

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA ELEKTROMECHANIKY A VÝKONOVÉ
ELEKTRONIKY**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

**Závislost parametrů tokem spínaného stroje
s permanentními magnety na počtu jeho pólů**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2017/2018

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Jan ŘEZÁČEK**
Osobní číslo: **E17B0156P**
Studijní program: **B2644 Aplikovaná elektrotechnika**
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**
Název tématu: **Závislost parametrů tokem spínaného stroje s permanentními magnety na počtu jeho pólů**
Zadávací katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

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

1. Proveďte teoretický rozbor tokem spínaných strojů s permanentními magnety (FSPM).
2. Vytvořte modely FSPM strojů s rozdílným počtem statorových a rotorových pólů a proveďte porovnání jejich vlastností.
3. Proveďte vyhodnocení výsledků.



Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah kvalifikační práce: 30 - 40 stran

Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

Student si vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího práce.

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Roman Pechánek, Ph.D.

Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

Datum zadání bakalářské práce: 10. října 2017

Termín odevzdání bakalářské práce: 7. června 2018


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




Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 10. října 2017

Abstrakt

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na tokem spínané stroje s permanentními magnety (FSPM) a sledování závislosti parametrů stroje na rozdílném počtu rotorových a statorových pólů. Vysvětluje princip fungování FSPM strojů a jejich možnou aplikaci v různých průmyslových odvětvích. Dále je zaměřena na vytvoření několika modelů FSPM strojů s různými topologiemi. Tyto modely jsou podrobeny simulacím na elektromagnetická pole. Cílem této práce je vytvoření topologie FSPM stroje s co nejvyšší velikostí celkového indukovaného napětí a točivého momentu vykazující sinusový průběh.

Klíčová slova

Tokem spínané stroje s permanentními magnety, elektromagnetické pole, FSPM, FEMM, SolidWorks, MATLAB

Abstract

The bachelor thesis is focused on the flux-switching permanent magnet (FSPM) machines and the observation of machine parameters dependence on the different numbers of rotor and stator poles. It explains the principle of operation of FSPM machines and their possible application in various industries. The thesis is also focused on creating several models of FSPM machines with different topologies. These models are subjected to simulations on electromagnetic fields. The aim of this thesis is to create the topology of FSPM machine with the highest magnitude of the total induced voltage and torque showing the sinusoidal waveform.

Key words

Flux-switching permanent magnet machines, electromagnetic field, FSPM, FEMM, SolidWorks, MATLAB

Prohlášení

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

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

.....

podpis

V Plzni dne 5.6.2018

Jan Řezáček

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Romanovi Pechánkovi, Ph.D. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

Obsah

OBSAH	8
ÚVOD	9
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	10
1 TOKEM SPÍNANÉ STROJE S PERMANENTNÍMI MAGNETY (FSPM)	11
1.1 PRINCIP FSPM STROJŮ.....	12
1.2 ZÁKLADNÍ KONSTRUKCE FSPM STROJŮ.....	13
1.2.1 Jednofázové FSPM stroje.....	14
1.2.2 Vícefázové FSPM stroje.....	15
1.2.3 Fault-tolerant FSPM stroje.....	16
1.2.4 Multi-tooth FSPM stroje.....	17
1.2.5 Twisted-rotor FSPM stroje.....	18
1.2.6 Outer-rotor FSPM stroje.....	19
1.2.7 Hybridní FSPM stroje.....	20
1.2.8 Lineární FSPM stroje.....	22
1.3 VYUŽITÍ FSPM STROJŮ.....	23
1.3.1 Armádní zařízení.....	23
1.3.2 Elektrická trakce.....	24
1.3.3 Elektromobily.....	25
1.3.4 Větrné elektrárny.....	26
2 POČÍTAČOVÉ MODELY FSPM STROJŮ S ROZDÍLNÝM POČTEM PÓLŮ	27
2.1 KONEČNĚ-PRVKOVÉ MODELY FSPM STROJŮ.....	28
2.2 SLEDOVANÉ PARAMETRY FSPM STROJŮ.....	29
2.2.1 Magnetické toky a indukované napětí.....	29
2.2.2 Točivý moment stroje.....	30
2.3 FSPM STROJE S 6-PÓLOVÝM STATOREM.....	31
2.3.1 FSPM stroj 6/5.....	32
2.3.2 FSPM stroj 6/7.....	34
2.3.3 FSPM stroj 6/8.....	37
2.4 FSPM STROJE S 12-PÓLOVÝM STATOREM.....	39
2.4.1 FSPM stroj 12/10.....	40
2.4.2 FSPM stroj 12/14.....	43
2.4.3 FSPM stroj 12/16.....	45
3 POROVNÁNÍ SIMULAČNÍCH VÝSLEDKŮ	48
3.1 POROVNÁNÍ INDUKOVANÝCH NAPĚTÍ STROJŮ.....	48
3.2 POROVNÁNÍ TOČIVÝCH MOMENTŮ STROJŮ.....	50
3.3 POROVNÁNÍ CELKOVÝCH INDUKOVANÝCH NAPĚTÍ POMOCÍ FOURIEROVY ANALÝZY.....	52
4 ZÁVĚR	56
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	58
PŘÍLOHY	61

Úvod

Tato bakalářská práce je zaměřena na tokem spínané stroje s permanentními magnety (FSPM). Hlavním cílem této práce je sledování závislosti parametrů stroje na různé počty statorových a rotorových pólů. Sledovanými parametry jsou indukované napětí U_i (V) v cívkách vinutí statoru při motorickém režimu stroje a točivý moment M (Nm) stroje při napájení jednoho fázového vinutí daným proudem.

V první části jsou teoreticky popsány různé topologie FSPM strojů. Dále je zde stručně vysvětlen jejich princip činnosti a možné aplikační využití, např. v elektrické trakci, větrných elektrárnách nebo v hybridních elektromobilech.

Druhá část bakalářské práce je zaměřena na vytvoření počítačových modelů a simulací FSPM strojů s různými počty statorových a rotorových pólů. Byly zvoleny dvě topologie uspořádání statoru – šestipólový a dvanáctipólový stator. U obou těchto konstrukcí statoru byly zvoleny tři topologie rotoru – desetipólový, čtrnáctipólový a šestnáctipólový rotor, resp. jejich poloviční hodnoty pro konstrukci FSPM strojů se šesti póly ve statoru. Cílem je vytvořit topologie FSPM strojů s co největšími indukovanými napětími a točivými momenty sinusových průběhů.

Ve třetí části byly zpracovány výsledky simulací z programu FEMM. Průběhy sledovaných parametrů jednotlivých variant topologií FSPM strojů jsou porovnávány mezi sebou. V závěru této práce jsou vyhodnoceny výsledky simulací FSPM strojů.

Seznam symbolů a zkratk

B	Magnetická indukce (T)
B_r	Remanentní indukce (T)
BLDC	Bezkartáčové stejnosměrné motory
DC.....	Stejnoseměrné vinutí
FEMM	Program určený k řešení problémů v oblasti elektromagnetických polí
FSPM.....	Tokem spínaný stroj s permanentními magnety
FFT	Rychlá Fourierova transformace
FTT	Fault-tolerant zub
H_c	Koercitivní síla (A/m)
Φ	Magnetický indukční tok (Wb)
MATLAB	Program pro vědeckotechnické výpočty
M	Točivý moment stroje (Nm)
NdFeB.....	Neodymový magnet s příměsí železa a boru
PM	Permanentní magnet
PMSM.....	Synchronní stroj s permanentními magnety
SmCo	Samarium-kobaltový magnet
SolidWorks	Program určený k modelování 2D/3D počítačových modelů
SRM.....	Spínaný reluktanční stroj
τ_r	Pólová rozteč rotoru
U	Elektrické napětí (V)

1 Tokem spínané stroje s permanentními magnety (FSPM)

Tokem spínané stroje s permanentními magnety, v anglickém překladu Flux-Switching Permanent Magnet Machines (zkráceně FSPM stroje), jsou v současné době předmětem mnoha vědeckých výzkumů po celém světě. [1] Díky jejich vysoké provozní spolehlivosti, účinnosti a točivému momentu jsou předurčeny pro různorodé aplikace v mnoha odvětvích od automobilového průmyslu, trakce, větrných elektráren až po letectví. [2] Výzkum a vývoj prvních motorů započal v USA v počátku 50. let 20. století především pro použití ve vojenském sektoru. Tyto stroje byly využity jako podpůrné napájecí zdroje naváděných raketových systémů. Výhodou byly především malé rozměry a hmotnost stroje, dodávka krátkodobých špičkových výkonů v řádu několika kW bez náročného chlazení stroje a dále také schopnost dlouhodobého bezúdržbového provozu. [3]

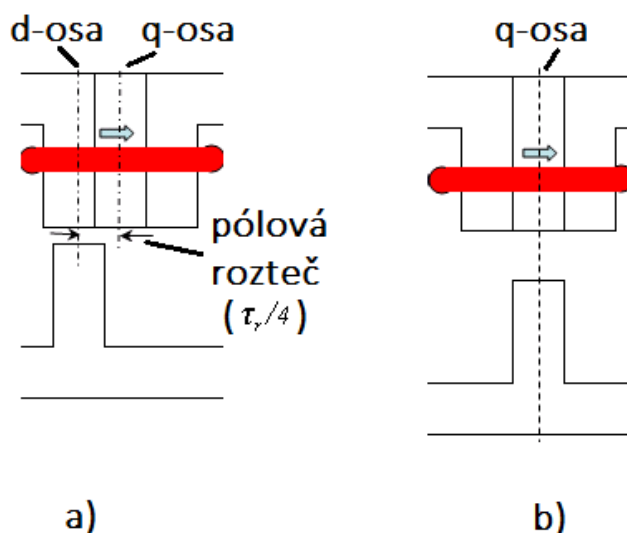
Konstrukce FSPM strojů je určitou kombinací vlastností a parametrů konvenčních synchronních strojů s permanentními magnety (PMSM) a robustní konstrukcí spínaných reluktančních strojů (SRM). [4] Ve statoru se nachází cívkové vinutí a permanentní magnety (dále jen PM). Póly statoru jsou vyniklé. Skládají se ze dvou přilehlých segmentů tvořící dva statorové zuby, mezi kterými je uložen PM. Segmenty jsou vyrobeny ze vzájemně oddělených feromagnetických plechů a připomínají svým tvarem písmeno „C“. [5] Vzhledem k tomu, že PM nejsou uloženy v rotoru jako v případě PMSM strojů, lze je daleko jednodušeji chladit a navíc na ně nepůsobí žádné odstředivé síly vytvořené otáčením rotoru. Rotor je identický s jednoduchou konstrukcí rotoru SRM strojů, tudíž má také vyniklé póly a je složen pouze z navzájem izolovaných feromagnetických plechů upevněných k hřídeli. Všechny tyto výhody umožňují konstruovat stroje s vyšším točivým momentem a výkonem a lze je provozovat ve vyšších otáčkách. [6]

Permanentní magnety na bázi vzácných zemin mají zásadní vliv na celkovou cenu a vlastnosti stroje. Důležitou roli zde hraje teplota prostředí, ve kterém je stroj provozován. Teplota výrazně ovlivňuje magnetické vlastnosti PM. Pokud by došlo k dlouhodobému navýšení teploty za kritickou mez, označovanou jako Curieova teplota (bod), PM by přišel skokově o svůj magnetismus (feromagnetické vlastnosti). [7] V současné době je nejvíce používán neodymový magnet s příměsí železa a boru (NdFeB), který je schopen pracovat

až do teploty 220 °C a jeho Curieova teplota přesahuje 300 °C. Jedná se o dosud nejsilnější magnet s vysokou koercivitou a schopností zesilovat magnetická pole procházející skrz magnet. Díky vysoké koercitivní síle H_c velmi dobře odolává vůči magnetickým polím, která by jinak způsobovala snižování magnetické polarizace, tzv. demagnetizaci. Hlavními nevýhodami při volbě tohoto PM jsou vysoká cena a menší tepelná odolnost. Zlatou střední cestou je samarium-kobaltový (SmCo) magnet, který není tak magneticky silný, ale je výrazně levnější a teplotně odolnější. Nejlevnější variantou je poté feritový magnet, který jako jediný nepodléhá riziku demagnetizace s rostoucí teplotou. [8] PM ve FSPM strojích jsou orientovány nesouhlasně tak, aby působily svými magnetickými poli proti sobě.

1.1 Princip FSPM strojů

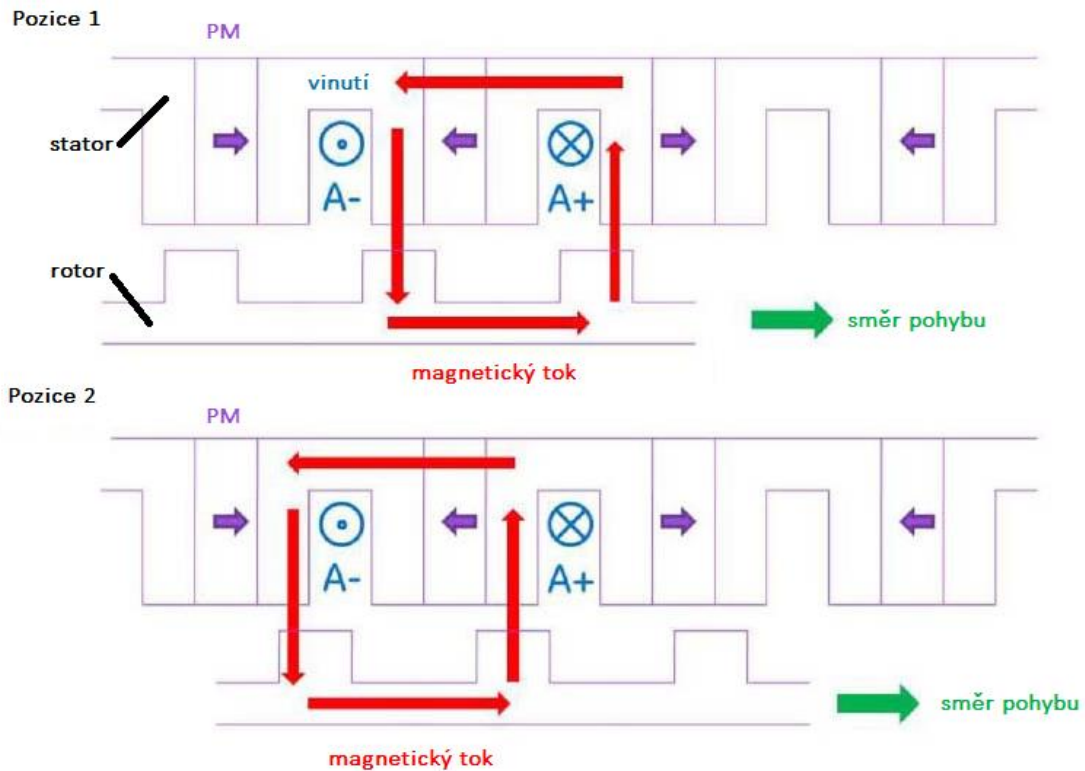
Magnetický tok vybuzený cívkami vinutí jednotlivých fází je zesilován magnetickým polem PM. Tento tok je sinusového průběhu a mění se v závislosti na poloze rotoru. Tok dosahuje maximální kladné nebo záporné hodnoty, pokud se rotorový pól nachází v d-ose jednoho či druhého statorového zubu. Naopak nulové hodnoty dosahuje v q-ose, viz Obrázek 1.



Obrázek 1: Pozice rotorového pólu – a) v d-ose, b) v q-ose – upraveno [2]

Výsledný magnetický tok se uzavírá skrze vzduchovou mezeru do rotoru, kde svými silovými účinky magnetického pole utváří točivý moment. Velikost a průběh točivého momentu lze měnit velikostí průměrné hustoty magnetického toku ve statorovém zubu,

resp. ve vzduchové mezeře, která je omezena remanentní indukci B_r magnetu. [2] Spínáním cívkového vinutí statoru v součinnosti s otáčením rotoru se mění (tzv. přepíná) směr magnetického toku a protéká místem nejmenšího magnetického odporu (reluktance), viz Obrázek 2.



Obrázek 2: Zjednodušený princip FSPM stroje – upraveno [7]

1.2 Základní konstrukce FSPM strojů

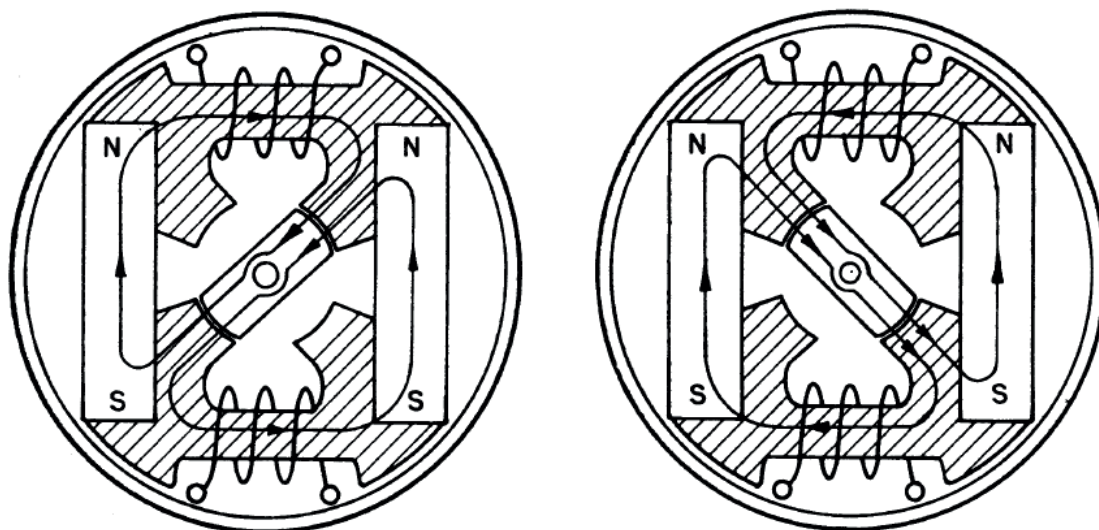
Jednotlivé druhy se mezi sebou liší rozdílným počtem pólů statoru a rotoru. Počty pólů se označují poměrem dvou čísel, z nichž v čitateli se uvádí počet statorových pólů a ve jmenovateli počet rotorových pólů, např. 12/10. Navrhované stroje se mohou dále lišit rozdílnou šířkou a výškou PM, statorového a rotorového zubu. Některé stroje mají odlišnou konstrukci a rozměry rotoru a statoru. Všechny tyto konstrukční atributy mají vliv na velikost celkového indukovaného napětí, točivého momentu, vlastní indukčnosti a frekvenci stroje. [9]

Z článku [10] lze vyčíst, že šířka rotorového pólu se sice mění s počtem rotorových pólů, ale její poměr vůči pólové rozteči rotoru τ , zůstává neměnný, většinou 1/3 nebo 1/4. Dále zvýšením počtu rotorových pólů na třináct nebo čtrnáct lze dosáhnout vyššího momentu až o 10% oproti FSPM 12/10 stroji.

1.2.1 Jednofázové FSPM stroje

Jednofázové FSPM stroje jsou vhodné jen v aplikacích s malým záběrným momentem. Slouží tak spíše k učebním účelům a jednoduše demonstrují funkčnost těchto strojů. Jednofázový FSPM 4/2 stroj, jehož čtyřpólový stator je tvořen dvojicí permanentních magnetů a vinutí přes které se uzavírá magnetický tok znázorněný šipkami do dvoupólového rotoru, viz Obrázek 3. Změnou polohy rotoru dojde k změně směru magnetického toku na opačnou stranu. [3]

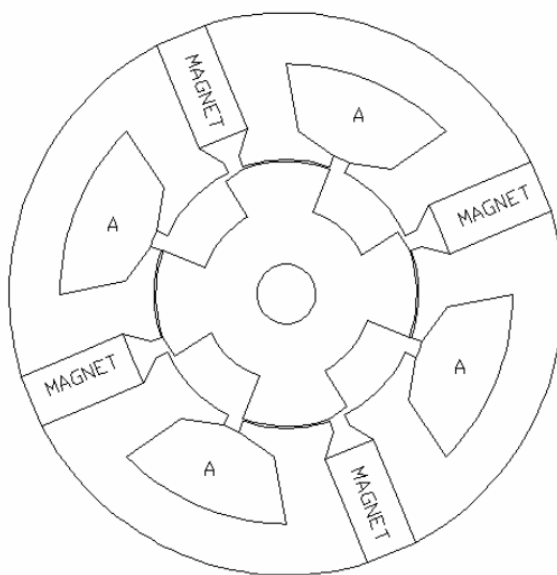
Konfigurace tohoto jednofázového FSPM stroje přináší problémy s rozběhem stroje a velkým zvlněním momentu. Pokud by se rotor nacházel v místech mimo póly statoru, kde se nevytváří točivý moment, stroj by se obtížně rozbíhal. Zvolením vhodné pólové rozteče rotoru a zkosením jeho pólů lze docílit lepšího rozběhu stroje. [11]



Obrázek 3: Jednofázový FSPM 4/2 stroj – převzato [6]

Další možné řešení související s výše uvedenými problémy bylo nalezeno britskými výzkumníky z univerzity v Leicesteru při hledání alternativních pohonů axiálních ventilátorů. [12] Tyto ventilátory jsou většinou poháněny bezkartáčovými stejnosměrnými DC motory (BLDC), které ovšem mají PM umístěné v rotoru. Takovéto umístění PM komplikuje chlazení stroje. K tomuto účelu byl navržen speciální jednofázový FSPM 8/4 stroj. Ačkoliv potíže se zvlněným momentem byly pouze zmírněny, úpravou konstrukce stroje a zvýšením počtu pólů na statoru a rotoru byl zajištěn bezproblémový rozběh stroje, viz Obrázek 4.

Z uvedených měření vyplývá skutečnost, že navržený stroj má elektrický příkon při nízkých otáčkách srovnatelný s bezkartáčovými DC motory. Při vyšších otáčkách nepatrně vzrůstá příkon a hlučnost pohonu. Jednofázové FSPM stroje jsou oproti stejnosměrným DC motorům značně levnější především kvůli použití menšího počtu PM.

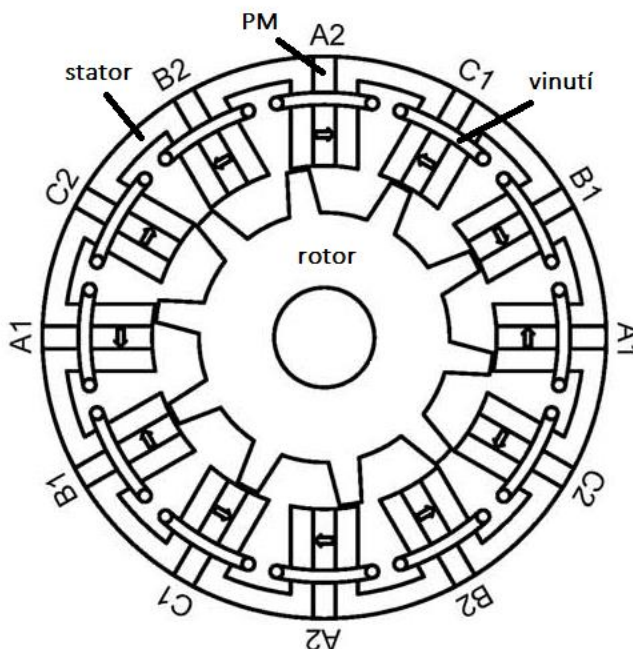


Obrázek 4: Jednofázový FSPM stroj 8/4 – převzato [12]

1.2.2 Vícefázové FSPM stroje

Třífázové nebo vícefázové FSPM stroje jsou využívány častěji než jednofázové, protože momentové průběhy jsou méně zvlněné. Typickým zástupcem tokem spínaných strojů s PM je trojfázový FSPM stroj 12/10 z kterého se bude vycházet v nadcházející kapitole zaměřené na modelování FSPM strojů. Stator má dvanáct pólů s dvanácti PM a

postupně střídajícím se fázovým vinutím po pólech. Desetipólový rotor je tvořen ze vzájemně izolovaných plechů, viz Obrázek 5.



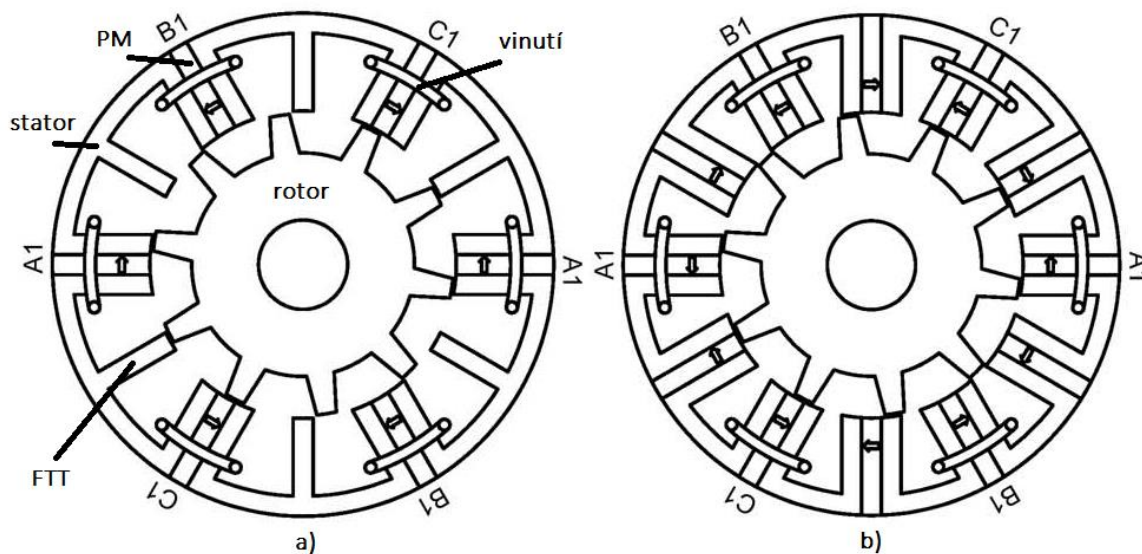
Obrázek 5: FSPM stroj 12/10 – upraveno [5]

1.2.3 Fault-tolerant FSPM stroje

Fault-tolerant FSPM (FT-FSPM) stroje jsou schopny fungovat bez přerušení i v případě poškození fází vinutí stroje. Stator je tvořen opět z jednotlivých segmentů ze vzájemně oddělených feromagnetických plechů, které připomínají tvar písmena „E“. [13] Jednotlivé fáze vinutí se mezi sebou neovlivňují, protože jsou od sebe izolovány fyzicky, elektricky, magneticky a tepelně. Izolaci zajišťuje statorový fault-tolerant zub (anglicky Fault-tolerant tooth - FTT), který nemá žádné vinutí, a může i nemusí mít v sobě uložen PM, viz Obrázek 6. [14] V případě poruchy jedné fáze vinutí stroj pokračuje dále v provozu na ostatních nepoškozených fázích, ale s menším momentem a výkonem. Varianta stroje s umístěným PM v FTT zubu vykazuje o více než 20% menší zvlnění průměrného momentu než zub s odstraněným PM.

