

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

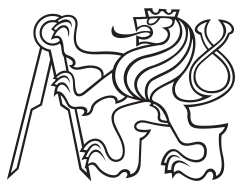
Fakulta elektrotechnická

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Praha, 2023

Bc. ŠTĚPÁN MORAVEC

Diplomová práce



České  
vysoké  
učení technické  
v Praze

Katedra elektroenergetiky

## Redukce zvlnění momentu u synchronního motoru s vnořenými permanentními magnety

Diplomová práce

Bc. Štěpán Moravec

Vedoucí: Ing. Ladislav Knebl Ph.D.

Obor: Elektroenergetika

Květen 2023

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Moravec** Jméno: **Štěpán** Osobní číslo: **498883**  
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**  
Zadávající katedra/ústav: **Katedra elektroenergetiky**  
Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**  
Specializace: **Elektroenergetika**

## II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

**Redukce zvlnění momentu u synchronního motoru s vnořenými permanentními magnety**

Název diplomové práce anglicky:

**Torque ripple minimization of interior permanent magnet synchronous motor**

Pokyny pro vypracování:

1. Nastudujte problematiku synchronních strojů s permanentními magnety.
2. Popište možnosti redukce zvlnění elektromagnetického momentu motoru s permanentními magnety v zatíženém stavu i ve stavu naprázdno.
3. Navrhněte možnosti geometrických úprav vedoucích ke snížení zvlnění elektromagnetického momentu.
4. Proveďte analýzu, optimalizaci a představených geometrických úprav.
5. Představená řešení porovnejte s konvenčními způsoby redukce zvlnění momentu.

Seznam doporučené literatury:

- [1] PYRHÖNEN J., TAPANI J., a HRABOVCOVÁ V., Design of rotating electrical machines. 2nd. Chichester: Wiley, 2014. ISBN 1118581571; 9781118581575;.  
[2] BOLDEA, Ion a Lucian TUTELEA. Reluctance electric machines : design and control. 6000 Broken Sound Parkway NW: CRC Press Taylor & Francis Group, 2019. ISBN 9781498782340.  
[3] HRABOVCOVÁ V., JANOUŠEK L., RAFAJDUS P., LIČKO M., Moderné elektrické stroje, Žilinská univerzita v Žilině, 2001, ISBN 80-7100-809-5

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

**Ing. Ladislav Knebl, Ph.D. Baumüller Brno, s.r.o.**

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **14.10.2022**

Termín odevzdání diplomové práce: **26.05.2023**

Platnost zadání diplomové práce: **19.02.2024**

Ing. Ladislav Knebl, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) práce

doc. Ing. Zdeněk Müller, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.  
podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

\_\_\_\_\_  
Datum převzetí zadání

\_\_\_\_\_  
Podpis studenta

## **ABSTRAKT**

Diplomová práce se zabývá možnostmi redukce zvlnění momentu u synchronního stroje s vnořenými permanentními magnety. V úvodu práce jsou představeny synchronní stroje a jejich princip tvorby momentu, zejména je popsán motor s permanentními magnety. Dále je provedena rešerše užívaných technik vedoucích ke snížení momentu. V praktické části práce jsou za pomoci metody konečných prvků zkoumány úpravy vedoucí ke snížení zvlnění momentu. Ke snížení zvlnění byly použity metody spočívající v přidání dodatečné bariéry magnetickému toku, zešikmení statorových drážek a použití rotoru s odsazením. V závěru práce je shrnutí výsledků ověřovaných simulací.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Synchronní motor s vnořenými permanentními magnety, redukce zvlnění momentu, parazitní reluktanční moment, bariéra magnetickému toku, natočení statorových drážek a natočení rotoru, analýza metodou konečných prvků.

## **ABSTRACT**

This thesis deals with the possibilities of the torque ripple minimization in an interior permanent magnet synchronous machine. In the beginning of the thesis, synchronous machines and their torque generation principle are presented. Special attention is dedicated to motors with permanent magnets. The research within this thesis, was conducted by following known techniques for torque ripple minimization. In the practical part of the thesis, adjustments leading to torque ripple reduction are examined, for those finite element method was used. In thesis methods such as the addition of extra flux barrier, skewing of the stator slots, and skewing of the rotor were used. The conclusion of the thesis provides a summary of the results obtained from the investigated simulations.

## **KEYWORDS**

Interior permanent magnet synchronous motor, torque ripple minimization, cogging torque, a flux-barrier, stator and rotor skewing, finite element analysis

MORAVEC, Štěpán. *Redukce zvlnění momentu u synchronního motoru s vnořenými permanentními magnety*. Praha, 2023, 64 s. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta elektrotechnická, Katedra elektroenergetiky. Vedoucí práce: Ing. Ladislav Knebl, Ph.D.

---



## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

Praha .....

.....

podpis autora

## PODĚKOVÁNÍ

Rád bych zde vyjádřil upřímné poděkování svému vedoucímu diplomové práce panu Ing. Ladislavu Kneblovi, Ph.D. za jeho odborné vedení, cenné rady, trpělivost, obětavost a povzbuzení při realizaci mé diplomové práce. Dále bych chtěl vyjádřit vděčnost za ochotu sdílet odborné informace, materiály a zpětnou vazbu, které vedly k prohloubení pochopení studované problematiky.

# Obsah

Úvod	1
<b>1 Synchronní motor - seznámení</b>	<b>2</b>
1.1 Tvorba točivého momentu . . . . .	2
1.2 Rozdělení synchronních strojů . . . . .	6
1.2.1 Reluktanční elektromotor . . . . .	7
1.2.2 Synchronní motor s permanentním magnetem . . . . .	10
1.2.3 Cize buzený synchronní motor . . . . .	11
1.3 PMSM motory . . . . .	12
1.3.1 Uspořádání magnetů PMSM válcových motorů . . . . .	12
1.3.2 Používané permanentní magnety v elektrických strojích . . . . .	14
<b>2 Momentové zvlnění</b>	<b>18</b>
2.1 Co je momentové zvlnění . . . . .	18
2.2 Vznik momentového zvlnění . . . . .	19
2.3 Rešerše konvenčních technik redukce momentového zvlnění v točivých elektrických strojích . . . . .	21
2.3.1 Redukce zvlnění přidáním bariéry magnetickému toku . . . . .	24
2.3.2 Redukce zvlnění momentu pomocí natočení statoru a rotoru . . . . .	25
2.3.3 Redukce zvlnění momentu pomocí optimalizace tvaru vzduchové bariéry . . . . .	26
2.3.4 Redukce zvlnění momentu pomocí změny úhlu rozevření PM . . . . .	26
2.3.5 Redukce zvlnění momentu pomocí asymetrického tvarování železa rotoru . . . . .	27
2.3.6 Redukce zvlnění momentu pomocí tvarování zubu statoru . . . . .	27
<b>3 Model pro analýzu momentového zvlnění</b>	<b>29</b>
3.1 Motivace simulací . . . . .	29
3.2 Metoda konečných prvků . . . . .	30
3.3 Vybrané parametry originálního modelu . . . . .	31
3.4 Výsledky simulace originálního modelu . . . . .	31
<b>4 Simulace upravených modelů - vytvoření dodatečné bariéry magnetickému toku</b>	<b>34</b>
4.1 Vliv kruhových bariér na zvlnění momentu . . . . .	34
4.1.1 Model 1 kruhové díry . . . . .	34
4.1.2 Model 2 kruhových děr . . . . .	38
4.1.3 Modely dalších variant kruhových otvorů . . . . .	40
4.2 Modely s obdélníkovými bariérami . . . . .	42

4.3	Model podélné bariéry . . . . .	43
<b>5</b>	<b>Simulace modelu s natočením statoru a rotoru</b>	<b>47</b>
5.1	Původní návrh motoru s úpravou natočením . . . . .	47
5.1.1	Natočení statorových drážek . . . . .	47
5.1.2	Natočení rotoru . . . . .	48
5.1.3	Porovnání výsledků natočení statorových drážek a natočení rotoru . . . . .	50
5.2	Kombinace natočení a modelu s podélnou bariérou . . . . .	51
5.2.1	Kombinace natočení statorových drážek a podélné bariéry . .	52
5.2.2	Kombinace natočení rotoru a podélné bariéry . . . . .	53
<b>6</b>	<b>Shrnutí výsledků</b>	<b>54</b>
6.1	Shrnutí výsledků vypočtených modelů . . . . .	54
6.2	Porovnání výsledků práce s konvenčními metodami redukce zvlnění momentu . . . . .	56
	<b>Závěr</b>	<b>57</b>
	<b>Literatura</b>	<b>59</b>
	<b>Seznam symbolů, veličin a zkratk</b>	<b>62</b>
	<b>Seznam Příloh</b>	<b>64</b>

## Seznam obrázků

1.1	Druhy strojů vzhledem k tvorbě momentu, převzato: Obr. 1.8. [2] . . .	3
1.2	Rozdělení synchronních motorů, upraveno [3] . . . . .	6
1.3	Nejčastěji používané druhy rotorů SynRM, převzato: obr. 5.1. [2] . .	9
1.4	Průřez čtyřfázovým 8/6 SR-motorem, upraveno: Fig. 3 [7] . . . . .	10
1.5	Závislost $\eta = f(n)$ , porovnání SR-Motoru, upraveno: Obr. 4.34. [2] . .	10
1.6	Možné způsoby provedení rotoru PMSM, převzato: Fig. 7.50 [8] . . . .	11
1.7	Ukázka uložení PM v PMSM motoru a) povrchové, b) vnitřní, pře- vzato: Obr. 2.25 [2] . . . . .	12
1.8	Synchronní stroj s PM uloženými uvnitř rotoru, b) $M=f(\beta)$ pro $X_q < X_d$ , c) $M=f(\beta)$ pro $X_q > X_d$ , převzato: Obr. 2.26 [2] . . . . .	14
1.9	Demagnetizační křivky současně používaných PM v elektrických stro- jích, $f(B) = H_c$ , převzato: Fig. 2.4 [11] . . . . .	17
2.1	Zvlnění momentu, převzato: Fig. 7 [12] . . . . .	18
2.2	Příklad PRM, upraveno [16] . . . . .	20
2.3	Úprava přidáním kruhové bariéry mag. toku, upraveno: Fig. 23 [17] .	24
2.4	Oblast pro snížení magnetického toku, upraveno: Fig. 25 [17] . . . . .	24
2.5	Možnosti provedení natočení, upraveno: 14. obrázek [18] a Figure 5 [19]	25
2.6	Úprava bariér rotoru, upraveno: Fig. 12 [20] . . . . .	26
2.7	Změna úhlu uložení PM magnetů, upraveno: Fig. 14 a Fig. 17 [17] . .	26
2.8	Asymetrické provedení rotoru IPM-SM, upraveno: Fig. 6 [22] . . . . .	27
2.9	Ukázka tvarování zubu statoru, upraveno: Fig. 3.6 a) a c) [8] . . . . .	27
2.10	Průběh mag. indukce podél povrchu statoru, upraveno: Fig. 3.6 b) [8]	28
3.1	Originální model zkoumaného motoru . . . . .	29
3.2	Ukázka výpočtové sítě originálního modelu, MKP . . . . .	30
3.3	Průběh zvlnění PRM nenapájeného neupraveného stroje . . . . .	32
3.4	Průběh zvlnění momentu napájeného neupraveného stroje . . . . .	32
3.5	Sycení magnetického obvodu stroje v čase $t=0$ . . . . .	33
3.6	Průběh indukovaného napětí ve vinutí . . . . .	33
4.1	Závislost měrného momentu na variantě modelu s 1 kruhovou dírou .	35
4.2	Geometrie rotoru modelu s 1 dírou, verze 52 . . . . .	36
4.3	Sycení můstku model 1 díry . . . . .	36
4.4	Průběhy momentu originálního stroje a strojů s úpravou 1 kruhové díry	37
4.5	Geometrie rotoru modelu s 2 kruhovými dírami . . . . .	38
4.6	Závislost měrného momentu na variantě modelu s 2 kruhovými dírami	38
4.7	Průběhy momentu originálního stroje a strojů s úpravou 2 kruhových děr . . . . .	39
4.8	Hustota výpočtové sítě pro model 2 kruhových děr verze 23 . . . . .	40
4.9	Příklad dalších prověřovaných geometrií . . . . .	41

4.10	Geometrie rotoru modelu s obdélníkovými výřezy . . . . .	42
4.11	Zvlnění momentu stroje s úpravou obdelníkového výřezu . . . . .	43
4.12	Geometrie rotoru modelu s podélnou bariérou . . . . .	44
4.13	Závislost momentu na variantě modelu s podélnou bariérou . . . . .	44
4.14	Výpočtová síť modelu s podélnou bariérou verze 16 . . . . .	45
4.15	Porovnání průběhu momentu originálního stroje s upraveným mode- lem - podélná bariéra . . . . .	46
5.1	Závislost měrného momentu na úhlu natočení statorové drážky . . . . .	48
5.2	Závislost měrného momentu na úhlu natočení rotoru . . . . .	49
5.3	Porovnání průběhu zvlnění momentu originálního modelu s modely využívající natočení statorových drážek a natočení rotoru . . . . .	50
5.4	Průběh zvlnění momentu, kombinace natočení drážek statoru a mo- delu podélné bariéry . . . . .	52
5.5	Průběh zvlnění momentu, kombinace natočení rotoru a podélné bariéry	53

## Seznam tabulek

1.1	Přehled vybraných vlastností permanentních magnetů používaných pro elektrotechnické účely [9] . . . . .	16
2.1	Rešerše publikovaných článků o snižování zvlnění momentu . . . . .	23
3.1	Vybrané parametry originálního návrhu stroje . . . . .	31
3.2	Tabulka použitých materiálů modelu stroje . . . . .	31
3.3	Významné body na průběhu momentu nenapájeného a napájeného stroje původního neupraveného modelu . . . . .	32
4.1	Vybrané výsledky modelu 1 kruhové díry . . . . .	35
4.2	Vybrané výsledky modelu dvou kruhových děr . . . . .	39
4.3	Vybrané výsledky modelů s obdélníkovými výřezy . . . . .	42
4.4	Vybrané výsledky modelu podélné bariéry . . . . .	45
5.1	Tabulka výsledků hledání optimálního úhlu natočení statorových drážek . . . . .	47
5.2	Tabulka výsledků hledání optimálního úhlu natočení rotoru . . . . .	49
5.3	Porovnání výsledků modelu kombinujícího podélnou bariéru verze č. 16 a natočení statorových drážek . . . . .	52
5.4	Porovnání výsledků kombinace modelu kombinujícího podélnou bariéru ver. 16 a natočení rotoru . . . . .	53
6.1	Shrnutí dosažených výsledků . . . . .	55

# Úvod

Elektromotory, jsou díky svým vlastnostem, používané a nezastupitelné v nesčetném množství pohonných aplikací. Díky svým vlastnostem, které byly objeveny již před mnoha lety, jsou dnes nejpoužívanějším typem pohonných jednotek. Ačkoli aspekty návrhu elektromotorů jsou ve značné míře známy a publikovány po vyšší desítky let, stále je v tomto odvětví prostor pro optimalizaci a zvyšování užitečných vlastností nově navrhovaných elektromotorů i již vyrobených strojů. To je mimo jiné umožněno stále zvyšující se dostupností výpočetního výkonu.

Při tvorbě momentu v elektrickém stroji vzniká díky fyzickým vlastnostem konstrukce k neideálnímu průběhu elektromagnetické indukce ve vzduchové mezeři. To má za následek vznik momentového zvlnění, které vede ke snižování užitečných vlastností pohonu, tím se rozumí například: zvýšené vibrace, zvýšený hluk a snížená životnost stroje. Zvlnění momentu je podmíněno konstrukcí stroje, je tedy přirozenou a běžnou vlastností všech točivých elektrických strojů.

Tato práce se zabývá možnostmi redukce momentového zvlnění u stroje s vnořenými permanentními magnety. Cílem práce je výpočtem analyzovat dostupné metody úprav geometrie stroje tak, aby bylo dosaženo pokud možno co největšího snížení zvlnění momentu za cenu nejméně náročné a nákladné úpravy. Pro úpravu je důležité, aby zůstaly zachovány provozní vlastnosti stroje, jako jsou: průměrná hodnota momentu a účinnost stroje co nejbližší původnímu návrhu.

V následujících kapitolách jsou popsány možnosti redukce momentového zvlnění, následně jsou představeny a simulovány konkrétní úpravy geometrie rotoru a statoru stroje. Simulace jsou provedeny metodou konečných prvků za pomoci výpočtového software ANSYS Maxwell. Výsledky simulací jsou diskutovány v závěru práce.



# 1 Synchronní motor - seznámení

Synchronní motory stejně jako ostatní elektromotory slouží k přeměně elektrické energie na mechanickou. Synchronní motory bývají obvykle třífázové, stator je tvořen trojfázovým vinutím založeným do statorových drážek. Vinutí je napájeno stejně velkým napětím vzájemně posunutým o 120° el. tak, aby bylo vytvořeno rotující magnetické pole. Rotor synchronních strojů se liší podle jednotlivých typů synchronních elektromotorů.

Trojfázové synchronní motory jsou současně užívány v mnoha průmyslových a dopravních odvětvích, kde díky svým výhodám nabízejí optimální technicko-ekonomické parametry. Konkrétní příklady nalézáme v současné době se rychle rozvíjející elektromobilitě, v průmyslu pro celou škálu pohonů např. čerpadel, tiskárenských technologií, automatických linek, v tvářecích a obrábějících strojích atd. Hlavní výhodou synchronních elektromotorů je nižší produkce ztrátového tepla a z toho plynoucí vysoká energetická efektivita. Synchronní stroje vynikají vysokou efektivitou využití materiálu a vysokou hustotou výkonu. [1]

## 1.1 Tvorba točivého momentu

Točivé elektrické stroje obecně mají v tvorbě točivého momentu společné základy. Je uvažován stroj který má jedno vinutí statorové a jedno vinutí rotorové, vlastní indukčnost statoru. Vlastní indukčnost statoru je označena  $L_1$  a vlastní indukčnost rotoru  $L_2$ , vzájemná indukčnost statorového a rotorového vinutí je  $L_{12}$ . Úhel polohy rotoru a statoru je označen  $\Theta$ . Celkový elektromagnetický moment lze potom vyjádřit:

$$M = \frac{1}{2} i_1^2 \frac{dL_1}{d\Theta} + \frac{1}{2} i_2^2 \frac{dL_2}{d\Theta} + \frac{1}{2} i_1 i_2 \frac{dL_{12}}{d\Theta} = M_{\text{rel}} + M_{\text{syn}}. \quad (1.1)$$

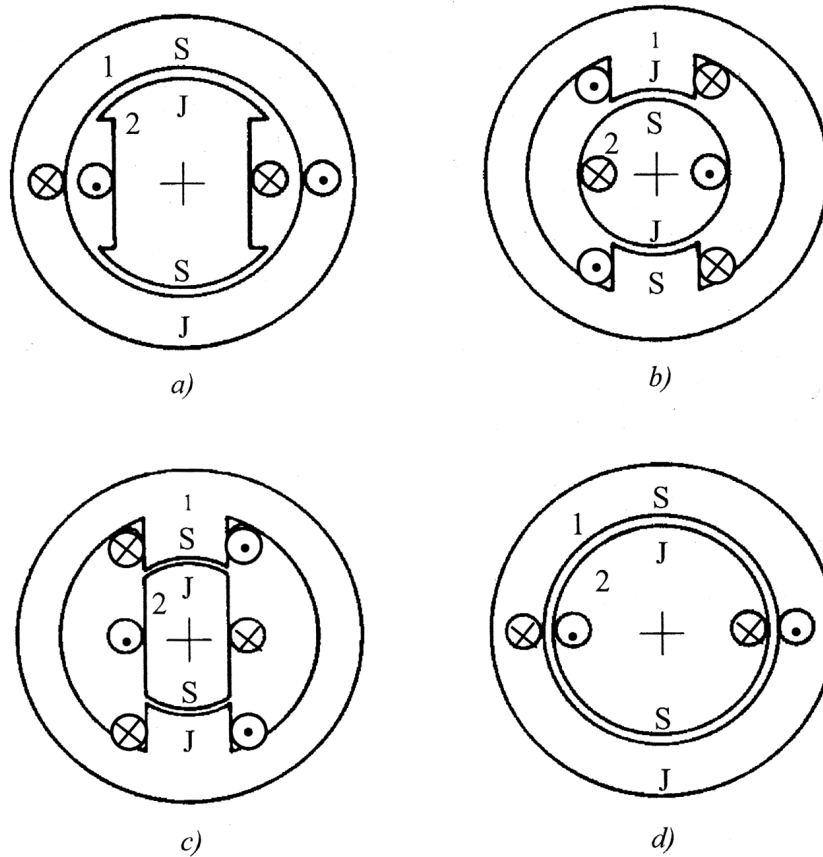
Z rovnice (1.1) plyne, že celkový vytvářený moment je součtem momentu vzniklého reluktancí  $M_{\text{rel}}$  a momentu synchronního  $M_{\text{syn}}$ . Reluktanční moment  $M_{\text{rel}}$  je určen prvníma dvěma členy rovnice (1.1):

$$M_{\text{rel}} = \frac{1}{2} i_1^2 \frac{dL_1}{d\Theta} + \frac{1}{2} i_2^2 \frac{dL_2}{d\Theta}, \quad (1.2)$$

synchronní moment  $M_{\text{syn}}$  je určen třetím členem rovnice (1.1):

$$M_{\text{syn}} = \frac{1}{2} i_1 i_2 \frac{dL_{12}}{d\Theta}. \quad (1.3)$$

Jak fungují jednotlivé složky momentu - reluktanční a synchronní je dobře srozumitelné, jsou-li zkoumány samostatně. Jsou uvažovány následující stroje viz obrázek 1.1.



Obr. 1.1: Druhy strojů vzhledem k tvorbě momentu, převzato: Obr. 1.8. [2]

Obrázek 1.1 znázorňuje elektrický stroj a) s vyjádřenými rotorovými póly, b) s vyjádřenými statorovými póly, c) s vyjádřenými rotorovými i statorovými póly, d) s hladkým rotorem i statorem (bez vyjádřených pólů). Naznačené směry proudů v jednotlivých vinutí ukazují vznik magnetických pólů při současném napájení obou vinutí.

Je uvažován stroj podle obrázku 1.1 a), jestliže bude napájeno pouze statorové vinutí (č. 1) bude se snažit rotor zaujmout polohu tak, aby výsledný magnetický odpor (reluktance) byl co nejnižší, rotor se snaží co nejvíce maximalizovat magnetickou vodivost. Na rotor působí elektromagnetická indukce a svým působením vytvoří magnetické pole, rotor se snaží zaujmout pozici tak, aby se osa magnetického pólu rotoru vyrovnala s osou statorového pole opačné polarity. Tendence rotoru zaradit se podle osy vybuzeného statorového vinutí je podstatou vzniku reluktančního momentu a v tomto případě bude jeho velikost:

$$M_{\text{rel1}} = \frac{1}{2} i_1^2 \frac{dL_1}{d\Theta}. \quad (1.4)$$

Jestliže bude napájeno pouze rotorové vinutí, nevznikne žádný reluktanční moment, protože stator je hladký (v případě zanedbání drážkování statoru) a reluktance se

s pozicí rotoru nezmění. Nevznikne ani žádný synchronní moment, který by točil s rotorem, rotor se tedy v tomto případě nepootočí.

Obrázek 1.1 b) znázorňuje opačnou situaci než obrázek 1.1 a), tedy rotor je hladký, ale stator má vyjádřené póly, avšak tvorba momentu je obdobná se situací popsanou výše. Tedy jestliže je napájeno pouze vinutí 2 vytvoří se reluktanční moment, který bude mít snahu vyrovnat magnetickou osu rotoru s póly statoru tak, aby se reluktance snížila. V případě, že je napájeno pouze vinutí rotoru (vinutí 2), nevytváří se žádný moment.

Stroje na obrázku 1.1 c) se vytváří reluktanční moment v případech, že je napájeno statorové i rotorové vinutí zvlášť, vytváří se reluktanční moment. Naproti tomu u stroje na obrázku 1.1 d) se reluktanční moment nevytváří v případě napájení rotorového ani statorového vinutí (drážkování stroje je zanedbáno), protože magnetický odpor se s polohou rotoru nemění. Z výše zmíněných skutečností plyne, že reluktanční moment se vytváří pouze tehdy, pokud jsou póly vyjádřené.

U všech znázorněných strojů se vytváří synchronní moment, jestliže je napájeno rotorové i statorové vinutí (směry proudu jsou znázorněny při napájení obou vinutí), magnetické póly rotoru i statoru mají opačnou polaritu a vytváří se tedy synchronní moment, který je způsobený tendencí vybuzeného rotorového magnetického pole srovnat se (synchronizovat se) podle smyslu vybuzeného statorového magnetického pole. Takto buzený stroj je také nazýván dvojitě buzený stroj nebo stroj buzený ze dvou stran.

