

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

Katedra elektroenergetiky a ekologie

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Stroj s permanentními magnety a spínaným tokem

vedoucí práce: Ing. Karel Hruška, Ph.D.

2015

autor: Bc. Miroslav Blohmann

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Miroslav BLOHMANN**
Osobní číslo: **E12N0137P**
Studijní program: **N2644 Aplikovaná elektrotechnika**
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**
Název tématu: **Stroj s permanentními magnety a spínaným tokem**
Zadávací katedra: **Katedra elektroenergetiky a ekologie**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Vytvořte přehled konstrukčních uspořádání strojů s permanentními magnety a spínaným tokem.
2. Vytvořte numerický model měřeného stroje.
3. Porovnejte výsledky měření s výsledky získanými výpočtem.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah pracovní zprávy: 30 - 40 stran

Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

1. HRABOVCOVÁ, V. : Moderné elektrické stroje
2. HANSELMAN, D. C. : Brushless Permanent Magnet Motor Design
3. MAYER, D.: Teorie elektromagnetického pole
4. REECE, A. B. J. : Finite element method in el. power engineering


Vedoucí diplomové práce:

Ing. Karel Hruška, Ph.D.


Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

Datum zadání diplomové práce: 15. října 2014

Termín odevzdání diplomové práce: 11. května 2015


Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.
děkan




Doc. Ing. Karel Noháč, Ph.D.
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2014

Abstrakt

Stroj s permanentními magnety a spínaným tokem

Předkládaná diplomová práce se zabývá strojem s permanentními magnety a spínaným tokem. V první části práce je provedeno shrnutí konstrukčních uspořádání strojů se spínaným tokem a permanentními magnety. Hlavním úkolem práce je vytvoření numerického modelu pomocí programu Agros2D a porovnání výsledků získaných ze simulací s výsledky získanými pomocí měření na reálném stroji. Stroj je měřen v motorickém i generátorickém režimu. Součástí práce jsou i výkresy, podle kterých byl stroj vyroben a 3D model stroje.

Klíčová slova

reluktanční motor, numerický model, permanentní magnety, spínaný tok, krokový motor, metoda konečných prvků, FSPM stroj

Abstract

Flux-switched motor with permanent magnets

The submitted thesis is focused on the Flux-switched motor with permanent magnets. First chapter is an overview of structures Flux-switched motors with permanent magnets. The main task of the work is the creation of numerical model with a computer program Agros2D and comparison of the model to the results of measurements of the real experimental machine. The real machine is measured as a motor and a generator. The work also contains technical drawings of the machine and 3D model.

Key words

reluctance motor, numerical model, permanent magnets, switched flux, stepper motor, finite element method, FSPM machine

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této diplomové práce, je legální.

.....

podpis

V Plzni dne 6.5.2015

Bc. Miroslav Blohmann

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu mé diplomové práce panu Ing. Karlu Hruškovi, Ph.D. a konzultantovi panu Ing. Františku Machovi za cenné a profesionální rady, připomínky, metodické vedení práce a velmi vstřícný přístup. Dále bych chtěl poděkovat panu Ing. Luboši Streitovi, Ph.D. za pomoc s řízením motoru.

Obsah

| | |
|--|-----------|
| OBSAH | 8 |
| SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK | 10 |
| ÚVOD | 13 |
| 1 KONSTRUKČNÍ USPOŘÁDÁNÍ STROJŮ S PERMANENTNÍMI MAGNETY A SPÍANÝM TOKEM | 14 |
| 1.1 DSPM STROJ..... | 14 |
| 1.2 FRM STROJ | 15 |
| 1.3 FSPM STROJ..... | 16 |
| 1.4 KONSTRUKČNÍ VYLEPŠENÍ FSPM..... | 18 |
| 1.4.1 Počet a tvar pólů statoru a rotoru | 18 |
| 1.4.2 Multi-tooth konstrukce | 19 |
| 1.4.3 Fault-tolerant konstrukce | 19 |
| 1.4.4 FSPM s oběžným rotorem | 20 |
| 1.4.5 FSPM s dvojitým rotorem..... | 21 |
| 1.4.6 Lineární FSPM stroj | 22 |
| 2 NUMERICKÝ MODEL MĚŘENÉHO STROJE | 23 |
| 2.1 POPIS PROGRAMU AGROS2D..... | 23 |
| 2.2 OBECNÝ POPIS MODELU | 23 |
| 2.3 FSPM GENERÁTOR NAMODELOVANÝ POMOCÍ MKP | 26 |
| 3 FSPM STROJ JAKO GENERÁTOR | 34 |
| 3.1 ZÁKLADNÍ PRINCIP FSPM GENERÁTORU | 34 |
| 3.2 MĚŘENÍ NA REÁLNÉM FSPM GENERÁTORU S MENŠÍM ROTOREM..... | 37 |
| 3.3 MĚŘENÍ NA REÁLNÉM FSPM GENERÁTORU S VĚTŠÍM ROTOREM..... | 40 |
| 4 FSPM STROJ JAKO MOTOR | 44 |
| 4.1 ZÁKLADNÍ PRINCIP FSPM MOTORU | 44 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 4.2 | MĚŘENÍ NA REÁLNÉM FSPM MOTORU S MENŠÍM ROTOREM | 45 |
| 4.3 | MĚŘENÍ NA REÁLNÉM FSPM MOTORU S VĚTŠÍM ROTOREM | 47 |
| 4.3.1 | <i>Výpočet točivého momentu FSPM motoru s větším rotorem.....</i> | <i>49</i> |
| 5 | POROVNÁNÍ NAMĚŘENÝCH A VYPOČTENÝCH VÝSLEDKŮ | 50 |
| 5.1 | INDUKOVANÉ NAPĚTÍ PRO STROJ S MENŠÍM ROTOREM | 50 |
| 5.2 | INDUKOVANÉ NAPĚTÍ PRO STROJ S VĚTŠÍM ROTOREM | 51 |
| | ZÁVĚR | 53 |
| | SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY | 55 |
| | PŘÍLOHY | 62 |
| | SEZNAM PŘÍLOH..... | 62 |

Seznam symbolů a zkratk

| | | |
|------------------|-----------------------|------------------------------------|
| A | [Wb·m ⁻¹] | vektorový magnetický potenciál |
| B | [T] | magnetická indukce |
| B _r | [T] | remanentní magnetická indukce |
| f | [Hz] | frekvence |
| H | [A·m ⁻¹] | intenzita magnetického pole |
| I | [A], [mA] | stejnoseměrný elektrický proud |
| i | [A], [mA] | střídavý elektrický proud |
| J | [A·m ⁻²] | proudová hustota |
| L | [H] | indukčnost |
| l | [m], [mm] | délka |
| l _{fe} | [m], [mm] | délka siločáry v železe |
| l _{mag} | [m], [mm] | délka siločáry v magnetu |
| l _{vzd} | [m], [mm] | délka siločáry ve vzduchové mezeře |
| M | [Nm] | točivý moment |
| M _n | [Nm] | jmenovitý točivý moment |
| M _z | [Nm] | točivý moment zvratu |
| M ₁₂₀ | [Nm] | točivý moment při napětí 120 V |
| M ₁₃₀ | [Nm] | točivý moment při napětí 130 V |
| N | [-] | počet závitů |
| n | [ot./min.] | otáčky za minutu |
| P | [W], [kW] | elektrický výkon |
| p _r | [-] | počet pólů na rotoru |
| R | [Ω] | elektrický odpor |
| R _m | [H ⁻¹] | magnetický odpor |
| R _z | [Ω] | elektrický odpor zátěže |

| | | |
|-----------------|--|-------------------------------|
| S | [m ²], [mm ²] | plocha |
| S _{fe} | [m ²], [mm ²] | plocha železa |
| t | [s] | čas |
| U | [V] | elektrické napětí |
| u _i | [V] | indukované napětí |
| W | [J] | energie |
| α | [°] | úhel |
| μ ₀ | [H·m ⁻¹] | permeabilita |
| μ _{fe} | [-] | relativní permeabilita železa |
| μ _r | [-] | relativní permeabilita |
| π | [-] | Ludolfovo číslo |
| Φ | [Wb] | magnetický tok |
| φ | [°] | fázový posuv |
| ω | [rad·s ⁻¹] | úhlová rychlost |
| BLDC | Brushless DC motor | |
| CAD | computer-aided design | |
| CH1 | kanál osciloskopu 1 | |
| CH2 | kanál osciloskopu 2 | |
| ČSN | české technické normy | |
| cps | cycle per second | |
| DOFs | degrees of freedom | |
| DSPM | Doubly Salient Permanent Magnets motor | |
| DXF | Drawing Exchange Format | |
| ETA | účinnost | |
| FFT | Fast Fourier transform | |
| FRM | Flux-reversal machine | |
| FSPM | Flux Switching Permanent Magnets motor | |

| | |
|----------|--|
| FTT | fault-tolerant teeth |
| IP44 | označení stupně krytí (proti pevným tělesům větší než 1 mm, proti stříkající vodě) |
| NdFeB | neodym-železo-bor magnet |
| OSC | osciloskop |
| PF | účinník |
| PM | permanentní magnety |
| PMSM | Permanent Magnet Synchronous Motor |
| RPM | revolutions per minute |
| SRM | Switched Reluctance Motor |
| 2D | dvojměrný |
| 3D | trojměrný |
| 1f | jednofázový |
| 3f | třífázový |
| Δ | zapojení do trojúhelníka |
| Y | zapojení do hvězdy |

Úvod

Princip spínaného reluktančního motoru byl objeven již v roce 1838, ale prakticky použitelný začal být tento typ motorů až s příchodem výkonové elektroniky. [1] V posledním desetiletí zájem o tyto stroje opět vzrůstá. Vzniká mnoho nových konstrukčních uspořádání, které mohou nacházet využití jak v nejlevnějších domácích spotřebičích, tak i v automobilovém a leteckém průmyslu, kosmonautice nebo například ve větrných elektrárnách či výtazích. [18], [20] Zvýšenému zájmu se tyto stroje těší také kvůli zkoumání použití těchto strojů s permanentními magnety ze vzácných zemin. Tato práce se zabývá stroji, ve kterých jsou využity ke zlepšení jejich vlastností permanentní magnety.

V první kapitole práce jsou popsána různá konstrukční řešení strojů se spínaným magnetickým tokem a permanentními magnety, jejich vzájemné odlišnosti, případně výhody a nevýhody jednotlivých typů. Nejpodrobněji se práce v této kapitole zabývá stroji typu FSPM z důvodu, že na stroji typu FSPM budou probíhat praktická měření.

Ve druhé kapitole práce je obecně popsán numerický model stroje typu FSPM, který byl vytvořen pro účely této diplomové práce pomocí programu Agros2D. Tento program využívá k řešení magnetických polí metodu konečných prvků s vyšším řádem přesnosti. Dále jsou v této kapitole uvedeny výsledky získané z numerického modelu a různých jeho modifikací.

Ve třetí a čtvrté kapitole je popsána možnost použití stroje typu FSPM jako generátoru nebo jako motoru. Je zde také vysvětlen základní princip funkce FSPM stroje a uvedeno několik vzorců, které jsou důležité pro jeho návrh. Dále jsou v těchto dvou kapitolách popsána měření, která byla provedena na reálném FSPM stroji pracujícím v generátorickém nebo motorickém režimu. Nejprve jsou vždy popsána měření pro stroj s menším rotorem a následně pak pro stroj s větším rotorem.

Pátá kapitola obsahuje porovnání výsledků získaných z numerického modelu a výsledků získaných z měření na reálném FSPM stroji.

1 Konstrukční uspořádání strojů s permanentními magnety a spínaným tokem

Stroje se spínaným tokem a permanentními magnety konstrukčně vycházejí z principu spínaného reluktančního motoru (SRM). Geometrie statoru a rotoru u těchto strojů se na první pohled podobá geometrii statoru a rotoru u krokových motorů. [1] Také tyto stroje mají zpravidla určitou kombinaci počtu vyniklých pólů na statoru a na rotoru. Mezi těmito počty platí určité zákonitosti, bez kterých by se motor netočil. [4]

Rozdíl mezi krokovým motorem a spínaným reluktančním motorem je ten, že SRM může být konstruován tak, aby měl vysokou účinnost i při vysokých otáčkách. Naproti tomu, krokové motory jsou obvykle konstruovány pro omezený rozsah otáček. Tento rozdíl způsobuje to, že u spínaných reluktančních motorů jsou odlišné požadavky na geometrii stroje, ale také na řízení, a s tím spojenou výkonovou elektroniku. [1]

1.1 DSPM stroj

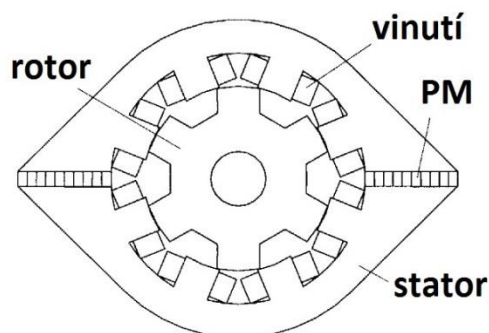
DSPM (*anglicky Doubly Salient Permanent Magnets motor*) je prakticky spínaný reluktanční motor, kterému jsou příčně do jha statoru přidány permanentní magnety. Tím je dosaženo zvýšení hustoty výkonu, a také zvýšení účinnosti. [15] Díky magnetům stroj také na rozdíl od SRM vykazuje nenulový záběrný moment i bez napájení cívek. [13] Na každém zubu statoru je navinuta cívka. Magnetický tok vytvořený cívkami v DSPM motoru má stále pouze jednu polaritu a tvar elektromotorického napětí v cívkách statoru se blíží lichoběžníku. Počet fází DSPM motoru se odvíjí od počtu zubů na statoru mezi jednotlivými magnety. [2], [14] Komutační frekvence každé fáze při určitých otáčkách je dána podle vzorce (1.1.).

$$f = \frac{p_r \cdot n}{60} \quad (1.1.)$$

- p_r označuje počet pólů rotoru

Ze vzorce (1.1.) tak vyplývá, že frekvence spínání jednotlivých fází je závislá na počtu pólů rotoru. Vzhledem k tomu, že se zvyšující se frekvencí stoupají ztráty v železe, je výhodné volit počet pólů rotoru ne příliš vysoký. Z tohoto důvodu má obvykle rotor DSPM motoru menší počet pólů než stator. Na druhou stranu, menší počet pólů rotoru vede k větším

momentovým pulzacím. [16] Podle literatury [13 - 16] se tedy jeví jako nejvhodnější DSPM motory s konstrukcí 6/4 nebo 8/6.

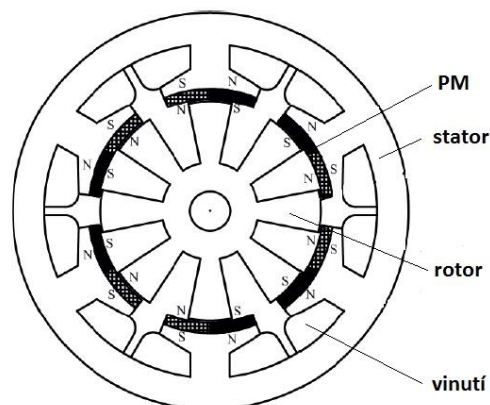


Obr. 1.1 DSPM motor 8/6 (upraveno z [15])

Na obrázku (Obr. 1.1) je zobrazen DSPM motor 8/6. Toto označení znamená, že motor má osm statorových a šest rotorových pólů. Na protilehlých pólech je vždy navinuta cívka jedné fáze tak, aby při sepnutí zajistila průchod magnetického toku těmito póly. [13], [16] Vhodně načasovaným spínáním jednotlivých cívek je pak možno rotor donutit otáčet se tak, aby magnetický tok procházel vždy s co možná nejmenší magnetickou reluktancí. K tomu je nutné znát přesnou polohu rotoru. Tu lze získat pomocí čidla polohy. Výsledný točivý moment je reluktančního charakteru. [16], [17]

1.2 FRM stroj

Na každém pólovém nástavci FRM stroje (*anglicky Flux-reversal machine*) jsou umístěny dva magnety, každý s opačnou polaritou, do série s cívkami statoru viz (Obr. 1.2). Díky tomu se FRM vyznačuje oproti jiným konstrukcím nízkými a konstantnějšími hodnotami vlastní indukčnosti, a z toho plynoucí krátkou časovou konstantou stroje. Nízká vlastní indukčnost také napomáhá k menšímu zvlnění točivého momentu. Větší část točivého momentu stroje je tvořena permanentními magnety. FRM se tedy chová jako SRM s velkou vzduchovou mezerou. [36], [37] Nevýhodou této konstrukce je obtížné upevnění magnetů na zaoblený povrch pólových nástavců, a také problémy se vznikem vířivých proudů uvnitř magnetů vyrobených z celistvého materiálu. Tok strojem je bipolární a elektromotorické napětí má trojúhelníkový nebo lichoběžníkový průběh v závislosti na konstrukci stroje. [37], [38]



Obr. 1.2 FRM stroj (upraveno z [2])

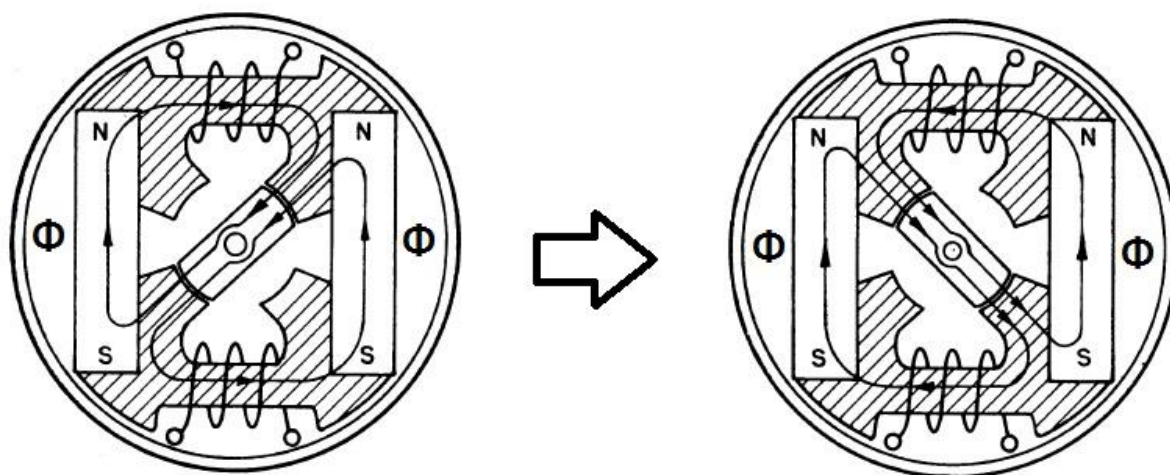
1.3 FSPM stroj

Možnost použití stroje se spínaným tokem a permanentními magnety s konstrukcí FSPM jako generátoru elektrické energie je popsána v článku [3] z roku 1955. Tento princip je tedy znám již dlouhou řadu let. Za velkou výhodou je v článku [3] považováno, že je možné dosáhnout krátkodobého špičkového výkonu 10 kW bez nutnosti přídavného chlazení. Jako další výhody jsou zde zmíněny vysoká účinnost při malé hmotnosti a rozměrech stroje a jednoduchost řízení amplitudy a frekvence napětí pouze změnou otáček hřídele. Tento systém byl testován v pomocných napájecích zdrojích pro navádění vojenských raket, kde bylo možno využít další z jeho velkých výhod. Tou je vysoká spolehlivost dodávky elektrické energie i po dlouhém skladování v porovnání s elektrochemickými zdroji. [3]

FSPM motor (*anglicky Flux Switching Permanent Magnets motor*) je jakousi kombinací synchronního motoru s permanentními magnety (*anglicky Permanent Magnet Synchronous Motor*) zkráceně PMSM a spínaného reluktančního motoru (*anglicky Switched Reluctance Motor*) zkráceně SRM. PMSM má díky permanentním magnetům umístěným na rotoru velký točivý moment, avšak je limitován chlazením permanentních magnetů a také jejich mechanickým uchycením, které musí odolat odstředivým silám působícím na otáčející se rotor. Naproti tomu u SRM je rotor velmi odolný, protože je vyhotoven pouze z feromagnetických plechů bez jakéhokoli vinutí nebo permanentních magnetů. Vzhledem k absenci druhého magnetického pole má však tento motor nižší hustotu energie a točivého momentu. Přídáním magnetů na stator spínaného reluktančního motoru SRM získáme stroj se

spínaným tokem a permanentními magnety neboli zkráceně FSPM stroj. Rotor FSPM stroje je složen, stejně jako u SRM, pouze z navzájem izolovaných elektromagnetických plechů, tím pádem je velmi odolný. Přidáním permanentních magnetů na stator stroje zvýšíme hustotu magnetického toku procházejícího ze statoru na rotor stroje, a tím dosažitelnou velikost točivého momentu. Tento stroj tedy kombinuje výhody PMSM a SRM. Při vhodném umístění permanentních magnetů na statoru stroje je také možno zajistit jednodušeji jejich chlazení. [1], [3], [11], [12]

Umístění permanentních magnetů se liší podle konstrukce konkrétního stroje. Permanentní magnety jsou na statoru umístěny buďto ve jhu, nebo přímo v zubech statoru. PM jsou vždy orientovány tak, aby tokem, který vytváří, působily proti sobě. Toto lze vidět na obrázku (Obr. 1.3). [3], [12]



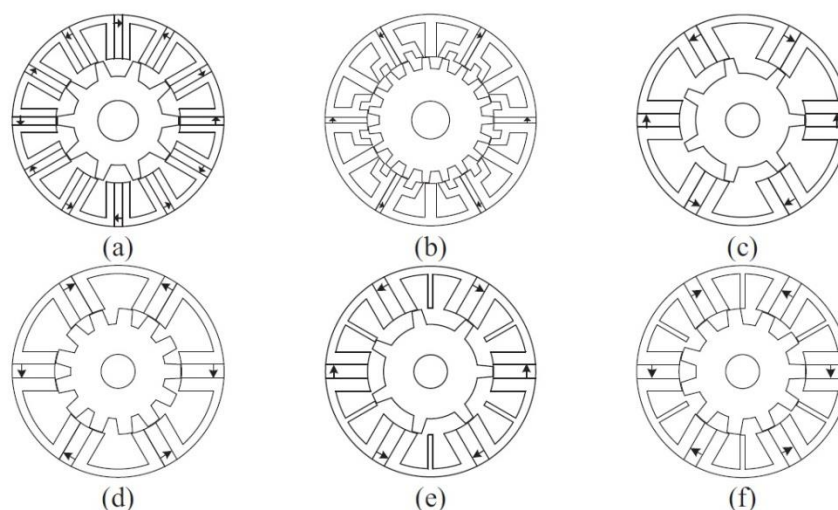
Obr. 1.3 FSPM stroj (upraveno z [3])

Vinutí cívky u FSPM stroje je umístěno vždy mezi dvěma póly na statoru. Mezi dalšími dvěma póly je pak tangenciálně umístěn permanentní magnet. Tím je zajištěno, že tok vytvořený cívkami může mít obě polarity na rozdíl od DSPM, kde má tok v cívkách vždy pouze jednu polaritu. FSPM motor proto dosahuje větších hodnot točivého momentu než DSPM stroj. Magnetický tok FSPM stroje má tedy shodný průběh jako u FRM stroje, ale vlivem odlišné konstrukce jsou eliminovány nevýhody, které jsou způsobeny magnety přimontovanými na povrchu statorových pólů u FRM. Elektromotorické napětí vytvářené tímto strojem je sinusové, což je výhodné jak pro použití stroje jako generátoru, tak i pro

použití stroje napájeného ze střídavé sítě. [2], [19]

1.4 Konstrukční vylepšení FSPM

V literatuře [11 - 20] je popsána řada různých konstrukcí FSPM motorů, které jsou podrobeny zkoumání. Tyto konstrukce se snaží ještě vylepšit vlastnosti stroje nebo je upravit pro konkrétní aplikace. Vlastnosti nových konstrukcí jsou obvykle ověřovány pomocí počítačových programů pracujících s metodou konečných prvků. To umožňuje teoreticky ověřit funkčnost motoru ještě před výrobou prototypu, a tím ušetřit za případnou výrobu nefunkčního vzorku.