Určitým kompromisem obou variant je zvýšení počtu rotorových pólů z deseti na čtrnáct a zvětšení izolačních mezer mezi jednotlivými „E“ segmenty. [15] Ještě lepších

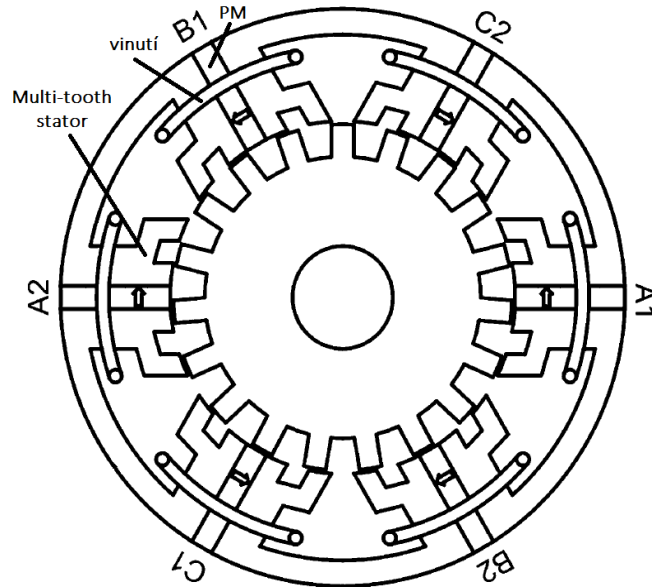
výsledků dosahuje modulární fault-tolerant FSPM stroj, který byl navržen v rámci experimentu na čínských univerzitách v Zhenjiangu a Nanjingu. [16] Rotor je čtrnáctipólový a stator obsahuje celkem dvanáct pólů a dvanáct FTT zubů, což výrazně snižuje množství použitých PM a také celkovou cenu stroje. V současné době se vyvíjí méně rozměrné a lehké stroje s větším počtem fází z důvodu zvýšení bezpečnosti, především pro aplikaci v letectví. [17]



Obrázek 6: Fault-tolerant FSPM stroj – a) bez PM, b) s PM – upraveno [5]

1.2.4 Multi-tooth FSPM stroje

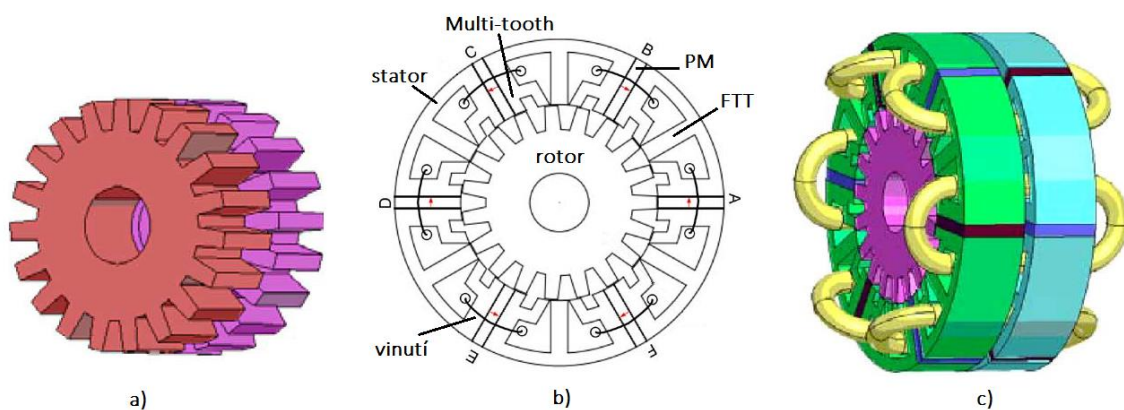
Vícezubé (anglicky Multi-tooth) FSPM stroje (MT-FSPM) mají na každém statorovém pólu několik zubů, viz Obrázek 7, které snižují zvlnění momentu a pulzační moment tvořený PM. Konvenční FSPM 12/10 stroje mají dva zuby na každý statorový pól. Multi-tooth stroje mají čtyři nebo šest zubů na pól. Nejvyššího momentu dosahuje stroj se šesti statorovými póly ve variantě čtyři zuby na pól a osmnácti rotorovými póly. [18] Tato vhodná konfigurace redukuje množství použitého magnetického materiálu, což značně zlevňuje celý stroj.



Obrázek 7: Multi-tooth FSPM stroj – upraveno [18]

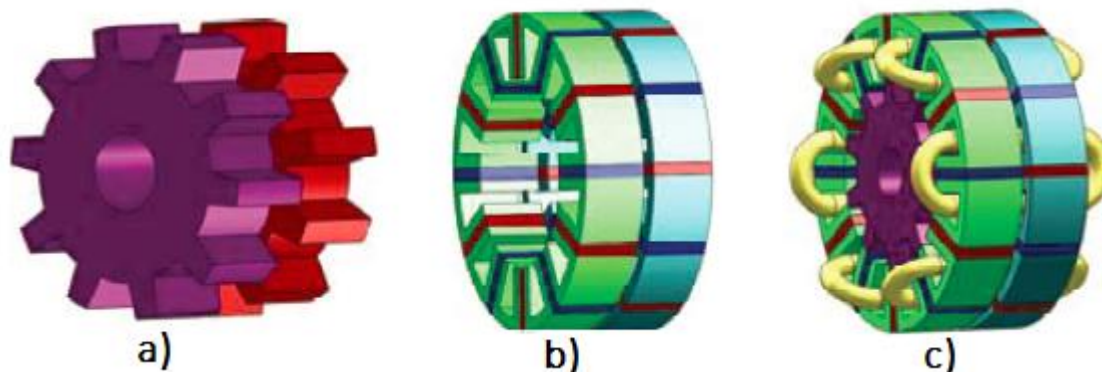
1.2.5 Twisted-rotor FSPM stroje

Na univerzitě v čínském Nanjingu byl vyvíjen a zkoumán speciální vícefázový FSPM stroj. [19] Šestifázový stroj s označením MTFTFSPM-TR kombinuje výše zmíněné konstrukce strojů fault-tolerant (FT-FSPM) a multi-tooth (MT-FSPM). Stator je rozdělen na dvě části, z nichž každá část má šest pólů se dvěma zuby na pól, šest fault-tolerant zubů a šest PM, které jsou opačně orientovány v každé části. Devatenáctipólový rotor je také tvořen dvěma částmi, které jsou vůči sobě pootočený o zub (anglicky Twisted-rotor), viz Obrázek 8.



Obrázek 8: MTFTFSPM-TR stroj – a) rotor, b) 2D model, c) 3D model – upraveno [19]

Další možnou variantou je FSPM 12/10 stroj, který je upraven podobně jako MTFTFSPM-TR stroj. Rotor je stále stejný, jen s menším počtem pólů. Stator je také rozdělen na dvě části s opačně orientovanými magnety, ale póly nejsou tvořeny více zuby jako u multi-tooth stroje. Konstrukčně je tak stator shodný spíše s fault-tolerant strojem s PM, viz Obrázek 9. [20]



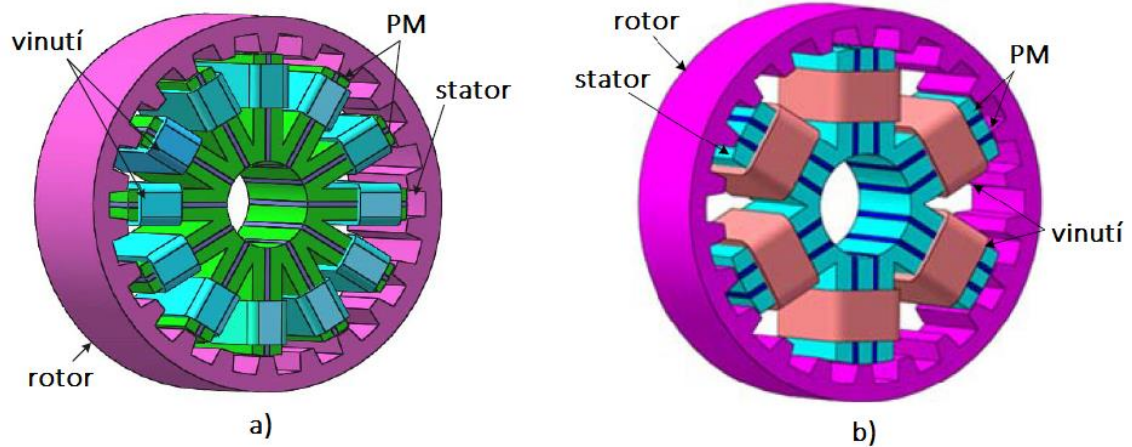
Obrázek 9: Twisted-rotor FSPM stroj – a) rotor, b) stator, c) 3D model – převzato [20]

1.2.6 Outer-rotor FSPM stroje

Outer-rotor FSPM stroje jsou konstrukčně inverzní ke klasickým FSPM strojům. Stator se nachází uvnitř stroje a je obíhán vnějším rotorem. Díky této konfiguraci je pohon stroje plynulý s malým zvlněním momentu, ale chlazení statoru je vzhledem k jeho umístění náročné a problematické. Nejmenších ztrát a zároveň nejvyššího momentu dosahuje stroj v oblasti nízkých otáček. [21]

V článku [22] jsou zkoumány dva druhy FSPM stroje s pólovou konfigurací 12/22 a 6/22, viz Obrázek 10. Konvenční FSPM 12/22 stroj s vnějším rotorem má klasické uspořádání FSPM stroje, kdy statorový pól tvoří PM, který je obklopen dvěma statorovými zuby a cívkovým vinutím. Hlavním úskalím je především omezený prostor pro vinutí daný specifickou konfigurací, což má za následek snížení momentu a hustoty energie. Modifikací statorového pólu zvanou sendvičová konfigurace stroje (S-FSPM) došlo k úspoře použitého materiálu a tudíž ke snížení hmotnosti. V každém pólu jsou „sendvičovitě“ uloženy dva PM se třemi zuby. Takové uspořádání velmi efektivně zvyšuje

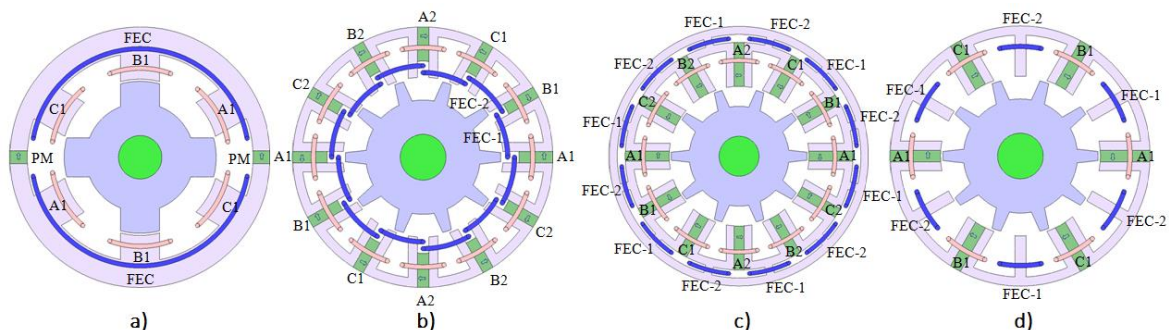
moment a účinnost stroje, a umožňuje jej dokonce provozovat v poruchových stavech díky schopnosti fault-tolerant. [23]



Obrázek 10: Outer-rotor FSPM stroj – a) konvenční FSPM stroj, b) S-FSPM stroj – upraveno [22]

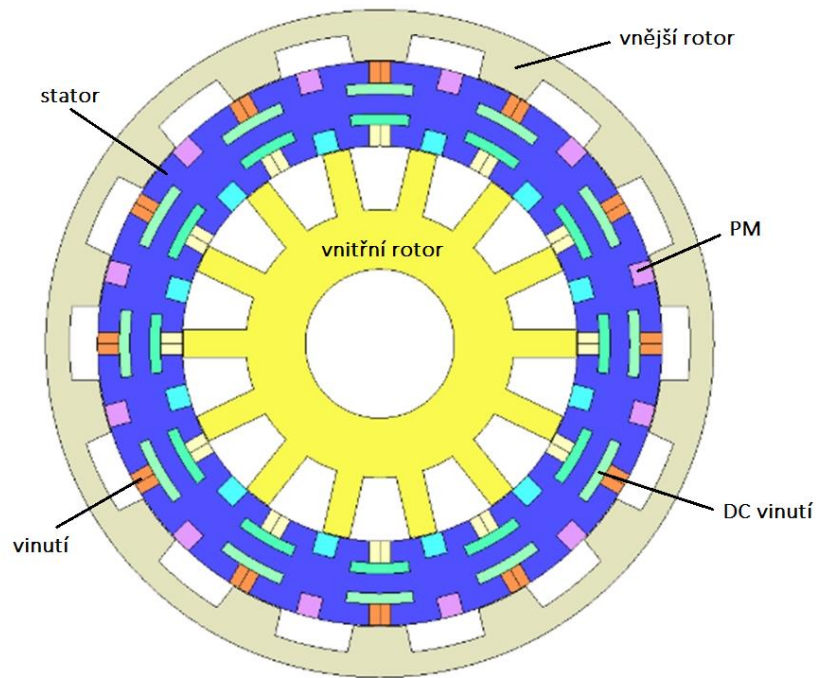
1.2.7 Hybridní FSPM stroje

Pohony hybridních FSPM strojů (HE-FSPM) využívají kombinaci magnetického toku tvořeného PM, cívkovými vinutími a pomocnými stejnosměrnými (DC) vinutími nejčastěji umístěnými ve statoru. [24] Pomocné vinutí zde slouží k zesilování nebo zeslabování magnetického toku, k lepší regulovatelnosti stroje a úspoře magnetického materiálu, což snižuje cenu stroje. Umístění takového vinutí může být různé, viz Obrázek 11. Hlavními nevýhodami jsou vyšší ztráty a možnost demagnetizace PM.



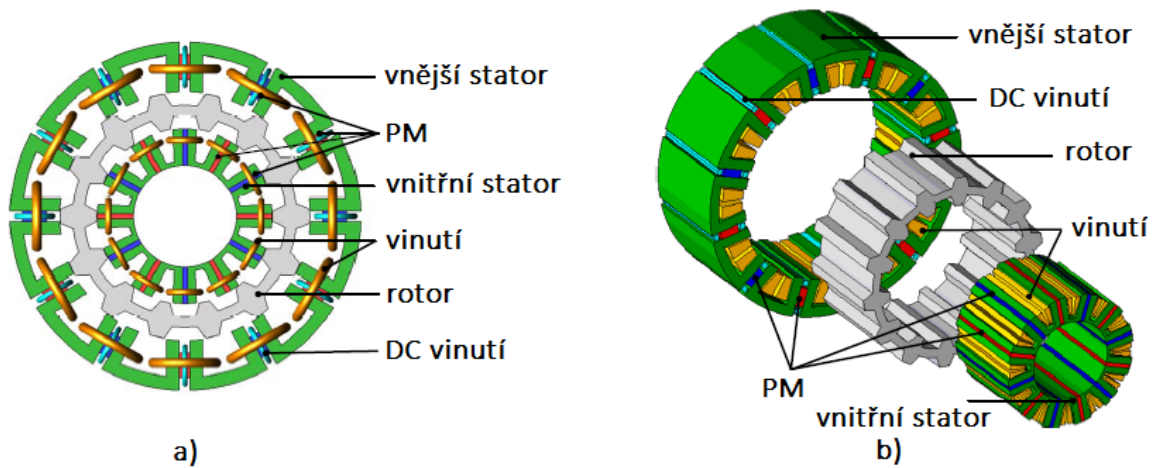
Obrázek 11: HE-FSPM stroj – a) PM na vnější části statoru, b) DC vinutí na vnitřní části statoru, c) DC vinutí na vnější části statoru, d) DC vinutí na FTT zubu – převzato [24]

Výzkumníci z malajské univerzity ve městě Batu Pahat navrhli hybridní FSPM stroj s dvojitým rotorem (DRHE-FSPM) jako alternativní pohon pro hybridní elektromobily, viz Obrázek 12. [25] Stroj se skládá z vnitřního a vnějšího rotoru a konstrukčně komplikovaného statoru se dvanácti póly. Oba rotory se čtrnácti póly pracují nezávisle na sobě při odlišných otáčkách, výkonech a momentech. Vnější rotor vykazuje vyšší moment a může pracovat při vyšších rychlostech.



Obrázek 12: DRHE-FSPM stroj – upraveno [25]

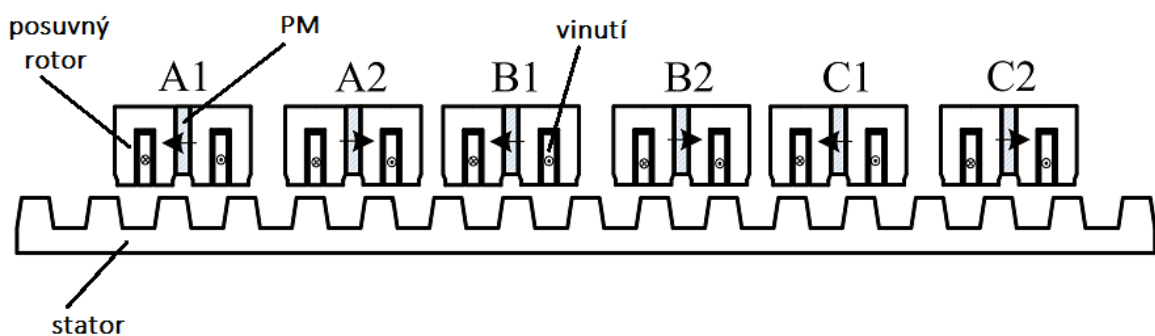
Další variantou je hybridní FSPM stroj s dvojitým statorem (DSHE-FSPM), viz Obrázek 13. Oba statory jsou dvanáctipólové, ale pomocné stejnosměrné vinutí se nachází pouze na pólech vnějšího statoru. Protože stroj dosahuje vysokého momentu s nízkým zvlněním, vysoké účinnosti, přesnosti a spolehlivosti, může být ideální náhradou servomotorů používaných v robotice, kde je kladen vysoký důraz na tyto vlastnosti. [26]



Obrázek 13: DSHE-FSPM stroj – a) 2D model, b) 3D model – upraveno [26]

1.2.8 Lineární FSPM stroje

Technologicky zajímavé jsou lineární FSPM stroje (LFSPM), viz Obrázek 14. Jedná se vlastně o konvenční FSPM stroj, který je rozvinut do roviny. Rotor zde koná přímočarý posuvný pohyb a nachází se na straně zátěže. Velkou výhodou těchto strojů je velká tažná síla a absence mechanického převodu pohonu, čímž vzrůstá provozní spolehlivost. [27] Uplatnění tak nacházejí v oblasti železniční dopravy, nebo v případě oboustranné konstrukce rotoru ve vojenství. [28]



Obrázek 14: Lineární FSPM stroj – upraveno [27]

1.3 Využití FSPM strojů

1.3.1 Armádní zařízení

Užití FSPM strojů v armádním sektoru bylo zběžně zmíněno v úvodu kapitoly 1. Nejprve byly využity FSPM stroje jako pomocné alternátory pro výrobu elektrické energie pro systémy naváděných raket v polovině 50. let 20. století. Byly zvoleny z důvodu menší hmotnosti, vyšší účinnosti, schopnosti dodávky vyšších špičkových výkonů a vyšší provozní spolehlivosti. [3]

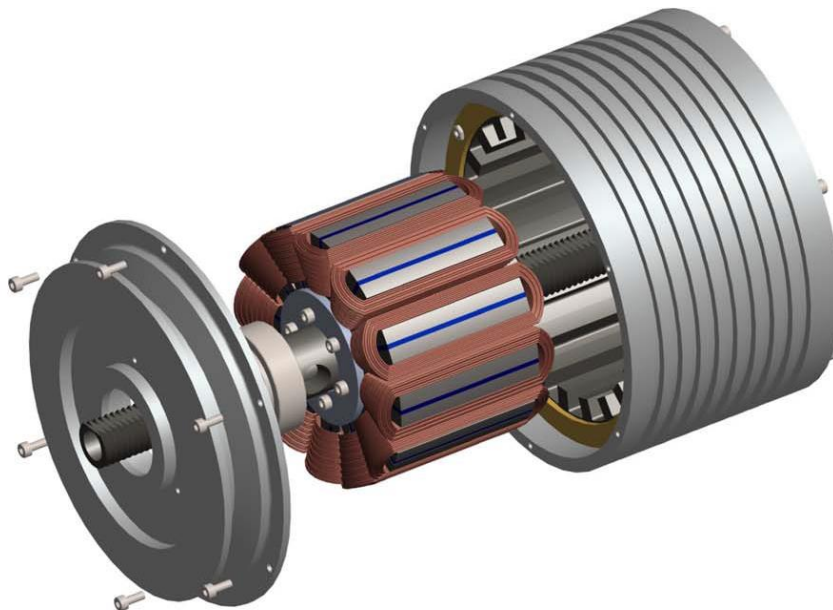
Další možné využití je náhrada lineárních indukčních motorů v elektromagnetických katapultech pro startování stíhacích letadel nebo bezpilotních letounů z paluby vojenských letadlových lodí, viz Obrázek 15. K tomuto účelu byl vytvořen prototyp lineárního FSPM stroje s oboustranným posuvným rotorem. Tento prototyp dosahoval vyšších výkonů při menším zvlnění, vyšší účinnosti, vyššího účinníku a menších ztrát v porovnání s dalšími dvěma lineárními indukčními motory. [29]



Obrázek 15: Elektromagnetický letadlový katapult – převzato [30]

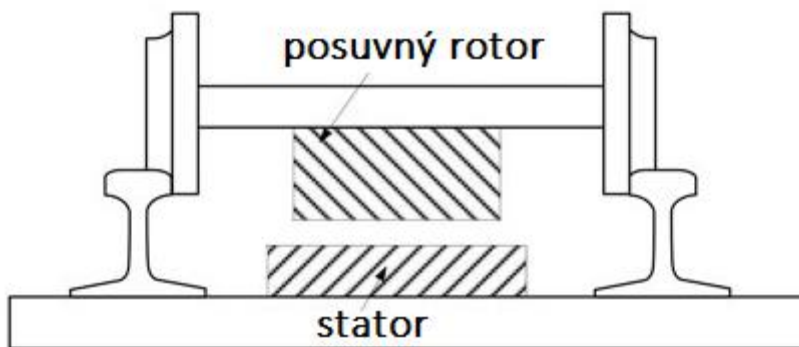
1.3.2 Elektrická trakce

V současné době jsou elektromotory v elektrické trakci čím dál častěji součástí hnacích kol z důvodu úspory místa v prostorech pro pasažéry. [31] Pro takový pohon lze použít outer-rotor FSPM stroj, viz Obrázek 16, čili stroj s vnějším rotorem, popisovaný v kapitole 1.2.6. Výhodou tohoto pohonu jsou nízké ztráty, vysoká účinnost a velký moment, bohužel zatím jen v provozu při nízkých otáčkách a lehkých nákladech. [21]



Obrázek 16: Model prototypu FSPM stroje – převzato [21]

Dalším možným pohonem pro železniční trakci by mohlo být použití lineárních FSPM strojů (viz kapitola 1.2.8). Výhodou těchto strojů je jejich vysoká provozní spolehlivost, nízká hlučnost, nízká cena a velká tažná síla. Krátkou pohyblivou část zde tvoří rotor, který je umístěn na spodní straně vlaku, viz Obrázek 17. V rotoru se nachází fázová vinutí a PM, která generují magnetické pole a magnetický tok. Stator tvoří pouze vzájemně izolované plechy, díky kterým jej lze umístit podél celé kolejové tratě na velké vzdálenosti. Takováto konstrukce je poté výrazně levnější, protože feromagnetické plechy nejsou příliš drahé. Dále rozměr rotoru je omezený a odpadá potřeba vysokého počtu PM. [32]



Obrázek 17: Lineární FSPM stroj v trakci – upraveno [32]

1.3.3 Elektromobily

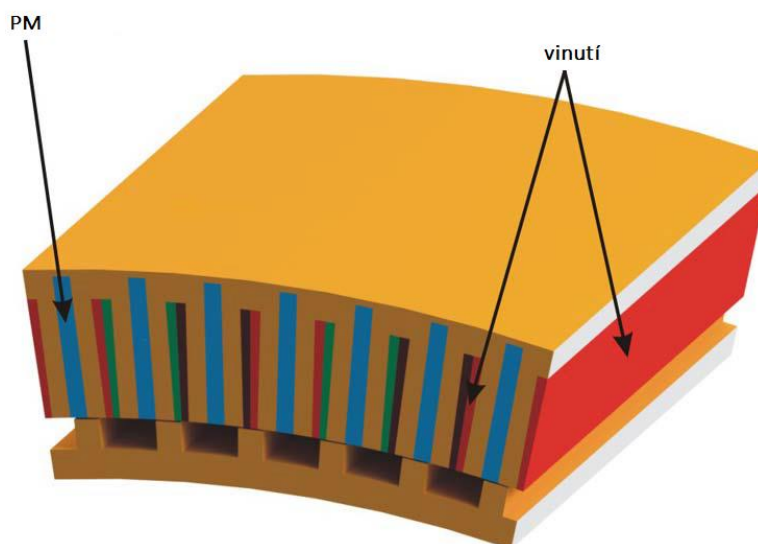
V následujících letech se bude automobilový průmysl čím dál více ubírat směrem k výrobě elektromobilů a hybridních automobilů, ekologicky šetrných vozidel k životnímu prostředí. Kladou se tak velké nároky na pohon, který by měl mít co nejlepší parametry. Hlavními určujícími parametry jsou především spolehlivost, dále malé rozměry, nízká hmotnost, velké rozpětí otáček a velký moment s malým zvlněním. [33]

Momentálně se využívají převážně PMSM motory s PM uloženými uvnitř stroje, ale snahou výrobců elektromobilů je hledání a vyvíjení nových možností pohonů. Nahrazením tohoto pohonu hybridními FSPM stroji může dojít k zlepšení parametrů, možnosti regulace stroje a celkovému konstrukčnímu zjednodušení celého pohonu. Pro tyto účely byl navržen hybridní FSPM stroj s dvojitým rotorem v rámci experimentu, jenž byl zmíněn v kapitole 1.2.7. [25] Výhodné na tomto pohonu je schopnost vytvořit velký moment při vysokých otáčkách.

1.3.4 Větrné elektrárny

Nynější větrné elektrárny převádějí větrnou energii na mechanickou a poté na elektrickou za pomoci asynchronních generátorů (alternátorů) nebo synchronních generátorů s PM. [34] Nevýhodou těchto strojů je jejich vysoká hmotnost, pořizovací cena a většinou také neschopnost pracovat v poruchovém stavu. Všechny tyto aspekty by mohly být zlepšeny použitím FSPM strojů. Další rozdělení větrných elektráren se liší podle velikosti rychlosti, respektive počtu otáček, ve kterých pracují – nízko, středně a vysokootáčkové. V závislosti na velikosti pracovní rychlosti se odvíjí druh použitého generátoru a vícestupňové převodovky, dále celková cena, velikost a účinnost elektrárny. [35]

Malé větrné elektrárny, pracující při nízkých otáčkách a malých výkonech, nepotřebují mechanickou převodovku. Generátor je tak přímo připojen k větrné turbíně. V článku [36] byly uvažovány dva druhy FSPM generátorů s vysokým počtem statorových a rotorových pólů – FSPM 120/100 (viz Obrázek 18) a FSPM 120/140. Pro oba stroje byly použity různé druhy PM při stejných rozměrech. Přestože neodymové (NdFeB) PM vykazují nejlepší výsledky, z hlediska ceny jsou přijatelnější feritové PM. Nevýhodou FSPM generátorů je náročná regulace pohonu a je nutné použít výkonovou řídicí elektroniku.