V případě reluktančních motorů však bývá buzena pouze jedna strana stroje, vinutí tedy musí být dimenzováno tak, aby přijalo celý elektrický příkon stroje. Zde vzniká určitý rozpor mezi požadavkem dosáhnout pokud možno co největšího vnitřního momentu a pokud možno co nejmenšího magnetizačního proudu, tyto stroje potom pracují s nízkým účinníkem v důsledku čehož roste celkový zdánlivý příkon stroje, který v důsledku zase zvyšuje nároky na dimenzování napájecího obvodu a především na měnič stroje.

Ze vztahu (1.2) plyne, že obě dvě složky momentu – reluktanční i synchronní se vyskytují v elektrických strojích současně. Obě složky ale nemohou být volně kombinované, protože důležitým požadavkem při návrhu stroje je pokud možno konstantní moment s co nejmenším zvlněním. Tvorba hladkého momentu je vysvětlena na čtveřici strojů z obrázku 1.1.

Stroj na obrázku 1.1 a) vytváří konstantní (hladký) moment tehdy, pokud je statorové vinutí (vinutí 1) vícefázové a je napájeno sinusovým proudem takovým způsobem, že vytvoří magnetické pole rotující synchronní rychlostí. Rotor zaujme vůči rotujícímu magnetickému poli souhlasnou polohu a rotuje tedy synchronní rychlostí spolu s magnetickým polem statoru. Tento princip je využíván u reluktančních synchronních motorů. Jestliže je současně buzen rotor stroje a to buď permanentním magnetem nebo vinutím napájeným stejnosměrným proudem (vinutí 2), bude

se vzniklé magnetické pole rotoru rovnat podle rotujícího magnetického pole statoru, tím vznikne synchronní moment. Celkový moment stroje se potom skládá ze dvou složek – reluktanční  $M_{rel}$  a synchronní  $M_{syn}$ . Znaménko každé ze složek záleží od zátěžného úhlu mezi magnetickou osou rotoru a statoru. Aby vznikl maximální moment musí se obě složky sčítat. Jestliže je amplituda rotující magnetické vlny statoru konstantní a pokud je i rotorové buzení konstantní vytváří se konstantní (hladký) vnitřní moment stroje.

V případě stroje na obrázku 1.1 b) je úloha statoru a rotoru opačná. Tentokrát musí být statorové vinutí napájeno stejnosměrným proudem, nebo je statorové pole vybuzeno permanentním magnetem. Rotor má vícefázové střídavé vinutí napájené sinusovým proudem, které vytváří rotující magnetické pole, které rotuje relativně k rotoru. Pokud rotor fyzicky rotuje stejnou rychlostí, ale v opačném smyslu než je rotující rotorové pole, budou rotorová pole stacionární a synchronní se statorovými póly. Jestliže je amplituda rotorové vlny magnetického napětí i buzení statoru konstantní, bude výsledný moment konstantní. Tato konstrukce je inverzní k synchronnímu stroji s vyjádřenými póly a jako taková bývá konstruována a využívána pouze zřídka. Často se však používá v podobě stejnosměrného stroje, kde stator je tvořen stejnosměrným vinutím, nebo permanentními magnety a rotor je svým způsobem více-fázovým vinutím s velkým počtem fází, jehož svorky jsou vyvedeny na komutátor. Ten je vyroben tak, že jestliže rotor rotuje, komutátor připojuje a rozpojuje jednotlivá vinutí takovým způsobem, že rozložení pólu podél povrchu rotoru je pevné (směr proudu ve vodiči rotoru zůstává stejný pod jedním pólem statoru) a je tedy synchronní vzhledem k statoru.

Stroj s vyjádřenými póly statoru i rotoru 1.1 c) představuje například spínaný reluktanční motor nebo krokový motor. Z jejich konstrukčního uspořádání plyne, že není možné ve vzduchové mezeře vytvořit pravidelnou složku magnetické indukce na rotoru ani na statoru, proto není možné v takovém stroji vytvořit hladký moment. Tyto stroje mohou být také používány tak, že je napájeno pouze jedno vinutí z polovodičového měniče a to tak, že v momentě kdy se osa rotorového a statorového pólu protnou, napájení se přeruší, aby se nevytvářel záporný moment, který by rotor brzdil. Jestliže je spínání řízené tak, že je dosaženého nepřetržité rotace, jedná se o spínaný reluktanční motor. Krokový motor je řízen tím způsobem, že póly rotoru a statoru jsou osově seřazeny do té doby, dokud se buzením jiné fáze nedosáhne podmínek pro novou polohu rotoru.

Synchronní stroj s hladkým rotorem 1.1 d) má jen synchronní moment, reluktanční moment se zde neuplatňuje. U těchto strojů platí stejně jaku u ostatních typů, že pokud jsou napájecí proudy statoru i rotoru konstantní a je konstantní i velikost rotujícího magnetického pole, vytváří se konstantní moment.

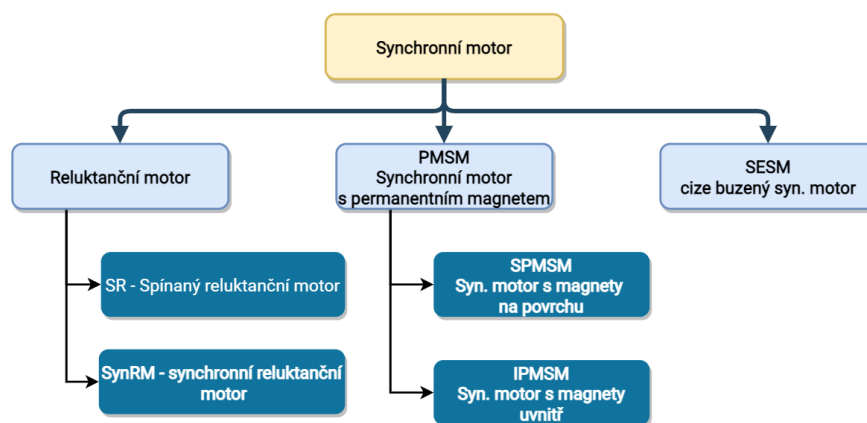
U všech výše popsaných strojů lze stejnosměrné vinutí nahradit permanentními magnety, čímž se jejich konstrukce a údržba podstatně zjednodušují. Není potřeba rea-

lizovat kluzné kontakty složené z kluzných kroužků a sběracích kartáčů, a proto se setkáváme s pojmem bezkartáčové stroje. Avšak z hlediska tvorby momentu je toto bezkartáčové konstrukční řešení náročnější, protože magnety nevytváří symetrickou vlnu magnetického napětí, a proto ani vnitřní moment stroje není úplně hladký. [2]

## 1.2 Rozdělení synchronních strojů

Synchronní stroje mohou být rozdělovány na základě několika kritérií. a to například podle:

- **Podle způsobu užití** je synchronní stroje možné provozovat v rozličných aplikacích, buď jako elektromotory k přeměně elektrické energie na mechanickou, nebo generátory k výrobě elektrické energie z mechanické, nebo jako rotační kompenzátory pro regulaci účinníku elektrické sítě.
- **Podle konstrukce rotoru** jsou rozeznávány dvě základní konstrukce a to: stroje s hladkým rotorem a nízkým počtem pól párů, typicky  $2p=2$ , případně  $2p=4$ , jsou obvykle používány pro konstrukce s vysokou obvodovou rychlostí rotoru (typické užití v případě generátoru jsou turbosoustrojí párou poháněných turbín). Naproti tomu jsou stroje s vníklými póly, mají velký počet pól párů a malou obvodovou rychlostí rotoru (například generátory v hydro elektrárnách).
- **Podle způsobu excitace rotorového pole** synchronní stroje lze konstruovat s rotory napájeným stejnosměrným proudem (cize buzený synchronní motor), nebo magnetické pole rotoru je vyvoláno pomocí permanentních magnetů (PMSM), nebo reluktanční, které pro svojí funkci nemusí mít rotor excitovaný stejnosměrným vinutím ani permanentním magnetem.



Obr. 1.2: Rozdělení synchronních motorů, upraveno [3]

Názorné rozdělení synchronních elektromotorů podle excitace magnetického pole je znázorněno na obrázku 1.2, jejich obecná funkce, porovnání výhod a nevýhod jsou popsány v následujících podkapitolách. Jako další možné rozdělení synchronních strojů lze uvést například podle způsobu pohybu (rotační, lineární stroje), nebo podle způsobu spouštění stroje (asynchronní rozběh, změnou frekvence napájecího napětí, roztočení pomocným zařízením). [2], [4]

### 1.2.1 Reluktanční elektromotor

Reluktanční elektromotor vytváří točivý moment díky rozdílné reluktanci (magnetického odporu) v ose  $d$  a v ose  $q$ . Bariéry jsou tedy tvářeny tak, aby v ose  $q$  byla reluktance co největší, kdežto v ose  $d$ , v ideálním případě, co nejmenší. Rotor musí tedy být vyroben z magneticky měkkého materiálu. Vysoká reluktance vzduchové mezery v bariéře rotoru vytváří odpor magnetickému toku. Magnetický tok podobně jako elektrický proud se uzavírá cestou nejmenšího odporu – v železe rotoru. Rotující magnetický tok statoru se uzavírá přes železo rotoru, rotor se snaží reluktanci magnetického obvodu co nejvíce zmenšit a zároveň se s pólem statoru, situaci lze připodobnit k magnetu snažícímu se přitáhnout k lednici. Rotor se otáčí synchronně s rotujícím magnetickým polem statoru.

Výhodou reluktančních motorů jsou díky absenci permanentních magnetů nízké výrobní náklady (v praxi se ale setkáváme s konstrukcí, která má v bariérách založené permanentní magnety, čímž se zvyšuje měrný výkon stroje, avšak argument výhody nižší výrobní ceny se popírá). Další výhodou je vysoká energetická účinnost díky absenci rotorového vinutí. V rotoru nevznikají Jouleovy ztráty, protože se zde neindukuje žádné elektromotorické napětí. Díky absenci komutátoru nevyžadují tyto motory pravidelnou údržbu a snižují se tak servisní nároky na provoz stroje, dále nevzniká na komutátoru jiskření, což je výhodou pro stroje užívané v nebezpečných prostorech, kde by jiskra mohla iniciovat požár nebo výbuch, např. důlní stroje.

Nevýhody reluktančních motorů jsou vysoké zvlnění momentu, s tím související vysoká hlučnost motoru, náročnost návrhu motoru a vysoké nároky na dimenzování napájecího měniče. Rozlišujeme reluktanční motory:

- **SynRM – synchronní reluktanční motor**
- **SR-Motor – spínaný reluktanční motor**

**SynRM – synchronní reluktanční motor**, který v minulosti nebyl příliš rozšířen, avšak v dnešní době je tento stroj konstruován stále častěji. To je umožněno díky pokročilým technologiím napájecích měničů a technickému zvládnutí vektorového řízení. SynRM má hladký stator (obdobně jako asynchronní motor) a rotor s vyjádřenými póly. V rotoru jsou vytvořeny drážky tak, aby bylo dosaženo co nejlepších kvalitativních výsledků stroje. Je nutné dosáhnout co největšího poměru  $\zeta = L_d/L_q$  indukčnosti v ose  $d$  a indukčností v ose  $q$ . Konstrukce se snaží do-

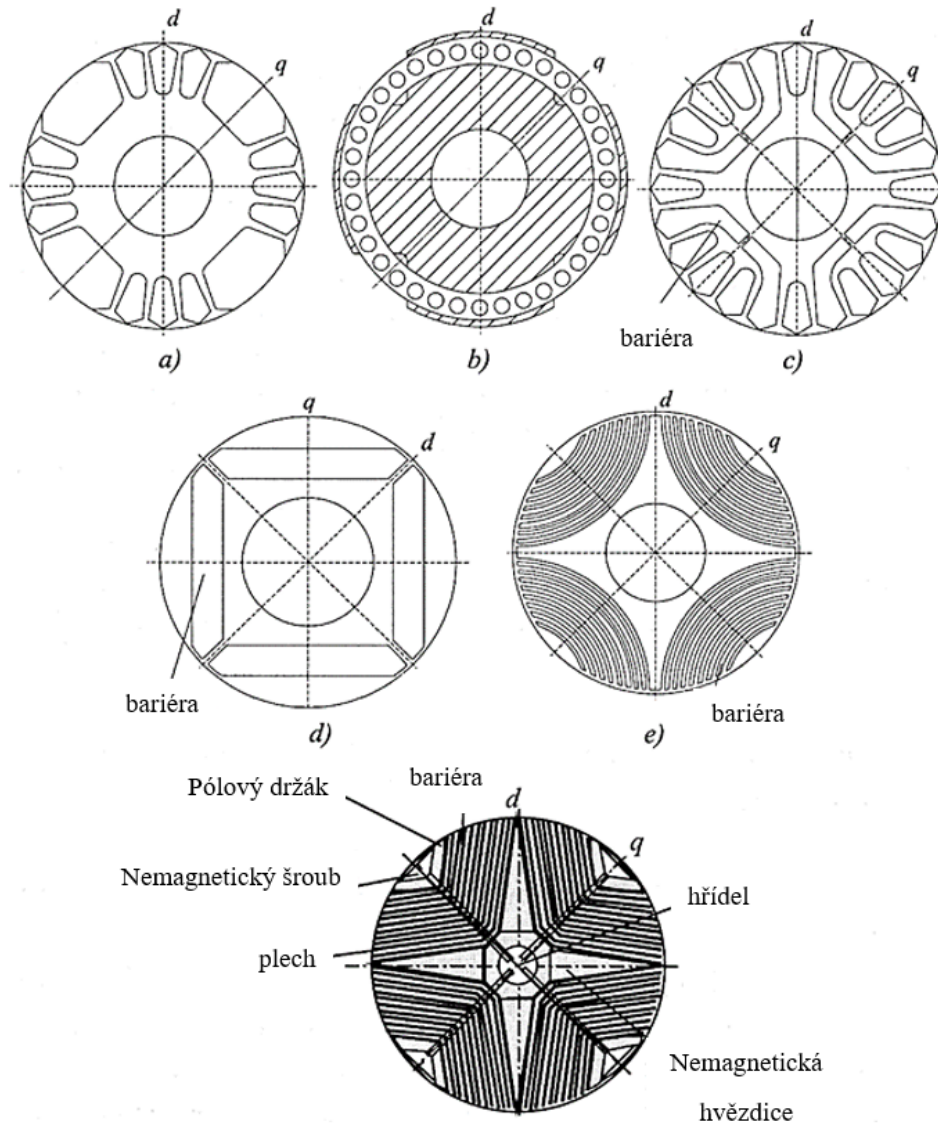
sáhnout „ideálnímu SynRM rotoru“. To je takový rotor, který dosahuje maximální magnetické vodivosti v ose  $d$  (podélné ose), avšak nekonečně vysokého magnetického odporu v ose  $q$  (příčné ose). Drážkami v rotoru jsou tvořeny vodivé cesty pro magnetický tok v ose  $d$ , vzduchová bariéra tvoří překážku magnetickému toku, proto reluktance v ose  $q$  klesá. Nejčastěji používané tvary drážek ukazuje obrázek 1.3, Podle konstrukce rotoru jsou rozlišované stroje:

1. radiálně vrstvené, obrázek 1.3 a)-e)
2. axiálně vrstvené, obrázek 1.3 f)
3. s klecí, obrázek 1.3 a)-c)
4. bez klece, obrázek 1.3 d)-f)
5. s vyjádřenými póly, obrázek 1.3 a), b)
6. s jednou magnetickou bariérou, obrázek 1.3 c), d)
7. s vícenásobnými magnetickými bariérami, obrázek e), f)

Klecové stroje jsou určeny především pro provoz na síti napájené konstantním napětím (klec zajišťuje stroji asynchronní rozběh a vyšší stabilitu). Bez klecové konstrukce jsou určeny pro vektorově řízené pohony.

Stroje s rotorem podle obrázku 1.3 a) jsou nazývané „synchronní indukční motory“, mají jednoduchou konstrukci, avšak poměr  $\zeta$  je poměrně malý. V porovnání s podobnými SynRM zaostávají tyto stroje nízkým účinníkem a účinností. Obdobné to je pro konstrukci podle obrázku 1.3 b), rotor je totožný pro synchronní stroje s vyjádřenými póly, avšak bez vinutí. Poměr indukčností u takového stroje se pohybuje v rozmezí  $\zeta \in \langle 2 \div 3 \rangle$ . V praxi tyto stroje s jednou bariérou nejsou schopné vzhledem na výkonové požadavky a účinník konkurovat asynchronním motorům. Tyto nedostatky řeší konstrukce s vyšším počtem bariér, u těchto strojů dosahuje poměr synchronních indukčností  $\zeta \in \langle 8 \div 9 \rangle$ , díky tomu dosahují i kvalitativní požadavky výrazného zlepšení oproti jedno-bariérové konstrukci. Radiálně vrstvený rotor je z hlediska výroby náročný, proto jsou bariérové rotory vyráběny jako axiálně vrstvené viz obrázek 1.3 f). Axiálně vrstvená konstrukce rotoru se nevíce přibližuje „ideálnímu SynRM rotoru“, poměry indukčností u nejlepších konstrukcí dosahují  $\zeta \in \langle 10 \div 12 \rangle$ .

SynRM nacházejí uplatnění v mnoha aplikacích, často jsou stroje užívané jako trakční motory. Obor dopravy je pod neustálým tlakem na snižování emisí a zvyšování účinnosti, spolehlivosti, ale také k dosažení co největší měrné výkonnosti stroje. Vhodné řešení často nabízí právě SynRM. Konkrétní užití těchto strojů je zmíněná elektrická trakce, v průmyslových aplikacích jako pohony pro pásové dopravníky, ventilátory, kompresory atd. [2],[5].



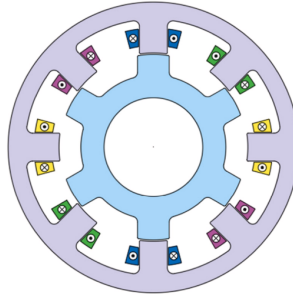
Obr. 1.3: Nejčastěji používané druhy rotorů SynRM, převzato: obr. 5.1. [2]

**SR-Motor – spínaný reluktanční motor**, viz (obrázek 1.4), má vyjádřené póly statoru i rotoru, je konstrukčně nejjednodušší, avšak vyznačuje se významným zvlněním momentu. To plyne ze samostatné konstrukce motorů, jejich geometrie neumožňuje sinusové rozložení magnetického toku ve vzduchové mezeře. Více bylo popsáno v kapitole 1.1. Toto výrazné momentové zvlnění je v určitých aplikacích omezující, avšak podstatnou výhodou je, že je lze používat jako krokové motory.

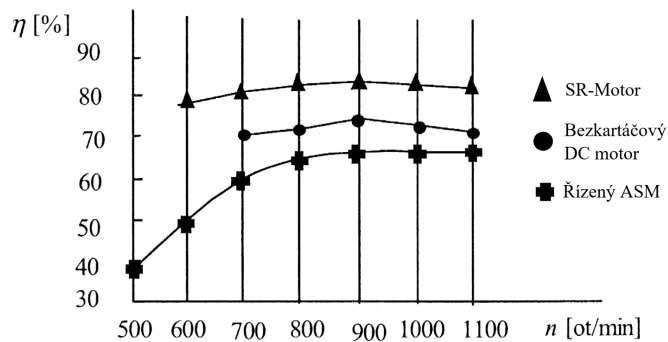
Tyto stroje jsou užívány v aplikacích, kde je požadovaná regulace momentu a otáček ve velkém rozsahu. SR-Motory jsou používány například pro pohon akumulátorových vysokozdvizných vozíků, nebo pro vysoko-otáčkové stroje ve zdravotnictví (odštědivky), dále například pro pohon vibračních zařízení, kde může být vysoké zvlnění výhodou (například mlýny v drtičkách kamenů). [6]



Graf na obrázku 1.5 porovnává účinnost v závislosti na otáčkách různých strojů a to: SR-Motor (trojúhelník), bezkartáčový stejnosměrný stroj s permanentními magnety (kruh) a řízeným asynchronním motorem (křížek), určených pro pohon cca 350 W vzduchového kompresoru. Z grafu plyne, že v této konkrétní situaci nejvyšší účinnosti dosahuje právě SR-Motor. [2], [7]



Obr. 1.4: Průřez čtyřfázovým 8/6 SR-motorem, upraveno: Fig. 3 [7]

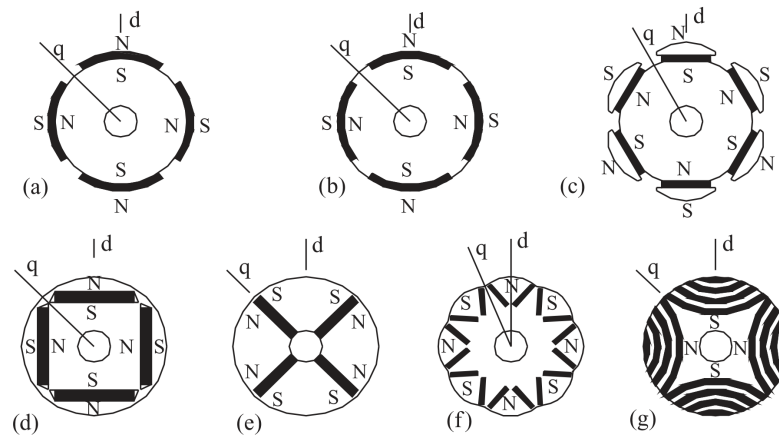


Obr. 1.5: Závislost  $\eta = f(n)$ , porovnání SR-Motoru, upraveno: Obr. 4.34. [2]

### 1.2.2 Synchronní motor s permanentním magnetem

PMSM motory jsou variantou synchronních strojů, které místo stejnosměrného vinutí na rotoru stroje používají permanentní magnety (PM), ty zajišťují rotoru permanentní excitaci magnetického pole. Uložení permanentních magnetů rotoru může být realizováno v mnoha variantách. Mohou být konstrukce rotoru, které používají magnety přisazené k povrchu rotoru, nebo jsou vsazené do vytvořených drážek tak, aby byly zarovnané s povrchem rotoru. Tyto a další možnosti uložení názorně ukazuje obrázek 1.6. Permanentní magnety vytváří na rotoru permanentní magnetické pole, které interaguje se statorovým polem. Stator je konstruován obdobně jako u jiných typů trojfázových elektromotorů. Kostra statoru je složena ze vzájemně izolovaných plechů, kvůli zamezení ztrát vířivými proudy. Do vytvořených drážek je založeno trojfázové vinutí, obvykle z měděných lakovaných vodičů.

Výhodou PMSM motorů je absence stejnosměrného vinutí. Z toho plyne nižší servisní náročnost (chybí kluzné kroužky a sběrací kartáče, které se provozem opotřebovávají a vyžadují občasnou údržbu), díky tomu jsou PMSM motory vhodné i do těžko přístupných prostorů. Další podstatnou výhodou PMSM motorů je vysoká momentová přetížitelnost a díky absenci rotorového vinutí, nevznikají zde Jouleovy ztráty, které by snižovaly účinnost stroje. Obrázek 1.6 ukazuje možné varianty provedení rotorů



Obr. 1.6: Možné způsoby provedení rotoru PMSM, převzato: Fig. 7.50 [8]

PMSM motorů. Jsou rozeznávány rotory a) přisazené k povrchu; b) vsazené k povrchu; c) s vystouplými póly; d) tangenciálně vsazené; e) radiálně vsazené; f) vsazené do tvaru V; g) SynRM s vsazenými magnety. Protože tato práce si bere za cíl snížení zvlnění momentu právě u tohoto druhu stroje, je PMSM popsán v podkapitole 1.3.

### 1.2.3 Cize buzený synchronní motor

Cize buzený synchronní motor nebo také SESM (z angl. separately excited synchronous motor) jsou elektromotory, které ke své funkci využívají excitaci magnetických polí cívkou na rotoru i na statoru. Stator je obvykle tvořen trojfázovým vinutím napájeným střídavým proudem tak, aby se vytvořilo rotující magnetické pole. Cívky rotoru jsou napájené stejnosměrným elektrickým proudem. Jejich výhodou je díky použití vinutí možnosti měnit excitaci jak rotorového, tak statorového magnetického pole, to dává těmto strojům schopnost regulovat je v širokém rozsahu provozních podmínek. Nevýhodou jsou potom nižší energetická efektivita, kvůli Jouleovým ztrátám v rotorovém vinutí a zvýšené nároky spojené s tímto vinutím (napájení, nutná údržba kluzných kroužků atd...). S touto typologií stroje je možné se setkat v celé řadě aplikací, které s výhodou využívají schopnost měnit buzení magnetického pole rotoru stroje, typická aplikace je tedy jako synchronní generátory a rotační kompenzátory.