Obr. 1.4 Ukázka různých konstrukcí FSPM motorů: (a) FSPM 12/10, (b) Multi-tooth FSPM, (c) FSPM 6/7 s C jádrem, (d) FSPM 6/13 s C jádrem, (e) 6/7 s E jádrem, (f) 6/11 s E jádrem (převzato z [21])

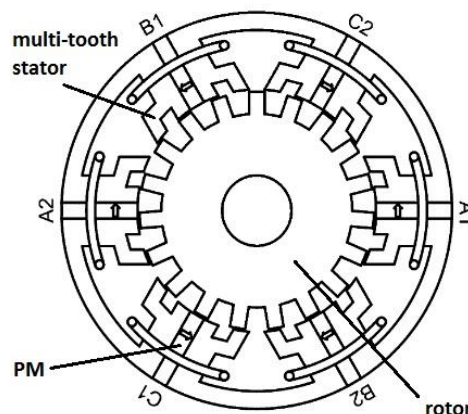
1.4.1 Počet a tvar pólů statoru a rotoru

Jednou z možností, jak ovlivnit vlastnosti stroje je změna počtu rotorových a statorových pólů. Počty pólů ovlivňují polohu d-osy a q-osy stroje a indukčnost v těchto osách. Dále pak ovlivňují frekvenci uvnitř stroje a tím pádem i indukované napětí a z toho vyplývající točivý moment. [21] Uvedené vlastnosti lze také ovlivnit šířkou zubů na statoru a rotoru a velikostí a kvalitou permanentních magnetů vložených do statoru. Podle [22] lze dosáhnout nejlepšího točivého momentu FSPM stroje zajištěním tloušťky magnetu shodné

s šířkou zubu statoru. Zredukováním šířky jha statoru na 70 % šířky zubu statoru lze dosáhnout větší vzduchové mezery mezi jednotlivými póly statoru a to také vede k mírnému zvýšení točivého momentu. [22]

1.4.2 Multi-tooth konstrukce

Zlepšení průběhu momentu, zejména pak snížení pulzačního momentu od permanentních magnetů (tzv. *Cogging torque*), může být dosaženo také použitím tzv. *multi-tooth* statorových pólů. Tyto póly jsou obdobné jako u hybridních krokových motorů. Stroj s tímto státorem lze vidět na obrázku (Obr. 1.5), kde stator má šest pólů a na každém pólu jsou čtyři vyniklé zuby. Rotor je standartní konstrukce s 19 zuby. [23]

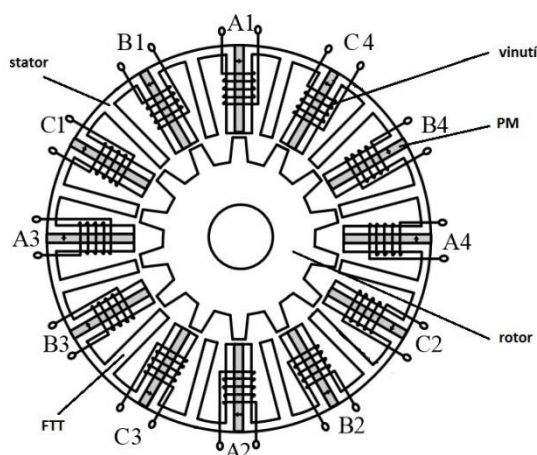


Obr. 1.5 Multi-tooth konstrukce statoru FSPM stroje (upraveno z [23])

1.4.3 Fault-tolerant konstrukce

Pro FSPM stroje je uvažováno využití také pro aplikace, kde výpadek stroje je velmi nežádoucí. Požadavky mohou být tak vysoké, že nesmí dojít k výpadku dokonce i při částečném poškození stroje (*anglicky Fault-tolerant systémy*). U takovýchto FSPM strojů je například galvanicky i magneticky oddělena každá fáze vinutí. Toho je dosaženo tím, že stator je složen z plechů ve tvaru E, které jsou vzájemně galvanicky izolovány (Obr. 1.4 (e), (f); Obr. 1.6). To znamená, že na statoru se nacházejí i zuby, na kterých není vinutí, ale uzavírá se přes ně magnetický tok (tzv. *fault-tolerant teeth, zkráceně FTT*), a tím je zajištěno, že se

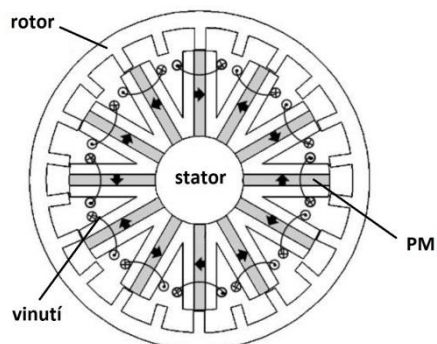
sousední fáze vzájemně nemohou ovlivňovat. Při poruše vinutí jedné fáze tedy může stroj nadále pracovat se zbývajícimi fázemi se sníženým výkonem. Je dokonce možné navrhnout i takový stroj, aby byl schopen pracovat s pouze jednou zdravou fází. [24], [25]



Obr. 1.6 Fault-tolerant FSPM motor (upraveno z [24])

1.4.4 FSPM s oběžným rotorem

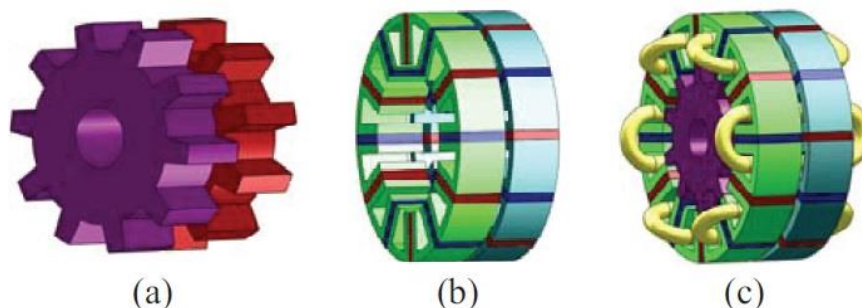
Tak jako například u BLDC motorů je hojně využíváno konstrukce s oběžným rotorem, je možno takto zkonstruovat i FSPM stroj. Principiálně pracuje stroj naprosto stejně, s tím rozdílem, že rotor není umístěn uvnitř statoru, ale obíhá okolo něj (Obr. 1.7). Hlavní výhodou tohoto uspořádání je snížení zvlnění momentu od permanentních magnetů tzv. Cogging torque. [26] Tento moment způsobuje nežádoucí pulzace momentu, a proto se ho snažíme potlačit. S tímto uspořádáním je také možno dosáhnout většího točivého momentu při stejné velikosti proudu cívkami a tím vyšší účinnosti. Hlavní nevýhodou konstrukce s oběžným rotorem je problematické chlazení vinutí statoru, které je uvnitř stroje hůře přístupné. [26], [28], [30] Tato konstrukce může být s úspěchem využita například v trakci, kde lze motor přímo integrovat do náboje kola. [27] Také pro použití FSPM stroje jako generátoru například ve větrných elektrárnách může být tato konstrukce výhodnější, protože je jednoduše možné zvýšit počet pólů rotoru a snížit počet pólů na statoru. Zvýšením počtu pólů rotoru lze snížit pulzace momentu. Vzhledem k nízké otáčivé rychlosti rotoru u větrných elektráren zároveň nedosahuje frekvence indukovaného napětí vysokých hodnot, a tudíž se příliš nezvyšují s frekvencí spojené ztráty v železe. [29]



Obr. 1.7 FSPM stroj s oběžným rotorem (upraveno z [30])

1.4.5 FSPM s dvojitým rotorem

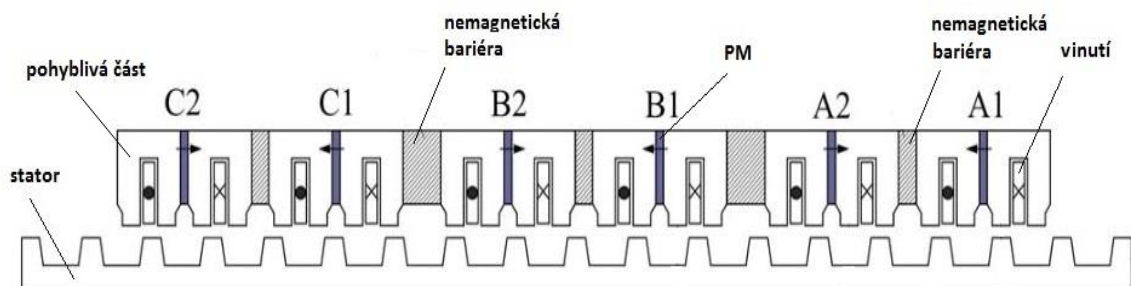
U FSPM stroje jsou již z principu funkce očekávány velké pulzace momentu. Největší zvlnění momentu je patrné u strojů, kde všechny póly statoru neobsahují vinutí (tzv. *fault-tolerant stroje*). [31] Ke snížení zvlnění momentu lze podle [31] použít konstrukci zkrouceného rotoru (*anglicky Twisted-rotor*). V této konstrukci je rotor i stator FSPM stroje složen ze dvou částí, ve kterých jsou zuby navzájem pootočený, a tyto dvě části jsou zařazeny za sebou (Obr. 1.8). Touto úpravou lze dosáhnout snížení pulzací momentu bez ovlivnění velikosti výsledného točivého momentu a schopnosti zeslabování magnetického toku pomocí cívek (*anglicky Flux-weakening capability*). [31], [32]



Obr. 1.8 FSPM stroj 12/10 s twisted-rotor konstrukcí: (a) konstrukce rotoru, (b) konstrukce statoru, (c) konstrukce celého stroje (převzato z [31])

1.4.6 Lineární FSPM stroj

Rozvinutím FSPM konstrukce vznikne lineární FSPM motor. Tato konstrukce trpí již z principu několika základními nedostatky. Na koncích magnetického obvodu má motor jiné vlastnosti, než uprostřed. Magnetický obvod lineárního FSPM motoru je tedy nevyvážený. Z toho plynou další nevýhody, jako větší pulzační moment od magnetů (*Cogging torque*) a větší zvlnění tažné či tlačné síly. Tyto nevýhody je možno do jisté míry potlačit vhodným návrhem stroje. [33] Lineární motory produkují přímo tažnou či tlačnou sílu bez převádění z otáčivého pohybu. Tím odpadá nutnost použití mechanických převodů a dochází ke zvýšení účinnosti a spolehlivosti soustavy stroje. Lineární stroje jsou využívány převážně v transportních systémech. [33], [34] V článku [35] je popsáno využití lineárního FSPM stroje také v aktivním tlumení silničních vozidel. Výhody užití lineárních FSPM strojů oproti standartním konstrukcím jsou stejné, jako byly popsány již výše u rotačních FSPM strojů.



Obr. 1.9 Lineární FSPM stroj (upraveno z [33])

2 Numerický model měřeného stroje

2.1 Popis programu Agros2D

Numerický model byl vytvořen pomocí programu Agros2D. Agros2D je multiplatformní aplikace pro řešení různých fyzikálních polí. K řešení parciálních diferenciálních rovnic využívá Agros2D knihovnu Hermes, která je založena na metodě konečných prvků vyšších řádů přesnosti. Tento program je vyvíjen na Západočeské univerzitě v Plzni. [39]

Pomocí Agros2D lze řešit problémy v kartézském nebo osově symetrickém uspořádání. Je možné modelovat ustálené stavy, harmonické analýzy a analýzy přechodných dějů. Program je rozdělen na tři základní části. *Preprocesor*, ve kterém je definován řešený problém, jeho geometrie, materiálové vlastnosti a okrajové podmínky. *Procesor* je zodpovědný za samotné řešení numerických výpočtů v jednotlivých uzlech řešené sítě. *Postprocesor* slouží ke grafickému zobrazení a následné analýze a dalšímu zpracování vypočtených dat. [39], [40]

2.2 Obecný popis modelu

Geometrie modelu byla vytvořena pomocí programu AutoCAD a do programu Agros2D byla naimportována ve formátu DXF. Poté bylo potřeba určit materiály jednotlivých komponentů. Každá uzavřená oblast modelu musí obsahovat vlastní materiálovou značku. Zadávané parametry jednotlivých materiálů jsou vypsány v tabulce (Tab. 2.1). Nakonec je potřeba výpočet modelu omezit okrajovými podmínkami. V tomto modelu je použita Dirichletova okrajová podmínka pro magnetický potenciál $A = 0 \text{ Wb}\cdot\text{m}^{-1}$. Tato podmínka určuje, že vektorový magnetický potenciál v dostatečné vzdálenosti od modelu se považuje za nulový. Proto je ve vzdálenosti 0,3 m od středu modelu umístěno fiktivní ohraničení modelu s Dirichletovou podmínkou $A = 0 \text{ Wb}\cdot\text{m}^{-1}$. Tím je definována oblast určená pro řešení.

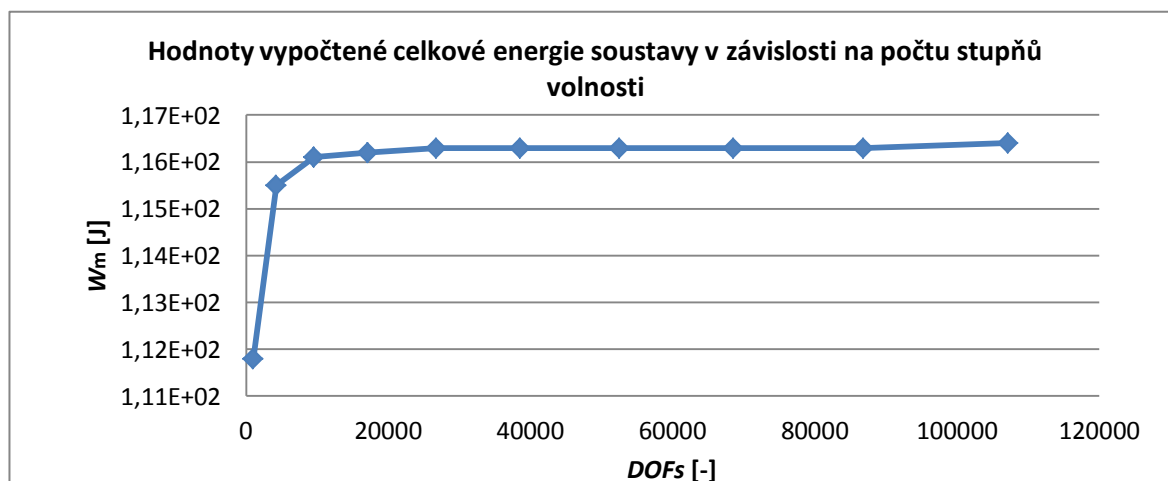
Řešená parciální diferenciální rovnice:

$$\text{rot} \left(\frac{1}{\mu(\vec{B})} \cdot (\text{rot} (\vec{A} - \vec{B}_r)) \right) = \vec{J}_{ext} \quad (1.2.)$$

| Materiál | Zadané parametry |
|--------------------------|--------------------------------|
| feromagnetická ocel | $\mu_r = 13000$ |
| permanentní magnet NdFeB | $\mu_r = 1,1$ $B_r = 1,2 T$ |
| měď | $\mu_r = 1$ |
| vzduch | $\mu_r = 1$ |

Tab. 2.1 Vlastnosti materiálů použitých v modelu

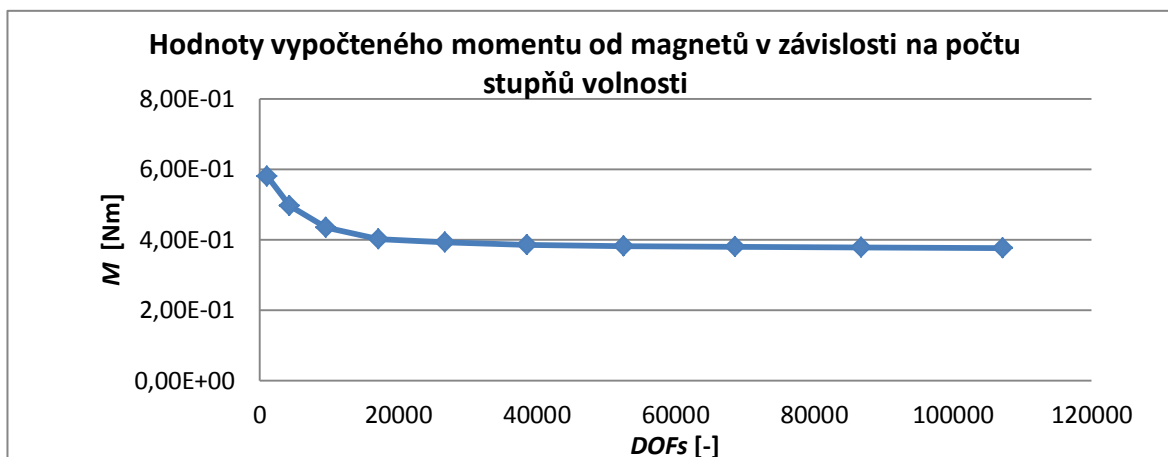
Výpočetní síť modelu je složena z trojúhelníkových elementů. Nejvíce zhuštěná je síť vždy tam, kde dochází ke změně v geometrii modelu. Počet těchto elementů, a tím i uzlů, v nichž je vypočítána hodnota parciální diferenciální rovnice pro magnetické pole je možno měnit. Počet zjemnění sítě je možno nastavit od 0 do 5 a řád výpočtového polynomu je možno nastavit od 0 do 10. Kombinací těchto dvou hodnot získáme různý počet stupňů volnosti (*anglicky degrees of freedom - DOFs*).



Obr. 2.1 Změna vypočtené hodnoty celkové energie soustavy v závislosti na DOFs

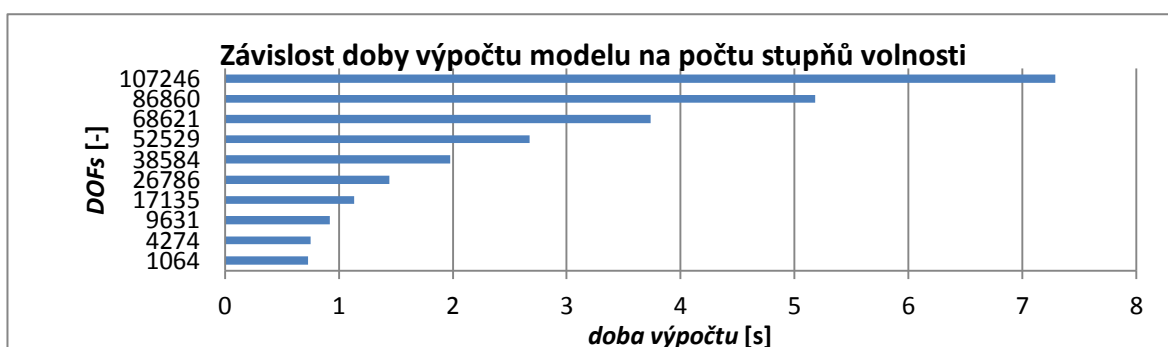
Bylo vyzkoušeno několik variant výpočtů v závislosti na počtu stupňů volnosti. V grafu (Obr 2.1) je znázorněna konvergence řešení pro hodnotu celkové energie soustavy. V grafu (Obr 2.2) je znázorněna konvergence řešení pro hodnotu momentu od permanentních

magnetů. Z těchto grafů vyplývá, že nejvíce se přesnost výpočtu snižuje při použití příliš malého množství stupňů volnosti například pro řád polynomu 1 a 2, ale od polynomu 3. řádu se výsledná hodnota výpočtu již výrazně nemění.



Obr. 2.2 Změna vypočteného momentu od magnetů v závislosti na DOFs

Obrázek (Obr. 2.3) však dokazuje, že s rostoucím řádem výpočtového polynomu se výrazně prodlužuje doba potřebná pro výpočet modelu. Stejně zákonitosti platí i pro zvyšování počtu zjemnění, kde počet stupňů volnosti narůstá se zvyšujícím se počtem zjemnění výrazně rychleji. Zvolením příliš velkého počtu stupňů volnosti se tedy výsledek nezpřesní, ale výrazně naroste čas potřebný na řešení modelu, a také nároky na použitý hardware. Po otestování více variant byl pro výsledný výpočet modelu zvolen kompromis v podobě počtu zjemnění 1 a řádu polynomu 2. Tato kombinace poskytuje dostatečně přesné výsledky za nepřilíš dlouhý čas potřebný pro výpočet. Počet stupňů volnosti při této kombinaci byl 17135.



Obr. 2.3 Závislost doby výpočtu na počtu stupňů volnosti

2.3 FSPM generátor namodelovaný pomocí MKP

Pomocí programu Agros2D byl namodelován průběh elektromagnetické indukce ve vzduchové mezeře stroje. Model byl zkonstruován tak, aby co nejpřesněji odpovídal reálnému stroji. Z magnetické indukce lze pomocí vzorce (1.3.) vypočítat magnetický tok pro každou polohu rotoru.

$$\Phi = \int_S B \cdot dS \quad [Wb] \quad (1.3.)$$

Při uvažování homogenního magnetického pole pak můžeme použít vzorec ve tvaru:

$$\Phi = B \cdot S \quad [Wb] \quad (1.4.)$$

Z magnetického toku procházejícího skrz cívku je možno poté pomocí vzorce (1.5.) vypočítat napětí indukované do každé ze dvou cívek na statoru:

$$u_i = -\frac{d\Phi}{dt} \quad [V] \quad (1.5.)$$

Lineární model

V lineárním modelu není vůbec uvažována změna permeability v závislosti na sycení železa. Relativní permeabilita je v tomto modelu zadána pouze jako konstantní hodnota $\mu_r = 13000$.

Cílem modelování bylo, získat co možná nejpřesnější informace o velikosti napětí, které se při otáčení rotoru indukuje do cívek na statoru. Z modelu získáme hodnoty magnetické indukce. Magnetický tok je vypočítán podle vzorce (1.4.), přičemž plocha jádra cívky určená z modelu je $S = 0,00120896 \text{ m}^2$. Na základě vzorce (1.5.) pak bylo vypočítáno indukované napětí. Čas jednoho kroku Δt do tohoto vzorce byl vypočítán z předpokládaných otáček za minutu a znalosti toho, o kolik se pootočí rotor za tento čas. To lze vidět ve vzorci (1.6.). Výsledné indukované napětí v modelu bylo tedy nakonec získáno podle vzorce (1.7.).

$$\Delta t = \frac{1}{n} \cdot \frac{\alpha}{360} = \frac{\alpha}{60 \cdot n} \text{ [s]} \quad (1.6.)$$

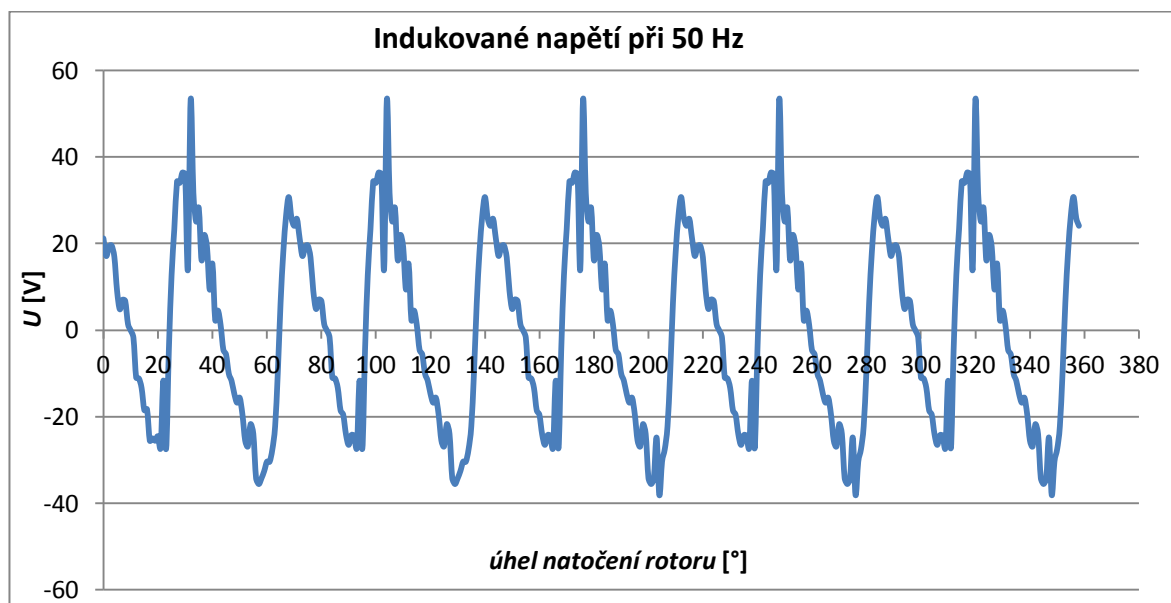
- α značí jednotkový úhel pootočení rotoru při simulaci ve stupních

$$u_i = -N \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} = -N \frac{\Delta \Phi}{\frac{\alpha}{60 \cdot n}} \text{ [V]} \quad (1.7.)$$

- Derivace d byla nahrazena malým konečným přírůstkem Δ podle $\frac{d\Phi}{dt} \sim \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$.

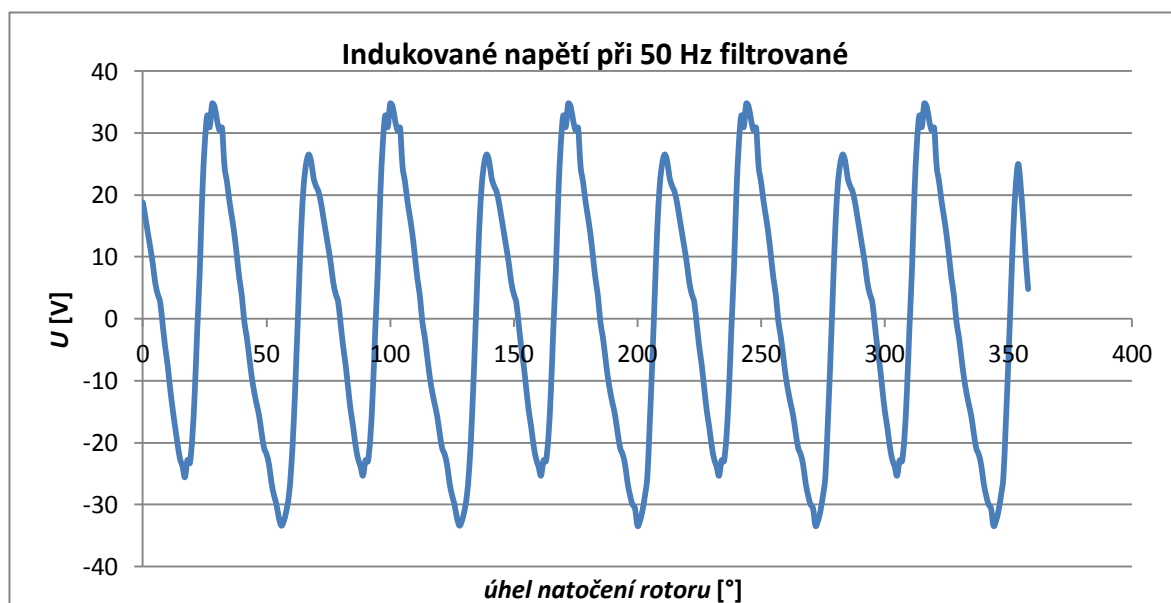
Model pro menší rotor se vzduchovou mezerou 5 mm

Na obrázku (Obr. 2.4) je zobrazen průběh indukovaného napětí s frekvencí 50 Hz do cívky na statoru, pro model FSPM generátoru s menším rotorem v závislosti na poloze rotoru. Napětí indukované do druhé cívky má stejný průběh, jen je fázově posunuto o 180°. Na tomto průběhu lze vidět, že některé hodnoty mají poměrně velkou odchylku od standardního průběhu. To je způsobeno tím, že v programu Agros2D není možné namodelovat plynulé otáčející se rotor a vygenerovat tak plynulou závislost magnetické indukce na poloze rotoru. Simulace otáčejícího se rotoru byla vytvořena tak, že hodnota magnetické indukce byla změřena vždy pro určitou polohu rotoru, a poté byl rotor pootočen a opět byla změřena hodnota magnetické indukce. Krok pootáčení rotoru v simulaci byl nastaven na 1°, to znamená, že jsme pro jednu celou otáčku rotoru získali 360 hodnot magnetické indukce.



