



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A ELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING

OPTIMALIZACE VYSOKOotáčkového ASYNCHRONNÍHO STROJE

OPTIMIZATION OF HIGH-SPEED INDUCTION MACHINE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Jakub

Cajzl

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Petr Klíma

BRNO 2024



Diplomová práce

magisterský navazující studijní program **Silnoproudá elektrotechnika a výkonová elektronika**

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Student: Bc. Jakub Cajzl

ID: 220757

Ročník: 2

Akademický rok: 2023/24

NÁZEV TÉMATU:

Optimalizace vysokootáčkového asynchronního stroje

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

- Proveďte literární rešerši zaměřenou na ztráty ve vysokootáčkovém asynchronním stroji.
- Navrhněte úpravy pro omezení ztrát zadaného vysokootáčkového asynchronního stroje.
- Proveďte optimalizaci tohoto stroje se zaměřením na vyšší účinnost při stejném výkonu.
- Srovnejte výchozí stroj s optimalizovaným.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] PYRHÖNEN, Juha; JOKINEN, Tapani a HRABOVCOVÁ, Valéria. Design of rotating electrical machines. 2nd edition. Chichester: Wiley, 2014. ISBN 978-1118581575.
- [2] GERADA, David; MEBARKI, Abdeslam; BROWN, Neil L.; GERADA, Chris; CAVAGNINO, Andrea et al. High-Speed Electrical Machines: Technologies, Trends, and Developments. IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2014, roč. 61, č. 6, s. 2946-2959. ISSN 0278-0046.
- [3] DEB, K.; PRATAP, A.; AGARWAL, S. a MEYARIVAN, T. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. IEEE Transactions on Evolutionary Computation. 2002, roč. 6, č. 2, s. 182-197. ISSN 1089778X.

Termín zadání: 5.2.2024

Termín odevzdání: 20.5.2024

Vedoucí práce: Ing. Petr Klíma

doc. Ing. Ondřej Vítek, Ph.D.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Tato práce se zabývá multi-kriteriální optimalizací vysokootáčkového asynchronního stroje. Úvod práce je věnován materiálům a ztrátám ve vysokootáčkových asynchronních strojích a porovnání základních topologií rotoru. V další části práce jsou shrnuty především základní informace spojené s principy optimalizace a základním rozdělením optimalizačních algoritmů. Dále jsou již detailněji popsány konkrétní algoritmy používané v optimalizačních úlohách. Hlavní část této práce se zabývá návrhy na zvýšení účinnosti původního vysokootáčkového asynchronního stroje 2,5 kW, které jsou ověřeny pomocí elektromagnetických výpočtů. Dále je již provedena samotná optimalizace pomocí genetického algoritmu NSGA-II. Jsou zde vyhodnoceny výsledky optimalizace a porovnány vybrané optimalizované modely s výchozím a upraveným modelem stroje. Účinnost stroje 2,5 kW byla úspěšně navýšena především díky radiálně drážkovanému rotoru s měděnými konci a použití statorových plechů s nižšími měrnými ztrátami. Optimalizací geometrie stroje byl navýšen účinník a byly sníženy ztráty ve vinutí a třením.

KLÍČOVÁ SLOVA

multi-kriteriální optimalizace, optimalizace elektrického stroje, NSGA-II, vysokootáčkový asynchronní stroj, axiálně drážkovaný plný rotor, ztráty ve strojích

ABSTRACT

This thesis deals with the multi-objective optimization of a high-speed asynchronous machine. The introduction is devoted to materials and losses in high speed asynchronous machines and comparison of basic rotor topologies. The next part of this thesis summarizes the basic information related to the optimization principles and the basic classification of optimization algorithms. Then the specific algorithms used in optimization problems are described in more detail. The main part of this thesis deals with proposals for increasing the efficiency of the original 2,5 kW high-speed asynchronous machine, which are verified by electromagnetic calculations. Furthermore, the optimization itself is already performed using the NSGA-II genetic algorithm created in Python. The optimization results are evaluated and the selected optimized models are compared with the initial and modified machine models. The efficiency of the 2,5 kW machine has been successfully increased mainly due to the radially slitted rotor with copper end-rings and the use of stator plates with lower core losses. By optimizing the machine geometry, the power factor was increased and winding and friction losses were reduced.