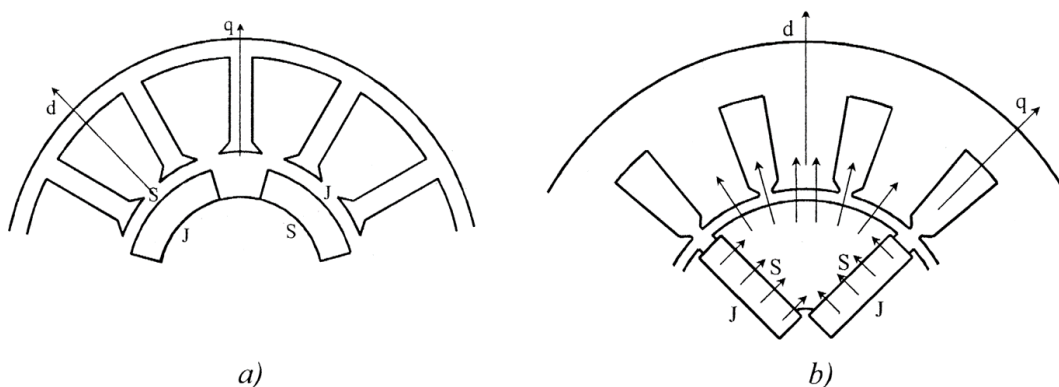
## 1.3 PMSM motory

Obecné informace o vlastnostech tohoto typu stroje byly popsány v podkapitole 1.2.2. Tato podkapitola si bere za cíl blíže popsat typologii PMSM strojů. PMSM motory mohou být konstruovány jako:

- **Válcové motory** - použití je obdobné jako pro obdobné synchronní stroje (např. trakční členy), vnitřní uspořádání těchto strojů je popsáno v následující podkapitole (1.3.1).
- **Axiální motory** - tyto stroje se vyznačují osovým magnetickým polem, v angličtině bývá tento typ motoru označován jako „axial flux motor“. Mají malou hloubku stroje, ale vzhledem ke své hloubce výrazně větší průměr stroje. Bývají konstruovány pro vysoké rychlosti, často v malých rozměrech. Tyto stroje se vyznačují malým momentem setrvačnosti, díky čemuž vynikají rychlou odezvou na řízení, jsou tedy vhodné např. jako pohony pro jednotky pevných disků a jiných počítačových komponentů. [10]

### 1.3.1 Uspořádání magnetů PMSM válcových motorů

O uspořádání PMSM rozhoduje mnoho faktorů, které je potřeba při konstrukci stroje zvážit. Je potřeba respektovat požadavky na provozní parametry (požadovaný moment stroje a otáčky), měrný výkon stroje, možnosti napájení, finanční náročnost projektu nebo technologii výroby, která může omezovat realizaci některých typů strojů. Podle těchto faktorů se potom vybírá ideální technicko-ekonomické řešení stroje. V praxi se z toho důvodu může volit řešení s poněkud horšími parametry, avšak se značně nižší cenou.



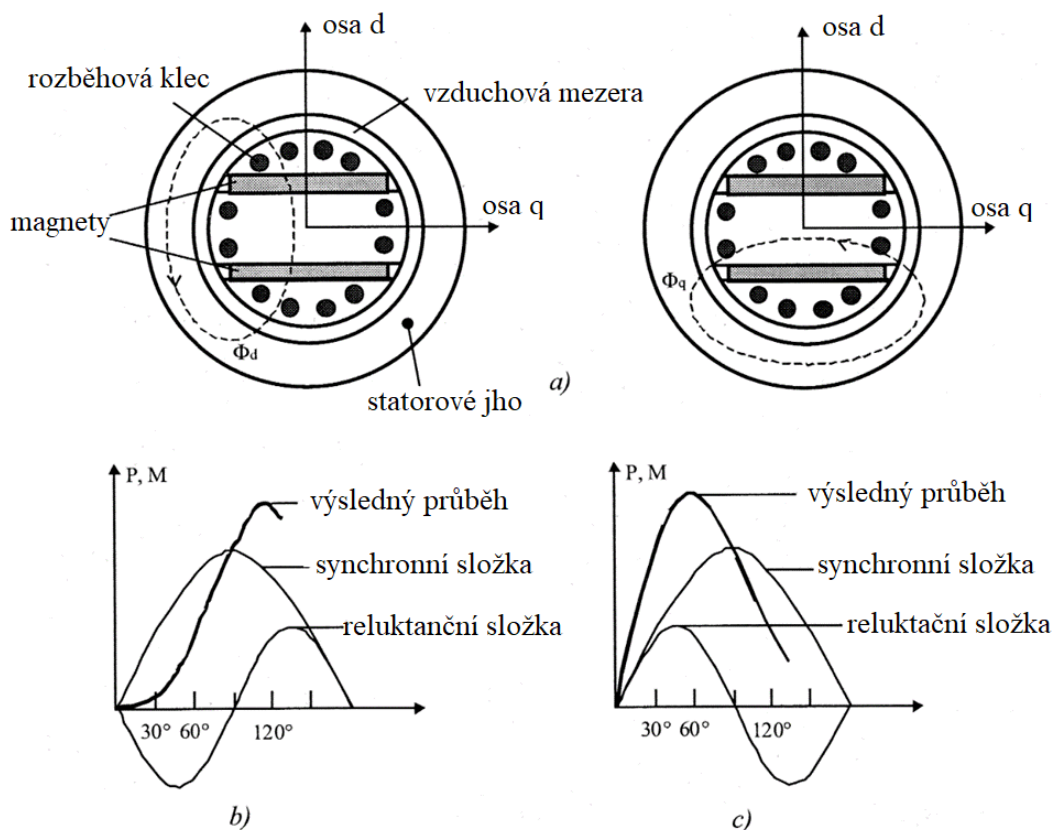
Obr. 1.7: Ukázka uložení PM v PMSM motoru a) povrchové, b) vnitřní, převzato: Obr. 2.25 [2]

Obrázek 1.7 ukazuje příklad rotorů a uložení magnetů v PMSM motorech. Stroj s permanentními magnety přisazenými k povrchu, nebo také SM-SM (z angl. *surface mounted PM synchronous machine*), viz obrázek 1.7 a), je možné považovat za stroj s hladkým rotorem, protože velikost vzduchové mezery se všeobecně u těchto motorů považuje jako velká, vliv reakce kotvy na magnetický tok pólu je potom slabá. Relativní permeabilita magnetů je v závislosti na kvalitě provedení magnetů blízká jedné ( $\mu_{rM} \approx \mu_{r0} \approx 1$  viz tabulka 1.1), a proto je možné celou vzduchovou mezeru včetně PM považovat z hlediska permeability za homogenní prostor s celkovou permeabilitou rovnající se  $\mu_0$ . Běžně je na tyto stroje z hlediska konstrukce nazíráno jako na stroje s hladkým rotorem, stejně jako u cize buzeného synchronního motoru s hladkým rotorem jsou téměř stejné reaktance v podélné a v příčné ose motoru  $X_d \approx X_q$ , neuplatňuje se zde tedy tvorba momentu vlivem reluktance. Jestliže však bude tento stroj podroben bližšímu zkoumání a přizná se vliv rozdílné permeability permanentního magnetu, tzn. že  $X_d > X_q$  bude vyjádření momentu stroje obdobné jako u stroje s vyjádřenými póly, matematický popis je následující:

$$M_e = 3 \frac{1}{\omega_s} \cdot \left( \frac{U_s U_{ib}}{X_d} \sin \beta + U_s^2 \frac{X_d - X_q}{2X_d X_q} \sin 2\beta \right), \quad (1.5)$$

kde  $\omega_s$  je synchronní rychlost,  $U_s$  svorkové napětí,  $U_{ib}$  indukované napětí a  $\beta$  je zátěžný úhel stroje. Závislost vnitřního momentu stroje  $M_e$  na zátěžném úhlu je znázorněna na obrázku 1.8 c). Stroj s magnety vsazenými do těla rotoru nebo také IPM-SM (z angl. *interior permanent magnet synchronous machine*), viz obrázek 1.7 b), bývá považován za stroj s vyjádřenými póly, protože reaktance se v příčné a podélné ose značně liší. Celkový moment stroje je dán součtem synchronního momentu a reluktančního momentu. Rozdílem oproti stroji s magnety na povrchu ale je, že reaktance v ose  $q$  je vyšší než v ose  $d$ , a proto druhá část vztahu 1.5, která respektuje vznik točivého momentu vlivem reluktance, nabývá záporných hodnot, tedy je v proti-fázi se synchronní složkou. Viz obrázek 1.8 b), ze kterého je patrné, že maximum celkového momentu nastává při zátěžném úhlu  $\beta > \frac{\pi}{2}$ , což je oproti motoru s magnety na povrchu podstatný rozdíl, kde maximum momentu nastává  $\beta < \frac{\pi}{2}$ .

To, proč je  $X_q > X_d$  názorně ukazuje obrázek 1.8 a), vlevo. Jestliže nastane moment, kdy magnetický tok vyvolaný reakcí kotvy je přesně s osou  $d$ , pak siločáry musí překonat cestu přes oba magnety, které díky své nízké permeabilitě tvoří toku bariéru. Jestliže se vlna přesune souhlasně s osou  $q$ , magnetický tok se uzavírá pouze přes železo rotoru (viz obrázek 1.8 a), vpravo. [2]



Obr. 1.8: Synchronní stroj s PM uloženými uvnitř rotoru, b)  $M=f(\beta)$  pro  $X_q < X_d$ , c)  $M=f(\beta)$  pro  $X_q > X_d$ , převzato: Obr. 2.26 [2]

### 1.3.2 Používané permanentní magnety v elektrických strojích

Jak již bylo popsáno výše, použitím permanentních magnetů v elektrických strojích je předpokládána vysoká životnost stroje bez potřeby údržby. Podstatným rozdílem však je výběr materiálu PM, kde vstupní investice do materiálu se mohou násobně lišit. Aby bylo dosaženo ideálního technicko-ekonomického návrhu, je potřeba zvážit velké množství faktorů, které mohou výběr konkrétního typu PM ovlivnit. Jako příklad lze uvést rozsah provozních teplot, požadovaná koercitivní síla magnetu ( $H_c$ ) a velikost remanentní indukce ( $B_r$ , dále pracovní podmínky stroje, vlastnosti stroje (požadované nominální otáčky stroje atd.) a v neposlední řadě vstupní investice na pořízení PM. Výběr materiálu PM je určen především měrným objemem stroje (měrný objem stroje je definován jako velikost vytvořeného vnitřního momentu stroje vztaheného k jeho objemu  $[\frac{N \cdot m}{m^3}]$ ). Zvyšováním využití elektrického a magnetického potenciálu stroje se dosahuje růstu měrného výkonu stroje - potažmo zmenšování stroje k vytvoření potřebného momentu, čímž je vyhověno zvyšující se poptávce po čím dál menších a výkonnějších strojích.

Strop využití elektrického potenciálu je určen schopností odvést teplo z elektrického stroje, vzniklé tepelnými ztrátami po průchodu elektrického proudu tak, aniž by bylo dosažené kritické teploty pro izolační materiály stroje. Další faktor, který ovlivňuje elektrické využití stroje, je reakce kotvy na PM. Při napájení statorového vinutí vzniklá magnetická indukce kotvy, která interaguje s PM (oslabuje jeho magnetické pole), je-li dosaženo kritické hodnoty, může se u PM dosáhnout trvalé demagnetizace. Při návrhu elektrického stroje musí PM vytvořit dostatečné magnetické pole tak, aby se předešlo trvalé demagnetizaci ( $H_c l_m$ ). Důsledkům reakce kotvy a hrozbě trvalé demagnetizace bývá zabráněno použitím magnetů s dostatečnou koeritivní silou a dostatečnou délkou magnetů ve směru magnetizace. Použití magnetů s dostatečnou tepelnou odolností a s vysokou koeritivní silou vedou ke zvyšování finanční náročnosti projektu.

Magnetickým potenciálem stroje je rozuměna schopnost elektrického stroje efektivně pojmout a transformovat magnetický tok. Velikost magnetické indukce ve vzduchové mezeře ( $B_\delta$ ) je omezena nasycením statorových zubů. Obecně situaci ilustruje stav, kdy příliš velké nasycení znamená velký magnetický odpor a tedy velký úbytek magnetického napětí, to vede na přílišné zahřívání stroje a velké ztráty v železe stroje, takový návrh je neefektivní.

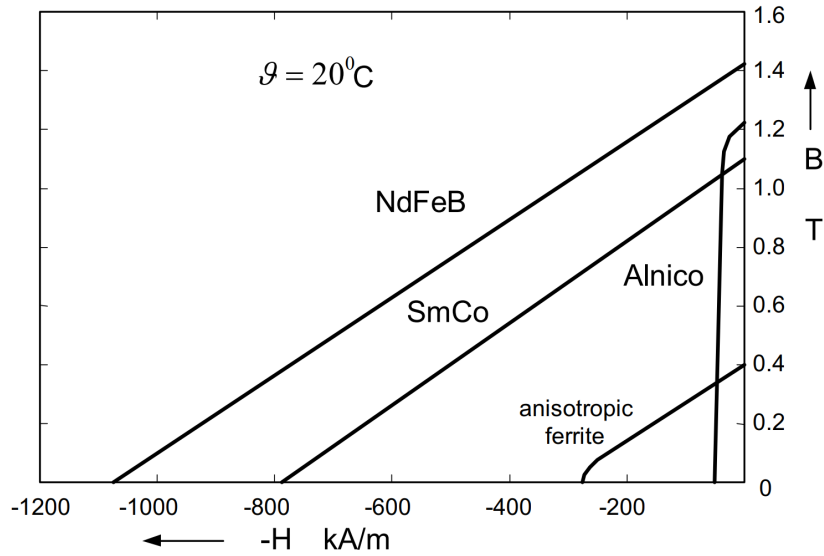
Důležité je uvést fakt, že samotným tvarováním PM, pokud konstrukce stroje dovolí jistou prostorovou toleranci, můžeme ovlivnit tvar magnetické indukce ve stroji a tedy i jeho vlastnosti (např. momentové zvlnění). Obvykle užívané permanentní magnety v elektrických strojích a jejich základní vlastnosti jsou:

- **AlNiCo** - tyto magnety bývají vytvořeny ze slitin hliníku, niklu a kobaltu. Vyznačují se příznivou výrobní cenou, vysokou teplotní stabilitou a chemickou stálostí, proto jsou vhodné do aplikací s vysokými teplotními nároky. Alnico magnety mají vysokou remanentní indukci (běžně  $B \approx 1,2$  [T]), avšak nízkou koeritivní sílu ( $H_c \approx 50$  [kA/m]) a také nízký energetický součín ( $BH_{\max} \approx 60$  [kJ/m<sup>3</sup>]). Jejich nevýhodou jsou nevhodné mechanické vlastnosti, tyto magnety jsou velice tvrdé a křehké, což ztěžuje jejich opracování a tváření (to může být problémem v případě, kdy je požadována optimalizace tvaru magnetu pro ideální průběh magnetické indukce). Tyto magnety mají úzkou stabilní oblast magnetu, a proto jsou náchylné k demagnetizaci.
- **Ferity** - Feritové magnety (nebo také keramické), jsou často používané magnety díky kombinaci jejich příznivých vlastností, a to: nízká cena (jejich pořizovací cena je mezi magnety pro aplikaci v elektrických strojích nejnižší), dobrá dostupnost na trhu a chemická stálost (jsou odolné vůči korozi). Navzdory tomu, že mají například v porovnání s AlNiCo magnety výrazně menší remanentní indukci, jejich energetický součín ( $BH_{\max}$ ) je vyšší. Mají také vhodný tvar demagnetizační křivky, odolávají tedy výrazně vyšším demagnetizačním polím (v porovnání s AlNiCo). Jejich nevýhodou je nízká teplotní odolnost.

- **Sm-Co** Samarium - kobaltové magnety, bývají řazené mezi tzv. magnety ze vzácných zemin (společně s Nd-Fe-B). Vyznačují se vysokou remanentní indukcí a vysokou koercitivní silou, tedy i vysokým energetickým součinem. Mají také velice dobrou teplotní a chemickou stabilitu, po obrobení nejsou vyžadovány další povrchové úpravy. Nevýhodou je především jejich vysoká cena, dále pak jejich křehkost a náchylnost k tříštění. Používají se především tedy v aplikacích, kde je kladen důraz na vysoký měrný moment a vysokou provozní teplotu stroje.
- **Nd-Fe-B** Posledním, avšak velmi důležitým typem současně používaných magnetů, které v posledních letech zaznamenaly velký pokrok ve vývoji jsou neodym - železo - borové magnety (Nd-Fe-B). Mají vysokou koercitivní sílu i remanentní indukci a maximální energetický součin. To znamená, že pokud by měl být pro určitou aplikaci nahrazen např. feritový magnet za Nd-Fe-B, bude nový PM výrazně menší pro poskytnutí stejného výkonu stroje. Současně jsou tyto magnety v porovnání se Sm-Co levnější. Nevýhodou těchto magnetů je silná teplotní závislost magnetických vlastností a také fakt, že sloučeniny Nd-Fe-B jsou bez dostatečného ošetření náchylné ke korozi. Pro ošetření bývá povrch zinkovaný, nebo niklovaný, případně pokryt pryskyřicí. [9]

Tab. 1.1: Přehled vybraných vlastností permanentních magnetů používaných pro elektrotechnické účely [9]

Fyz. veličina [jednotka]	Al-Ni-Co	Ferrity	NdFeB	SmCo
Remanentní indukce $B_r$ [T]	0,55-1,37	0,20-0,46	1,08-1,49	0,87-1,19
Koercitivní síla $H_c$ [kA/m]	38-151	140-405	876-2710	1350-2400
Energ. součin $BH_{max}$ [kJ/m <sup>3</sup> ]	10,7-83,6	6.4-41.8	220-430	143-251
Hustota $D$ [kg/dm <sup>3</sup> ]	6,8-7,3	4.9-5.1	7,4-7,5	7,4-7,5
Měrná rezistivita $\rho$ [nΩm]	470-750	$10^7 - 10^{11}$	12-16	50-900
Curieho teplota $T_c$ [°C]	800	450	310	720-820
Max. prov. teplota $T_{max}$ [°C]	500	300	150	250-350
Relativní permeabilita $\mu_r$ [-]	1.3-6.2	1,05-1,2	1,0-1,1	1,0-1,1



Obr. 1.9: Demagnetizační křivky současně používaných PM v elektrických strojích,  $f(B) = H_c$ , převzato: Fig. 2.4 [11]

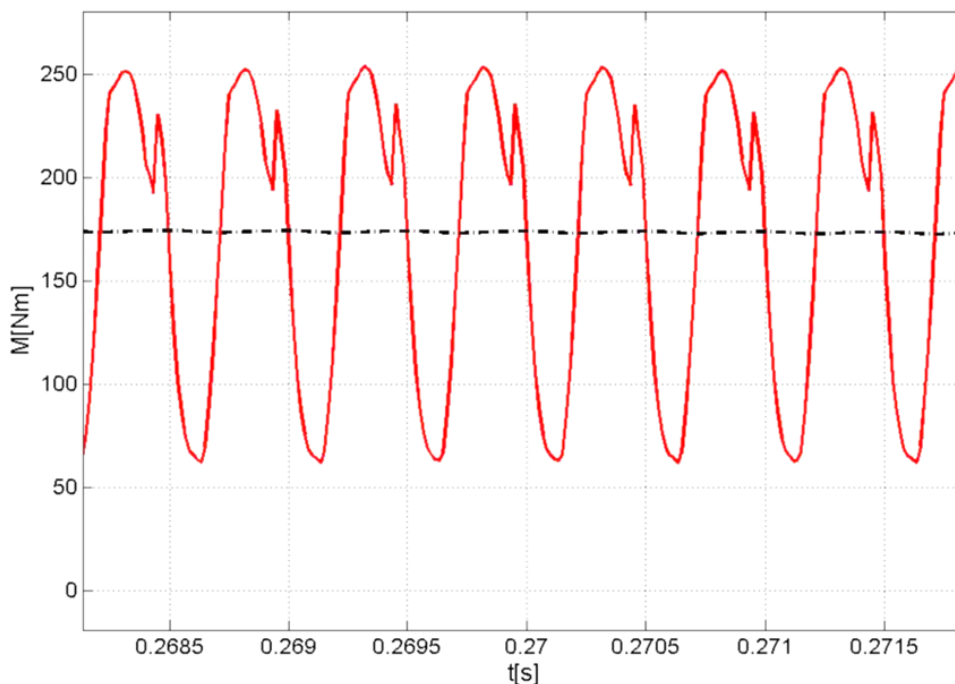
Graf na obrázku 1.9 ukazuje typické demagnetizační křivky v současné době vyráběných permanentních magnetů. Graf soužší k ilustraci vlastností obecně používaných magnetů. Křivky jsou vyobrazeny pro teplotu okolí  $\vartheta = 20^{\circ}\text{C}$ . V tabulce 1.1 jsou uvedeny typické hodnoty PM používaných pro elektrotechnické účely. [11]



## 2 Momentové zvlnění

Toto je kapitola popisující momentové zvlnění. Tato část si berte za cíl získat poznatky o problematice momentového zvlnění, jsou zde popsány základní principy jak vzniká momentové zvlnění a jaké jsou způsoby redukce momentového zvlnění.

### 2.1 Co je momentové zvlnění



Obr. 2.1: Zvlnění momentu, převzato: Fig. 7 [12]

Momentové zvlnění u elektrických strojů je odchylka okamžité hodnoty vnitřního momentu stroje od průměrné hodnoty, obvykle bývá vyjadřována v procentech. Z pravidla je tato odchylka periodická, má charakteristickou frekvenci a amplitudu viz obrázek 2.1, kde červená je okamžitá hodnota momentu a černá je průměrná hodnota momentu. Na moment jako takový, bývá obvykle nazíráno jako na průměrnou hodnotu momentu vzniklého ve stroji, která je ovšem vůči realitě značně filtrovaná, viz obrázek 2.1, který ukazuje zvlnění SR-Motoru (jehož jmenovité parametry jsou:  $n = 5000$  [ot/min],  $M_{\text{avg}} = 175$  [Nm].)

Následky momentového zvlnění jsou: vibrace stroje, které zvyšují hlučnost stroje, zvýšené mechanické namáhání např. ložiska v motoru i namáhání poháněného ústrojí, dále také zpětné vlivy na napájecí soustavu (problematika EMC). Zvlnění momentu zanáší odchylku při měření a zkoušení elektrických strojů, což ztěžuje určování parametrů elektrického stroje zejména účinnosti u vysokootáčkových strojů.

Ideovou výjimku z nežádoucích vlivů zvlnění tvoří krokové motory, kdy dostatečné zvlnění resp. parazitní reluktanční moment (PRM) udrží rotor „uzamčený“ v určité vyžadované poloze a pro tyto motory je naopak tento parametr důležitý. U krokových motorů není ovšem tento parametr nazýván zvlněním resp. PRM, ale statickým vazebným momentem  $M_{sv}$  [Nm], resp. statickým vazebným momentem nenabuzeného motoru  $M_{sv0}$  [Nm], princip vzniku takového momentu je ale identický. Popis vzniku zvlnění a vysvětlení PRM bude popsáno v následující podkapitole. [2] [13]

## 2.2 Vznik momentového zvlnění

Jak bylo popsáno výše, momentové zvlnění se týká všech elektrických motorů avšak zejména bývá zkoumáno u SR-Motorů, motorů s permanentními magnety a u indukčních strojů. Momentové zvlnění je důsledkem konstrukčních a napájecích dispozicí motoru, vzniká vlivem:

- **Nesinusová excitace magnetického toku podél vzduchové mezery**, (v zahraniční literatuře bývá tento jev nazýván *non-ideal back EMF waveform*). Zvlnění vzniká v důsledku neideálního průběhu magnetické indukce ve vzduchové mezeře, průběh je ovlivněn geometrickým tvarem vinutí/zubů nebo PM, které nelze realizovat v ideálních proporcích, to je v určité míře přirozenou vlastností většiny elektrických točivých strojů. Podle své konstrukce jsou pak jednotlivá řešení na zvlnění náchylnější – typickým příkladem takového stroje je spínaný reluktanční motor (blíže popsáný v kap. 1.2.1), která má díky své konstrukci s vyjádřenými póly statoru i rotoru deformovaný průběh magnetické indukce. Jiná řešení mají naopak přirozeně menší zvlnění – synchronní motor s hladkým rotorem.