Obrázek 18: FSPM generátor 120/100 – upraveno [36]

2 Počítačové modely FSPM strojů s rozdílným počtem pólů

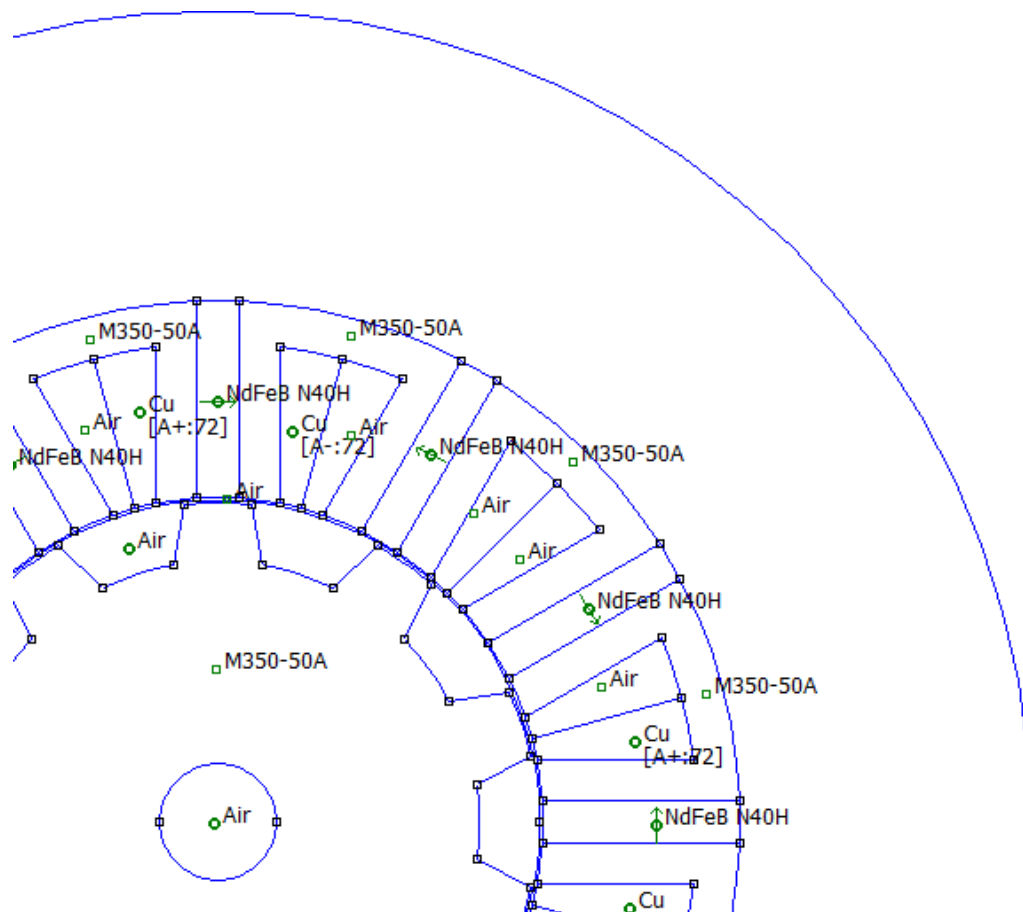
V této části práce jsou sestaveny počítačové 2D modely FSPM strojů s rozdílným počtem statorových a rotorových pólů, které byly následně podrobeny simulacím. Sledovanými parametry byla indukovaná napětí U_i ve statoru při motorickém režimu stroje a točivý moment stroje M . Výchozím modelem je konvenční FSPM 12/10 stroj, z kterého vycházejí další konfigurace. Byly zvoleny dvě konfigurace statoru – dvanáctipólový a šestipólový, a tři konfigurace rotoru – desetipólový, čtrnáctipólový a šestnáctipólový, resp. jejich poloviční počet v případě stroje se šesti statorovými póly. Dále byly určeny výchozí rozměry a parametry FSPM strojů z článku [5], viz Tabulka 1.

Tabulka 1: Rozměry a parametry FSPM strojů

Druhy FSPM strojů	6/5	6/7	6/8	12/10	12/14	12/16
Počet fází	3					
Počet pólů statoru	6			12		
Počet pólů rotoru	5	7	8	10	14	16
Průměr vnější kružnice	140 mm					
Vnější průměr statoru	90 mm					
Vnitřní průměr statoru	56 mm					
Vnější průměr rotoru	55 mm					
Aktivní délka stroje	25 mm					
Vzduchová mezera	0,5 mm					
Šířka pole rotoru	1/3 pólové rozteče rotoru					
Šířka statorového zubu	3,6 mm					
Šířka jha	3,6 mm					
Šířka permanentního magnetu	3,6 mm					
Výška permanentního magnetu	17 mm					
Počet cívkových závitů na jedné fázi	72					
Jmenovité napětí	36 V					
Jmenovitý proud	10 A					
Synchronní rychlost	400 ot/min					

2.1 Konečně-prvkové modely FSPM strojů

Nejprve bylo nutné vytvořit 2D modely s danými rozměry a konfiguracemi pomocí CAD programu SolidWorks a exportovat tyto modely ve výměnném formátu *.DXF pro další analýzy. Následně byly sestavovány konečně-prvkové modely v simulačním programu FEMM, který mimo jiné slouží k řešení problémů elektromagnetických polí ve dvourozměrném režimu. Modelům byly definovány použité materiály s jejich vlastnostmi, viz Obrázek 19. Pro magnetický obvod statoru a rotoru byly zvoleny elektrotechnické plechy M350-50A s nelineární B-H charakteristikou (vztah mezi magnetickou indukcí a intenzitou magnetického pole) dle normy ČSN EN 10106. [37] Dalšími materiály jsou neodymové PM s příměsí železa a boru NdFeB N40H [38], měď pro statorové vinutí a vzduch pro vzduchovou mezeru uvnitř stroje a okolní prostředí mimo stroj. Poté byla definována okrajová podmínka na vnější kružnici s 140 mm, nacházející se vně stroje.



Obrázek 19: Definování materiálů v programu FEMM

2.2 Sledované parametry FSPM strojů

2.2.1 Magnetické toky a indukované napětí

Magnetické toky FSPM strojů byly odečítány ve všech cívkách jednoho fázového statorového vinutí při otáčení rotoru po směru hodinových ručiček. Celkem bylo naměřeno 360 hodnot velikosti magnetického toku v závislosti na čase, resp. 360 dílčích kroků otočení rotoru. Předpokladem byl generátorický režim stroje, kdy fázovým vinutím neprotékal definovaný proud. Program FEMM neumožňuje simulovat otáčení rotoru a současně odečítat hodnoty v čase. Řešením tohoto problému bylo použití externího LUA skriptu, viz Příloha A. Jednotlivé prvky tvořící rotor musely být zařazeny do jedné skupiny, se kterou se následně otáčelo. Otočení bylo prováděno pootočením rotorového pólu o pozici přechozího rotorového pólu. Dobu otočení o jeden dílčí krok, resp. elektrický úhel bylo nutné přepočítat pro každý jednotlivý FSPM stroj zvlášť, kvůli odlišnému počtu rotorových pólů. Nejprve bylo nutné stanovit synchronní rychlost rotoru vyjádřenou v otáčkách za minutu:

$$n_s \text{ (ot/min)} \quad (2.1)$$

Poté přepočítat otáčky za minutu na otáčky za sekundu:

$$n = \frac{n_s}{60} \text{ (ot/s)} \quad (2.2)$$

Převrácením otáček za sekundu lze získat celkovou periodu otáček:

$$T_{ot} = \frac{1}{n} \text{ (s)} \quad (2.3)$$

Vydělením celkové periody otáček počtem rotorových pólů lze získat periodu, za kterou urazí rotorový pól o polohu předchozího rotorového pólu:

$$T = \frac{T_{ot}}{p_r} \text{ (s)} \quad (2.4)$$

Celkovou dobu pootočení rotorového pólu o jeden dílčí krok lze získat vydělením periody T celkovým počtem dílčích kroků:

$$\Delta t = \frac{T}{\text{počet kroků}} \text{ (s)} \quad (2.5)$$

Cílem LUA skriptu bylo zautomatizování simulačních výpočtů. Bylo nutné určit všechny cívky jednoho fázového statorového vinutí pomocí křivky, tzv. kontury, skrz kterou prochází úhrnný tok magnetické indukce. LUA skript byl nastaven tak, aby vždy vybral jednu cívku pomocí souřadnic, pro kterou byl vypočten křivkový integrál definované kontury a následně zapsal hodnotu magnetického toku do textového souboru. Tento výpočet a zápis se opakoval pro všechny cívky jednoho fázového vinutí – 4 cívky (dvanáctipólový stator), 2 cívky (šestipólový stator). Nakonec došlo k pootočení rotoru o jeden dílčí krok Δt a vše se opakovalo až do dosáhnutí 360 dílčích kroků.

Poté bylo nutné spočítat indukované napětí podle rovnice:

$$U_i = -\frac{d\Phi}{dt} = -\frac{N * (\Phi_2 - \Phi_1)}{\Delta t} \text{ (V)} \quad (2.6)$$

Celkový počet závitů N jedné cívky fázového vinutí se vynásobí s výsledným magnetickým tokem (odečtením následujícího magnetického toku Φ_2 s předchozím magnetickým tokem Φ_1) a celý čítec se vydělí jedním dílčím krokem Δt . Tento výpočet se opakuje pro všechny cívky jednoho fázového vinutí. Celkové indukované napětí jedné fáze se poté vypočte součtem všech indukovaných napětí jednotlivých cívek. Získá se tak celkem 360 hodnot indukovaného napětí v závislosti na čase, resp. elektrickém úhlu.

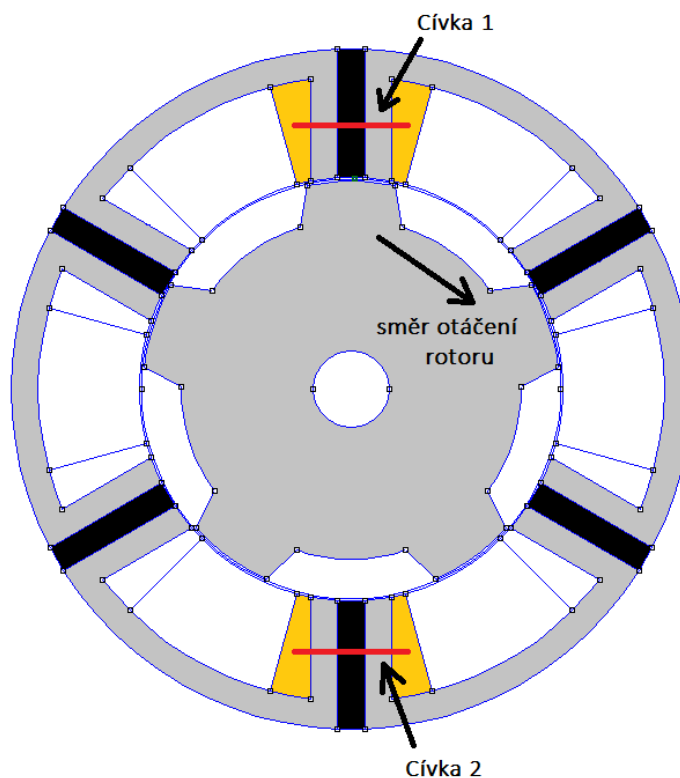
2.2.2 Točivý moment stroje

Točivý moment jednotlivých FSPM strojů byl odečítán z kružnice procházející středem vzduchové mezery při otáčení rotoru a při proudovém zatížení $I = 10$ A. Byl opět použit LUA skript (viz. Příloha B), fungující na podobném principu jako skript u indukovaného napětí. Konturou zde byla zvolena středová kružnice, resp. její dvě

půlkružnice, opět pomocí souřadnic. Vypočtením křivkového integrálu lze získat přímou hodnotu momentu stroje, která byla zapsána do textového souboru. Následovalo opět pootočení rotoru o jeden dílčí krok Δt a celý postup se opakoval. Bylo tak získáno 360 hodnot točivého momentu v závislosti na čase, resp. elektrickém úhlu.

2.3 FSPM stroje s 6-pólovým statorem

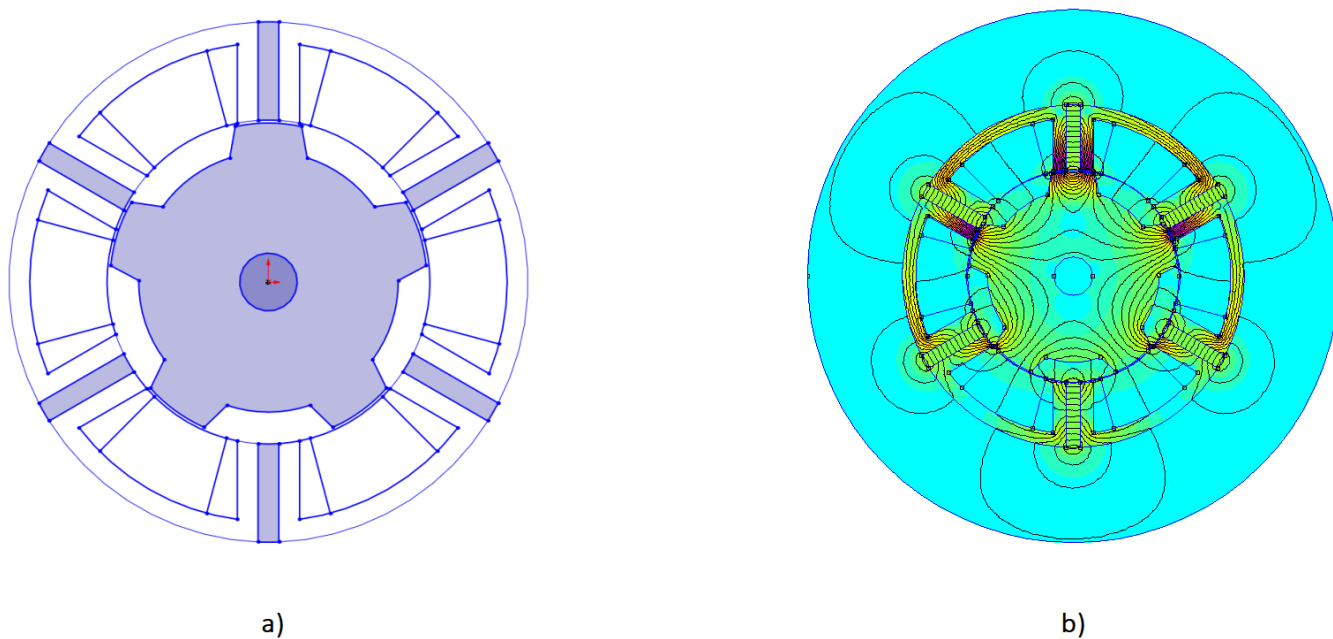
FSPM stroje se šestipólovým statorem mají fyzicky celkem dvě cívky v každém fázovém statorovém vinutí. V těchto cívkách byly odečítány magnetické toky, ze kterých byla vypočítávána indukovaná napětí, viz Obrázek 20. Byly zvoleny tři topologie FSPM strojů s různými počty rotorových pólů – 6/5 (pětipólový rotor), 6/7 (sedmipólový rotor) a 6/8 (osmipólový rotor).



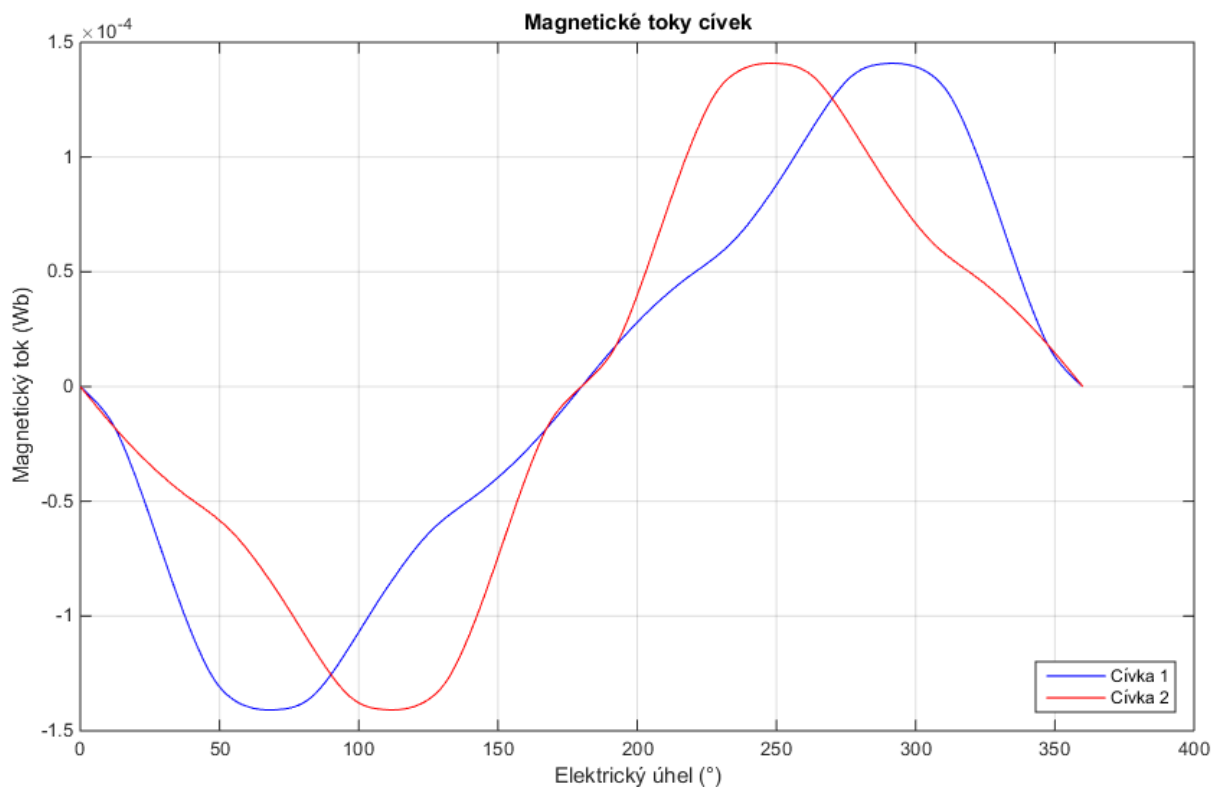
Obrázek 20: Ilustrační znázornění cívek jednoho fázového vinutí a směru pohybu rotoru

2.3.1 FSPM stroj 6/5

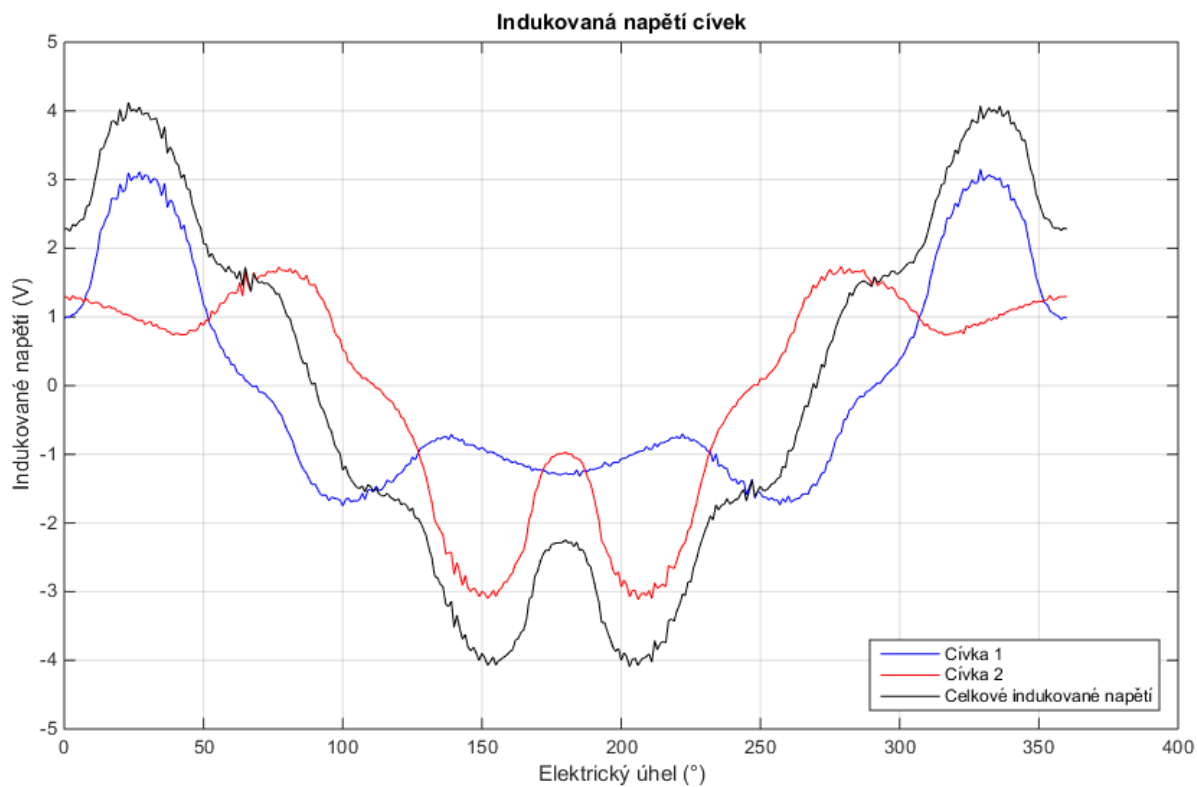
Obrázek 22 znázorňuje zvlněný průběh magnetického toku v první a druhé cívice jednoho fázového vinutí. Obrázek 23 znázorňuje průběh indukovaného napětí v první a druhé cívice, a také celkové indukované napětí, které vychází ze součtu indukovaných napětí v jednotlivých cívkách, s maximální hodnotou $\pm 4,07$ V. Točivý moment stroje byl odečítán z kružnice procházející středem vzduchové mezery, jeho průběh je velmi zvlněný a maximální hodnota je $\pm 1,22$ Nm, viz Obrázek 24.



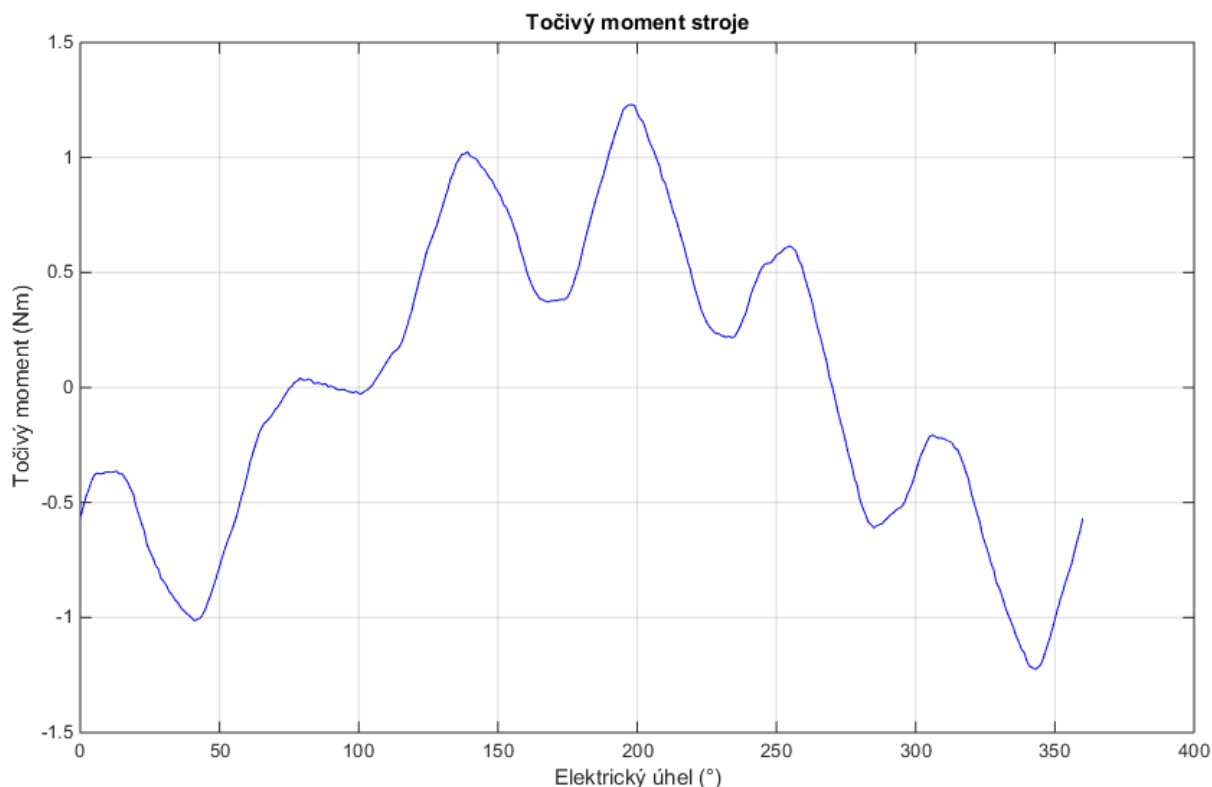
Obrázek 21: Modely FSPM stroje 6/5 zpracované v programu - a) SolidWorks, b) FEMM



Obrázek 22: Průběhy magnetických toků v cívkách FSPM stroje 6/5



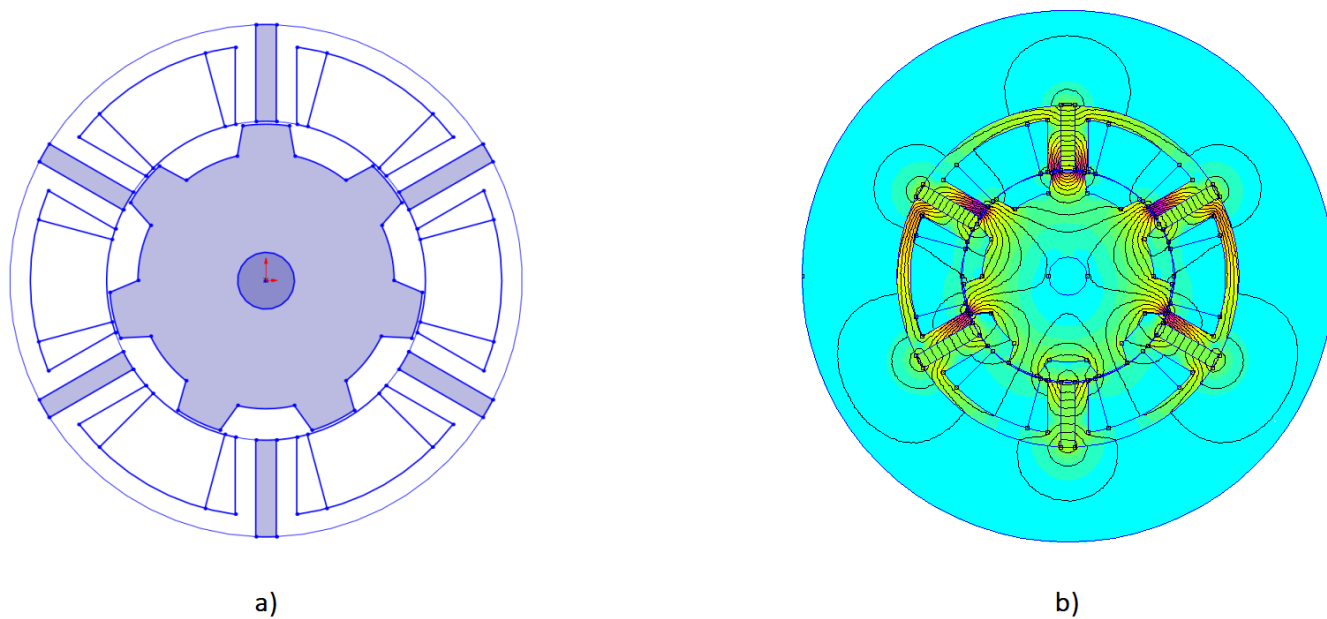
Obrázek 23: Průběhy indukovaných napětí v cívkách FSPM stroje 6/5



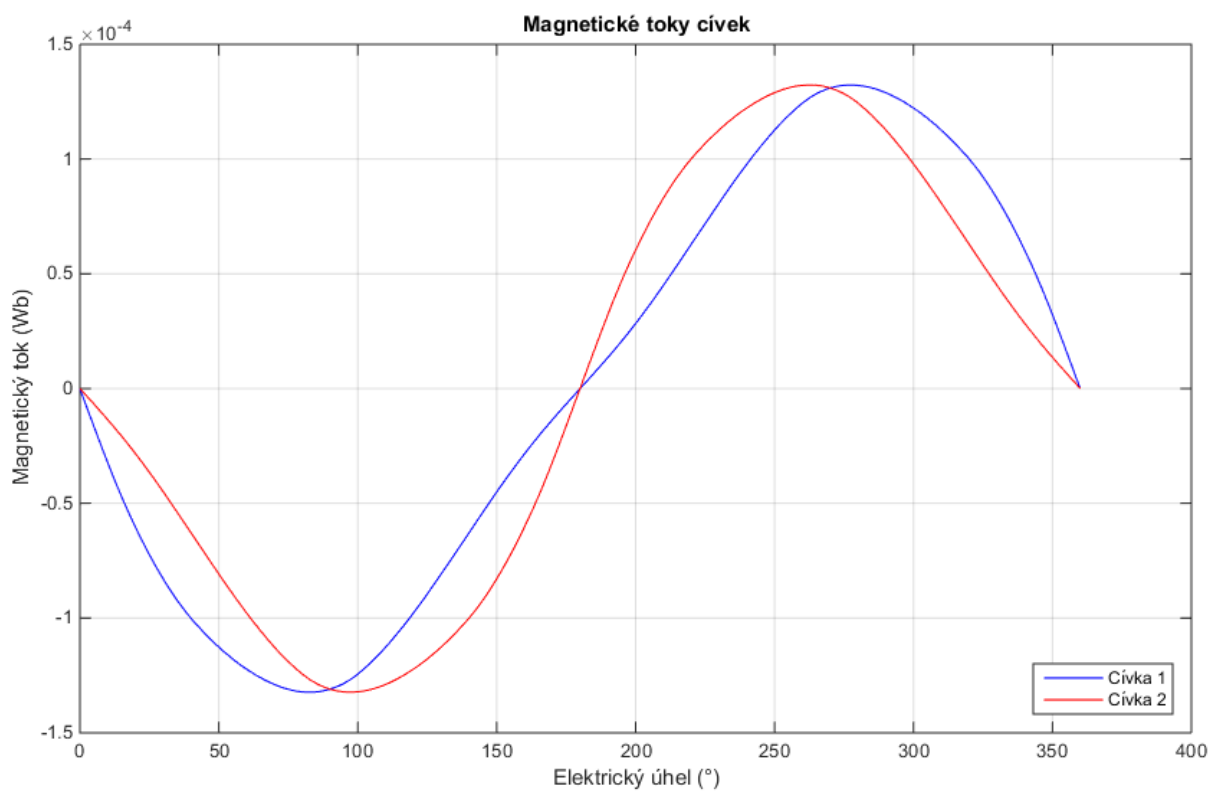
Obrázek 24: Průběh točivého momentu FSPM stroje 6/5

