

**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

Fakulta elektrotechnická



**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**Reluktanční synchronní motor**

**Synchronous reluctance motor**

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management

Studijní obor: Aplikovaná elektrotechnika

Vedoucí práce: Ing. Pavel Koblíček, Ph.D.

**2021**

**Jakub Rypan**



## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Rypan** Jméno: **Jakub** Osobní číslo: **483831**  
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**  
Zadávající katedra/ústav: **Katedra elektrických pohonů a trakce**  
Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**  
Specializace: **Aplikovaná elektrotechnika**

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Synchronní reluktanční motor**

Název bakalářské práce anglicky:

**Synchronous Reluctance Motor**

Pokyny pro vypracování:

1. Prostudujte problematiku vzniku momentu synchronního reluktančního motoru.
2. Seznamte se s různými konstrukcemi rotorů, shrňte jejich výhody, nevýhody a oblasti použití.
3. Diskutujte použití synchronních reluktančních pohonů v trakčních aplikacích.
4. Zjistěte, jaké jsou aktuální trendy a výzvy v této oblasti, a proveďte diskuzi.

Seznam doporučené literatury:

- [1] Boldea, I.: Reluctance Synchronous Machines and Drives, Oxford University Press, 2001.
- [2] Heidari, H. et al.: A Review of Synchronous Reluctance Motor-Drive Advancements, Sustainability, 13(2), 2021.
- [3] Wu, H., Depernet, D., Lanfranchi, V.: A Survey of Synchronous Reluctance Machine used in Electric Vehicle, International Conference on Renewable Energy: Generation and Applications, Feb 2016, Belfort, France.
- [4] Bianchi, N. et al., Electric Vehicle Traction Based on Synchronous Reluctance Motors, IEEE Trans. on Ind. App., Vol. 52, No. 6, Nov/Dec 2016.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

**Ing. Pavel Koblře, Ph.D., katedra elektrických pohonů a trakce**

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

Datum zadání bakalářské práce: **10.02.2021** Termín odevzdání bakalářské práce: **13.08.2021**

Platnost zadání bakalářské práce: **30.09.2022**

Ing. Pavel Koblře, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

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

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Datum převzetí zadání

Podpis studenta



## PODĚKOVÁNÍ

---

Tímto bych rád poděkoval svému vedoucímu práce Ing. Pavel Koblře, Ph.D. za cenné rady, tipy, doporučení a hlavně za trpělivost a ochotu pomoci při psaní této práce. Dále bych rád poděkoval svým přátelům a především rodině, která mi byla oporou nejen při psaní této práce, ale po celou dobu studia.

## PROHLÁŠENÍ

---

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

V Praze dne 12. srpna 2021

.....

## ABSTRAKT

---

Tato bakalářská práce se zabývá rozбором reluktančních synchronních motorů (RSM). Cílem je přehledně shrnout dostupné informace ohledně těchto motorů. V rámci této práce je vysvětlen základní princip činnosti RSM, jsou popsány jednotlivé konstrukční řešení rotoru včetně jejich výhod a nevýhod a je shrnuto použití těchto motorů. Dále se práce zabývá porovnáním RSM s ostatními typy motorů a jejich možným využitím v trakčních aplikacích. Závěrem této práce je shrnující diskuze týkající se aktuálních trendů v oblasti RSM včetně predikce budoucího vývoje.

**Klíčová slova:** Synchronní reluktanční motor, reluktanční moment, konstrukce rotoru, trakční aplikace.

## ABSTRACT

---

This bachelor thesis deals with analysis of synchronous reluctance motors (SynRM). This work aims to summarize the available information about SynRM motors. Within this thesis basic principle of SynRM operation is explained, individual design solutions of the rotor, including their advantages and disadvantages are described, and the usage of these motors is summarized. SynRM are compared to other motor types, and their possible use in traction applications is discussed. Concluding discussion concerns current trends in the field of SynRM, including prediction of the future development.

**Keywords:** Synchronous reluctance motor, reluctance torque, rotor design, traction applications.

# Obsah

Úvod.....	1
1. Princip vzniku reluktančního momentu .....	2
1.1 Reluktance.....	2
1.2 Indukčnost.....	3
1.3 Vznik reluktančního momentu .....	4
1.4 Moment RSM.....	7
2. Historie RSM .....	8
3. Konstrukce rotorů RSM .....	11
3.1 Klecové rotory.....	12
3.2 Bezklecové rotory .....	13
3.2.1 Axiálně laminované rotory.....	13
3.2.2 Radiálně laminované rotory .....	14
4. Kvalitativní činitele.....	16
4.1 Účinník.....	16
4.2 Zvlnění momentu .....	17
4.3 Hustota momentu .....	20
5. Porovnání RSM s ostatními typy motorů, výhody a nevýhody.....	21
5.1 Výhody RSM .....	21
5.2 Nevýhody RSM.....	21
5.3 Porovnání RSM s ASM.....	21
5.4 Porovnání RSM a PMSM.....	23
6. Použití RSM.....	23
7. Reluktanční synchronní motory obsahující permanentní magnety .....	24
8. Elektrická trakce.....	26
8.1 Požadavky na trakční motor.....	26
8.2 Elektromobily.....	27
8.2.1 Aktuální trendy.....	27
8.3 Železniční trakční aplikace.....	28
8.3.1 Aktuální trendy.....	29
9. Diskuze.....	29
Závěr .....	31
Citovaná literatura.....	32

## Seznam obrázků

Obr. 1: Reluktance v magnetickém obvodu .....	2
Obr. 2: Vyznačení směru podélné osy $d$ a směru příčné osy $q$ .....	3
Obr. 3: Moment působící na rotor v závislosti na jeho natočení .....	5
Obr. 4: Model siločar magnetického toku uvnitř RSM v závislosti na tvaru rotoru.....	7
Obr. 5: Základní dělení konstrukcí rotorů RSM z hlediska tvaru.....	11
Obr. 6: Náhled na TLA rotor (vlevo) a ALA rotor (vpravo) z boku .....	12
Obr. 7: Typy rotorů s rozběhovými klecemi .....	13
Obr. 8: Různé způsoby tvarování plechů a bariér ALA rotorů.....	14
Obr. 9: Příklady konstrukcí TLA rotorů .....	15
Obr. 10: Graf závislosti účinníku na úhlu statorového proudu RSM .....	16
Obr. 11: Fázový úhel mezi jednotlivými žebry jedné bariéry .....	18
Obr. 12: Rotorové konstrukce potlačující vyšší harmonické složky v momentu .....	19
Obr. 13: RSM doplněný konstrukcí „retaining sleeve“ .....	20
Obr. 14: Porovnání celkových ztrát RSM a ASM o výkonu 15 kW a rychlosti 1500 ot/min .....	22
Obr. 15: Porovnání účinností RSM a ASM v závislosti na výkonu motoru.....	22
Obr. 16: Porovnání PMA-SynRM s RSM z hlediska momentu, výkonu, účinníku a účinnosti v závislosti na rychlosti motoru .....	24
Obr. 17: Rotor PMA-SynRM, který vznikl kombinací IPMSM a RSM .....	24
Obr. 18: Porovnání rotorových konstrukcí různých typů motoru.....	25
Obr. 19: Rozdílné umístění magnetů v rotoru PMA-SynRM.....	26
Obr. 20: Porovnání jednotlivých typů motorů používaných v železniční trakci .....	29



## Seznam zkratek

RSM	reluktanční synchronní motor
PMa-SynRM	<i>permanent magnet assisted synchronous reluctance motor</i> (reluktanční synchronní motor s magnety v rotoru)
ASM	asynchronní motor
SM	synchronní motor
TLA	<i>transversally laminated anisotropic rotor</i> (radiálně laminovaný rotor)
ALA	<i>axially laminated anisotropic rotor</i> (axiálně laminovaný rotor)
PMSM	<i>permanent magnet synchronous motor</i> (synchronní motor s magnety v rotoru)
FEM	<i>finite element method</i> (metoda konečných prvků)
R&J	<i>Romeo and Juliet</i> konstrukce rotoru
IPMSM	<i>interior permanent magnet synchronous motor</i> (synchronní motor s permanentními magnety uvnitř rotoru)
SPMSM	<i>surface permanent magnet synchronous motor</i> (synchronní motor s permanentními magnety na povrchu rotoru)



# Úvod

Reluktanční synchronní motory (RSM) jsou točivé střídavé stroje, které využívají reluktančního momentu k přeměně elektrické energie na mechanickou. RSM spadají do kategorie synchronních motorů se speciální konstrukcí. V minulosti nenašly v průmyslu širší využití vinou řady nedostatků oproti jiným typům motorů, nicméně v posledních letech se výzkum i využití těchto motorů těší velkému zájmu. Stále se publikuje velké množství odborných článků a vědeckých prací, které se zabývají především konstrukčním zlepšením RSM s cílem dosáhnout co nejlepších vlastností. Příčinou zvýšeného zájmu v posledních letech byla cenová nestabilita kovů vzácných zemin, z kterých se vyrábí permanentní magnety do synchronních motorů, nízké výrobní náklady a relativně dobré hodnoty účinnosti těchto motorů. Velké množství publikací na téma konstrukce a vlastností RSM spolu s jejich aktuální popularitou bylo podmětem k zadání této rešeršní práce. Cílem této práce je přehledně a srozumitelně shrnout dostupné informace týkající se stěžejních vlastností těchto motorů, zjistit aktuální trendy a výzvy a provést diskuzi.

Práce začíná vysvětlením základních pojmů potřebných k pochopení principu činnosti RSM a vzniku momentu v RSM. Následuje historie, shrnující postupný vývoj rotorů RSM a jejich použití napříč jednotlivými časovými obdobími. Dále jsou popsána možná konstrukční řešení rotoru RSM, přičemž jsou zhodnoceny vlastnosti a kvalitativní činitele. Nechybí ani porovnání jednotlivých konstrukcí mezi sebou. Kvalitativní činitele jsou rozebrány z hlediska současně známých možností optimalizace jednotlivých kvalitativních činitelů. Práce také shrnuje aktuální použití RSM. Následně se práce zabývá základními vlastnostmi reluktančních synchronních motorů obsahujících permanentní magnety v rotoru (PMA-SynRM), které jsou v současnosti předmětem velkého zájmu, obzvláště v elektrické trakci. Poté jsou shrnuty aktuální trendy v elektrické trakci a to jak v železniční, tak automobilové. Závěr této práce obsahuje diskuzi ohledně současných technických, ekonomických a ekologických trendů RSM včetně predikce možného budoucího vývoje.

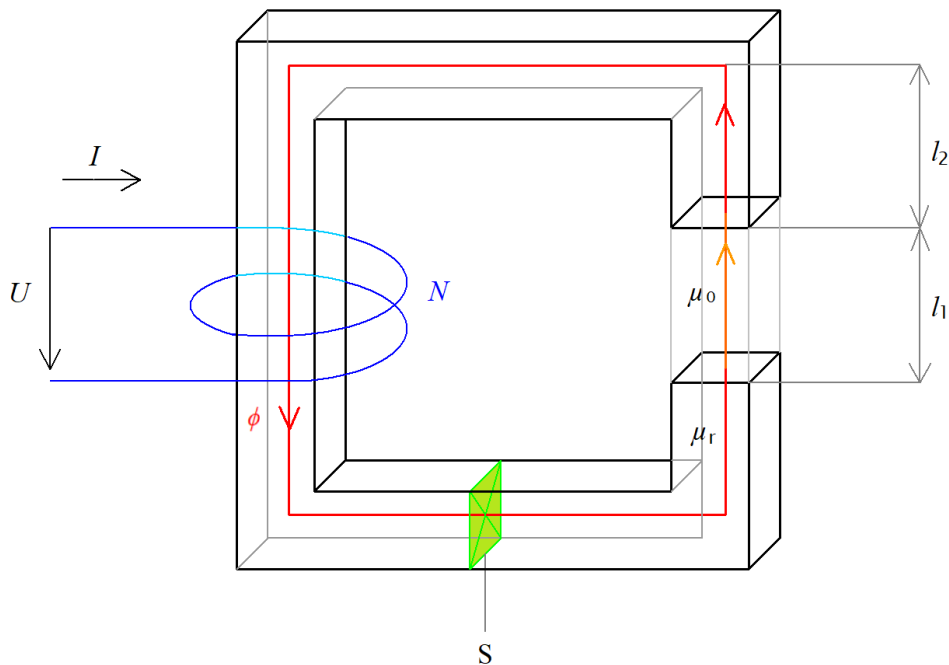
# 1. Princip vzniku reluktančního momentu

## 1.1 Reluktance

Reluktance  $R_m$ , rovněž známá jako magnetický odpor, je fyzikální veličina, která vyjadřuje míru schopnosti průchodu magnetického toku prostředím určitých vlastností, a je definována jako

$$R_m = \frac{l}{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot S}, \quad (1)$$

kde  $l$  je délka cesty magnetického toku  $\phi$ ,  $\mu_0$  je permeabilita vakua,  $\mu_r$  je relativní permeabilita prostředí a  $S$  je uvažovaný průřez cesty magnetického toku. Z tohoto vztahu vyplývá, že reluktance dané cesty závisí na materiálu a geometrii cesty magnetického toku. Uvedené lze dobře vysvětlit např. pomocí obr. 1. Obr. 1 obsahuje magnetický obvod, který se skládá z feromagnetického tělesa ve tvaru písmena “c” a cívky s  $N$  závitů, která toto těleso obepíná. Cívkou prochází proud  $I$ , který způsobuje vznik magnetického toku  $\phi$ . Magnetický tok se snaží vždy procházet cestou nejmenšího magnetického odporu, tj. nejmenší reluktance, aby magnetická energie systému byla co největší. (To je jeden ze základních zákonů, které lze pozorovat všude kolem nás.) Z toho plyne, že dráha magnetického toku  $\phi$  v tomto magnetickém obvodu bude prakticky tvořena magnetickým obvodem a pouze v místě jeho přerušeni vzduchem (siločára magnetického toku musí být podle čtvrté Maxwellovy rovnice uzavřená) [1]. Pokud bude vzduchová mezera dostatečně tenká, a průřez vzduchové mezery tak bude zhruba totožný s průřezem feromagnetické cesty, vyplývá tento poznatek přímo z rovnice (1), neboť feromagnetikum má o několik řádů větší relativní permeabilitu. Je nutno dodat, že obr. 1 je čistě schématický k vysvětlení problematiky. Pokud bychom měli reálný obvod, siločáry magnetického toku by neměly tvar červené křivky na obrázku, nelámaly by se do pravého úhlu v prostředku průřezu a objevil by se rozptyl.



Obr. 1: Reluktance v magnetickém obvodu.

## 1.2 Indukčnost

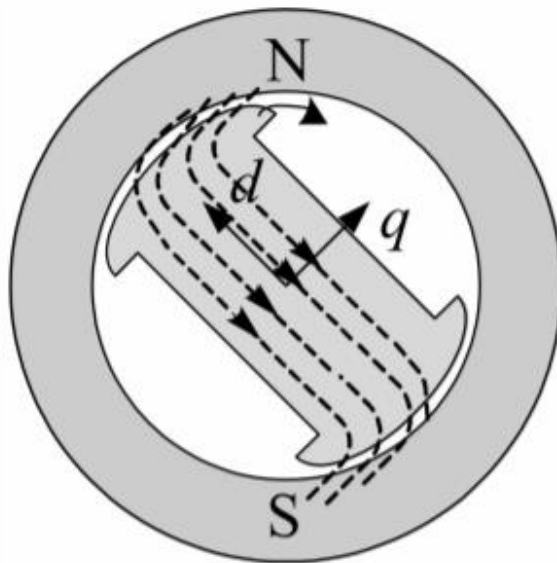
Indukčnost je fyzikální veličina, která vyjadřuje schopnost elektricky vodivých těles protékaných elektrickým proudem vytvářet magnetické pole. Z předchozí kapitoly již víme, že reluktance ovlivňuje velikost magnetického toku, což je úhrn toku magnetické indukce  $\mathbf{B}$  procházející danou plochou  $S$ . Magnetický tok je definován jako

$$\phi = \iint_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S}. \quad (2)$$

Magnetický tok nám slouží k popisu celkového působení magnetického pole s daným rozpořádáním [1]. Můžeme tedy předpokládat, že indukčnost a reluktance spolu nějak souvisí a lze vyjádřit jednu veličinu pomocí té druhé. To se dá odvodit pomocí statické definice vlastní indukčnosti, která popisuje vztah mezi magnetickým tokem a proudem cívky

$$L = \frac{N \cdot \phi}{I} = \frac{N \cdot U_m}{I \cdot R_m}, \quad (3)$$

kde  $R_m$  je celková reluktance magnetického obvodu. Tento vztah je důležitý, jelikož tato skutečnost se často využívá k popisu RSM. V následující kapitole popisují, jak vzniká reluktanční moment a že je pro něj důležité, aby celková reluktance pole vybuzeného statorem byla závislá na tom, jak je rotor natočen. Inženýři k popisu takovýchto rotorů představili tzv. dq analýzu, která nám pomáhá tuto situaci lépe matematicky popsat a i graficky znázornit. Principem této analýzy je to, že rotor má v určitém směru vůči cestě magnetického toku reluktanci co nejnižší a v jiném směru reluktanci co nejvyšší. Osu směru s nejnižší reluktancí označujeme jako podélnou, značí se  $d$  z anglického *direct*, a osu směru s nejvyšší reluktancí označujeme jako příčnou, značí se  $q$  z anglického *quadrature*. Tím popíšeme daný rotor a můžeme mluvit i o různých indukčnostech v daných směrech  $d$  a  $q$ , tedy o podélné indukčnosti  $L_d$  a příčné indukčnosti  $L_q$ . Na obr. 2 je zobrazeno pro jednoduchý dvoupólový rotor, jak by se určil směr os  $d$  a  $q$ .