Obr. 2.4 Průběh indukovaného napětí z modelu $f = 50$ Hz - neupravený, menší rotor

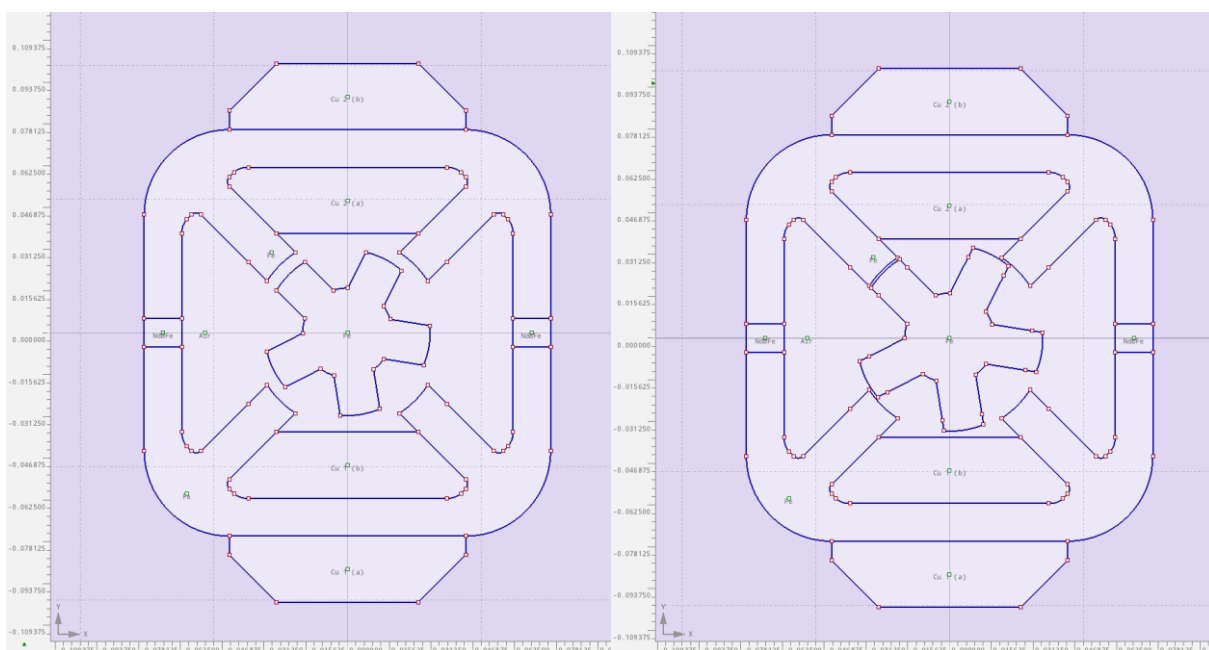
Na obrázku (Obr. 2.5.) je průběh napětí o frekvenci 50 Hz po odfiltrování odchýlených hodnot. Toho bylo dosaženo použitím klouzavého průměru. Tato metoda funguje tak, že vždy z pěti hodnot byl udělán aritmetický průměr, a poté se hodnoty posunuly o jednu hodnotu dále. Hodnoty aritmetických průměrů jsou vyneseny do grafu. Tímto způsobem vznikl vyhlazený průběh indukovaného napětí.



Obr. 2.5 Průběh indukovaného napětí z modelu $f = 50$ Hz - filtrovaný, menší rotor

Model pro větší rotor se vzduchovou mezerou 1 mm

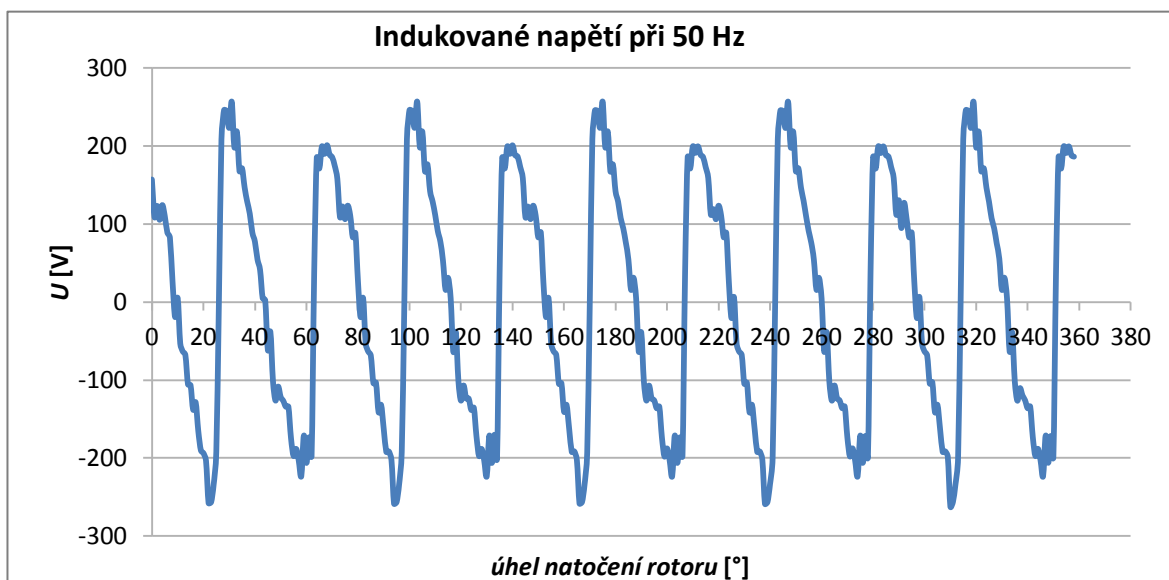
Model pro větší rotor byl namodelován se shodnými parametry, jako model s menším rotorem. Relativní permeabilita je v tomto modelu zadána také pouze jako konstantní hodnota $\mu_r = 13000$. Jediný rozdíl oproti modelu s menším rotorem je ten, že rotor byl zvětšen tak, že vzduchová mezera mezi zuby na statoru a na rotoru je zmenšena z původních 5 mm na 1 mm. Porovnání geometrie modelu s větším a menším rotorem zobrazují obrázky (Obr. 2.6, Obr. 2.7).



Obr. 2.6 Geometrie s menším rotorem

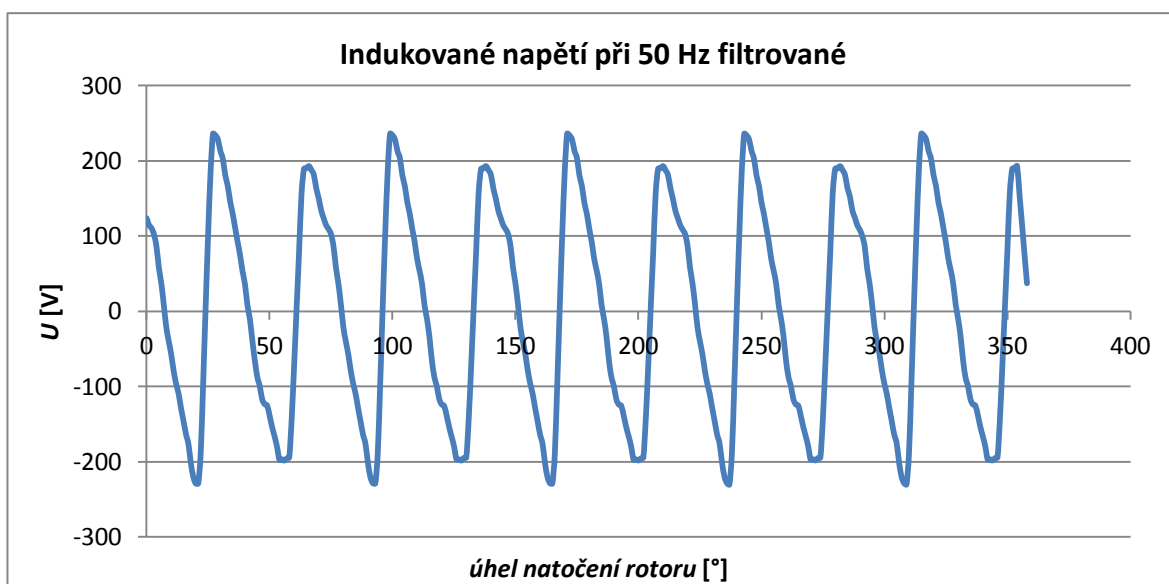
Obr. 2.7 Geometrie s větším rotorem

Na obrázku (Obr. 2.8) je průběh napětí při 50 Hz pro model FSPM generátoru s větším rotorem pro identické parametry modelu jako u modelu s menším rotorem.



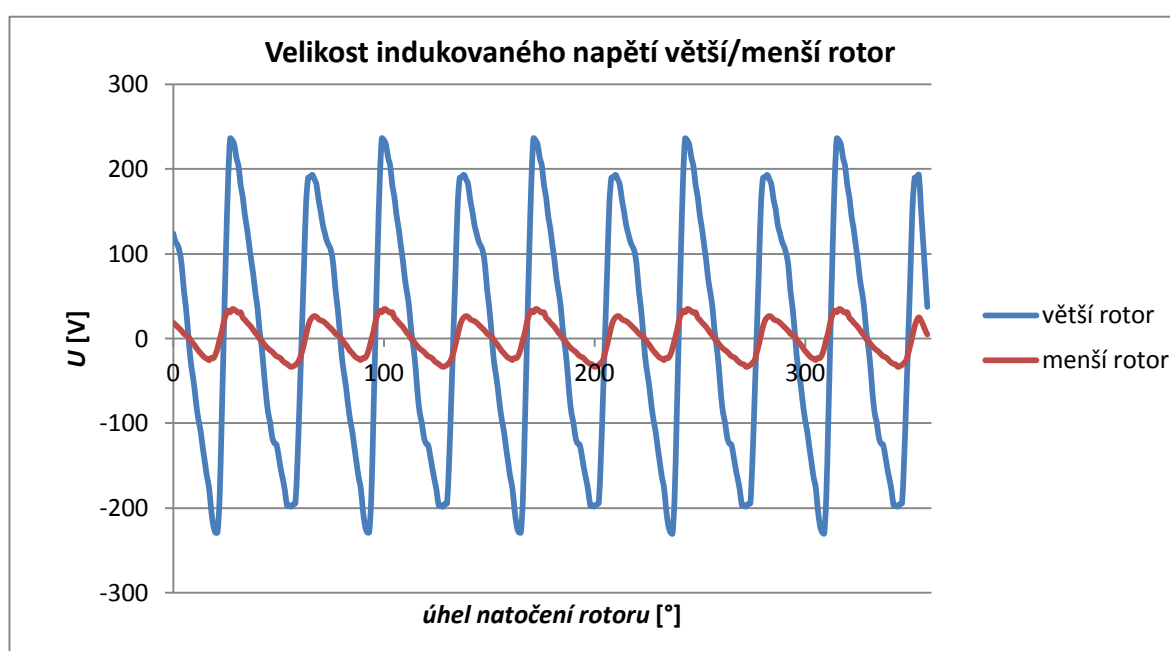
Obr. 2.8 Průběh indukovaného napětí z modelu $f = 50$ Hz - neupravený, větší rotor

Na obrázku (Obr. 2.9) je průběh napětí z obrázku (Obr.2.8) po odfiltrování odchýlených hodnot. Toho bylo dosaženo stejným způsobem, jako je již popsáno výše u modelu s menším rotorem.



Obr. 2.9 Průběh indukovaného napětí z modelu $f = 50$ Hz - filtrovaný, větší rotor

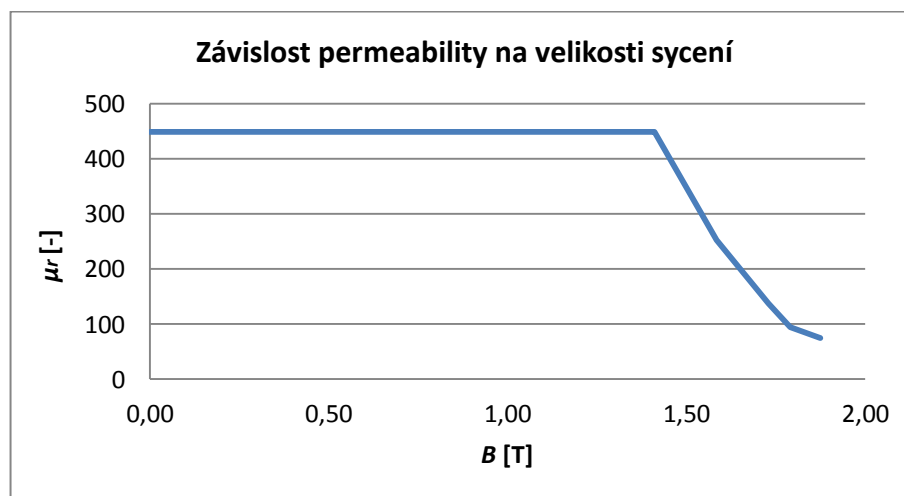
Při porovnání obrázků (Obr. 2.4, Obr. 2.5) a obrázků (Obr. 2.8, 2.9) je ihned patrné, že hodnota indukovaného napětí se zmenšenou vzduchovou mezerou velmi výrazně vzrostla. Maximální hodnota indukovaného napětí z modelu pro menší rotor pro frekvenci 50 Hz je 34,7 V. Oproti tomu maximální hodnota indukovaného napětí z modelu pro větší rotor pro frekvenci 50 Hz je 236,1 V. Z toho vyplývá, že se zmenšením vzduchové mezery o 4 mm vzroste hodnota indukovaného napětí téměř sedmkrát. Tento rozdíl je dobře patrný z grafu (Obr. 2.10).



Obr. 2.10 Porovnání velikosti indukovaného napětí pro větší a menší rotor pro 50 Hz

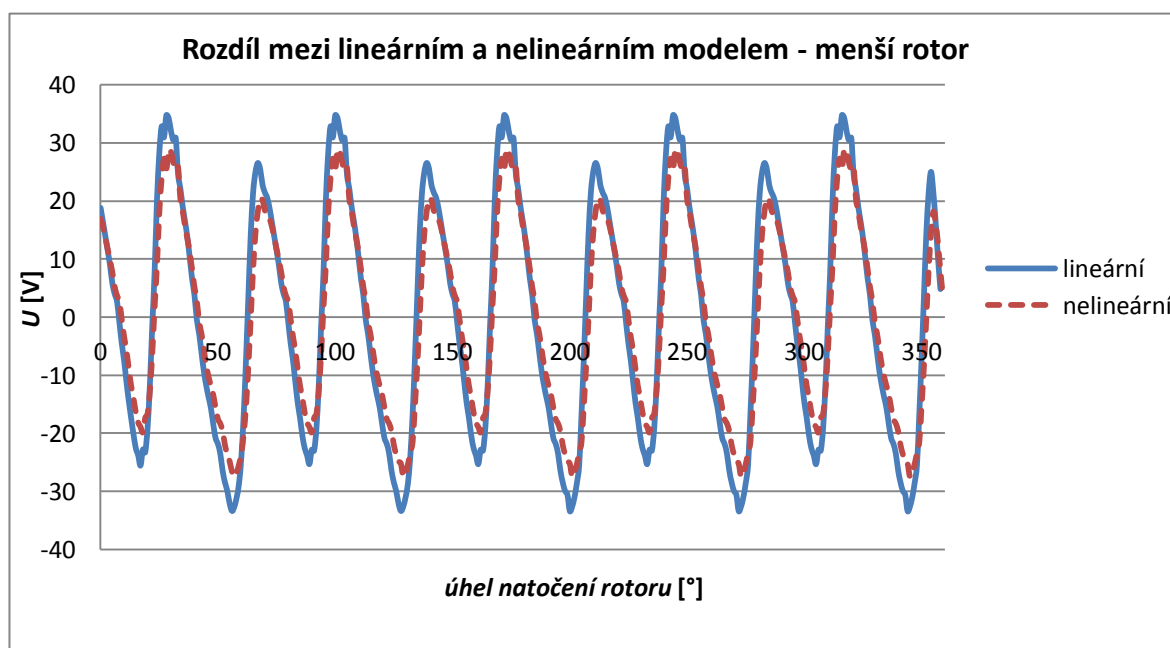
Nelineární model

Ve výše uvedeném lineárním modelu nebyla vůbec uvažována závislost permeability na sycení železa odvíjející se od velikosti magnetické indukce. Zadáním charakteristiky pro sycení materiálu je možno zahrnout do modelu vliv sycení železa na permeabilitu, a tím zpřesnit výsledky získané z modelování. Pro model byla použita charakteristika oceli ČSN 12040 (Obr. 2.11).

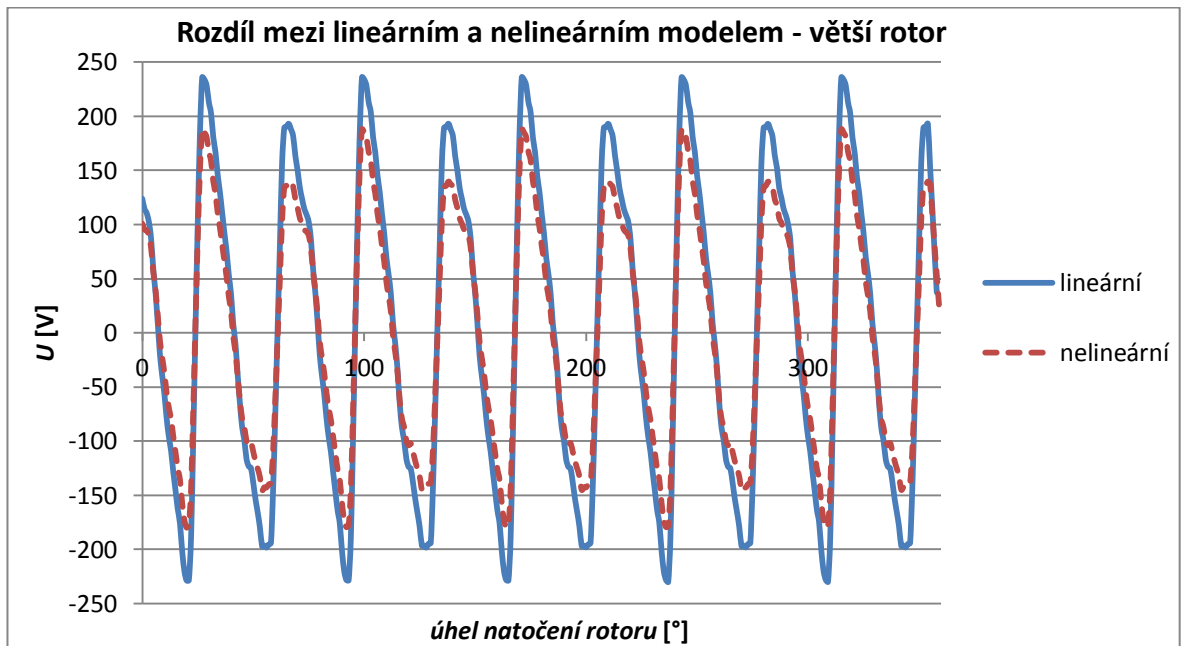


Obr. 2.11 Závislost permeability na velikosti sycení pro ocel ČSN 12040

Uvažování nelinearity magnetického obvodu způsobilo pokles vypočteného indukovaného napětí téměř o 18 % u modelu s malým rotorem (Obr. 2.12). U modelu s větším rotorem byl způsoben pokles indukovaného napětí o téměř 20 % (Obr. 2.13).



Obr. 2.12 Rozdíl v indukovaném napětí mezi lineárním a nelineárním modelem - menší rotor pro 50 Hz

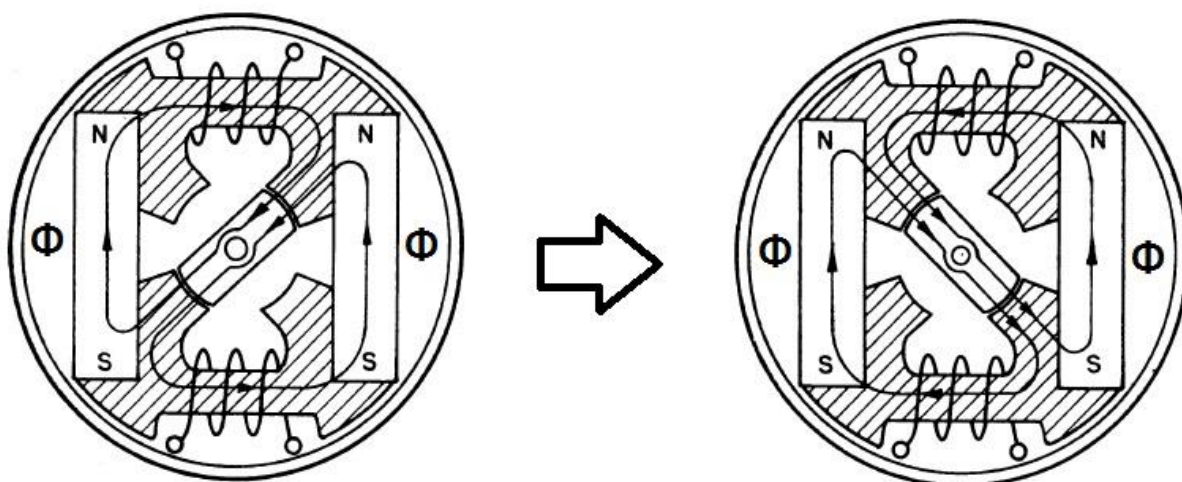


Obr. 2.13 Rozdíl v indukovaném napětí mezi lineárním a nelineárním modelem - větší rotor pro 50 Hz

3 FSPM stroj jako generátor

3.1 Základní princip FSPM generátoru

Základní princip FSPM generátoru je vidět na obrázku (Obr. 3.1.). Pro jednoduchost a snazší pochopení funkce má rotor na obrázku pouze 2 zuby. V praxi by bylo výhodnější použít rotor s více zuby, protože by tak docházelo k menším skokům rotoru a tím menším momentovým pulzacím. Změnou počtu zubů na rotoru je také možno ovlivnit frekvenci napětí indukovaného do cívek na statoru. [3] Vzhledem k tomu, že stator i rotorem protéká střídavý magnetický tok, je vhodné, aby byl stator i rotor konstruován z tenkých vzájemně izolovaných feromagnetických plechů. Tímto opatřením zabezpečíme snížení ztrát v železe. [4] Na statoru jsou navinuty dvě cívky. Na statoru jsou dále umístěny dva permanentní magnety, které jsou ve stroji orientovány tak, že vždy shodné póly magnetů směřují na stejnou stranu. Magnetický tok vytvořený permanentními magnety je na obrázku (Obr. 3.1.) znázorněn pomocí šipek. Po pootočení rotoru o mechanických 90° se polarita magnetického toku procházejícího strojem obrátí. Pro každou celou otáčku rotoru se tedy čtyřikrát změní směr magnetického toku. Za jednu otáčku rotoru tedy získáme čtyři cykly výstupního napětí. [1], [3], [5]



Obr. 3.1. Průběh magnetického toku v závislosti na poloze rotoru (upraveno z [3])

Počet těchto cyklů za sekundu je úměrný počtu pólů na rotoru a lze ho vypočítat pomocí vzorce:

$$cps = p_r \frac{n}{60} \quad (1.8.)$$

- Ve vzorci (1.8.) *cps* (cycles per second) odpovídá počtu cyklů za jednu sekundu, p_r značí počet pólů na rotoru a n udává počet otáček hřídele za minutu. [3]

Generované napětí pak vychází ze vzorce:

$$U = \frac{N p_r n \Phi f_v}{60} [V] \quad (1.9.)$$

- Zde N odpovídá počtu závitů cívky, p_r je počet pólů rotoru, n jsou otáčky rotoru za minutu, Φ odpovídá změně toku ve statoru a f_v je frekvence v cyklech za sekundu ze vzorce (1.8.). [3]

Indukčnost cívky statoru je závislá na počtu závitů, ale také na konfiguraci magnetického obvodu:

$$L = \frac{0,4 \pi N^2 10^{-8}}{R_m} [H] \quad (1.10.)$$

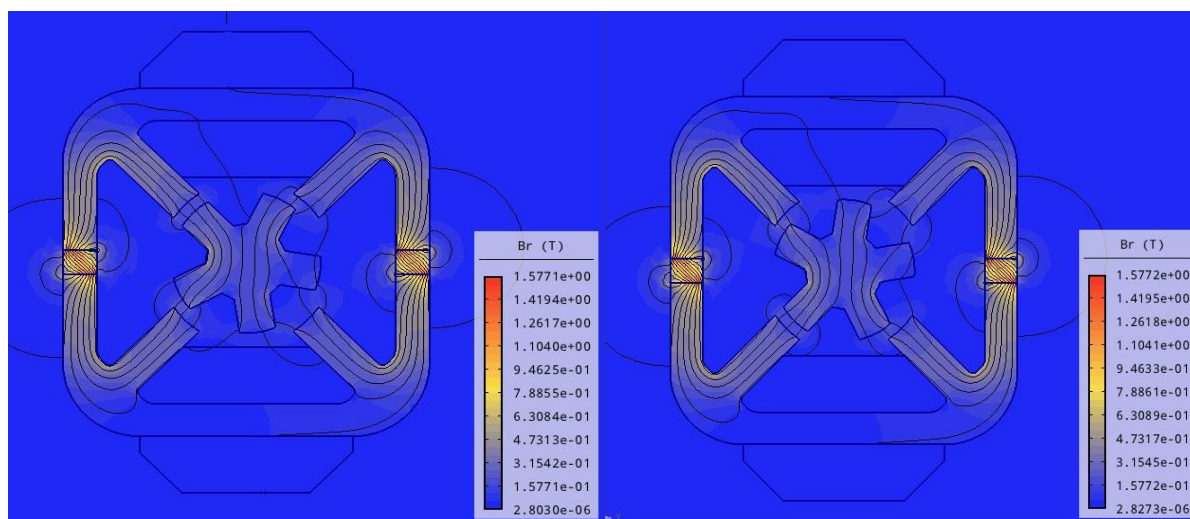
- R_m odpovídá magnetické reluktanci

$$R_m = \frac{l_{fe}}{\mu_{fe} S_{fe}} + \frac{l_{mag}}{\mu_{mag} S_{mag}} + \frac{l_{vzd}}{\mu_0 S_{vzd}} [H^{-1}] \quad (1.11.)$$