KEYWORDS

multi-objective optimization, electric machine optimization, NSGA-II, high-speed asynchronous machine, axially-slitted solid rotor, losses in machines

CAJZL, Jakub. *Optimalizace vysokootáčkového asynchronního stroje*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky, 2024, 96 s. Diplomová práce. Vedoucí práce: Ing. Petr Klíma

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení autora: Bc. Jakub Cajzl
VUT ID autora: 220757
Typ práce: Diplomová práce
Akademický rok: 2023/24
Téma závěrečné práce: Optimalizace vysokootáčkového asyn-
chronního stroje

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí/ho závěrečné práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno

.....

podpis autora*

*Autor podepisuje pouze v tištěné verzi.

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Petru Klímovi za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce. Také bych rád poděkoval své rodině za veškerou podporu v průběhu mého studia.

Obsah

Úvod	12
1 Vysokootáčkové elektrické stroje	13
1.1 Srovnání vlastností vysokootáčkových strojů	14
1.2 Náhled do návrhu vysokootáčkových strojů	15
1.2.1 Elektromagnetický návrh	15
1.2.2 Tepelný návrh	16
1.2.3 Mechanický návrh	16
2 Vysokootáčkové asynchronní stroje	17
2.1 Topologie rotoru	17
2.1.1 Plný hladký rotor	19
2.1.2 Plný hladký rotor potažený měděnou vrstvou	19
2.1.3 Axiálně drážkovaný plný rotor	20
2.1.4 Plný rotor s klecí nakrátko	24
2.2 Materiály pro vysokootáčkové asynchronní stroje	25
2.2.1 Elektrotechnické oceli	25
2.2.2 Oceli pro plné rotory	27
2.2.3 Slitiny mědi pro rotorové tyče	28
2.3 Mechanické namáhání	28
2.3.1 Odstředivé síly	29
2.3.2 Kritické otáčky	30
2.4 Ztráty vysokootáčkových asynchronních strojů	30
2.4.1 Ztráty ve vinutí	31
2.4.2 Ztráty v železe	32
2.4.3 Ztráty vířivými proudy na povrchu rotoru	33
2.4.4 Mechanické ztráty	35
3 Optimalizační algoritmy	37
3.1 Ideální postup multi-kriteriální optimalizace	37
3.2 Postup multi-kriteriální optimalizace založené na preferencích	38
3.3 Rozdělení optimalizačních algoritmů	39
3.3.1 Optimalizace hejnem čistic	41
3.3.2 Simulované žihání	42
3.3.3 Horolezecký algoritmus	43
3.3.4 SOMA	44
3.3.5 NSGA-II	45

4	Analýza vysokootáčkového asynchronního stroje	52
4.1	Nastavení 2D modelu	53
4.2	Výsledky elektromagnetických výpočtů	55
4.3	Vybrané možnosti zvýšení účinnosti stroje	59
4.3.1	Statorové plechy s nižšími měrnými ztrátami	59
4.3.2	Měděné konce rotoru	60
4.3.3	Radiální drážkování rotoru	61
4.3.4	Radiálně drážkovaný rotor s měděnými konci	63
4.3.5	Změna tvaru statorové drážky	65
4.3.6	Kombinace všech vybraných způsobů zvýšení účinnosti	66
5	Optimalizace zadaného stroje	67
5.1	Optimalizační postup	67
5.1.1	Zpracování výstupních dat	68
5.1.2	Optimalizované parametry motoru	69
5.1.3	Nastavení parametrů optimalizačního algoritmu	69
5.2	Výsledky optimalizace	70
5.3	Srovnání navržených strojů	72
	Závěr	80
	Literatura	83
	Seznam symbolů a zkratk	93