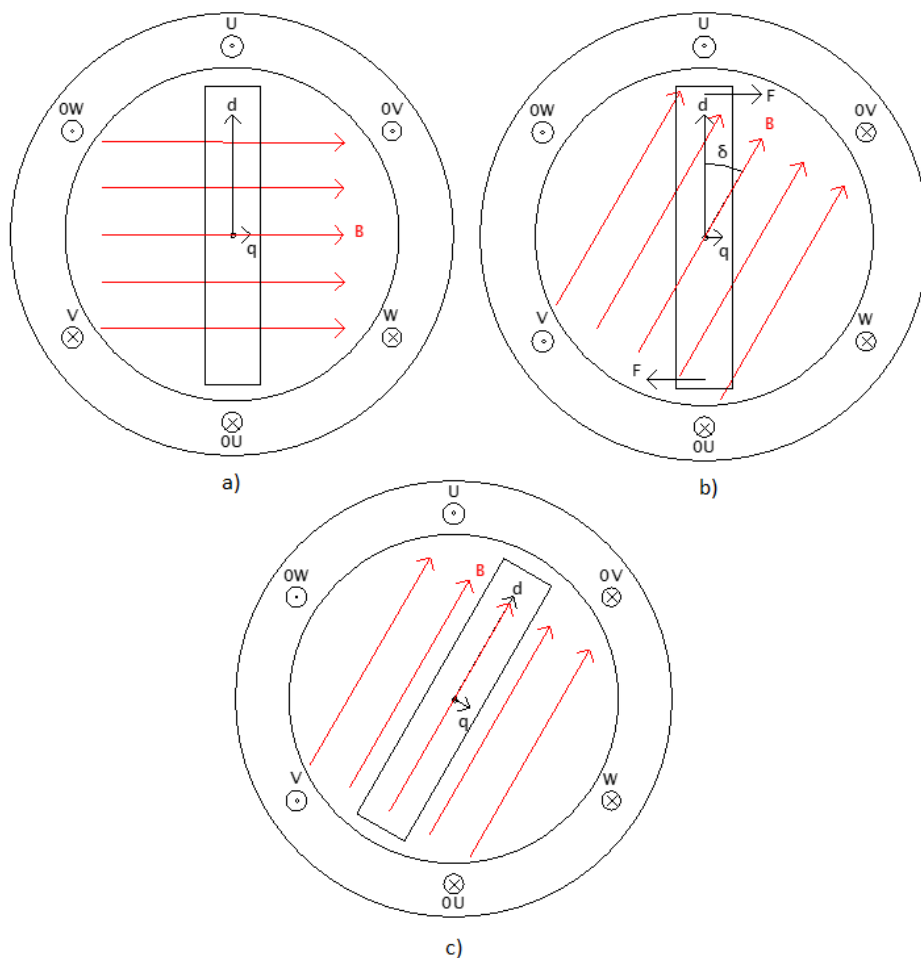


Obr. 2: Vyznačení směru podélné osy  $d$  a směru příčné osy, převzato z [2].

### 1.3 Vznik reluktančního momentu

Reluktanční moment v RSM vzniká, pokud rotor motoru má po obvodu vrtání statoru proměnnou reluktanci. Pokud je do homogenního magnetického pole vložen rotor z materiálu s danou permeabilitou, který je symetrický vůči magnetickému poli nezávisle na natočení (válcový tvar, tj. kruhový průřez rotoru), nebude vznikat reluktanční moment. To je způsobeno tím, že magnetické pole statoru prochází rotorem a nezávisle na natočení rotoru bude reluktance tohoto rotoru stále stejná. Magnetický odpor cesty magnetického toku, který je vybuzen statorovým vinutím, je tedy pořád stejně velký. Rotor se neotáčí, protože nevzniká žádný moment, který by na rotor působil. Pokud se však vloží do magnetického pole nesymetrický rotor s danou permeabilitou, který v závislosti na natočení ovlivní magnetické pole statoru (například rotor s různou šířkou vzduchové mezery – např. obdélníkový průřez), pak vzniká reluktanční moment působící na daný rotor připevněný k hřídeli. To je způsobeno tím, že reluktance cesty magnetického pole vybuzeného statorovým vinutím bude různě veliká v závislosti na natočení rotoru. Velikost reluktančního momentu je tedy závislá na natočení rotoru. Pokud rotoru nebude bránit dostatečně veliký protimoment, rotor se začne otáčet, a to až do doby, kdy bude reluktance magnetického pole nejnižší. Pro rotor obdélníkového průřezu tato situace nastane ve chvíli, kdy je rotor natočený tak, že delší strana rotoru má stejný směr, jako magnetické siločáry magnetického pole. To proto, že relativní permeabilita materiálu rotoru  $\mu_1$  je mnohonásobně vyšší než relativní permeabilita vzduchové mezery  $\mu_0$ . Rotor je totiž tvořen z plechů, jejichž relativní permeabilita má hodnotu v řádech tisíců, zatímco relativní permeabilita vzduchu má prakticky hodnotu 1. Z rovnice (1) tedy vyplývá, že rotor má značně nižší reluktanci oproti vzduchové mezeře. A jelikož s různým natočením rotoru je hodnota  $l$  vzduchové mezery i plechů rotoru ze vztahu (1) různě veliká, tak je v prostoru statorového magnetického pole různá reluktance v závislosti na natočení rotoru. Rotor, pokud mu není bráněno nějakou jinou vnější silou, se jako každý jiný systém snaží zaujmout takový energetický stav, ve kterém má systém co nejvyšší vnitřní energii (zde se jedná o magnetickou energii) [3]. Tohoto stavu dosahuje rotor tehdy, když je natočen tak, aby co nejméně zeslaboval magnetické pole statoru, tedy když je natočen tak, aby cesta siločar magnetického pole měla co nejnižší reluktanci. Toto je tedy princip vzniku reluktančního momentu.

K dosažení co nejvyšších hodnot reluktančního momentu, je tedy potřeba vytvořit rotor s co nejvyšší reluktancí v jednom směru, zatímco reluktanci v druhém směru požadujeme co nejnižší. Obr. 3 sleduje tři situace, kdy je statorové vinutí nabuzené stejnosměrným proudem tak, aby vytvářelo kvazi-homogenní magnetické pole v prostoru pro rotor. V každé situaci je různě natočený rotor obdélníkového průřezu vůči tomuto poli. Na obr. 3a) je rotor uvnitř statorového magnetického pole natočen tak, že směr osy  $q$  je rovnoběžný se směrem vytvořeného magnetického pole. V tomto případě nebude na rotor působit žádný moment, je to sice stav s nejvyšší reluktancí, ale působící síly na rotor se vykompenzují. Je to tzv. labilní poloha. Jakmile je rotor z této polohy byť jen lehce vychýlen, bude již na rotor působit moment. To můžeme pozorovat na obr. 3b). Zde je uvnitř nabuzeného statorového magnetického pole rotor natočen tak, že směr magnetického pole je mezi směry os  $d$  a  $q$ . V této situaci působí na rotor síly, které vytváří moment, který způsobí otočení rotoru okolo hřídele v takovém směru, aby podélná osa  $d$  byla ve stejném směru, jako je magnetické pole vytvořené nabuzením statorových cívek. Na obr. 3c) je znázorněna situace, kdy rotor má podélnou osu  $d$  ve stejném směru jako magnetický tok. Tato pozice rotoru se nazývá pozicí stabilní. Pokud rotor lehce vychýlíme, rotor vlivem reluktančního momentu bude působit proti vychýlení a bude se snažit vrátit zpět do této pozice.



Obr. 3: Moment působící na rotor v závislosti na natočení a) osa  $q$  je podélná se směrem magnetického pole, b) směr magnetického pole je mezi osami  $d$  a  $q$ , c) osa  $d$  je podélná se směrem magnetického pole

Takto lze chápat princip vzniku reluktančního momentu v případě, že stator bude stejnosměrným proudem nabuzen tak, aby vytvářel neměnné magnetické pole. Od motoru se však chce, aby vykonával práci a měnil elektrickou energii na mechanickou. Proto je potřeba pomocí statoru vytvořit točivé magnetické pole, které bude otáčet díky reluktančnímu momentu rotorem. Toho, aby statorové vinutí RSM vytvářelo točivé magnetické pole je dosaženo tak, že stator je tvořen trojfázovým vinutím, přičemž na každou fázi je přivedeno střídavé napětí se stejně velkou amplitudou, ale s fázovým posunem vůči ostatním dvěma fázím o  $+120^\circ$  a  $-120^\circ$ . Díky tomu vznikne točivé magnetické pole, jehož mechanická rychlost otáčení je rovna

$$\omega_m = \frac{2\pi f}{p}, \quad (4)$$

kde  $f$  je frekvence fázového napětí statoru a  $p$  je počet pólů statoru [4]. Pokud však chceme, aby RSM pracoval pouze na principu vzniku reluktančního momentu, který byl popsán dříve, tak je zapotřebí zdroj proměnného napětí, frekvenční měnič. Ten bude potřeba proto, že se rotor RSM, již podle názvu, otáčí synchronně se statorovým polem. Pokud ale připojíme na statorové vinutí například klasické trojfázové napětí, které máme dostupné v domácnostech (tedy tři fáze s efektivním napětím 230 V, fázově vůči sobě posunuté o  $120^\circ$  elektrických a frekvencí 50 Hz), pak se rotor RSM točit nezačne. To je způsobeno tím, že točivé magnetické pole statoru se bude otáčet příliš velkou rychlostí a rotor se s polem nedokáže synchronizovat. Proto je potřeba frekvenčního měniče, který bude frekvenci postupně zvyšovat z nulové hodnoty až na frekvenci požadovanou. Pokud by rotorová konstrukce

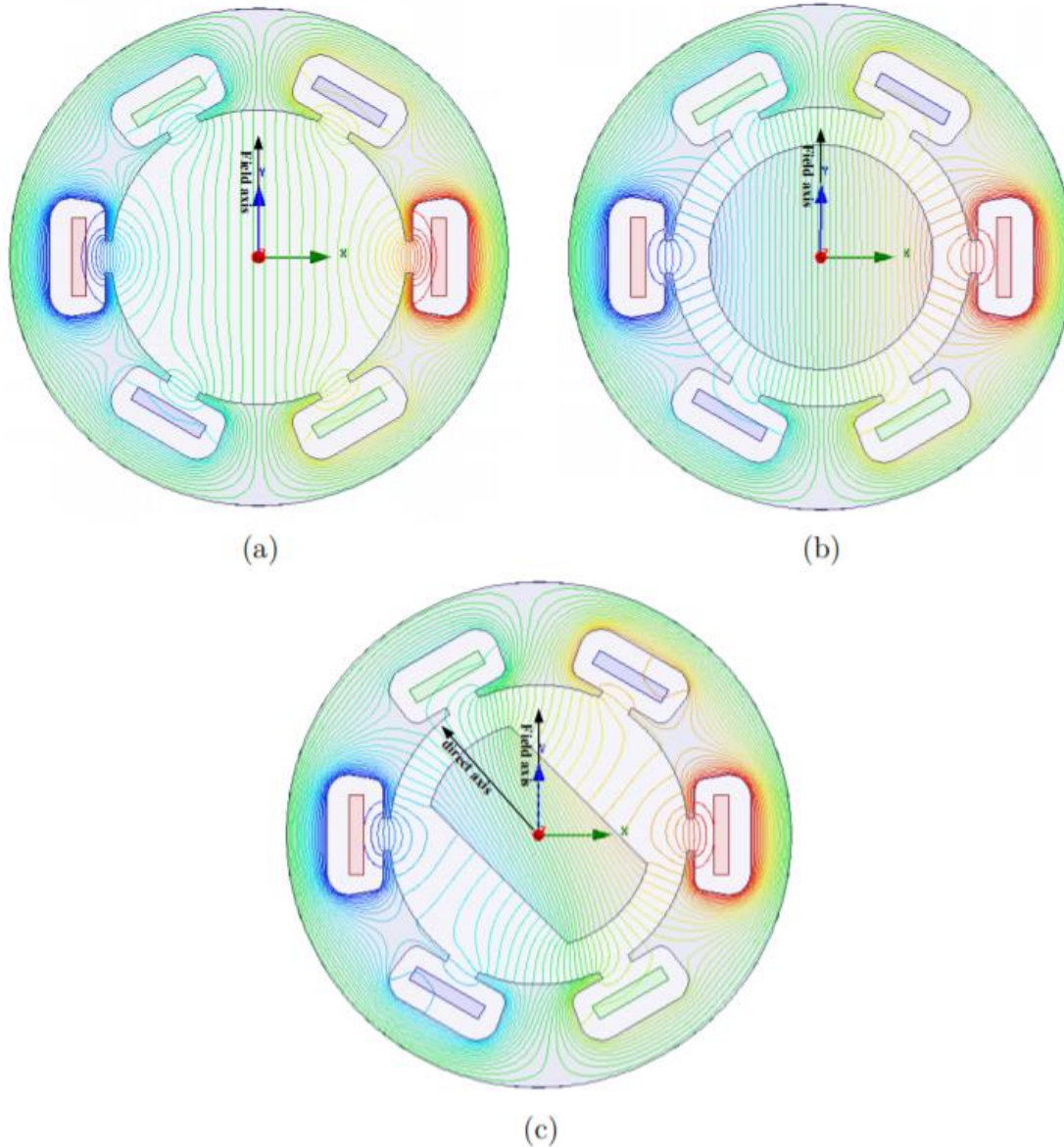
obsahovala i asynchronní rozběhovou klec, pak není potřeba frekvenčních měničů, protože rotor se rozběhne na stejném principu, jakým se rozbíhají asynchronní motory a do synchronismu může být vtažen reluktančním momentem.

Ve chvíli, kdy se rotor RSM točí synchronními otáčkami (nezáleží na frekvenci tohoto pole), je směr osy  $d$  vůči směru magnetického pole zpožděn o zátěžný úhel  $\delta$ , což je způsobeno zátěžným momentem na hřídeli, který je tvořen mimo zátěže i třením v ložiskách či vlastní ventilací. Nezatížený motor by měl tedy osu  $d$  ve stejném směru jako je směr točivého magnetického pole, pokud zanedbáme ztráty a všudypřítomný zátěžný moment způsobený třením ložisek a vlastní ventilací.

Je důležité si uvědomit, že vložením nesymetrického rotoru do homogenního magnetického pole statoru (obzvláště, pokud bude natočený jinak, než podélně s magnetickým polem) dojde k deformaci magnetického pole. To je způsobeno různou permeabilitou rotoru a vzduchové mezery spolu s nesymetrií rotoru. Siločáry magnetického toku se zdeformují tak, aby vytvořily takovou cestu, která bude mít nejnižší celkovou reluktanci. Takto vytvořený systém se tedy snaží předejít deformaci magnetického pole právě tím, že rotor se snaží zaujmout pozici s co nejnižší reluktancí, což je zároveň stav s nejvyšší magnetickou energií.

Na obr. 4 jsou znázorněny tři situace, kdy vždy bylo vytvořeno homogenní magnetické pole uvnitř motoru RSM, které jsme dostali nabuzením statoru stejnosměrným proudem. Obr. 4 poté znázorňuje, jak budou vypadat siločáry magnetického pole v závislosti na tom, co je vloženo do tohoto pole. Na obr. 4a) je znázorněno magnetické pole bez přítomnosti rotoru uvnitř pole. Jak je vidět, siločáry magnetického pole vytváří téměř homogenní pole ve směru osy  $y$ , která je vyobrazena na obrázku. Na obr. 4b) je dovnitř stejně nabuzeného magnetického pole vložen rotor válcového tvaru. Siločáry magnetického pole se z větší části nezměnily, stále mají směr osy  $y$ . Jediný rozdíl je ten, že některé siločáry lehce změny tvaru oproti obr. 4a) a to tak, aby procházely vloženým rotorem, jelikož tento rotor má nižší relativní permeabilitu než vzduch a tato cesta má nižší celkovou reluktanci. Na obr. 4c) dojde ovšem k podstatné změně magnetického pole právě proto, že se dovnitř vloží rotor vhodného tvaru, který není natočený podélnou osou  $d$  ve směru osy  $y$ . Je patrné, že přestože stator byl nabuzen tak, aby magnetický tok byl ve směru osy  $y$ , tak kvůli rotoru dojde k deformaci magnetického pole a magnetický tok je natočen podél osy  $d$ , která má podstatně nižší reluktanci oproti vzduchové mezeře.





Obr. 4: Model siločar magnetického toku uvnitř RSM v závislosti na tvaru rotoru. a) v poli není rotor, b) v poli je symetrický rotor, c) nesymetrický rotor, převzato z [5].

## 1.4 Moment RSM

V předchozí kapitole byl vysvětlen princip, jakým vzniká moment působící na rotor RSM. Dále je potřeba definovat velikost působícího momentu pomocí matematických vztahů, abychom s ním mohli dále pracovat. Jak již bylo vysvětleno, velikost momentu je závislá především na rozdílu indukčností v osách  $d$  a  $q$  a na natočení rotoru vůči magnetickému poli statoru. Je několik způsobů, jak se dá tato skutečnost vyjádřit matematickým vztahem. V této kapitole jsou uvedeny tři nejdůležitější.

První způsob vyjádření momentu RSM je pomocí napájecího statorového napětí  $U$ , zátěžného úhlu  $\delta$  (úhel mezi osou  $d$  a směrem magnetického pole), podélné a příčné reaktance  $X_d$  a  $X_q$ , počtu pólů  $m$  a mechanickou úhlovou rychlostí  $\omega_{1m}$  rotoru. Takto vyjádřený moment představuje statický reluktanční moment [4]:

$$M_{rel} = \frac{m \cdot U^2}{\omega_{1m} \cdot 2} \cdot \left( \frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \cdot \sin 2\delta . \quad (5)$$

Druhý způsob vyjádření momentu RSM je pomocí složek  $\psi_d$  a  $\psi_q$  spřaženého magnetického toku v osách d a q, složek statorového proudu  $i_d$  a  $i_q$  a počtem pólů. Takto lze vyjádřit okamžitou hodnotu momentu [6] [7]:

$$M_{rel} = \frac{3 \cdot p}{2} \cdot (\psi_{ds} \cdot i_{qs} - \psi_{qs} \cdot i_{ds}). \quad (6)$$

Třetí způsob vyjádření momentu se dá odvodit přímo z vztahu (6) [8]. Na rozdíl od předchozího vztahu tento vztah namísto proudů v osách d a q obsahuje amplitudu statorového proudu  $I_s$  a namísto složek spřaženého magnetického toku obsahuje indukčnosti v daných osách d a q  $L_d$  a  $L_q$ . Jedná se tedy také o okamžitou hodnotu momentu. Výsledný vztah vypadá následovně:

$$M_{rel} = \frac{3 \cdot p}{4} \cdot (L_d - L_q) \cdot I_s^2 \cdot \sin 2\delta. \quad (7)$$

Rovnice (5), (6), (7), potvrzují, že k vytvoření velkého momentu je velmi důležité konstruovat rotor RSM tak, aby rozdíl reluktancí v daných osách byl co nejvyšší. Dále si můžeme všimnout, že reluktanční moment RSM bude nejvyšší při zátěžném úhlu  $\delta = 45^\circ$ . Zároveň ze členu  $\sin 2\delta$  vyplývá, že pokud osa q nebo osa d je rovnoběžná se směrem magnetického toku, tedy zátěžný úhel nabývá hodnot  $0^\circ$  a  $90^\circ$ , pak na rotor RSM nebude působit žádný moment. To je v souladu s tím, jak byl vysvětlen princip vzniku reluktančního momentu v předchozí kapitole. Z rovnic také vyplývá, že čím vyšší bude počet pólů, tím vyšší (přímo úměrně) bude hodnota momentu působícího na RSM.

Reluktanční moment se nevyužívá pouze v RSM. Je přítomný ve všech synchronních strojích konstruovaných tak, že rotor má různě velkou reluktanci v závislosti na natočení rotoru. Například klasické synchronní stroje s vyniklými póly využívají nejen tzv. synchronního momentu, který vzniká díky nabuzení rotorového budicího vinutí stejnosměrným proudem, ale také momentu reluktančního. Reluktanční moment je v tomto případě užitečný, protože při asynchronním rozběhu pomáhá dostat rotor do synchronismu a zvyšuje přetížitelnost motoru. Existují též synchronní motory s permanentními magnety, které jsou konstruovány podobně jako RSM, avšak rotor obsahuje navíc permanentní magnety, takže je zde nejenom moment způsobený magnetickým polem magnetů vložených do rotoru, ale i reluktanční moment. Tyto stroje se v poslední době s velkou oblibou používají v elektrických vozidlech, protože mají řadu dobrých vlastností. Jim se věnuji v kapitole 7.