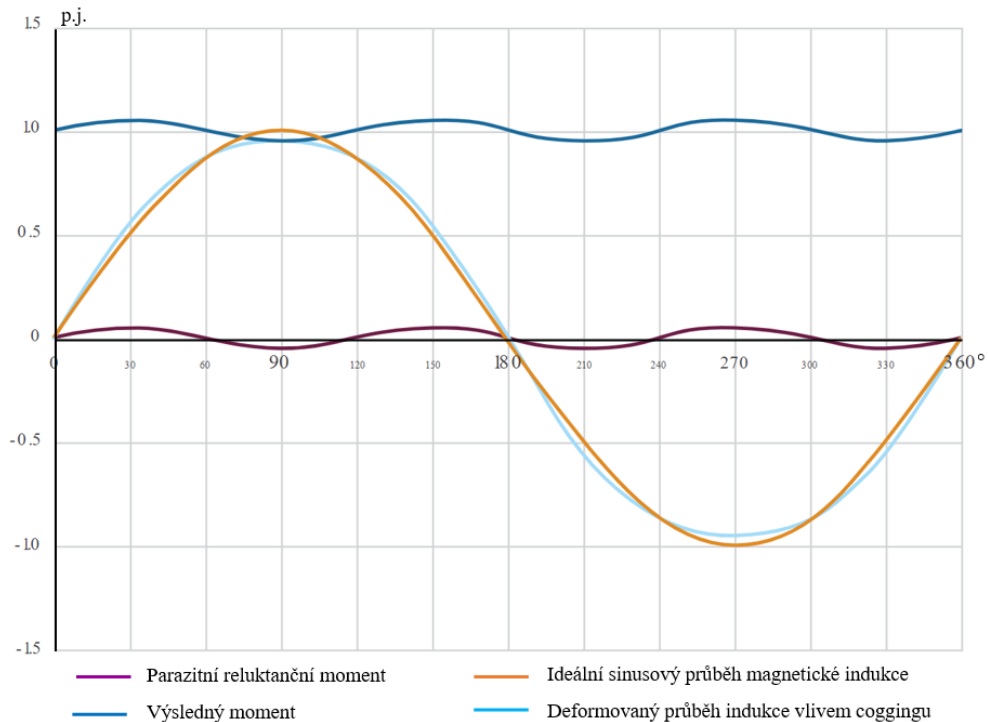
Je více možností, jak tímto způsobem vzniklé momentové zvlnění omezit. Jako příklad lze uvést zvyšování počtu pól párů, optimalizace tvaru magnetů a zubů stroje, použití kompenzačních vinutí a optimalizací řídicího algoritmu stroje (optimalizace napájení měničem). [8]

- **PRM – Interakce permanentního magnetu s železem statoru**, v zahraniční literatuře pojmenovaná *Cogging torque* (lze přeložit jako ozubený/zubový). Vzniká především u motorů s permanentními magnety (případně u indukčních strojů, bude vysvětleno níže), kdy v průběhu otáčení rotoru permanentní magnety interagují s železem (se zuby) statoru. V průběhu otáčky se mění dráha magnetického toku PM a vlivem odlišné vzdálenosti od železa statoru se mění magnetický odpor. Každý permanentní magnet má v blízkosti železa tendenci snížit svojí reluktanci se svým okolím a má tedy snahu „přitáhnout se“, osově srovnat se s nejbližším zubem statoru. Vznik tohoto zvlnění není podmíněn napájením a lze jej fyzicky cítit i u nenapájeného motoru. V průběhu otáčení se projevuje jako „cukání“ rotoru, tak jak se zuby snaží při-

táhnout k nejbližšímu železu. PRM se nejvíce projevuje v nízkých otáčkách, s rostoucími otáčkami pomáhá setrvačnost rotoru tento vliv snižovat. [13]

Podobné je to i u indukčních strojů, které sice nevyužívají permanentních magnetů, ale v železech rotoru se indukuje elektrický proud, který kolem želez vyvolává magnetické pole, které interaguje s železem statoru podobně jako v případě strojů s PM. Z konstrukčního hlediska je na zvlnění momentu indukčního stroje nazíráno jako na PRM, protože magnetické pole vyvolané v kotvě rotoru interaguje s železem statoru. [14]

Možnosti omezení PRM jsou například: použití konstrukce bez-drážkového statoru, úprava geometrie rotoru vytvořením dodatečné bariéry magnetickému toku, asymetrický úhel rozevření drážek u rotorů, které mají magnety vsazené ve tvaru V (viz obrázek 1.6 f)) nebo užití podélného natočení rotoru resp. natočení statorových drážek (tzv. *skewing*). [15]



Obr. 2.2: Příklad PRM, upraveno [16]

Obrázek 2.2 ukazuje příklad, jak PRM ovlivňuje výsledný moment stroje. Svislá osa je vyvedená v poměrných jednotkách, horizontální představuje geometrické stupně v průběhu jedné otáčky. Fialový průběh ukazuje PRM vyvolaný interakcí PM s železem statoru, modrá je pak výsledný moment stroje. Podobně oranžová ukazuje ideální průběh magnetické indukce podél vzduchové mezery a světle modrá deformovaný průběh vlivem PRM.

Ačkoli PRM značně přispívá do celkového momentového zvlnění, je nutné uvést, že celkové momentové zvlnění je určeno celkovými elektromagnetickými vlastnostmi stroje. Tyto vlastnosti se však při napájení mění a tedy PRM se neprojeví exaktně stejným způsobem u nenapájeného a u napájeného stroje. Na to je při návrhu stroje brát zřetel a je proto nutné porovnat výsledky simulací ve stavu bez napájení s výsledky napájeného stroje. Faktem ale zůstává myšlenka, že pokud se docílí snížení PRM u nenapájeného stroje, výsledné zvlnění u napájeného stroje bude nižší.

## 2.3 Rešerše konvenčních technik redukce momentového zvlnění v točivých elektrických strojích

Momentové zvlnění je nežádoucím, avšak nevyhnutelným důsledkem konstrukčních řešení elektrických strojů, pomocí vhodné optimalizace návrhu je však možné snižovat na únosnou míru. Při výběru vhodné metody snižování je nutné uvážit vstupní podmínky tak, aby byla vybrána metoda nebo kombinace metod, které povedou k dostatečné efektivitě za přijatelnou cenu. Jako příklad je uvažována situace motoru, který je již zavedený ve výrobě delší dobu a projevilo se u něj z dlouhodobého hlediska zvlnění momentu jako problematické (např. kvůli zvýšenému mechanickému opotřebení ložisek). U takového stroje by byla násilná změna geometrie/vivnutí příliš nákladná, protože již zavedená výroba má vypracované pracovní postupy a přípravky pro výrobu konkrétního stroje, taková změna ve výrobním procesu by nedávala z ekonomického hlediska smysl. Proto je vhodné v dané situaci volit jiné způsoby např. úpravu napájení, mírnou dodatečnou úpravu geometrie atd. Naproti tomu u motoru, který je ve fázi prototypu nebo ještě není fyzicky vyroben a je zkoumán pouze simulacemi, je možné volit potenciálně efektivnější metody za vyšší cenu a vyšší náročnosti provedení úprav. Jednotlivé možnosti snižování momentového zvlnění budou popsány v této podkapitole.

Vhodnost a schopnost aplikovat jednotlivé metody může být pro jednotlivé typy strojů odlišná. Obecně lze metody rozdělit do čtyř kategorií.:

- Optimalizace geometrického tvaru:
  - změnou tvaru nebo zavedením bariér magnetickému toku
  - změnou úhlu rozevření magnetů (u rotorů s magnety uloženými do tvaru V)
  - asymetrické uložení magnetů v rotoru
  - použití bezdrážkového rotoru
  - optimalizace tvaru, velikosti zubů a drážek (nesymetrická velikost zubu, velikost vzduchové mezery mezi zuby atd.
  - použití pomocných pólů
  - optimalizace tvaru pólu
  - změna směru magnetizace PM, sesazení magnetů podle Halbachova pole

- natočení drážek statoru, nebo rotoru (skewing)
- odsazení magnetů odsazení v podélném směru
- tvarování PM
- Změna poměru počtu drážek na pól a fázi motoru:
  - pravidelný počet
  - zlomkový
- Změna rozložení vinutí statoru:
  - jednovrstvé vinutí
  - dvouvrstvé vinutí
  - vinutí se zkráceným krokem
- Optimalizace řízení a napájení motoru

Tabulka 2.1 ukazuje řešerši publikovaných článků, ve kterých se jejich autoři zabývali snižováním zvlnění momentu u elektrických motorů, a to především u IMP-SM, SM-SM a SynRM. Snižování momentu bylo docíleno pomocí metod popsaných v 1. sloupci tabulky 2.1. Topologie stroje a vybrané parametry jsou v následujících sloupcích. Dosažené procentuální snížení zvlnění je v předposledním sloupci, jedná se o poměr zvlnění momentu původního originálního návrhu a zvlnění u upraveného stroje. V posledním sloupci jsou křížové odkazy k citovaným článkům.

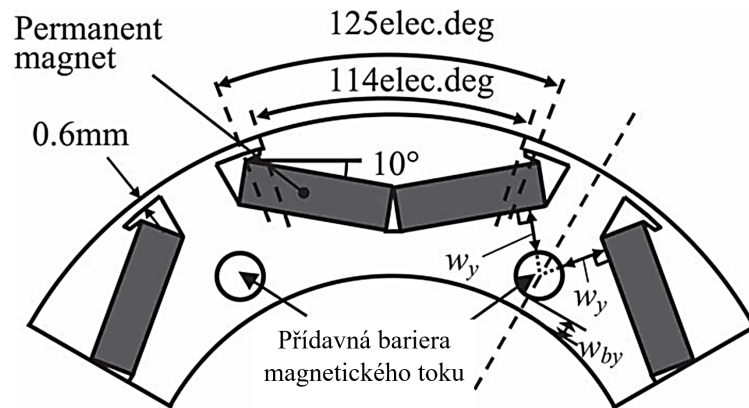
Ke snižování momentu byly zejména použity metody optimalizace geometrického tvaru a to: změna tvaru bariér, asymetrické uložení magnetů, optimalizace tvarů zubu statoru, případně změna typu vinutí motoru tak, aby se magnetický tok v mezeře blížil ideálnímu sinusovému tvaru. Nejlepších výsledků bylo dosaženo v případě článku [22], kde bylo zvlnění momentu sníženo až o 58 %. Takových výsledků se podařilo docílit za pomoci komplexního přepracování geometrie stroje a materiálu PM. Principy jednotlivých metod jsou představeny v následujících podkapitolách.

Tab. 2.1: Rešerše publikovaných článků o snižování zvlnění momentu

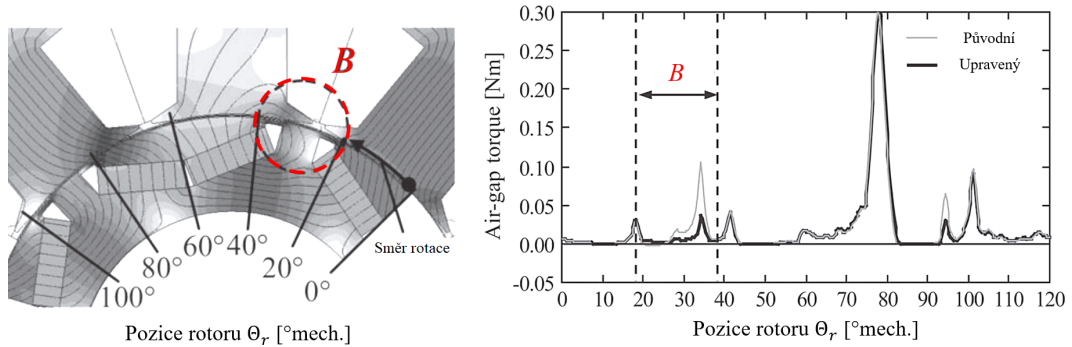
Metoda optimalizace	Typ stroje	M [Nm]	$n_s$ [ $min^{-1}$ ]	$Q_s$ [-]	2p [-]	$\Delta m_{ripp}$ [%]	Reference
Optimalizace bariér rotoru	IPM-SM	30	1750	9	6	28	[17]
Optimalizace bariér rotoru	SynRM	85	1500	36	4	34,1	[20]
Rotor s asymetrickými bariérami	IPM-SM	30	3200	12	4	14	[21]
Tvarování železa rotoru IPM motoru	IPM-SM	24	2000	12	8	33,1	[22]
Optimalizace tvaru zubů, drážek a PM	IPM-SM	400	1200	48	8	58	[23]
Optimalizace materiálu PM a tvaru rotoru	IPM-SM	210	380	48	8	50	[24]
Rozdělení magnetů (Consequent-Pole)	IPM-SM	2,13	1750	9	6	28	[25]
Otevření zubu statoru	SM-SM	111	-	12	8	14,4	[26]
Natočení statorových drážek o 15°	SM-SM	28	600	18	4	71,4	[27]
Zlomkové vinutí a vyosení magnetů vůči ose pólu	SM-SM	29,6	600	27	6	50	[27]

### 2.3.1 Redukce zvlnění přidáním bariéry magnetickému toku

Jednou z možných alternativ geometrických úprav rotoru je zkvalitnění průběhu zvlnění přidáním dodatečné bariéry magnetického toku do geometrie rotoru, v publikovaném článku [17] byl do geometrie rotoru přidán kruhový otvor, viz obrázek 2.3. Otvor je situován mezi póly rotoru v prostoru pod PM. Kruhová bariéra snižuje magnetický tok procházející „zubem rotoru“, což snižuje magnetickou indukci procházející oblastí B, viz obr. 2.4 vlevo. Důsledek a snížení zvlnění je patrný na grafu vpravo, kde tmavá čára náleží upravenému rotoru, světlá originálnímu motoru. Přidáním otvoru bylo docíleno snížení ztrát v železe rotoru o 12%.



Obr. 2.3: Úprava přidáním kruhové bariéry mag. toku, upraveno: Fig. 23 [17]



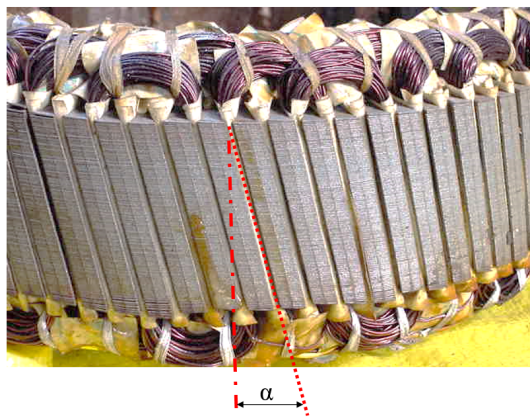
Obr. 2.4: Oblast pro snížení magnetického toku, upraveno: Fig. 25 [17]

### 2.3.2 Redukce zvlnění momentu pomocí natočení statoru a rotoru

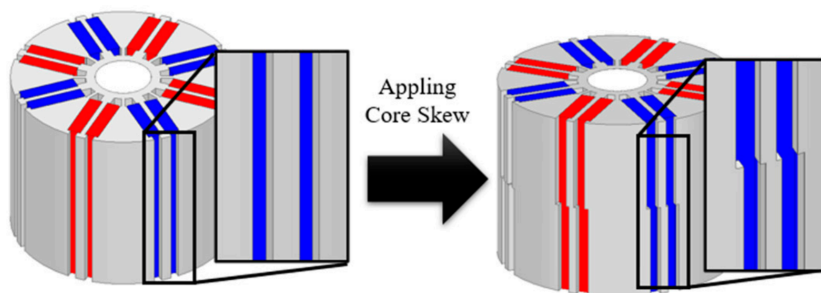
Často užívanou metodou, vedoucí ke snížení zvlnění momentu je použití skewingu - natočení. Natočení lze u IPM-SynRM realizovat dvěma způsoby a to:

- Natočení statorových drážek viz obrázek 2.5 a)
- Odsazení-natočení rotoru v podélném směru, obrázek 2.5 b)

U asynchronních motorů lze skewing také realizovat natočením svazku rotorové klece.



(a) Natočení drážek statoru



(b) Natočení rotoru

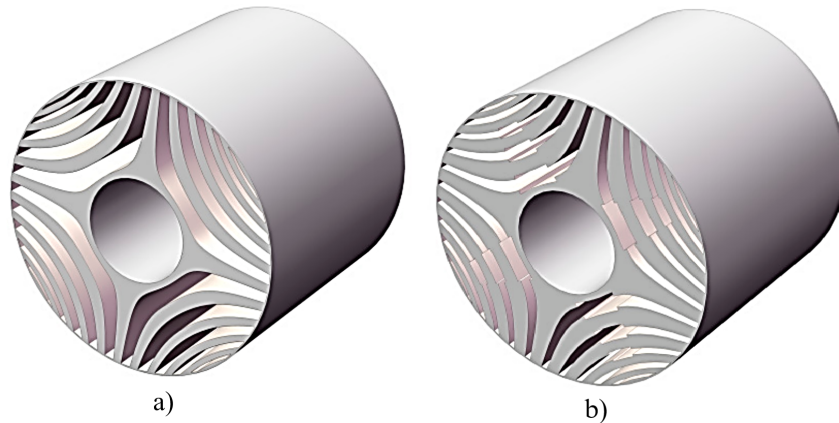
Obr. 2.5: Možnosti provedení natočení, upraveno: 14. obrázek [18] a Figure 5 [19]

Natočení statorových drážek se vyznačuje plynulým přechodem jednotlivých vrstev podél hloubky železa statoru. Tento způsob byl společně se změnou tvaru zubu užít v článku [26]. Plynulé natočení rotoru podobné natočení statorových drážek lze realizovat, avšak to je problematické vzhledem k nutnému specifickému tvarování permanentních magnetů, proto bývá natočení rotoru realizováno skokovým odsazením. Odsazení může být dvou nebo více stupňové. U vícestupňových odsazení bývají jednotlivé stupně řazeny buď lineárně se stejným odsazením, nebo sestavené do tvaru V, případně jsou jednotlivé vrstvy sesazené na přeskáčku.



### 2.3.3 Redukce zvlnění momentu pomocí optimalizace tvaru vzduchové bariéry

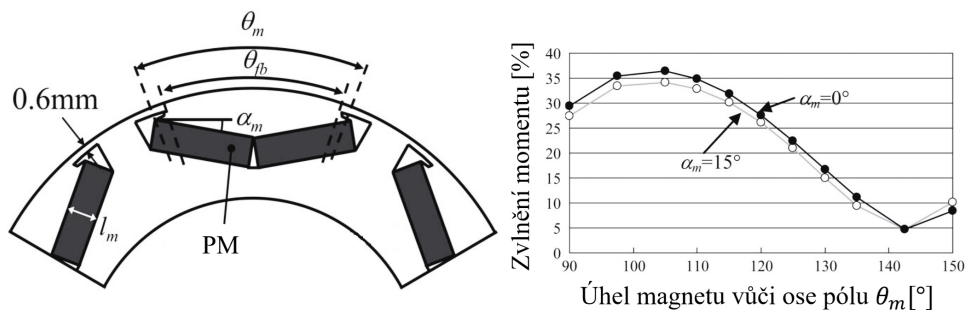
Další možností geometrických úprav vedoucí ke snížení zvlnění momentu, je optimalizace tvaru bariéry magnetického pole. Příkladem toho jsou články [17] a [20]. Obrázek 2.6 ukazuje příklad změny provedené v článku [20] kde rotor SynRM v pravé části b) je upravenou verzí původního stroje a). Autoři článku uvádějí, že touto změnou geometrie se podařilo snížit zvlnění momentu stroje o 34,1 %.



Obr. 2.6: Úprava bariér rotoru, upraveno: Fig. 12 [20]

### 2.3.4 Redukce zvlnění momentu pomocí změny úhlu rozevření PM

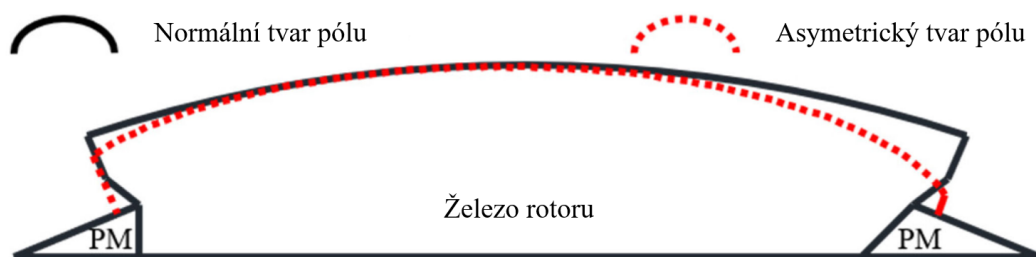
Článek [17] diskutuje mimo optimalizaci tvaru bariéry magnetického toku také ideální úhel rozevření permanentních magnetů  $\theta_m$ . Způsob provedení takové změny ukazuje obrázek 2.7, v pravé části obrázku je pak znázorněn vliv této změny na celkové zvlnění stroje. Tato změna je však doprovázena snížením celkového momentu a změnou délky magnetu vůči směru magnetického pole statoru, proto je při takové úpravě nutné brát zřetel na možné demagnetizační účinky.



Obr. 2.7: Změna úhlu uložení PM magnetů, upraveno: Fig. 14 a Fig. 17 [17]

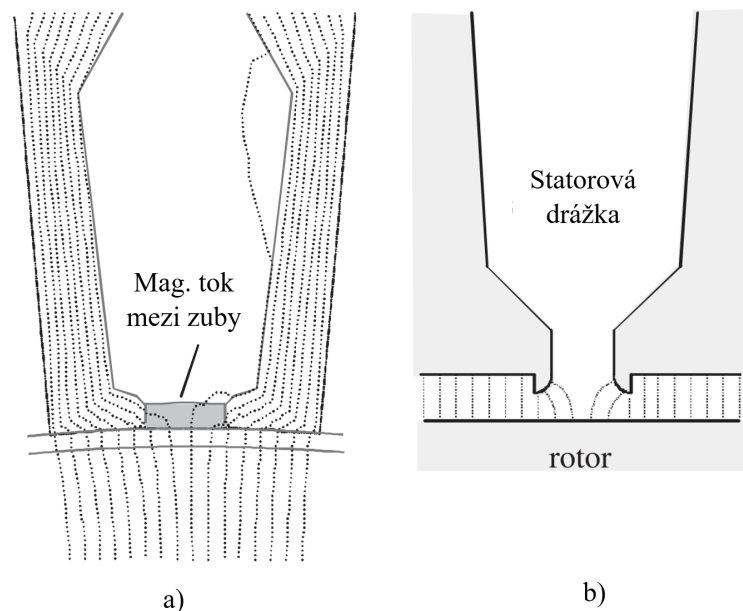
### 2.3.5 Redukce zvlnění momentu pomocí asymetrického tvarování železa rotoru

Další používanou možností jejíž pomocí lze docílit snížení zvlnění momentu u IPM-SM je změna tvaru železa rotoru. Magnety vzhledem ke svému umístění způsobují nesinusové sycení vzduchové mezery. Magnetický tok je vyšší v blízkosti magnetů a nižší v prostoru mezi nimi. Tvarováním rotoru je měněna šířka vzduchové mezery tak, aby bylo dosaženo sinusového průběhu magnetického toku ve vzduchové mezeře. Asymetrickým tvarem je docíleno lepšího průběhu magnetické indukce motoru při zátěži, kdy magnetický tok je zkreslen vlivem reakce kotvy. Možný způsob provedení názorně ukazuje obrázek 2.8. Tento způsob je publikován v článku [22].



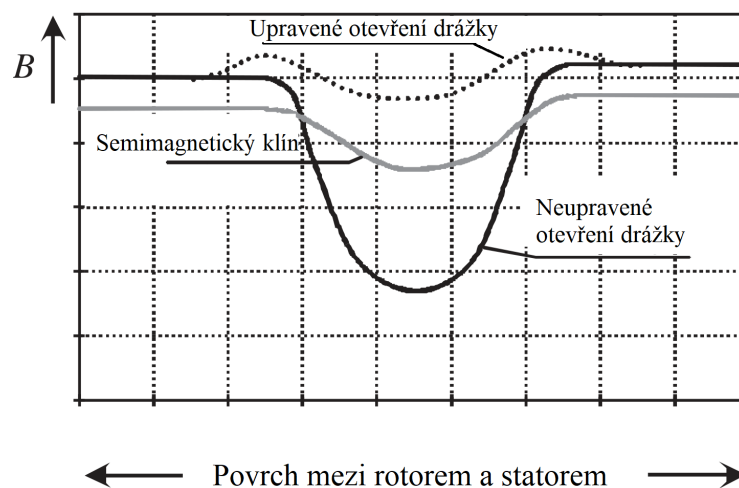
Obr. 2.8: Asymetrické provedení rotoru IPM-SM, upraveno: Fig. 6 [22]

### 2.3.6 Redukce zvlnění momentu pomocí tvarování zubu statoru



Obr. 2.9: Ukázka tvarování zubu statoru, upraveno: Fig. 3.6 a) a c) [8]

Správným ošetřením otevřením zubu statoru lze snížit poklesy magnetického toku ve vzduchové mezeře mezi rotorem a státorem. Tyto odchylky lze ošetřit například změnou tvaru otevření drážek, použitím semi-magnetického klínu mezi zuby statoru nebo konstrukcí s úplným uzavřením drážek. Vliv otevření drážky na průběh magnetického toku ve vzduchové mezeře je ukázán na obrázku 2.10 [8]. Tento způsob byl například součástí úprav motoru citovaného v článku [23].