Magnetická reluktance neboli magnetický odpor závisí na konstrukci konkrétního FSPM stroje. Skládá se z magnetické reluktance v železe stroje na statoru i rotoru, v permanentních magnetech a ve vzduchové mezeře. Závisí tedy na použitých materiálech a také na tom, kudy přesně ve stroji protéká magnetický tok. Při každé poloze rotoru se mění magnetická reluktance a s ní tím pádem magnetický tok procházející přes rotor.

$$\Phi = L \cdot I \quad [Wb] \quad (1.12.)$$

Tento jev lze pozorovat na obrázku (Obr. 3.2), kde je pomocí kontur naznačen magnetický tok vytvořený permanentními magnety, který se uzavírá přes rotor. Při dvou rozdílných polohách rotoru lze vidět, že tok vždy protéká místy s nejmenší magnetickou reluktancí. Ze vzorce (1.10.) vyplývá, že indukčnost je nepřímo úměrná magnetické reluktanci. Indukčnost cívek ve FSPM stroji je proto pro každou polohu rotoru jiná. [3], [5]



Obr. 3.2 Magnetický tok vytvářený permanentními magnety a jeho změna po pootočení rotoru (Agros2D)

3.2 Měření na reálném FSPM generátoru s menším rotorem

Pro provedení měření FSPM stroje v generátorickém režimu bylo potřeba FSPM strojem otáčet konstantními otáčkami, které by bylo možné plynule regulovat. K tomu byl použit malý třífázový vysokootáčkový asynchronní motor s označením FT4C52S vyrobený společností ATAS Náchod s frekvenčním měničem SKA1200075 od firmy Emerson Industrial Automation (Tab. 3.1). K této sestavě byl pomocí řemene přes řemenici připojen FSPM stroj.

| | |
|---------------------------|------------|
| Jmenovité vstupní napětí | 230 V 1f |
| Jmenovité výstupní napětí | 230 V 3f |
| Jmenovitý výstupní proud | 4 A |
| Jmenovitý výkon | 750 W |
| Frekvenční rozsah | 0 - 550 Hz |

Tab. 3.1 Štítkové parametry frekvenčního měniče SKA1200075 [9]

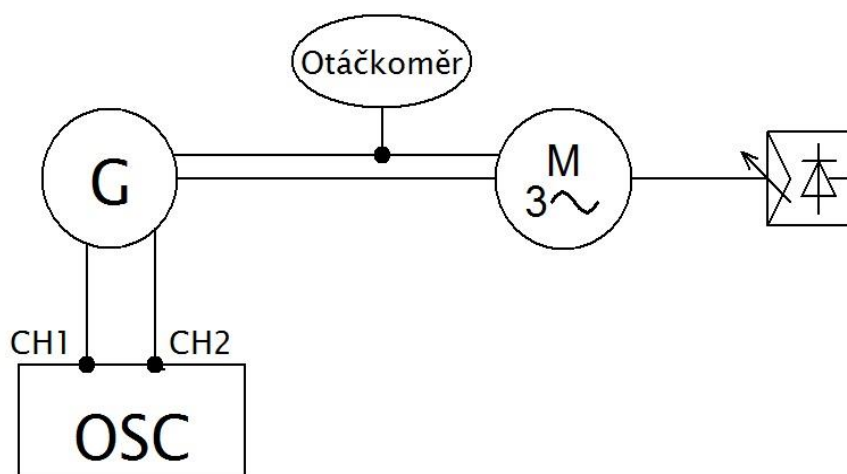


Obr. 3.3 Asynchronní stroj s frekvenčním měničem

K cívkám navinutým na statoru byl připojen osciloskop. Pomocí něho bylo měřeno napětí indukované do cívek. Otáčky rotoru byly měřeny pomocí optického snímače otáček přímo na řemenici FSPM generátoru. Schéma zapojení zobrazuje obrázek (Obr. 3.4).

| | |
|--------------------------|--------------------|
| Jmenovité vstupní napětí | 230 V 3f |
| Jmenovitý výkon | 500 W |
| Rozsah otáček | 0 - 23700 ot./min. |
| Krytí | IP 44 |
| Druh zatížení | S1 |

Tab. 3.2 Štítkové parametry motoru FT4C52S [10]

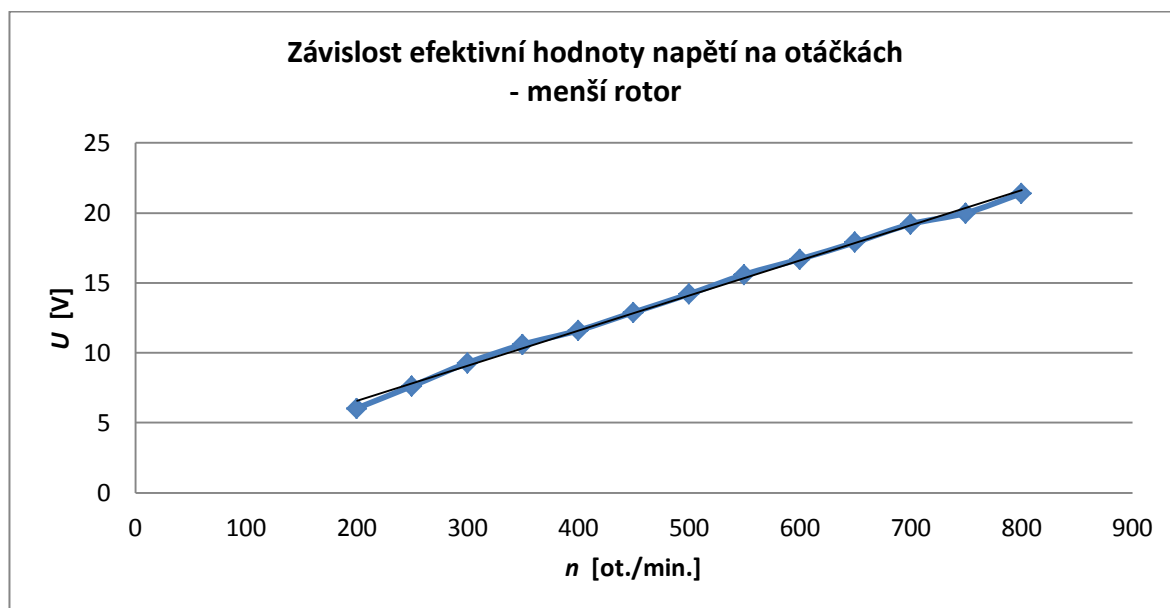


Obr. 3.4 Schéma zapojení pro měření napětí naprázdno

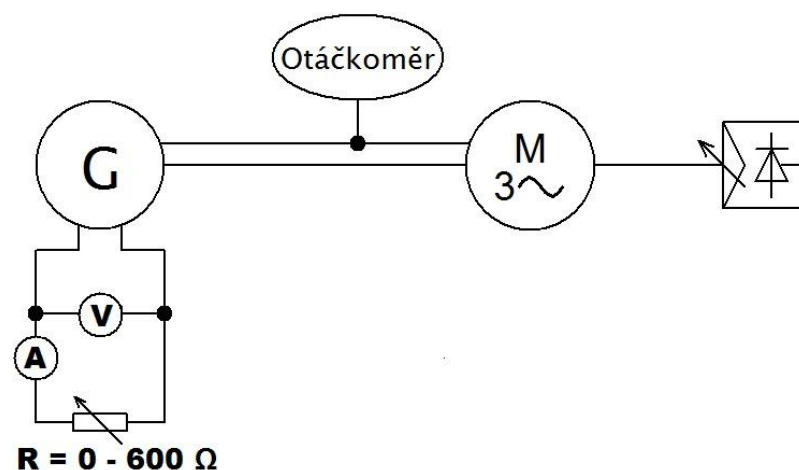
V grafu (Obr. 3.6) je vidět, jak se mění efektivní hodnota indukovaného napětí v závislosti na otáčkách rotoru. Toto napětí roste lineárně se zvyšujícími se otáčkami rotoru. Tento průběh tedy odpovídá závislosti, která je popsána ve vzorci (1.9.).



Obr. 3.5 Sestava pro měření na FSPM generátoru - menší rotor

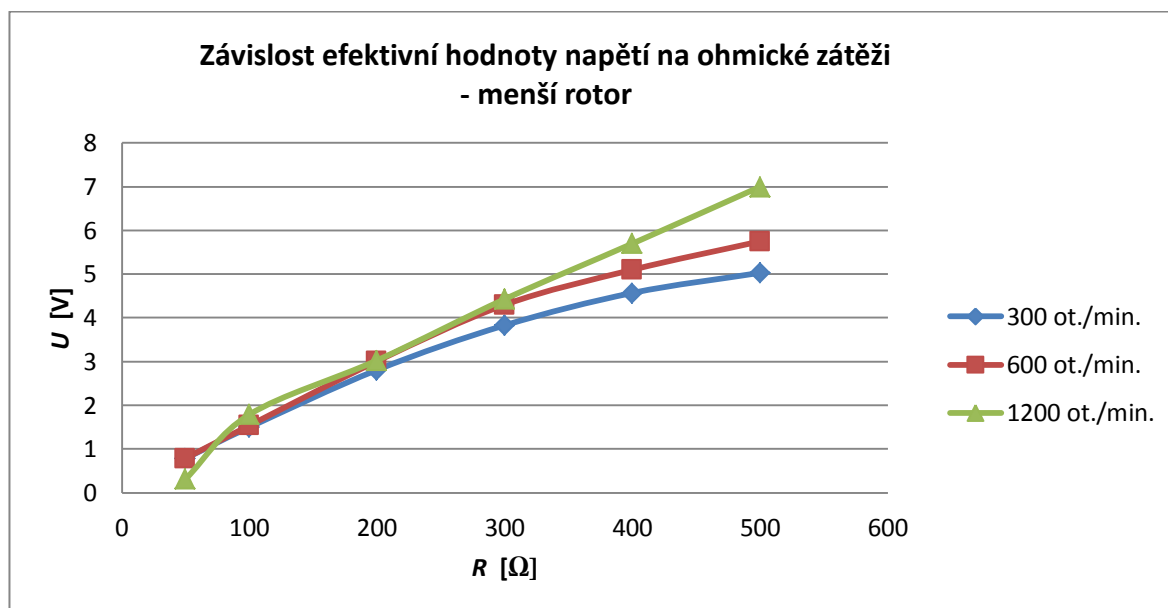


Obr. 3.6 Závislost efektivní hodnoty napětí na otáčkách rotoru - menší rotor



Obr. 3.7 Schéma zapojení pro měření napětí s ohmickou zátěží

Graf (Obr. 3.8) znázorňuje pokles napětí indukovaného do cívek v závislosti na zatížení přídavným rezistorem. Z grafu je patrné, že napětí oproti nezatíženému stavu poměrně výrazně poklesne. Na průbězích pro 300 a 600 ot./min. je vidět, jak má napětí nejprve lineární průběh, ale poté se zvyšujícím se zátěžným odporem začne dodávané napětí klesat. FSPM generátor v této konfiguraci je tedy poměrně měkký zdroj. Nesmí být opomenuto také to, že už jen samotná cívka na statoru, do které se napětí indukuje, má odpor 60 Ω .



Obr. 3.8 Závislost indukovaného napětí na zátěži - menší rotor

3.3 Měření na reálném FSPM generátoru s větším rotorem

Po záměně rotoru ve FSPM stroji za větší výrazně vzrostl vlivem snížené magnetické reluktance statický moment vytvářený permanentními magnety. Takto velký moment již nebylo možno přenést pomocí řemenu. Pro měření FSPM generátoru s větším rotorem bylo tedy nutné použít jinou měřicí sestavu (Obr. 4.5), než byla použita k měření stroje s menším rotorem. Sestava se skládala z poháněcího asynchronního motoru firmy Siemens s označením 1LE10010EA422AB4-Z se jmenovitým výkonem 2,2 kW. Štítkové hodnoty motoru jsou vypsány v tabulce (Tab. 3.3). Hřídel měřeného FSPM stroje byla ke hřídeli hnacího motoru připojena přes pevnou spojku, skládající se ze dvou kovových částí, které byly vzájemně propojeny silonovou výplní. Ta slouží k tlumení momentových rázů (Obr. 3.9).

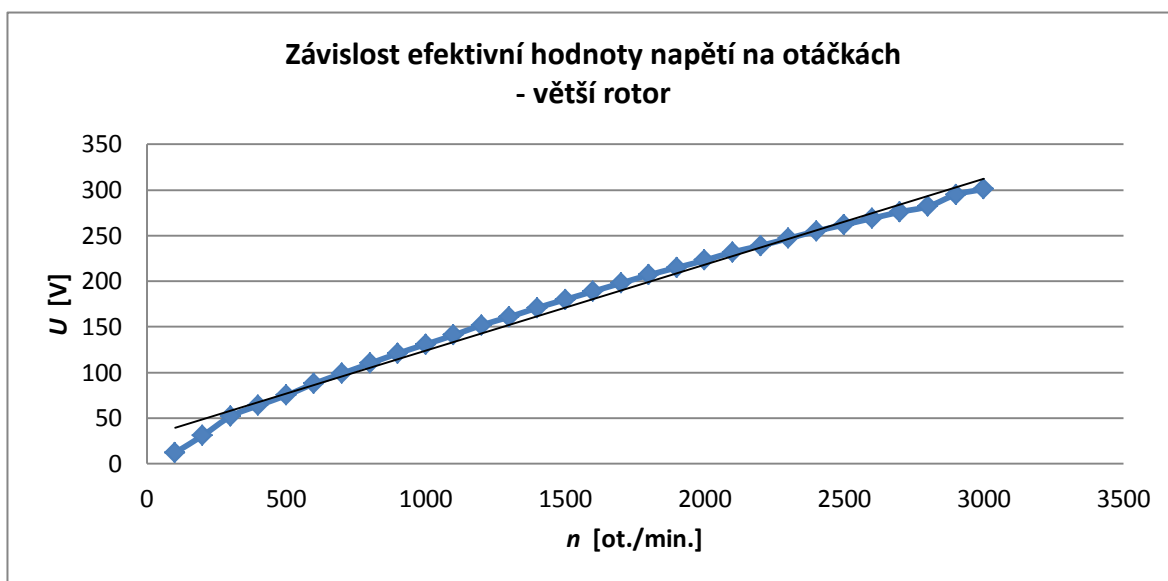


Obr. 3.9 Detail spojení hřídelí FSPM a asynchronního stroje - větší rotor

| U [V] | f [Hz] | P [kW] | I [A] | PF [-] | RPM | EFF-CL | ETA [%] |
|-------|--------|--------|-------|--------|------|--------|---------|
| 230 Δ | 50 | 2,2 | 7,8 | 0,85 | 2890 | IE2 | 83,2 |
| 400 Y | 50 | 2,2 | 4,50 | 0,85 | 2890 | IE2 | 83,2 |
| 460 Y | 60 | 2,55 | 4,35 | 0,86 | 3485 | IE2 | 85,5 |

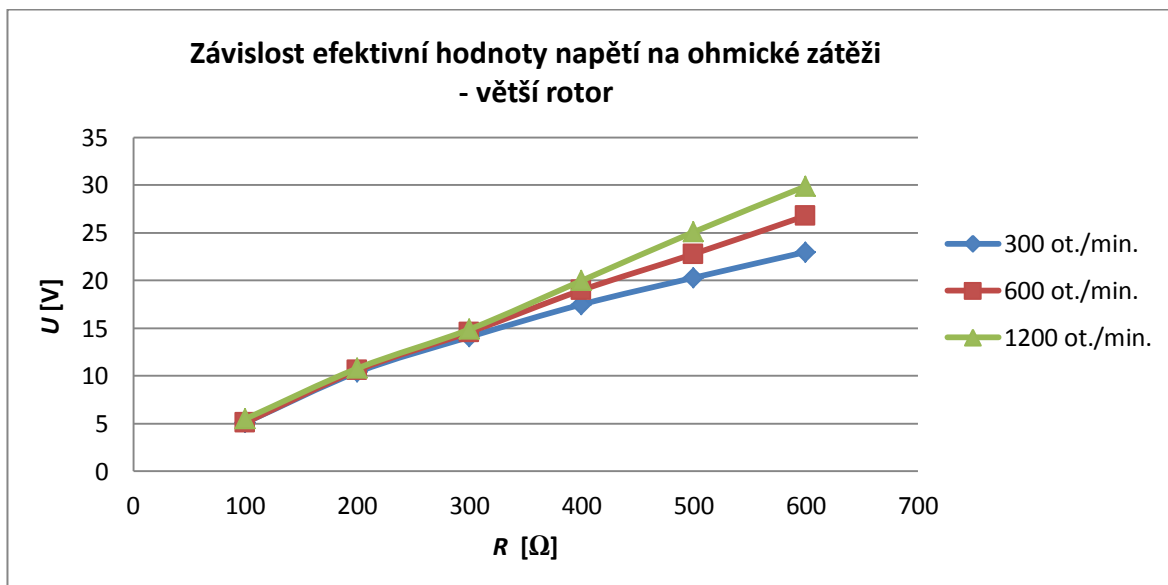
Tab. 3.3 Štítkové hodnoty motoru Siemens 1LE10010EA422AB4-Z [42]

Graf (Obr. 3.10) zobrazuje velikost efektivní hodnoty indukovaného napětí v závislosti na otáčkách rotoru pro stroj s větším rotorem. Při vyšších otáčkách je zde vidět pokles napětí od lineárního průběhu. To je způsobeno tím, že uvnitř stroje je při 3000 ot./min. frekvence 246 Hz. Při takto vysoké frekvenci se výrazně zvyšují ztráty v železe, zejména vezmeme-li v úvahu, že celý experimentální stroj je zkonstruován z masivního materiálu, a ne z lištěných plechů, pomocí kterých je možno tyto ztráty výrazně snížit. Tento jev bylo možné pozorovat i na oteplení stroje.



Obr. 3.10 Závislost efektivní hodnoty napětí na otáčkách rotoru - větší rotor

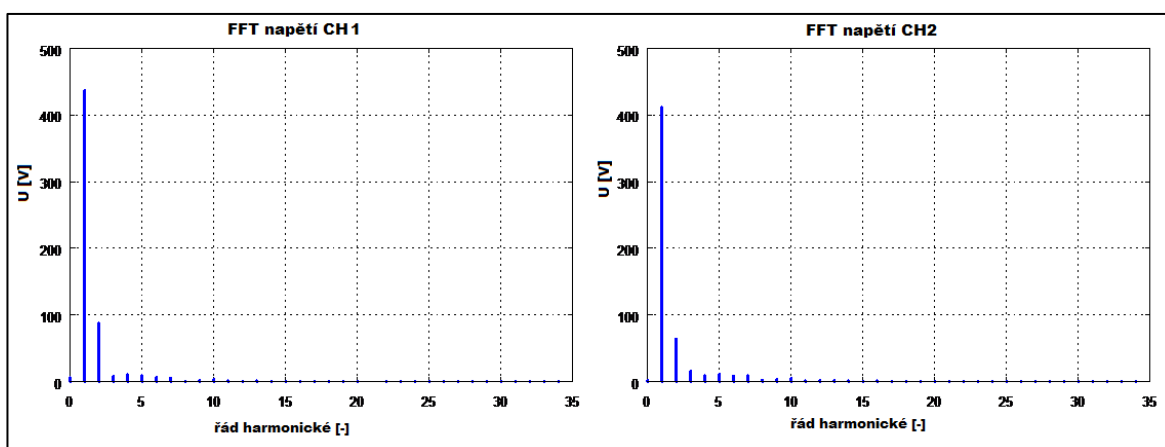
V grafu (Obr. 3.11) jsou zobrazeny velikosti efektivní hodnoty napětí v závislosti na odporu zátěže pro různou rychlost otáčení rotoru. Velikost napětí při stejných otáčkách a odporu vzrostla oproti hodnotám pro menší rotor přibližně čtyřikrát. Přesto je zkoušený FSPM stroj velmi měkký zdroj napětí. To je dáno mimo jiné vysokým odporem cívek na statoru stroje. Schémata zapojení pro měření generátoru s větším rotorem jsou shodná, jako u měření s menším rotorem (Obr. 3.4, 3.7).



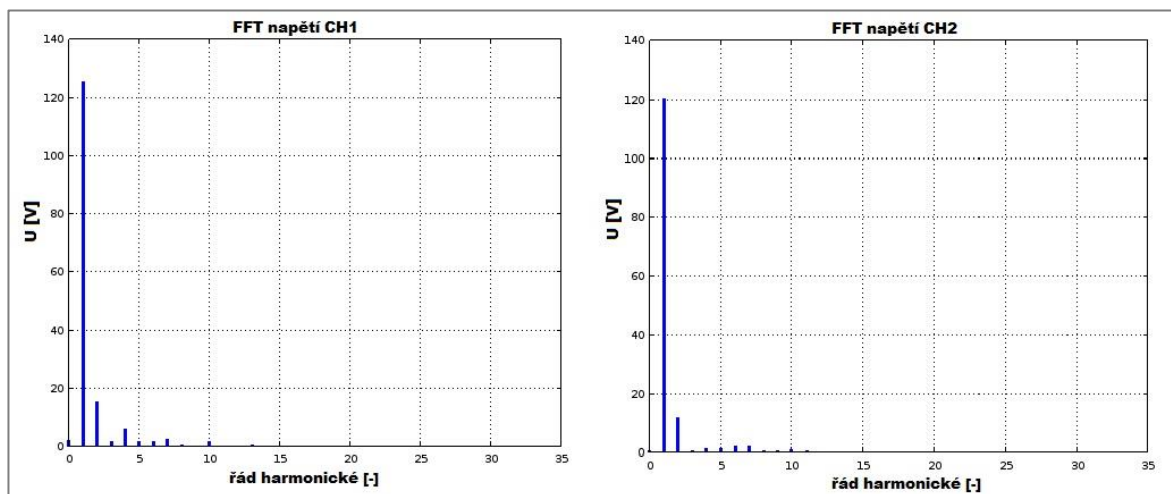
Obr. 3.11 Závislost indukovaného napětí na zátěži - větší rotor

Na obrázku (Obr. 3.12) je zobrazena Fourierova transformace indukovaného napětí při 3000 ot./min. pro obě cívky statoru. Fourierova transformace byla provedena pomocí skriptu v programu GNU Octave. Na obrázku jsou zobrazeny harmonické do řádu 35. Nejvýraznější jsou druhá až sedmá harmonická. Z obrázku je patrné, že na kanálu CH1 má první a druhá harmonická vyšší amplitudu o více než 20 V, než na kanálu CH2. Tato odchylka má velikost 6,1 % a je pravděpodobně způsobena ne úplně shodným počtem závitů na cívkách statoru.

$$odch_{CH1 \text{ a } CH2} = \left(\frac{U_{CH1}}{U_{CH2}} - 1 \right) \cdot 100 = \left(\frac{436,8}{411,5} - 1 \right) \cdot 100 = 6,1 \% \quad (1.13.)$$



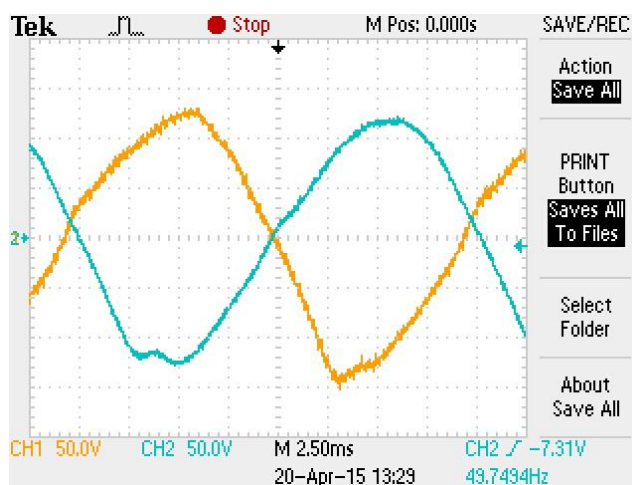
Obr. 3.12 FFT indukovaného napětí pro 3000 ot./min. pro obě cívky statoru - větší rotor



Obr. 3.13 FFT indukovaného napětí pro 600 ot./min. pro obě cívky statoru - větší rotor

Na obrázku (Obr. 3.13) je zobrazeno napětí pomocí FFT pro oba kanály pro 600 ot./min. Průběh tohoto napětí je zachycen na obrazovce osciloskopu (Obr. 3.14). Ačkoli by se podle obrázku (Obr. 3.14) mohlo zdát, že více sinusový je průběh napětí na kanále CH1, podle velikosti amplitud vyšších harmonických na obrázku (Obr. 3.13) je vidět, že průběh napětí na kanále CH2 má se více blíží sinusovému průběhu. Kanál CH2 má opět nižší amplitudu první harmonické, stejně jako u průběhu pro 3000 ot./min. na obrázku (Obr. 3.12). Rozdíl velikosti napětí mezi kanálem CH1 a CH2 pro rychlost 600 ot./min. je 4,1 %.

$$odch_{CH1 \text{ a } CH2} = \left(\frac{U_{CH1}}{U_{CH2}} - 1 \right) \cdot 100 = \left(\frac{125,7}{120,7} - 1 \right) \cdot 100 = 4,1 \% \quad (1.14.)$$



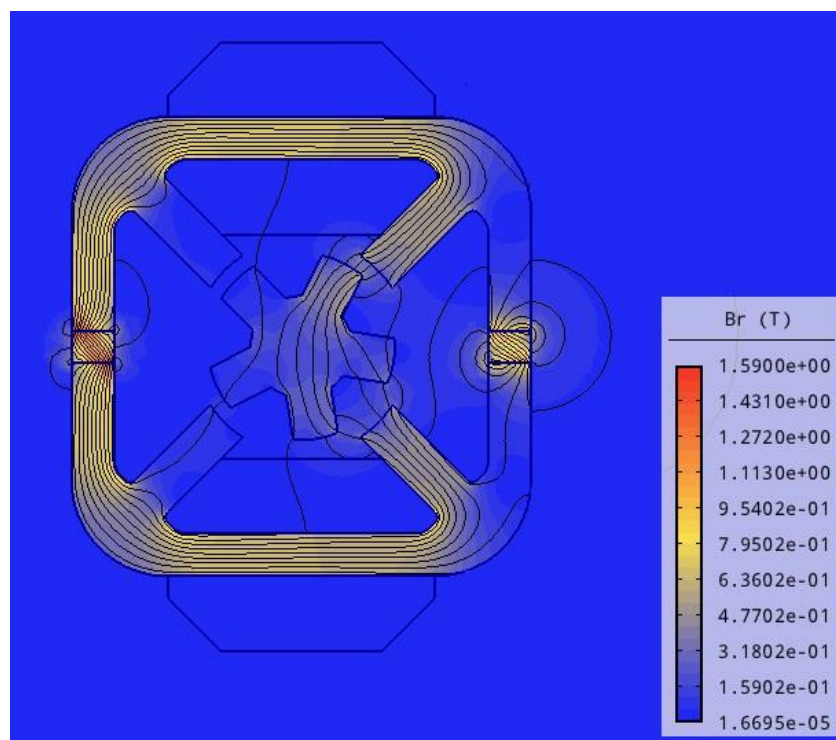
Obr. 3.14 Obrazovka osciloskopu Tektronix zachycující indukované napětí do obou cívek statoru pro 600 ot./min. - větší rotor

4 FSPM stroj jako motor

4.1 Základní princip FSPM motoru

Jak již bylo uvedeno výše, FSPM stroj je kombinací synchronního motoru s permanentními magnety a spínaného reluktančního motoru.