Moment RSM není konstantní, ale periodicky narůstá a klesá (což je zřejmé z předchozích vyjádření momentů). To je však často nežádoucí. Tomuto jevu se říká anglicky *torque ripple* neboli zvlnění momentu. Jeden z požadavků na RSM je, aby toto zvlnění bylo co nejnižší. Jak dosáhnout co nejnižšího zvlnění momentu je popsáno v kapitole 4.2.

## 2. Historie RSM

Princip, jak použít reluktančního momentu k pohánění motorů na přeměnu elektrické energie na energii mechanickou, je znám již více než 120 let. Poprvé se začalo uvažovat o vytvoření motorů na principu využití rozdílné reluktance rotoru poté, co Nikola Tesla v roce 1887 objevil a popsal, jak vytvořit točivé magnetické pole. Prvními motory, které fungovaly na tomto principu, byly spínané reluktanční motory [9]. Těmi se vědci zabývali, aby se zjistilo, zda nemají lepší vlastnosti než asynchronní a synchronní motory.

V roce 1899 vydal A. E. Blondel práci, která obsahovala dq analýzu synchronních strojů a popisovala jejich chování v příčném a podélném směru [10]. Ta se hojně používala k popisu chování synchronních strojů s vyniklými póly. J. K. Kostko využil této analýzy a začal se jako první zabývat konstrukcí a analýzou motorů, které se později začaly označovat jako RSM. V roce 1923 vydal první článek, který

se danou tematikou zabýval [11]. V onom článku uvádí, že účinník a účinnost těchto motorů bude nedostatečná k tomu, aby RSM mohly konkurovat asynchronním motorům (ASM), pokud se nevytvoří rotory se snahou maximalizovat rozdíl indukčností v ose d a q. Proto Kostko navrhuje design rotoru, kdy se střídají podélně vzduchové mezery s plechy rotoru, čímž dosahuje značně vyššího poměru indukčností než u rotorů s vyniklými póly. Také počítá teoreticky maximální dosažitelnou hodnotu momentu pro motor s tímto rotorem a uvádí, že by měl dosahovat 80 % momentu vůči ekvivalentnímu ASM. Tato práce je považována za počátek vývoje RSM. Důsledkem publikování článku bylo okamžité zvýšení zájmu o prozkoumání RSM a začali se jimi zabývat další inženýři jako například R. Doherty a A. C. Nickle. Ti popsali například charakteristiky momentu a výkonu RSM v závislosti na natočení úhlu rotoru. Přestože se Kostko vydal při analýze konstrukce rotorů RSM správným směrem k optimalizaci RSM, v této době se používaly pouze RSM, které byly vytvořené modifikací rotorů ASM či jednoduché rotory s vyniklými póly. Tyto motory našly v následujících letech jen velmi malé využití, a to pouze jako pohony čtecích a zapisovacích jednotek magnetických záznamových zařízení [12].

V 50. a 60. letech se začaly používat rotory z klasických synchronních motorů s vyniklými póly bez budičeho vinutí na rotoru. Důvodem vyššího použití oproti předchozím RSM byla jejich spolehlivost, robustnost a levná cena [13]. Díky své spolehlivosti se dokonce používaly tyto motory k posouvání regulačních tyčí v jaderných reaktorech. Také se používaly v textilním průmyslu [14]. Tyto motory však byly provozovány v aplikacích s konstantním napětím a konstantní frekvencí, proto obsahovaly ještě asynchronní rozběhovou klec. Kvůli této kleci byl poměr indukčností v příčné a podélné ose malý a účinnost i účinník nebyly dostatečné v porovnání s ASM či SM. To bylo příčinou značného poklesu zájmu o RSM.

Zájem průmyslových firem o RSM sice poklesl, ale výzkum stále probíhal a byla snaha zlepšit RSM natolik, aby mohly soupeřit s ASM. Na zlepšení konstrukčního řešení rotorů RSM se podíleli v 60. až 70. letech například Lawrenson nebo Ramamoorthy. Lawrenson navrhl dvě nové struktury rotoru. Obě struktury se řadí do tzv. *segmented rotors* neboli segmentové rotory, což jsou rotory tvořené plechovými segmenty přidělanými na hřídel, mezi kterými je vzduchová mezera. Tuto strukturu navrhl, protože v některých aplikacích se požaduje malá setrvačnost rotorů, čemuž vyhovují segmentové rotory lépe než rotory s vyniklými póly [15]. Lawrenson vydal několik článků, které se zabývají touto problematikou, kterou následně zlepšil Ramamoorthy [16]. Touto dobou se také objevil zájem o další způsob jak konstruovat rotor RSM. Nový způsob byl založen na principu, kdy rotor obsahuje bariéry, které brání magnetickému toku ve směru osy q s minimálním snížením toku v ose d. Tyto bariéry mohou být různě tvarované, různého počtu i materiálů a často se realizují pomocí vzduchové mezery. Touto strukturou rotoru RSM se zabývali například B. J. Chalmers nebo V. B. Honsinger [17]. Protože tyto bariéry byly často vytvořeny pomocí vzduchových mezer, bylo třeba dbát na to, aby byl motor zároveň stabilní při provozu s různými rychlostmi otáčení. Tím se zabýval Honsinger. Snažil se najít kompromis mezi mechanickou stabilitou a momentem působícím na rotor pomocí toho, že ve směru osy q v rotoru se díky vzduchovým bariérám vytvořily podpůrné můstky (v angličtině *bridges*). Větší počet můstků nebo širší můstky zajišťovaly větší mechanickou stabilitu. To ale bylo za cenu vyšší indukčnosti v příčném směru a takovýto rotor dosahoval nižších hodnot momentu.

Jak segmentové rotory, tak rotory s bariérami představovaly technologický pokrok. Obě struktury vykazují vyšší účinník, účinnost i moment než RSM s vyniklými póly. Díky tomu se začaly používat v aplikacích s širším rozsahem provozních rychlostí a tam, kde je potřeba víc motorů pracujících synchronně, jako jsou například papírny nebo textilní průmysl [17]. Avšak stejně jako u RSM s vyniklými póly o ně přestal být zájem, protože i přes značné zlepšení tyto RSM stále dosahovaly horších vlastností než klasický ASM.

Takto by to zůstalo nejspíš dodnes, nebýt pokroku v oblasti výkonové elektroniky. Pro RSM představovala přítomnost rozběhové klece v rotoru značný problém. Zkoušely se stále progresivnější designy rotorů. Jedním z nových designů rotorů RSM byly například *transversally laminated anisotropic rotors*, což překládáme jako radiálně laminované rotory (TLA). Dalším designem rotorů RSM byly *axially laminated anisotropic rotors*, což překládáme jako axiálně laminované rotory (ALA). Dokud však byla potřeba v rotoru rozběhová klec, tak poměr indukčností v podélném a příčném směru byl vždy nedostačující k tomu, aby RSM mohly konkurovat ASM a klasickým synchronním motorům (SM). Naštěstí výkonová elektronika zažila velký posun dopředu s vývojem tyristorů a tranzistorů v 80. a 90. letech. V té době byly tyristory i tranzistory čím dál víc dostupné, a to i cenově. Díky tomu přestala být rozběhová klec uvnitř rotorů RSM potřeba, protože byly k mání frekvenční měniče a RSM bylo možné rozběhnout z nulových otáček pomocí změny frekvence. Díky tomu se znovuobjevil zájem o RSM, ke kterým se vrátili například Miller [18] a Staton [19]. Miller se zabývá TLA a bariérovou strukturou rotorů, zatímco Staton se zabývá rotorem tvořeným jednou bariérou a ALA rotory.

Vývoj RSM byl v té době již tak daleko, že RSM by byly schopné ASM konkurovat, přestože ASM byl v té době mnohem rozšířenější a u RSM bylo třeba brát v potaz vyšší zvlnění momentu. RSM se přesto nepodařilo do průmyslu rozšířit, protože ve stejném časovém období (80. a 90. léta) přišly na trh synchronní motory s permanentními magnety (PMSM) z prvků vzácných zemin, jako je neodym či samarium. PMSM mají značně lepší účinník, účinnost i moment oproti RSM, takže zájem o RSM znovu poklesl, přestože se stále zkoumalo jak zefektivnit konstrukci RSM za účelem dosažení lepších vlastností vůči ASM.

Největší změna nastala mezi roky 2009 až 2011. Byla způsobena prudkým nárůstem ceny neodymu a dysprosia. Čína má největší zásoby vzácných kovů na světě a to včetně těchto dvou prvků. Většina nabídky na trhu byla proto tvořena právě Čínou, která měla v podstatě monopol na neodym a na dysprosium, které se přidávalo do neodymových magnetů, aby se zvýšila Curierova teplota. Na konci roku 2010 cena neodymu vzrostla až na pětadvacetinásobek původní ceny a cena dysprosia na dvaadvacetinásobek [20]. Důvodů nárůstu cen neodymu a dysprosia je více, ale hlavním důvodem byla Čína a její zákaz vyvážení vzácných kovů [21]. Ceny vzácných kovů potřebných k výrobě neodymových magnetů se po určité době vrátily zpět na původní hodnoty, ale mnoho podnikatelů a firem během této doby zkrachovalo, nebo přišlo o podstatně velkou finanční částku. To zapříčinilo, že v posledních deseti letech je znovu velký zájem o motory, které používají technologie bez vzácných kovů, aby podnikatelé předešli možným vysokým nárůstům cen vzácných kovů jako na přelomu roku 2010 a 2011. Během této doby RSM našly konečně využití v různých průmyslových aplikacích od pohonů čerpadel či kompresorů po pohony dopravníků [22]. Například firma ABB nabízí od roku 2012 RSM motory s TLA rotorem v širokém rozsahu výkonů od 5,5 kW až po 315 kW. V posledních letech je snaha optimalizovat TLA rotory, protože se věří, že to je nejslibnější konstrukce rotoru (viz kapitola 3).

### 3. Konstrukce rotorů RSM

Možné konstrukce rotorů RSM je nevhodnější dělit podle tří kritérií. První způsob, jak lze dělit rotory RSM je podle toho, zda rotor obsahuje klec pro asynchronní rozběh nebo ne. Jedná se pak o klecové a bezklecové rotory.

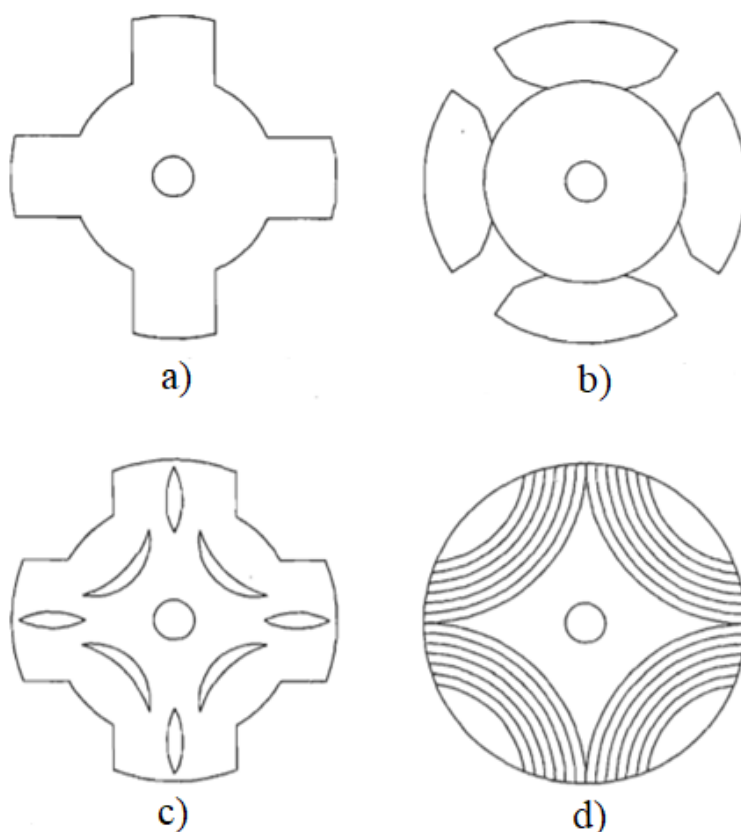
Druhé kritérium rozdělení rotorů souvisí s tvarem rotoru. Podle tvaru můžeme rotory rozdělit následovně:

- a) rotor s vyniklými póly,
- b) rotor vytvořený ze segmentů, tzv. segmentový rotor,
- c) bariérový rotor (počet bariér se může lišit),
- d) axiálně laminovaný rotor (ALA).

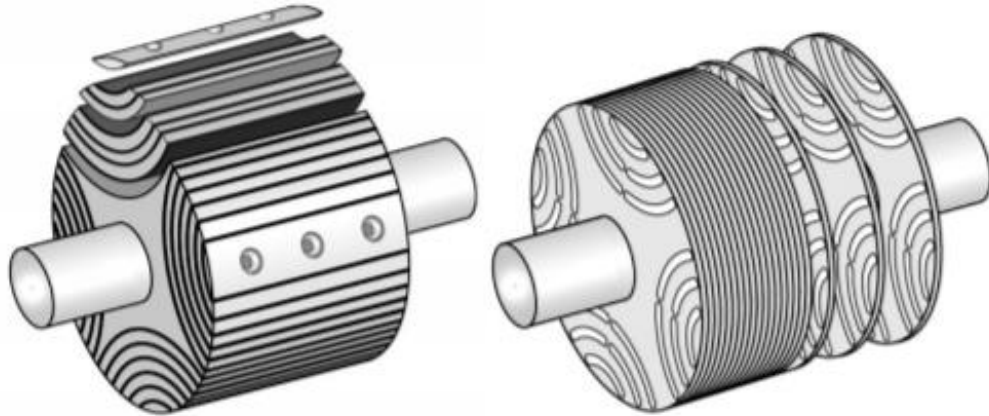
Příčné řezy všech čtyř typů rotorů jsou vyobrazeny na obr. 5.

Třetí kritérium, podle něhož se dají rotory RSM dělit, je, zda jsou plechy a bariéry RSM, které tvoří rotor, přidělané k hřídeli podélně či příčně vzhledem k ose hřídele. To je zachyceno na obr. 6. Jedná se tedy o dělení na axiálně laminované rotory (ALA) a radiálně laminované rotory (TLA).

Většina rotorových konstrukcí patří do více kategorií nebo je vytvořena kombinací dvou typů rotorů, proto představená tři kritéria nejsou výlučná.



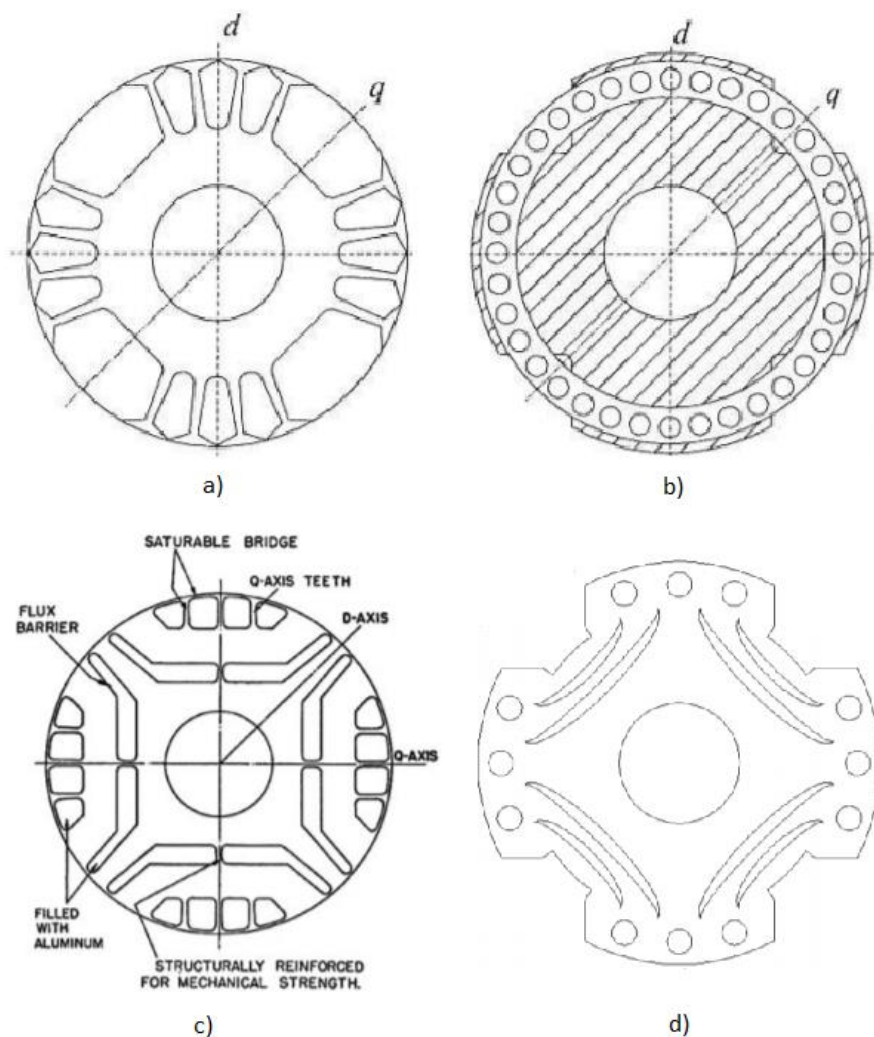
Obr. 5: Základní dělení konstrukcí rotorů RSM z hlediska tvaru. a) rotor s vyniklými póly, b) segmentový rotor, c) rotor s bariérami bránícími průchodu magnetického toku, d) axiálně laminovaný rotor, převzato z [13].



Obr. 6: Náhled na TLA rotor (vlevo) a ALA rotor (vpravo) z boku, převzato z [23].