2.3.2 FSPM stroj 6/7

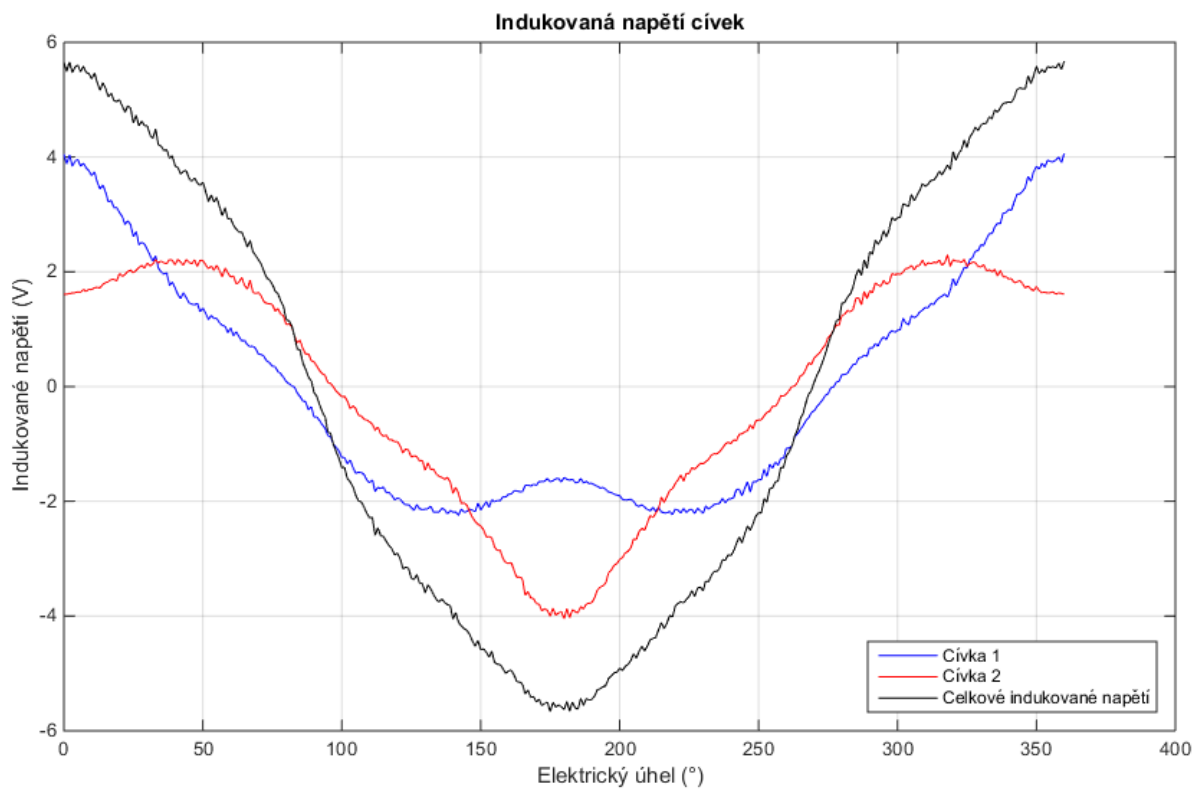
Obrázek 26 znázorňuje téměř sinusový průběh magnetického toku v první a druhé cívice jednoho fázového vinutí, avšak je zde patrné menší zvlnění průběhu oproti stroji FSPM 6/7. Obrázek 27 znázorňuje průběh indukovaného napětí v první a druhé cívice, a také celkové indukované napětí sinusového průběhu s výrazně menším zvlněním. Maximální hodnota celkového indukovaného napětí je přibližně $\pm 5,67$ V. Obrázek 28 znázorňuje průběh točivého momentu stroje, který je méně zvlněný oproti FSPM 6/5 stroji. Maximální hodnota točivého momentu se zaokrouhlením je přibližně $\pm 1,27$ Nm.



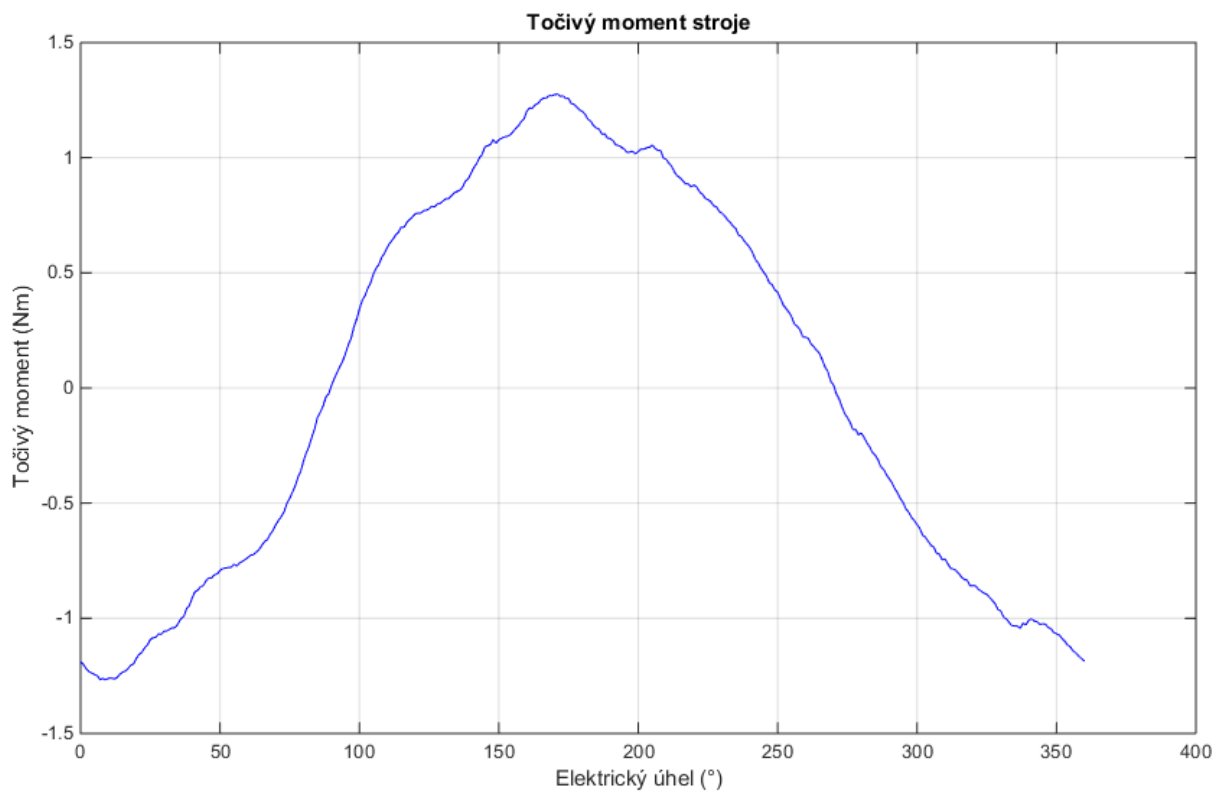
Obrázek 25: Modely FSPM stroje 6/7 zpracované v programu - a) SolidWorks, b) FEMM



Obrázek 26: Průběhy magnetických toků v cívkách FSPM stroje 6/7



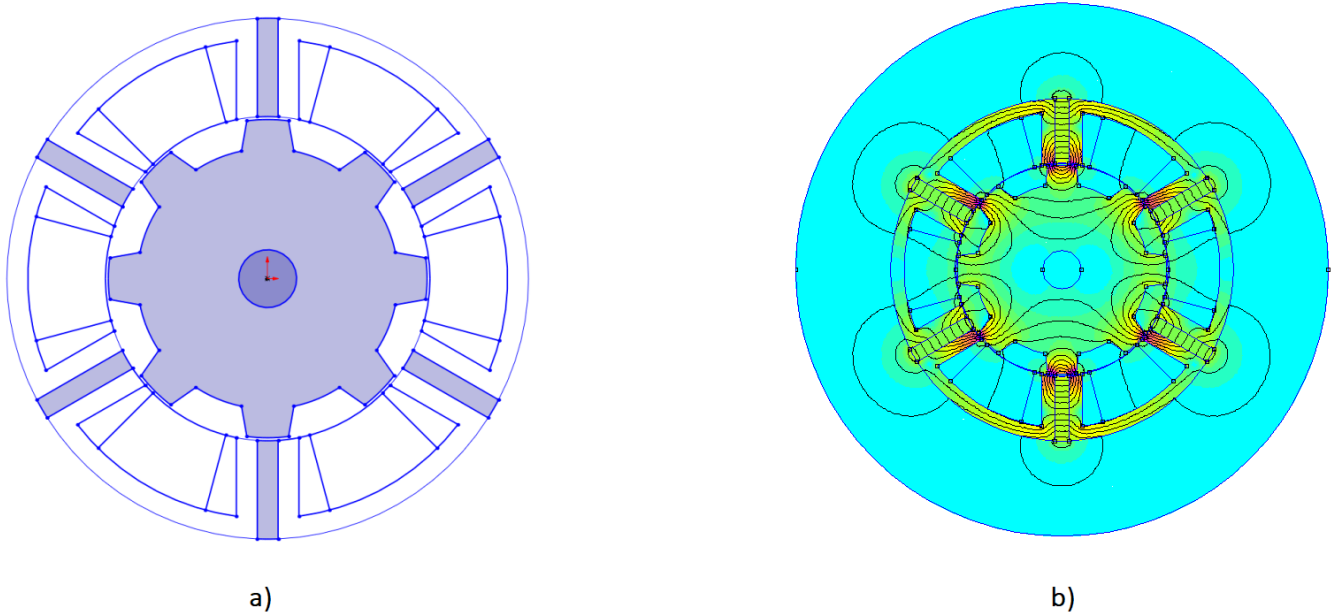
Obrázek 27: Průběhy indukovaných napětí v cívkách FSPM stroje 6/7



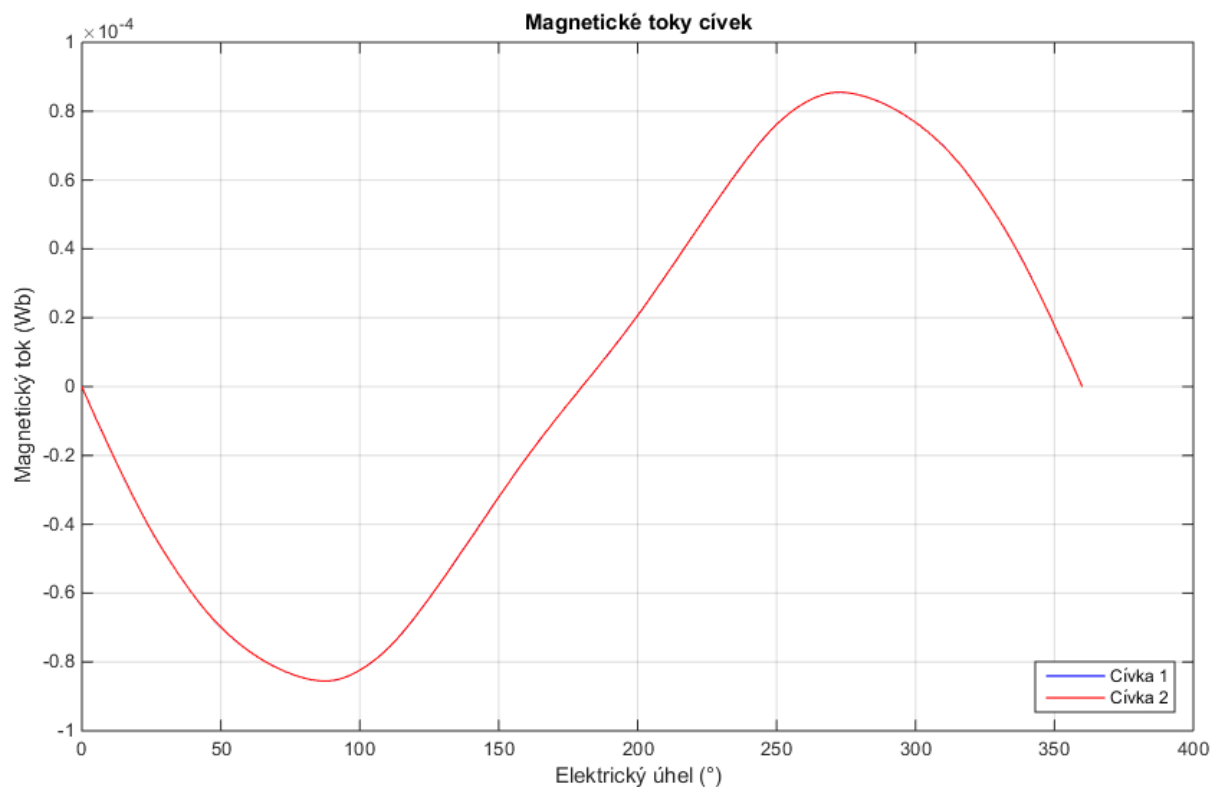
Obrázek 28: Průběh točivého momentu FSPM stroje 6/7

2.3.3 FSPM stroj 6/8

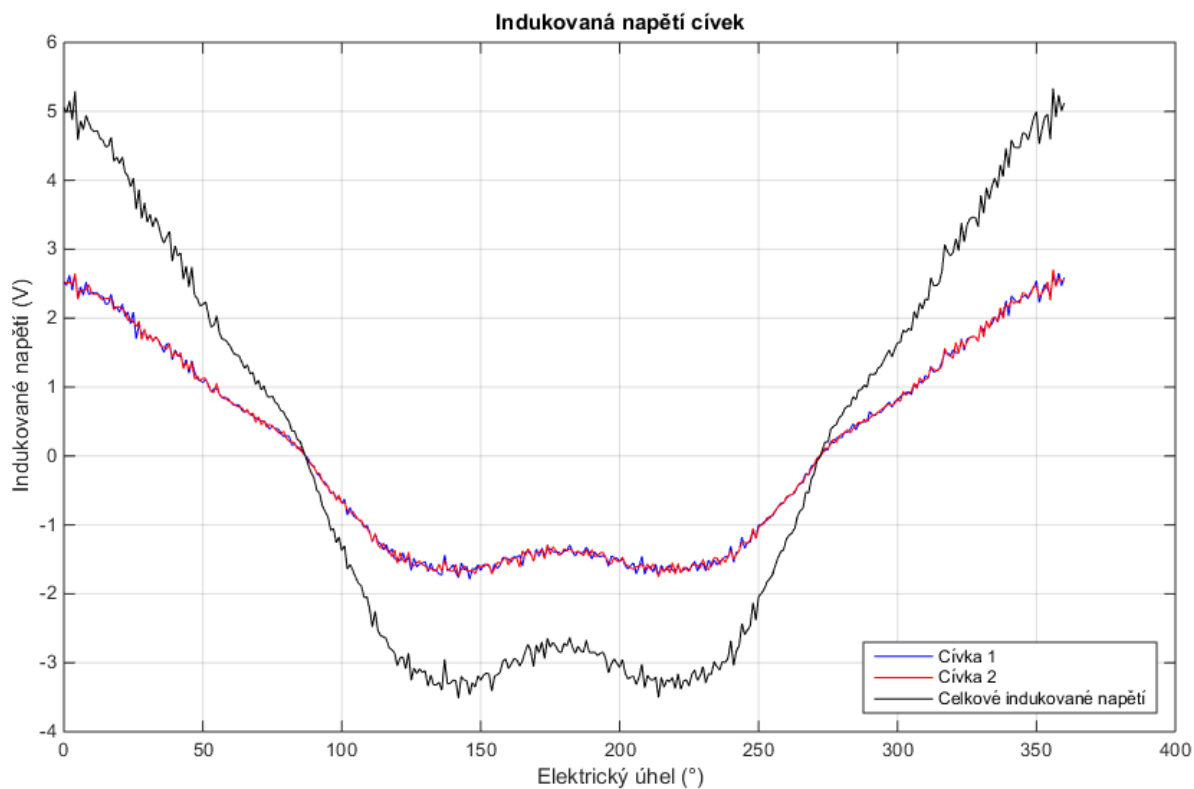
V této topologii FSPM stroje bylo nutné obrátit polaritu protilehlé cívky tak, aby nedocházelo k vyrušení magnetického toku a indukovaného napětí, kvůli průběhům jdoucím do protifáze. Obrázek 30 znázorňuje shodné sinusové průběhy magnetického toku v první a druhé cívce jednoho fázového vinutí. Obrázek 31 znázorňuje průběh indukovaného napětí v první a druhé cívce, a také celkové indukované napětí. Maximální hodnota celkového indukovaného napětí je $\pm 5,29$ V. Obrázek 32 znázorňuje velmi zvlněný průběh točivého momentu stroje a jeho maximální hodnota je $\pm 2,44$ Nm.



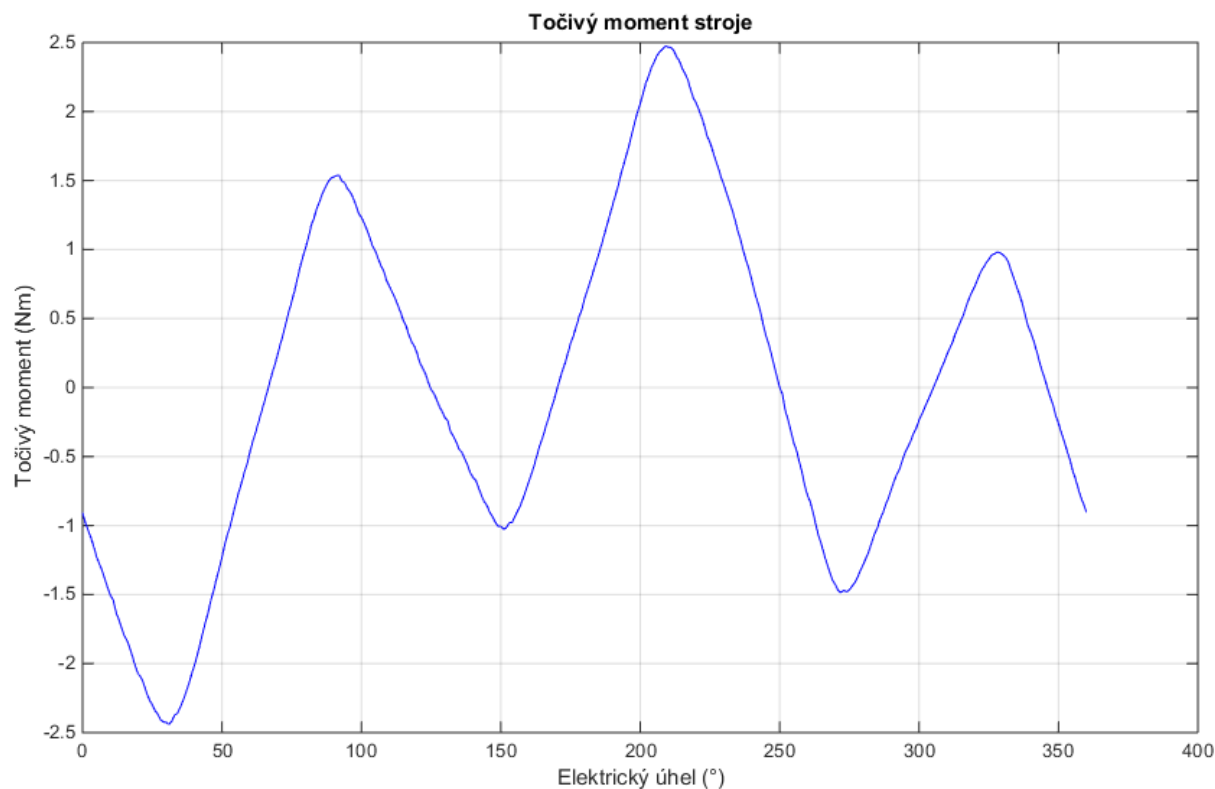
Obrázek 29: Modely FSPM stroje 6/8 zpracované v programu - a) SolidWorks, b) FEMM



Obrázek 30: Průběhy magnetických toků v cívkách FSPM stroje 6/8



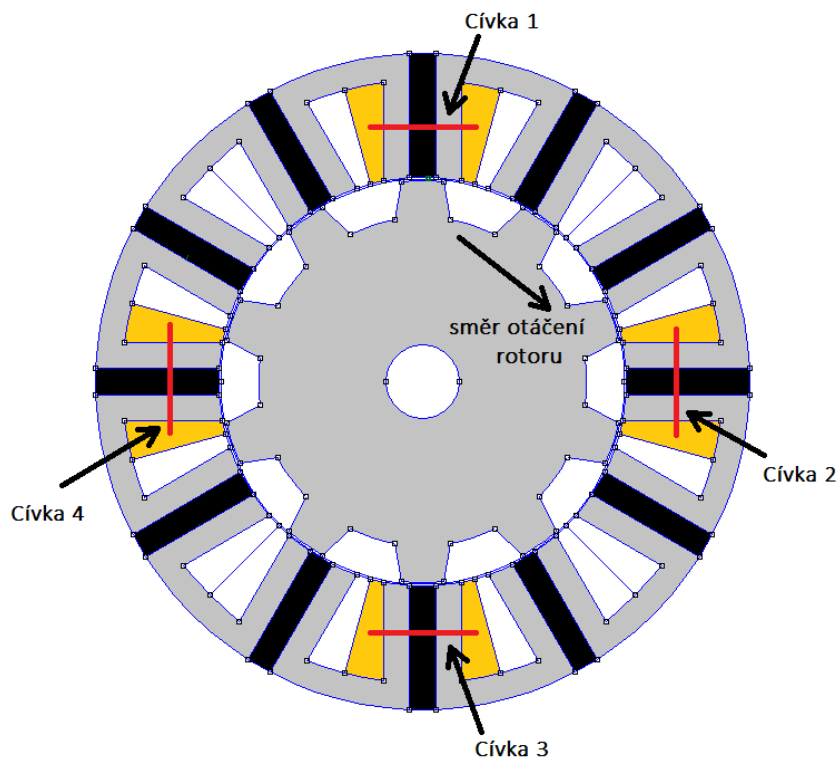
Obrázek 31: Průběhy indukovaných napětí v cívkách FSPM stroje 6/8



Obrázek 32: Průběh točivého momentu FSPM stroje 6/8

2.4 FSPM stroje s 12-pólovým statorom

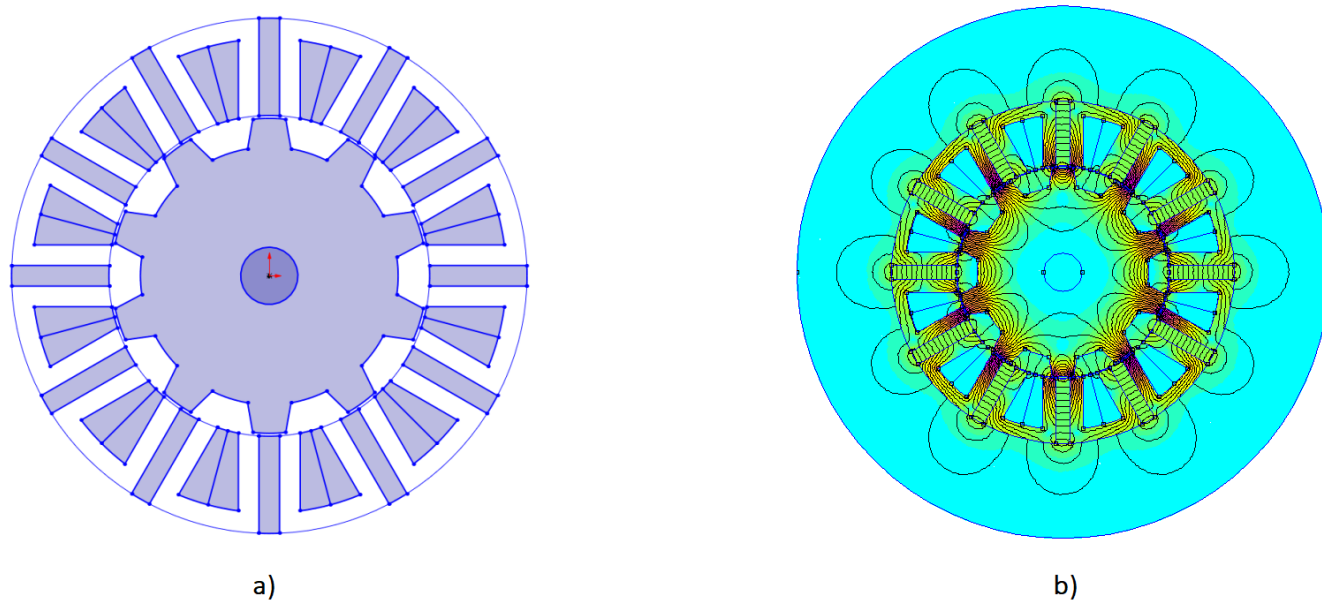
FSPM stroje s dvanáctipólovým statorom mají fyzicky celkem čtyři cívky v každém fázovém statorovém vinutí. V těchto cívkách byly odečítány magnetické toky, ze kterých byla vypočítávána indukovaná napětí, viz Obrázek 33. Byly zvoleny tři topologie FSPM strojů s různými počty rotorových pólů – 12/10 (desetipólový rotor), 12/14 (čtrnáctipólový rotor) a 12/16 (šestnáctipólový rotor).