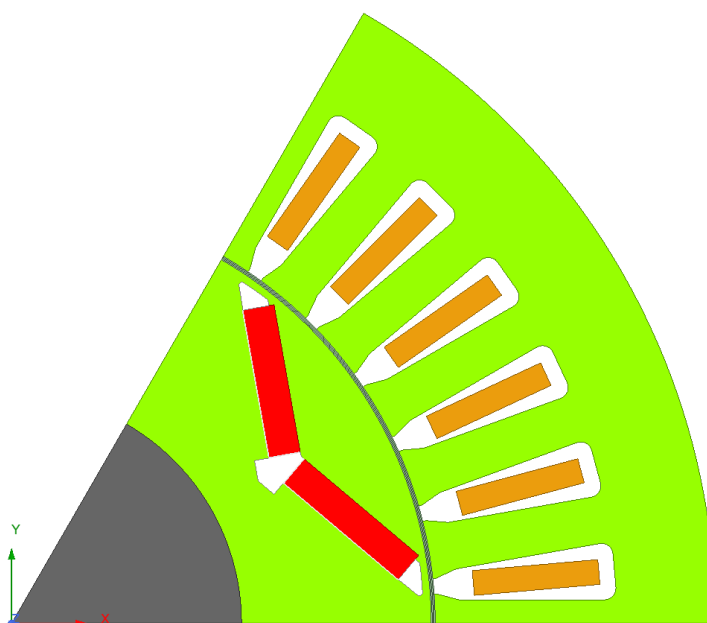
Obr. 2.10: Průběh mag. indukce podél povrchu statoru, upraveno: Fig. 3.6 b) [8]

### 3 Model pro analýzu momentového zvlnění

Elektromagnetická analýza je provedena metodou konečných prvků, pomocí výpočtového software ANSYS Maxwell. Tato kapitola má za cíl představení parametrů originálního neupraveného modelu, na kterém jsou následně aplikované geometrické úpravy pro snížení momentového zvlnění.

#### 3.1 Motivace simulací

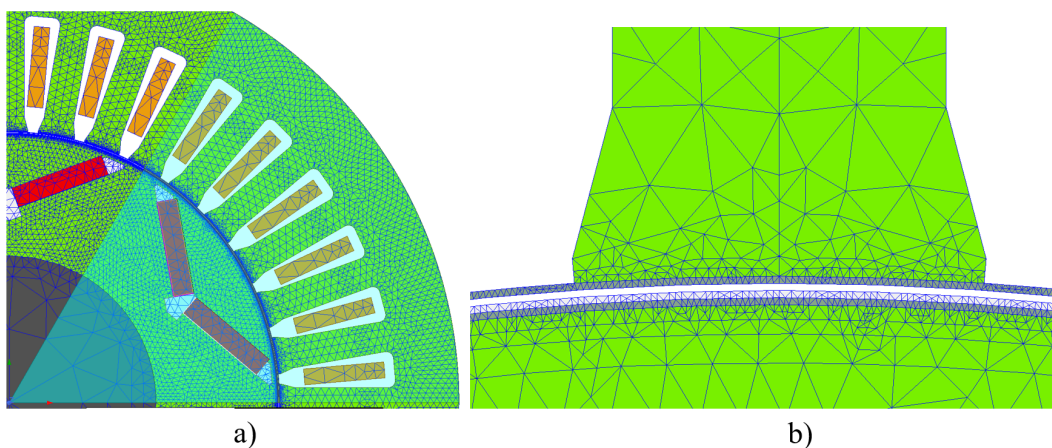
Cílem práce je snížení momentového zvlnění pomocí vhodných geometrických úprav a porovnat výsledky simulací s jinými konvenčně používanými metodami snižování zvlnění. Pro simulace je použit stroj společnosti Baumüller, u kterého se provozem projevilo vysoké zvlnění momentu jako problémové. Motivací práce je tedy zjistit vliv a vhodnost jednoduchých geometrických úprav na zvlnění stroje, geometrie však vzhledem k zavedeným výrobním procesům nemůže být měněna libovolně. V praktické části práce bude zkoumán vliv dodatečných bariér magnetického toku podobně, jako bylo uvedeno v kapitole 2.3.1. Řez původním modelem, je na obrázku 3.1.



Obr. 3.1: Originální model zkoumaného motoru

## 3.2 Metoda konečných prvků

Metoda konečných prvků (MKP) nebo také anglicky FEM (finite element method) je jednou z nejčastěji používaných metod matematických simulací užívaných pro simulaci elektromagnetických jevů, strojírenství, stavebnictví a dalších ne pouze jen technických odvětví. Metoda konečných prvků umožňuje rozložení složitých fyzikálních problémů, pro které neexistuje dostatečně přesné řešení pomocí analytických vzorců, na konečné množství prvků, výpočetně nenáročných řešení diferenciálních rovnic pro nekonečně malé parciální oblasti. Tyto oblasti jsou propojeny do vzájemné výpočtové sítě které je specifikována podle geometrických rozměrů, materiálových vlastností a okrajových podmínek. Výpočtový model je tedy specifikován výpočtovou sítí o konečném počtu prvků, v každém jednotlivém výpočtovém bodě (uzlu) probíhá numerický výpočet zkoumaných hodnot.



Obr. 3.2: Ukázka výpočtové sítě originálního modelu, MKP

Výhoda řešení pomocí MKP je dosažení přesných výsledků pro rozličné geometrie zkoumaných problémů, nevýhodou je velmi značné množství zpracovávaných dat a tedy potřebná doba pro získání výsledků z prováděné simulace. Přesnost výsledků je určena jemností výpočtové sítě, proto bývá síť zjemňována v místě, kde jsou předpokládány největší změny. V praxi u elektrického stroje to je vzduchová mezera mezi rotorem a statorem, viz obrázek 3.2 b). Obrázek 3.2 a) ukazuje nastavení výpočtové sítě (tzv. mesh) pro analýzu originálního neupraveného modelu stroje. Naproti metodě konečných prvků stojí nástroje využívající analytických vzorců (např. RMXprt, MotorCAD), případně výpočet pomocí metody odporové sítě. Tyto způsoby mohou být pro výpočet výrazně rychlejší, avšak výsledky nemusí vykazovat takovou přesnost právě jako v případě MKP a to především v případě drobné změny geometrie, tak jako je tomu použito v této práci. [28]

### 3.3 Vybrané parametry originálního modelu

Analyzovaný model je synchronní stroj s permanentními magnety vnořenými do tvaru V. Vybrané parametry původního návrhu stroje jsou představeny v tabulce 3.3 a použité materiály pro simulaci stroje jsou uvedeny v tabulce 3.2.

Tab. 3.1: Vybrané parametry originálního návrhu stroje

Parametr	Symbol	Hodnota	Jednotka
Typ stroje	IPM-SM	-	-
Nominální moment	$M_N$	310	Nm
Nominální otáčky stroje	$n_N$	4500	$min^{-1}$
Počet pólů 2p	2p	6	-
Počet drážek statoru	$Q_s$	36	-
Počet fází	$m_f$	3	-
Maximální proud fází	$I_{Lmax}$	36,77	A

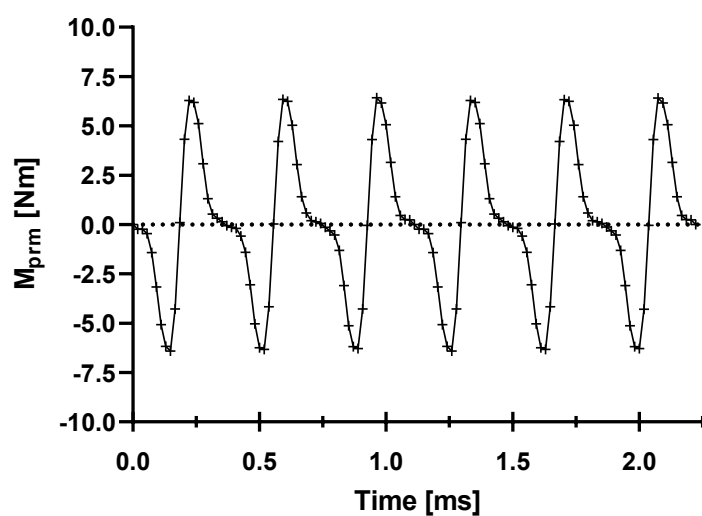
Tab. 3.2: Tabulka použitých materiálů modelu stroje

Materiál stroje	
Plechý statoru	M330-35A
Plechý rotoru	M330-35A
Materiál PM	NdFe35
Statorové vinutí	Copper 75C
Hřídel	Steel 1010

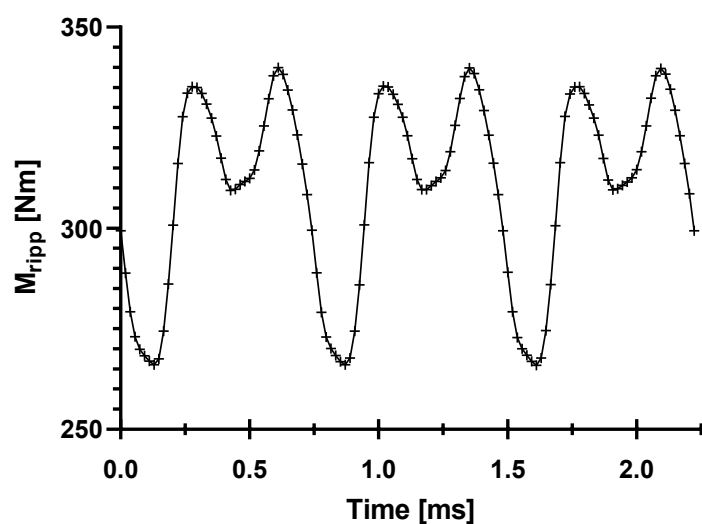
Z důvodu ochrany práv duševního vlastnictví společnosti Baumüller není možné veřejně publikovat a konkretizovat veškeré detaily návrhu stroje jako jsou exaktní rozměry stroje, drážek, typ a provedení použitého vinutí atd.

### 3.4 Výsledky simulace originálního modelu

Na obrázku 3.3 a 3.4 jsou vyobrazené výsledné průběhy momentu v závislosti na čase a to pro nenapájený stroj a pro stroj napájený nominálním proudem  $i_N$ . Čas simulace je nastaven na  $\frac{1}{6}$  geometrické otáčky stroje, tím je zjištěn průběh momentu v průběhu pólu motoru. Protože rotor je složen ze 6-ti symetrických pólů, bylo by 6 totožných průběhů navázáno za sebou. Z průběhu je patrná interakce magnetů s železem statoru, průběh obsahuje 6 špičkových hodnot odpovídajícím 6-ti zubům statoru naproti pólu motoru. U napájeného stroje je potom patrná interakce s fázovým vinutím založeným v drážkách statoru.



Obr. 3.3: Průběh zvlnění PRM nenapájeného neupraveného stroje



Obr. 3.4: Průběh zvlnění momentu napájeného neupraveného stroje

Tab. 3.3: Významné body na průběhu momentu nenapájeného a napájeného stroje původního neupraveného modelu

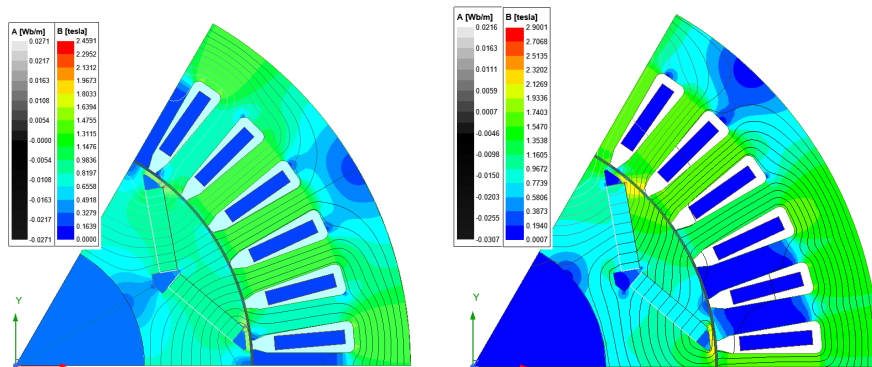
Model	$M_{avg}$ [Nm]	$M_{max}$ [Nm]	$M_{pk2pk}$ [Nm]	$M_{ripp}$ [%]
Originální $I_{=0}$	–	6,42	12,83	–
Originální $I_N$	310,13	339,96	74,02	23,87

Zvlnění momentu je určeno vztahem 3.1, příklad výpočtu je proveden pro 2. řádek tabulky 3.3. Hodnota zvlnění napájeného stroje je 23,87%. Hodnota maximálního

momentu pro nenapájený stroj ( $M_{\max, I=0}$ ) je rovna PRM. Jedná se tedy o moment, který působí proti „otáčení“ rotoru, stojícího stroje. Tento výsledek je také možné interpretovat tím způsobem, že pokud by bylo žádáno otočení rotoru u stojícího motoru, je potřeba na hřídeli vyvinout točivý moment větší než  $M_{\max, I=0}$ , aby bylo docíleno pootočení rotoru.

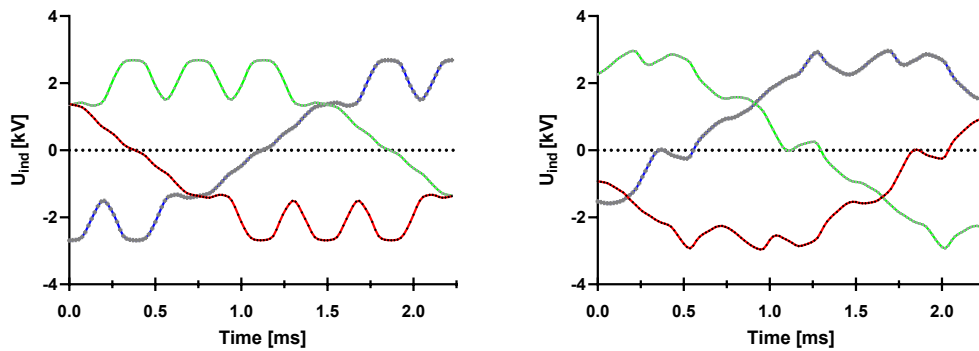
$$M_{\text{ripp}} = \frac{M_{\text{pk2pk}}}{M_{\text{avg}}} \cdot 100 = \frac{74,02}{310,13} \cdot 100 = 23,87\%. \quad (3.1)$$

Na obrázku 3.5 je zobrazeno rozložení magnetické indukce v řezu geometrií rotoru, graf na obrázku 3.6 potom indukovaná napětí ve vinutí statoru kde červená náleží fázi A, zelená fázi B a modrá fázi C.



(a) nenapájený stroj, neupravený model (b) napájený stroj, neupravený model

Obr. 3.5: Sycení magnetického obvodu stroje v čase  $t=0$



(a) nenapájený stroj, neupravený model

(b) napájený stroj, neupravený model

Obr. 3.6: Průběh indukovaného napětí ve vinutí



## 4 Simulace upravených modelů - vytvoření dodatečné bariéry magnetickému toku

V rámci práce bylo prověřeno 16 různých geometrických úprav modelů stroje, z důvodu přehlednosti práce jsou v textu představeny a diskutovány pouze vybrané výsledky. Kompletní přehled všech vypočtených výsledků s popisem variant geometrických úprav jsou ve dvou tabulkových přílohách (PRILOHA\_A.xlsx a PRILOHA\_B.xlsx) k této práci. V následujících podkapitolách jsou představeny vybrané výsledky proěřovaných geometrických úprav

### 4.1 Vliv kruhových bariér na zvlnění momentu

První zkoumanou úpravou geometrie rotoru je vliv vytvořených děr v železe rotoru. Díra resp. díry jsou umístěny v prostoru nad magnety a vytváří dodatečnou bariéru magnetickému toku. Vliv této úpravy je diskutován v následující podkapitole.

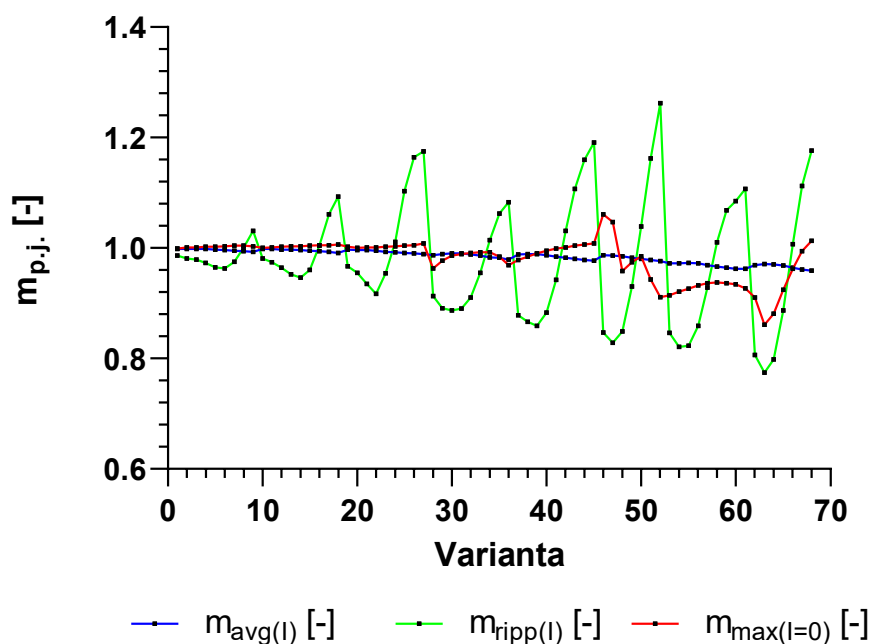
#### 4.1.1 Model 1 kruhové díry

Byly vypočteny momentové charakteristiky pro model s jednou dírou vytknutou z geometrie rotoru. Modelu náleží 1. list v tabulkové příloze A. Díra je specifikována proměnnými:

- průměrem –  $d_{díry}$ ,
- vzdáleností od středu motoru –  $radius_{díry}$ ,
- úhlem vyosení vůči ose pólu –  $úhel_{díry}$ .

Graf na obrázku 4.1 porovnává vypočtené hodnoty momentu pro jednotlivé varianty proměnných. Hodnoty vypočtených momentů jsou v poměrných jednotkách, ty jsou vztaženy k hodnotě originálního návrhu z toho důvodu, aby bylo možné rychlým způsobem porovnat hodnoty nově vypočtených variant s hodnotami původního návrhu. Hodnoty originálního motoru jsou uvedeny v tabulce 3.3. Přepočet do poměrných jednotek je proveden vztahem (4.1).

Výstup grafu 4.1 je tedy následující: jestliže je žádané snížení PRM, je hledána varianta s hodnotou  $m_{\max(I=0)} < 1$  (červený průběh), protože právě tehdy je PRM menší než u původního motoru. Zároveň je hledána varianta, u které nebude hodnota  $m_{ripp(I)} > 1$  (zelený průběh), protože v takovém případě je celkové zvlnění u napájeného stroje vyšší než u originálního motoru. Posledním kritériem je průměrný moment napájeného stroje  $M_{avg(I)} \approx 1$  (modrý průběh), cílem je, aby pokud možno nebyl průměrný moment vůči originálu snížen, proto je hledána hodnota blízká 1. Tímto způsobem jsou prošetřeny modely i v následujících kapitolách.



Obr. 4.1: Závislost měrného momentu na variantě modelu s 1 kruhovou dírou

Tab. 4.1: Vybrané výsledky modelu 1 kruhové díry

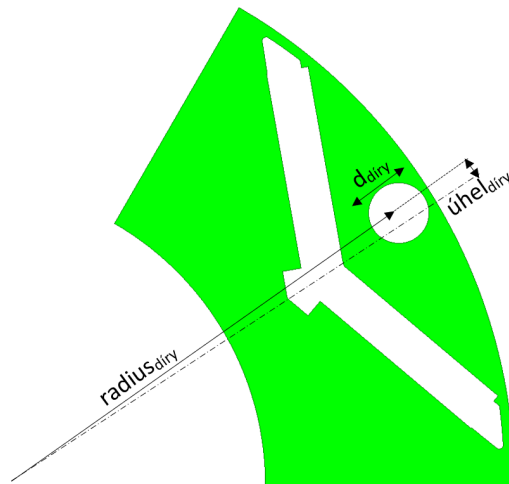
Varianta	$d_{díry}$	$radius_{díry}$	$úhel_{díry}$	$M_{max(I=0)}$	$M_{avg(I)}$	$M_{avg(I)}$
52	4 mm	68 mm	2 deg	5,85 Nm	302,7 Nm	30,13 Nm
63	5 mm	66 mm	-3 deg	5,53 Nm	301,04 Nm	18,48 Nm
65	5 mm	66 mm	1 deg	5,93 Nm	300,07 Nm	21,18 Nm

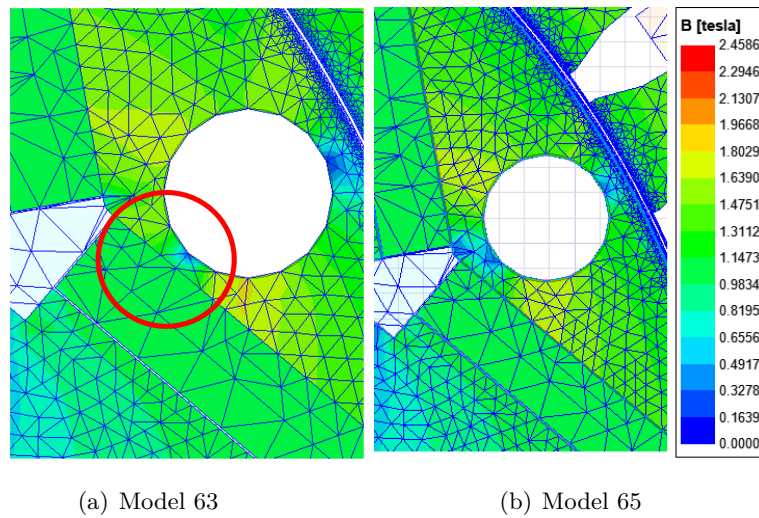
Varianta	$d_{díry}$	$radius_{díry}$	$úhel_{díry}$	$m_{max(I=0)}$	$m_{avg(I)}$	$m_{avg(I)}$
52	4 mm	68 mm	2 deg	0,911 -	0,976 -	1,262 -
63	5 mm	66 mm	-3 deg	0,861 -	0,971 -	0,774 -
65	5 mm	66 mm	1 deg	0,924 -	0,968 -	0,887 -

Tabulka 4.1 ukazuje výběr výsledků provedených simulací. Příklad výpočtu pro pátý řádek (verze modelu 63) tabulky 4.1:

$$\begin{aligned}
 m_{max(I=0)} &= \frac{M_{max(I=0)}}{M_{max(I=0),původníhonávrhu}} = \frac{5,53}{6,42} = 0,861 [-] \\
 m_{avg(I)} &= \frac{M_{avg(I)}}{M_{avg(I),původníhonávrhu}} = \frac{301,04}{310,13} = 0,971 [-] \\
 m_{ripp(I=0)} &= \frac{M_{ripp(I=0)}}{M_{ripp(I=0),původníhonávrhu}} = \frac{18,47}{23,87} = 0,774 [-]
 \end{aligned} \tag{4.1}$$



Obr. 4.2: Geometrie rotoru modelu s 1 dírou, verze 52



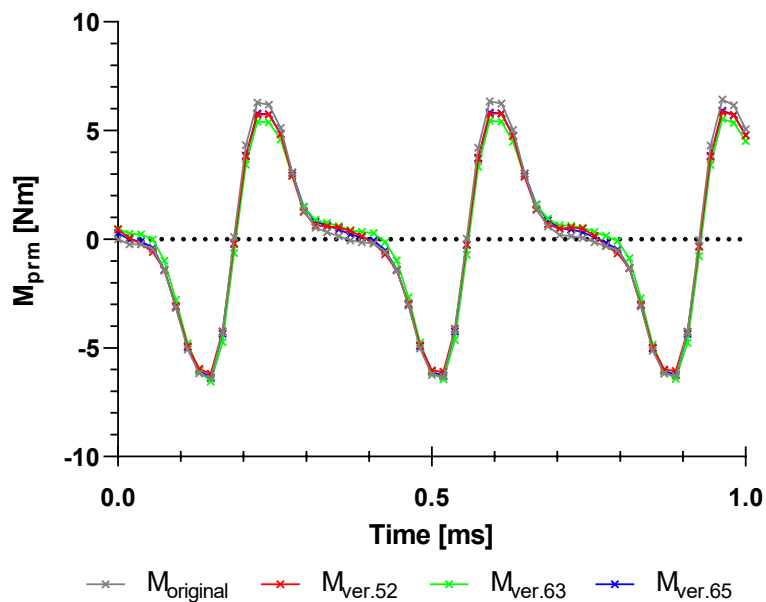
(a) Model 63

(b) Model 65

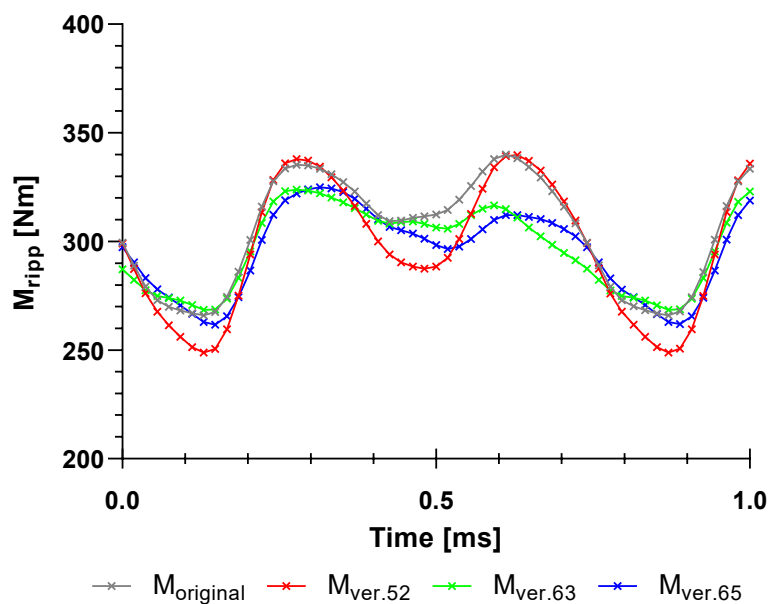
Obr. 4.3: Sycení můstku model 1 díry

Tvar plechu rotoru je zobrazen na obrázku 4.2. Na obrázku jsou dále vyznačeny proměnné zkoumané v tomto modelu. Z představených výsledků je patrné, že v případě verze modelu 52 klesne zvlnění nenapájeného stroje způsobené PRM, ale navzdory tomuto vzroste celkové zvlnění momentu, proto toto řešení není vhodné. V případě verze 72 klesne zvlnění způsobené PRM i celkové zvlnění zatíženého stroje, díra se však dostává do blízkosti PM, a vůči němu se stává disproporční. V tomto případě se však jedná o chybu modelu, protože vlivem hustoty výpočtové sítě se nepočítá správně sycení můstku mezi PM a vytvořenou dírou viz obrázek 4.3 a), v tomto případě lze očekávat odchylku vůči realitě. Průběhy okamžitých hodnot PRM a celkového zvlnění momentu jsou na obrázku 4.4.