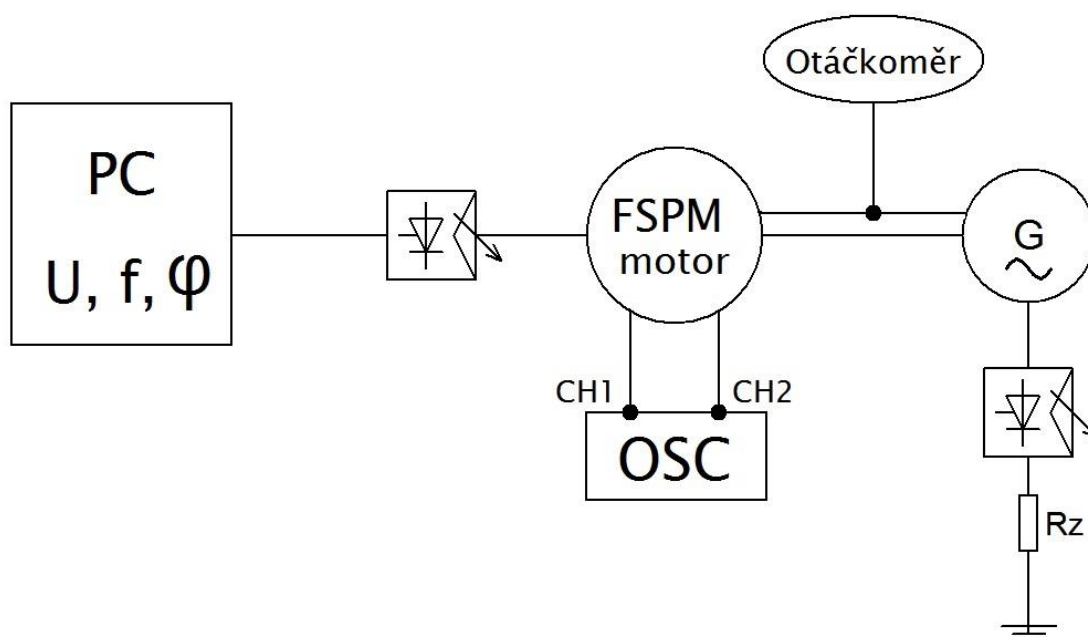
Vhodným napájením cívek na statoru je možno dosáhnout točivého momentu s takovým průběhem, který zajistí otáčení rotoru. Každou z cívek je potřeba napájet tak, aby se vždy na jedné straně cívky magnetický tok vytvořený cívkou sečetl s magnetickým tokem způsobeným permanentním magnetem a společně procházel pólem statoru do rotoru. Na druhé straně cívky má tím pádem magnetické pole obrácenou polaritu. Ta působí proti poli vytvořenému permanentním magnetem. Tato pole se vzájemně vyruší, a do pólu na statoru neteče žádný nebo velmi zeslabený magnetický tok. Tento princip je zobrazen pomocí kontur na obrázku (Obr. 4.1). Rotor stroje se tedy pootočí tak, aby jím magnetický tok procházel s co nejmenší magnetickou reluktancí. Po tomto pootočení je potřeba přepnout polaritu cívek. Rychlost otáčení rotoru je možno řídit rychlostí přepínání polarity cívek.



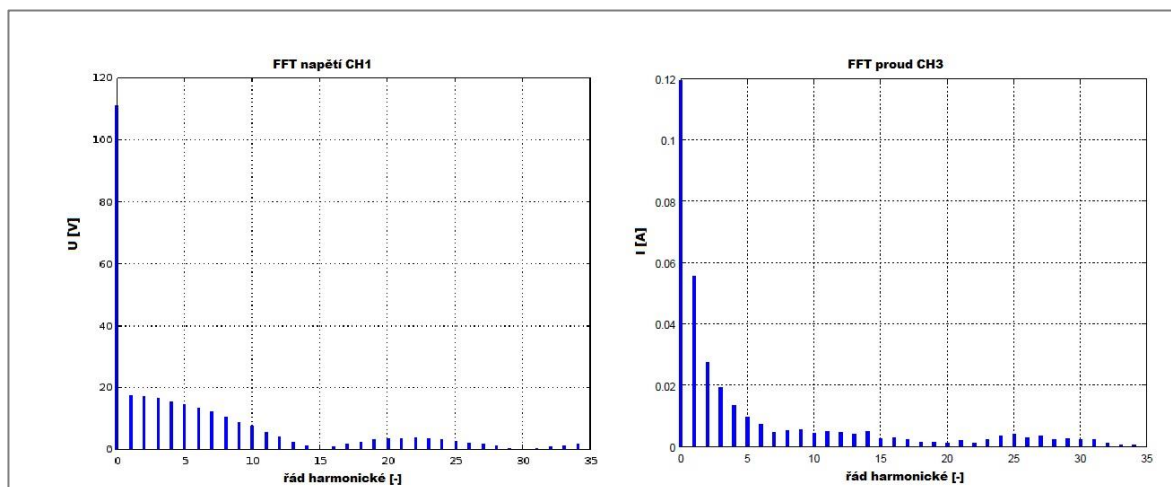
Obr. 4.1 Zesilování a zeslabování pole permanentních magnetů pomocí napájení cívek

4.2 Měření na reálném FSPM motoru s menším rotorem

Měření FSPM stroje s menším rotorem spočívalo pouze ve změření velikosti napětí a proudů tekoucích do motoru. Hodnota točivého momentu stroje s malým rotorem byla tak nízká, že při pokusech ji změřit se stroj přestal otáčet a pouze kýval okolo rovnovážné polohy. Maximální napětí, na které byl stroj s malým rotorem zkoušen, byly 60 V obdélníkové pulzy kladné a záporné polarity. Při tomto napětí tekl do motoru při 600 ot./min. proud, který dosahoval špičkové hodnoty okolo 250 mA (Obr. 4.4). Zkoušením bylo zjištěno, že nejvýhodnější je do cívek pouštět obdélníkové pulzy vzájemně posunuté o 180° . Při tomto napájení cívek se motor choval nejstabilněji. Indukčnost statorových cívek je velmi vysoká. Se stoupajícími otáčkami rotoru roste velmi výrazně reaktance statorových cívek, a je proto potřeba velké napájecí napětí, aby do cívky protekl dostatečný proud. Schéma zapojení pro měření FSPM stroje v motorickém režimu je na obrázku (Obr. 4.2).

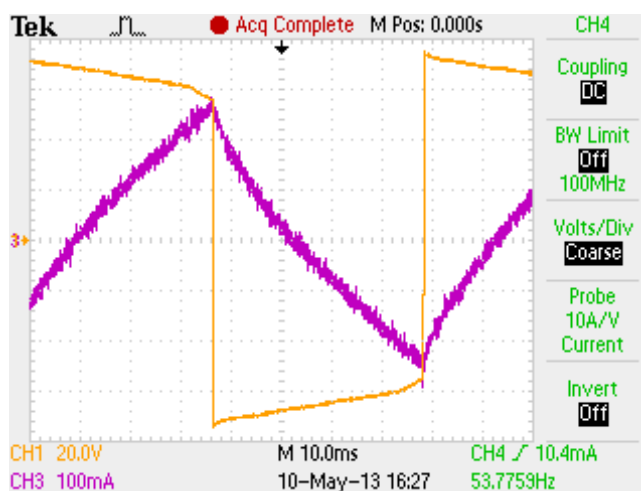


Obr. 4.2 Schéma zapojení pro měření FSPM stroje jako motoru se zátěží



Obr. 4.3 FFT napájecího napětí a proudu tekoucího do motoru s menším rotorem pro průběh z obrázku (Obr. 4.4)

Na obrázku (Obr. 4.3) je provedena Fourierova transformace napětí a proudu tekoucího do motoru při průbězích z obrázku (Obr. 4.4). Již ze samotných průběhů (Obr. 4.4) je vidět, že průběhy jsou lehce zarušené. To je potvrzeno Fourierovou transformací na obrázku (Obr. 4.3), kde je vidět, že amplitudy vyšších harmonických jsou poměrně výrazné až do vysokých řádů.



Obr. 4.4 Obrazovka osciloskopu při měření FSPM motoru s malým rotorem, otáčejícím se rychlostí 600 ot./min.

4.3 Měření na reálném FSPM motoru s větším rotorem

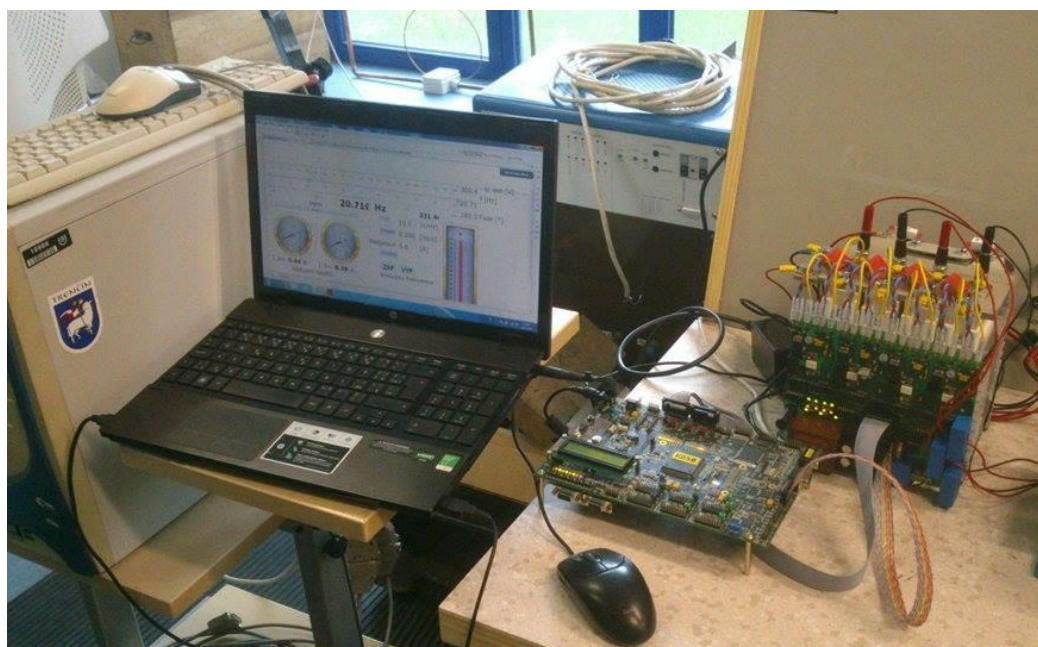
Měřicí sestava byla použita stejná, jako pro měření generátoru s větším rotorem (Obr. 4.5). Jako zátěž pro FSPM motor byl využit asynchronní stroj. Zátěžný moment asynchronního stroje byl tak velký, že FSPM motor nebyl schopen se sám roztočit, protože k roztočení bez řízení s čidlem polohy se potřebuje nejprve rozkývat. Bylo proto potřeba FSPM motor vždy roztočit na určité otáčky asynchronním motorem, zároveň FSPM motor napájet tak, aby měl stejné otáčky jako asynchronní motor, a poté asynchronní motor vypnout. Roztočený FSPM motor už dokázal asynchronním strojem otáčet, a ten poté sloužil jako zátěž pro FSPM motor. Motor se stabilně točil pro napájecí frekvenci v rozsahu 20 – 50 Hz, což znamená přibližně do 600 ot./min. V tomto rozsahu byl schopen bez problémů reagovat na změny napájecí frekvence zrychlováním nebo zpomalováním. To znamená, že stroj byl schopen dodat činný výkon k pokrytí mechanických ztrát použitého asynchronního motoru. Tyto ztráty se pro motor firmy Siemens s označením 1LE10010EA422AB4-Z pohybují okolo 50 W.



Obr. 4.5 Sestava pro měření FSPM stroje s větším rotorem jako motoru

Zvyšování zátěže FSPM motoru bylo realizováno tak, že asynchronnímu stroji byly pomocí střídače nastaveny otáčky stejné, jako otáčky FSPM motoru. Napětí asynchronního

stroje bylo sníženo, aby klesl jeho točivý moment a FSPM stroj ho při zvyšování jeho otáček mohl přetlačit. Takto byl stroj zkoušen pro napětí na asynchronním stroji 120 V. Nevyšší možné napětí asynchronního stroje, kdy ho ještě FSPM stroj přetlačil, bylo 130 V. Proud, tekoucí do odporů připojených k měničiči asynchronního stroje, byl pod hranicí měřitelnosti. Napětí na stejnosměrný meziobvod střídače napájecího FSPM motor bylo přiváděno pomocí autotransformátoru s usměrňovačem. Toto napětí bylo zvyšováno až do 400 V. Se zvýšením napětím získával stroj větší točivý moment, protože do cívek mohl protéci větší proud. Napětí a proud, které tekly do cívek FSPM stroje byly měřeny pomocí osciloskopu. Bohužel průběhy napětí i proudu byly silně rušené pravděpodobně spínáním střídače. Není z nich tedy možné provést analýzu a vyvodit závěry. Toto měření by bylo vhodné realizovat s pokročilejším řízením FSPM stroje, kde by byla snímána poloha rotoru. Tím by bylo možné dosáhnout výrazně většího točivého momentu. Dále by bylo vhodnější jako zátěž namísto asynchronního stroje použít stejnosměrný motor, kde by bylo jednodušší realizování přesné zátěže i měření výstupních hodnot. Zároveň by odpadlo zkreslení výsledků způsobené účinností střídače asynchronního motoru.



Obr. 4.6 Střídač pro FSPM motor a jeho řízení pomocí počítače

4.3.1 Výpočet točivého momentu FSPM motoru s větším rotorem

Jmenovitý moment asynchronního stroje:

$$M_n = \frac{P}{\omega} = \frac{2200}{314,15} = 7,00 \text{ Nm} \quad (1.15.)$$

Moment zvratu asynchronního stroje (odhad):

$$M_z = 2,5 \cdot M_n = 2,5 \cdot 7,003 = 17,50 \text{ Nm} \quad (1.16.)$$

Moment asynchronního stroje při napájení 130 V:

$$M_{130} = \left(\frac{130}{400}\right)^2 \cdot 17,50 = 1,85 \text{ Nm} \quad (1.17.)$$

Moment asynchronního stroje při napájení 120 V:

$$M_{120} = \left(\frac{120}{400}\right)^2 \cdot 17,50 = 1,58 \text{ Nm} \quad (1.18.)$$

Výkon stroje pro vypočtený moment 1,90 Nm při 320 ot./min.:

$$P = M \cdot \omega = 1,85 \cdot 33,15 = 61,33 \text{ W} \quad (1.19.)$$

Pro napětí 120 V a 130 V byl FSPM motor schopen asynchronní stroj přetlačit. To znamená, že musel vyvinout točivý moment větší, než byl točivý moment asynchronního motoru. Lze proto odhadnout, že točivý moment FSPM stroje se pohyboval někde v rozmezí 1,55 až 1,90 Nm. V katalogu k asynchronnímu motoru 1LE10010EA422AB4-Z [42] není uvedena hodnota momentu zvratu. Tento moment byl proto pouze odhadnut, jako 2,5 násobek jmenovitého momentu stroje.

5 Porovnání naměřených a vypočtených výsledků

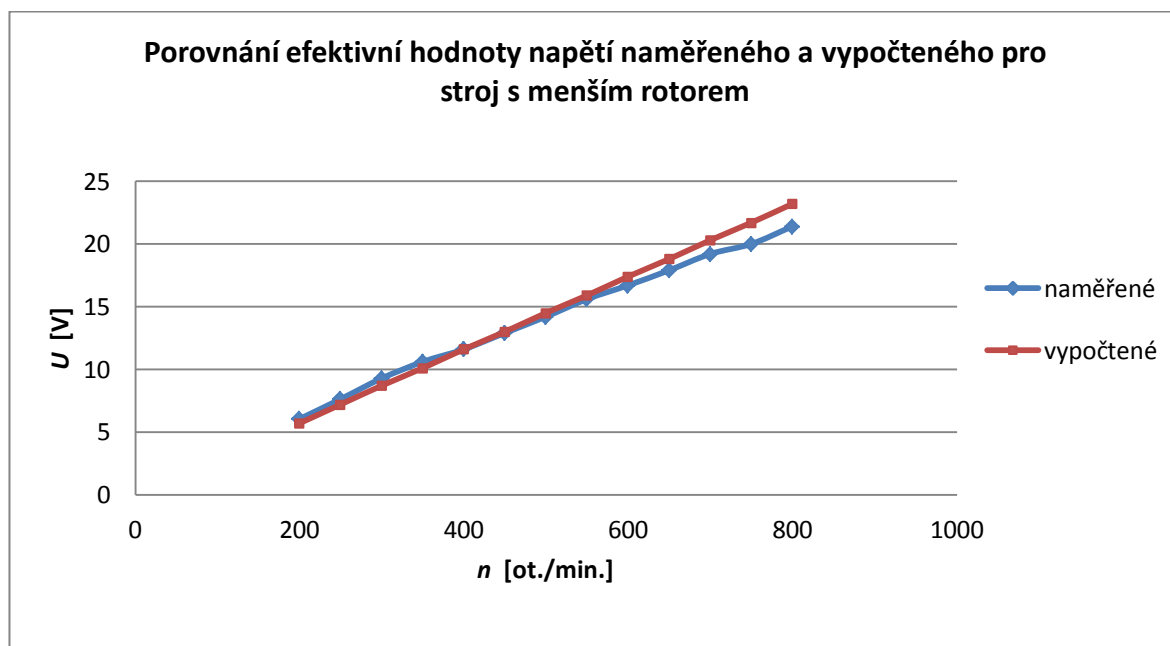
Díky použití numerického modelování je možné odhadnout základní vlastnosti stroje ještě před výrobou prototypu. Pomocí vytvořeného modelu v programu Agros2D bylo možné již předem přibližně určit velikost napětí, které se v generátorickém režimu naindukuje do cívek umístěných na statoru stroje. Numerický model FSPM generátoru je podrobně popsán v kapitole 2.

5.1 Indukované napětí pro stroj s menším rotorem

Napětí, indukované do cívek na statoru pro FSPM stroj s malým rotorem, získané za pomoci programu Agros2D pro lineární model po odfiltrování zákmitů, zobrazuje obrázek (Obr. 2.5) ve druhé kapitole. Z tohoto obrázku je vidět, že amplituda jednotlivých napěťových pulzů není úplně stejná. Amplituda nejvyššího pulzu pro frekvenci 50 Hz dosahuje hodnoty 35 V a amplituda nižšího pulzu hodnoty 27 V. Průměrná hodnota maximální amplitudy je tedy 31 V. Efektivní hodnota napětí získaná z modelu, který nezahrnuje sycení magnetického obvodu, vychází tedy 21,9 V.

Pro numerický model zahrnující sycení magnetického obvodu pro frekvenci 50 Hz vychází amplituda nejvyššího napěťového pulzu 29 V a amplituda nižšího napěťového pulzu 20 V (Obr. 2.12). Průměrná hodnota maximální amplitudy napětí z numerického modelu, zahrnujícího sycení magnetického obvodu, vychází tedy 24,5 V. Efektivní hodnota napětí je 17,3 V.

Při měření na reálném FSPM generátoru s menším rotorem byla při frekvenci 50 Hz změřena pomocí osciloskopu Tektronix efektivní hodnota indukovaného napětí 16,7 V. Odchylka od hodnoty získané pomocí numerického modelu je tedy pouhých 3,5 %. Rozdíl reálně naměřených hodnot a hodnot vypočítaných z numerického modelu pro různé rychlosti otáčení rotoru je zobrazen v grafu (Obr. 5.1). Pro nízké otáčky jsou naměřené a vypočítané hodnoty prakticky totožné. Se zvyšujícími se otáčkami je reálná hodnota napětí menší než vypočtená. To může být způsobeno zvětšováním ztrát v železe pro vyšší frekvence. Tyto ztráty nejsou v modelu zahrnuty.



Obr. 5.1 Porovnání vypočteného a skutečně změřeného napětí - menší rotor, nelineární model

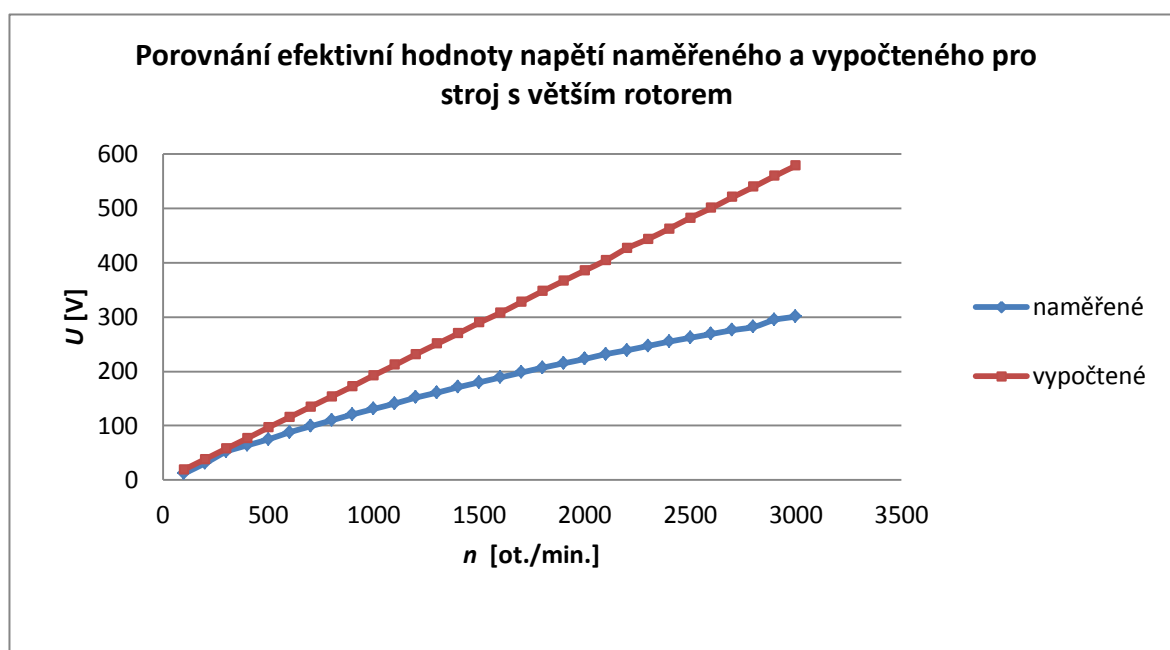
5.2 Indukované napětí pro stroj s větším rotorem

Amplituda nejvyššího pulzu indukovaného napětí, vycházející z numerického modelu při frekvenci 50 Hz pro stroj s větším rotorem, je 236 V. Amplituda menšího pulzu je 193 V. Tyto hodnoty lze ověřit na obrázku (Obr 2.9) v kapitole 2. Průměrná hodnota maximální amplitudy napětí vychází tedy 214,5 V a z toho efektivní hodnota napětí 152 V.

Pro numerický model zahrnující sycení magnetického obvodu vychází při frekvenci 50 Hz amplituda nejvyššího napěťového pulzu 188 V. Amplituda menšího pulzu je 140 V. Tyto hodnoty lze vyčíst z grafu (Obr. 2.13). Průměrná hodnota maximální amplitudy je tedy 164 V a efektivní hodnota napětí je 116 V.

Při měření na reálném FSPM generátoru s větším rotorem byla při frekvenci 50 Hz změřena pomocí osciloskopu Tektronix efektivní hodnota indukovaného napětí 88 V. Odchylka od hodnoty získané pomocí numerického modelu je 24 %. Tato odchylka se vzrůstajícími otáčkami rotoru nadále stoupá (Obr. 5.2) a pro 3000 ot./min. je již téměř 50 %. Toto je nejspíše způsobeno zvýšením povrchových ztrát v motoru. Tyto ztráty nastávají vlivem kolísání indukce ve vzduchové mezeře a podle [41] rostou s kvadrátem indukce ve

vzduchové mezeře. Změna magnetické indukce ve vzduchové mezeře je pro motor s větším rotorem výrazně větší. Odchylka efektivní hodnoty napětí reálného stroje od hodnot vypočítaných z numerického modelu tedy také výrazně narůstá. Povrchové ztráty není možné v programu Agros2D nasimulovat. Se zvyšujícími se otáčkami také narůstají ztráty v železe. Ty také zapříčiňují, že se odchylka efektivní hodnoty napětí mezi reálným strojem a numerickým modelem se zvyšujícími se otáčkami nadále zvětšuje.