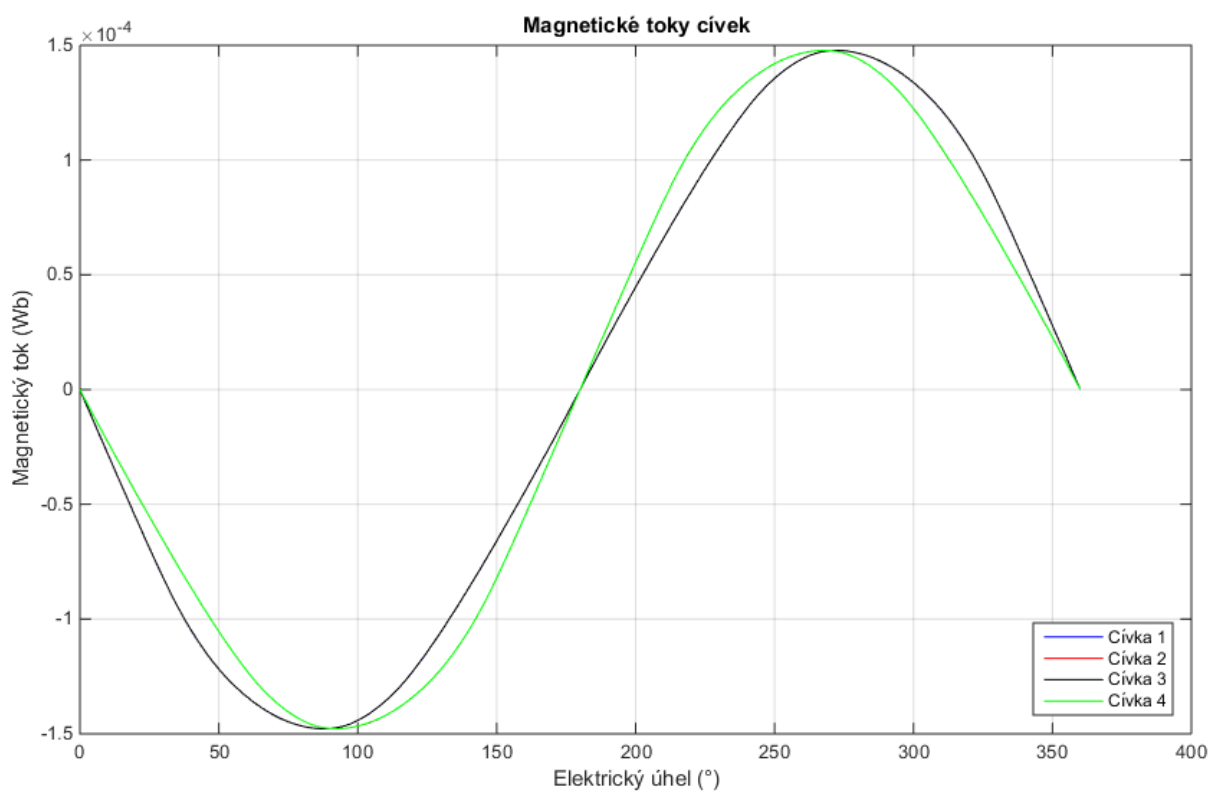
Obrázek 33: Znáornění cívek jednoho fázového vinutí a směru pohybu rotoru

2.4.1 FSPM stroj 12/10

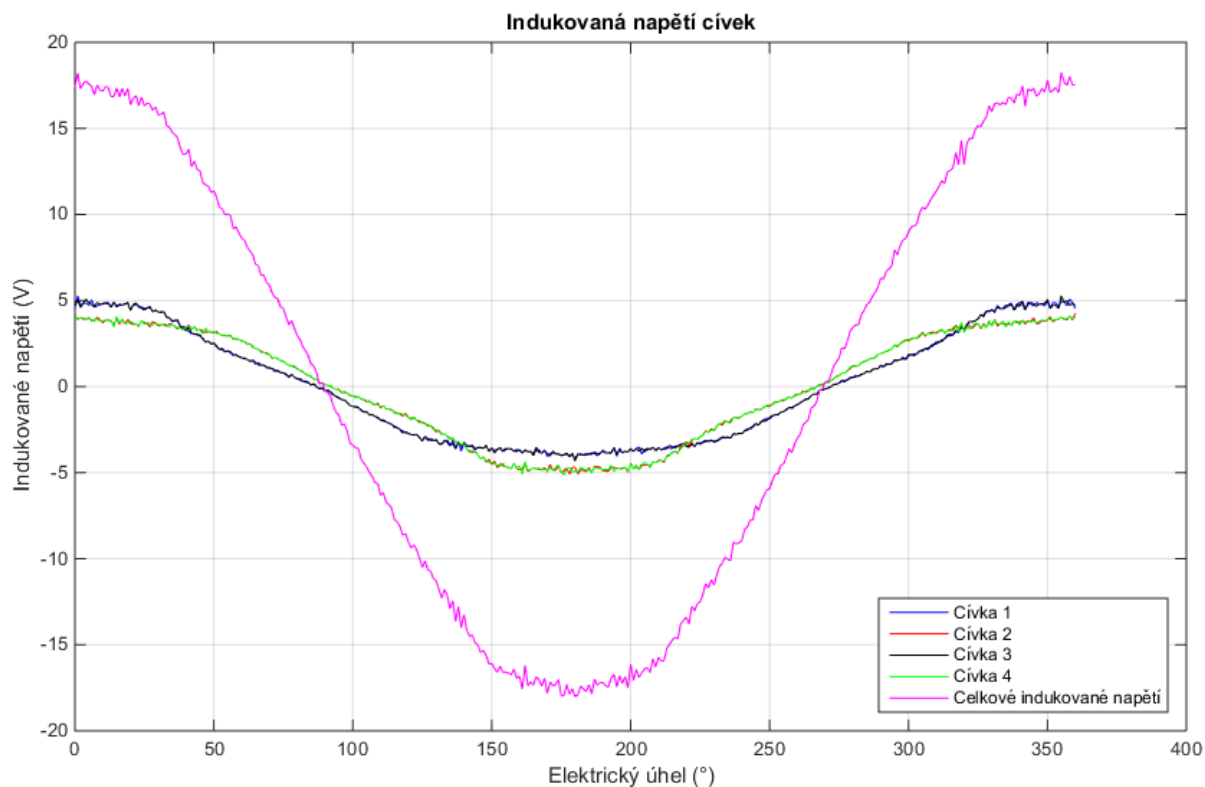
Obrázek 35 znázorňuje sinusový průběh magnetického toku ve všech čtyřech cívkách jednoho fázového vinutí, z nichž průběhy v protilehlých cívkách jsou shodné. Obrázek 36 znázorňuje průběh indukovaného napětí ve všech cívkách, a také celkové indukované napětí, které vychází ze součtu indukovaných napětí v jednotlivých cívkách, s maximální hodnotou $\pm 18,25$ V. Obrázek 37 znázorňuje točivý moment stroje s mírně zvlněným a zkresleným průběhem v maximu se špičkovou hodnotou $\pm 4,18$ Nm.



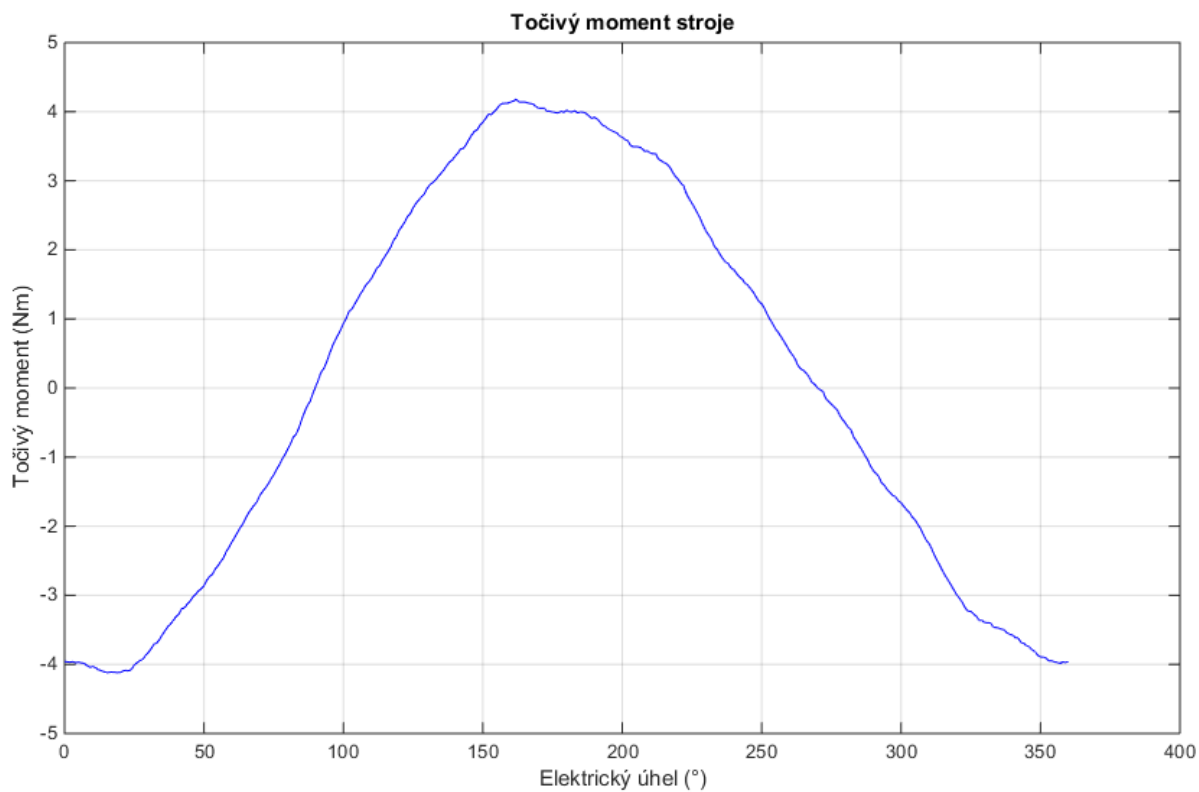
Obrázek 34: Modely FSPM stroje 12/10 zpracované v programu - a) SolidWorks, b) FEMM



Obrázek 35: Průběhy magnetických toků v cívkách FSPM stroje 12/10



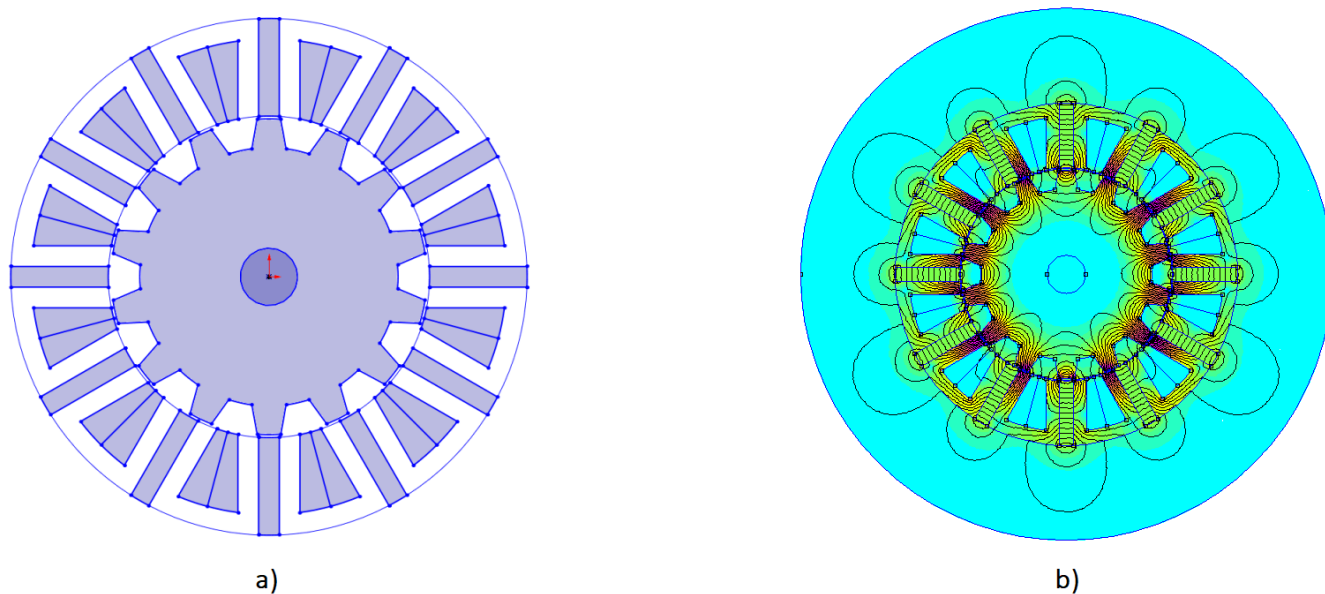
Obrázek 36: Průběhy indukovaných napětí v cívkách FSPM stroje 12/10



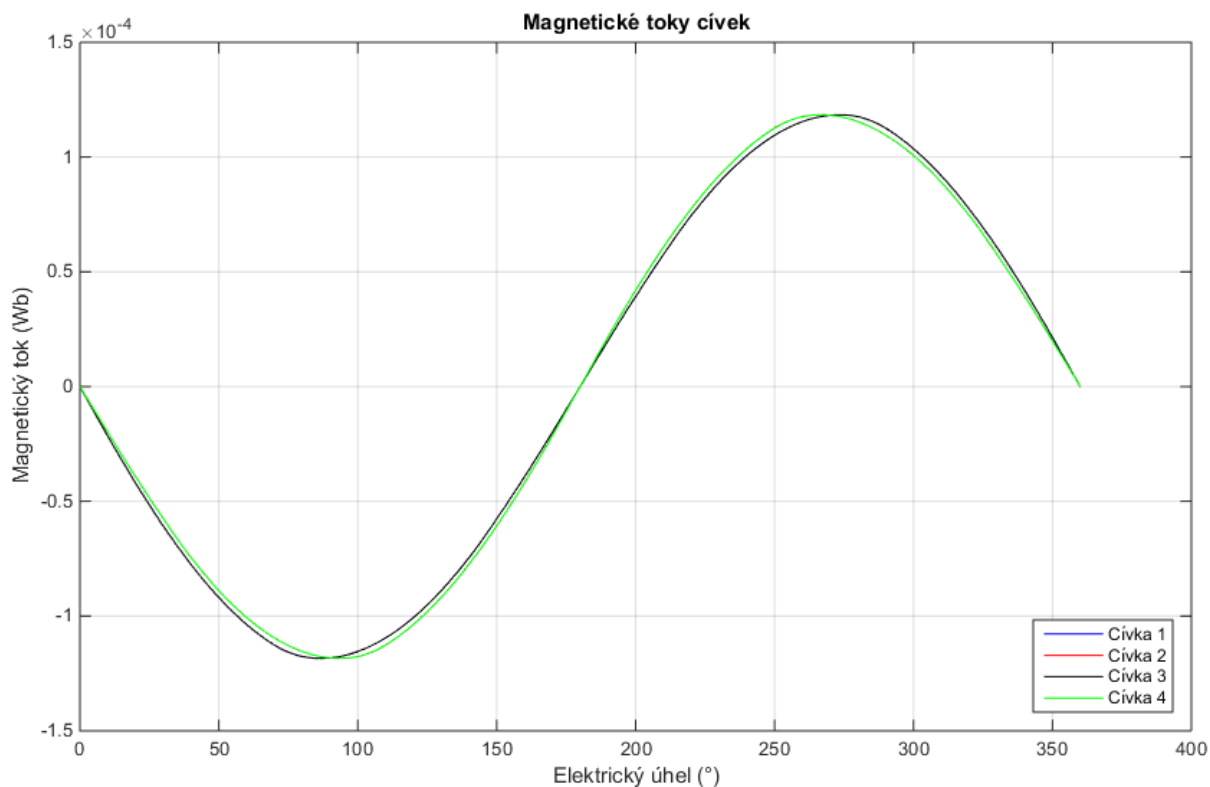
Obrázek 37: Průběh točivého momentu FSPM stroje 12/10

2.4.2 FSPM stroj 12/14

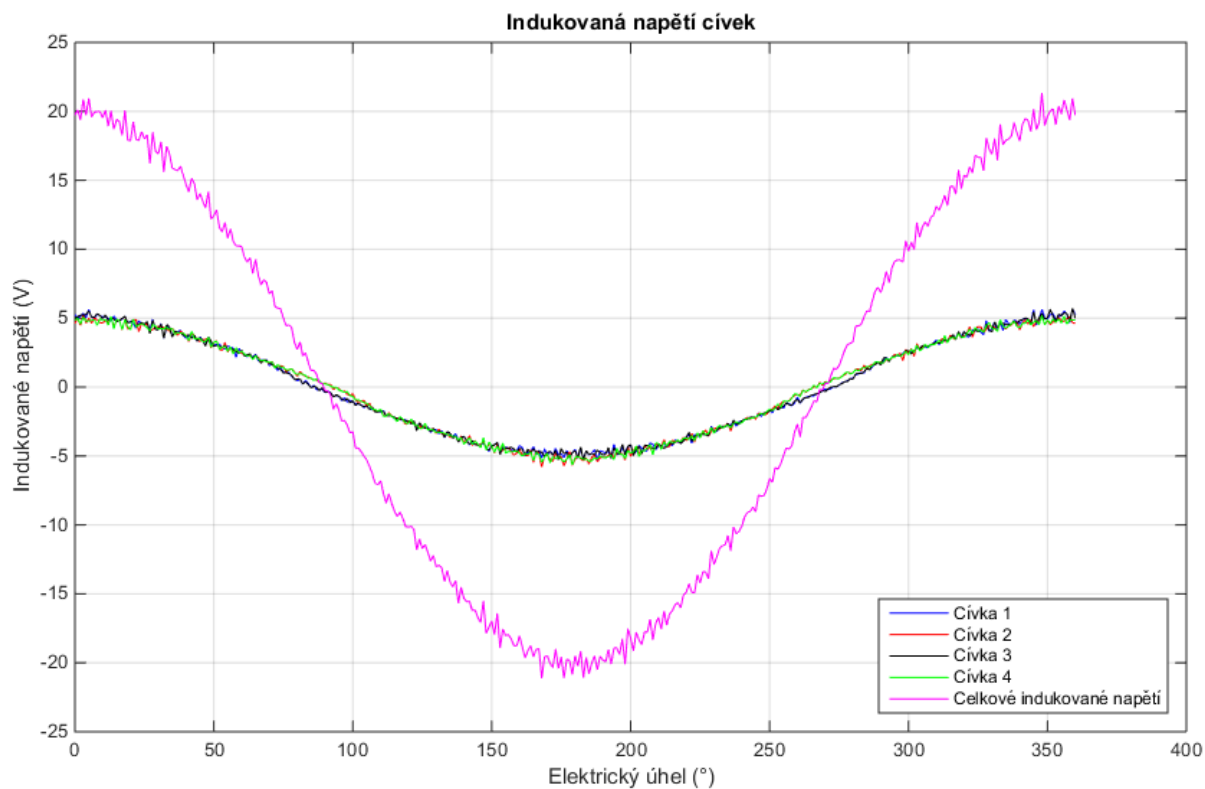
Obrázek 39 znázorňuje sinusový průběh magnetického toku ve všech čtyřech cívkách jednoho fázového vinutí, z nichž průběhy v protilehlých cívkách jsou shodné. Obrázek 40 znázorňuje průběh indukovaného napětí ve všech cívkách, a také celkové indukované napětí sinusového průběhu s malým zvlněním. Maximální hodnota celkového indukovaného napětí je přibližně $\pm 20,87$ V. Obrázek 41 znázorňuje průběh točivého momentu stroje, který je méně zvlněný a více vyhlazený oproti FSPM 12/10 stroji. Maximální hodnota točivého momentu se zaokrouhlením je přibližně $\pm 4,7$ Nm.



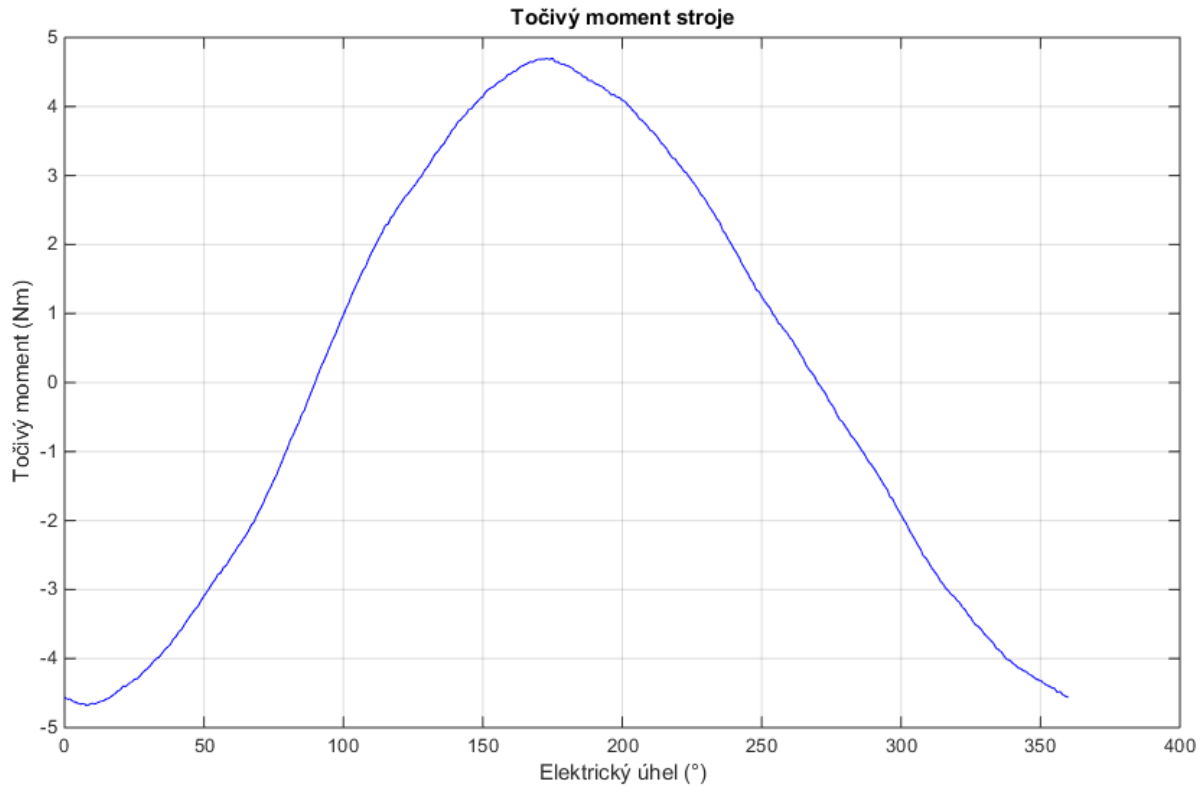
Obrázek 38: Modely FSPM stroje 12/14 zpracované v programu - a) SolidWorks, b) FEMM



Obrázek 39: Průběhy magnetických toků v cívkách FSPM stroje 12/14



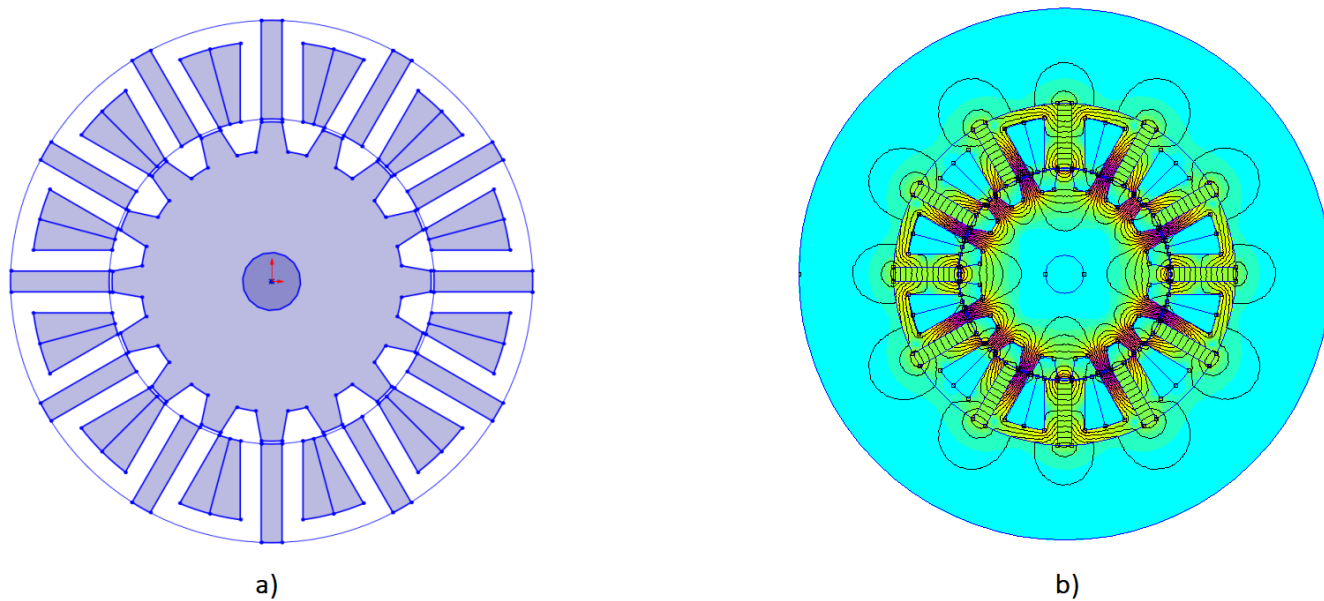
Obrázek 40: Průběhy indukovaných napětí v cívkách FSPM stroje 12/14



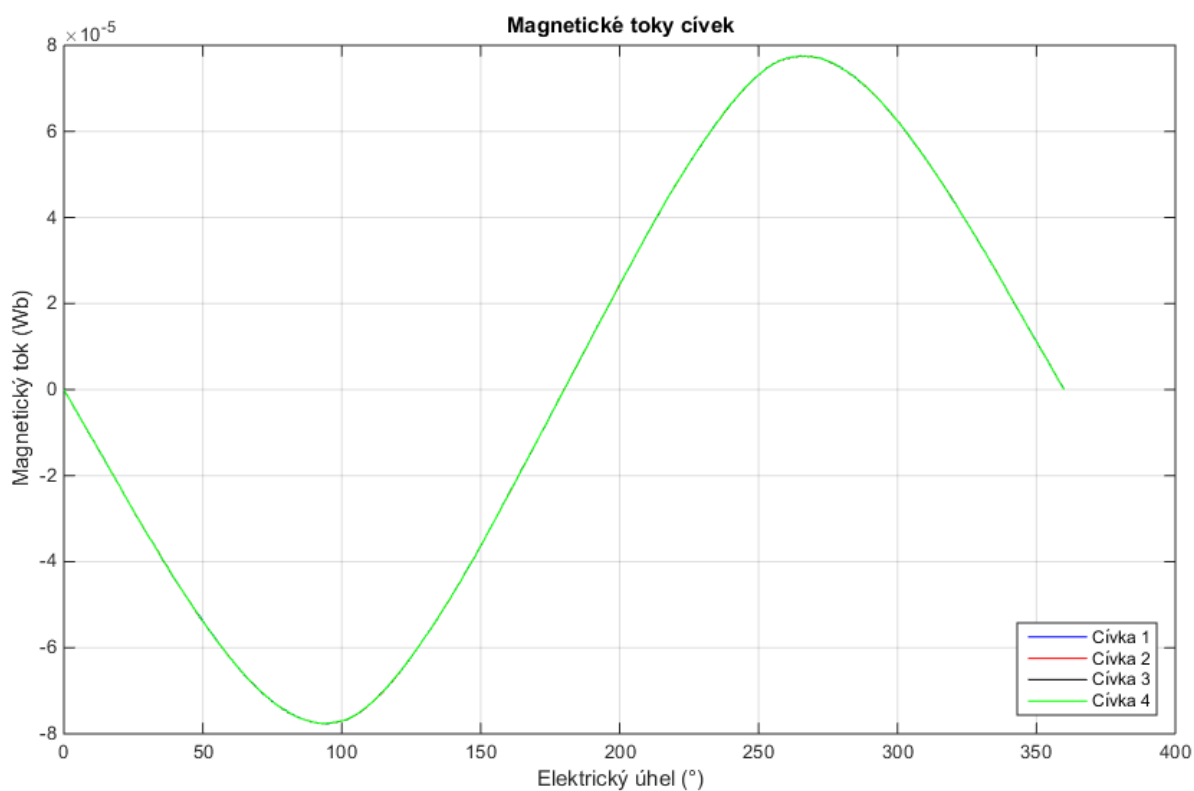
Obrázek 41: Průběh točivého momentu FSPM stroje 12/14

2.4.3 FSPM stroj 12/16

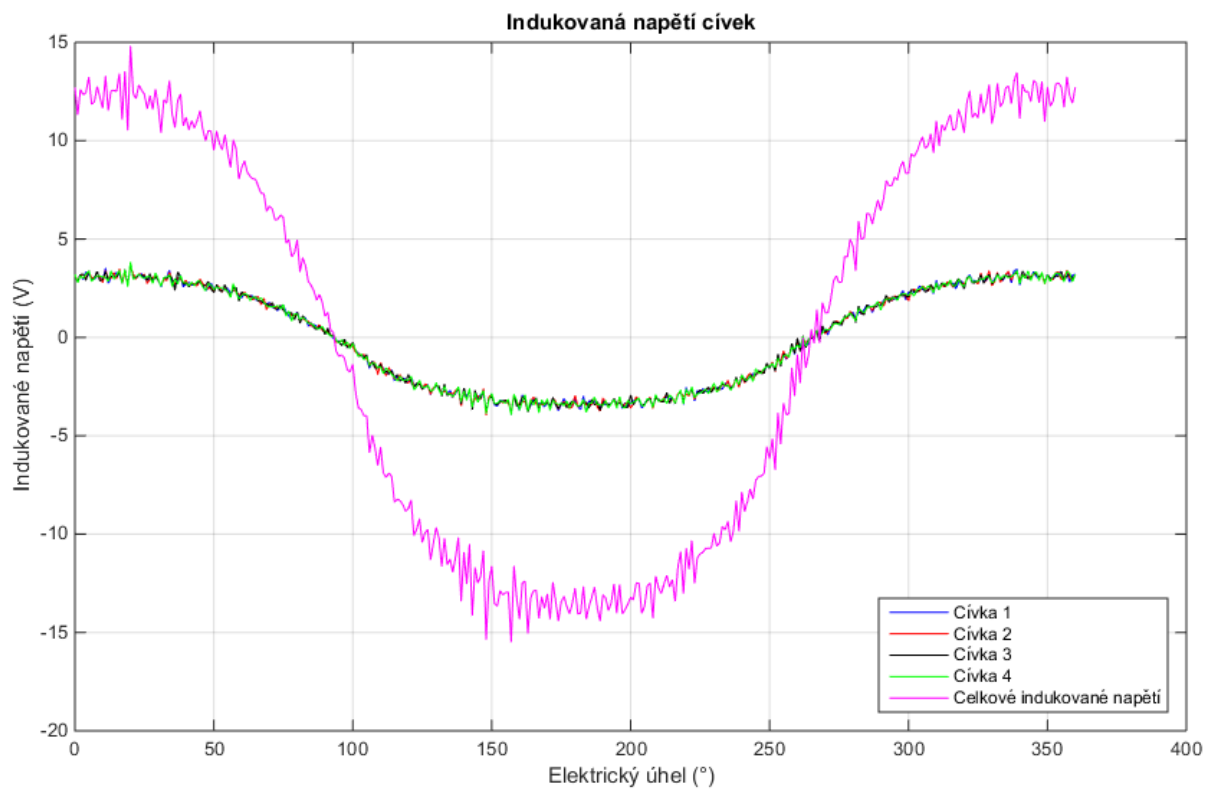
Podobně jako v případě topologie FSPM 6/8 stroje bylo opět nutné obrátit polaritu v přilehlých cívkách tak, aby nedocházelo k vyrušení magnetického toku a indukovaného napětí, kvůli průběhům jdoucí do protifáze. Obrázek 43 znázorňuje shodné sinusové průběhy magnetického toku ve všech čtyřech cívkách jednoho fázového vinutí. Obrázek 44 znázorňuje průběh indukovaného napětí ve všech cívkách, a také celkové indukované napětí. Maximální hodnota celkového indukovaného napětí je $\pm 13,47$ V. Obrázek 45 znázorňuje zvlněný průběh točivého momentu stroje a jeho maximální hodnota je $\pm 3,26$ Nm.