### 3.1 Klecové rotory

Klecových rotorů je několik typů. (viz obr. 7). Prvním typem klecových rotorů jsou rotory s vyniklými póly. Jsou to historicky nejstarší rotory RSM, jak bylo zmíněno v kapitole 2. Výroba těchto rotorů byla velmi levná, protože se vyráběly modifikací rotorů ASM nebo SM s vyniklými póly. Na obr. 7a) je tento typ rotoru, který byl vytvořen tak, že se vzal rotor ASM a pomocí frézování se vytvořily vyniklé póly. Na obr. 7b) je klecový rotor s vyniklými póly vytvořený ze SM s vyniklými póly. Tento rotor dostaneme jednoduše tak, že odstraníme z rotoru SM s vyniklými póly budící vinutí. Klecové rotory s vyniklými póly mají velmi malý poměr podélné a příčné indukčnosti (označovaný  $\zeta$ ). Tento poměr většinou nebyl vyšší než 2. Kvůli tomu mají motory s těmito rotory velmi malý účinník, který dosahuje hodnot 0,5 až 0,55, a nízkou účinnost, která se pohybuje v rozmezí 50 až 75 % [13]. Dalším typem byly také klecové rotory s vyniklými póly vyrobené z rotorů SM s vyniklými póly, které ale ještě navíc obsahovaly bariéry, které snižovaly indukčnost ve směru osy  $q$ . Tyto bariéry byly nejčastěji vytvářeny pomocí děrování. Tento typ rotoru je na obr. 7c) a d). Přestože tyto štěrby pomohly zvýšit poměr indukčnosti  $\zeta$  až na hodnoty 4, vyšších hodnot tyto rotory nedosahovaly, což je stejně jako u předchozího typu rotorů zapříčiněno hlavně přítomností rozběhové klece. Bariéry často obsahovaly ještě můstky, aby rotor splňoval potřebné mechanické vlastnosti. Pokud byly přítomny tyto můstky, poměr indukčnosti  $\zeta$  se snížil na 2 až 3 [24]. Poté, co se začal používat tento typ rotorů, zkoušel se také design, kdy se vzaly plechy válcového tvaru a do nich se rýhováním vytvořily tyto bariéry, anebo se vzal asynchronní motor a do něj byly vyrýhovány tyto bariéry. Většinou se zkoušely konstrukce s jednou či dvěma bariérami. Tento typ konstrukce má však vysoké zvlnění momentu a také nemá dostatečně velký poměr indukčnosti  $\zeta$ , aby mohl konkurovat ASM. Posledním typem konstrukce rotorů, které obsahovaly rozběhovou klec, byly segmentové rotory, s kterými přišel Lawrenson [14]. Schématický obrázek segmentových rotorů obsahující rozběhovou klec se mi nepovedlo sehnat, ale tyto rotory jsou klasické segmentové rotory s klecí umístěnou uvnitř segmentů obdobně jako rotory s vyniklými póly. Tyto rotory byly vynalezeny, protože měly malou setrvačnost, která byla vyžadována v určitých aplikacích. Poměr indukčnosti  $\zeta$  dosahoval hodnot 3 až 6. Účinník dosahoval hodnot 0,6 až 0,8 a účinnost těchto motorů byla 60 až 80 %. Nevýhodou byla nižší robustnost oproti motorům s vyniklými póly [13].



Obr. 7: Typy rotorů s rozběhovými klecemi. a) a b) převzato z [25], c) převzato z [20] a d) převzato z [8].

## 3.2 Bezklecové rotory

Dalším typem rotorů jsou bezklecové rotory. K nim v dnešní době patří výhradně ALA nebo TLA. Lze vyrobit i pólové a segmentové rotory bez rozběhových klecí, ale tyto konstrukce nedosahují dostatečného poměru indukčností  $\zeta$ . Na obr. 6 jsou zobrazeny ALA a TLA rotory z bočního pohledu.

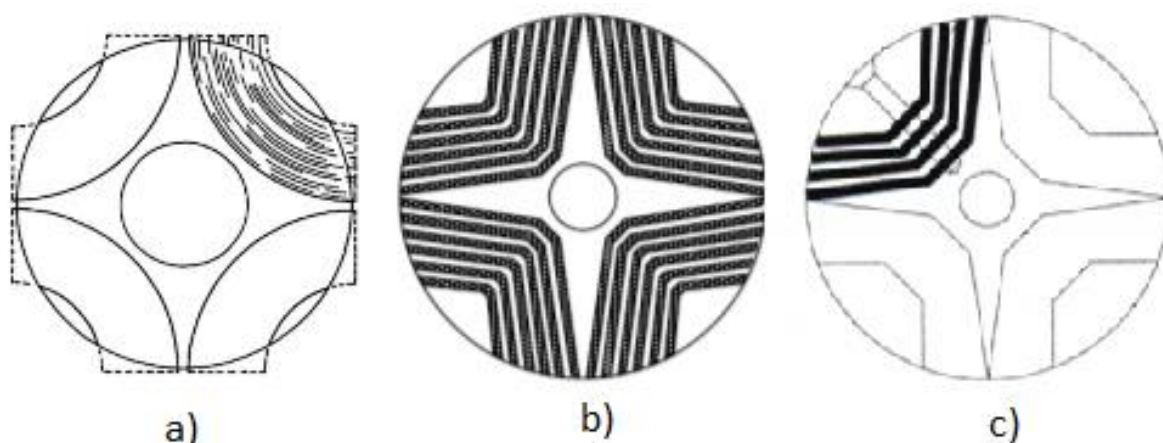
### 3.2.1 Axiálně laminované rotory

ALA i TLA rotory jsou vlastně vícebariérové rotory. Liší se v tom, jak jsou tyto bariéry vytvořeny. ALA se skládá z elektrotechnických plechů a nejčastěji epoxidových bariér, které jsou přidělány pomocí šroubů podélně vůči ose hřídele. Oproti tomu TLA je tvořen z disků z elektrotechnických plechů, které mají pomocí laseru či fréz vyřezán tvar vzduchových bariér. Tyto disky jsou poté slisovány k sobě.

ALA bývají tvořeny takřka bez výjimky pouze dvěma pólovými dvojicemi. První, kdo se zabýval tímto designem, byl Cruishank. Jelikož přišel s tímto designem v roce 1966, tak ALA rotory obsahovaly rozběhovou klec. S rozběhovou klecí se poměr indukčností  $\zeta$  pohyboval v rozmezí 4 až 9, což jsou značně lepší hodnoty než ty, kterých dosahovaly všechny dříve zmiňované konstrukce. Jakmile byly na trhu dostupné frekvenční měniče, tak byla tato struktura používána bez rozběhové klece a dosahovala nejvyšších poměrů indukčnosti  $\zeta$ . Standardně se uvádí, že hodnota poměru indukčností  $\zeta$  bývá u této konstrukce mezi 8 a 13 [17]. ALA rotory dosahují takto vysokých hodnot poměru indukčností  $\zeta$ , protože plechy a bariéry takřka dokonale kopírují tvar vytvářeného magnetického pole uvnitř statoru. Počet



bariér a plechů bývá různý, avšak většinou se doporučovalo, aby jich bylo alespoň 20, aby se omezilo zvlnění momentu [26]. Poměr tloušťky bariéry a plechu se doporučuje 1:1 [27]. Tyto bariéry a plechy mívají většinou tvar písmene U, tvar písmene V, anebo jsou tvořené z plechu ohnutého na dvou místech. Tyto tři způsoby tvarování ALA rotorů jsou zobrazeny na obr. 8a), b), c). Již Cruishank zhodnotil motory s ALA rotorem jako ekvivalentní ASM motorům. Dále se ALA motory zabýval Staton, který se pokusil o optimalizaci ALA motorů a uvádí, že tyto motory oproti ekvivalentnímu ASM potřebují o 20 % méně zdánlivého výkonu a mají o 10 až 15 % nižší ztráty. Boldea navrhl konstrukčně motor s ALA rotorem o výkonu 1,5 kW, jehož hodnota poměru indukčností  $\zeta$  dosahovala 16, účinník dosahoval hodnoty 0,91 a účinnost byla 84 %, což jsou v porovnání s 1,5 kW ASM lepší hodnoty [28]. Mohlo by se tedy zdát, že tento typ konstrukce rotorů RSM bude převládat. Bohužel tento typ konstrukce má i své nevýhody. Jednou z nevýhod je složitá výroba, která brání širšímu rozšíření této konstrukce. Tato konstrukce také hůř snáší mechanické namáhání, jelikož plechy rotoru jsou drženy pouze několika šroubky. Další podstatnou nevýhodou jsou poměrně vysoké ztráty vířivými proudy, protože na rozdíl od TLA motorů jsou zde plechy podélně, tudíž mají větší plochu, a tak i ztráty vířivými proudy jsou při použití stejné oceli vyšší. V neposlední řadě má tato konstrukce značně vyšší zvlnění momentu než ASM.



Obr. 8: Různé způsoby tvarování plechů a bariér ALA rotorů. a) tvar písmene U, převzato z [20], b) tvar písmene V, převzato z [29], c) dvakrát ohnuté plechy, převzato z [30].

### 3.2.2 Radiálně laminované rotory

Jak jsem již zmínil v kapitole 2, TLA rotory jsou tvořeny radiálně slisovanými elektrotechnickými plechy, přičemž do těchto plechů jsou pomocí laserů či fréz vytvořené speciálně tvarované otvory, které tvoří vzduchové bariéry. Tyto vzduchové bariéry mohou být dále vyplněny epoxidem, což zajišťuje lepší mechanické vlastnosti, ale zase zhoršuje tepelné vlastnosti rotoru. Výhodou této konstrukce je, že je tvořena ze stejných plechů jako plechy v rotoru ASM, nejen materiálově, ale též tvarově. Díky tomu není potřeba měnit styl výroby v továrnách na výrobu ASM motorů, které mohou vytvářet i TLA rotory pro RSM [17]. Další výhodou této konstrukce jsou nižší ztráty vířivými proudy než u ALA rotorů, neboť prostor pro uzavírání vířivých proudů je zde podstatně menší [13]. TLA jsou oproti ALA rotorům robustnější, což je jejich další výhodou. Avšak aby vydržely mechanické namáhání při vyšších otáčkách, TLA rotory potřebují v bariérách můstky, které snižují mechanické namáhání působící na segmenty mezi vzduchovými bariérami. Můstky však bývají také vyrobeny z elektrotechnické oceli, a tak jimi prochází rozptylový magnetický tok. Tím se zvyšuje indukčnost v ose  $q$ , a poměr indukčností  $\zeta$  tak klesá. Hodnoty  $\zeta$  se pohybují v rozmezí 6 až 10. V poslední době se začalo testovat, zda by nebylo lepší tyto můstky nahradit můstkami, které jsou z materiálů s nízkou relativní permeabilitou, jako je například titan, který má v důsledku toho vysokou reluktanci oproti elektrotechnickým plechům.



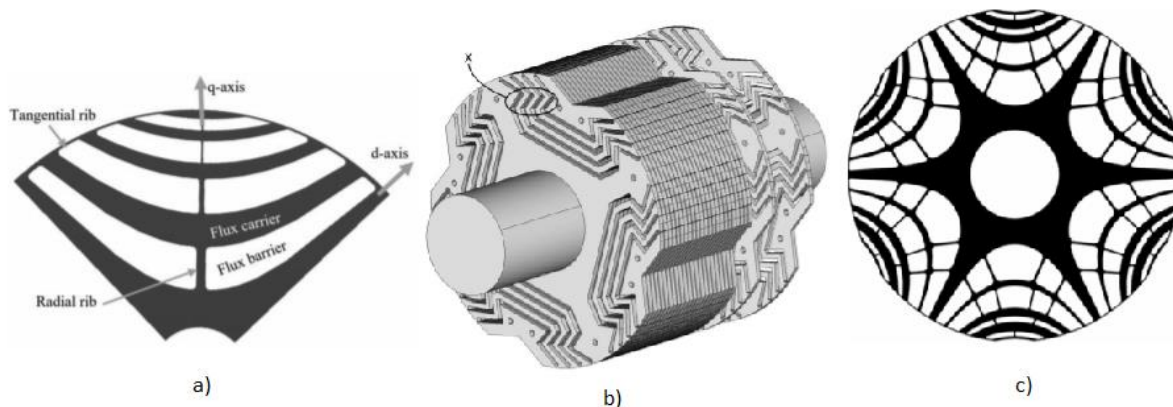
Existuje také tzv. *dovetail rotor*, což je specificky zkonstruovaná TLA konstrukce, která nevyžaduje tyto můstky, aby vykazovala stejných mechanických vlastností. Přestože však tyto konstrukce nemají můstky podporující odolnost rotoru vůči setrvačným silám, tak v porovnání s klasickými TLA rotory mají lehce nižší účinnost a účinník. Avšak mechanická stabilita tohoto rotoru je značně vyšší než klasických TLA rotorů, což umožňuje vyšší rozsah provozních rychlostí [31].

TLA rotory na rozdíl od ALA rotorů mohou být konstruované pro různý počet pólových dvojic, nejčastěji však bývají vytvářeny pro počet pólových dvojic  $p = 2$  nebo  $p = 3$ . Počet bariér, počet můstek a počet žebér (ten souvisí s počtem bariér) se liší v závislosti na tom, kolik má stator zubů a jak dobře je rotor optimalizovaný.

Na obr. 9a) je zobrazená klasická konstrukce aktuálně nejrozšířenějších TLA rotorů. Tyto TLA rotory mají počet pólových dvojic  $p = 2$  a obsahují, jak je z obrázku patrné, několik vzduchových mezer. Počet těchto bariér závisí na statoru a ovlivňuje též poměr indukčností  $\zeta$ , především zvlnění momentu. Tento typ TLA rotoru také obsahuje napříč vzduchovými bariérami můstky, které pomáhají vydržet mechanické namáhání působící na rotor u pracujícího motoru. Tyto můstky mohou a nemusí být ve všech bariérách, a sice v závislosti na tom, jak moc jsou dané segmenty mezi bariérami rotoru mechanicky namáhané. Nejčastěji používanou metodou k analýze mechanického namáhání a magnetického toku procházejícího můstky rotoru je FEM – *finite element method* neboli metoda konečných prvků.

Na obr. 9b) je zobrazen dovetail TLA rotor. Oproti klasickému TLA se liší tím, že neobsahuje žádné můstky.

Na obr. 9c) je TLA rotor, který má počet pólových dvojic  $p = 3$ . Tento motor byl optimalizován tak, aby vydržel mechanické namáhání při vysokých otáčkách a zároveň měl dostatečně dobré vlastnosti, co se týče měrného výkonu [32]. Je určený pro vysokorychlostní aplikace.



Obr. 9: Příklady TLA rotorů. a) klasický moderní TLA rotor převzato z [32], b) dovetail TLA rotor převzato z [33], c) TLA rotor s počtem pólpárů  $p = 3$ , určený pro vysokorychlostní aplikace převzato z [32].

Konstrukční geometrické řešení TLA rotorů je složitá záležitost. Optimální geometrie TLA rotorů je neustále prozkoumávána, jelikož TLA rotory mají mnoho parametrů, které ovlivňují konečné vlastnosti motoru. Mezi tyto parametry patří například tloušťka bariér v cestě magnetického toku, jejich počet, šířka žebér, šířka můsteků, vzdálenost mezi jednotlivými bariérami tak, aby pasovaly na zuby statoru, nebo třeba počet pólových dvojic. Změna jakéhokoliv z těchto parametrů může značně ovlivnit měrný výkon, účinník, měrný moment, zvlnění momentu nebo poměr indukčností  $\zeta$  RSM. Zároveň však změnou těchto parametrů neovlivníme pouze jeden faktor, ale více faktorů najednou. Jednoduchým příkladem je změna počtu bariér. Touto změnou nejenže změním poměr  $\zeta$ , ale také tím ovlivním například zvlnění momentu, účinník i účinnost [5].

## 4. Kvalitativní činitele

Kvalitativní činitele jsou nejdůležitější činitele, které popisují, jak nám bude konkrétní konstrukce RSM užitečná. Máme tři hlavní činitele, které vypovídají o RSM. Jsou jimi účinník, zvlnění momentu a momentová hustota.

### 4.1 Účinník

Účinník  $\cos \varphi$  je definován pro harmonické průběhy jako poměr činného výkonu  $P$  ku zdánlivému výkonu  $S$  v daném elektrickém obvodu

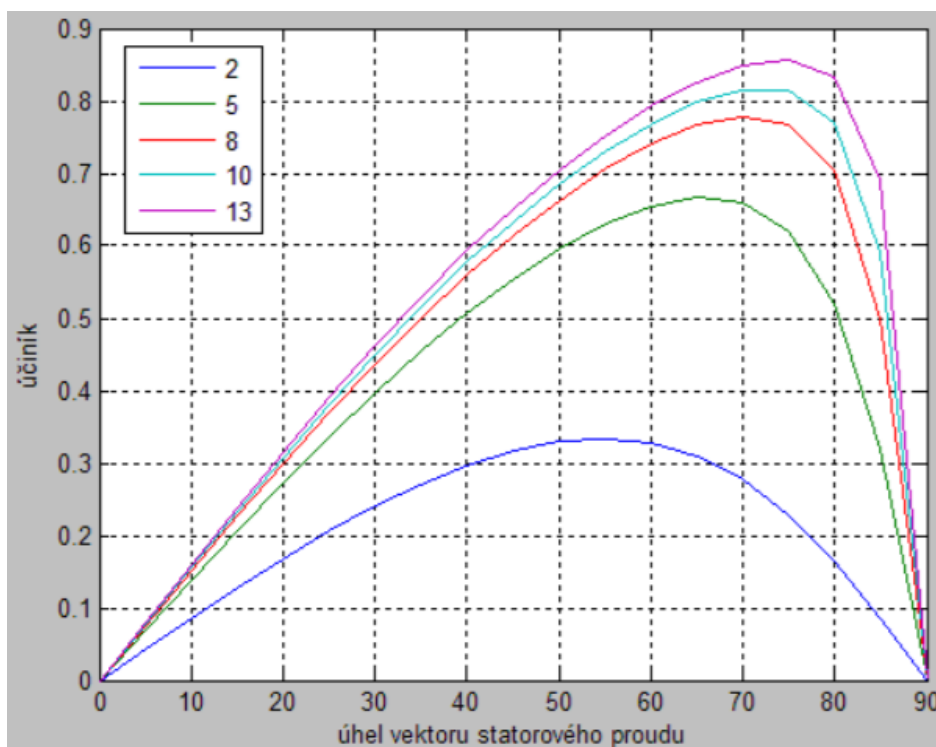
$$\cos \varphi = \frac{P}{S} \quad (8)$$

Pokud si vyjádříme u RSM účinník v závislosti na poměru indukčností  $\zeta$ , a poté ho derivujeme, abychom zjistili maximální možný účinník RSM, dostaneme následující vztah [25], [27], [34]:

$$\cos \varphi_{max} = \frac{(\zeta-1)}{(\zeta+1)}. \quad (9)$$

Pokud si tento vztah vyjádříme v závislosti na úhlu mezi proudem statoru a osou  $d$ , dostaneme následující graf na obr. 10. Z obrázku vyplývá, že pro RSM rotory s poměrem  $\zeta$  o velikosti 8 se dostáváme s účinníkem k hodnotě 0,77, což se blíží hodnotě pro typické ASM v B třídě o výkonu cca 7,5 kW [34].

Z grafu na obr. 10 jasně vyplývá, proč je potřeba dbát na vysoký poměr indukčností  $\zeta$ . Až do začátku 90. let neměly RSM motory poměr  $\zeta$  vyšší než 6, což bylo důvodem jejich špatné reputace a byly považovány za prakticky nepoužitelné právě kvůli nízkému účinníku. Tato reputace v řadě případů způsobila, že stále nedošlo k výměně ASM za RSM, přestože bylo dokázáno, že by to bylo výhodnější z hlediska účinnosti a také z tepelných hledisek (rotor RSM dosahuje nižších teplot než rotor ASM) [35].