Analýza modelů s využitím jedné díry dosáhla nejlepších výsledků u modelu číslo 65, tímto způsobem bylo dosaženo snížení zvlnění momentu  $\Delta M_{ripp}$  o 11,3%. Úpravou bylo dosaženo snížení PRM o 7,6% u nenapájeného stroje. Pokles průměrného momentu takto upraveného stroje je 3,2%.



(a) Průběh PRM nenapájeného stroje v čase



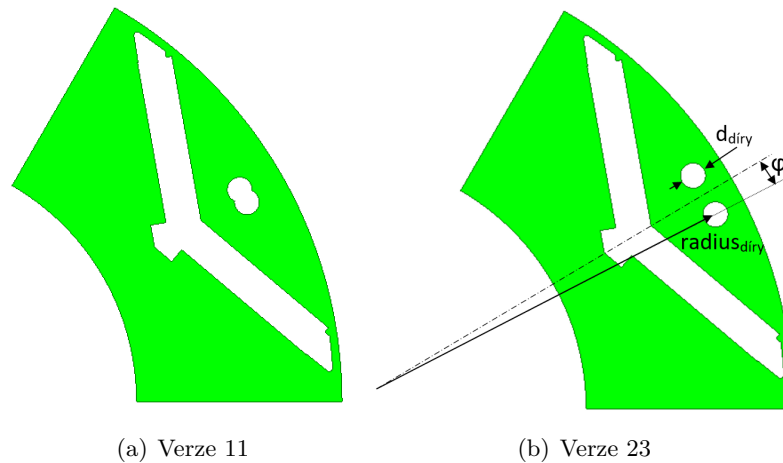
(b) Průběh zvlnění momentu napájeného stroje v čase

Obr. 4.4: Průběhy momentu originálního stroje a strojů s úpravou 1 kruhové díry

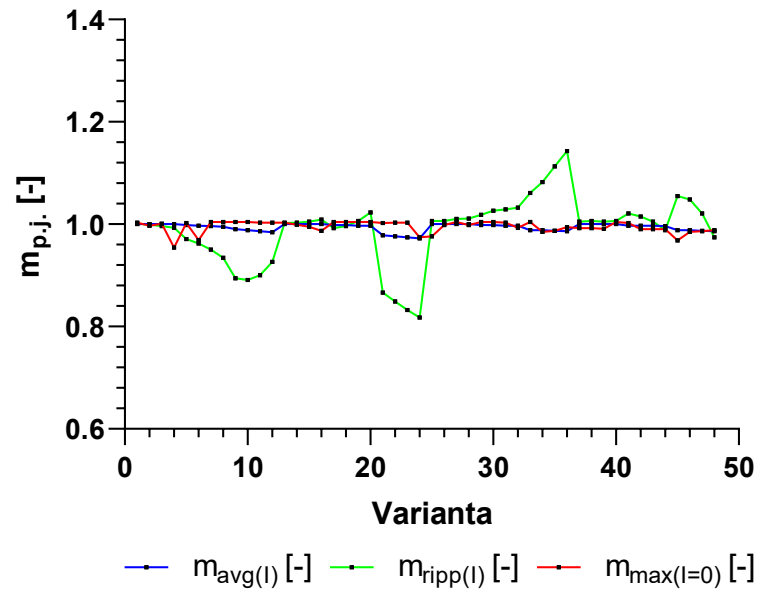
### 4.1.2 Model 2 kruhových děr

Další zkoumanou variantou bylo vytvoření dodatečné bariéry pomocí dvou děr vyteklých z geometrie rotoru. Modelu náleží 2. list v tabulkové příloze A. Díry jsou specifikovány proměnnými, které jsou dále znázorněny na obrázku 4.5 b):

- průměrem díry –  $d_{díry}$ ,
- poloměrem od středu motoru –  $radius_{díry}$ ,
- úhlem vychýlení od osy pólu –  $\varphi_{díry}$ .



Obr. 4.5: Geometrie rotoru modelu s 2 kruhovými dírami



Obr. 4.6: Závislost měrného momentu na variantě modelu s 2 kruhovými dírami

Graf na obrázku 4.6 ukazují vliv úprav na měrnou velikost momentu. Na základě tohoto grafu byly vybrány 2 nejpodstatnější modely s nejlepšími výsledky simulací, tyto výsledky jsou uvedeny v tabulce 4.2. Příklad výpočtu pro třetí řádek (verze modelu 11 úpravy dvou kruhových děr) tabulky 4.2:

$$m_{\max(I=0)} = \frac{M_{\max(I=0)}}{M_{\max(I=0), \text{původníhonávrhu}}} = \frac{6,44}{6,42} = 1,003 [-], \quad (4.2)$$

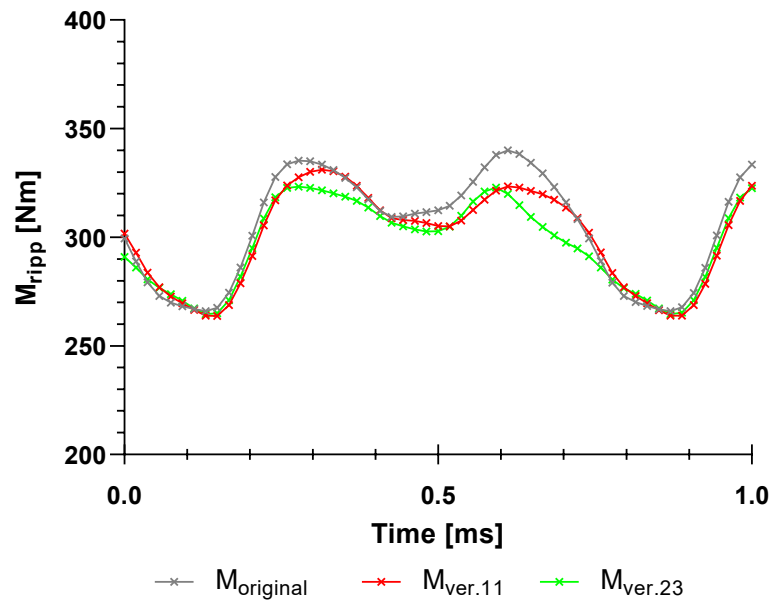
$$m_{\text{avg}(I)} = \frac{M_{\text{avg}(I)}}{M_{\text{avg}(I), \text{původníhonávrhu}}} = \frac{305,89}{310,13} = 0,986 [-],$$

$$m_{\text{ripp}(I=0)} = \frac{M_{\text{ripp}(I=0)}}{M_{\text{ripp}(I=0), \text{původníhonávrhu}}} = \frac{21,49}{23,87} = 0,900 [-].$$

Tab. 4.2: Vybrané výsledky modelu dvou kruhových děr

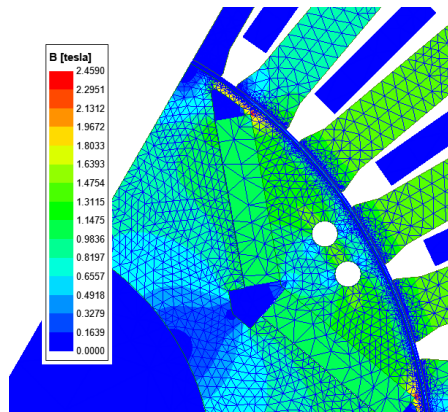
Varianta	$d_{\text{díry}}$	$radius_{\text{díry}}$	$\varphi_{\text{díry}}$	$M_{\max(I=0)}$	$M_{\text{avg}(I)}$	$M_{\text{ripp}(I)}$
11	2 mm	66 mm	1 deg	6,44 Nm	305,89 Nm	21,49 Nm
23	2 mm	68 mm	3 deg	6,44 Nm	302,18 Nm	19,86 Nm

Varianta	$d_{\text{díry}}$	$radius_{\text{díry}}$	$\varphi_{\text{díry}}$	$m_{\max(I=0)}$	$m_{\text{avg}(I)}$	$m_{\text{ripp}(I)}$
11	2 mm	66 mm	1 deg	1,003 -	0,986 -	0,900 -
23	2 mm	68 mm	3 deg	1,003 -	0,974 -	0,832 -



Obr. 4.7: Průběhy momentu originálního stroje a strojů s úpravou 2 kruhových děr

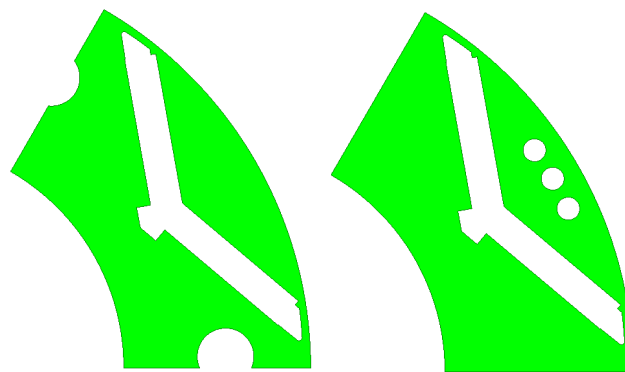
Nejpodstatnějšího výsledku úpravy pomocí 2 kruhových děr bylo dosaženo u stroje podle varianty 23. Navzdory tomu, že touto úpravou dojde k nepatrnému navýšení PRM stroje, bylo docíleno snížení celkového zvlnění napájeného stroje  $m_{\text{ripp}(I)}$  o 16,8 %. Pokles průměrného momentu činí  $m_{\text{ripp}(I)}$  o 3,4 %. Průběh okamžitých hodnot momentu je na obrázku 4.7, průběh PRM není vyobrazen protože rozdíl hodnot  $m_{\text{max}(I=0)}$  originálního a upravených strojů se liší o 0,3 %, průběhy jsou tedy prakticky totožné s průběhem PRM originálního stroje, viz obrázek 3.3. Ukázka hustoty výpočtové sítě a sycení magnetickou indukcí nenapájeného stroje pro model 2 děr je na obrázku 4.8. Hlavní výhodou této úpravy je velmi nízká náročnost jejího provedení a jednoduchost její implementace do procesu výroby.



Obr. 4.8: Hustota výpočtové sítě pro model 2 kruhových děr verze 23

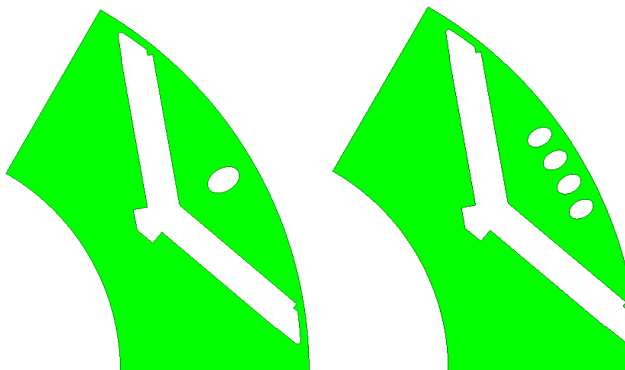
#### 4.1.3 Modely dalších variant kruhových otvorů

V rámci praktické části práce byly simulovány výsledky pro další varianty kruhových otvorů, dále úpravou kruhu došlo k vytvoření eliptického otvoru. Celkem bylo prozkoumáno 8 modelů na základě kruhu a to: 4 modely pro 1 - 4 kruhové otvory, a dále 4 modely s 1 - 4 eliptickými výřezy. Mezi těmito modely však nebyly nalezeny uspokojivé výsledky. Nebylo prokázáno, že úprava kruhové díry na eliptickou přinese výraznou změnu nebo zlepšení průběhu zvlnění momentu. Dále nebylo prokázáno, že přesunutí díry do prostoru pod magnety (obdobně jako u studie [17] citované v kapitole 2.3.1), přispěje k redukci zvlnění momentu. Přidáváním více výřezů do geometrie rotoru roste počet variant, jejichž výsledky nejsou validní z důvodu protnutí geometrie výřezu s částí motoru mimo rotorový plech a modelů, u kterých se nepočítá správně sycení můstků mezi otvory, z důvodu nedostatečné vzdálenosti objektů pro vytvoření dostatečně husté výpočtové sítě MKP. Příklady tvarů zkoumaných geometrií a výsledky modelů s kruhovým otvorem pod magnetem jsou na obrázku 4.9, podklady ke grafu jsou v 1. listu tabulkové přílohy B k práci.



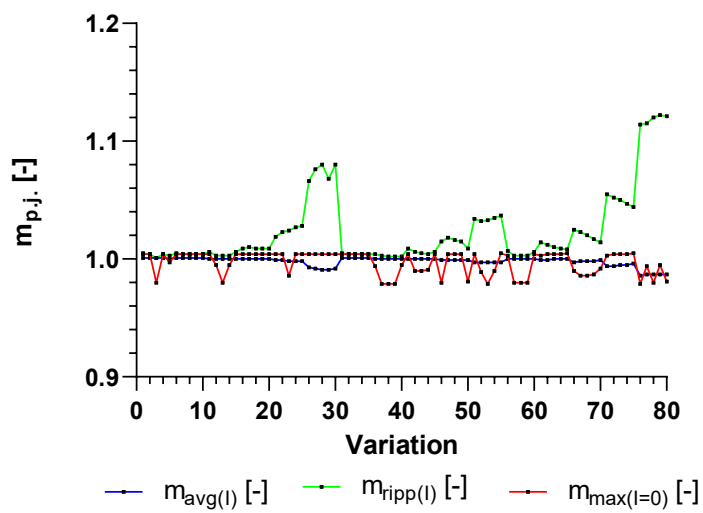
(a) s dírou pod magnetem

(b) s 3 kruhovými dírami



(c) s eliptickým výřezem

(d) s 4 eliptickými výřezy



(e) Závislost měrného momentu na variantě modelu s dírou pod magnetem

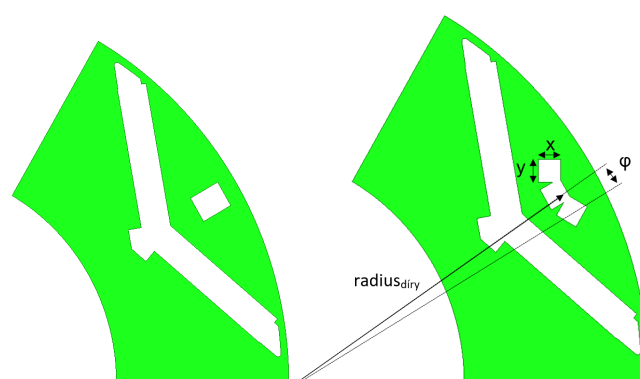
Obr. 4.9: Příklad dalších prověřovaných geometrií



## 4.2 Modely s obdélníkovými bariérami

Další prověřenou variantou zkoumaného tvaru bariéry jsou obdélníkové výřezy, viz obrázek 4.10. Modelu jednoho obdélníku náleží 3. list v tabulkové příloze A, modelu se třemi trojúhelníky potom 4. list v příloze A. Obdélníkové výřezy jsou specifikovány proměnnými:

- velikostí strany  $x - x$
- velikostí strany  $y - y$
- poloměrem od středu motoru –  $radius_{díry}$
- úhlem bočních výřezů –  $\varphi$  (u varianty 3 obdélníků)



(a) 1 obdélník, varianta 12 (b) 3 obdélník, varianta 4

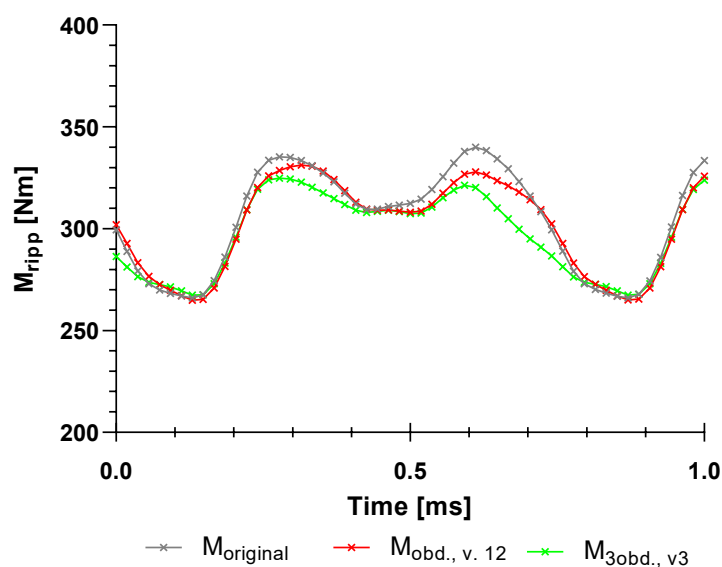
Obr. 4.10: Geometrie rotoru modelu s obdélníkovými výřezy

Tab. 4.3: Vybrané výsledky modelů s obdélníkovými výřezy

Varianta	x	y	$radius_{díry}$	$\varphi$	$M_{\max(I=0)}$	$M_{\text{avg}(I)}$	$M_{\text{ripp}(I)}$
1 obd., v. 12	6 mm	5 mm	64 mm	/	6,42 Nm	306,85 Nm	21,67 Nm
3 obd., v. 4	4 mm	4 mm	63 mm	30 deg	6,10 Nm	301,71 Nm	19,53 Nm
Varianta	x	y	$radius_{díry}$	$\varphi$	$m_{\max(I=0)}$	$m_{\text{avg}(I)}$	$m_{\text{ripp}(I)}$
1 obdélník, v. 12	6 mm	5 mm	64 mm	/	1,001	0,989	0,908
3 obdélníky, v. 4	4 mm	4 mm	63 mm	30 deg	0,951	0,973	0,818

V tabulce 4.3 jsou uvedeny nejpodstatnější výsledky simulací pro obdélníkové výřezy. Referenčními hodnotami pro výpočet měrných momentů, jsou stejně jako v předchozí kapitole hodnoty původního neupraveného stroje. Výpočet je tedy stejný jako v předcházející kapitole (vztah 4.1).

Simulacemi bylo zjištěno, že v případě modelu se třemi obdélníky verze č.4, bylo dosaženo snížení zvlnění momentu  $m_{\text{ripp}(I)}$  o 18,2%. Přičemž průměrný vyvíjený moment stroje  $m_{\text{avg}(I)}$  klesne o 2,7%. Průběh okamžitých hodnot zvlnění momentu v porovnání s originálním strojem je na obrázku 4.11.



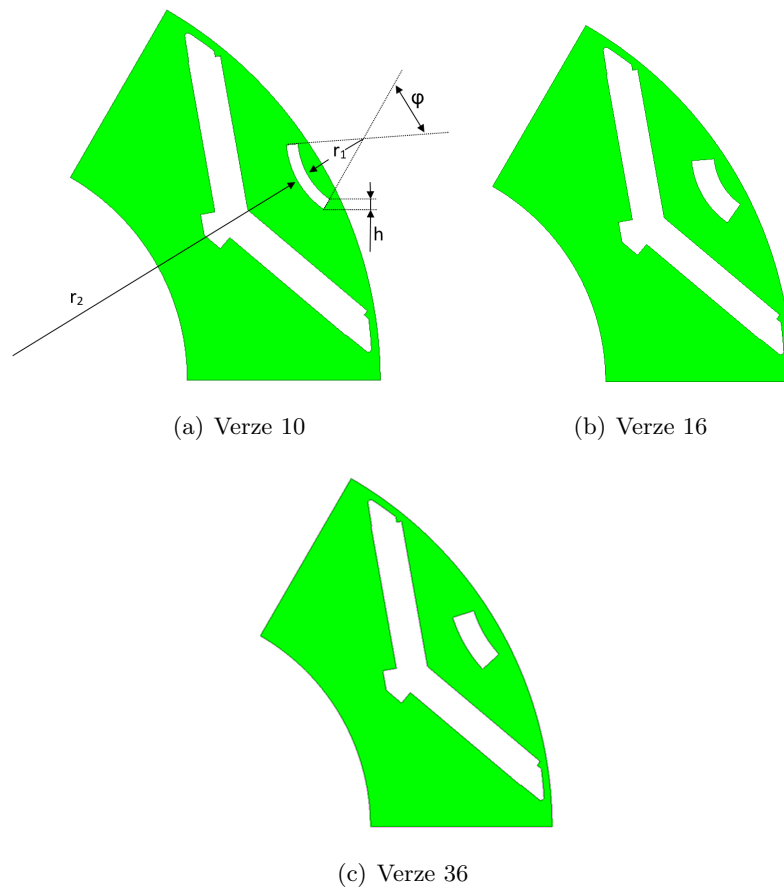
Obr. 4.11: Zvlnění momentu stroje s úpravou obdelníkového výřezu

Modely třech obdelníkových bariér přinesly nejlepší výsledky v případě, že se společně protnou a spojí do jedné bariéry, viz obrázek 4.10 b), tento model přinesl optimistické výsledky a položil tak základy pro finální model využívající ke snížení zvlnění momentu dodatečnou bariéru magnetickému toku. Tento model je popsán v následující podkapitole.