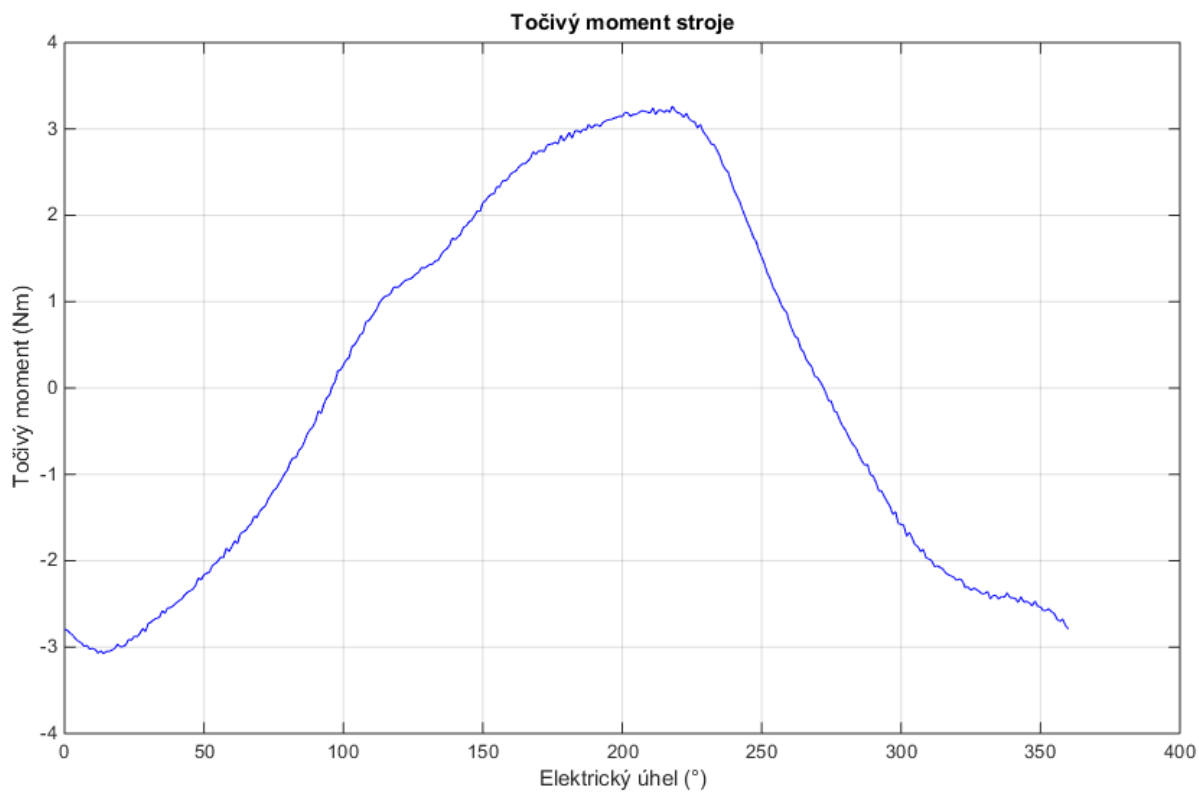
Obrázek 42: Modely FSPM stroje 12/16 zpracované v programu - a) SolidWorks, b) FEMM



Obrázek 43: Průběhy magnetických toků v cívkách FSPM stroje 12/16



Obrázek 44: Průběhy indukovaných napětí v cívkách FSPM stroje 12/16



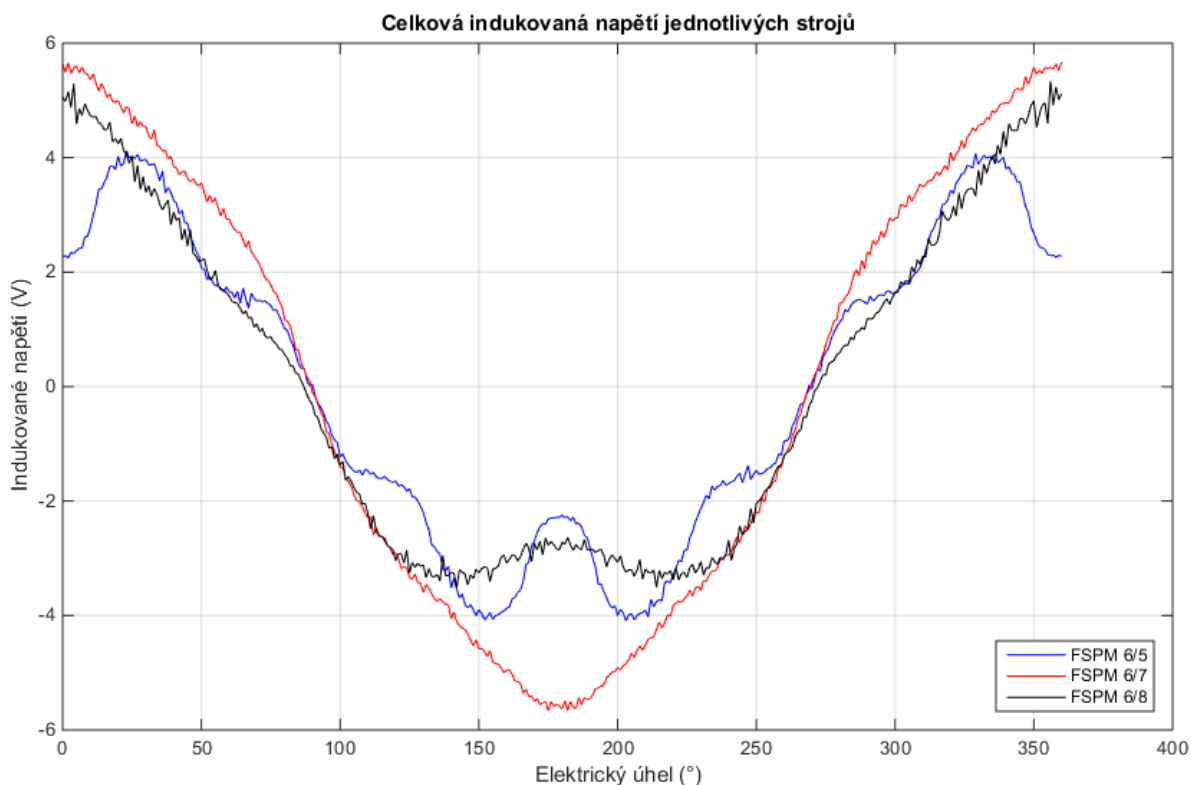
Obrázek 45: Průběh točivého momentu FSPM stroje 12/16

3 Porovnání simulačních výsledků

3.1 Porovnání indukovaných napětí strojů

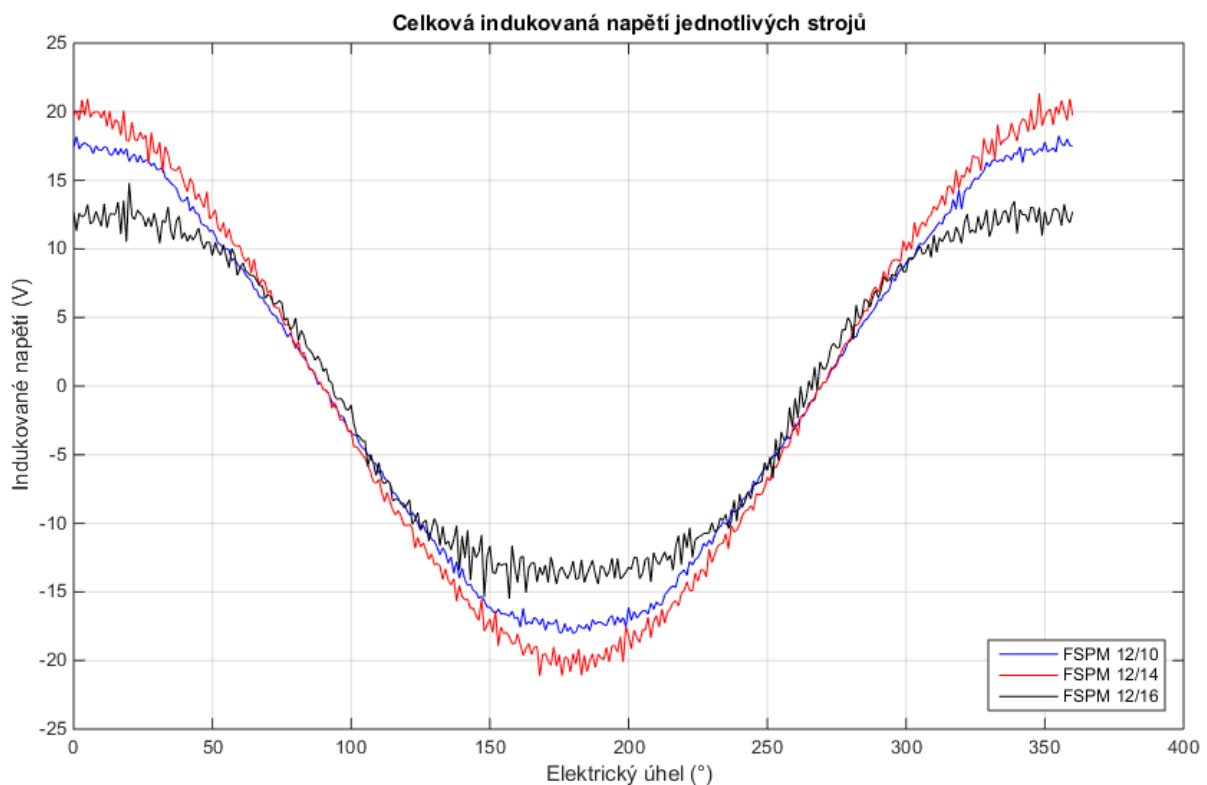
Indukované napětí je přímo úměrné časové změně magnetického indukčního toku. Magnetické toky jsou sinusového průběhu v téměř všech sledovaných FSPM strojích. Výjimkou jsou FSPM stroje 6/5 a 6/7, kde jsou průběhy mírně zvlněné a zdeformované. Avšak lze předpokládat, že průběhy celkových indukovaných napětí budou také sinusového charakteru.

V následujícím grafu (viz Obrázek 46) jsou porovnávány celková indukovaná napětí v cívkách jednotlivých FSPM strojů se šestipólovým statorem. Na první pohled je patrné, že FSPM stroj 6/7 dosahuje nejvyšší velikosti indukovaného napětí ($\pm 5,67$ V) s téměř nezvlněným sinusovým průběhem. Poněkud většího zvlnění průběhu dosahuje FSPM stroj 6/8. Další nevýhodou je pokles indukovaného napětí v maximu přibližně o 2 V oproti FSPM stroji 6/7. Největšího zvlnění dosahuje průběh celkového indukovaného napětí ve FSPM stroji 6/5.



Obrázek 46: Porovnání celkových indukovaných napětí jednotlivých strojů s 6-pólovým statorem

Celkově lépe jsou na tom průběhy indukovaných napětí FSPM strojů s dvanácti pólovým statorem, viz Obrázek 47. Z grafu jsou patrné sinusové průběhy ve všech třech variantách FSPM strojů. Nejvyšší velikosti celkového indukovaného napětí ($\pm 20,87$ V) dosahuje FSPM stroj 12/14, který má nejméně zvlněný sinusový průběh. Nejhůře je na tom FSPM stroj 12/16, kdy už jsou patrná mírná zvlnění průběhu a také pokles maximální hodnoty indukovaného napětí přibližně o 7 V oproti FSPM stroji 12/14. FSPM stroj 12/10 kopíruje průběh indukovaného napětí FSPM stroje 12/14, ale s poklesem velikostí v maximech až o 13% oproti FSPM stroji 12/14.

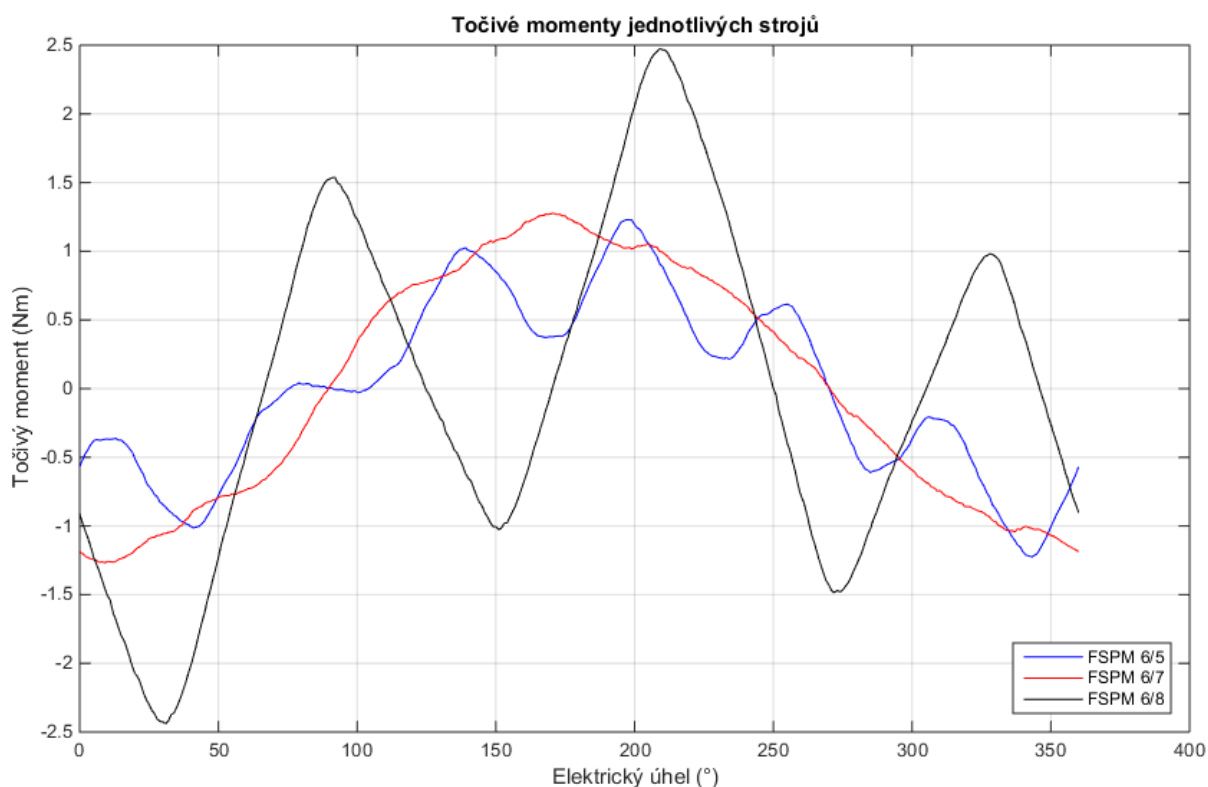


Obrázek 47: Porovnání celkových indukovaných napětí jednotlivých strojů s 12-pólovým statorem

3.2 Porovnání točivých momentů strojů

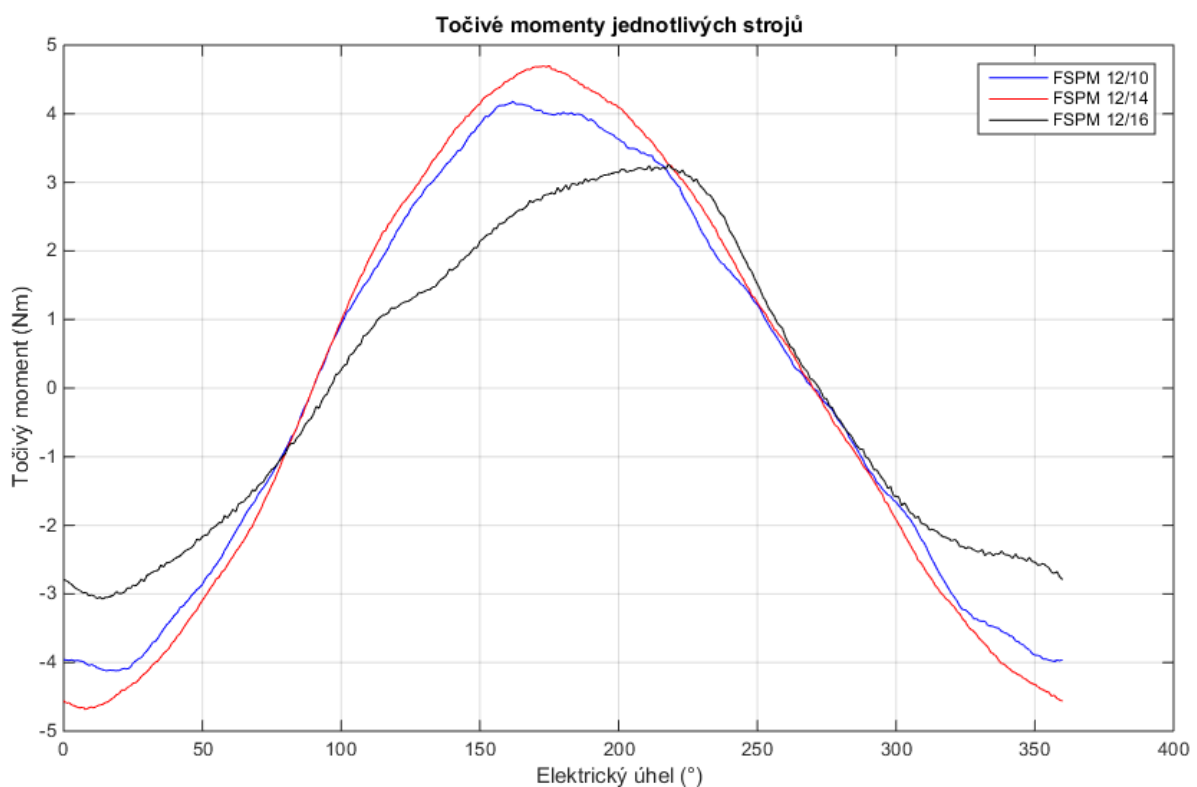
V této části kapitoly budou porovnávány průběhy točivých momentů jednotlivých FSPM strojů. Snahou je dosáhnout ideálně takřka sinusových průběhů jako v případě celkových indukovaných napětí. Jednotlivá zvlnění momentů mohou způsobovat nežádoucí jevy, např. různé momentové rázy, vibrace nebo hluk.

Obrázek 48 zobrazuje průběhy točivých momentů jednotlivých FSPM strojů se šestipólovým statorem. Na první pohled je patrné, že nejvyšší velikosti momentu dosahuje FSPM stroj 6/8 (v nejvyšším maximu až $\pm 2,48$ Nm), bohužel s velmi zvlněným průběhem, což činí daný stroj nevhodným. Nejlepšího, až sinusového, průběhu dosahuje FSPM stroj 6/7 s poklesem momentu až o 1,2 Nm oproti maximu průběhu FSPM stroje 6/8. FSPM stroj 6/5 na tom není o moc lépe, kdy dosahuje maximálních hodnot momentu přibližných FSPM stroji 6/7, ale bohužel s velkým zvlněním průběhu.



Obrázek 48: Porovnání točivých momentů jednotlivých strojů s 6-pólovým statorem

V dalším grafu (viz Obrázek 49) jsou znázorněny průběhy točivých momentů FSPM strojů s dvanáctipólovým státorem. Všechny znázorněné průběhy mají sinusový charakter. Nejlepšího výsledku dosahuje FSPM stroj 12/14 s maximální velikostí momentu až $\pm 4,7$ Nm a téměř sinusovým průběhem. Dále maximální hodnota momentu je vyšší až o 11% oproti FSPM stroji 12/10, což splňuje tvrzení nacházející se v počátku kapitoly 1.2. Nejhorší vychází FSPM stroj 12/16, u kterého došlo k poklesu maximální velikosti momentu až o 1,5 Nm oproti FSPM stroji 12/14. Patrný je také posun maximální hodnoty momentu téměř o $+60^\circ$ (elektrických stupňů) oproti ostatním porovnávaným průběhům.



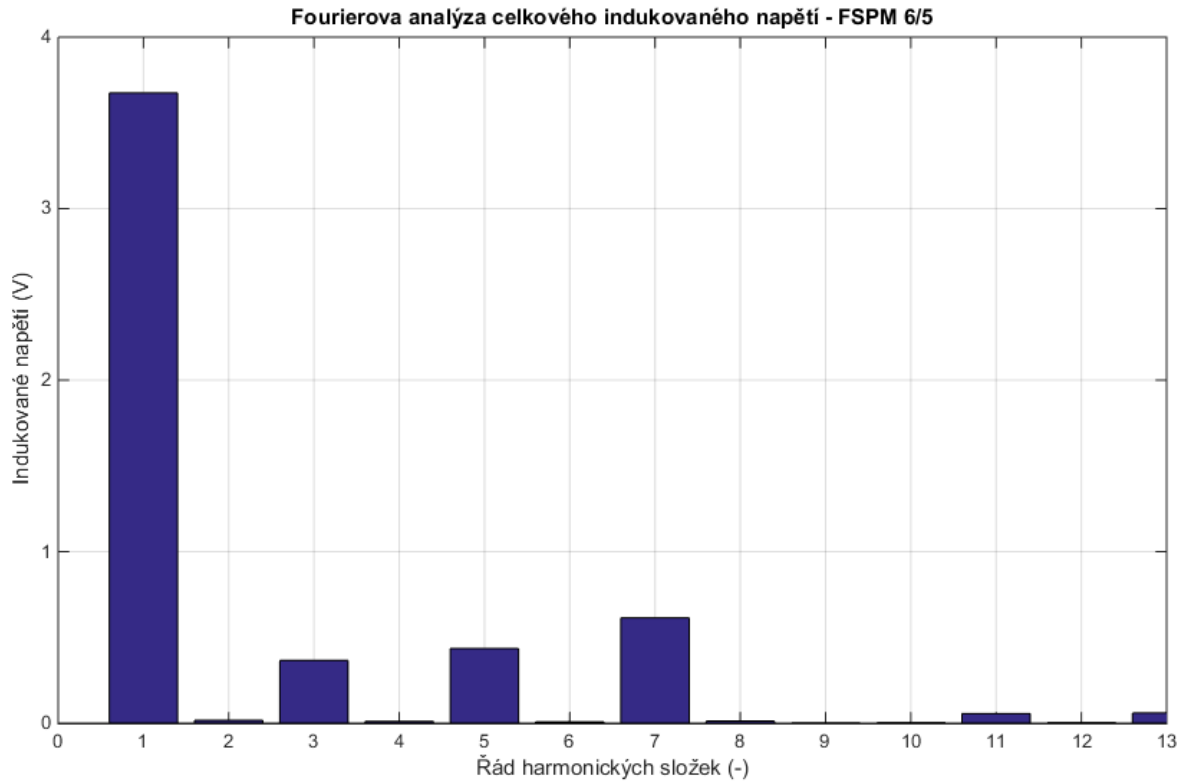
Obrázek 49: Porovnání točivých momentů jednotlivých strojů s 12-pólovým státorem

3.3 Porovnání celkových indukovaných napětí pomocí Fourierovy analýzy

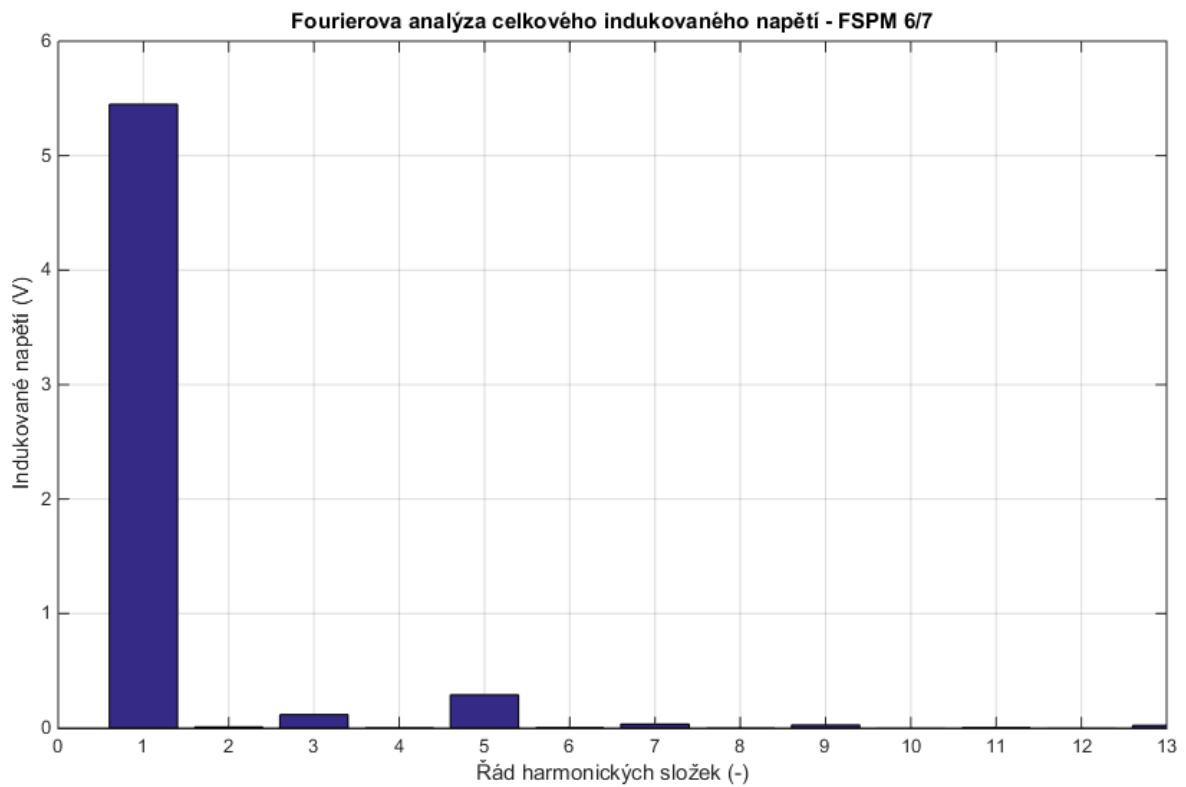
V poslední části této práce budou zkoumána a porovnávána celková indukovaná napětí pomocí Fourierovy frekvenční analýzy. Aplikací tzv. Rychlé Fourierovy transformace (zkráceně FFT) na indukovaná napětí lze získat spektrum, resp. řády harmonických složek jednotlivých napětí. Tyto složky mohou ovlivňovat celkové průběhy indukovaných napětí a způsobovat tak jejich zvlnění a deformace.