Obr. 5.2 Porovnání vypočteného a skutečně změřeného napětí - větší rotor, nelineární model

Závěr

Diplomová práce se zabývala stroji s permanentními magnety a spínaným magnetickým tokem. V první kapitole práce byla popsána různá konstrukční řešení strojů se spínaným magnetickým tokem a permanentními magnety. Byly uvedeny jejich vzájemné odlišnosti, případně výhody a nevýhody jednotlivých typů.

Ve druhé kapitole se práce zabývala numerickým modelem stroje. Byl zde obecně představen počítačový program Agros2D, který posloužil k vytvoření modelu. Poté byl popsán model FSPM stroje a uvedeny použité parametry jednotlivých materiálů. Dále se práce v této části zabývala dobou potřebnou pro výpočet modelu v závislosti na počtu stupňů volnosti. Bylo zjištěno, že dostatečné přesnosti je dosaženo již při počtu zjemnění sítě 1 a řádu výpočtového polynomu 2. Z tohoto důvodu byly všechny výpočty na modelu simulovány s tímto nastavením. Zvolená konfigurace zároveň neklade příliš vysoké požadavky na použitý hardware a výpočet je dostatečně rychlý.

Ve třetí kapitole se práce zabývala FSPM strojem pracujícím v generátorickém režimu. Měřením bylo odhaleno, že experimentální FSPM stroj je velmi měkký zdroj. Pro stroj s malým rotorem poklesla při 600 ot./min. efektivní hodnota napětí ze 17 V na necelých 6 V po zatížení 500 Ω odporovou zátěží. Pro velký rotor dosahovala efektivní hodnota napětí pro 3000 ot./min. hodnoty přes 300 V. Pro rychlost 600 ot./min. byla naměřena efektivní hodnota napětí 88 V. Tato hodnota po zatížení 500 Ω odporovou zátěží klesla pod hranici 25 V.

Ve čtvrté kapitole byl vysvětlen základní princip FSPM motoru. Dále jsou v této kapitole popsána měření provedená na stroji pracujícím v motorickém režimu. Při praktickém měření bylo zjištěno, že stroj s menším rotorem nemá téměř žádný moment. I po velmi malém zatížení se stroj zastavil a pouze kýval kolem rovnovážné polohy. Bylo změřeno, že pro napájení kladnými a zápornými obdélníkovými pulzy 60 V tekl do cívek proud 250 mA. Měření FSPM motoru s větším rotorem, kdy byl k jeho hřídeli připojen asynchronní stroj, který sloužil jako generátor, bylo velice obtížně realizovatelné. Zátěžný moment, způsobený asynchronním generátorem totiž neumožňoval FSPM stroji roztočit se z nulových otáček. Měření probíhala tak, že pomocí asynchronního stroje byl FSPM stroj nejprve roztočen, poté

byl asynchronní stroj vypnut, aby mohl sloužit jako generátor pro zatěžování FSPM motoru. Řízení FSPM motoru se ukázalo jako velice obtížně realizovatelné bez čidla polohy rotoru. Není možné dopředu říci, na jakou stranu se stroj roztočí, a po zatížení vyšším momentem se stroj zastaví. Měřením bylo zjištěno, že výkon FSPM motoru se pohyboval kolem 50 až 60 W a točivý moment stroje v rozmezí 1,55 až 1,90 Nm. Tyto hodnoty je však vzhledem k podmínkám měření nutno brát pouze jako orientační. Pro přesnější a podrobnější měření by bylo potřeba udělat řízení přímo určené pro FSPM stroj, kde by se pomocí čidla polohy přesně řídilo spínání jednotlivých cívek. Přesným spínáním cívek ve vhodný okamžik by s velkou pravděpodobností došlo k výraznému zvýšení točivého momentu stroje.

V páté kapitole byly porovnány výsledky získané z numerického modelu a výsledky získané pomocí reálných měření. Bylo porovnáváno indukované napětí. Pro malý rotor byl rozdíl efektivní hodnoty napětí získaný po zohlednění sycení magnetického obvodu z modelu od efektivní hodnoty napětí z měření pouhých 3,5 %. Simulace tedy velmi přesně odpovídala chování skutečného stroje. Odchylka se zvětšovala pro vyšší rychlost otáčení rotoru, protože se stoupající frekvencí rostou ztráty v železe. Ztráty v železe není možné do modelu zahrnout. Pro větší rotor byla odchylka efektivní hodnoty napětí získaná z modelu od efektivní hodnoty napětí získané měřením po zohlednění sycení magnetického obvodu v modelu 24 %. Toto výrazné zvětšení odchylky nejspíše způsobily zvýšené povrchové ztráty ve stroji s větším rotorem. Tyto ztráty není možné v modelu zohlednit. Pro základní představu o chování stroje je však simulace velmi výhodná a výsledky z ní ulehčovaly práci při měření na reálném stroji.

Tato diplomová práce teoreticky i prakticky ověřila princip FSPM stroje a potvrdila jeho funkčnost jako generátoru i jako motoru. Myslím, že se správně navrženým řízením s čidlem polohy by FSPM motor mohl být velmi zajímavý pro aplikace, kde je potřeba jednoduchý a zároveň spolehlivý stroj s vysokou účinností. Za jeho největší výhodu bych považoval velmi jednoduchou konstrukci, a tím pádem nízké náklady na jeho výrobu. Jsem zvědavý, zda v budoucnu bude tento typ stroje nadále rozvíjen a najde uplatnění v praxi.

Seznam použité literatury

- [1] HRABOVCOVÁ, V. JANOUŠEK, L. RAFAJDUS, P. LIČKO, M. Moderné elektrické stroje. Žilina: Žilinská univerzita, 2001. 265 s. ISBN 80-7100-809-5
- [2] ROTEVATN, Njål. Design and testing of Flux Switched Permanent Magnet (FSPM) Machines. Trondheim, 2009. Master of Science in Energy and Environment. Norwegian University of Science and Technology, Department of Electrical Power Engineering. Vedoucí práce Robert Nilssen
- [3] Rauch, S.E.; Johnson, L.J., "Design Principles of Flux-Switch Alternators [includes discussion]," *Power Apparatus and Systems, Part III. Transactions of the American Institute of Electrical Engineers* , vol.74, no.3, pp., Jan. 1955
- [4] BARTOŠ, Václav. *Teorie elektrických strojů*. 1. vyd. V Plzni: Západočeská univerzita, 2006. ISBN 9788070435090.
- [5] MAYER, Daniel. *Teorie elektromagnetického pole*. 3. vyd.-přepřac. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2001, 357 s. ISBN 80-7082-826-9.
- [6] KUČEROVÁ, Eva. *Elektrotechnické materiály*. 1. vyd. V Plzni: Západočeská univerzita, 2002. ISBN 80-708-2940-0.
- [7] ŠAVEL, Josef. *Elektrotechnologie: materiály, technologie a výroba v elektronice a elektrotechnice*. 4., rozš. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2005, 314 s. ISBN 978-80-7300-190-2.
- [8] NDT Education Resource Center, 2001-2014, The Collaboration for NDT Education, Iowa State University, Dostupné z: www.ndt-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/MagParticle/Physics/HysteresisLoop.htm
- [9] EMERSON INDUSTRIAL AUTOMATION. [online]. [cit. 2015-02-16]. Technické informace k frekvenčnímu měniči SKA1200075. Dostupné z: <http://www.emersonindustrial.com/en-EN/documentcenter/ControlTechniques/PDF/D-CommSK.pdf>
- [10] ATAS ELEKTROMOTORY NÁCHOD A.S. [online]. [cit. 2015-02-16]. Dostupné z: <http://www.atas.cz/files/FT4C.pdf>
- [11] Y. Tang, J. J. H. Paulides, and E. A. Lomonova, "Analytical Modeling of Flux-Switching In-Wheel Motor Using Variable Magnetic Equivalent Circuits," ISRN

- Automotive Engineering, vol. 2014, Article ID 530260, 10 pages, 2014.
doi:10.1155/2014/530260
- [12] Wei Hua; Ming Cheng; Zhu, Z.Q.; Howe, D., "Analysis and Optimization of Back EMF Waveform of a Flux-Switching Permanent Magnet Motor," *Energy Conversion, IEEE Transactions on* , vol.23, no.3, pp.727,733, Sept. 2008
doi: 10.1109/TEC.2008.918612
- [13] Yuefeng Liao; Liang, F.; Lipo, T.A., "A novel permanent magnet motor with doubly salient structure," *Industry Applications Society Annual Meeting, 1992., Conference Record of the 1992 IEEE* , vol., no., pp.308,314 vol.1, 4-9 Oct. 1992
doi: 10.1109/IAS.1992.244279
- [14] Hua, W.; Zhu, Z.Q.; Cheng, M.; Pang, Y.; Howe, D., "Comparison of flux-switching and doubly-salient permanent magnet brushless machines," *Electrical Machines and Systems, 2005. ICEMS 2005. Proceedings of the Eighth International Conference on* , vol.1, no., pp.165,170 Vol. 1, 27-29 Sept. 2005
doi: 10.1109/ICEMS.2005.202506
- [15] Performance Analysis of 8/6-Pole Doubly Salient Permanent Magnet Motor
K. T. Chau, Ming Cheng, C. C. Chan
Electric Machines & Power Systems
Vol. 27, Iss. 10, 1999
- [16] Ming Cheng; Chau, K.T.; Chan, C.C.; Qiang Sun, "Control and operation of a new 8/6-pole doubly salient permanent-magnet motor drive," *Industry Applications, IEEE Transactions on* , vol.39, no.5, pp.1363,1371, Sept.-Oct. 2003
doi: 10.1109/TIA.2003.816506
- [17] Li, Y.; Lipo, T.A., "A doubly salient permanent magnet motor capable of field weakening," *Power Electronics Specialists Conference, 1995. PESC '95 Record., 26th Annual IEEE* , vol.1, no., pp.565,571 vol.1, 18-22 Jun 1995
doi: 10.1109/PESC.1995.474865
- [18] Zhu, Z.Q.; Chen, J.T., "Advanced Flux-Switching Permanent Magnet Brushless Machines," *Magnetics, IEEE Transactions on* , vol.46, no.6, pp.1447,1453, June 2010
doi: 10.1109/TMAG.2010.2044481

- [19] Pollock, H.; Pollock, C.; Walter, R.T.; Gorti, B.V., "Low cost, high power density, flux switching machines and drives for power tools," *Industry Applications Conference, 2003. 38th IAS Annual Meeting. Conference Record of the* , vol.3, no., pp.1451,1457 vol.3, 12-16 Oct. 2003 doi: 10.1109/IAS.2003.1257748
- [20] Widyan, M.S.; Hanitsch, R.E., "Directly driven rare-earth permanent-magnet electrical-machine prototype for wind energy applications," *Universities Power Engineering Conference, 2007. UPEC 2007. 42nd International* , vol., no., pp.786,790, 4-6 Sept. 2007 doi:0.1109/UPEC.2007.4469049 Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4469049&isnumber=4468909>
- [21] Hui Liu; Yu Wang; Zhiquan Deng; Lucheng Song, "Comparison of FSPM topologies applied in open-winding wind power system," *Industrial Electronics and Applications (ICIEA), 2014 IEEE 9th Conference on* , vol., no., pp.1527,1532, 9-11 June 2014 doi: 10.1109/ICIEA.2014.6931411 Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6931411&isnumber=6931119>
- [22] Zhu, Z.Q.; Pang, Y.; Chen, J.T.; Xia, Z.P.; Howe, D., "Influence of design parameters on output torque of flux-switching permanent magnet machines," *Vehicle Power and Propulsion Conference, 2008. VPPC '08. IEEE* , vol., no., pp.1,6, 3-5 Sept. 2008 doi: 10.1109/VPPC.2008.4677782 Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4677782&isnumber=4677399>
- [23] Chen, J.T.; Zhu, Z.Q.; Howe, D., "Stator and Rotor Pole Combinations for Multi-Tooth Flux-Switching Permanent-Magnet Brushless AC Machines," *Magnetics, IEEE Transactions on* , vol.44, no.12, pp.4659,4667, Dec. 2008 doi: 10.1109/TMAG.2008.2004264 Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4711310&isnumber=4711281>
- [24] W. Zhao, M. Cheng, J. Ji, and R. Cao, "Electromagnetic analysis of a modular

- flux-switching permanent-magnet motor using finite-element method," *Progress In Electromagnetics Research B*, Vol. 43, 239-253, 2012. doi:10.2528/PIERB12062908
Dostupné z: <http://www.jpier.org/pierb/pier.php?paper=12062908>
- [25] Owen, R.L.; Zhu, Z.Q.; Thomas, A.S.; Jewell, G.W.; Howe, D., "Fault-Tolerant Flux-Switching Permanent Magnet Brushless AC Machines," *Industry Applications Society Annual Meeting, 2008. IAS '08. IEEE*, vol., no., pp.1,8, 5-9 Oct. 2008
doi: 10.1109/08IAS.2008.56 Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4658844&isnumber=4658788>
- [26] Chau, K.T.; Dong Zhang; Jiang, J.Z.; Chunhua Liu; Yuejin Zhang, "Design of a Magnetic-Geared Outer-Rotor Permanent-Magnet Brushless Motor for Electric Vehicles," *Magnetics, IEEE Transactions on*, vol.43, no.6, pp.2504,2506, June 2007
doi: 10.1109/TMAG.2007.893714 Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4202811&isnumber=4202640>
- [27] Yu Wang; Meng-Jia Jin; Jian-Xin Shen; Fei, W.Z.; Luk, P.C.K., "An outer-rotor flux-switching permanent magnet machine for traction applications," *Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2010 IEEE*, vol., no., pp.1723,1730, 12-16 Sept. 2010
doi: 10.1109/ECCE.2010.5618120 Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5618120&isnumber=5617696>
- [28] Mingyue Dai; Li Quan; Xiaoyong Zhu; Zixuan Xiang; Huawei Zhou, "Design of a sandwiched flux switching permanent magnet machine with outer-rotor configuration," *Transportation Electrification Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific), 2014 IEEE Conference and Expo*, vol., no., pp.1,5, Aug. 31 2014-Sept. 3 2014
doi: 10.1109/ITEC-AP.2014.6941226 Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6941226&isnumber=6940609>
- [29] Zohoori, A.; Vahedi, A.; Noroozi, M.A., "Design study of FSPM generator with novel outer rotor configuration for small wind turbine application," *Environment and*

- Electrical Engineering (EEEIC), 2014 14th International Conference on* , vol., no., pp.275,279, 10-12 May 2014
doi: 10.1109/EEEIC.2014.6835878 Dostupné z:
<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6835878&isnumber=6835825>
- [30] LEE, Jae-Kwang, Jin-Seok JANG a Byung-Teak KIM., "Optimal Design of an Outer-rotor Flux-switching Permanent Magnet Motor for High Speed Operation," *The Transactions of The Korean Institute of Electrical Engineers* [online]. 2011, vol. 60, issue 11, s. 2035-2042 [cit. 2015-02-28]. DOI: 10.5370/kiee.2011.60.11.2035. Dostupné z:
http://www.researchgate.net/publication/263649792_Optimal_Design_of_an_Outer-rotor_Flux-switching_Permanent_Magnet_Motor_for_High_Speed_Operation
- [31] De'e Xie; Yu Wang; Zhiquan Deng, "FSPM machines with twisted-rotor structure," *Industrial Electronics and Applications (ICIEA), 2014 IEEE 9th Conference on* , vol., no., pp.1533,1538, 9-11 June 2014
doi: 10.1109/ICIEA.2014.6931412 Dostupné z:
<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6931412&isnumber=693119>
- [32] Pengfei Zhou; Yu Wang; Zhiquan Deng; De'e Xie, "A parallel BLDC FSPM machines with wide fluxweakening capability," *Industrial Electronics and Applications (ICIEA), 2014 IEEE 9th Conference on* , vol., no., pp.918,923, 9-11 June 2014
doi: 10.1109/ICIEA.2014.6931294 Dostupné z:
<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6931294&isnumber=693119>
- [33] Ruiwu Cao; Ming Cheng; Wei Hua, "Investigation and General Design Principle of a New Series of Complementary and Modular Linear FSPM Motors," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on* , vol.60, no.12, pp.5436,5446, Dec. 2013
doi: 10.1109/TIE.2012.2230605 Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6365807&isnumber=6545313>

- [34] Bangfu Zhang; Ming Cheng; Ruiwu Cao; Yi Du; Gan Zhang, "Analysis of Linear Flux-Switching Permanent Magnet Motor Using Response Surface Methodology," *Magnetics, IEEE Transactions on* , vol.50, no.11, pp.1,4, Nov. 2014
doi: 10.1109/TMAG.2014.2334060 Dostupné
z: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6971304&isnumber=6971254>
- [35] Mei Kang; Jinghua Ji; Guohai Liu; Wenxiang Zhao, "A new tubular fault-tolerant permanent-magnet motor for active vehicle suspension," *IECON 2012 - 38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society* , vol., no., pp.4082,4086, 25-28 Oct.2012
doi: 10.1109/IECON.2012.6389237 Dostupné
z: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6389237&isnumber=6388505>
- [36] Upadhyay, P.; Sheth, N.K.; Rajagopal, K.R., "Performance of flux reversal motor at various rotor pole arcs," *Electrical Machines and Systems, 2007. ICEMS. International Conference on* , vol., no., pp.1517,1522, 8-11 Oct. 2007
Dostupné
z: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4412281&isnumber=4411938>
- [37] Deodhar, R.P.; Andersson, S.; Boldea, I.; Miller, T.J.E., "The flux-reversal machine: a new brushless doubly-salient permanent-magnet machine," *Industry Applications Conference, 1996. Thirty-First IAS Annual Meeting, IAS '96., Conference Record of the 1996 IEEE* , vol.2, no., pp.786,793 vol.2, 6-10 Oct 1996
doi: 10.1109/IAS.1996.560174 Dostupné
z: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=560174&isnumber=12219>
- [38] Wang, C.; Nasar, S.A.; Boldea, I., "Three-phase flux reversal machine (FRM)," *Electric Power Applications, IEE Proceedings -* , vol.146, no.2, pp.139,146, Mar 1999
doi: 10.1049/ip-epa:19990114 Dostupné
z: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=766189&isnumber=16599>

- [39] Agros2D An application for solution of physical fields [online]. c2015 [cit. 2015-03-4]. Dostupné z: <http://www.agros2d.org/>
- [40] KARBAN, Pavel. Agros2D – aplikace pro řešení fyzikálních polí. In: *AbcLinuxu* [online]. 31. 3. 2010. [cit. 2015-03-05]. Dostupné z: <http://www.abclinuxu.cz/clanky/agros2d-aplikace-pro-reseni-fyzikalnich-poli>
- [41] KOPYLOV, Igor Petrovič. *Stavba elektrických strojů*. Praha: SNLT, 1988, 688 s.
- [42] *Datasheet for three-phase Squirrel-Cage-Motors - 1LE1001-0EA42-2AB4* [online]. [cit. 2015-05-05]. Dostupné z: <http://datasheet.ciiva.com/30484/0900766b811b7957-30484547.pdf>

Přílohy

Seznam příloh

3D model kompletního stroje

3D model statoru

3D model rotoru

Výkres statoru

Výkres menšího rotoru

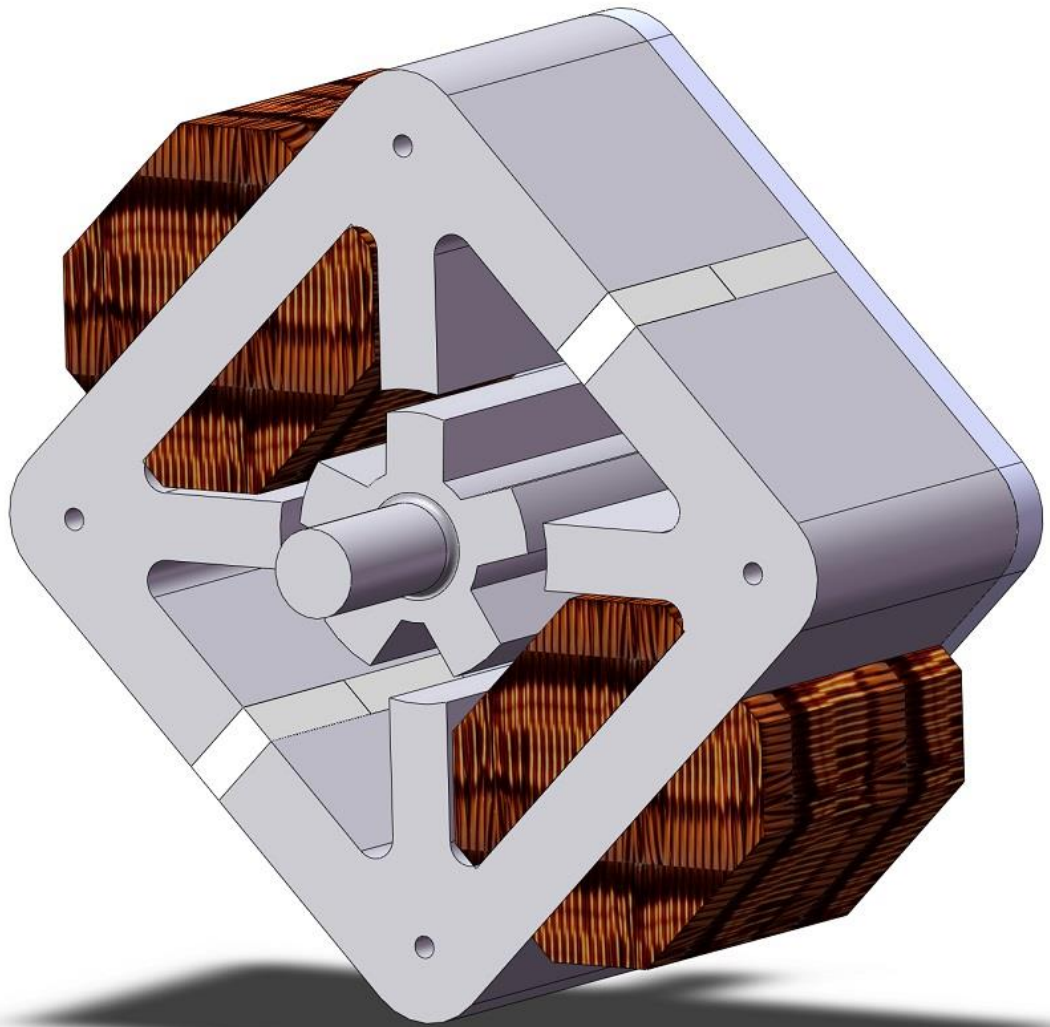
Výkres většího rotoru

Výkres stahovacích desek

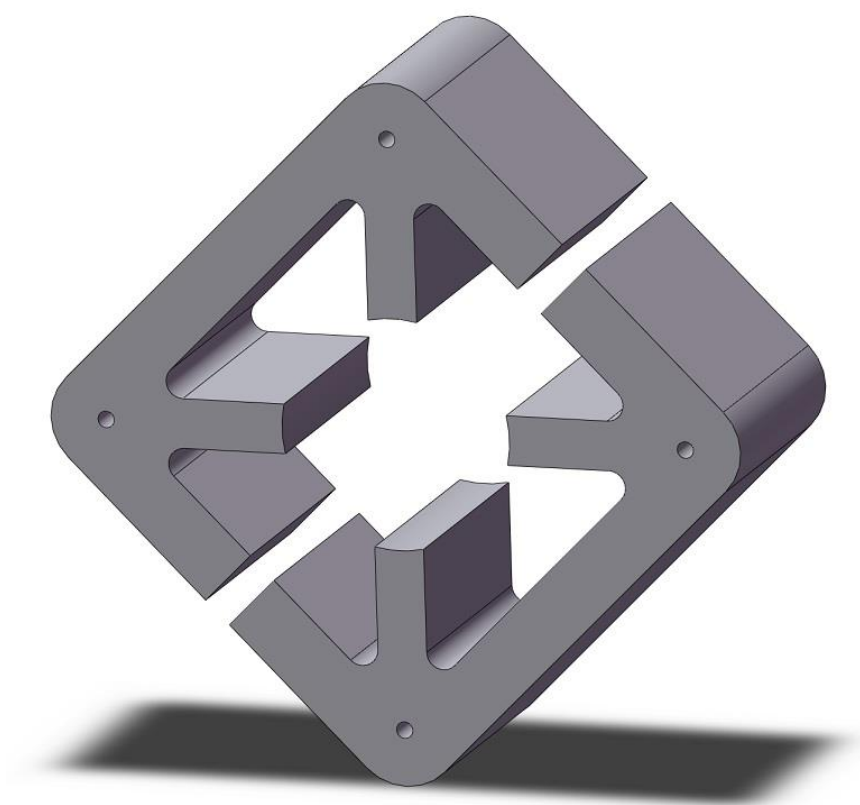
Výkres magnetu

Skript modelu s menším rotorem v jazyce Python

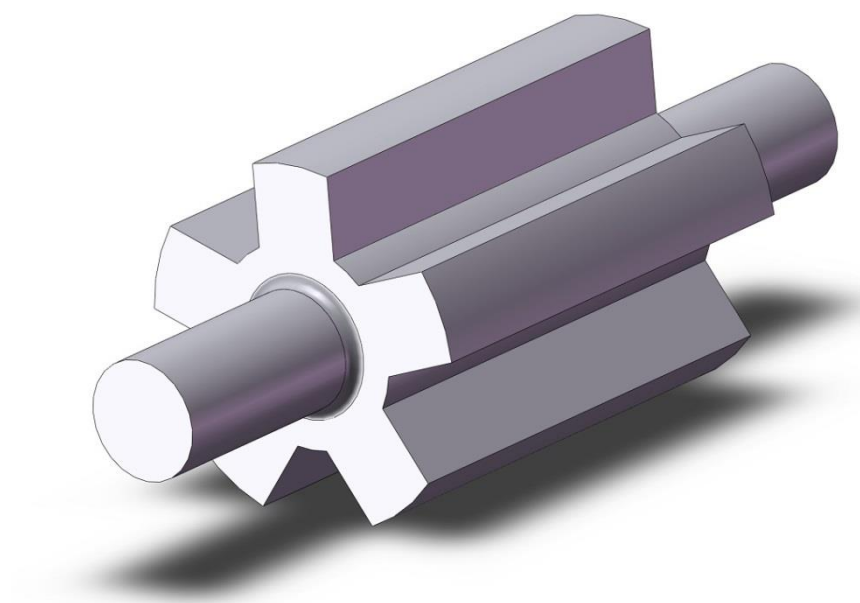
Skript modelu s větším rotorem v jazyce Python



