držet, jelikož byl axiální generátor příliš tvrdým zdrojem. Dále lze z měření vyčíst, že účinnost dosahovala 65% a z grafu lze usoudit, že při jmenovitých otáčkách a vyšších, by účinnost s rostoucím zatížením dále rostla.

8 Závěr

V dnešním moderním světě můžeme všude kolem sebe vidět přístroje, stroje, pohony a jiná zařízení, která pro svou funkci potřebují elektrickou energii. Proto je problém její výroby hodno prozkoumávat. Axiální generátory jsou jednou z možností jak výrobu elektrické energie obstarat. Především jsou, díky své jednoduchosti, dobrou volbou pro necentrální výrobu a různé jiné speciální aplikace, kde jejich vlastnosti nabízí různé výhody oproti konvenčním strojům pracujících s radiálním tokem. Velmi často jsou pak podomácku vyráběny jako generátory do malých větrných elektráren.

Měření dokázalo, že navržený experimentální generátor, dokáže pracovat s poměrně vysokou účinností. Ovšem je nutné dodat, že při jeho praktickém využití by bylo vhodné jednofázový obvod nahradit třífázovým. Charakteristiky naprázdno a nakrátko potvrdili teoretické předpoklady a to lineární závislost U_0 a I_k na otáčkách. Pro další měření tohoto generátoru, především pro měření charakteristik nakrátko a při zatížení, je nutné lépe zvolit mechanickou spojku mezi ním a zbytkem měřicího soustrojí Langlois.

Použitá literatura

- [1] Gieras, J., F.: *Axial Flux Permanent Magnet Brushless Machine*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, 2004, ISBN 1-4020-2661-7
- [2] SINOMAG: *Permanentni_magnety.pdf*, on-line, www.magnety.cz
http://www.sinomag.cz/sinomag.cz/data/sinomag/downloads/Permanentni_magnety.pdf
- [3] Kopylov, I.,P.: *Stavba elektrických strojů*, SNTL, Praha, 1988, ISBN 978-0-470-69516-6
- [4] Petrásek F.: *Elektrické stroje (laboratorní měření)*, České vysoké učení technické v Praze, Praha, 1987
- [5] Langlois: *ELECTROTECH-1.pdf*, on-line www.langlois-france.com
<http://www.langlois-france.com/pdf/ELECTROTECH-1.pdf>