Obr. 10: Graf závislosti účinníku na úhlu statorového proudu RSM, převzato z [36].

Další možností, jak zvýšit účinnost RSM, je přidání permanentních magnetů do vzduchových mezer v TLA rotoru RSM. Tomuto typu motorů se poté však již neříká RSM, ale *permanent magnet assisted synchronous reluctance motors* (PMA-SynRM).

## 4.2 Zvlnění momentu

Zvlnění momentu je dalším důležitým kvalitativním činitelem. Zvlnění momentu není ve většině aplikací žádané například proto, že příliš vysoké hodnoty zvlnění momentu způsobují veliký hluk, vibrace a namáhání mechanických částí stroje [37]. S tím mají problém například spínané reluktanční motory.

Zvlnění momentu se udává v procentech a je definováno následovně [12]:

$$M_{zvlnění} = \frac{M_{max} - M_{min}}{M_{prům}} \cdot 100 \% , \quad (10)$$

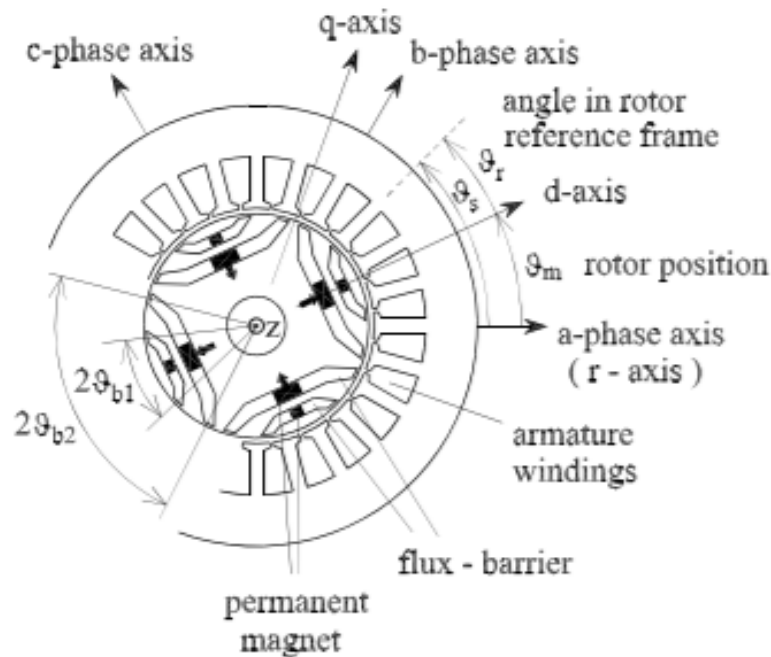
přičemž  $M_{max}$  je maximální hodnota momentu v sledovaném časovém intervalu,  $M_{min}$  je minimální hodnota momentu a  $M_{prům}$  je průměrná hodnota momentu v sledovaném časovém intervalu. Zvlnění zapříčiňují dva jevy. Prvním důvodem zvlnění momentu jsou vyšší harmonické statorového proudu [38], [37], [39].

Dalším důvodem je nekonstantní reluktance rotoru při otáčení motoru [40]. Reluktanční princip vzniku momentu způsobí, že když je zub statoru vyrovnán s rotorem (osou d rotoru) tak, že magnetický tok má v cestě nejmenší magnetický odpor, pak má rotor tendenci v této poloze zůstat, tudíž při vychýlení začne vytvářet moment opačný oproti momentu, který rotorem otáčí, jak bylo popsáno v kapitole 1.3. Tato interakce pak způsobuje zvlnění momentu. V anglické literatuře se občas zvlnění momentu vyvolané interakcí rotoru a statoru nazývá *cogging torque*.

Existuje mnoho způsobů, které ovlivňují velikost zvlnění momentu. Podle [40] existují dva základní způsoby, jak snížit vysoké zvlnění momentu. První je tzv. *motor skewing*, neboli zešikmení rotorového paketu (obdobné zešikmení drážek rotoru u ASM), tradičně o velikost jednoho statorového zubu. Díky tomu dojde k snížení vyšších harmonických obsažených v momentu způsobených konstrukcí rotoru. Druhá metoda spočívá ve zkrácení cívkového kroku statorového vinutí, tzv. *stator chording*. Zkrácení cívkového kroku způsobí snížení obsahu vyšších prostorových harmonických nižších řádů magnetomotorické síly, což má za důsledek nižší zvlnění momentu [41]

Optimalizace rotoru není jednoduchou záležitostí. Zvlnění momentu je ovlivňováno počtem bariér, šířkou bariér, pozicí a šířkou žeber (místo, kde končí vzduchová bariéra, je ohraničeno plechovým segmentem, kterému se říká žebro), úhlem žeber a dokonce i šířkou vzduchové mezery. Tématem optimalizace rotorové geometrie s účelem dosáhnout co nejnižšího zvlnění momentu, aniž by došlo k významnému snížení dalších kvalitativních parametrů, se zabývá mnoho prací, např. [5], [38], [42], [43], [44]. Pokud shrneme důležité poznatky z těchto prací, dojdeme k několika závěrům.

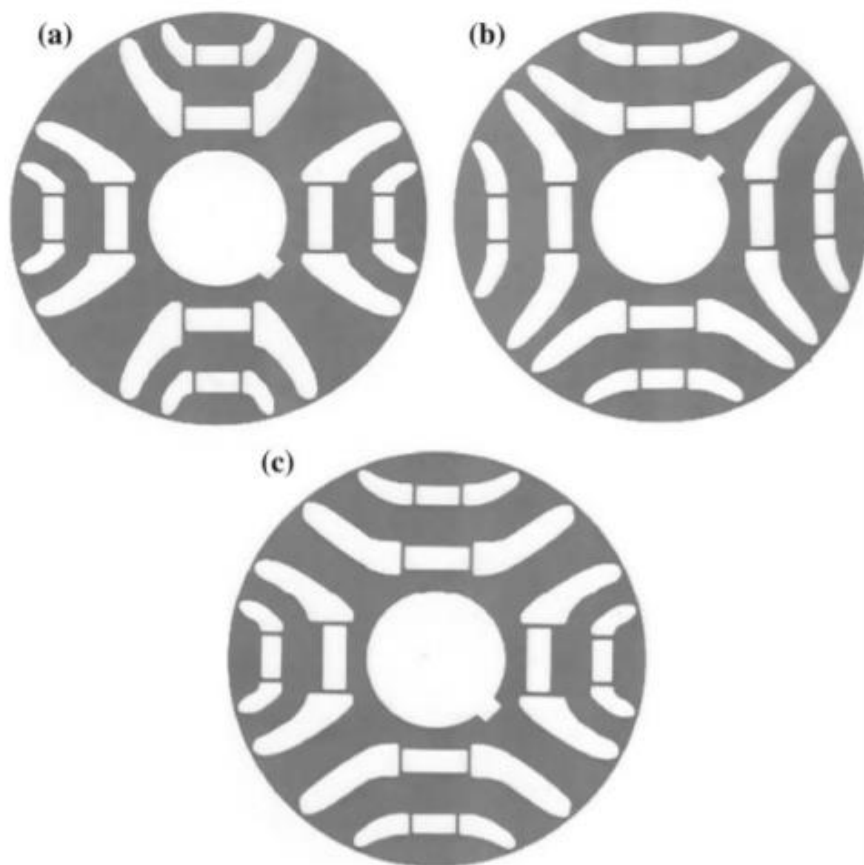
Poloha konců bariér, a tedy žeber, a počet těchto bariér spolu s počtem statorových zubů ovlivňuje zvlnění momentu tak, že zvlnění momentu je nejnižší, když jsou žebra rotoru srovnána s mezerami mezi zuby statoru. Tedy ve chvíli, kdy jsou vodivé segmenty srovnané se zuby statoru. Je však důležité dbát na to, aby fázový úhel žeber jedné bariéry nebyl plný úhel  $2\pi$ . Pokud nedodržíme tuto podmínku, nedojde k poklesu zvlnění momentu, přestože bude pozice žeber a zubů statoru optimalizovaná z hlediska toho, jak jsou srovnána zuby statoru s rotorem [38]. Toto lze lépe pochopit z obr. 11. Na obr. 11 je zobrazen fázový úhel mezi žebry jedné bariéry pro dvě různé bariéry. Tyto úhly jsou označeny jako  $\vartheta_{b1}$  a  $\vartheta_{b2}$ . Úhly  $\vartheta_{b1}$  i  $\vartheta_{b2}$  jsou vynásobeny dvěma, protože jsou brány jako úhel od osy  $q$  k danému žebro, přičemž fázový úhel mezi žebry dané bariéry je dvojnásobný.



Obr. 11: Fázový úhel mezi jednotlivými žebry jedné bariéry, převzato z [44].

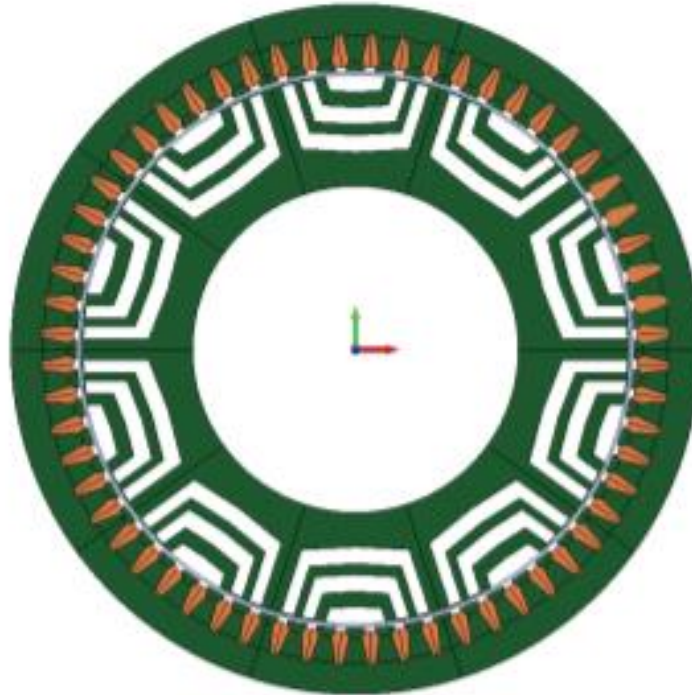
Tento problém se obvykle řeší úmyslným vytvořením nesymetrických bariér tak, aby byla splněna podmínka, že žádná bariéra nebude mít mezi svými žebry plný fázový úhel. Toto řešení nijak nesníží průměrnou hodnotu momentu [40], [38]. Také dojde ke snížení vyšších harmonických momentu rotoru, s čímž souvisí pokles zvlnění momentu.

Další způsob, jak se vypořádat s vyššími harmonickými momentu RSM, jsou dvě nové rotorové konstrukce. První z nich se nazývá *Romeo and Juliet*, zkráceně R&J konstrukce. Jsou to stále TLA rotory. Rozdíl oproti normálním TLA rotorům je však v tom, že ne všechny válcové segmenty jsou stejné. Naopak, polovina segmentů je typu Romeo a polovina typu Julie, přičemž se vždy střídá R typ a J typ segmentu. Tato struktura byla navržena tak, aby se vyšší harmonické způsobené R typem segmentů vykompenzovaly s J typem segmentů. Tím snížíme obsah vyšších harmonických složek vyskytujících se v momentu RSM, čímž podstatně klesne zvlnění momentu [44], [20]. Druhá konstrukce se nazývá *Machaon* (tento název byl odvozen od podoby otakárka fenyklového (*Papilio machalón*), motýla, který má dvě malá a dvě velká křídla). Princip snížení zvlnění momentu v této konstrukci je stejný jako u R&J. Rotor je konstruován tak, aby se vyšší harmonické složky momentu vykompenzovaly. Na rozdíl od R&J konstrukce se však nestřídají dva různé typy segmentů. Všechny segmenty jsou stejné, avšak jak napovídá název motoru, v rotoru se střídají velké a malé vzduchové bariéry převzaté z R typů a z J typů segmentů. Tato konstrukce byla vyvinuta z R&J konstrukce [44]. Pro rotor s počtem pólpárů  $p = 2$  budou tedy dvě části s malými vzduchovými bariérami a dvě části s velkými vzduchovými bariérami. Pro lepší představu jsou na obr. 12 zobrazeny rotorové plechy R&J konstrukce a Machaon konstrukce.



Obr. 12: Rotorové konstrukce potlačující vyšší harmonické složky v momentu. a) R typ, b) J typ, c) typ Machaon, převzato z [20].

V posledních šesti letech se začalo zkoumat, jaký vliv bude mít přidání tzv. *retaining sleeve* k rotorům RSM. Zjistilo se, že tento konstrukční doplněk značně sníží zvlnění momentu a motory, které je využívají, díky němu dosahují vyšší účinnosti, měrného výkonu a nižších ztrát [45]. Jde v podstatě o vhodně tvarovaný plášť válce z karbonových vláken nebo z vodivého, ale nemagnetického materiálu, jako je například slitina Inconel. Na obr. 13 je zobrazen rotor s tímto doplňkem a je označen šedou barvou. Použití takové konstrukce rotoru má na něj, co se magnetického pole týče, stejné účinky, jaké by měla širší vzduchová mezera mezi rotorem a statorem, čehož následek by bylo nižší zvlnění momentu. Rozdíl je v tom, že širší vzduchová mezera by negativně ovlivnila jiné parametry jako například střední hodnota momentu.



Obr. 13: RSM doplněný konstrukcí „retaining sleeve“, převzato z [45].

### 4.3 Hustota momentu

Hustota momentu udává velikost točivého momentu vztaženého k jednotkovému objemu motoru. Hustota momentu je důležitým kvalitativním parametrem všech točivých strojů. Umožňuje posouzení efektivity konstrukce daného motoru. Motory s vyšší hustotou momentu mohou být menších rozměrů k dosažení stejných momentů jako motory s nižší hustotou momentu, což se projeví v požadavcích na prostor a může to mít vliv i na výrobní náklady. Hustota momentu nám tedy slouží k porovnání různých motorů z hlediska výkonosti [46].

Z definice hustoty momentu a ze vztahů (5) a (7) vyplývá, že vysoká momentová hustota je značně závislá na poměru indukčností  $\zeta$ . Původní rotory RSM nedosahovaly vysokých hodnot  $\zeta$ . Hustota momentu tedy nebyla dostatečná k tomu, aby tyto rotory konkurovaly ASM. Bylo ukázáno, že aktuálně používané RSM s optimalizovanými TLA rotory mají dostatečné hodnoty hustoty momentu, a jsou vhodné například k použití v trakčních aplikacích [47]. Aktuálně používané rotory se již blíží optimálnímu stavu, co se týče konstrukce a dosahovaných hodnot poměru indukčností  $\zeta$ , proto dalšího zvýšení hustoty momentu musí být dosaženo jiným způsobem. Bylo ukázáno, že pokud se místo klasického statorového vinutí použije kombinované vinutí trojúhelník-hvězda (*combined delta-star winding*), dojde ke zvýšení momentu i hustoty momentu. To je způsobeno tím, že kombinované vinutí má vyšší hodnotu činitele vinutí (cca o 3 %). Zvýšení hustoty momentu je pouze 5 % při jmenovitých hodnotách, avšak díky kombinovanému vinutí dojde i k zvýšení hustoty výkonu a účinnosti motoru [48], [49]. Na druhou stranu toto vinutí způsobí větší zastoupení vyšších harmonických složek, a tedy i vyšší zvlnění momentu, je konstrukčně složité, nemá vyvedený uzel a nemožnost změny směru točivého pole záměnou dvou fází.

## 5. Porovnání RSM s ostatními typy motorů, výhody a nevýhody

### 5.1 Výhody RSM

RSM mají několik obecných výhod, díky kterým je o ně v posledních letech stále větší zájem [17]. První výhodou RSM je absence rotorového vinutí. Díky tomu v rotorech nedochází k žádným ohmickým ztrátám, které by způsobovaly oteplení rotoru. RSM se kvůli tomu nazývaly „studené motory“ (z anglického *cool motor*) [50]. Účinnost RSM je proto také velmi dobrá a je považována za jednu z předních vlastností RSM. Rotor též není třeba chladit a celková životnost izolace statorového vinutí je díky nižším teplotám z tohoto pohledu značně prodloužena. Podle [50] jsou RSM schopny pracovat s teplotní třídou izolace A (dovolené oteplení 60 °C). Dalšími obecnými výhodami RSM jsou vysoká momentová hustota a vysoká hustota výkonu. RSM jsou také robustní a nevyžadují složitou údržbu. V porovnání s ostatními motory jsou levnější. Další výhodou se jeví poměrně široký rozsah rychlostí a jednoduché řízení. Rotory RSM mají též malou setrvačnost, což umožňuje dynamické řízení [51], a vysokou přetížitelnost.

### 5.2 Nevýhody RSM

Mezi hlavní nevýhody RSM patří nižší účinník v porovnání s ostatními typy motorů a zvlnění momentu. Účinník nelze výrazně zvýšit, pokud se výrazně nezvýší poměr indukčností  $\zeta$  nebo se do rotoru nepřidají magnety, čímž vzniknou PMA-SynRM [52], [42]. To může znamenat, že RSM budou potřebovat k napájení výkonový měnič vyššího výkonu oproti jiným motorům. Zvlnění momentu lze podstatně zmenšit a není zdaleka tak velkou nevýhodou, jakou se jevílo před deseti lety (způsoby, kterými lze zvlnění momentu zmenšit jsou popsány v kapitole 4.2). Přesto však nelze zvlnění momentu úplně eliminovat, a proto je považováno za jednu z nevýhod RSM. Další nevýhodou RSM je jejich „nevyspělost“. Větší využití v průmyslu našly až poté, co je v roce 2012 firma ABB začala nabízet v řadě výkonů. Tato nevýhoda je zřejmě jen dočasná, neboť konstrukce i metody řízení se stále zdokonalují.