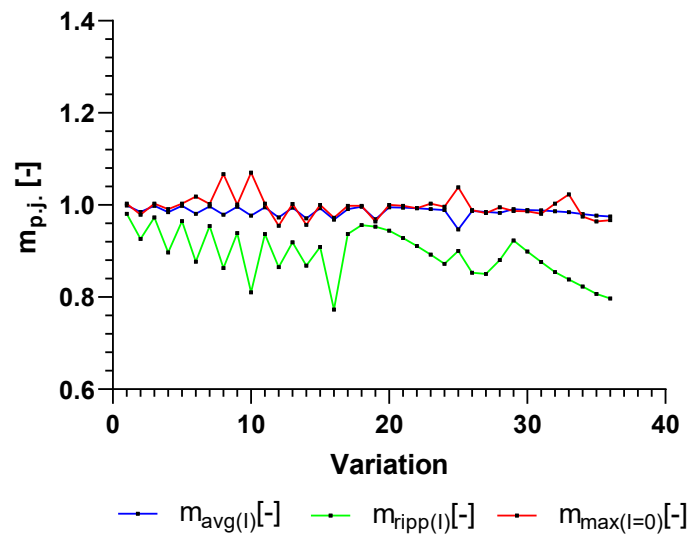
### 4.3 Model podélné bariéry

Poslední zkoumanou úpravou geometrie rotoru, vytvořenou přidáním dodatečné bariéry magnetickému toku, je vliv bariéry vytvořené podél magnetů v prostoru nad nimi, viz obrázek 4.12. Tomuto modelu náleží 5. list tabulkové přílohy A. Simulace modelů zkoumaných v předchozích kapitolách ukázaly, že protnutí geometrie výřezů může mít příznivý efekt, viz model s dvěma kruhovými dírami verze 11 (obrázek 4.5 a)), nebo v případě 3 obdelníků obrázek verze 4 (obrázek 4.10 b)). Cílem této části bylo optimalizovat tvar bariéry tak, aby bylo dosaženo pokud možno co největšího snížení momentu. Bariéra je specifikována proměnnými:

- výškou drážky –  $h$
- úhlem výřezu –  $\varphi$
- poloměrem kruhu od strany statoru –  $r_1$
- poloměrem od středu motoru –  $r_2$



Obr. 4.12: Geometrie rotoru modelu s podélnou bariérou



Obr. 4.13: Závislost momentu na variantě modelu s podélnou bariérou

Tab. 4.4: Vybrané výsledky modelu podélné bariéry

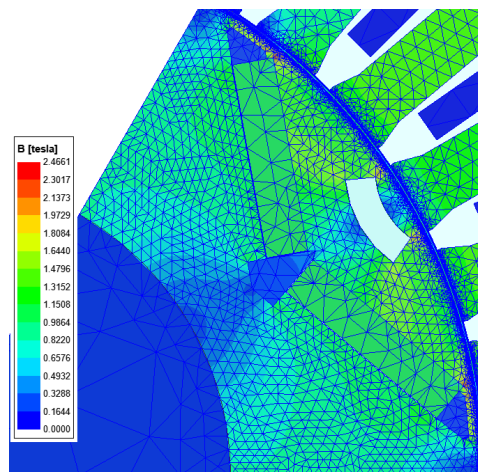
Varianta	$\varphi$	$h$	$r_1$	$r_2$	$M_{\max(I=0)}$	$M_{\text{avg}(I)}$	$M_{\text{ripp}(I)}$
10	50 deg	2	15 mm	68 mm	6,87 Nm	302,94 Nm	19,34 Nm
16	50 deg	4	15 mm	66 mm	6,24 Nm	300,13 Nm	18,44 Nm
36	25 deg	4	15 mm	66 mm	6,21 Nm	302,28 Nm	19,02 Nm

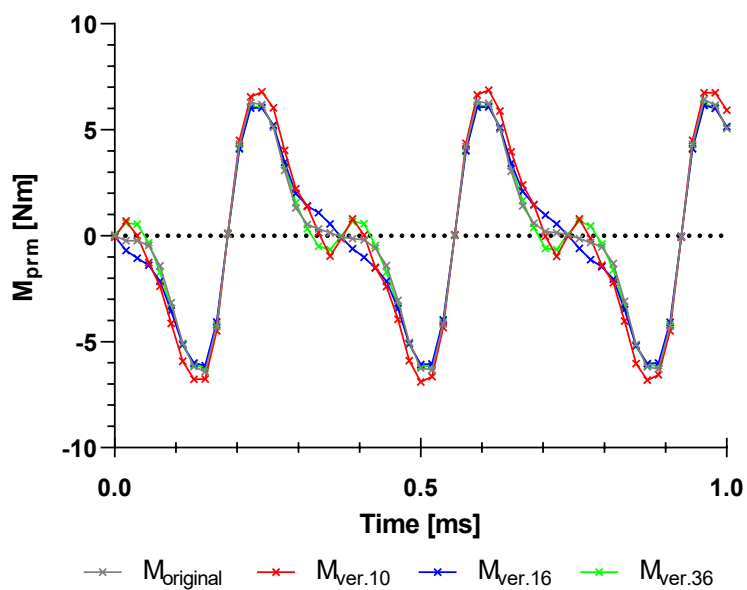
Varianta	$\varphi$	$h$	$r_1$	$r_2$	$m_{\max(I=0)}$	$m_{\text{avg}(I)}$	$m_{\text{ripp}(I)}$
10	50 deg	2	15 mm	68 mm	1,070 -	0,977 -	0,810 -
16	50 deg	4	15 mm	66 mm	0,972 -	0,968 -	0,773 -
36	25 deg	4	25 mm	66 mm	0,967 -	0,975 -	0,797 -

Pomocí parametrické analýzy modelu s podélnou bariérou byly zjištěny hodnoty momentů pro jednotlivé varianty. Výsledky provedených simulací jsou uvedeny v tabulkové příloze v jejím 5. listu, z těchto získaných výsledků byl sestrojen graf na obrázku 4.13. Na základě tohoto grafu byly vybrány nejpodstatnější výsledky, které jsou uvedeny v tabulce 4.4.

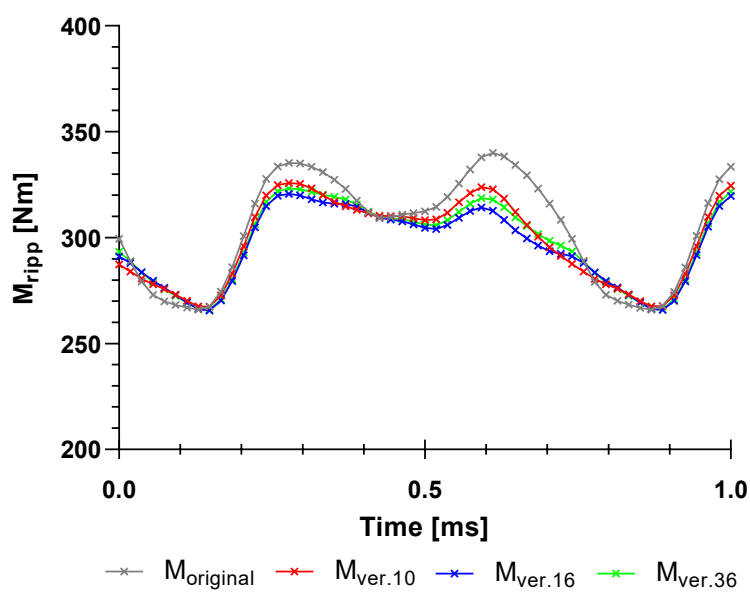
Stěžejních výsledků bylo dosaženo u varianty modelu číslo 16. U takto upraveného stroje bylo dosaženo snížení zvlnění momentu způsobeného PRM  $m_{\max(I=0)}$  pouze o 2,8 %, avšak celkové zvlnění napájeného stroje  $m_{\text{ripp}(I)}$  bylo sníženo o 22,7 %. Průměrný moment takto upraveného stroje klesne o 3,2 %. U modelu č. 16 bylo dosaženo nejlepších výsledků, proto byl tento model použit pro simulaci modelu kombinující více metod snižování momentu a to: natočení satorové drážky a natočení rotoru, viz kapitola 5.2. Zobrazení hustoty výpočtové sítě je na obrázku 4.14. Průběh okamžitých hodnot zvlnění momentu napájeného stroje a PRM v porovnání s originálním návrhem stroje je na obrázku 4.15.



Obr. 4.14: Výpočtová síť modelu s podélnou bariérou verze 16



(a) Průběh PRM nenapájeného stroje v čase



(b) Průběh zvlnění momentu napájeného stroje v čase

Obr. 4.15: Porovnání průběhu momentu originálního stroje s upraveným modelem - podélná bariéra

## 5 Simulace modelu s natočením statoru a rotoru

Další efektivní metodou úpravy geometrie stroje, vedoucí ke snížení PRM, respektive celkového zvlnění napájeného stroje je natočení statorové drážky nebo rotoru. Výsledky simulací takto upraveného stroje jsou popsány v následujících podkapitolách.

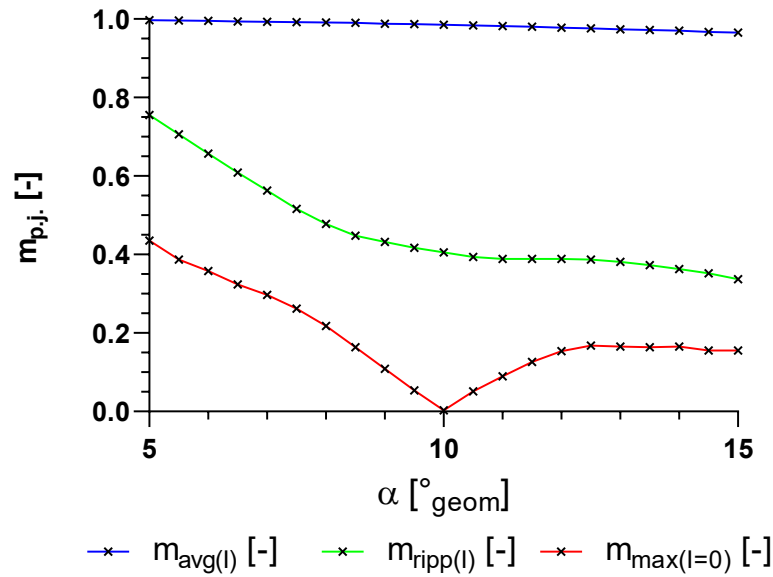
### 5.1 Původní návrh motoru s úpravou natočením

#### 5.1.1 Natočení statorových drážek

V této podkapitole jsou představeny výsledky motoru s natočenými statorovými drážkami. Drážky se plynule natáčí v podélném směru podél celé aktivní hloubky stroje pod úhlem  $\alpha$ . Výsledky parametrické analýzy modelu jsou uvedeny v tabulce 5.1, grafické znázornění pak na obrázku 5.1. Této úpravě náleží 6. list v tabulkové příloze A.

Tab. 5.1: Tabulka výsledků hledání optimálního úhlu natočení statorových drážek

$\alpha$ [° <sub>geom</sub> ]	$M_{\max(I=0)}$	$M_{\text{avg}(I)}$ [Nm]	$M_{\text{ripp}(I)}$ [Nm]	$m_{\max(I=0)}$	$m_{\text{avg}(I)}$	$m_{\text{ripp}(I)}$
5	2,80	309,18	18,02	0,435	0,997	0,755
5,5	2,49	308,94	16,86	0,387	0,996	0,706
6	2,30	308,67	15,68	0,358	0,995	0,657
6,5	2,08	308,36	14,54	0,324	0,994	0,609
7	1,90	308,04	13,44	0,297	0,993	0,563
7,5	1,68	307,69	12,33	0,262	0,992	0,516
8	1,40	307,31	11,42	0,218	0,991	0,478
8,5	1,05	306,91	10,70	0,164	0,99	0,448
9	0,70	306,48	10,32	0,109	0,988	0,432
9,5	0,35	306,03	9,96	0,054	0,987	0,417
10	0,02	305,55	9,66	0,003	0,985	0,405
10,5	0,33	305,04	9,41	0,051	0,984	0,394
11	0,58	304,51	9,28	0,09	0,982	0,389
11,5	0,81	303,94	9,29	0,126	0,98	0,389
12	0,99	303,36	9,29	0,154	0,978	0,389
12,5	1,08	302,74	9,23	0,168	0,976	0,387
13	1,06	302,09	9,10	0,165	0,974	0,381
13,5	1,05	301,41	8,89	0,164	0,972	0,373
14	1,06	300,71	8,66	0,165	0,97	0,363
14,5	0,99	299,97	8,40	0,155	0,967	0,352
15	1,00	299,21	8,05	0,155	0,965	0,337



Obr. 5.1: Závislost měrného momentu na úhlu natočení statorové drážky

Optimální úhel natočení statorové drážky byl nalezen:  $\alpha_{\text{skewdstat.}} = 10^\circ_{\text{geom}}$ . Při tomto úhlu je PRM téměř nulový. To je dáno tím, že síly vyvolané magnety interagující mezi statorovými zuby jsou vyrovnané – magnety jsou přesně v mezi-poloze mezi statorovými zuby (stroj má 36 statorových drážek, tzn 1 drážka je každých  $10^\circ_{\text{geom}}$ ).

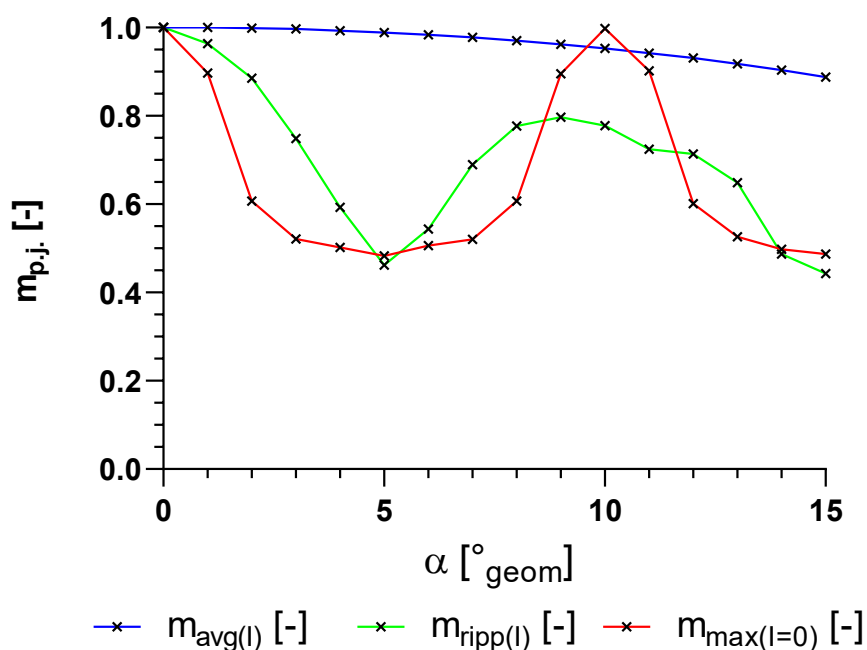
### 5.1.2 Natočení rotoru

Další možnou úpravou geometrie stroje je natočení rotoru. Úprava spočívá v tom, že rotor je v půlce své hloubky natočen o úhel  $\alpha$ . Na rozdíl od natočení statorových drážek, kde se drážka otáčí průběžně v celém podélném směru, je u natočení rotoru změna úhlu v půlce hloubky skoková. To je nutné kvůli vnořeným magnetům. Závislost měrného momentu stroje vzhledem k parametrům původního návrhu stroje je uvedena v tabulce 5.2 a na obrázku 5.2. Seznam dat vypočtených hodnot tohoto modelu je v 7. listu tabulkové přílohy A.

Optimální úhel natočení rotoru byl výpočtem nalezen:  $\alpha_{\text{skewdrot.}} = 5^\circ_{\text{geom}}$ . V tomto případě je PRM sniženo o 51,7%. Celkové vypočtené zvlnění momentu  $m_{\text{ripp}(l)}$  klesne o 51,7%. Z výsledků plyne, že následné zvyšování úhlu natočení  $\alpha_{\text{skewdrot.}}$  má za následek snižování průměrného momentu stroje, v případě  $\alpha_{\text{skewdrot.}} = 5^\circ$  je pokles  $m_{\text{avg}(l)}$  o 1,1%, avšak v případě  $\alpha_{\text{skewdrot.}} = 15^\circ$  je pokles  $m_{\text{avg}(l)}$  více než 11%.

Tab. 5.2: Tabulka výsledků hledání optimálního úhlu natočení rotoru

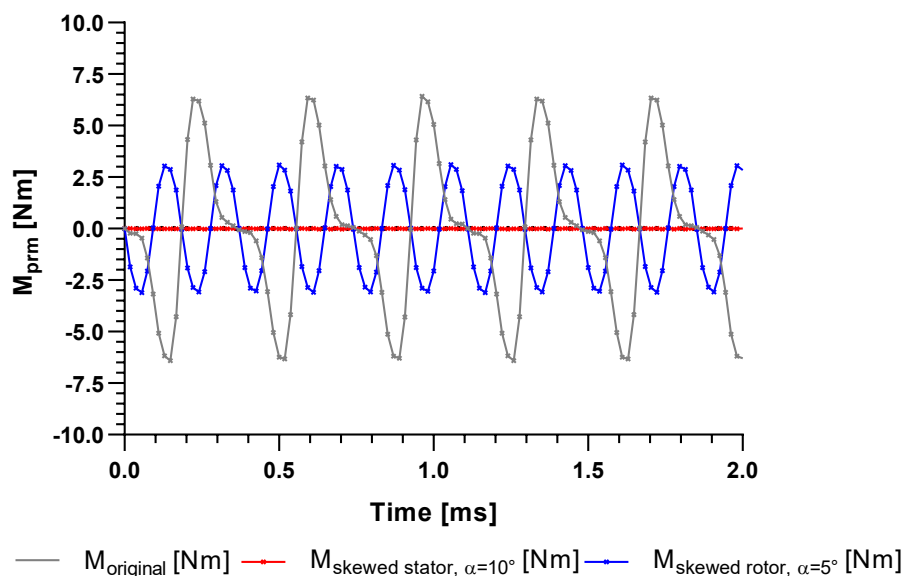
$\alpha$ [ $^{\circ}$ geom]	$M_{\max(I=0)}$ [Nm]	$M_{\text{avg}(I)}$ [Nm]	$M_{\text{ripp}(I)}$ [Nm]	$m_{\max(I=0)}$	$m_{\text{avg}(I)}$	$m_{\text{ripp}(I)}$
0	6,45	310,35	23,97	1,000	1,000	1,000
1	5,76	310,20	23,01	0,897	1,000	0,964
2	3,90	309,77	21,13	0,607	0,999	0,885
3	3,34	309,06	17,87	0,521	0,997	0,749
4	3,22	308,06	14,16	0,502	0,993	0,593
5	3,10	306,75	11,03	0,483	0,989	0,462
6	3,25	305,14	12,99	0,506	0,984	0,544
7	3,34	303,22	16,48	0,520	0,978	0,690
8	3,90	300,97	18,54	0,607	0,970	0,777
9	5,75	298,40	19,04	0,895	0,962	0,797
10	6,41	295,52	18,57	0,998	0,953	0,778
11	5,79	292,26	17,30	0,902	0,942	0,725
12	3,86	288,64	17,05	0,601	0,931	0,714
13	3,38	284,64	15,50	0,526	0,918	0,649
14	3,20	280,23	11,63	0,498	0,904	0,487
15	3,13	275,39	10,57	0,487	0,888	0,443



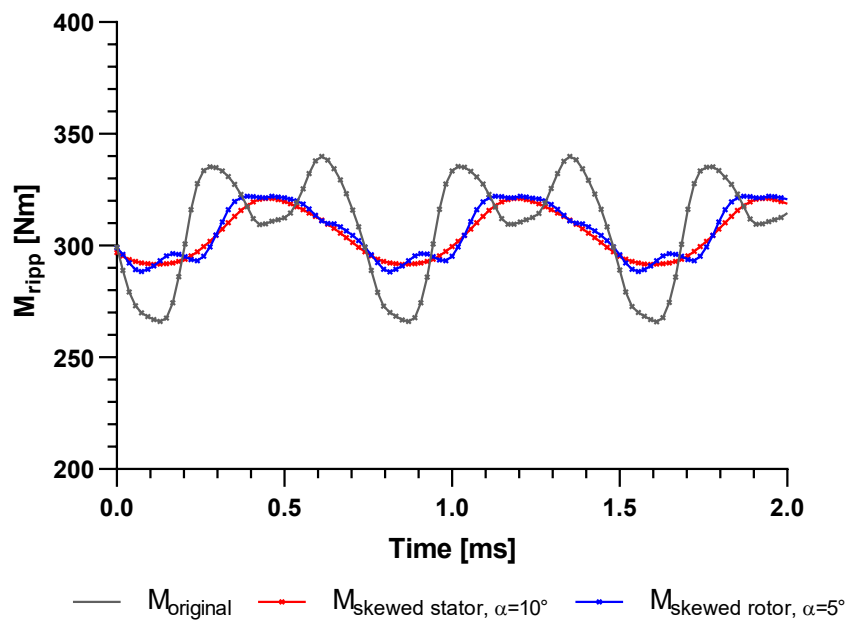
Obr. 5.2: Závislost měrného momentu na úhlu natočení rotoru



### 5.1.3 Porovnání výsledků natočení satorových drážek a natočení rotoru



(a) Průběh PRM nenapájeného stroje v čase



(b) Průběh zvlnění momentu napájeného stroje v čase

Obr. 5.3: Porovnání průběhu zvlnění momentu originálního modelu s modely využívající natočení satorových drážek a natočení rotoru

Grafy na obrázku 5.3 ukazují průběh okamžitých hodnot momentu původního modelu (černý průběh), modelu využívající natočení statorových drážek  $\alpha = 10^\circ_{\text{geom}}$  (červený průběh) a modelu využívající natočení rotoru s úhlem natočení  $\alpha = 5^\circ_{\text{geom}}$  (modrý průběh).

Graf v horní části, obrázek 5.3 a), ukazuje PRM nenapájeného stroje, z průběhu je patrné, že stroj využívající natočení statorových drážek má PRM prakticky nulový. Model s natočeným rotorem má PRM poloviční oproti původnímu motoru, moment ale kmitá s dvojnásobnou frekvencí. To je kvůli tomu, že PRM je dán celkovým součtem momentů jednotlivých vrstev. Protože u statoru je natočení plynulé, je odečítáno od sebe více harmonických, a proto je i výsledný PRM prakticky nulový. Naproti tomu u natočení rotoru je kompenzována díky jednomu skokovému předsazení pouze fundamentální složka zvlnění momentu, avšak druhá a další harmonické jsou stále přítomné a tedy výsledný PRM kmitá s dvojnásobnou frekvencí, než původní návrh stroje.

Graf ve spodní části obrázku 5.3 b) ukazuje průběh zvlnění momentu napájeného stroje. Průběh momentu modelu s natočenými statorovými drážkami kmitá s poloviční amplitudou, vrchol amplitudy koresponduje s polohou statorového vinutí, průběh má tvar velmi blízký sinusové funkci a lze konstatovat, že zbývající zvlnění je tvořeno nesinusovým rozložením magnetické indukce podél vzduchové mezery. Na průběhu momentu stroje s pootočeným rotorem (modrý průběh) jsou patrné zbytky interakce PM se zuby statoru avšak i tato metoda se jeví jako vysoce účinná. Lepších výsledků je očekáváno spojením natočení s metodou využívající dalších geometrických úprav, případně úpravou vektorového řízení a napájení stroje.

## 5.2 Kombinace natočení a modelu s podélnou bariérou

V této kapitole jsou představeny výsledky a je prozkoumán vliv kombinace natočení statorových drážek a následně natočení rotoru, s modelem využívající dodatečnou bariéru magnetickému poli podél magnetů, konkrétně se jedná o verzi č. 16 viz kap. 4.3. Cílem kapitoly je zjistit, zda kombinace modelu s dodatečnou bariérou magnetickému toku, u kterého bylo dosaženo nejlepšího výsledku, bude mít natočení příznivý vliv na další snižování zvlnění momentu.

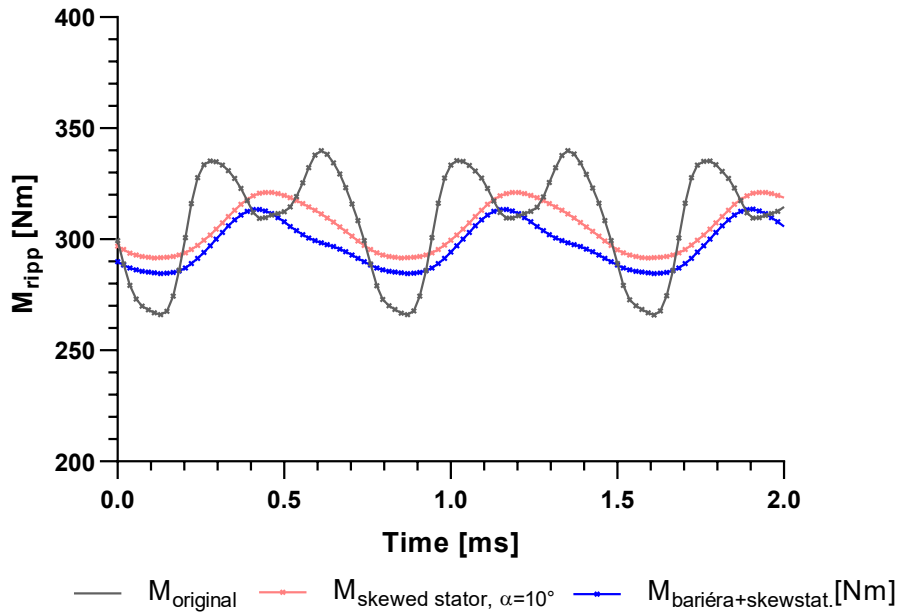
### 5.2.1 Kombinace natočení statorových drážek a podélné bariéry

Tab. 5.3: Porovnání výsledků modelu kombinujícího podélnou bariéru verze č. 16 a natočení statorových drážek

Varianta	$M_{\max(I=0)}$ [Nm]	$M_{\text{avg}(I)}$ [Nm]	$M_{\text{ripp}(I)}$ [Nm]
Model původní stroj	6,42	310,13	23,87
Natočení drážek statoru	0,02	305,55	9,66
Kombinace bariéry a natočení	0,03	297,39	9,70

Varianta	$m_{\max(I=0)}$ [-]	$m_{\text{avg}(I)}$ [-]	$m_{\text{ripp}(I)}$ [-]
Model původní stroj	1,000	1,000	1,000
Natočení drážek statoru	0,003	0,985	0,405
Kombinace bariéry natočení	0,004	0,959	0,407



Obr. 5.4: Průběh zvlnění momentu, kombinace natočení drážek statoru a modelu podélné bariéry

Simulace modelu kombinující model s podélnou bariérou ver. 16 a natočení statorové drážky s optimálním úhlem natočení  $\alpha = 10^\circ_{\text{geom}}$  zjištěném v předchozí kapitole 5.1.1, nepřinesla další zlepšení výsledků. Oproti originálnímu modelu s natočenými statorovými drážkami se zvýší zvlnění momentu  $m_{\text{ripp}(I)}$  o 0,2 %, průměrný vytvořený moment stroje  $m_{\text{avg}(I)}$  dále klesne o 2,6 %. Průběh okamžité hodnoty momentu je na obrázku 5.4.