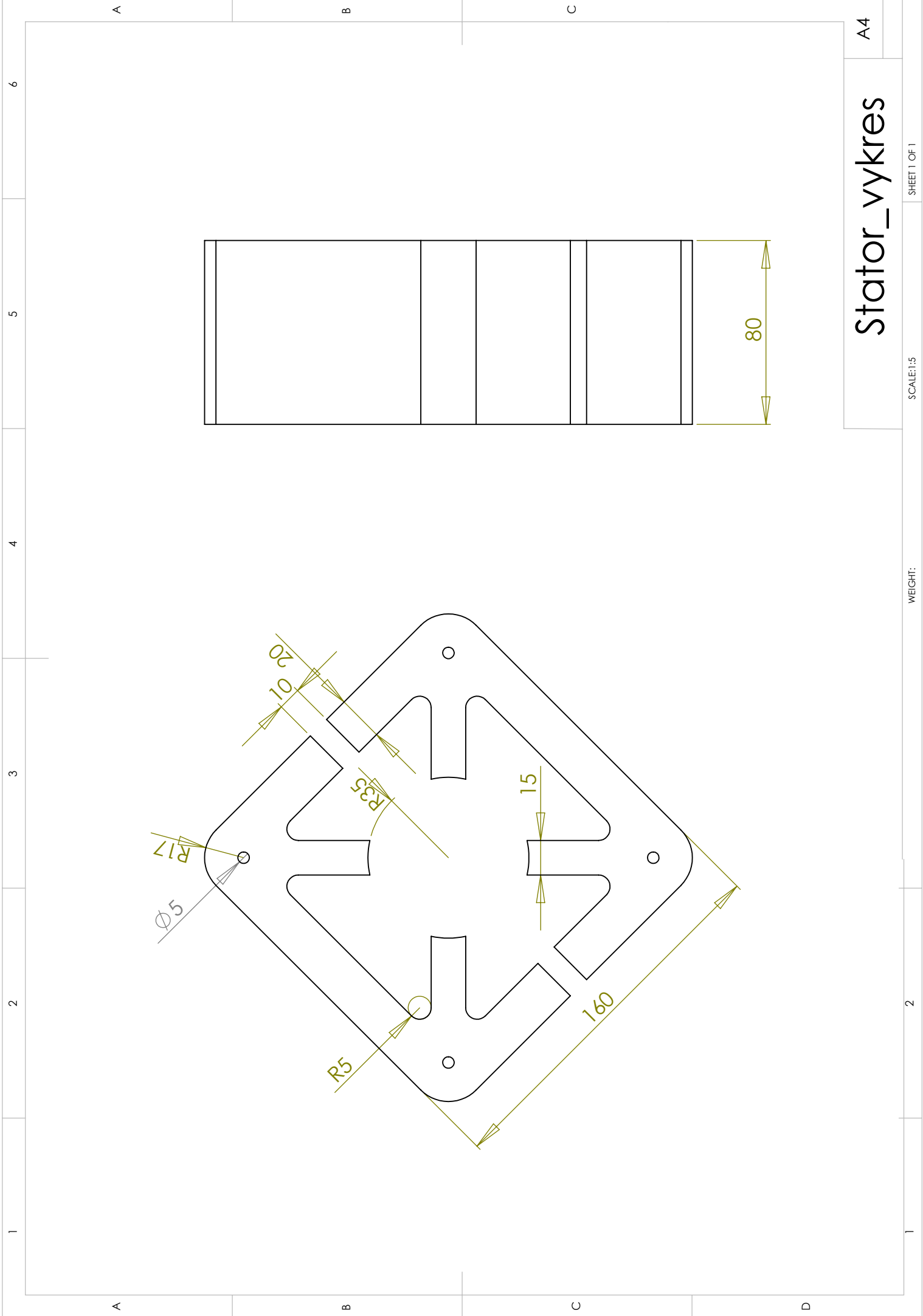
Obr. P1.1. 3D model FSPM stroje



Obr. P1.2. 3D model statoru



Obr. P1.3. 3D model rotoru



Stator_vykres

A4

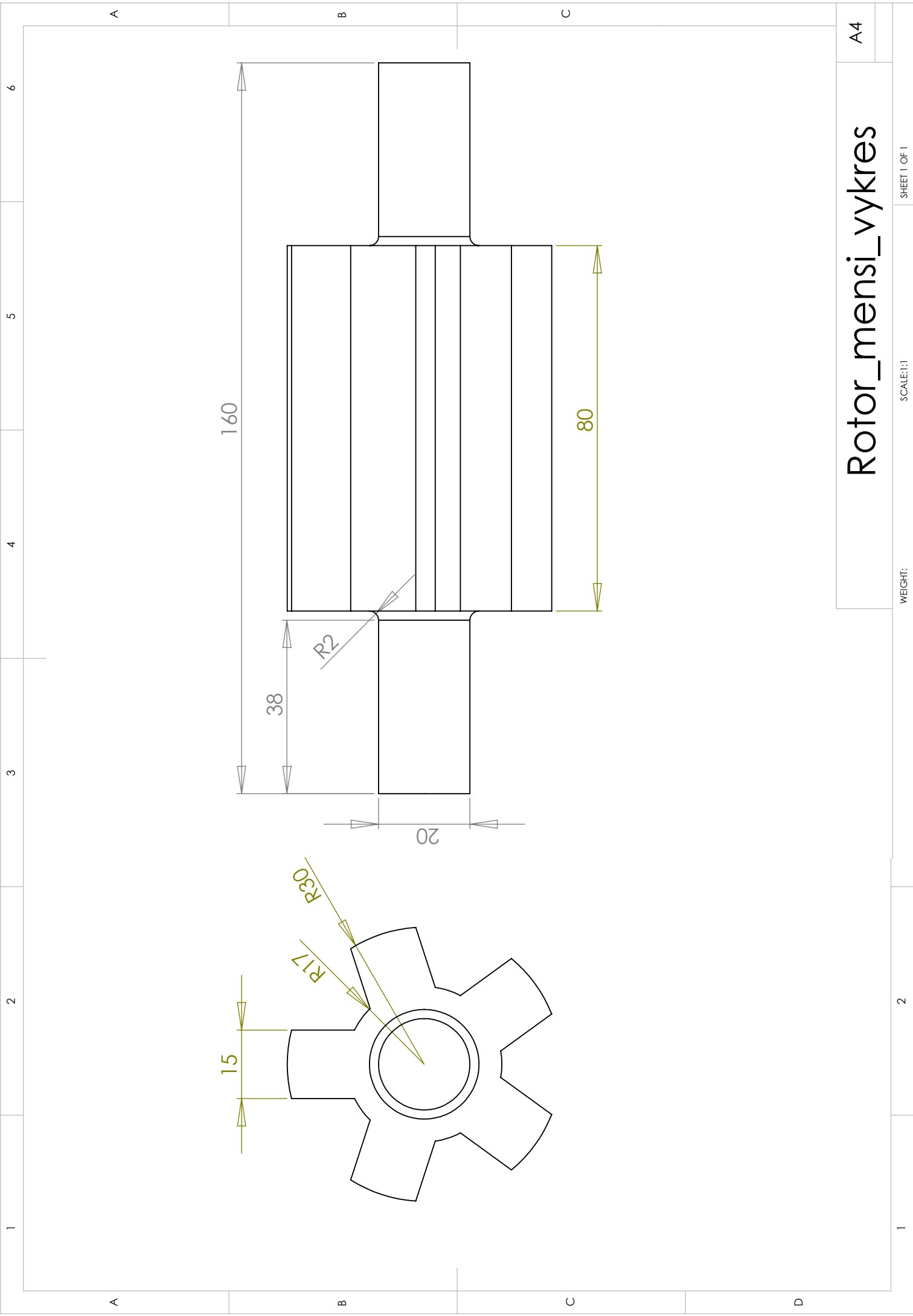
SCALE: 1:5

WEIGHT:

SHEET 1 OF 1

2

1



Rotor_mensi_vykres

A4

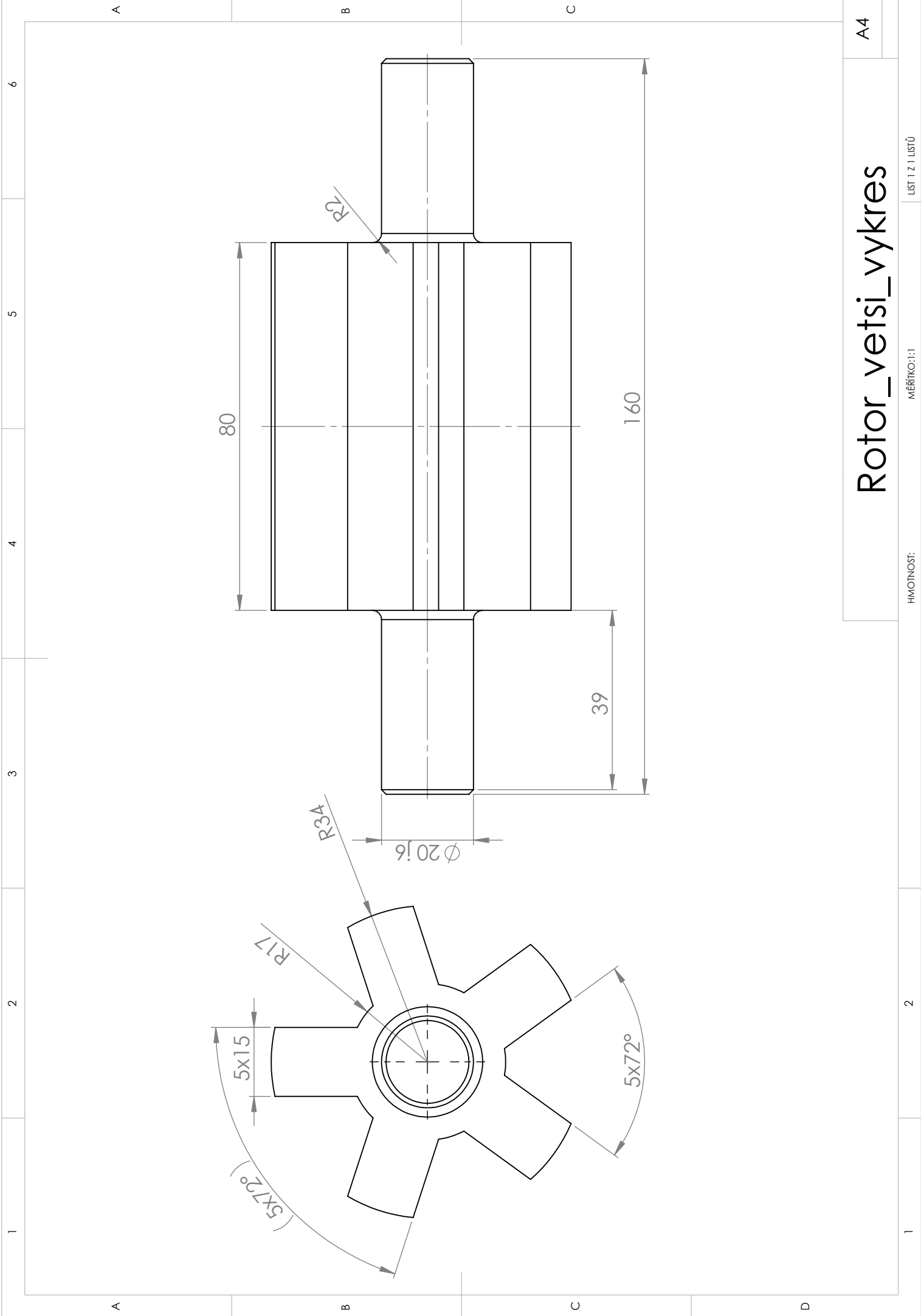
SHEET 1 OF 1

SCALE:1:1

WEIGHT:

2

1



Rotor_vetsi_vykres

A4

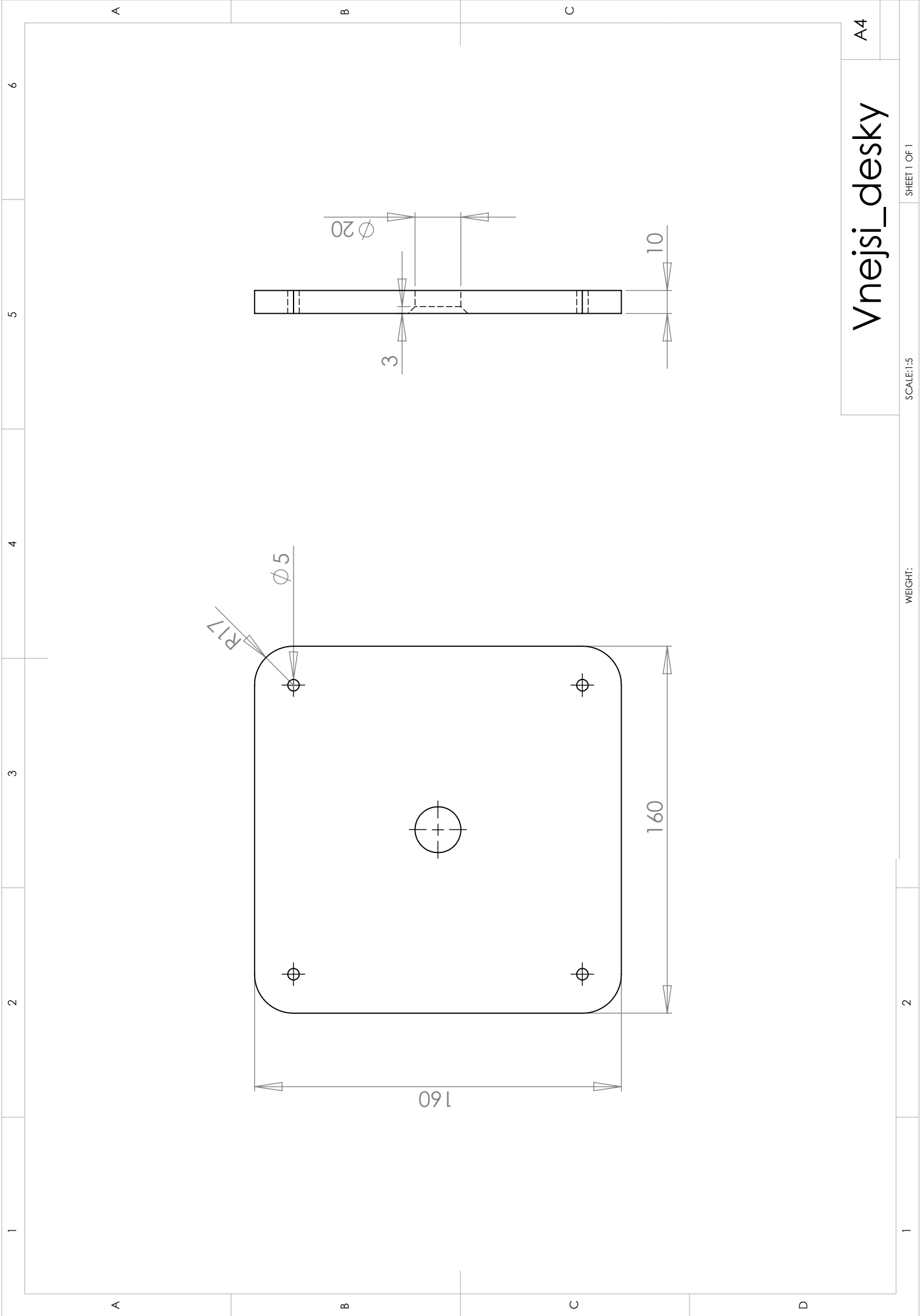
LIST 1 Z 1 LISTU

MÉRITKO:1:1

HVOTNOST:

2

1



Vnejsi_desky

A4

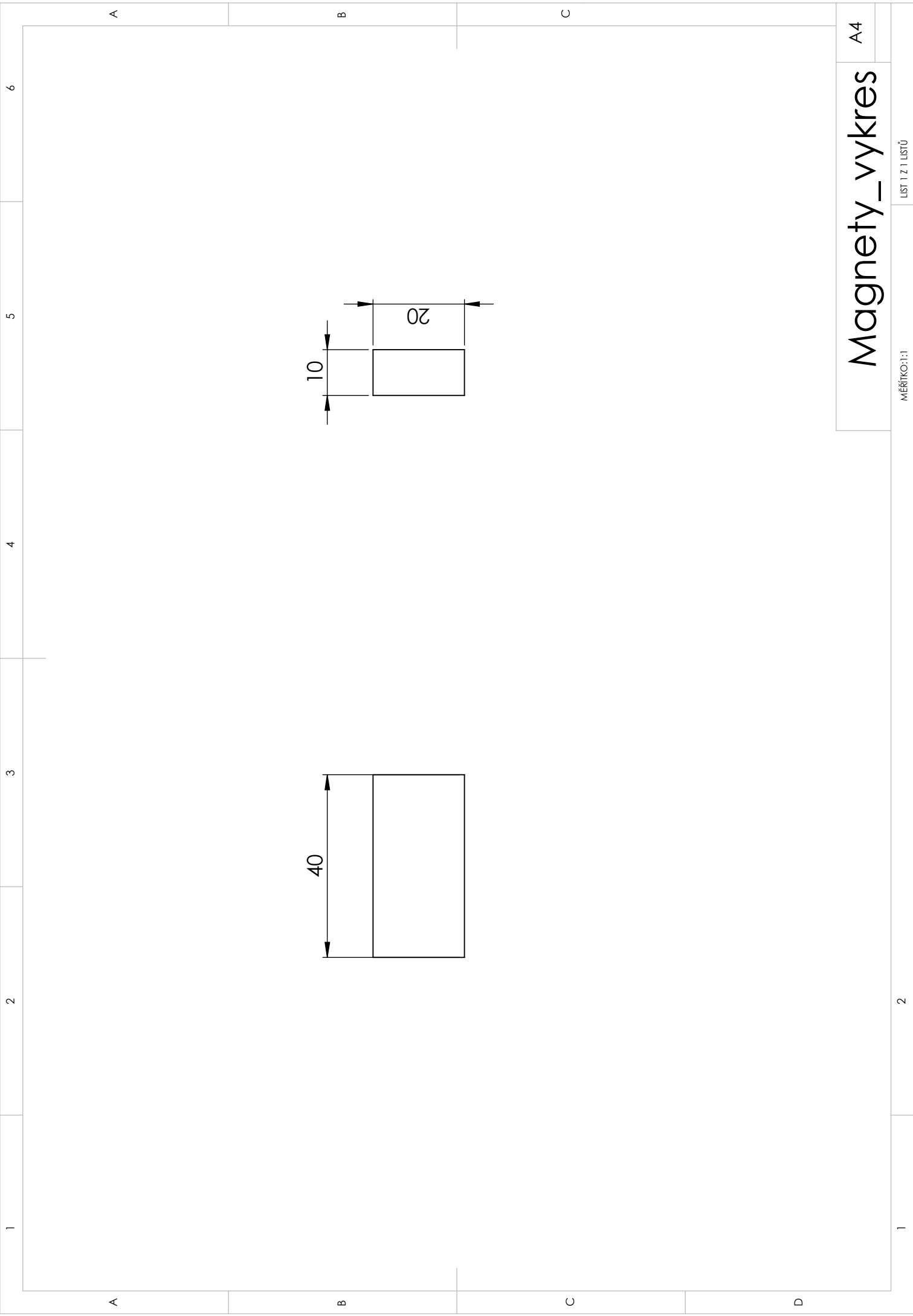
SHEET 1 OF 1

SCALE:1:5

WEIGHT:

2

1



Magnety_vykres

A4

LIST 1 Z 1 LISTU

MĚŘÍTKO:1:1

Skript modelu s menším rotorem v jazyce Python:

```
import agros2d as a2d

# problem
problem = a2d.problem(clear = True)
problem.coordinate_type = "planar"
problem.mesh_type = "triangle"

# fields
# magnetic
magnetic = a2d.field("magnetic")
magnetic.analysis_type = "steadystate"
magnetic.matrix_solver = "mumps"
magnetic.number_of_refinements = 1
magnetic.polynomial_order = 2
magnetic.adaptivity_type = "disabled"
magnetic.solver = "newton"
magnetic.solver_parameters['residual'] = 0
magnetic.solver_parameters['relative_change_of_solutions'] = 0.1
magnetic.solver_parameters['damping'] = "automatic"
magnetic.solver_parameters['damping_factor'] = 0.8
magnetic.solver_parameters['damping_factor_increase_steps'] = 1
magnetic.solver_parameters['damping_factor_decrease_ratio'] = 1.2
magnetic.solver_parameters['jacobian_reuse'] = True
magnetic.solver_parameters['jacobian_reuse_ratio'] = 0.8
magnetic.solver_parameters['jacobian_reuse_steps'] = 20

# boundaries
magnetic.add_boundary("A = 0", "magnetic_potential",
{"magnetic_potential_real" : 0})

# materials
magnetic.add_material("Fe", {"magnetic_permeability" : { "value" : 13000,
"x" : [0,1.41,1.585,1.73,1.79,1.875], "y" :
[448.82,448.82,252.26,137.67,94.96,74.6], "interpolation" :
"piecewise_linear", "extrapolation" : "constant", "derivative_at_endpoints"
: "first" }, "magnetic_conductivity" : 0, "magnetic_remanence" : 0,
"magnetic_remanence_angle" : 0, "magnetic_velocity_x" : 0,
"magnetic_velocity_y" : 0, "magnetic_velocity_angular" : 0,
"magnetic_current_density_external_real" : 0,
"magnetic_total_current_prescribed" : 0, "magnetic_total_current_real" :
0})
magnetic.add_material("NdBFe", {"magnetic_permeability" : 1.1,
"magnetic_conductivity" : 0, "magnetic_remanence" : 1.2,
"magnetic_remanence_angle" : 135, "magnetic_velocity_x" : 0,
"magnetic_velocity_y" : 0, "magnetic_velocity_angular" : 0,
"magnetic_current_density_external_real" : 0,
"magnetic_total_current_prescribed" : 0, "magnetic_total_current_real" :
0})
magnetic.add_material("Cu 1 (a)", {"magnetic_permeability" : 1,
"magnetic_conductivity" : 0, "magnetic_remanence" : 0,
"magnetic_remanence_angle" : 0, "magnetic_velocity_x" : 0,
"magnetic_velocity_y" : 0, "magnetic_velocity_angular" : 0,
"magnetic_current_density_external_real" : 0,
"magnetic_total_current_prescribed" : 0, "magnetic_total_current_real" :
0})
magnetic.add_material("Cu 1 (b)", {"magnetic_permeability" : 1,
"magnetic_conductivity" : 0, "magnetic_remanence" : 0,
```

```

"magnetic_remanence_angle" : 0, "magnetic_velocity_x" : 0,
"magnetic_velocity_y" : 0, "magnetic_velocity_angular" : 0,
"magnetic_current_density_external_real" : 0,
"magnetic_total_current_prescribed" : 0, "magnetic_total_current_real" :
0})
magnetic.add_material("Cu 2 (a)", {"magnetic_permeability" : 1,
"magnetic_conductivity" : 0, "magnetic_remanence" : 0,
"magnetic_remanence_angle" : 0, "magnetic_velocity_x" : 0,
"magnetic_velocity_y" : 0, "magnetic_velocity_angular" : 0,
"magnetic_current_density_external_real" : 0,
"magnetic_total_current_prescribed" : 0, "magnetic_total_current_real" :
0})
magnetic.add_material("Cu 2 (b)", {"magnetic_permeability" : 1,
"magnetic_conductivity" : 0, "magnetic_remanence" : 0,
"magnetic_remanence_angle" : 0, "magnetic_velocity_x" : 0,
"magnetic_velocity_y" : 0, "magnetic_velocity_angular" : 0,
"magnetic_current_density_external_real" : 0,
"magnetic_total_current_prescribed" : 0, "magnetic_total_current_real" :
0})
magnetic.add_material("Air", {"magnetic_permeability" : 1,
"magnetic_conductivity" : 0, "magnetic_remanence" : 0,
"magnetic_remanence_angle" : 0, "magnetic_velocity_x" : 0,
"magnetic_velocity_y" : 0, "magnetic_velocity_angular" : 0,
"magnetic_current_density_external_real" : 0,
"magnetic_total_current_prescribed" : 0, "magnetic_total_current_real" :
0})

# geometry
geometry = a2d.geometry
geometry.add_edge(-0.0194454, 0.030052, -0.030052, 0.0194454, angle =
24.1896)
geometry.add_edge(-0.030052, 0.0194454, -0.0371231, 0.0265165)
geometry.add_edge(-0.0371231, 0.0265165, -0.0548008, 0.0441942)
geometry.add_edge(-0.0548008, 0.0441942, -0.0583363, 0.0441942, angle = 90)
geometry.add_edge(-0.0583363, 0.0441942, -0.0601041, 0.0424264)
geometry.add_edge(-0.0601041, 0.0424264, -0.0618718, 0.0371231, angle = 45)
geometry.add_edge(-0.0618718, 0.0371231, -0.0618718, 0.0053033)
geometry.add_edge(-0.0618718, 0.0053033, -0.0618718, -0.0053033)
geometry.add_edge(-0.0618718, -0.0053033, -0.0618718, -0.0371231)
geometry.add_edge(-0.0618718, -0.0371231, -0.0601041, -0.0424264, angle =
45)
geometry.add_edge(-0.0601041, -0.0424264, -0.0583363, -0.0441942)
geometry.add_edge(-0.0583363, -0.0441942, -0.0548008, -0.0441942, angle =
90)
geometry.add_edge(-0.0548008, -0.0441942, -0.0371231, -0.0265165)
geometry.add_edge(-0.0371231, -0.0265165, -0.030052, -0.0194454)
geometry.add_edge(-0.030052, -0.0194454, -0.0194454, -0.030052, angle =
24.1896)
geometry.add_edge(-0.0194454, -0.030052, -0.0265165, -0.0371231)
geometry.add_edge(-0.0265165, -0.0371231, -0.0441942, -0.0548008)
geometry.add_edge(-0.0441942, -0.0548008, -0.0441942, -0.0583363, angle =
90)
geometry.add_edge(-0.0441942, -0.0583363, -0.0424264, -0.0601041)
geometry.add_edge(-0.0424264, -0.0601041, -0.0371231, -0.0618718, angle =
45)
geometry.add_edge(-0.0371231, -0.0618718, 0.0371231, -0.0618718)
geometry.add_edge(0.0371231, -0.0618718, 0.0424264, -0.0601041, angle = 45)
geometry.add_edge(0.0424264, -0.0601041, 0.0441942, -0.0583363)
geometry.add_edge(0.0441942, -0.0583363, 0.0441942, -0.0548008, angle = 90)
geometry.add_edge(0.0441942, -0.0548008, 0.0265165, -0.0371231)
geometry.add_edge(0.0265165, -0.0371231, 0.0194454, -0.030052)