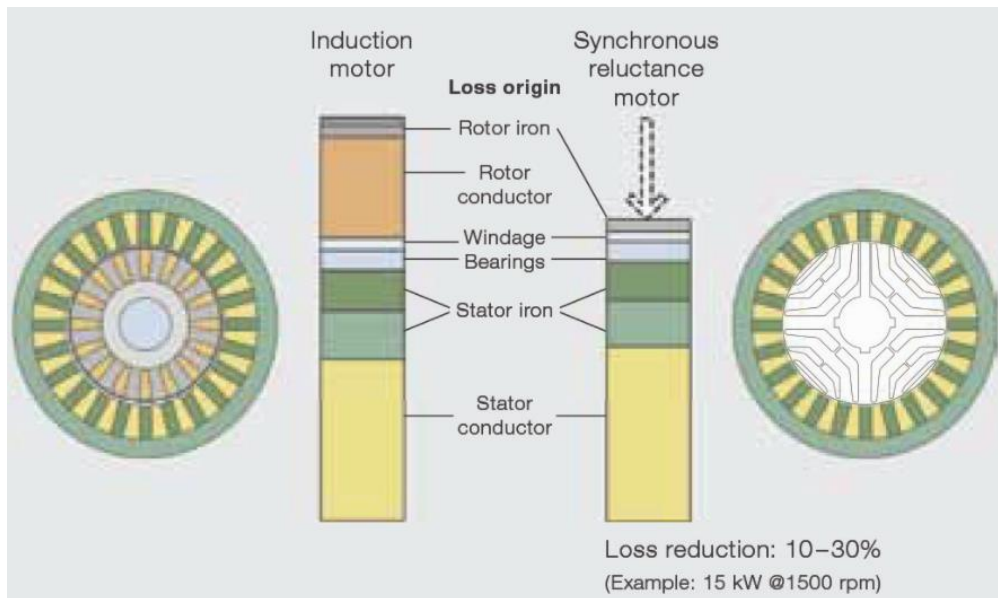
### 5.3 Porovnání RSM s ASM

Asynchronní motory jsou používány v průmyslových aplikacích více než sto let. Jsou to pravděpodobně nejrozšířenější elektromotory a jsou považovány za dobré motory v mnoha aplikacích [17]. Oproti tomu RSM velmi dlouho nenašly své uplatnění kvůli dřívějším konstrukcím, jejichž moment, výkon a účinník dosahoval malých hodnot. RSM měly kvůli tomu dlouhou dobu pověst „podřadných motorů“. RSM se však stále vyvíjely a bylo ukázáno, že dokáží ASM nejen konkurovat, ale dokonce je v určitých parametrech předčit.

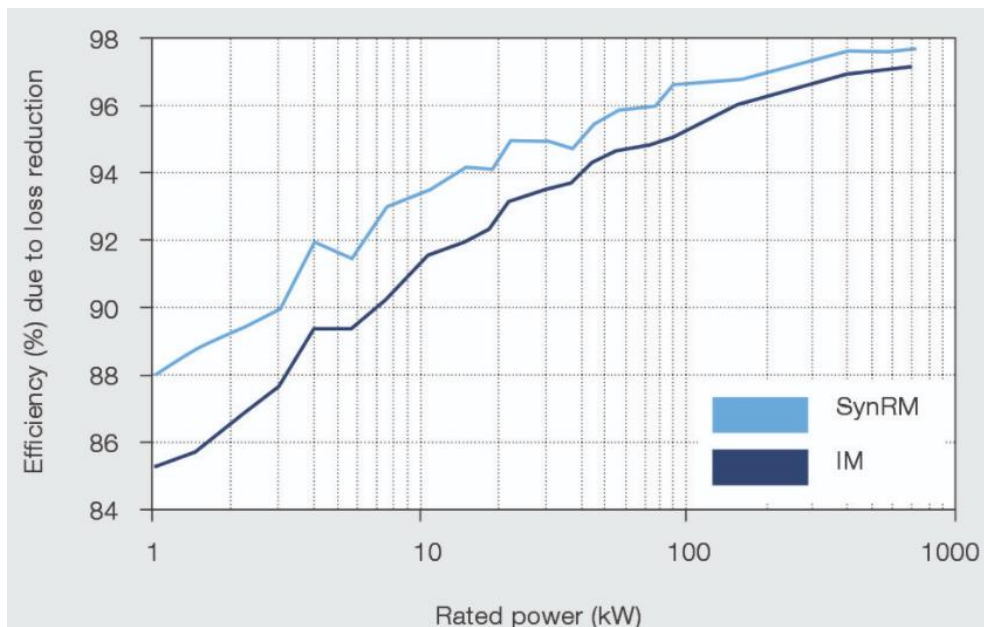
Hlavní výhodou RSM oproti ASM je absence rotorového vinutí. RSM má díky tomu nižší ztráty oproti ASM stejného výkonu. Ztráty v rotoru u ASM mohou tvořit až 40 % celkových ztrát [53]. Na obr. 14 je zobrazeno porovnání ztrát ASM a RSM o výkonech 15 kW a při 1500 ot./min. RSM má také díky absenci rotorového vinutí značně vyšší účinnost. Ta je hlavním důvodem, proč se uvažuje o nahrazení ASM reluktančními synchronními motory. V posledních letech se klade velký důraz na účinnost motorů a během pár let budou podle IEC (mezinárodní elektrotechnická komise) muset všechny průmyslové motory splňovat třídu účinnosti IE5. Předpokládá se však, že ASM nižších výkonů, tj. pod 30 kW, nebudou schopny této účinnosti dosáhnout [54]. Na obr 15 je zobrazeno porovnání účinností RSM a ASM v závislosti na velikosti jejich jmenovitého výkonu. RSM má také lepší vlastnosti co se týče



přehřívání. V [55] byly testovány ASM a RSM o výkonu 110 kW, přičemž se ukázalo, že RSM dosahoval stejných parametrů jako ASM (účinnost a hodnoty statorových proudů), avšak teplotní nárůst byl o 16 °C nižší. RSM tedy při stejné teplotě dosahuje vyšších výkonů než ASM a to o 5 až 15 % [5], [55]. Další výhodou RSM oproti ASM je to, že pracují v synchronismu. Výhodou RSM je také jejich malá setrvačnost, což umožňuje dynamičtější řízení. RSM má také vyšší měrný výkon a moment. Díky tomu je potřeba RSM nižších rozměrů k dosažení stejného výkonu jako ASM. Firma ABB vyrábí tzv. *high output* RSM, přičemž uvádí, že jsou schopni vyrobit RSM stejné velikosti jako ASM, ale s až 60% nárůstem výkonu [53]. To se projeví i na ceně RSM, která je nižší než cena ekvivalentního ASM.



Obr. 14: Porovnání celkových ztrát RSM a ASM o výkonu 15 kW a rychlosti 1500 ot/min, převzato z [50].



Obr. 15 Porovnání účinností RSM a ASM v závislosti na výkonu motoru, převzato z [50].



## 5.4 Porovnání RSM a PMSM

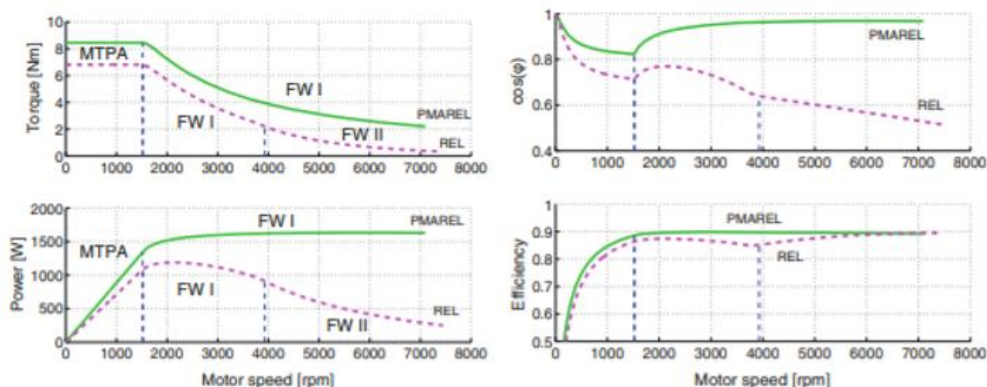
Aktuálně jsou PMSM v průmyslu a v trakci (mimo železniční trakce) nejpoužívanějšími motory. Ve chvíli, kdy je potřeba hledět na parametry jako je výkonová hustota, účinnost, účinník a momentová hustota, tak z konvenčních motorů jsou PMSM ve všech těchto parametrech nejlepší [20]. Přesto i PMSM mají své nevýhody, vinou kterých se v závislosti na požadavcích na žádaný motor mohou uplatnit i jiné typy motorů. Jednou z nevýhod klasických PMSM s neodymovými magnety je jejich vysoká cena. V porovnání s tím jsou RSM podstatně levnější, protože žádné magnety neobsahují. U PMSM je také třeba dávat pozor na poruchové stavy. Pokud dojde ke zkratu, pak dojde ke značnému snížení momentu (to je způsobeno tím, že rotorové magnety indukují zpětné magnetické pole, které brzdí motor) a ke zvýšení zvlnění momentu [56]. Zároveň je velmi složité takto vzniklé poruchové stavy řešit během provozu motoru [17], [20]. Tyto problémy RSM nemá. RSM mají též při vyšších rychlostech vyšší účinnost než PMSM. Rotory RSM mají také nižší moment setrvačnosti, lze je tedy řídit dynamičtěji než PMSM [51]. Na druhou stranu značně horší účinník RSM způsobí, že RSM potřebují frekvenční měnič vyššího výkonu. RSM jsou také spolehlivější, protože nehrozí, že přestanou fungovat v teplotách, které jsou vyšší než Curieova teplota magnetů PMSM.

## 6. Použití RSM

V posledním desetiletí se RSM začaly používat v průmyslových aplikacích kvůli zvyšujícím se nárokům na používané motory z hlediska jejich účinnosti. Patří mezi hlavní kandidáty k nahrazení asynchronních motorů v průmyslu v oblasti nižších výkonů. RSM se v průmyslu již nyní používají například pro pohony čerpadel, ventilátorů, kompresorů, míchaček, navijáků či dopravníků [22]. RSM začala komerčně vyrábět firma ABB od roku 2012, a to ve výkonovém rozmezí 5,5 – 315 kW. Z toho je patrné, že se s RSM počítá nejen pro aplikace o nižších výkonech. Postupem času se k ABB přidaly další firmy. Například firma Siemens nabízí na trhu RSM ve výkonovém rozmezí 0,55 – 45 kW [57], firma KSB dodává RSM ve výkonovém rozmezí 0,55 – 450 kW [58] a mnoho dalších firem nabízí RSM v různém výkonovém rozmezí k rozmanitým průmyslovým aplikacím.

Díky levné ceně a dobrému rozsahu provozních rychlostí se často o RSM mluví jako o možné alternativě pro pohony používané v trakčních aplikacích. Přestože však mnoho akademických prací považuje RSM za možnou levnou alternativu [59], [60], tak se momentálně v trakčních aplikacích RSM nepoužívají. Důvodem je nízká hodnota účinníku a nižší hodnoty účinnosti, momentové hustoty a výkonové hustoty v porovnání s nejvíce používanými PMSM. Dalším důvodem je pravděpodobně to, že RSM se stále ještě zkoumají a vylepšují, zatímco ASM se v trakci a průmyslu používají již od 90. let [61] a PMSM od roku 2003 [20]. Bylo ukázáno, že k tomu, aby se v trakčních aplikacích RSM používaly, dosahují dostatečných hodnot hustoty momentu [47]. Nadále však zůstává otázkou, zda se RSM vyvinou a prosadí natolik, aby se začaly používat i v trakci.

V posledních letech se v trakčních aplikacích začaly objevovat nové motory – PMA-SynRM. Jsou to RSM, které uvnitř vzduchových bariér mají vložené buď ferritové nebo neodymové magnety. Díky těmto magnetům dosahují tyto motory lepšího účinníku, momentové i výkonové hustoty a účinnosti než klasické RSM. Na obr. 16 jsou znázorněny charakteristiky, které porovnávají RSM a PMA-SynRM z hlediska zmíněných parametrů v závislosti na rychlosti motoru. Z charakteristik jasně vyplývá, že PMA-SynRM je ve všech parametrech lepší než RSM. PMA-SynRM proto zaujaly mnoho firem a začínají konkurovat PMSM především v oblasti elektromobilů, a uvažuje se o jejich použití i v železniční trakci.

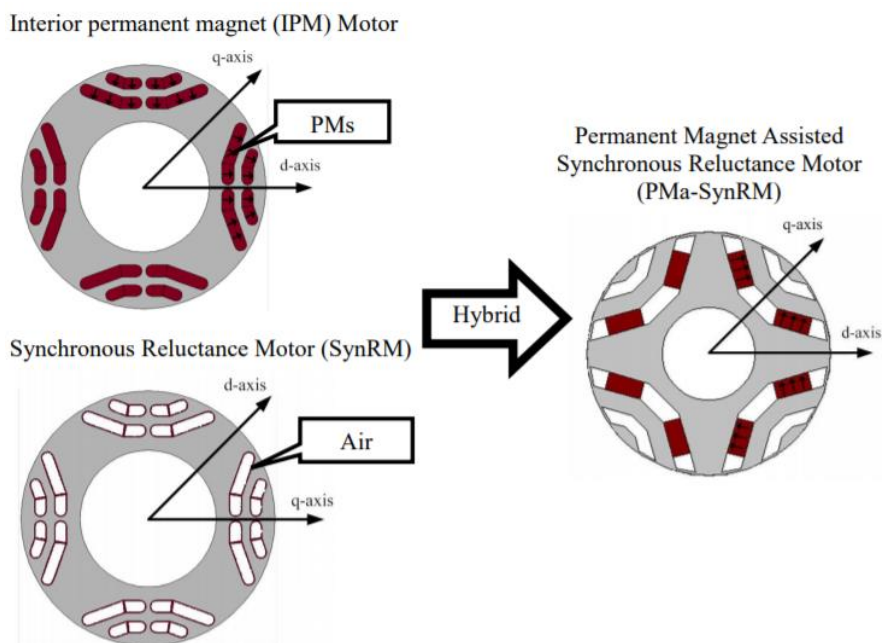


Obr. 16: Porovnání PMA-SynRM s RSM z hlediska momentu, výkonu, účinniku a účinnosti v závislosti na rychlosti motoru, převzato z [20].

## 7. Reluktanční synchronní motory obsahující permanentní magnety

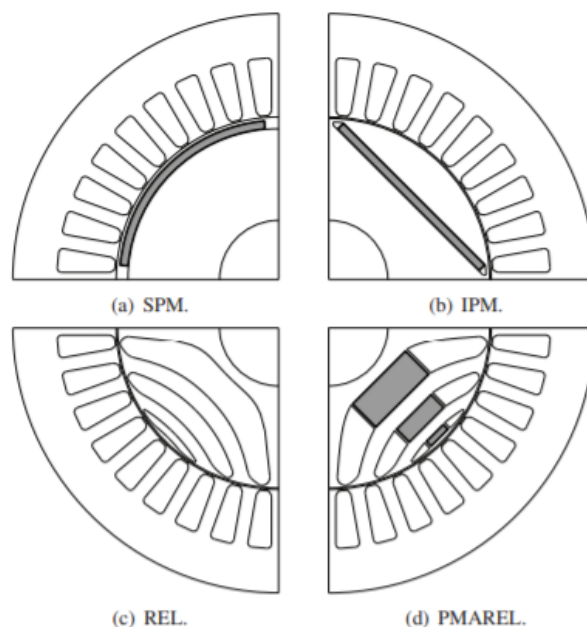
Jelikož kapitola 8 pojednává o aktuální situaci v trakčních aplikacích, přičemž častokrát se v ní mluví o PMA-SynRM, je vhodné stručně popsat základní vlastnosti PMA-SynRM.

PMA-SynRM jsou prakticky RSM s klasickým TLA rotorem s bariérami magnetického toku realizovanými vzduchovými mezerami, přičemž v mezerách jsou umístěny magnety. Jde tedy v podstatě o evoluční stupeň klasických RSM. Nejčastěji se používají feritové magnety, protože jsou značně levnější než magnety neodymové, přestože nejsou tak silné, a proto momentová a výkonová hustota PMA-SynRM s feritovými magnety bude maličko nižší než s neodymovými magnety. PMA-SynRM jsou tedy kombinací PMSM (konkrétně IPMSM – *interior permanent magnet synchronous motor*, neboli synchronní motor s permanentními magnety uvnitř rotoru) a RSM. Na obr. 17 je zobrazen rotor PMA-SynRM, který dostaneme kombinací IPMSM a RSM.



Obr. 17: Rotor PMA-SynRM, který vznikl kombinací IPMSM a RSM, převzato z [62].

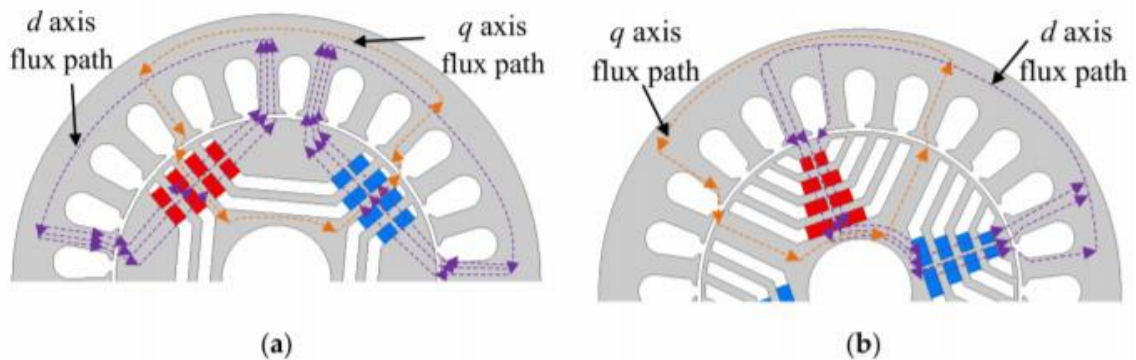
Hlavní rozdíl mezi IPMSM a PMA-SynRM je, že PMA-SynRM jsou konstruované tak, aby měly jak moment díky magnetickému poli magnetů v rotoru, tak co nejvyšší reluktanční moment. Oproti tomu IPMSM vykazují moment především díky magnetickému poli magnetů v rotoru (samozřejmě v interakci se statorovým polem). IPMSM a PMA-SynRM jsou co do principu velmi podobné, protože IPMSM díky přítomnosti magnetů v rotoru také vykazují reluktanční moment. V mnoha člancích se tyto motory nerozlišují a často jsou PMA-SynRM motory označovány za IPMSM rotory a naopak. Nejčastěji se motor označuje tak či onak v závislosti na poměru reluktančního momentu a synchronního momentu způsobeného magnetickým polem magnetů. Pokud je motor z větší části poháněn reluktančním momentem, je označován za PMA-SynRM, pokud je to obráceně, tak bývá označován za IPMSM. Pokud je motor vyroben tak, že se vezme rotor RSM a přidají se do něj magnety, motor se vždy nazývá PMA-SynRM. Na obr. 18 jsou zobrazeny části řezů čtyř typů motorů. První dva jsou PMSM motory, přičemž a) je rotor který má magnety na povrchu rotoru a nevykazuje reluktanční moment - SPMSM, zatímco b) je rotor který má magnety uvnitř a reluktanční moment vykazuje - IPMSM. V části c) je klasický RSM s TLA rotorem a v části d) je PMA-SynRM.



Obr. 18: Porovnání rotorových konstrukcí různých typů motoru. a) SPMSM, b) IPMSM, c) RSM, d) PMA-SynRM, převzato z [63].