Jak již bylo výše zmíněno, FSPM stroj 6/7 dosahuje nejlepšího a nejméně zvlněného průběhu celkového indukovaného napětí ze všech FSPM strojů se šestipólovým statorem. Analyzováním jeho spektra lze vyvodit, že dominantní harmonickou složkou je především 1. harmonická s amplitudou přesahující 5 V (viz. Obrázek 51). Dalšími harmonickými složkami jsou 3. a 5. harmonická, které způsobují mírná zvlnění napětí. Nejvíce zvlněného průběhu indukovaného napětí dosahoval FSPM stroj 6/5. Spektrum tohoto stroje obsahuje dominantní 1. harmonickou složku, dále také 3., 5. a 7. harmonickou složku nezanedbatelných amplitud (viz. Obrázek 50), které výrazně ovlivňují výsledný průběh indukovaného napětí. Spektrum FSPM stroje 6/8 (viz. Obrázek 52) obsahuje především sudé harmonické složky (konkrétně 2., 4. a 6. harmonická složka) s vyšší amplitudou než liché harmonické složky (3., 5. a 7. harmonická složka). Průběh indukovaného napětí tohoto stroje je tak méně zvlněný oproti FSPM stroji 6/5.

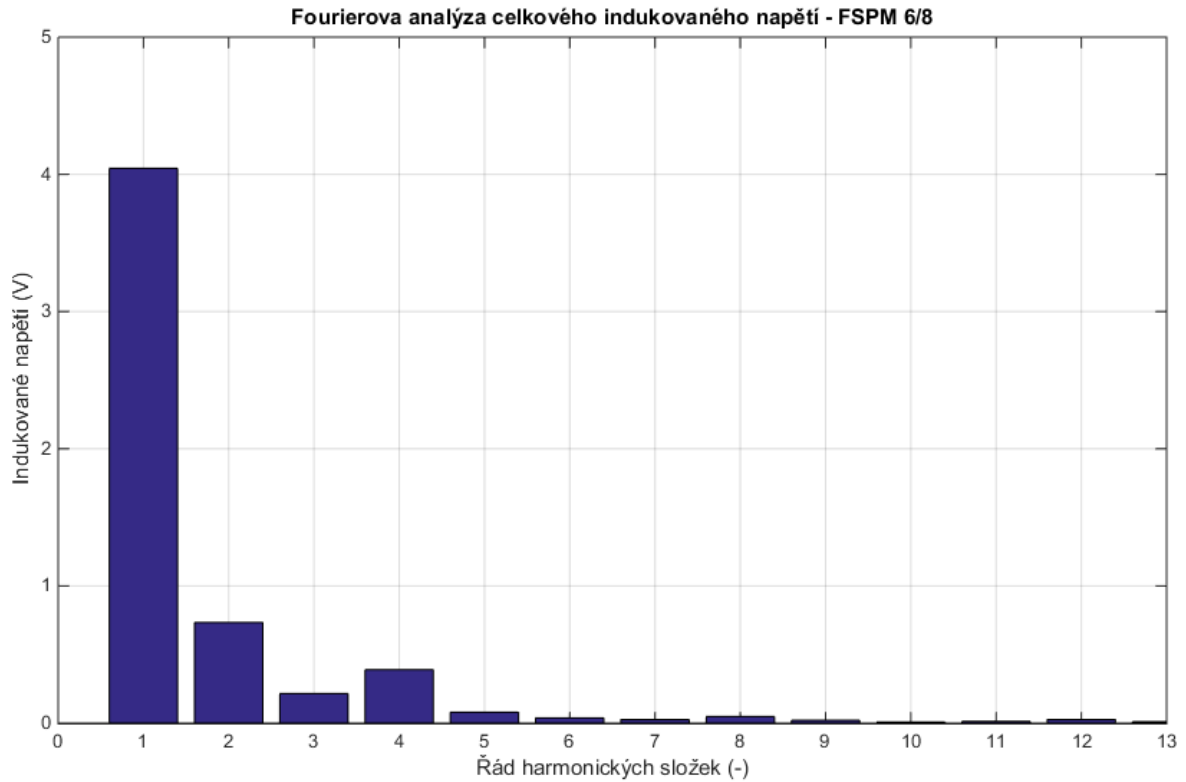
Nejlepšího průběhu celkového indukovaného napětí ze všech FSPM strojů s dvanáctipólovým statorem dosahuje FSPM stroj 12/14. Spektrum tohoto stroje (Obrázek 54) obsahuje převážně 1. harmonickou složku s amplitudou přesahující 20 V. Protože další harmonické složky (2., 5. a 11. harmonická složka) dosahují velmi malých amplitud, průběh celkového indukovaného napětí tohoto stroje je nejméně zvlněný. Obdobně je na tom FSPM stroj 12/10, jehož spektrum obsahuje také zanedbatelné množství vyšších řádů harmonických složek (viz. Obrázek 53). Spektrum FSPM stroje 12/16 (viz. Obrázek 55) obsahuje velké množství řádů harmonických složek (2. až 6. harmonická složka) nezanedbatelných amplitud. Všechny tyto harmonické složky ovlivňují průběh celkového indukovaného napětí tohoto stroje.



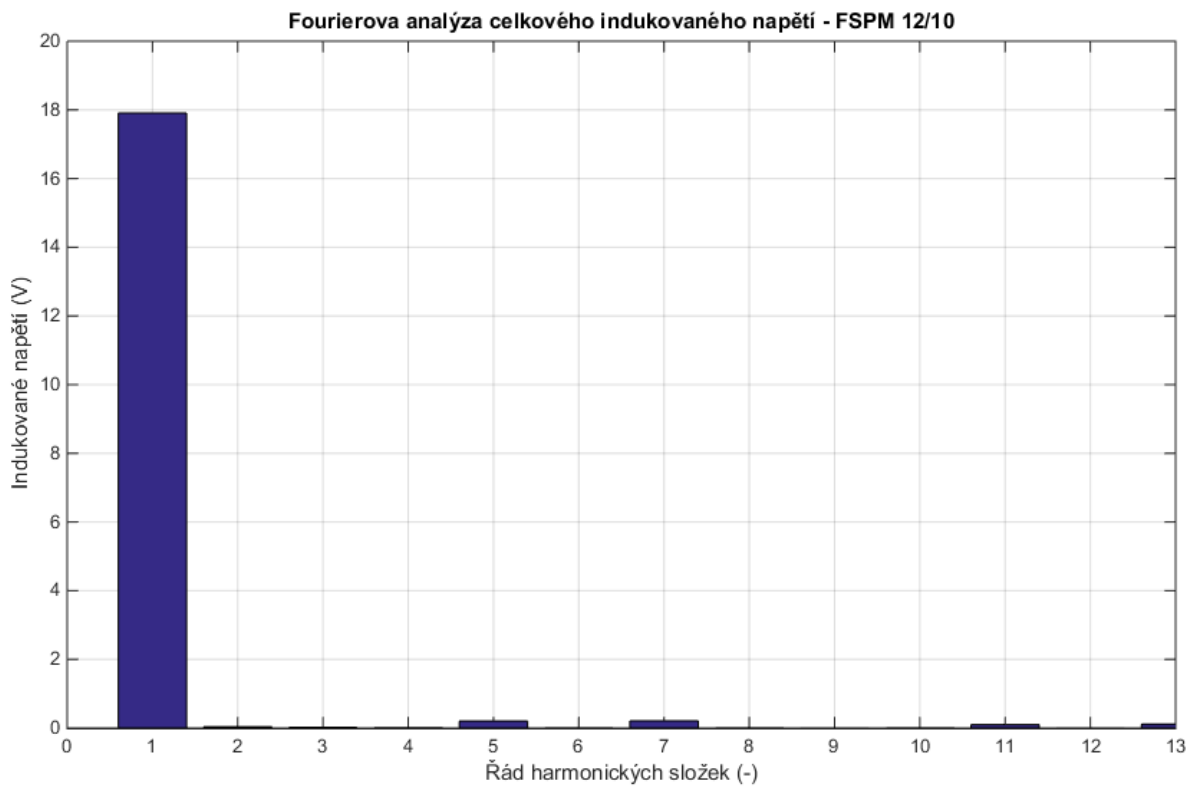
Obrázek 50: FFT celkového indukovaného napětí FSPM 6/5 stroje



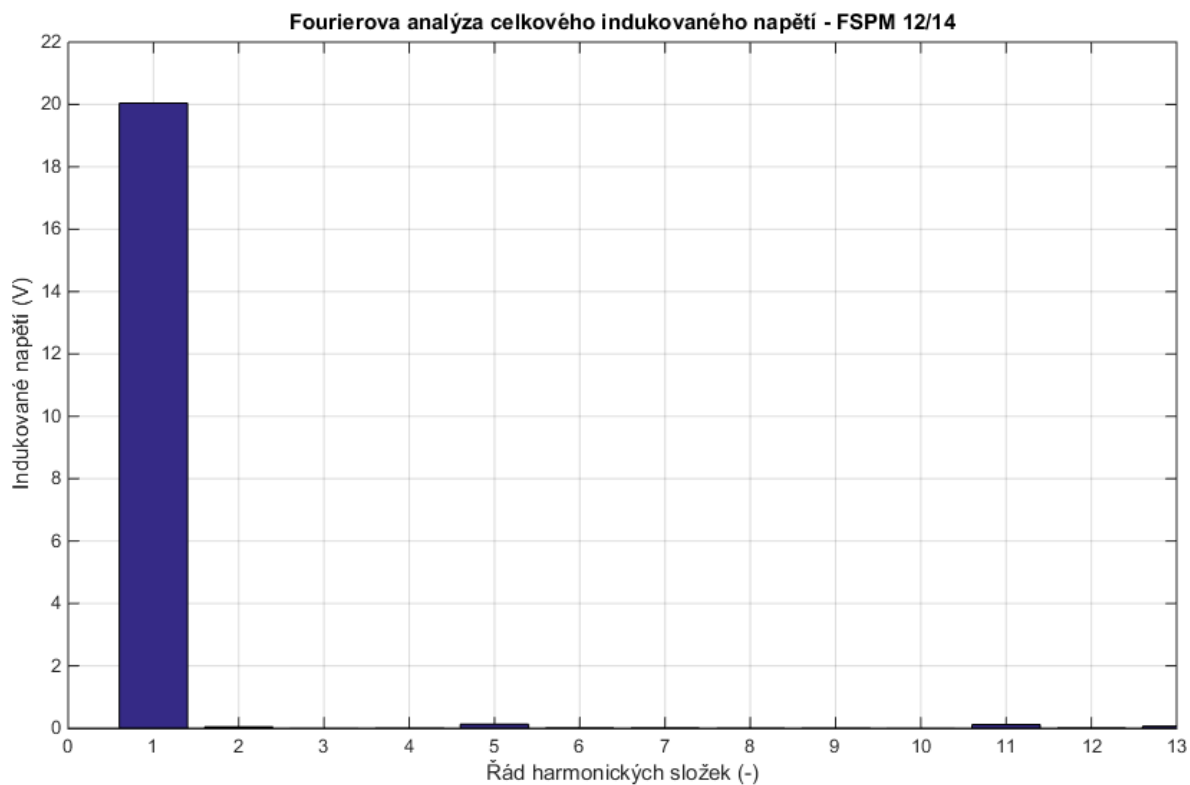
Obrázek 51: FFT celkového indukovaného napětí FSPM 6/7 stroje



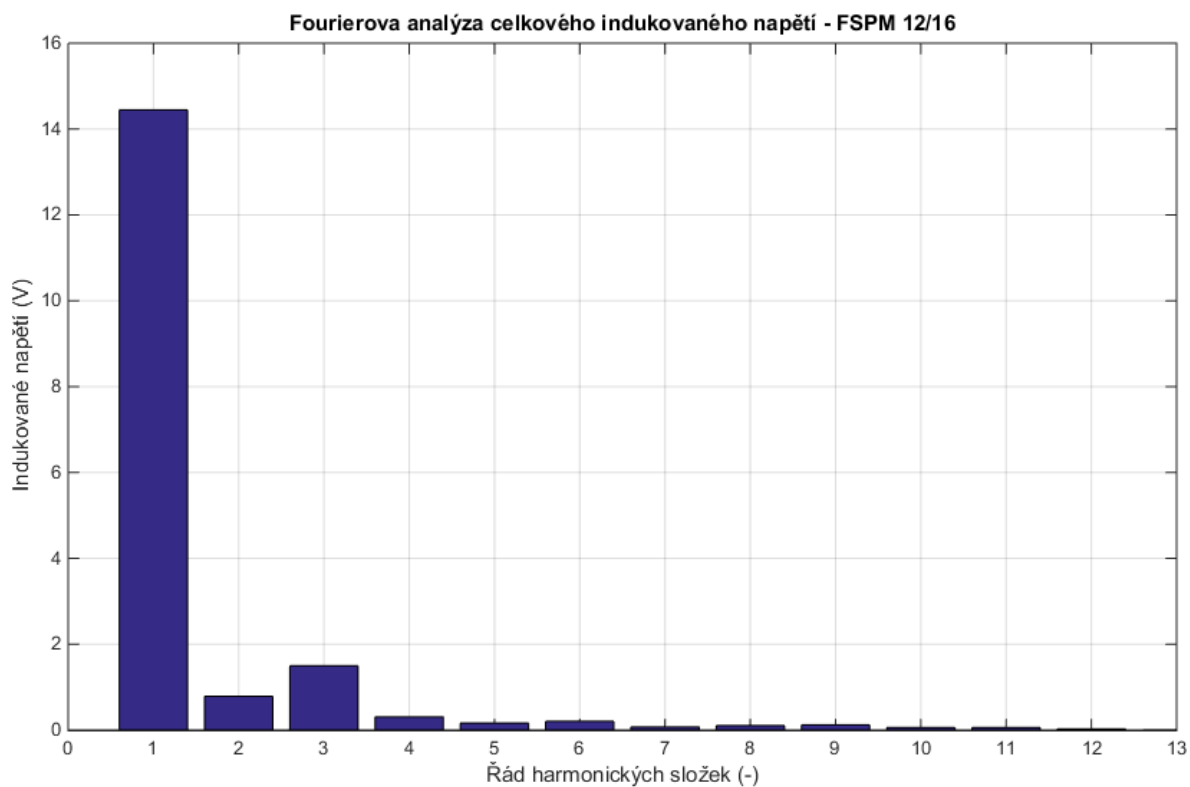
Obrázek 52: FFT celkového indukovaného napětí FSPM 6/8 stroje



Obrázek 53: FFT celkového indukovaného napětí FSPM 12/10 stroje



Obrázek 54: FFT celkového indukovaného napětí FSPM 12/14 stroje



Obrázek 55: FFT celkového indukovaného napětí FSPM 12/16 stroje

4 Závěr

Tato práce se zabývala tokem spínanými stroji s permanentními magnety (FSPM) a sledování závislosti jejich parametrů na různém počtu rotorových a statorových pólů. Kvůli neustálému rozvoji elektrotechnických materiálů a výkonové elektroniky se tyto stroje staly v současné době předmětem mnoha vědeckých výzkumů a experimentů po celém světě. Největší výhodou těchto strojů je velká účinnost, jednoduchá robustní konstrukce rotoru, dobré chlazení a možnost pracovat v poruchových stavech u speciálních konstrukcí FSPM strojů. Naopak největší nevýhodou těchto strojů je vysoká pořizovací cena kvůli použitým permanentním magnetům na bázi vzácných zemin, a také občasné zvlněné průběhy indukovaných napětí a točivých momentů v určitých topologiích FSPM strojů.

Uvedená práce měla tři hlavní části – teoretickou, simulační a porovnávací. V první teoretické části byly popsány základní topologie FSPM strojů s různými konstrukcemi a konfiguracemi. Následně byl popsán princip, jakým způsobem FSPM stroje fungují. Na konci této kapitoly byla zmíněna možná využití v různých průmyslových odvětvích, například pohon umístěný přímo v hnacích kolech hybridních elektromobilů nebo vozidel v elektrické trakci, dále lineární pohon umístěný na spodní straně vozidel v železniční trakci, nebo také oboustranný lineární pohon nacházející se v elektromagnetických katapultech pro startování stíhacích letadel nebo bezpilotních letounů z paluby vojenských letadlových lodí. Další možné využití FSPM strojů je v oblasti větrné energetiky jako generátory (alternátory) elektrické energie v nízkootáčkových větrných elektrárnách.

Další kapitola, věnující se simulacím, byla zaměřena na vytvoření FSPM modelů s různými počty statorových a rotorových pólů. Celkem bylo zvoleno šest různých topologií FSPM strojů. První tři topologie měly šestipólový stator s různým počtem rotorových pólů – 6/5 (pětipólový rotor), 6/7 (sedmipólový rotor) a 6/8 (osmipólový rotor). Další tři topologie měly dvanáctipólový stator s dvojnásobným počtem pólů než FSPM stroje se šestipólovým státorem – 12/10 (desetipólový rotor), 12/14 (čtrnáctipólový rotor) a 12/16 (šestnáctipólový rotor). Nejdříve bylo nutné vytvořit 2D modely zvolených FSPM strojů s patřičnými rozměry pomocí programu SolidWorks. Převedením jednotlivých 2D modelů do simulačního programu FEMM, určenému k simulování problémů v oblasti elektromagnetických polí, byly sestaveny konečně-prvkové modely. K jednotlivým

modelům byly definovány použité materiály a okrajová podmínka na vnější kružnici. Výstupem simulací byly grafy průběhů sledovaných parametrů – indukované napětí U_i (V) a točivý moment M (Nm). Dále byla aplikována Rychlá Fourierova transformace (zkráceně FFT) na celková indukovaná napětí k analýze jednotlivých strojů na výskyt řádu vyšších harmonických. Všechny tyto grafy byly vytvořeny v programu MATLAB. Následně byly porovnány výsledky v poslední části této práce.

Nejvíce vhodným strojem splňující cíl práce se stal FSPM stroj 12/14 (dvanáctipólový stator a čtrnáctipólový rotor), protože tato topologie vykazuje ze všech zkoumaných strojů největší celkové indukované napětí ($\pm 20,87$ V) a točivý moment ($\pm 4,7$ Nm) téměř dokonalého sinusového průběhu. Velikost točivého momentu tohoto stroje je až o 13% vyšší než vykazuje FSPM stroj 12/10. Na druhé místo se řadí právě FSPM stroj 12/10 (dvanáctipólový stator a desetipólový rotor), který má obdobné sinusové průběhy sledovaných parametrů jako výše zmiňovaný stroj, avšak s poklesem jejich velikostí. Tento stroj vykazuje relativně vysoké celkové indukované napětí ($\pm 18,25$ V) a také točivý moment ($\pm 4,18$ Nm). Třetím nejvhodnějším strojem se stal FSPM stroj 6/7 (šestipólový stator a sedmipólový rotor), jehož celkové indukované napětí má velikost $\pm 5,67$ V a točivý moment $\pm 1,27$ Nm. Ostatní zkoumané topologie FSPM strojů 6/5, 6/8 a 12/16 se staly nevhodnými, kvůli velmi zvlněným průběhům celkových indukovaných napětí a točivých momentů. Zvlnění mohou být způsobena danou konstrukcí stroje nebo také počtem statorových a rotorových pólů, kdy se v těchto konstrukcích nevhodně uzavírá magnetický indukční tok. Na zvlnění má také z velké části vliv výskyt vyšších řádů harmonických složek. Taková zvlnění, především u točivého momentu, mohou vyvolávat velmi nežádoucí jevy, mezi které se řadí například různé momentové rázy, vibrace a hluk stroje.

Všechny zkoumané stroje jsou založeny pouze na teoretické rovině, kde je zanedbáváno několik parametrů. V této práci byly vybrány pouze základní konstrukce FSPM strojů, které bohužel vykazují velká sycení magnetických indukcí ve statorových zubech. Řešením by bylo například zvětšit šířku statorových zubů, případně omezit tloušťku permanentních magnetů umístěných mezi statorovými zuby. Pro aplikaci v reálném světě by bylo potřeba vytvořit komplexní návrh strojů založený na podrobných výpočtech, matematických modelech, simulacích 3D modelů v elektromagnetických polích a různých konstrukčních úpravách podle daného aplikačního využití.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] ZHU, Z. Q. Switched flux permanent magnet machines - Innovation continues. *2011 International Conference on Electrical Machines and Systems, ICEMS 2011* [online]. 2011, (c). Dostupné z: doi:10.1109/ICEMS.2011.6073317
- [2] CHEN, Anyuan, Robert NILSSEN a Arne NYSVEEN. Analytical design of a high-torque flux-switching permanent magnet machine by a simplified lumped parameter magnetic circuit model. *19th International Conference on Electrical Machines, ICEM 2010* [online]. 2010, (7491), 0–5. Dostupné z: doi:10.1109/ICELMACH.2010.5607710
- [3] RAUCH, S. E. a L. J. JOHNSON. Design Principles of Flux-Switch Alternators [includes discussion]. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers. Part III: Power Apparatus and Systems* [online]. 1955, 74(3), 1261–1268. ISSN 0097-2460. Dostupné z: doi:10.1109/AIEEPAS.1955.4499226
- [4] ILHAN, E., B. L. J. GYSEN, J. J. H. PAULIDES a E. A. LOMONOVA. Analytical hybrid model for flux switching permanent magnet machines. *IEEE Transactions on Magnetics* [online]. 2010, 46(6), 1762–1765. ISSN 00189464. Dostupné z: doi:10.1109/TMAG.2010.2042579
- [5] ZHU, Z. Q., J. T. CHEN, Electrical ENGINEERING a S. SHEFFIELD. Advanced Flux-Switching Permanent Magnet Brushless Machines. 2010, 46(6), 1447–1453.
- [6] ROTEVATN, Njål. Design and testing of Flux Switched Permanent Magnet (FSPM) Machines [online]. 2009, (June). Dostupné z: <http://www.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2:347864>
- [7] TAHA, M. Design of a flux switching permanent magnet motor using ferrite magnets. *2016 18th International Middle-East Power Systems Conference, MEPCON 2016 - Proceedings* [online]. 2017, 938–942. Dostupné z: doi:10.1109/MEPCON.2016.7837009
- [8] ARNOLD MAGNETIC TECHNOLOGIES. *Permanent Magnets and Assemblies* [online]. Dostupné z: <http://www.arnoldmagnetics.com/permanent-magnets/>
- [9] ZHU, Z. Q., Y. PANG, J. T. CHEN, Z. P. XIA a D. HOWE. Influence of design parameters on output torque of flux-switching permanent magnet machines. *2008 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, VPPC 2008* [online]. 2008, 1–6. ISSN 1938-8756. Dostupné z: doi:10.1109/VPPC.2008.4677782
- [10] CHEN, J. T. a Z. Q. ZHU. Influence of the rotor pole number on optimal parameters in flux-switching pm brushless ac machines by the lumped-parameter magnetic circuit model. *IEEE Transactions on Industry Applications* [online]. 2010, 46(4), 1381–1388. ISSN 00939994. Dostupné z: doi:10.1109/TIA.2010.2049720
- [11] CHEN, Y., S. CHEN, Z. Q. ZHU, D. HOWE a Y. Y. YE. Starting torque of single-phase flux-switching permanent magnet motors. *IEEE Transactions on Magnetics* [online]. 2006, 42(10), 3416–3418. ISSN 00189464. Dostupné z: doi:10.1109/TMAG.2006.879437
- [12] CHENG, Yi, Charles POLLOCK a Helen POLLOCK. A permanent magnet flux switching motor for low energy axial fans. *Conference Record - IAS Annual Meeting (IEEE Industry Applications Society)* [online]. 2005, 3, 2168–2175. ISSN 01972618. Dostupné z: doi:10.1109/IAS.2005.1518747
- [13] XUE, Xiaohong, Wenxiang ZHAO, Jihong ZHU, Guohai LIU, Xiaoyong ZHU a Ming CHENG. Design of five-phase modular flux-switching permanent-magnet machines for high reliability applications. *IEEE Transactions on Magnetics* [online]. 2013, 49(7), 3941–3944. ISSN 00189464. Dostupné

- z: doi:10.1109/TMAG.2013.2244201
- [14] OWEN, R. L., Z. Q. ZHU, A. S. THOMAS, G. W. JEWELL a D. HOWE. Fault-tolerant flux-switching permanent magnet brushless AC machines. *Conference Record - IAS Annual Meeting (IEEE Industry Applications Society)* [online]. 2008, 1–8. ISSN 01972618. Dostupné z: doi:10.1109/08IAS.2008.56
- [15] OWEN, Richard L., Z. Q. ZHU, Arwyn S. THOMAS, Geraint W. JEWELL a David HOWE. Alternate poles wound flux-switching permanent-magnet brushless AC machines. *IEEE Transactions on Industry Applications* [online]. 2010, 46(2), 790–797. ISSN 00939994. Dostupné z: doi:10.1109/TIA.2009.2039913
- [16] DONATO, L Di. Electromagnetic analysis of a modular flux-switching permanent-magnet motor using finite-element method. *Progress In Electromagnetics Research B*, Vol. 40, 305–324, 2012. 2012, 40(February), 305–324.
- [17] THOMAS, Arwyn S., Z. Q. ZHU, Richard L. OWEN, Geraint W. JEWELL a David HOWE. Multiphase Flux-Switching Permanent-Magnet Brushless Machine for Aerospace Application. *IEEE Transactions on Industry Applications* [online]. 2009, 45(6), 1971–1981. ISSN 19399367. Dostupné z: doi:10.1109/TIA.2009.2031901
- [18] CHEN, J. T., Z. Q. ZHU a D. HOWE. Stator and rotor pole combinations for multi-tooth flux-switching permanent-magnet brushless AC machines. *IEEE Transactions on Magnetics* [online]. 2008, 44(12), 4659–4667. ISSN 00189464. Dostupné z: doi:10.1109/TMAG.2008.2004264
- [19] DENG, Zhiquan. A Multi-Tooth Fault-Tolerant Flux-Switching Permanent-Magnet Machine With Twisted-Rotor. 2012, 48(10), 2674–2684.
- [20] XIE, De'e, Yu WANG a Zhiquan DENG. FSPM machines with twisted-rotor structure. *Proceedings of the 2014 9th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, ICIEA 2014* [online]. 2014, 1533–1538. Dostupné z: doi:10.1109/ICIEA.2014.6931412
- [21] FEI, Weizhong, Patrick Chi Kwong LUK, Jian Xin SHEN, Yu WANG a Mengjia JIN. A novel permanent-magnet flux switching machine with an outer-rotor configuration for in-wheel light traction applications. *IEEE Transactions on Industry Applications* [online]. 2012, 48(5), 1496–1506. ISSN 00939994. Dostupné z: doi:10.1109/TIA.2012.2210009
- [22] DAI, Mingyue, Li QUAN, Xiaoyong ZHU, Zixuan XIANG a Huawei ZHOU. Design of a sandwiched flux switching permanent magnet machine with outer-rotor configuration. *IEEE Transportation Electrification Conference and Expo, ITEC Asia-Pacific 2014 - Conference Proceedings* [online]. 2014, 1–5. Dostupné z: doi:10.1109/ITEC-AP.2014.6941226
- [23] ZOHOORI, Alireza, Abolfazl VAHEDI a Mohammad Ali NOROOZI. Design study of FSPM generator with novel outer rotor configuration for small wind turbine application. *2014 14th International Conference on Environment and Electrical Engineering, IEEEIC 2014 - Conference Proceedings* [online]. 2014, 275–279. Dostupné z: doi:10.1109/EEEIC.2014.6835878
- [24] SULAIMAN, E., N. S.M. AMIN, Z. A. HUSIN, M. Z. AHMAD a T. KOSAKA. Design study and analysis of hybrid excitation flux switching motor with DC excitation in radial direction. *Proceedings of the 2013 IEEE 7th International Power Engineering and Optimization Conference, PEOCO 2013* [online]. 2013, (June), 40–45. Dostupné z: doi:10.1109/PEOCO.2013.6564512
- [25] HASSAN, Muhammad Kamaluddin, Erwan SULAIMAN, Gadafi M. ROMALAN, Mohd Fairuz OMAR a Mahyuzie JENAL. 12Slot-14pole Dual Rotor Hybrid Excitation Flux Switching Machine (DR-HEFSM) load analysis. *2015 IEEE Student Conference on Research and Development, SCORd 2015* [online]. 2016, 245–249.