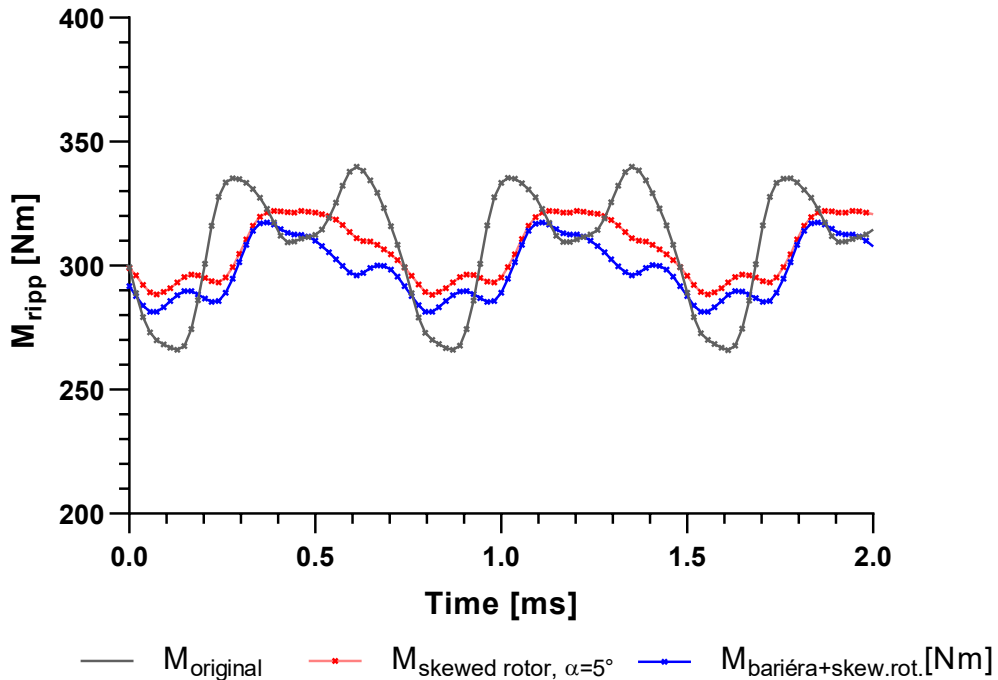
## 5.2.2 Kombinace natočení rotoru a podélné bariéry

Tab. 5.4: Porovnání výsledků kombinace modelu kombinujícího podélnou bariéru ver. 16 a natočení rotoru

Varianta	$M_{\max(I=0)}$ [Nm]	$M_{\text{avg}(I)}$ [Nm]	$M_{\text{ripp}(I)}$ [Nm]
Model Original	6,42	310,13	23,87
Model natočení rotoru	3,10	306,75	11,03
Kombinace natočení a bariéry	3,37	298,56	12,11

Varianta	$m_{\max(I=0)}$ [-]	$m_{\text{avg}(I)}$ [-]	$m_{\text{ripp}(I)}$ [-]
Model Original	1,000	1,000	1,000
Model natočení rotoru	0,483	0,989	0,462
Kombinace natočení a bariéry	0,526	0,963	0,507



Obr. 5.5: Průběh zvlnění momentu, kombinace natočení rotoru a podélné bariéry

V této části byly vypočteny výsledky pro kombinaci modelu podélné bariéry (verze 16) a natočení rotoru s úhlem natočení  $\alpha_{\text{skewdrot.}} = 5^\circ_{\text{geom}}$ . Natočením rotoru podobně jako u natočení statorových drážek nebylo dosaženo dalšího snížení zvlnění momentu, průběh zvlnění momentu je vyobrazen na obrázku 5.5. Průměrný moment takto upraveného stroje  $m_{\text{avg}(I)}$  klesne o 2,6 %, přičemž celkové zvlnění momentu napájeného stroje  $m_{\text{ripp}(I)}$  se zvýší o 4,2 %.

## 6 Shrnutí výsledků

### 6.1 Shrnutí výsledků vypočtených modelů

V tabulce 6.1 jsou shrnuty stěžejní výsledky ověřených simulací. V tabulce jsou zahrnuty veličiny

- $\Delta m_{\max(I=0)}$  – dosažené procentuální snížení PRM
- $\Delta m_{\text{avg}(I)}$  – procentuální ztráta průměrného momentu napájeného stroje
- $\Delta m_{\text{ripp}(I)}$  – procentuální snížení hodnoty zvlnění momentu napájeného stroje

Pro stanovení efektivity úpravy stroje je stanoven poměr efektivity ( $p_{\text{efektivita}}$ ), který je přímo úměrný dosažené hodnoty snížení zvlnění a nepřímo úměrný ztrátě průměrného vytvořeného momentu. Tímto způsobem je možné zohlednit ztrátu průměrného momentu v důsledku úpravy. Výpočet pro první řádek tabulky:

$$p_{\text{efektivita}} = \frac{\Delta m_{\text{ripp}(I)}}{\Delta m_{\text{avg}(I)}} = \frac{11,3\%}{3,2\%} = 3,5 \quad (6.1)$$

Nejvyšší hodnoty  $p_{\text{efektivita}}$  bylo dosaženo u modelu využívající natočení rotoru, touto úpravou bylo docíleno nejvyššího snížení zvlnění momentu v poměru ke ztrátě průměrného momentu. Největšího absolutního snížení zvlnění momentu bylo dosaženo u motoru využívající natočení drážek statoru.

U modelů využívající ke snížení zvlnění momentu pouze metodu přidání bariéry magnetického toku, bylo dosaženo největšího  $p_{\text{efektivita}}$  u modelu využívající 1 obdélníkový výřez, největší absolutní snížení zvlnění momentu bylo dosaženo u modelu s podélnou bariérou.

Nejvýznamnějšího snížení PRM bylo dosaženo pomocí natočení statorových drážek s úhlem natočení  $\alpha = 10^\circ$ , simulace ukázala, že tímto způsobem lze PRM téměř absolutně vykompenzovat. Výrazného zlepšení bylo dosaženo u rotoru s předsazením (natočení rotoru).

Kombinací metod natočením a přidání bariéry magnetického toku nebylo dosaženo zlepšení výsledků. Poměr  $p_{\text{efektivita}}$  klesá především kvůli zvyšující se ztrátě průměrného momentu, tento efekt převažuje nad snižováním účinnosti redukce zvlnění momentu.

Tab. 6.1: Shrnutí dosažených výsledků

Použitá metoda	$\Delta m_{\max(I=0)}$ [%]	$\Delta m_{\text{avg}(I)}$ [%]	$\Delta m_{\text{ripp}(I)}$ [%]	$p_{\text{efektivita}}$	Reference
1 Kruhová díra – verze č. 65	7,6	3,2	11,3	3,5	kap 4.1.1
2 Kruhové díry – verze č.23	-0,3	2,6	16,8	6,5	kap 4.1.2
1 Obdélník – verze č. 12	-0,1	1,1	9,2	8,4	kap 4.2
3 Obdélníky – verze č. 4	4,9	2,7	18,2	6,7	kap 4.2
Model podélné bariéry – verze č. 16	2,8	3,2	22,7	7,1	kap 4.3
natočení drážek statoru – $\alpha = 10^\circ$	99,7	1,5	59,5	39,7	kap 5.1.1
natočení rotoru – $\alpha = 5^\circ$	51,7	1,1	53,8	48,9	kap 5.1.2
Kombinace bariéry a natočení drážek statoru	99,6	4,1	59,3	14,5	kap 5.2.1
Kombinace bariéry a natočení rotoru	47,4	3,7	49,3	13,3	kap 5.2.2

Příklad výpočtu pro první řádek tabulky:

$$\begin{aligned} \Delta m_{\max(I=0)} &= (1 - m_{\max(I=0),\text{modelu}}) \cdot 100 & (6.2) \\ \Delta m_{\max(I=0)} &= (1 - 0,924) \cdot 100 = 7,6 \% \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta m_{\text{avg}(I)} &= (1 - m_{\text{avg}(I),\text{modelu}}) \cdot 100 & (6.3) \\ \Delta m_{\text{avg}(I)} &= (1 - 0,968) \cdot 100 = 3,2 \% \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta m_{\text{ripp}(I)} &= (1 - m_{\text{ripp}(I),\text{modelu}}) \cdot 100 & (6.4) \\ \Delta m_{\text{ripp}(I)} &= (1 - 0,887) \cdot 100 = 11,3 \% \end{aligned}$$

## 6.2 Porovnání výsledků práce s konvenčními metodami redukce zvlnění momentu

Výsledky prováděných simulací přinesly výsledky srovnatelné s konvenčními metodami užívaných ke snížení zvlnění momentu. Jako příklad lze uvést proporcčně obdobný stroj se srovnatelným výkonem prověřovaném v článku [23]. V tomto případě bylo dosaženo snížení zvlnění momentu  $\Delta m_{\text{ripp(I)}}$  pomocí optimalizace tvaru permanentních magnetů, zubů a drážek statoru o 58 %, což odpovídá zjištěným výsledkům pro natočení statorových drážek s úhlem natočení  $\alpha = 10^\circ$ , v tomto případě bylo dosaženo snížení zvlnění momentu napájeného stroje o 59,3 %.

Úpravou spočívající v přidání dodatečné bariéry magnetickému toku, bylo v závislosti na tvaru bariéry dosaženo snížení zvlnění momentu v rozsahu 10 % - 20 %. To odpovídá výsledkům citovaným z článku [21], ve kterém bylo dosaženo snížením momentu  $\Delta m_{\text{ripp(I)}}$  o 14% pomocí asymetrického tvarování bariér.

Výsledky modelů v citovaných člancích shrnutých v kapitole 2.3, však není možné porovnávat pouze číselnou hodnotou snížení zvlnění momentu, nebo například pomocí poměru  $p_{\text{efektivita}}$ , jednak kvůli tomu, že citované články se nezabývají ztrátou průměrného momentu, ale také proto, že každý elektrický stroj je individuální a má odlišná specifika návrhu a procesu výroby. Proto výběr vhodných metod vedoucích ke snížení celkového zvlnění momentu nelze generalizovat a jednoznačně určit konkrétní metody, které jsou vhodnější variantou než jiné.

## Závěr

V teoretickém úvodu práce, kap. 1., byla představena problematika synchronních elektromotorů s permanentními magnety. V úvodu byly položeny teoretické základy aspektů tvorby momentu v elektrických synchronních strojích. Dále byly v úvodu práce také uvedeny kapitoly věnující reluktančním elektromotorům, protože v praktické části práce byl analyzován synchronní stroj s vnořenými permanentními magnety, u kterého se při tvorbě momentu uplatňuje jak synchronní, tak i reluktanční složka momentu.

V kapitole věnované momentovému zvlnění, kap. 2, byla blíže popsána problematika jeho vzniku. Dále byla v této kapitole vytvořena rešerše technik a popis úprav užívaných ke snížení zvlnění momentu. Z rešerše vyplynuly dosažené hodnoty snížení zvlnění momentu od 15 % do 70 %, v závislosti na použité metodě.

Ve 3. kapitole byl představen stroj, na kterém byly analyzovány jednotlivé geometrické úpravy. V následujících kapitolách byly představeny úpravy zřizované za cílem snížení zvlnění momentu napájeného stroje. Celkem bylo vypočteno a optimalizováno 16 modelů. Výsledky simulací jsou shrnuty v přílohových tabulkách. Příloha A shrnuje výsledky blíže představené v textu. Příloha B doplňuje vypočtené výsledky modelů, které neprokázaly žádné nebo dostatečně účinné snížení zvlnění momentu, a proto byly v textu zmíněny pouze okrajově. Jedná se ovšem o výsledky, které nepostradatelně sloužily k optimalizaci nových tvarů s lepšími výsledky.

První úpravy, spočívající ve vytvoření dodatečných bariér magnetickému toku, byly analyzovány v kapitole 4. Nejlepších výsledků bylo dosaženo u stroje s podélnou bariérou popsaného v části kapitoly 4.3. Optimalizací tohoto tvaru bylo dosaženo snížení celkového zvlnění momentu  $\Delta m_{ripp(I)}$  o 22,7 %

Další zkoumané úpravy spočívající v natočení statorových drážek resp. v natočení rotoru, byly popsány v kapitole 5.1.1. Metoda natočení statoru se ukázala jako velmi efektivní a tímto způsobem bylo dosaženo největšího absolutního snížení celkového zvlnění momentu  $\Delta m_{ripp(I)}$  o 59,5 %. Velmi dobrých výsledků bylo dosaženo také použitím natočení rotoru (kapitola 5.1.2), tímto způsobem bylo docíleno nejvyššího snížení zvlnění momentu vzhledem ke ztrátě průměrného momentu. Dosažené snížení momentu nabylo hodnoty  $\Delta m_{ripp(I)}$  53,8 %, přičemž hodnota průměrného momentu  $m_{avg(I)}$  klesla o 1,1 %.

Poslední zkoumanou úpravou byla kombinace výše popsaných metod. Výsledky těchto modelů, představené v kapitole 5.2, neprokázaly zlepšení průběhu momentu vůči modelům využívající pouze natočení statorových drážek, resp. natočení rotoru.

Jsou-li výsledky dosažených hodnot snížení zvlnění momentu porovnány ku ztrátě průměrného momentu stroje, lze říci, že využití natočení je cca 5x - 10x účinnější než metody využívající ke snížení zvlnění momentu dodatečnou bariéru magnetickému toku.



Do výběru vhodné metody však zasahují technicko-ekonomické aspekty výroby stroje, kde může být upřednostněna úprava pomocí přídavné bariéry magnetického toku díky jednoduchosti provedení takové úpravy a implementace do výrobního procesu. Naproti tomu úprava pomocí natočení statoru resp. rotoru vyžaduje rozsáhlejší změny v procesu výroby stroje, zvyšují se náklady na materiál stroje a prodlužuje se čas potřebného na výrobu takového stroje.

## Literatura

- [1] Elektrické Motory Baumüller [online]. [cit. 2023-04-16]. Dostupné z: <https://www.baumueller.com/cs/produkty/motory>
- [2] HRABOVCOVÁ, Valéria, Ladislav JANOUŠEK, Pavol RAFAJDUS a Miroslav LIČKO. Moderné elektrické stroje. Žilina: Žilinská univerzita v Žilině, 2001. ISBN 80-7100-809-5.
- [3] Electric Motors Types. OSWOS [online]. [cit. 2023-04-19]. Dostupné z: <https://oswos.com/electric-motor/>
- [4] CHMELÍK, Karel. Asynchronní a synchronní elektrické stroje. VŠB–TUO, Fakulta elektrotechniky a informatiky, 2001. ISBN 80 – 7078 – 857 - 7.
- [5] JOSIP, Zekic. Modeling and analysis of SynRM for hybrid electric vehicle application. Chalmers University of Technology Göteborg, Sweden 2016, 2016. Master's Thesis. Vedoucí práce Andreas Andersson.
- [6] ANDRADA, Pere, ed. SRM Drives for Electric Traction [online]. Barcelona: Univeritat Politecnica de Catalunya, 2019, 156 [cit. 2023-03-23]. Dostupné z: <https://1url.cz/ar8PV>
- [7] Design optimization of switched reluctance machines for performance and reliability enhancements: A review: Renewable and Sustainable Energy Reviews [online]. 2022 [cit. 2023-03-23]. ISSN 1364-0321. Dostupné z: <https://1url.cz/Kr8Ps>
- [8] PYRHÖNEN, Juha, Tapani JOKINEN a Hrabovcová VALERIA. Design of Rotating Electrical Machines. Lappeenranta University of Technology: John Wiley, 2008. ISBN 978-0-470-69516-6.
- [9] KONTOS, Sofia a Sandra ERIKSSON. An Overview of MnAl Permanent Magnets with a Study on Their Potential in Electrical Machines [online]. October 2020 [cit. 2023-04-19]. ISSN 10.3390/en13215549. Dostupné z: <https://1url.cz/6r8Pa>
- [10] Features of Axial Flux Motors. Sumitomo electric [online]. 2023 [cit. 2023-04-06]. Dostupné z: <https://1url.cz/zr8PT>
- [11] GEIRAS, Jacek. Permanent magnet motor technology: Design and Applications. 3rd edition. Hamilton Sundstrand Aerospace, Rockford, Illinois, U.S.A.: CRC Press Taylor and Francis Group, 2010. ISBN 978-1-4200-6440-7.
- [12] Diko, Milan Rafajdus, P. Makyš, Pavol Dubravka, Peter Szabo, Lorand Ruba, Mircea. (2015). A Novel Concept of Short-Flux Path Switched Reluctance Motor for Electrical Vehicles. Advances in Electrical and Electronic Engineering. 13. 206-211. 10.15598/aeec.v13i3.1309.

- [13] HANSELMAN, Duane. Brushless permanent magnet motor design. 2nd ed. University of Maine: Magna physic publishing, 2003. ISBN 1-881855-15-5.
- [14] PFANNENSTIEL, Alexander, Andraes MOECKEL, "Reduction of torque ripple in induction motors by using a modulated rotor,"Innovative Small Drives and Micro-Motor Systems; 11th GMM/ETG-Symposium, Saarbruecken, Germany, 2017, pp. 1-6.
- [15] XU, Gaohong, Wenxiang ZHAO, Guohai LIU, Fangfang ZHAI a Qian CHEN. Torque Performance Improvement of Consequent-Pole PM Motors With Hybrid Rotor Configuration. IEEE Transactions on Transportation Electrification [online]. 2020 [cit. 2023-04-19]. DOI:10.1109/TTE.2020.3041194 Dostupné z: <https://1url.cz/Br8Pd>
- [16] Cogging Torque and Torque Ripple: What You Need to Know. In: Kollmorgen [online]. 15 Jun 2021 [cit. 2023-04-19]. <https://1url.cz/or8Pj>
- [17] Y. Kano, "Torque Ripple Reduction of Saliency-Based Sensorless Drive Concentrated-Winding IPMSM Using Novel Flux Barrier,"in IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 51, no. 4, pp. 2905-2916, July-Aug. 2015, doi: 10.1109/TIA.2015.2391431. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7008510>
- [18] African Wind Power Review. Otherpower [online]. [cit. 2023-05-18]. Dostupné z: <https://1url.cz/ur7vs>
- [19] Nam, D.-W.; Lee, K.-B.; Pyo, H.-J.; Jeong, M.-J.; Yang, S.-H.; Kim, W.-H.; Jang, H.-K. A Study on Core Skew Considering Manufacturability of Double-Layer Spoke-Type PMSM. Energies 2021, 14, 610. <https://doi.org/10.3390/en14030610>
- [20] Liang, J.; Dong, Y.; Sun, H.; Liu, R.; Zhu, G. Flux-Barrier Design and Torque Performance Analysis of Synchronous Reluctance Motor with Low Torque Ripple. Appl. Sci. 2022, 12, 3958. <https://doi.org/10.3390/app12083958>
- [21] G. Dajaku and D. Gerling, "New methods for reducing the cogging torque and torque ripples of PMSM,"2014 4th International Electric Drives Production Conference (EDPC), Nuremberg, Germany, 2014, pp. 1-7, doi: 10.1109/EDPC.2014.6984396.
- [22] Y. -H. Jung, M. -R. Park and M. -S. Lim, "Asymmetric Rotor Design of IPMSM for Vibration Reduction Under Certain Load Condition,"in IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 35, no. 2, pp. 928-937, June 2020, doi: 10.1109/TEC.2020.2966299. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8957648>

- [23] Cho, S., Lee, DC., Hwang, J. et al. Optimal design to reduce torque ripple of IPM motor with radial based function meta-model considering design sensitivity analysis. *J Mech Sci Technol* 33, 3955–3961 (2019). <https://doi.org/10.1007/s12206-019-0740-0>
- [24] Z. S. Du and T. A. Lipo, "Efficient Utilization of Rare Earth Permanent-Magnet Materials and Torque Ripple Reduction in Interior Permanent-Magnet Machines,"in *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 53, no. 4, pp. 3485-3495, July-Aug. 2017, doi: 10.1109/TIA.2017.2687879.
- [25] J. Li, K. Wang and F. Li, "Reduction of Torque Ripple in Consequent-Pole Permanent Magnet Machines Using Staggered Rotor,"in *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 34, no. 2, pp. 643-651, June 2019, doi: 10.1109/TEC.2018.2873318.
- [26] ABDELMOULA, Rihab, Benhadj NAOUREZ, Mohamed CHAIEB a Rafik NEJI. Reducing torque ripples in permanent magnet synchronous motor [online]. September 2017 [cit. 2023-05-05]. Dostupné z: <https://1url.cz/wrmZ1>
- [27] D. Barman and V. R. Chowdhury, "An Odd Number of Pole Pairs to Minimize Cogging Torque With Mechanical Symmetry Preserved,"2018 *IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES)*, Chennai, India, 2018, pp. 1-4, doi: 10.1109/PEDES.2018.8707779.
- [28] J. -H. Lee, Y. -C. Kwon and S. -K. Sul, "High-Fidelity Induction Motor Simulation Model Based on Finite Element Analysis,"in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 69, no. 10, pp. 9872-9883, Oct. 2022, doi: 10.1109/TIE.2022.3163556.

## Seznam symbolů, veličin a zkratek

<b>IPM-SM</b>	Synchronní stroj s vnořenými permanentními magnety
<b>MKP</b>	Motoda konečných prvků
<b>PM</b>	Permanentní magnet
<b>PMSM</b>	Synchronní stroj s permanentními magnety
<b>PRM</b>	Parazitní reluktanční moment
<b>SM-SM</b>	Synchronní stroj s permanentními magnety na povrchu
<b>SR-Motor</b>	Spínaný reluktanční motor
<b>Syn-RM</b>	Synchronní reluktanční motor
$2_p$	Počet pólů stroje
$B_r$	Remanentní magnetická indukce
$B_\delta$	Magnetická indukce ve vzduchové mezeře
$BH_{\max}$	Maximální energetický součin
$H_c$	Koercitivní síla
$L_1$	Vlastní indukčnost statoru
$L_2$	Vlastní indukčnost rotoru
$L_{12}$	Vzájemná indukčnost statoru a rotoru
$m$	Měrný moment stroje
$m_f$	Počet fází
$M$	Moment stroje
$M_e$	Vnitřní moment stroje
$n_s$	Nominální otáčky stroje
$p_{\text{efektivita}}$	poměr efektivity úpravy stroje
$Q_s$	Počet statorových drážek
$X_d$	Reaktance v ose $d$ (v podélné ose)
$X_q$	Reaktance v ose $q$ (v příčné ose)
$\text{avg}(I)$	Týkající se hodnoty průměrného momentu napájeného stroje
$\text{max}(I=0)$	Týkající se hodnoty parazitního reluktančního momentu nenapájeného stroje
$\text{prm}$	Týkající se průběhu parazitního reluktančního momentu stroje
$\text{ripp}$	Týkající se průběhu zvlnění momentu stroje
$\text{ripp}(I)$	Týkající se hodnoty momentového zvlnění napájeného stroje
$\alpha$	Úhel natočení ( <i>skewing</i> )
$\beta$	Zátěžný úhel stroje
$\Delta$	Rozdíl hodnot
$\zeta$	Poměr indukčností v ose $d$ a v ose $q$

$\theta$	Vzájemný úhel rotoru a statoru
$\vartheta$	Teplota okolí
$\mu_{rM}$	Relativní permeabilita magnetu
$\mu_{r0}$	Relativní permeabilita vakua
$\varphi$	Úhel posunutí geometrie vůči ose pólu

## Seznam Příloh

K této DP náleží 2 tabulkové přílohy. Přílohy jsou vytvořeny v softwaru:

Microsoft®Excel®pro Microsoft 365 MSO (Version 2208 Build 16.0.15601.20644)  
64 bitů

[PŘILOHA\_A.xlsx] - Obsahuje seznam vypočtených hodnot s modely jejichž výsledky jsou blíže rozvedené v textu práce, obsahuje 7 listů pro modely:

1. list - Model 1 díra
2. list - Model 2 díry
3. list - Model 1 obdélník
4. list - Model 3 obdélníky
5. list - Model podélná bariéra
6. list - Model natočení statorových drážek
7. list - Model natočení rotorových drážek

[PŘILOHA\_B.xlsx] - Obsahuje seznam vypočtených hodnot dodatečných modelů. Příloha obsahuje 9 listů náležící modelům:

1. list - Model 1 díra pod magnety
2. list - Model 3 díry
3. list - Model 4 díry
4. list - Model 1 elipsa
5. list - Model 2 elipsy
6. list - Model 3 elipsy
7. list - Model 4 elipsy
8. list - Model trojúhelníkový výřez
9. list - Model 3 trojúhelníkové výřezy