Hlavní výhodou PMA-SynRM oproti IPMSM je fakt, že díky přítomnosti většího reluktančního momentu lze použít feritové magnety, aniž by se vlastnosti motoru výrazně zhoršily. Změnou parametrů se podrobně zabývá práce [64], kde je ukázáno, že pokles důležitých parametrů motoru není nijak výrazný a PMA-SynRM se jeví jako vhodný kandidát k nahrazení IPMSM, které jsou dražší. Navíc je také snaha používat technologie, které nevyužívají magnety z kovů vzácných zemin. PMA-SynRM byly vytvořeny proto, že se snaží zkombinovat výhody IPMSM a RSM a zároveň mít co nejméně nevýhod obou typů motorů. Magnety lze do rotoru umístit různě, přičemž mnoho parametrů ovlivňuje konečné vlastnosti motoru. K těmto parametrům patří například počet magnetů, jejich šířka a délka, jejich umístění a počet řad magnetů (souvisí s počtem bariér, ale ne vždy musí být magnety v každé bariéře) [65]. Bylo také prozkoumáno, zda je výhodnější dát magnety doprostřed magnetických bariér, nebo na konce magnetických bariér. Tyto dvě možnosti uložení magnetů jsou zobrazeny na obr. 19. Ukázalo se, že výhodnější je uložit magnety na kraje bariér. Motor pak dosahuje vyšších hodnot účinnosti, průměrného momentu, hustoty magnetického toku vzduchovou mezerou a vykazuje nižší hodnoty zpětného magnetického pole, které indukuje napětí na statorové vinutí [2]. Hlavní nevýhodou

PMa-SynRM je zvlnění momentu. To však lze redukovat stejnými způsoby, které jsou popsány v kapitole 4.2. Také je potřeba dbát na to, že při příliš velkém přetížení PMa-SynRM může dojít k nenávratné demagnetizaci magnetů [47].



Obr. 19: Rozdílné umístění magnetů v rotoru PMa-SynRM. a) magnety jsou umístěny na kraji bariér, b) magnety jsou umístěny uprostřed bariér, převzato z [2].

## 8. Elektrická trakce

Trakce je souhrnné označení pro pohony vozidel. Elektrická trakce je označení pro všechny pohony vozidel, které k pohybu využívají elektrické energie. Patří sem elektromobily, železniční vozidla, vozidla MHD – trolejbusy, elektrobuses, tramvaje a metra, lanovky a důlní železnice. Elektrickou trakci dělíme na trakci závislou a trakci nezávislou. Závislá trakce využívá k pohybu vozidel energii přiváděnou z vnějšího systému. Sem patří například trolejbusy a železnice. Nezávislá trakce má energii potřebnou k pohybu uskladněnou uvnitř vozidla pomocí akumulátorů, sem patří například elektromobily. Elektrický pohon se skládá ze čtyř částí – elektrického stroje, polovodičového měniče, spínacích přístrojů a řídicí části.

V kontextu této bakalářské práce se zabývám pouze elektrickými motory používanými v trakčních aplikacích.

### 8.1 Požadavky na trakční motor

K tomu, aby byly motory používané v trakci co nejefektivnější, je potřeba, aby používané motory splňovaly následující požadavky [5], [47], [29]:

- vysoké hodnoty jmenovitého výkonu a hustoty výkonu,
- vysoké hodnoty momentů při nízkých otáčkách – rozjezd a stoupání,
- vysoké hodnoty momentů při cestovní rychlosti (*cruising speed*),
- široký rozsah rychlostí – jak oblast s konstantním výkonem tak oblast s konstantním momentem,
- vysoká účinnost v celém rychlostním a momentovém rozsahu,
- rychlá dynamická odezva na žádost změny tahu či rychlosti,
- vysoká spolehlivost při různých provozních podmínkách,
- přijatelná cena,
- nízký hluk a vibrace a s tím související nízké zvlnění momentu,
- vysoká přetížitelnost.

## 8.2 Elektromobily

Na konci 20. století byly vyrobeny první moderní elektromobily. Krátce na to, začátkem 21. století, se již začaly vyrábět elektromobily za účelem snížení celkových emisí v automobilovém průmyslu. Mezi automobilové závody, které nabízí na trhu elektromobily, patří například General Motors, Toyota, Honda, Nissan, Ford, BMV, Tesla a další. V posledních letech se počet vyráběných elektromobilů stále zvyšuje, kvůli rostoucímu důrazu na snížení celkových emisí skleníkových plynů do atmosféry. Očekává se tedy neustálý nárůst počtu vyráběných elektromobilů. Důsledkem je velká snaha o to zdokonalit nejen motory, které pohánají elektromobily, ale také bateriové systémy a měniče.

Elektromobily t. č. využívají několika typů motorů. V pracích [32], [29] jsou zaznamenány elektromobily dostupné na trhu a je v nich uvedeno, jaký motor využívají. Převážná většina elektromotorů používá PMSM, konkrétně IPMSM. Některé modely elektromobilů, mezi které patří například Audi e-tron 55, Tesla X a Tesla S P100D, používají ASM. Také se vyskytují elektromobily se SM (např. Renault Zoe). PMA-SynRM se aktuálně na trhu téměř nevyskytují (až na druhou generaci hybridního vozidla Chevrolet Volt), avšak některé elektromobily obsahující IPMSM mají úmyslně umístěny magnety v rotoru tak, aby se maximalizoval reluktanční moment. Tyto motory mají k PMA-SynRM velmi blízko. Elektromobily, které obsahují tyto motory, jsou například Tesla 3, Tesla X SR, a BMW i3S 33 a 44 [32]. Klasické RSM se zatím v žádných elektromobilech nevyskytují.

### 8.2.1 Aktuální trendy

Momentálně nejvíce používanými motory jsou IPMSM. Používají se nejvíc proto, že nejlépe splňují požadavky na trakční motory. Mají vysoký moment, a to jak startovací, tak při cestovních rychlostech. Hustota momentu i výkonu je také vysoká a mají výbornou účinnost v širokém rozsahu rychlostí. Tento trend bude jistě pokračovat. To i díky tomu, že magnety uvnitř IPMSM lze umístit tak, že 40 až 50 % momentu je tvořeno reluktančním momentem [29]. Také dosahují širokého rozsahu rychlostí s konstantním výkonem. Největší nevýhodou těchto motorů se jeví závislost na silných neodymových magnetech, které jsou drahé a jsou tvořeny vzácnými kovy, kterých je na planetě omezené množství. Očekává se tedy, že v některých aplikacích se začnou vyskytovat spíše IPMSM než SPMSM, jelikož spotřebují méně magnetů než SPMSM díky tomu, že produkují i reluktanční moment. Také je možné, že postupně začnou být PMSM nahrazovány PMA-SynRM s feritovými magnety v aplikacích, kde momentové a výkonové vlastnosti motoru nejsou nejvyšší prioritou, jelikož jsou značně levnější [66] a dosahují podobných parametrů jako IPMSM a SPMSM [63].

ASM motory se používají pro jejich jednoduchost, spolehlivost, robustnost a levnou cenu v porovnání s PMSM. Jejich výhodou je také vysoký špičkový moment a dobrá dynamická odezva [29]. Avšak PMSM a PMA-SynRM dosahují lepších kvalitativních parametrů. Očekává se tedy, že se od ASM v elektromobilech postupem času upustí.

RSM zatím v elektromobilech používané nejsou. RSM mají nižší účinník, než všechny ostatní zmiňované typy motorů používané v elektromobilech a v porovnání s PMSM dosahují horších hodnot z hlediska hustoty momentu, hustoty výkonu i účinnosti. Přesto mají i své výhody. Jednou z velkých výhod je vysoká přetížitelnost. U RSM nehrozí žádná demagnetizace magnetů. Jsou také robustní, lehce udržovatelné a levné. Není tedy vyloučené, že v budoucnu nahradí ASM. K tomu je ale potřeba co nejvíce optimalizovat rotorovou strukturu tak, aby se co nejvíce potlačily nedostatky, jakými jsou například účinník či zvlnění momentu. ASM navíc v nejbližších letech nejspíše nahradí PMSM, takže pokud nedojde k zlepšení RSM, pak v trakčních aplikacích stále uplatnění nenajdou.

PMa-SynRM jsou dobrou alternativou vůči ASM i PMSM. Při použití feritových magnetů dosahují tyto motory velmi dobrých kvalitativních parametrů. Předpokládá se nárůst PMa-SynRM v elektromobilech díky dobrým vlastnostem, nezávislosti na kovech vzácných zemin a levné ceně v porovnání s PMSM. Je potřeba však nezapomínat, že PMa-SynRM s feritovými magnety mají nižší přetížitelnost, protože jinak hrozí nevratná demagnetizace magnetů v rotoru.

### 8.3 Železniční trakční aplikace

V železniční elektrické trakci 20. století vládly stejnosměrné motory. To především proto, že byly schopné velkého přetížení, a to i při rozjezdu, a měly jednoduché ovládání rychlosti. U těchto motorů je však velkým problémem komutace. Proto se postupem času od stejnosměrných motorů upustilo [67].

Nejvíce používanými motory pro železniční trakci se v 90. letech staly ASM [61]. Ty zůstávají nejvíce používanými motory v železniční trakci dodnes. Důvodem je jejich robustnost, jednoduchá údržba, nízká cena, vysoká přetížitelnost a možnost zapojení dvou nebo čtyř ASM paralelně k jednomu výkonovému měniči.

Také se používají PMSM motory, přestože jejich využití je nižší než u ASM. Výhodou PMSM oproti ASM je vysoká hustota momentu a vyšší účinnost. Nevýhodou je však neschopnost zapojit více motorů paralelně k jednomu výkonovému měniči. Tato nevýhoda platí pro všechny typy synchronních motorů [68]. Tato nevýhoda je však velmi podstatná, protože kvůli tomu je cena celkové dopravní soustavy mnohem dražší a také bude zabírat více místa. Lze se na to tedy dívat i tak, že celková momentová a výkonová hustota celé soustavy bude nižší. Další nevýhodou PMSM je to, že při poruchovém stavu motoru indukují rotorové magnety zpětné magnetické pole, které brzdí motor [67].

V posledních letech byly zaznamenány pokusy o prosazení RSM do železniční trakce. Dosud však žádné RSM použity v železniční trakci nebyly. Důvodem je malý účinník RSM, nízká momentová hustota, neschopnost připojení více motorů paralelně k jednomu výkonovému měniči a také jistá neochota přizpůsobovat se novým technologiím, která převládá v železničních aplikacích [68].

Důležitými faktory u motorů používaných v železniční trakci je bezpečnost a spolehlivost.

Na obr. 20 je zobrazena tabulka, která porovnává ASM s klecí nakrátko z mědi, ASM s klecí nakrátko z hliníku, PMSM, RSM a PMa-SynRM z hlediska účinnosti, momentové hustoty, odbuzování, účinníku, schopnosti pracovat paralelně s jedním výkonovým měničem, ceny, spolehlivosti a bezpečnosti [68]. Jednotlivé motory jsou hodnoceny na stupnici od jedné do deseti, přičemž hodnota deset je nejlepší. Z této tabulky je jasně vidět, proč jsou ASM upřednostňovány oproti ostatním motorům. Je vidět, že RSM si nevedou špatně, ale neschopnost připojit víc motorů k jednomu měniči spolu s nízkým účinníkem je důvodem, proč se zatím nezačaly tyto motory v těchto aplikacích používat.

Motor type	IM, Cu	IM, Al	PM	SynRel	PMSynRel
Efficiency	4	2	10	6	8
Torque density	6	4	10	4	8
Field weakening	6	6	10	4	8
Power factor	6	6	10	2	8
Multiple drive	8	10	2	2	2
Cost	6	8	2	10	4
Reliability	10	10	8	10	8
Safety	10	10	4	10	6

Obr. 20: Porovnání jednotlivých typů motorů používaných v železniční trakci, převzato z [68].

### 8.3.1 Aktuální trendy

Předpokládá se, že ASM budou stále dominovat. Z hlediska PMSM motorů se aktuálně používají IPMSM s tvarem magnetů do písmene V. Předpokládá se, že IPMSM motory budou postupně nahrazovány PMA-SynRM kvůli tomu, aby se snížilo nebo úplně omezilo používání kovů vzácných zemin v motorech. Jako možnost se jeví používat místo těchto magnetů feritové magnety, ale může trvat i desítky let, než se tyto motory začnou používat [68]. Podle [67] jsou RSM dobrou alternativou a je možné, že se časem začnou používat v železniční trakci díky tomu, že jsou schopné dosáhnout podobných parametrů, když nebereme v potaz účinník. Nejspíš nenahradí ASM kvůli neschopnosti připojení více motorů k jednomu výkonovému měniči, ale přesto je možné, že se začnou používat díky jejich nízké ceně.

## 9. Diskuze

Díky neustálé snaze inženýrů a vědců zlepšit RSM zašel v průběhu let vývoj RSM tak daleko, že RSM se od motorů, které byly považovány za podřadné, vyvinuly v motory, které našly použití v mnoha rozmanitých průmyslových aplikacích. Současné RSM mají, co se týče účinnosti, přetížitelnosti a oteplení motoru, velmi dobré vlastnosti. Jejich výroba se moc neliší od výroby ASM a je dokonce levnější. S narůstajícím důrazem na zvýšení účinnosti motorů, který je zapříčiněn snahou o snížení celkového dopadu průmyslu na životní prostředí, se očekává nárůst použití RSM v průmyslových aplikacích.

Nevýhody RSM však stále zůstávají. Především nízký účinník a vysoké zvlnění momentu. Proto je potřeba, aby se ve výzkumu stále pokračovalo. Jak dosáhnout vyššího účinníku zkoumá mnoho prací a zdá se, že je několik možností. Nejpřímočařejší přístup je snaha o zvýšení poměru indukčnosti  $\xi$  optimalizací konstrukce rotoru. K tomu se nejčastěji využívá analýza metody konečných prvků. V závislosti na požadovaných vlastnostech motoru (ty se odvíjí od plánovaného použití) se nejvhodnější rotorové konstrukce RSM liší. Další způsob, jak se pokusit zvýšit účinník je pomocí nemagnetických můstků [69]. Také je možnost nadále zkoumat ALA konstrukce rotorů, které dosahují vyšších hodnot poměru indukčnosti. Tato možnost se však nezdá úplně vhodnou, protože nejen, že ALA rotory snášejí hůř mechanickou zátěž, ale jejich výrobní proces je zcela jiný než u klasických točivých strojů, což implikuje vyšší náklady na výrobu.



Zvlnění momentu u RSM bylo v minulosti značným problémem. V posledních letech se však přišlo s několika způsoby, jak zvlnění momentu omezit na přijatelnou úroveň. Nejpříjemnější metodou se zdá být použití rotorových konstrukcí R&J a Machaon, které snižují obsah vyšších harmonických složek v momentu RSM. Dříve používané zešíkmení rotorových paketů se již tolik nepoužívá, protože bylo ukázáno, že snižuje střední hodnotu momentu.

Další možnou oblastí zkoumání je statorové vinutí. V [17] se zkoumá, zda změna statorového vinutí náhodou nebude výhodná pro RSM. Jednou z možností, jak změnit statorové vinutí je použití soustředného skupinového vinutí, místo klasického smyčkového vinutí. RSM s takto navinutým statorovým vinutím by potenciálně mohly mít lepší účinnost, hustotu momentu a výkonu, nižší provozní teploty a menší spotřebu mědi na statorové vinutí. Na druhou stranu takovýto RSM má i své nevýhody jako například značně zvýšené zvlnění momentu a nižší účinník oproti RSM s klasickým statorovým vinutím. Nižší účinník je však výzvou již pro klasické RSM, proto se od RSM se soustředným skupinovým vinutím prozatím upustilo.

Co se týče elektrické trakce, klasické RSM využití prozatím nenašly a pokud v následujících letech nedojde ke zlepšení některých klíčových parametrů RSM, tak se RSM v trakci používat nebudou. RSM se v trakci nepoužívají kvůli nízkému účinníku, nižší momentové a výkonové hustotě, nižšímu rozsahu rychlostí s konstantním výkonem, nižší účinnosti a nižšímu záběrnému momentu (v porovnání s PMSM). RSM jsou sice značně levnější a mají dobrou přetížitelnost a dobré tepelné vlastnosti, avšak ani to nestačí na převážení jejich nevýhod. Jediné aplikace, kde se o RSM uvažuje jako o alternativě, jsou důlní železnice, kde se klade velký nárok na robustnost, spolehlivost a velkou hustotu momentu a výkonu. Aktuálně se v tomto odvětví používají ASM. RSM jsou však až na účinník schopné ASM konkurovat. Dokonce díky nižšímu oteplení rotoru mají RSM o stejné velikosti vyšší momentovou a výkonovou hustotu. Zatím se však RSM nevyužívají ani v důlních železnicích, přestože to je zapříčiněno spíše neochotou se přizpůsobit novým technologiím.

V současné době jediný způsob, jak u RSM dosáhnout dostatečně dobrých vlastností k tomu, aby se používaly v trakci, je přidání magnetů do rotoru. To se však bavíme o PMA-SynRM a ne o klasických RSM bez magnetů v rotoru. PMA-SynRM vykazují značně lepší vlastnosti oproti RSM, zejména co se týče účinníku a momentu. Přestože se PMA-SynRM zatím používají jen minimálně (například v druhé generaci hybridního vozidla Chevrolet Volt [70]), jsou považovány za konkurenční motory IPMSM. Předpokládá se, že použití PMA-SynRM v trakci se bude neustále zvyšovat, obzvláště v elektromobilech. Výhodou PMA-SynRM je nižší spotřeba drahých neodymových magnetů a možnost použití magnetů, které nejsou z kovů vzácných zemin, jako jsou například ferritové magnety. Jedinou podstatnou nevýhodou PMA-SynRM s ferritovými magnety je nižší přetížitelnost motoru, která je způsobena tím, že při vyšších přetížích motoru hrozí nenávratná demagnetizace magnetů, což je způsobené nižší koercitivitou ferritových magnetů oproti neodymovým magnetům.



## Závěr

Cílem práce bylo přehledně shrnout problematiku reluktančních synchronních motorů tak, aby čtenář se základními znalostmi a orientací v problematice elektrických strojů a pohonů měl po přečtení této práce přehled o současné situaci, výzvách, výhodách a nevýhodách RSM, jejich použití a aktuálních trendech.

V rámci této práce byla provedena rešerše věnující se problematice reluktančních synchronních motorů. V první kapitole jsou vysvětleny důležité pojmy potřebné k pochopení principu vzniku momentu a činnosti RSM, což odpovídá prvnímu bodu zadání. Následuje historie RSM, kde je stručně shrnut vývoj RSM od jejich vzniku až do současnosti. Ve třetí kapitole jsou představena možná konstrukční řešení RSM, přičemž je poukázáno na jejich vlastnosti, výhody a nevýhody, což odpovídá druhému bodu zadání. V následující kapitole jsou představeny jednotlivé kvalitativní činitele RSM a je zde poukázáno na možné způsoby, jak dosáhnout lepších hodnot jednotlivých činitelů. Pátá kapitola je věnována výhodám a nevýhodám RSM. Jsou v ní shrnuty obecné výhody a nevýhody RSM následované porovnáním RSM s ASM a s PMSM. Z porovnání s ASM plyne, že RSM jsou výhodnější pro průmyslové aplikace v porovnání s ASM. Nevýhodou RSM je jejich nižší účinnost, ale v těchto aplikacích ho vyvažují nižší celkové ztráty RSM a vyšší účinnost. Šestá kapitola se věnuje použití RSM. RSM se v současnosti používají pouze v průmyslových aplikacích, přičemž konkrétní oblasti použití jsou značně rozmanité. Následující kapitola krátce shrnuje základní vlastnosti PMSM-SynRM. Osmá kapitola shrnuje problematiku elektrické trakce v kontextu RSM. Je v ní popsána aktuální situace v železniční trakci a v oblasti elektromobilů, přičemž je kladen důraz nejen na aktuálně používané technologie, ale také trendy v jednotlivých odvětvích. Závěrečná devátá kapitola obsahuje diskuzi o důležitých poznatcích ohledně RSM včetně budoucích výzev. Třetí a čtvrtý bod zadání práce jsou řešeny v rámci osmé a deváté kapitoly.