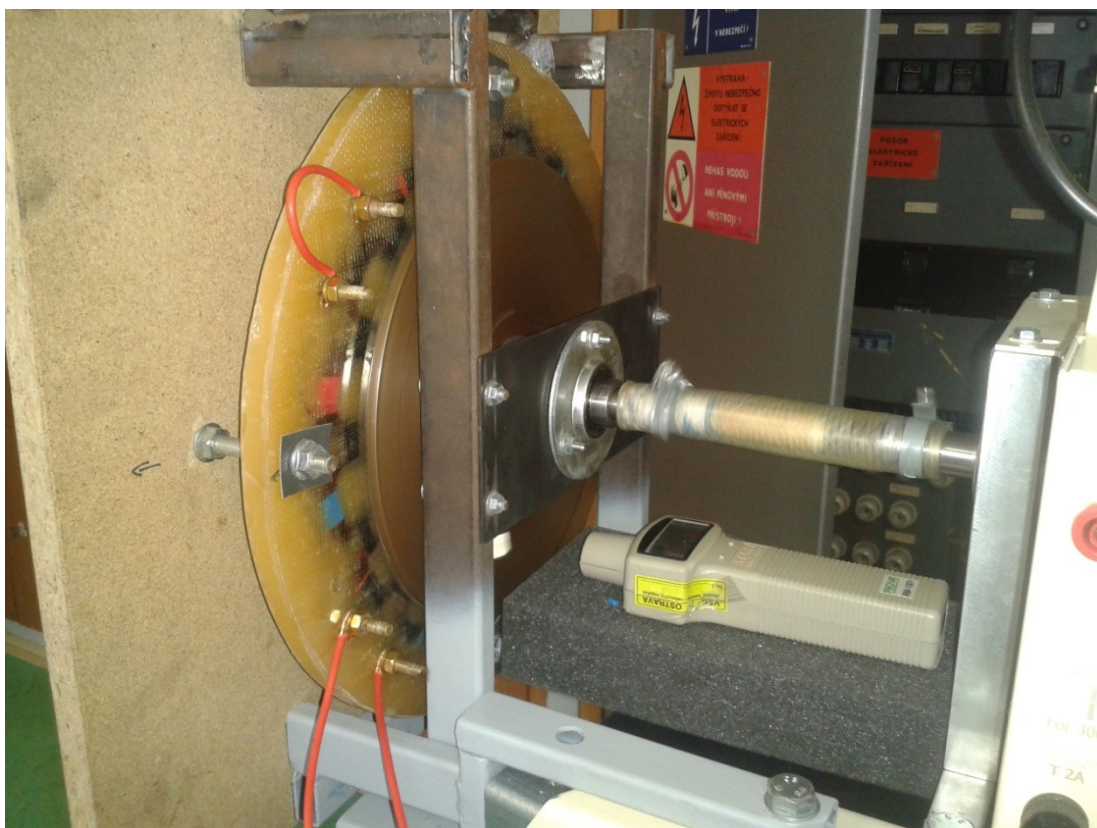
Seznam příloh

Příloha A: Měření při odporové zátěži	ii
Příloha B: Měření otáček generátoru.....	ii
Příloha C: Frekvenční měnič.....	iii
Příloha C: Měřicí souprava.....	iii

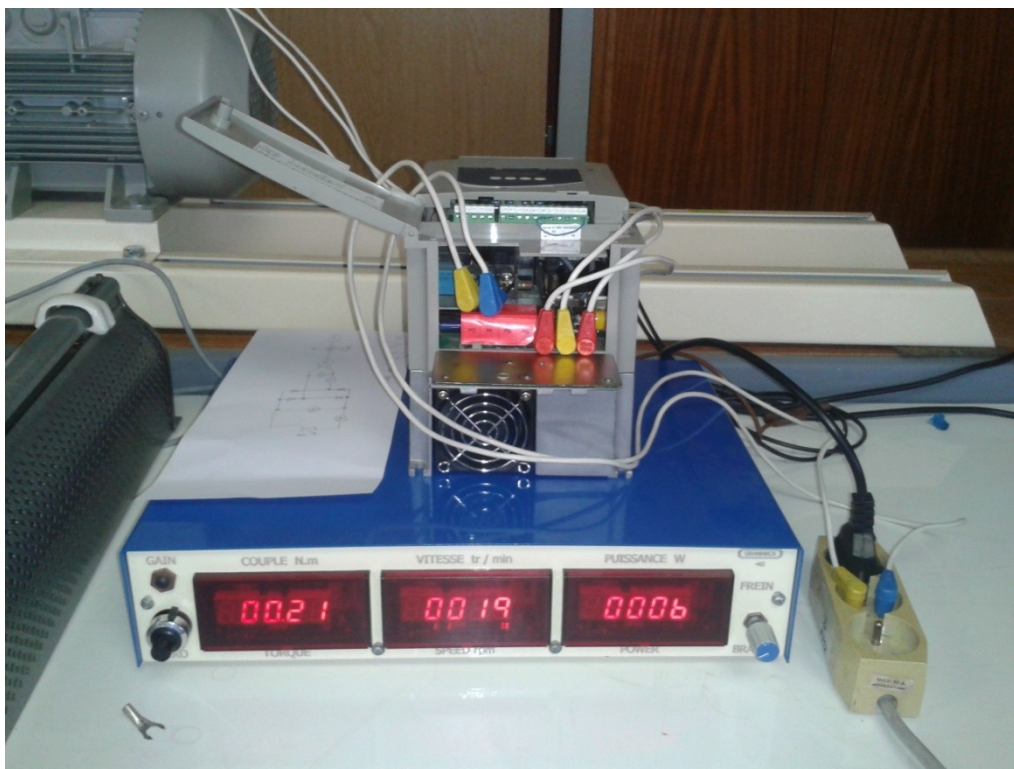
Příloha A: Měření při odporové zátěži



Příloha B: Měření otáček generátoru



Příloha C: Frekvenční měnič



Příloha D: Měřicí souprava