```

```
geometry.add_edge(0.0194454, -0.030052, 0.030052, -0.0194454, angle =
24.1896)
geometry.add_edge(0.030052, -0.0194454, 0.0371231, -0.0265165)
geometry.add_edge(0.0371231, -0.0265165, 0.0548008, -0.0441942)
geometry.add_edge(0.0548008, -0.0441942, 0.0583363, -0.0441942, angle = 90)
geometry.add_edge(0.0583363, -0.0441942, 0.0601041, -0.0424264)
geometry.add_edge(0.0601041, -0.0424264, 0.0618718, -0.0371231, angle = 45)
geometry.add_edge(0.0618718, -0.0371231, 0.0618718, -0.0053033)
geometry.add_edge(0.0618718, -0.0053033, 0.0618718, 0.0053033)
geometry.add_edge(0.0618718, 0.0053033, 0.0618718, 0.0371231)
geometry.add_edge(0.0618718, 0.0371231, 0.0601041, 0.0424264, angle = 45)
geometry.add_edge(0.0601041, 0.0424264, 0.0583363, 0.0441942)
geometry.add_edge(0.0583363, 0.0441942, 0.0548008, 0.0441942, angle = 90)
geometry.add_edge(0.0548008, 0.0441942, 0.0371231, 0.0265165)
geometry.add_edge(0.0371231, 0.0265165, 0.030052, 0.0194454)
geometry.add_edge(0.030052, 0.0194454, 0.0194454, 0.030052, angle =
24.1896)
geometry.add_edge(0.0194454, 0.030052, 0.0265165, 0.0371231)
geometry.add_edge(0.0265165, 0.0371231, 0.0441942, 0.0548008)
geometry.add_edge(0.0441942, 0.0548008, 0.0441942, 0.0583363, angle = 90)
geometry.add_edge(0.0441942, 0.0583363, 0.0424264, 0.0601041)
geometry.add_edge(0.0424264, 0.0601041, 0.0371231, 0.0618718, angle = 45)
geometry.add_edge(0.0371231, 0.0618718, -0.0371231, 0.0618718)
geometry.add_edge(-0.0371231, 0.0618718, -0.0424264, 0.0601041, angle = 45)
geometry.add_edge(-0.0424264, 0.0601041, -0.0441942, 0.0583363)
geometry.add_edge(-0.0441942, 0.0583363, -0.0441942, 0.0548008, angle = 90)
geometry.add_edge(-0.0441942, 0.0548008, -0.0265165, 0.0371231)
geometry.add_edge(-0.0265165, 0.0371231, -0.0194454, 0.030052)
geometry.add_edge(-0.0441942, 0.076014, -0.076014, 0.0441942, angle = 90)
geometry.add_edge(-0.076014, 0.0441942, -0.076014, 0.0053033)
geometry.add_edge(-0.076014, 0.0053033, -0.076014, -0.0053033)
geometry.add_edge(-0.076014, -0.0053033, -0.076014, -0.0441942)
geometry.add_edge(-0.076014, -0.0441942, -0.0441942, -0.076014, angle = 90)
geometry.add_edge(-0.0441942, -0.076014, 0.0441942, -0.076014)
geometry.add_edge(0.0441942, -0.076014, 0.076014, -0.0441942, angle = 90)
geometry.add_edge(0.076014, -0.0441942, 0.076014, -0.0053033)
geometry.add_edge(0.076014, -0.0053033, 0.076014, 0.0053033)
geometry.add_edge(0.076014, 0.0053033, 0.076014, 0.0441942)
geometry.add_edge(0.076014, 0.0441942, 0.0441942, 0.076014, angle = 90)
geometry.add_edge(0.0441942, 0.076014, -0.0441942, 0.076014)
geometry.add_edge(-0.0618718, 0.0053033, -0.076014, 0.0053033)
geometry.add_edge(-0.0618718, -0.0053033, -0.076014, -0.0053033)
geometry.add_edge(0.0618718, -0.0053033, 0.076014, -0.0053033)
geometry.add_edge(0.0618718, 0.0053033, 0.076014, 0.0053033)
geometry.add_edge(-0.0159099, 0.0265165, -0.0265165, 0.0159099, angle =
28.0724)
geometry.add_edge(-0.0265165, 0.0159099, -0.0159099, 0.0053033)
geometry.add_edge(-0.0159099, 0.0053033, -0.01677, -0.000127279, angle =
18.8699)
geometry.add_edge(-0.01677, -0.000127279, -0.0301351, -0.00693721)
geometry.add_edge(-0.0301351, -0.00693721, -0.0233253, -0.0203022, angle =
28.0724)
geometry.add_edge(-0.0233253, -0.0203022, -0.00996019, -0.0134924)
geometry.add_edge(-0.00996019, -0.0134924, -0.00506114, -0.0159886, angle =
18.8699)
geometry.add_edge(-0.00506114, -0.0159886, -0.00271465, -0.0308039)
geometry.add_edge(-0.00271465, -0.0308039, 0.0121007, -0.0284574, angle =
28.0724)
geometry.add_edge(0.0121007, -0.0284574, 0.00975415, -0.013642)
geometry.add_edge(0.00975415, -0.013642, 0.013642, -0.00975415, angle =
18.8699)
```



```

geometry.add_edge(0.013642, -0.00975415, 0.0284574, -0.0121007)
geometry.add_edge(0.0284574, -0.0121007, 0.0308039, 0.00271465, angle =
28.0724)
geometry.add_edge(0.0308039, 0.00271465, 0.0159886, 0.00506114)
geometry.add_edge(0.0159886, 0.00506114, 0.0134924, 0.00996019, angle =
18.8699)
geometry.add_edge(0.0134924, 0.00996019, 0.0203022, 0.0233253)
geometry.add_edge(0.0203022, 0.0233253, 0.00693721, 0.0301351, angle =
28.0724)
geometry.add_edge(0.00693721, 0.0301351, 0.000127279, 0.01677)
geometry.add_edge(0.000127279, 0.01677, -0.0053033, 0.0159099, angle =
18.8699)
geometry.add_edge(-0.0053033, 0.0159099, -0.0159099, 0.0265165)
geometry.add_edge(-0.0441942, -0.076014, -0.0441942, -0.0830851)
geometry.add_edge(-0.0441942, -0.0830851, -0.0265165, -0.100763)
geometry.add_edge(-0.0265165, -0.100763, 0.0265165, -0.100763)
geometry.add_edge(0.0265165, -0.100763, 0.0441942, -0.0830851)
geometry.add_edge(0.0441942, -0.0830851, 0.0441942, -0.076014)
geometry.add_edge(0.0265165, -0.0371231, -0.0265165, -0.0371231)
geometry.add_edge(0.0441942, 0.076014, 0.0441942, 0.0830851)
geometry.add_edge(0.0441942, 0.0830851, 0.0265165, 0.100763)
geometry.add_edge(0.0265165, 0.100763, -0.0265165, 0.100763)
geometry.add_edge(-0.0265165, 0.100763, -0.0441942, 0.0830851)
geometry.add_edge(-0.0441942, 0.0830851, -0.0441942, 0.076014)
geometry.add_edge(-0.0265165, 0.0371231, 0.0265165, 0.0371231)
geometry.add_edge(0.3, 0, 1.83691e-17, 0.3, angle = 90, boundaries =
{"magnetic" : "A = 0"})
geometry.add_edge(1.83691e-17, 0.3, -0.3, 3.67382e-17, angle = 90,
boundaries = {"magnetic" : "A = 0"})
geometry.add_edge(-0.3, 3.67382e-17, 1.83691e-17, -0.3, angle = 90,
boundaries = {"magnetic" : "A = 0"})
geometry.add_edge(1.83691e-17, -0.3, 0.3, 0, angle = 90, boundaries =
{"magnetic" : "A = 0"})

geometry.add_label(0, 0, materials = {"magnetic" : "Fe"})
geometry.add_label(-0.0601041, -0.0601041, materials = {"magnetic" : "Fe"})
geometry.add_label(-0.0689429, 8.44307e-18, materials = {"magnetic" :
"NdBFe"})
geometry.add_label(0.0689429, 0, materials = {"magnetic" : "NdBFe"})
geometry.add_label(-1.62367e-17, -0.0883883, materials = {"magnetic" : "Cu
1 (a)"})
geometry.add_label(-9.09254e-18, -0.0494975, materials = {"magnetic" : "Cu
1 (b)"})
geometry.add_label(3.03085e-18, 0.0494975, materials = {"magnetic" : "Cu
2 (a)"})
geometry.add_label(5.41222e-18, 0.0883883, materials = {"magnetic" : "Cu
2 (b)"})
geometry.add_label(-0.0532319, 6.51903e-18, materials = {"magnetic" :
"Air"})
geometry.add_label(9.18485e-18, 0.15, materials = {"magnetic" : "Air"})
geometry.add_label(-0.0284691, 0.0300844, materials = {"magnetic" : "Fe"})
a2d.view.zoom_best_fit()

```

Skript modelu s větším rotorem v jazyce Python:

```
import agros2d as a2d

# problem
problem = a2d.problem(clear = True)
problem.coordinate_type = "planar"
problem.mesh_type = "triangle"

# fields
# magnetic
magnetic = a2d.field("magnetic")
magnetic.analysis_type = "steadystate"
magnetic.matrix_solver = "mumps"
magnetic.number_of_refinements = 1
magnetic.polynomial_order = 2
magnetic.adaptivity_type = "disabled"
magnetic.solver = "linear"

# boundaries
magnetic.add_boundary("A = 0", "magnetic_potential",
{"magnetic_potential_real" : 0})

# materials
magnetic.add_material("Fe", {"magnetic_permeability" : 13000,
"magnetic_conductivity" : 0, "magnetic_remanence" : 0,
"magnetic_remanence_angle" : 0, "magnetic_velocity_x" : 0,
"magnetic_velocity_y" : 0, "magnetic_velocity_angular" : 0,
"magnetic_current_density_external_real" : 0,
"magnetic_total_current_prescribed" : 0, "magnetic_total_current_real" :
0})
magnetic.add_material("NdBFe", {"magnetic_permeability" : 1.1,
"magnetic_conductivity" : 0, "magnetic_remanence" : 1.2,
"magnetic_remanence_angle" : 135, "magnetic_velocity_x" : 0,
"magnetic_velocity_y" : 0, "magnetic_velocity_angular" : 0,
"magnetic_current_density_external_real" : 0,
"magnetic_total_current_prescribed" : 0, "magnetic_total_current_real" :
0})
magnetic.add_material("Cu 1 (a)", {"magnetic_permeability" : 1,
"magnetic_conductivity" : 0, "magnetic_remanence" : 0,
"magnetic_remanence_angle" : 0, "magnetic_velocity_x" : 0,
"magnetic_velocity_y" : 0, "magnetic_velocity_angular" : 0,
"magnetic_current_density_external_real" : 0,
"magnetic_total_current_prescribed" : 0, "magnetic_total_current_real" :
0})
magnetic.add_material("Cu 1 (b)", {"magnetic_permeability" : 1,
"magnetic_conductivity" : 0, "magnetic_remanence" : 0,
"magnetic_remanence_angle" : 0, "magnetic_velocity_x" : 0,
"magnetic_velocity_y" : 0, "magnetic_velocity_angular" : 0,
"magnetic_current_density_external_real" : 0,
"magnetic_total_current_prescribed" : 0, "magnetic_total_current_real" :
0})
magnetic.add_material("Cu 2 (a)", {"magnetic_permeability" : 1,
"magnetic_conductivity" : 0, "magnetic_remanence" : 0,
"magnetic_remanence_angle" : 0, "magnetic_velocity_x" : 0,
"magnetic_velocity_y" : 0, "magnetic_velocity_angular" : 0,
"magnetic_current_density_external_real" : 0,
"magnetic_total_current_prescribed" : 0, "magnetic_total_current_real" :
0})
```

```

magnetic.add_material("Cu 2 (b)", {"magnetic_permeability" : 1,
  "magnetic_conductivity" : 0, "magnetic_remanence" : 0,
  "magnetic_remanence_angle" : 0, "magnetic_velocity_x" : 0,
  "magnetic_velocity_y" : 0, "magnetic_velocity_angular" : 0,
  "magnetic_current_density_external_real" : 0,
  "magnetic_total_current_prescribed" : 0, "magnetic_total_current_real" :
  0})
magnetic.add_material("Air", {"magnetic_permeability" : 1,
  "magnetic_conductivity" : 0, "magnetic_remanence" : 0,
  "magnetic_remanence_angle" : 0, "magnetic_velocity_x" : 0,
  "magnetic_velocity_y" : 0, "magnetic_velocity_angular" : 0,
  "magnetic_current_density_external_real" : 0,
  "magnetic_total_current_prescribed" : 0, "magnetic_total_current_real" :
  0})

# geometry
geometry = a2d.geometry
geometry.add_edge(-0.0194454, 0.030052, -0.030052, 0.0194454, angle =
24.1896)
geometry.add_edge(-0.030052, 0.0194454, -0.0371231, 0.0265165)
geometry.add_edge(-0.0371231, 0.0265165, -0.0548008, 0.0441942)
geometry.add_edge(-0.0548008, 0.0441942, -0.0583363, 0.0441942, angle = 90)
geometry.add_edge(-0.0583363, 0.0441942, -0.0601041, 0.0424264)
geometry.add_edge(-0.0601041, 0.0424264, -0.0618718, 0.0371231, angle = 45)
geometry.add_edge(-0.0618718, 0.0371231, -0.0618718, 0.0053033)
geometry.add_edge(-0.0618718, 0.0053033, -0.0618718, -0.0053033)
geometry.add_edge(-0.0618718, -0.0053033, -0.0618718, -0.0371231)
geometry.add_edge(-0.0618718, -0.0371231, -0.0601041, -0.0424264, angle =
45)
geometry.add_edge(-0.0601041, -0.0424264, -0.0583363, -0.0441942)
geometry.add_edge(-0.0583363, -0.0441942, -0.0548008, -0.0441942, angle =
90)
geometry.add_edge(-0.0548008, -0.0441942, -0.0371231, -0.0265165)
geometry.add_edge(-0.0371231, -0.0265165, -0.030052, -0.0194454)
geometry.add_edge(-0.030052, -0.0194454, -0.0194454, -0.030052, angle =
24.1896)
geometry.add_edge(-0.0194454, -0.030052, -0.0265165, -0.0371231)
geometry.add_edge(-0.0265165, -0.0371231, -0.0441942, -0.0548008)
geometry.add_edge(-0.0441942, -0.0548008, -0.0441942, -0.0583363, angle =
90)
geometry.add_edge(-0.0441942, -0.0583363, -0.0424264, -0.0601041)
geometry.add_edge(-0.0424264, -0.0601041, -0.0371231, -0.0618718, angle =
45)
geometry.add_edge(-0.0371231, -0.0618718, 0.0371231, -0.0618718)
geometry.add_edge(0.0371231, -0.0618718, 0.0424264, -0.0601041, angle = 45)
geometry.add_edge(0.0424264, -0.0601041, 0.0441942, -0.0583363)
geometry.add_edge(0.0441942, -0.0583363, 0.0441942, -0.0548008, angle = 90)
geometry.add_edge(0.0441942, -0.0548008, 0.0265165, -0.0371231)
geometry.add_edge(0.0265165, -0.0371231, 0.0194454, -0.030052)
geometry.add_edge(0.0194454, -0.030052, 0.030052, -0.0194454, angle =
24.1896)
geometry.add_edge(0.030052, -0.0194454, 0.0371231, -0.0265165)
geometry.add_edge(0.0371231, -0.0265165, 0.0548008, -0.0441942)
geometry.add_edge(0.0548008, -0.0441942, 0.0583363, -0.0441942, angle = 90)
geometry.add_edge(0.0583363, -0.0441942, 0.0601041, -0.0424264)
geometry.add_edge(0.0601041, -0.0424264, 0.0618718, -0.0371231, angle = 45)
geometry.add_edge(0.0618718, -0.0371231, 0.0618718, -0.0053033)
geometry.add_edge(0.0618718, -0.0053033, 0.0618718, 0.0053033)
geometry.add_edge(0.0618718, 0.0053033, 0.0618718, 0.0371231)
geometry.add_edge(0.0618718, 0.0371231, 0.0601041, 0.0424264, angle = 45)
geometry.add_edge(0.0601041, 0.0424264, 0.0583363, 0.0441942)

```

```
geometry.add_edge(0.0583363, 0.0441942, 0.0548008, 0.0441942, angle = 90)
geometry.add_edge(0.0548008, 0.0441942, 0.0371231, 0.0265165)
geometry.add_edge(0.0371231, 0.0265165, 0.030052, 0.0194454)
geometry.add_edge(0.030052, 0.0194454, 0.0194454, 0.030052, angle =
24.1896)
geometry.add_edge(0.0194454, 0.030052, 0.0265165, 0.0371231)
geometry.add_edge(0.0265165, 0.0371231, 0.0441942, 0.0548008)
geometry.add_edge(0.0441942, 0.0548008, 0.0441942, 0.0583363, angle = 90)
geometry.add_edge(0.0441942, 0.0583363, 0.0424264, 0.0601041)
geometry.add_edge(0.0424264, 0.0601041, 0.0371231, 0.0618718, angle = 45)
geometry.add_edge(0.0371231, 0.0618718, -0.0371231, 0.0618718)
geometry.add_edge(-0.0371231, 0.0618718, -0.0424264, 0.0601041, angle = 45)
geometry.add_edge(-0.0424264, 0.0601041, -0.0441942, 0.0583363)
geometry.add_edge(-0.0441942, 0.0583363, -0.0441942, 0.0548008, angle = 90)
geometry.add_edge(-0.0441942, 0.0548008, -0.0265165, 0.0371231)
geometry.add_edge(-0.0265165, 0.0371231, -0.0194454, 0.030052)
geometry.add_edge(-0.0441942, 0.076014, -0.076014, 0.0441942, angle = 90)
geometry.add_edge(-0.076014, 0.0441942, -0.076014, 0.0053033)
geometry.add_edge(-0.076014, 0.0053033, -0.076014, -0.0053033)
geometry.add_edge(-0.076014, -0.0053033, -0.076014, -0.0441942)
geometry.add_edge(-0.076014, -0.0441942, -0.0441942, -0.076014, angle = 90)
geometry.add_edge(-0.0441942, -0.076014, 0.0441942, -0.076014)
geometry.add_edge(0.0441942, -0.076014, 0.076014, -0.0441942, angle = 90)
geometry.add_edge(0.076014, -0.0441942, 0.076014, -0.0053033)
geometry.add_edge(0.076014, -0.0053033, 0.076014, 0.0053033)
geometry.add_edge(0.076014, 0.0053033, 0.076014, 0.0441942)
geometry.add_edge(0.076014, 0.0441942, 0.0441942, 0.076014, angle = 90)
geometry.add_edge(0.0441942, 0.076014, -0.0441942, 0.076014)
geometry.add_edge(-0.0618718, 0.0053033, -0.076014, 0.0053033)
geometry.add_edge(-0.0618718, -0.0053033, -0.076014, -0.0053033)
geometry.add_edge(0.0618718, -0.0053033, 0.076014, -0.0053033)
geometry.add_edge(0.0618718, 0.0053033, 0.076014, 0.0053033)
geometry.add_edge(-0.0265165, 0.0159099, -0.0159099, 0.0053033)
geometry.add_edge(-0.0159099, 0.0053033, -0.01677, -0.000127279, angle =
18.8699)
geometry.add_edge(-0.01677, -0.000127279, -0.0301351, -0.00693721)
geometry.add_edge(-0.0233253, -0.0203022, -0.00996019, -0.0134924)
geometry.add_edge(-0.00996019, -0.0134924, -0.00506114, -0.0159886, angle =
18.8699)
geometry.add_edge(-0.00506114, -0.0159886, -0.00271465, -0.0308039)
geometry.add_edge(0.0121007, -0.0284574, 0.00975415, -0.013642)
geometry.add_edge(0.00975415, -0.013642, 0.013642, -0.00975415, angle =
18.8699)
geometry.add_edge(0.013642, -0.00975415, 0.0284574, -0.0121007)
geometry.add_edge(0.0308039, 0.00271465, 0.0159886, 0.00506114)
geometry.add_edge(0.0159886, 0.00506114, 0.0134924, 0.00996019, angle =
18.8699)
geometry.add_edge(0.0134924, 0.00996019, 0.0203022, 0.0233253)
geometry.add_edge(0.00693721, 0.0301351, 0.000127279, 0.01677)
geometry.add_edge(0.000127279, 0.01677, -0.0053033, 0.0159099, angle =
18.8699)
geometry.add_edge(-0.0053033, 0.0159099, -0.0159099, 0.0265165)
geometry.add_edge(-0.0441942, -0.076014, -0.0441942, -0.0830851)
geometry.add_edge(-0.0441942, -0.0830851, -0.0265165, -0.100763)
geometry.add_edge(-0.0265165, -0.100763, 0.0265165, -0.100763)
geometry.add_edge(0.0265165, -0.100763, 0.0441942, -0.0830851)
geometry.add_edge(0.0441942, -0.0830851, 0.0441942, -0.076014)
geometry.add_edge(0.0265165, -0.0371231, -0.0265165, -0.0371231)
geometry.add_edge(0.0441942, 0.076014, 0.0441942, 0.0830851)
geometry.add_edge(0.0441942, 0.0830851, 0.0265165, 0.100763)
geometry.add_edge(0.0265165, 0.100763, -0.0265165, 0.100763)
```

```

geometry.add_edge(-0.0265165, 0.100763, -0.0441942, 0.0830851)
geometry.add_edge(-0.0441942, 0.0830851, -0.0441942, 0.076014)
geometry.add_edge(-0.0265165, 0.0371231, 0.0265165, 0.0371231)
geometry.add_edge(0.3, 0, 1.83691e-17, 0.3, angle = 90, boundaries =
{"magnetic" : "A = 0"})
geometry.add_edge(1.83691e-17, 0.3, -0.3, 3.67382e-17, angle = 90,
boundaries = {"magnetic" : "A = 0"})
geometry.add_edge(-0.3, 3.67382e-17, 1.83691e-17, -0.3, angle = 90,
boundaries = {"magnetic" : "A = 0"})
geometry.add_edge(1.83691e-17, -0.3, 0.3, 0, angle = 90, boundaries =
{"magnetic" : "A = 0"})
geometry.add_edge(-0.0187099, 0.0293165, -0.0293165, 0.0187099, angle =
28.0724)
geometry.add_edge(-0.0265165, 0.0159099, -0.0293165, 0.0187099)
geometry.add_edge(-0.0159099, 0.0265165, -0.0187099, 0.0293165)
geometry.add_edge(-0.0336633, -0.00873488, -0.0268535, -0.0221, angle =
28.0724)
geometry.add_edge(-0.00209517, -0.0347149, 0.0127202, -0.0323685, angle =
28.0724)
geometry.add_edge(0.0323684, -0.0127201, 0.034715, 0.00209521, angle =
28.0724)
geometry.add_edge(0.0220999, 0.0268535, 0.00873486, 0.0336634, angle =
28.0724)
geometry.add_edge(0.00873486, 0.0336634, 0.00693721, 0.0301351)
geometry.add_edge(0.0203022, 0.0233253, 0.0220999, 0.0268535)
geometry.add_edge(0.0284574, -0.0121007, 0.0323684, -0.0127201)
geometry.add_edge(0.034715, 0.00209521, 0.0308039, 0.00271465)
geometry.add_edge(-0.00209517, -0.0347149, -0.00271465, -0.0308039)
geometry.add_edge(0.0127202, -0.0323685, 0.0121007, -0.0284574)
geometry.add_edge(-0.0336633, -0.00873488, -0.0301351, -0.00693721)
geometry.add_edge(-0.0268535, -0.0221, -0.0233253, -0.0203022)

geometry.add_label(0, 0, materials = {"magnetic" : "Fe"})
geometry.add_label(-0.0601041, -0.0601041, materials = {"magnetic" : "Fe"})
geometry.add_label(-0.0689429, 8.44307e-18, materials = {"magnetic" :
"NdBFe"})
geometry.add_label(0.0689429, 0, materials = {"magnetic" : "NdBFe"})
geometry.add_label(-1.62367e-17, -0.0883883, materials = {"magnetic" : "Cu
1 (a)"})
geometry.add_label(-9.09254e-18, -0.0494975, materials = {"magnetic" : "Cu
1 (b)"})
geometry.add_label(3.03085e-18, 0.0494975, materials = {"magnetic" : "Cu
2 (a)"})
geometry.add_label(5.41222e-18, 0.0883883, materials = {"magnetic" : "Cu
2 (b)"})
geometry.add_label(-0.0532319, 6.51903e-18, materials = {"magnetic" :
"Air"})
geometry.add_label(9.18485e-18, 0.15, materials = {"magnetic" : "Air"})
geometry.add_label(-0.0284691, 0.0300844, materials = {"magnetic" : "Fe"})

a2d.view.zoom_best_fit()

```