## Citovaná literatura

- [1] PANKRÁČ, V. Pomocné texty k přednáškám z teorie elektromagnetického pole ZS,LS 2013/2014. *Elmag.fel.cvut* [online]. Praha Fel ČVUT, 2013 [cit. 2021-08-09]. Dostupné z: [https://elmag.fel.cvut.cz/sites/default/files/users/pankrac/files/text\\_A1B17EMP\\_22\\_leden\\_2016.pdf](https://elmag.fel.cvut.cz/sites/default/files/users/pankrac/files/text_A1B17EMP_22_leden_2016.pdf)
- [2] HUA, Yizhou, Huangqiu ZHU, Ming GAO a Zongyou JI. Design and Analysis of Two Permanent-Magnet-Assisted Bearingless Synchronous Reluctance Motors with Different Rotor Structure. *Energies* 2021. 2021, **14**(879), 2-17.
- [3] REZA, Rajabi Moghaddam. *Synchronous Reluctance Machine (SynRM) in Variable Speed Drives (VSD) Applications*. Stockholm, 2011.
- [4] VOŽENÍLEK, Petr, Vladimír NOVOTNÝ a Pavel MINDL. *Elektromechanické měniče*. 2. vydání. Praha: ČVUT, 2015. ISBN 978-80-01-04875-7.
- [5] YAMMINE, M. Samer. *Contribution to the Synchronous Reluctance Machine Performance Improvement by Design Optimization and Current Harmonics Injection*. Toulouse, 2015. Master thesis. Institut National Polytechnique de Toulouse (INP Toulouse).
- [6] BOLDEA, Ion a Lucian TUTELEA. *Reluctance electric machines: Design and control*. CPR press, 2019. ISBN 978-1-4987-8233-3.
- [7] KOSHELEV, Maxim. *Návrh synchronního reluktančního motoru*. Brno, 2014. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [8] KUBÍN, Tomáš. *Reluktanční stroj s permanentními magnety na rotoru*. Brno, 2014. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [9] HAATAJA, Jorma. *A Comparative Performance Study Of Four-Pole Induction Motors And Synchronous Reluctance Motors In Variable Speed Drives*. Lappeenranta, 2003. Master degree. Lappeenranta University of Technology.
- [10] CAPOLINO, Gerard-Andre. André Blondel - French Scientist and Engineer. *EEE Industry Applications Magazine*. 2004, .
- [11] KOSTKO, J. K. Polyphase reaction synchronous motors. *Journal of the American Institute of Electrical Engineers*. 1923, **42**(11), 1162-1168.
- [12] BÁRTA, Jan a Čestmír ONDRŮŠEK. Rotor design and optimalization of synchronous reluctance machine. *MM science journal*. 2015.
- [13] COATES, Colin. *Modelling and field-oriented control of synchronous reluctance motor with rectangular stator current excitation*. Wollongong, 2001. Doctor of philosophy thesis. University of Wollongong.
- [14] LAWRENSON, P. a L. AGU. Theory and performance of polyphase reluctance machines. *Proceedings IEE*. 1964, **111**(8), 1435-1445.

- [15] LAWRENSON, P. a A. AGU. A new unexcited synchronous machine. *Proceedings IEE*. 1963, **110**(7), 1275.
- [16] RAMAMORTY, M. Optimalization of polyphase segmented-rotor reluctance machine design: A nonlinear programming approach. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*,. 1979, **98**(2), 527-535.
- [17] SPARGO, Donaghy. *Synchronous reluctance motor technology : opportunities, challenges and future direction* [online]. Durham University, 2016.
- [18] MILLER, Timothy, Alan HUTOR, Calum COSSAR a David STATON. Design of a Synchronous Reluctance Motor Drive. *IEE Transaction On Industry Applications*. 1991, **27**(4), 741-749.
- [19] STATON, David, Wen SOONG a Timothy MILLER. Unified Theory of Torque Production in Switched Reluctance and Synchronous Reluctance Motors. *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATION*. 1995, **31**(2), 329-337.
- [20] PELLEGRINO, Gianmario, Thomas JAHNS, Nicola BIANCHÍ, Wen SOONG a Francesco CUPERTINO. *The Rediscovery of Synchronous Reluctance and Ferrite Permanent Magnet Motors Tutorial Course Notes*. 1. Switzerland: Springer, 2016. ISBN 978-3-319-32200-1.
- [21] REIMER, Maximilian, Heike SCHENK-MATHES, Matthias HOFFMANN a Tobias ELWERT. Recycling Decisions in 2020, 2030, and 2040—When Can Substantial NdFeB Extraction be Expected in the EU?. *Metals 2018*. 2018, **8**(867), 1-15.
- [22] ABB IE5 SynRM motors are awarded Efficient Solution Label. <https://new.abb.com/> [online]. Helsinki, 2020 [cit. 2021-07-31]. Dostupné z: <https://new.abb.com/news/detail/71053/abb-ie5-synrm-motors-are-awarded-efficient-solution-label>
- [23] OPREA, Claudiu, Arkadiusz DZIECHCIARZ a Claudia MARTIS. Comparative Analysis of Different Synchronous Reluctance Motor Topologies: Claudiu Oprea, Arkadiusz Dziechciarz, Claudia Martis. *2015 IEEE 15th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC)*. 2015, , 1904-1909.
- [24] LIPO, T. A. Synchronous Reluctance Machines-A Viable Alternative for AC Drives?. *Electric Machines & Power Systems*. 2007, **19**, 659-671.
- [25] HRABOVCOVÁ, Valerie, L. JANOUŠEK, P. LIČKO a P. RAFAJDUS. *Moderné elektrické stroje*. 1. Žilina: Žilinská univerzita v Žilině, 2001. ISBN 9788071008095.
- [26] STATON, D., T. MILLER a S. WOOD. Maximising the saliency ratio of the synchronous reluctance motor. *IEE Proceedings B Electric Power Applications*. 1993, **140**(4), 249-259.
- [27] MATSUO, T. a T. LIPO. Rotor Design Optimization of Synchronous Reluctance Machine. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 1994, **9**(2), 359-365.
- [28] BOLDEA, I., Z. FU a S. NASAR. Performance Evaluation of Axially-Laminated Anisotropic (ALA) Rotor Reluctance Synchronous Motors. *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS*. 1994, **30**(4), 977-985.

- [29] AGAMLOH, Emmanuel, Annete VON JOAUNE a Alexandre YOKOCHI. An Overview of Electric Machine Trends in Modern Electric Vehicles. *Machines* 2020. 2020, **8**(20), 1-17.
- [30] PAVLUK, Jan. *Aplikace vývojového prostředí Ansys pro návrh reluktančního synchronního motoru 15 kW*. Praha, 2017. Diplomová práce. ČVUT.
- [31] KOLEHMAINEN, Jere. Synchronous Reluctance Motor With Form Blocked Rotor. *IEEE TRANSACTIONS ON ENERGY CONVERSION*. 2010, **25**(2), 450-456.
- [32] CREDO, Andrea, Giuseppe FABRI, Marco VILLANI a Mircea POPESCU. Adopting the Topology Optimization in the Design of High-Speed Synchronous Reluctance Motors for Electric Vehicles. *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS*. 2020, **56**(5), 5429-5438.
- [33] KOLEHMAINEN, Jere. Synchronous Reluctance Motor With Form Blocked Rotor. *IEEE TRANSACTIONS ON ENERGY CONVERSION*. 2010, **25**(2), 450-456.
- [34] TAHI, S., R. IBITOUEN a M. BOUNEKHLA. Design optimization of two synchronous reluctance machine structures with maximized torque and power factor. Progress In Electromagnetics Research B, 2011. 369-387 s. *Progress In Electromagnetics Research B*. 2011, **35**(1), 369-387.
- [35] WRIGHT, Jarrad G. *Design of a reluctance synchronous machine for traction motor applications using the finite element method*. Johannesburg, 2010. Disertační práce. University of the Witwatersrand.
- [36] KUBÍN, Tomáš. *Reluktanční stroj s permanentními magnety na rotoru*. Brno, 2014. Diplomová práce. VUT Brno.
- [37] What is Torque Ripple and Cogging Torque in Electric Motors. *Www.azosensors.com* [online]. [cit. 2021-07-05]. Dostupné z: <https://www.azosensors.com/article.aspx?ArticleID=1956>
- [38] SANADA, Masayuki, Kenji HIRAMOTO, Shigeo MORIMOTO a Yoji TAKEDA. Torque Ripple Improvement for Synchronous Reluctance Motor using Asymmetric Flux Barrier Arrangement. *Department of Electrical and Electronic Systems*. Osaka Prefecture University, Japan, 2003, , 350-355.
- [39] COLLINS, Danielle. What's the difference between cogging torque and torque ripple?. *Www.motioncontroltips.com* [online]. [cit. 2021-07-05]. Dostupné z: <https://www.motioncontroltips.com/whats-the-difference-between-cogging-torque-and-torque-ripple/>
- [40] WANG, K., Z. ZHU a Grzegorz OMBACH. Torque ripple reduction of synchronous reluctance machines: Using asymmetric flux-barrier. *COMPEL International Journal of Computations and Mathematics in Electrical*. 2015, **34**(1), 18-31.
- [41] BOMELA, Xola a Maarten KAMPER. Effect of Stator Chording and Rotor Skewing on Performance of Reluctance Synchronous Machine. *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS*. 2002, **38**(1), 91-100.

- [42] NIAZI, Peyman. *PERMANENT MAGNET ASSISTED SYNCHRONOUS RELUCTANCE MOTOR DESIGN AND PERFORMANCE IMPROVEMENT*. Texas, 2005. Dissertation. Texas A&M University.
- [43] PELLEGRINI, Gianmario, Francesco CUPERTINO a Chris GERADA. Automatic Design of Synchronous Reluctance Motors Focusing on Barrier Shape Optimization. *IEEE Transactions on industry applications* [online]. 2015, **51**(2), 10 [cit. 2021-06-16]. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6872804>
- [44] BIANCHI, Nicola, Silverio BOLOGNANI, Diego BON a Michele PRÉ. Rotor Flux-Barrier Design for Torque Ripple Reduction in Synchronous Reluctance and PM-Assisted Synchronous Reluctance Motors. *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS*. 2009, **45**(3), 921-928.
- [45] BHAGEERATH, Patel, Kevin GRACE a Ayman EL-REFAIE. Conceptual design of sleeve rotor synchronous reluctance motor for traction applications. *IET Electric Power Applications*. 2016, **10**(5), 368-374.
- [46] Why torque density is important to machine design. *Eaton* [online]. [cit. 2021-07-30]. Dostupné z: <https://www.eaton.com/us/en-us/products/motors-generators/high-torque/why-torque-density-is-important-in-machine-design.html>
- [47] BIANCHI, Nicola, Silverio BOLOGNANI, Enrico CARRARO, Mose CASTIELLO a Emanuele FORNASIERO. Electric Vehicle Traction Based on Synchronous Reluctance Motors. *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS*. 2016, **52**(6), 4762-4769.
- [48] IBRAHIM, Mohamed, Ayman ABDEL-KHALIK, Essam RASHAD a Peter SERGEANT. An Improved Torque Density Synchronous Reluctance Machine with a Combined StarDelta Winding Layout: Essam M. Rashad, Senior Member, IEEE, and Peter Sergeant, Member, IEEE. *IEEE Transaction On Energy Conversion*. 2017, **1**(1), 1-10.
- [49] IBRAHIM, Mohamed, Bishal SILWAL a Peter SERGEANT. Permanent Magnet-Assisted Synchronous Reluctance Motor Employing a Hybrid StarDelta Winding for High Speed Applications. *2018 XIII International Conference on Electrical Machines (ICEM)*. 2018, , 378-385.
- [50] LENDENMANN, Heinz, Reza MOGHADDAM, Ari TAMMI a Lars-Erik THAND. The advantages of controlling synchronous motors with variable-speed drives. *Ee publishers* [online]. ABB: ABB, 2019 [cit. 2021-07-30]. Dostupné z: <https://www.ee.co.za/article/the-advantages-of-controlling-synchronous-motors-with-variable-speed-drives.html>
- [51] HEIDARI, Hamidreza, Anton RASSÖLKIN, Ants KALLASTE, Ekaterina ANDRIUSHCHENKO, Anouzar BELAHZEN a Dmitry LUKICHEV. A Review of Synchronous Reluctance Motor-Drive Advancements. *Synchronous Reluctance Motor-Drive Advancements. Sustainability 2021*. 2021, **13**(729), 1-37.
- [52] HEIDARI, Hamidreza, Galina DEMIDOVA, Ekaterina ANDRIUSHCHENKO, Anton RASSÖLKIN, Ants KALLASTE a Toomas VAIMANN. Comparison of Synchronous Reluctance Machine and Permanent Magnet-Assisted Synchronous Reluctance Machine

- Performance Characteristics. *27th International Workshop on Electric Drives: MPEI Department of Electric Drives 90th Anniversary (IWED)*, Moscow, Russia, 2020, , 1-5.
- [53] MATYSKA, Pavel. Advantages of Synchronous Reluctance Motors. *Transactions on Electrical Engineering*. 2014, **3**(2), 44-47.
- [54] KOLEHMAINEN, Jere, Jere KÄRKKÄINEN, Hannu KOLEHMAINEN, Lassi AARNIOVUORI a Juha PYRHÖNEN. Technology Comparison of Induction Motor and Synchronous Reluctance Motor. *IECON 2017 - 43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*. 2017, , 2207-2212.
- [55] GERMISHUIZEN, J., E. VAN DER MERWE, K. VAN DER WESTHUIZEN a M. KAMPER. Performance comparison of reluctance synchronous and induction traction drives for electrical multiple units: J. J. Germishuizen, E S. Van der Merwe, K. Van der Westhuizen\*, M. J. Kamper. *EEE Industry Applications Conference*. 2000, **35**(1), 316-323.
- [56] ZHU, Jingwei a Xiaobing NIU. Investigation of Short-circuit Fault in a Fault-Tolerant Brushless Permanent Magnet AC Motor Drive with Redundancy. *2010 5th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications*. 2010, , 1238-1242.
- [57] SIMOTICS GP, SD, XP, DP Low-Voltage Motors. <https://siemens.com/> [online]. Katalog, edice 06, 2020 [cit. 2021-07-31]. Dostupné z: [https://cache.industry.siemens.com/dl/files/197/109749197/att\\_1026989/v1/Motors-D81.1-complete-English-06-2020.pdf](https://cache.industry.siemens.com/dl/files/197/109749197/att_1026989/v1/Motors-D81.1-complete-English-06-2020.pdf)
- [58] REEL SuPremE® – The IE5 magnet-free synchronous reluctance motor. [www.ksb.com](http://www.ksb.com) [online]. [cit. 2021-07-31]. Dostupné z: <https://www.ksb.com/blob/199782/10a90edea2eca4cb28afab3076d43df3/reel-supreme-motor-brochure-en-dow-data.pdf>
- [59] PANDA, Sibasish a Ritesh KESHRI. *Reduced Rib Synchronous Reluctance Motor for Traction Applications* [online]. India, 2019. Dostupné také z: [https://www.researchgate.net/profile/Sibasish-Panda-2/publication/337700862\\_Reduced\\_Rib\\_Synchronous\\_Reluctance\\_Motor\\_for\\_Traction\\_Applications/links/5de8a5024585159aa462d3f2/Reduced-Rib-Synchronous-Reluctance-Motor-for-Traction-Applications.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Sibasish-Panda-2/publication/337700862_Reduced_Rib_Synchronous_Reluctance_Motor_for_Traction_Applications/links/5de8a5024585159aa462d3f2/Reduced-Rib-Synchronous-Reluctance-Motor-for-Traction-Applications.pdf)
- [60] WU, Hailong, Daniel DEPERNET a Vincent LANFRANCHI. *A Survey of Synchronous Reluctance Machine used in Electric Vehicle* [online]. Belfort, 2019. Dostupné také z: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02355278>
- [61] ABOUZEID, Ahmed, Juan GUERRERO, Aitor ENDEMAÑO, David ORTEGA, Igor LARRAZABAL a Fernando BRIZ. Control Strategies for Induction Motors in Railway Traction Applications. *Energies* 2020. 2020, **13**(700), 1-22.
- [62] BONTHU, Sai Sudheer Reddy. *Optimal Design And Comparative Analysis Of Multi-Phase Permanent Magnet Assisted Synchronous Reluctance Machines*. Akron, 2015. Master of science thesis. The University of Akron.

- [63] WANG, Yawei, Silverio BOLOGNANI, N. BIANCHI a Luigi ALBERTI. *Synchronous motors for traction applications* [online]. Padova (Italy), 2017.
- [64] JEONG, Yun, Kwangdeok KIM, Yong KIM, Byung PARK a Sang JUNG. Design Characteristics of PMa-SynRM and Performance Comparison with IPMSM Based on Numerical Analysis. *012 XXth International Conference on Electrical Machines*. 2012, , 164-170.
- [65] HUYNH, Thanh, Min HSIEH, Kai SHIH a Hsiu KUO. An Investigation Into the Effect of PM Arrangements on PMa-SynRM Performance. *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS*. 2018, **54**(6), 5856-5868.
- [66] CAI, Haiwei, Bo GUAN a Longya XU. Low-Cost Ferrite PM-Assisted Synchronous Reluctance Machine for Electric Vehicles. *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS*. 2014, **61**(10), 5741-5748.
- [67] DE PANCORBO, S., G. UGALDE a A. EGEEA. Comparative Study between Induction Motor and Synchronous Reluctance Motor for Electrical Railway Traction Applications. *2015 5th International Electric Drives Production Conference (EDPC)*. 2015, , 1-5.
- [68] NATEGH, Shafiqh, Aldo BOGLIETTI, Yujing LIU, Daniel BARBER, David LINDBERG a Ola AGLÉN. A Review on Different Aspects of Traction Motor Design for Railway Applications: Daniel Barber , Ron Brammer , Senior Member, IEEE, David Lindberg , and Ola Aglen. *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS*. 2020, **56**(3), 2148-2157.
- [69] PANDA, Sibasish, Ritesh KESHRI, Gustav TIWARI a Mario MEZZAROBBA. Design refinements of synchronous reluctance motor utilising non-magnetic radial ribs for traction applications. *IET Electric. Power Applications*. 2020, **14**(12), 2480-2489.
- [70] BAN, Branko, Mario KLANAC a Stjepan STIPETIC. *Synchronous Reluctance Machines: Theory, Design and the Potential Use in Traction Applications* [online]. High Tatras, 2019.