- ISSN 18196608. Dostupné z: doi:10.1109/SCORED.2015.7449333
- [26] YU, Jincheng a Chunhua LIU. Design of a double-stator hybrid flux switching permanent magnet machine for direct-drive robotics. *2017 20th International Conference on Electrical Machines and Systems, ICEMS 2017* [online]. 2017. Dostupné z: doi:10.1109/ICEMS.2017.8056304
- [27] ZHANG, Bangfu, Ming CHENG, Ruiwu CAO, Yi DU a Gan ZHANG. Analysis of linear flux-switching permanent magnet motor using response surface methodology. *IEEE Transactions on Magnetics* [online]. 2014, 50(11), 1–4. ISSN 00189464. Dostupné z: doi:10.1109/TMAG.2014.2334060
- [28] ZHANG, Zheng, Ruiwu CAO, Minghang LU a Yi JIN. Speed Control of Double-sided Linear Flux-Switching Permanent Magnet Motor System for Electromagnetic Launch System. 2017, (3).
- [29] CAO, Ruiwu, Yi JIN, Minghang LU a Zheng ZHANG. Quantitative Comparison of Linear Flux-Switching Permanent Magnet Motor with Linear Induction Motor for Electromagnetic Launch System. *IEEE Transactions on Industrial Electronics* [online]. 2018, 46(c), 1–1. ISSN 0278-0046. Dostupné z: doi:10.1109/TIE.2018.2798592
- [30] GROHMANN, Jan. *EMALS: Elektromagnetický katapult pro letadlové lodě* [online]. 2014. Dostupné z: <http://www.armadninoviny.cz/emals-elektromagneticky-katapult-pro-letadlove-lode.html>
- [31] WANG, Yu, Meng Jia JIN, Jian Xin SHEN, W. Z. FEI a P. C.K. LUK. An outer-rotor flux-switching permanent magnet machine for traction applications. *2010 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, ECCE 2010 - Proceedings* [online]. 2010, 1723–1730. Dostupné z: doi:10.1109/ECCE.2010.5618120
- [32] CAO, Ruiwu, Ming CHENG, Chris MI, Wei HUA, Xin WANG a Wenxiang ZHAO. Modeling of a complementary and modular linear flux-switching permanent magnet motor for urban rail transit applications. *IEEE Transactions on Energy Conversion* [online]. 2012, 27(2), 489–497. ISSN 08858969. Dostupné z: doi:10.1109/TEC.2012.2190985
- [33] AHMAD, M. Z., E. SULAIMAN, Z. A. HARON a T. KOSAKA. Preliminary studies on a new outer-rotor permanent magnet flux switching machine with hybrid excitation flux for direct drive EV applications. *PECon 2012 - 2012 IEEE International Conference on Power and Energy* [online]. 2012, (December), 928–933. Dostupné z: doi:10.1109/PECon.2012.6450350
- [34] ZOHOORI, Alireza, Abolfazl VAHEDI a Mohammad Ali NOROOZI. Sensitivity analysis of 6-19 pole outer rotor configuration of FSPM generator for wind turbine application. *2014 5th Conference on Thermal Power Plants, CTPP 2014* [online]. 2015, 132–136. Dostupné z: doi:10.1109/CTPP.2014.7040708
- [35] AKURU, Udochukwu B. a Maarten J. KAMPER. Evaluation of flux switching PM machines for medium-speed wind generator drives. *2015 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, ECCE 2015* [online]. 2015, 1925–1931. Dostupné z: doi:10.1109/ECCE.2015.7309932
- [36] OJEDA, Javier, Marcelo Godoy SIMÕES, Guangjin LI a Mohamed GABSI. Design of a flux-switching electrical generator for wind turbine systems. *IEEE Transactions on Industry Applications* [online]. 2012, 48(6), 1808–1816. ISSN 00939994. Dostupné z: doi:10.1109/TIA.2012.2221674
- [37] COGENT POWER LTD. Typical data for SURA M350-50A [online]. 2008, 1. Dostupné z: <https://cogent-power.com/cms-data/downloads/m350-50a.pdf>
- [38] ARNOLD MAGNETIC TECHNOLOGIES. *NdFeB N40H* [online]. Dostupné z: <http://www.arnoldmagnetics.com/wp-content/uploads/2017/11/N40H-151021.pdf>

Přílohy

Příloha A – LUA skript - Výpočet indukovaného napětí

```
--- vypocet indukovaneho napeti ve FSPM
--- (c) 2013                               Pushkin
--- skript verze 1.0
--- FSPM models revision 1.0

start=0
substeps=360
p=10
tp=360/p
dAlfa=-(tp/substeps)

if start==0 then
    open("FSPM 12_10_napeti.fem")
    --- priprava vystupniho souboru
    vystup1=openfile("mag_tok1.txt", "w")
    vystup2=openfile("mag_tok2.txt", "w")
    vystup3=openfile("mag_tok3.txt", "w")
    vystup4=openfile("mag_tok4.txt", "w")
else
    open(format("FSPM_napeti_%1$d.fem",start))
    --- priprava vystupniho souboru
    vystup1=openfile("mag_tok1.txt", "a")
    vystup2=openfile("mag_tok2.txt", "a")
    vystup3=openfile("mag_tok3.txt", "a")
    vystup4=openfile("mag_tok4.txt", "a")
end

mi_seteditmode("group")
mi_saveas(format("FSPM_napeti_%1$d.fem",start))
mi_analyse()
mi_loadsolution()

    --- oznaceni civky1
mo_seteditmode("contour")
mo_addcontour(-7,34.5)
mo_addcontour(7,34.5)

flux_re, flux_im, bn_re, bn_im=mo_lineintegral(0)
write(vystup1, flux_re, "\n")
mo_clearcontour()

    --- oznaceni civky2
mo_seteditmode("contour")
mo_addcontour(34.5,7)
mo_addcontour(34.5,-7)

flux_re, flux_im, bn_re, bn_im=mo_lineintegral(0)
write(vystup2, flux_re, "\n")
mo_clearcontour()

    --- oznaceni civky3
mo_seteditmode("contour")
mo_addcontour(7,-34.5)
mo_addcontour(-7,-34.5)

flux_re, flux_im, bn_re, bn_im=mo_lineintegral(0)
write(vystup3, flux_re, "\n")
```

```
mo_clearcontour()

    --- oznaceni civky4
mo_seteditmode("contour")
mo_addcontour(-34.5,-7)
mo_addcontour(-34.5,7)

flux_re, flux_im, bn_re, bn_im=mo_lineintegral(0)
write(vystup4, flux_re, "\n")
mo_close()

for n=(start+1), substeps do
    mi_selectgroup(1)
    mi_move_rotate(0,0,dAlfa)
    mi_saveas(format("FSPM_napeti_%1$d.fem",n))
    mi_analyse()
    mi_loadsolution()

    --- oznaceni civky1
mo_seteditmode("contour")
mo_addcontour(-7,34.5)
mo_addcontour(7,34.5)

flux_re, flux_im, bn_re, bn_im=mo_lineintegral(0)
write(vystup1, flux_re, "\n")
mo_clearcontour()

    --- oznaceni civky2
mo_seteditmode("contour")
mo_addcontour(34.5,7)
mo_addcontour(34.5,-7)

flux_re, flux_im, bn_re, bn_im=mo_lineintegral(0)
write(vystup2, flux_re, "\n")
mo_clearcontour()

    --- oznaceni civky3
mo_seteditmode("contour")
mo_addcontour(7,-34.5)
mo_addcontour(-7,-34.5)

flux_re, flux_im, bn_re, bn_im=mo_lineintegral(0)
write(vystup3, flux_re, "\n")
mo_clearcontour()

    --- oznaceni civky4
mo_seteditmode("contour")
mo_addcontour(-34.5,-7)
mo_addcontour(-34.5,7)

flux_re, flux_im, bn_re, bn_im=mo_lineintegral(0)
write(vystup4, flux_re, "\n")
mo_close()

end

closefile(vystup1)
closefile(vystup2)
closefile(vystup3)
closefile(vystup4)
```

Příloha B – LUA skript - Výpočet točivého momentu

```
--- vypocet tociveho momentu ve FSPM
--- (c) 2013          Pushkin
--- skript verze 1.0
--- FSPM models revision 1.0

start=0
substeps=360
p=10
tp=360/p
dAlfa=-(tp/substeps)

if start == 0 then
    open("FSPM 12_10_moment.fem")

    vystup=openfile("moment.txt", "w")
else
    open(format("FSPM_moment_%1$d.fem",start))

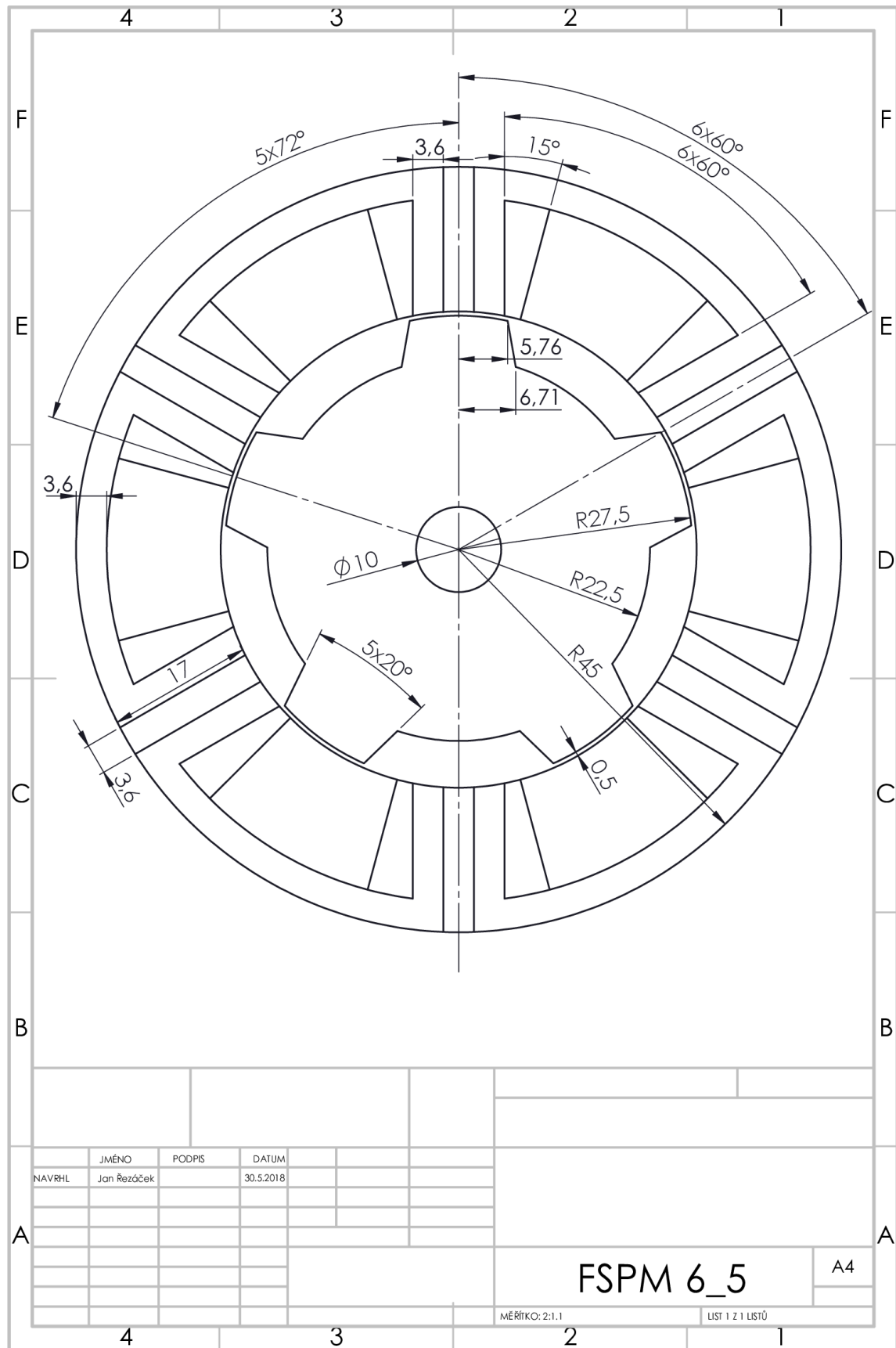
    vystup=openfile("moment.txt", "a")
end

mi_seteditmode("group")
mi_saveas(format("FSPM_moment_%1$d.fem",start))
mi_analyse()
mi_loadsolution()
mo_seteditmode("contour")
mo_selectpoint(-27.75,-0.01)
mo_selectpoint(27.75,-0.01)
mo_selectpoint(27.75,0.01)
mo_selectpoint(-27.75,0.01)
MDC,DM,TV,FV =mo_lineintegral(4)
write(vystup, MDC, "\n")
mo_close()

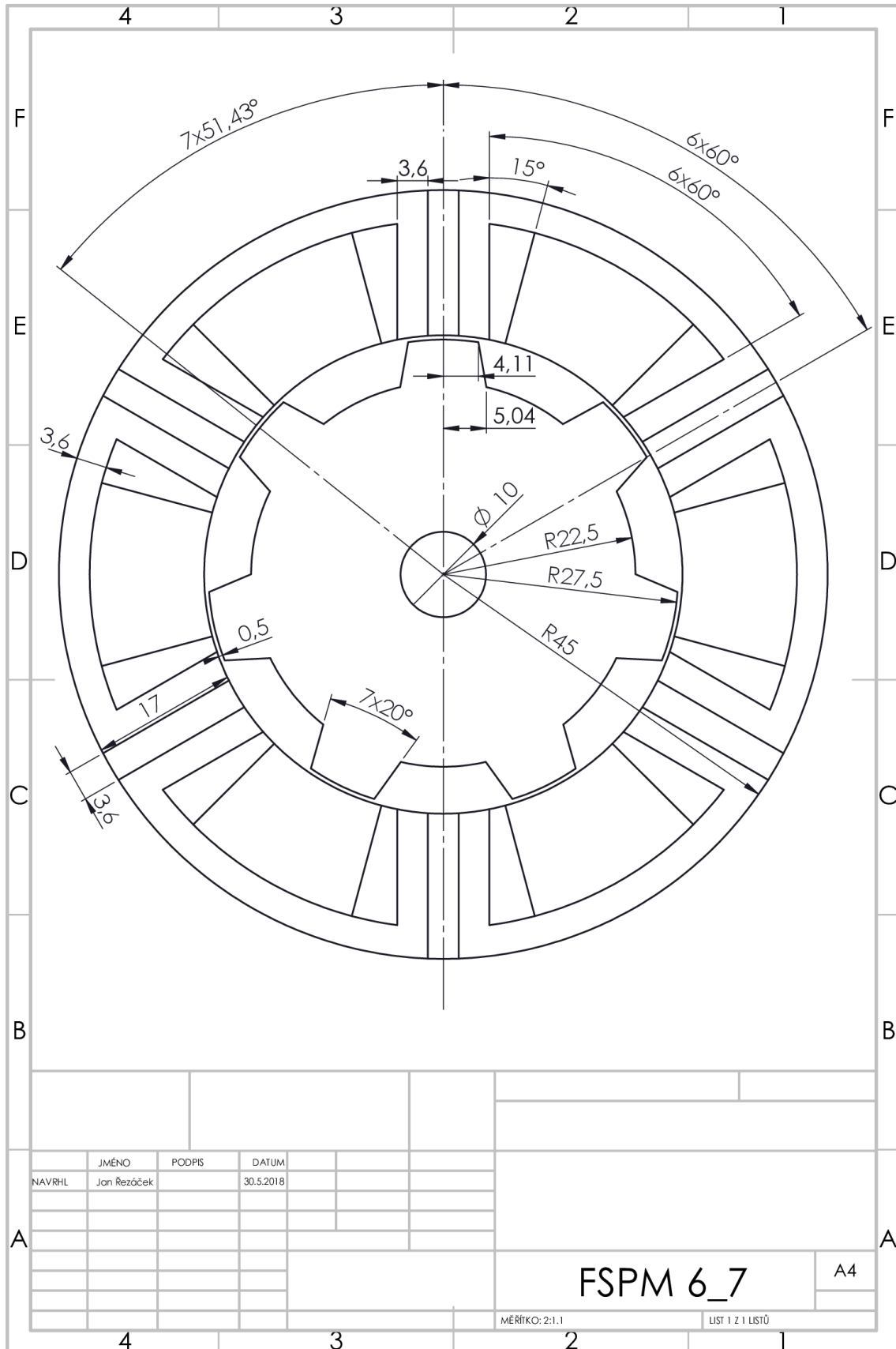
    for n=(start+1),substeps do

        mi_selectgroup(1)
        mi_move_rotate(0,0,dAlfa)
        mi_saveas(format("FSPM_moment_%1$d.fem",n))
        mi_analyse()
        mi_loadsolution()
        mo_seteditmode("contour")
        mo_selectpoint(-27.75,-0.01)
        mo_selectpoint(27.75,-0.01)
        mo_selectpoint(27.75,0.01)
        mo_selectpoint(-27.75,0.01)
        MDC,DM,TV,FV =mo_lineintegral(4)
        write(vystup, MDC, "\n")
        mo_close()
    end
end
closefile(vystup) --- uzavreni vystupniho souboru
```

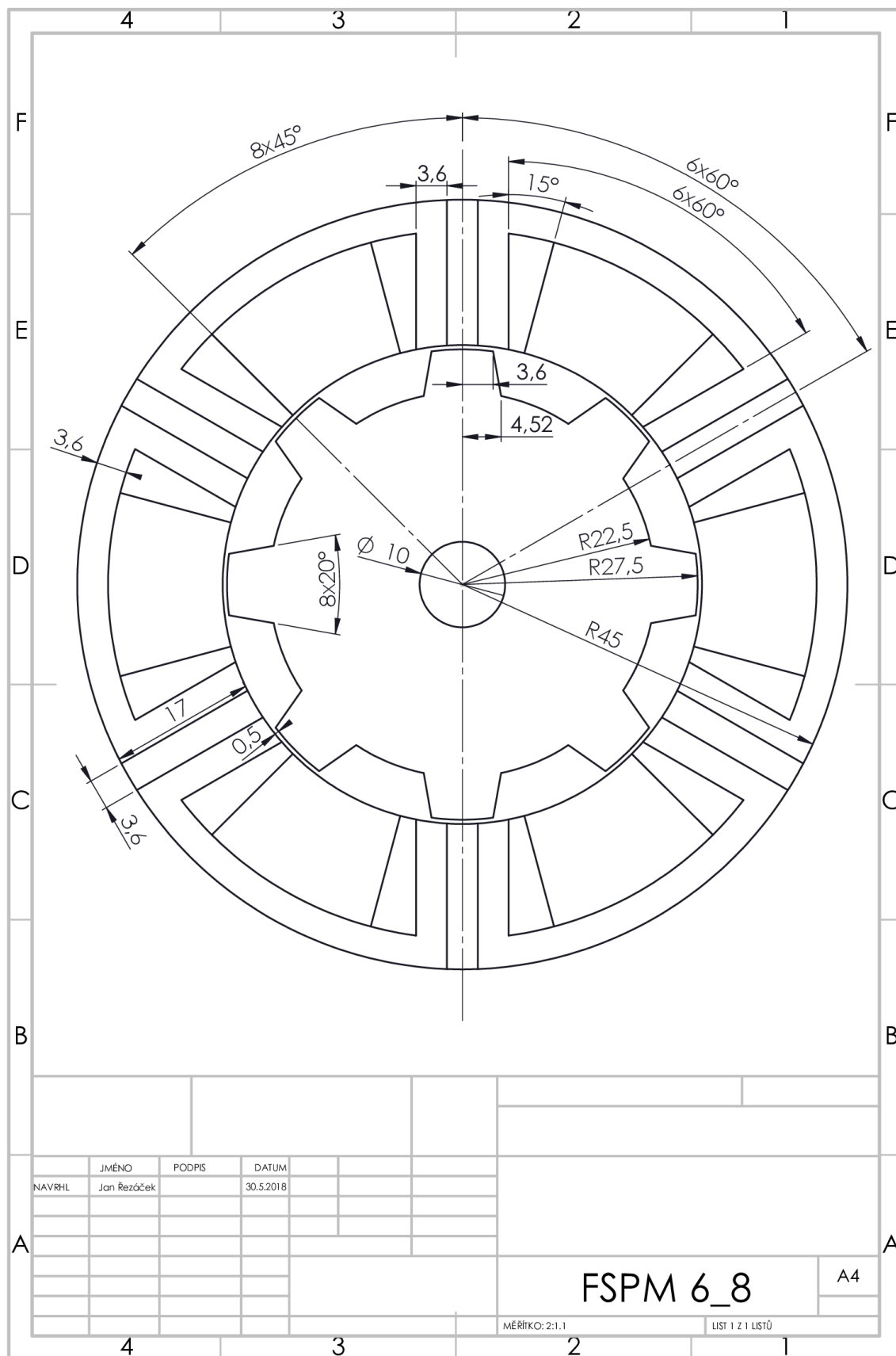
Příloha C – Výkres stroje FSPM 6/5



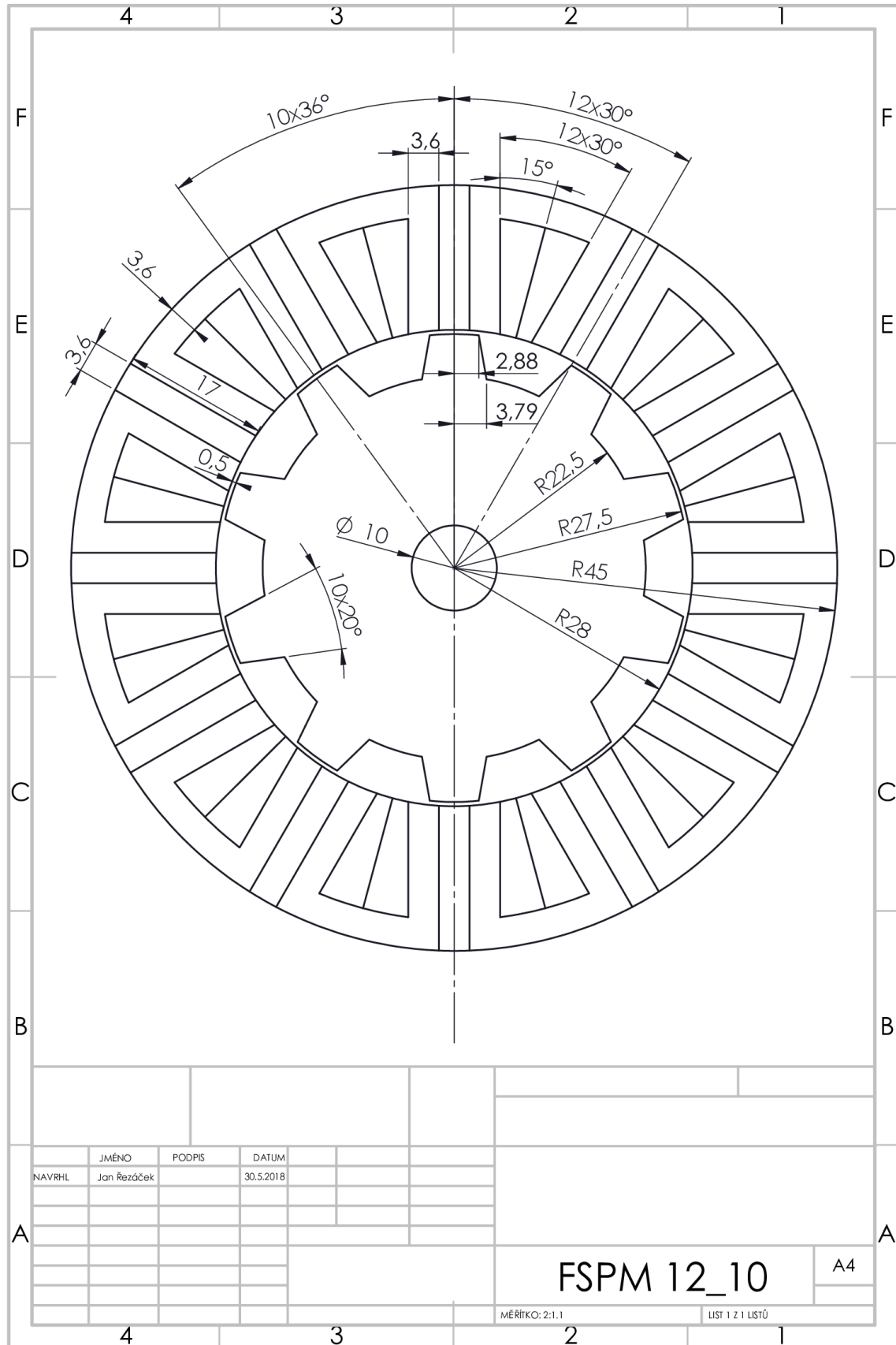
Příloha D – Výkres stroje FSPM 6/7



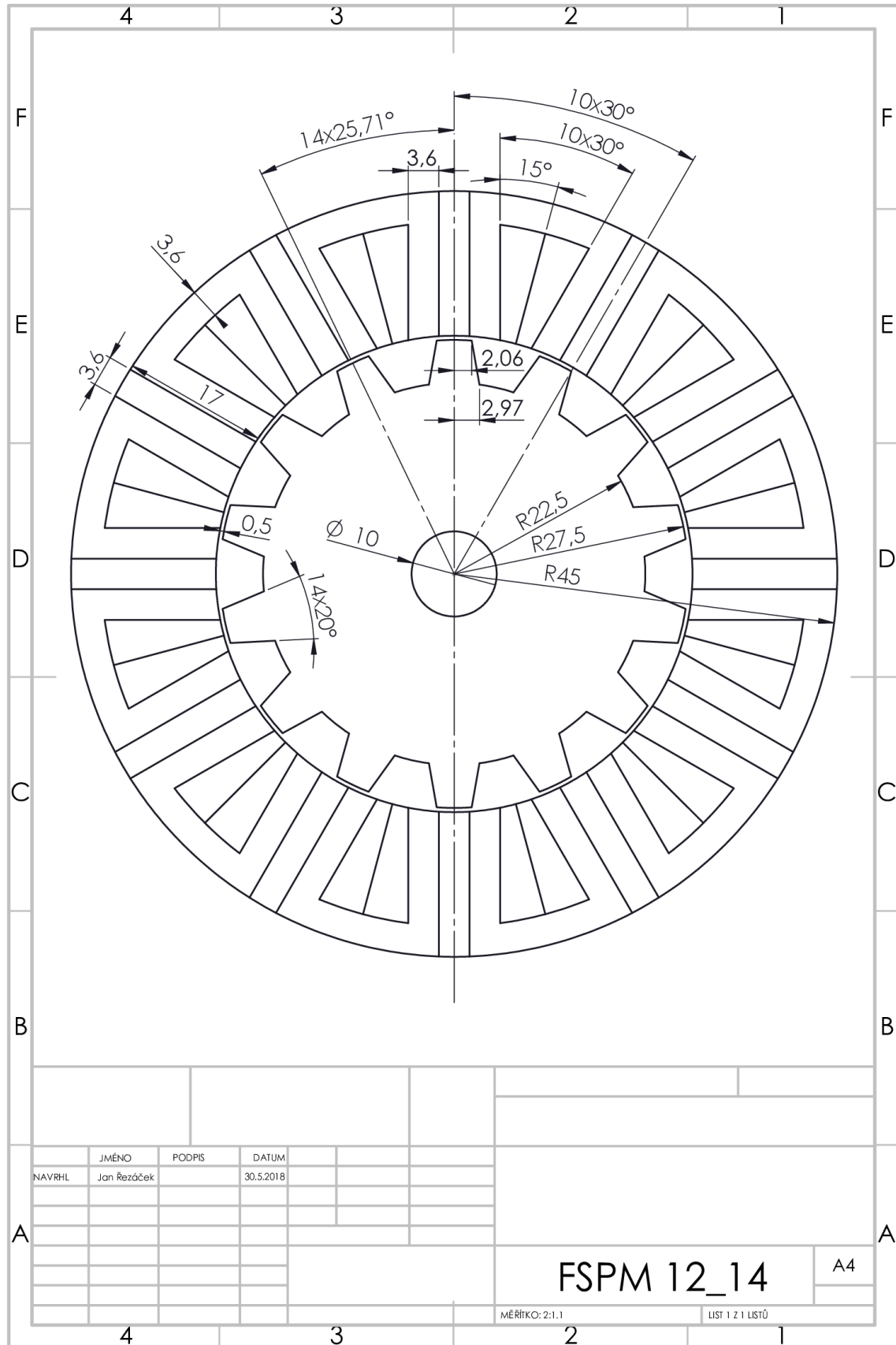
Příloha E – Výkres stroje FSPM 6/8



Příloha F – Výkres stroje FSPM 12/10



Příloha G – Výkres stroje FSPM 12/14



Příloha H – Výkres stroje FSPM 12/16