Seznam obrázků

1.1	Přehled realizovaných vysokootáčkových strojů [1].	13
1.2	Provázanost požadavků kladených na vysokootáčkový stroj.	15
2.1	Závislost maximálního výkonu na otáčkách pro rotorový materiál s mezi kluzu 700 MPa [12].	17
2.2	Řez plným hladkým rotorem [18].	19
2.3	Řez plným rotorem potaženým měděnou vrstvou [18].	20
2.4	Řez axiálně drážkovaným plným rotorem [18].	21
2.5	Řez axiálně drážkovaným rotorem s vrstvou na povrchu [22].	23
2.6	Řez axiálně drážkovaným rotorem s měděnou vrstvou na povrchu zubů [24].	24
2.7	Řez plným rotorem s klecí nakrátko [18].	25
2.8	Srovnání vybraných materiálů pro plechy z hlediska meze kluzu a měrných ztrát v železe (při 1 T a 400 Hz) [1].	26
2.9	Srovnání vybraných materiálů pro rotorové tyče z hlediska meze kluzu a vodivosti vztažené k mědi [1].	28
2.10	Základní tělesa: tenkostěnný válec, válec s malou dírou, plný válec [9].	29
2.11	Ohybové tvary rotoru pro první a druhé kritické otáčky [9].	30
2.12	Ztráty standartního asynchronního stroje a vysokootáčkového asyn- chronního stroje s plným rotorem s Cu vrstvou 37 kW [34].	31
2.13	Pokles magnetické indukce vlivem drážkování statoru [12].	33
2.14	Vhodný tvar magnetického klínu pro potlačení vlivu drážkování sta- toru na povrchové ztráty rotoru [12].	34
3.1	Proces multi-kriteriální optimalizace využívající ideální postup [50]. . .	38
3.2	Proces multi-kriteriální optimalizace založené na preferencích [50]. . .	39
3.3	Rozdělení optimalizačních algoritmů, čerpáno z [51].	40
3.4	Pohyb částice v rámci optimalizace hejnem částic [56].	41
3.5	Horolezecký algoritmus [58].	43
3.6	Princip funkce SOMA [61].	44
3.7	Základní princip genetického algoritmu [49].	46
3.8	Turnajový výběr (tournament selection) [64].	47
3.9	Křížení [62].	48
3.10	Princip optimalizačního algoritmu NSGA-II [65].	48
3.11	Non-dominated sorting.	49
3.12	Crowding distance.	50
4.1	Provedení (a) rotorových a (b) statorových drážek.	53
4.2	2D model vysokootáčkového asynchronního motoru.	54
4.3	Výpočetní síť.	55

4.4	Procentuální zastoupení ztrát ve stroji.	56
4.5	Rozložení magnetické indukce v řezu stroje.	57
4.6	Vířivé proudy na povrchu rotoru.	57
4.7	Průběh radiální složky magnetické indukce ve vzduchové mezeře.	58
4.8	Amplitudové spektrum průběhu radiální složky magnetické indukce.	58
4.9	Vířivé proudy na povrchu rotoru s měděnými konci.	61
4.10	Vířivé proudy na povrchu rotoru s radiálními drážkami.	63
4.11	Vířivé proudy na povrchu radiálně drážkovaného rotoru s Cu konci.	64
4.12	Nové provedení statorových drážek.	65
5.1	Optimalizační postup.	68
5.2	Výsledky optimalizace stroje 2,5 kW pomocí algoritmu NSGA-II.	71
5.3	Výsledky optimalizace vysokootáčkového asynchronního stroje 2,5 kW.	72
5.4	Srovnání geometrií jednotlivých modelů stroje 2,5 kW (a) výchozí, (b) výchozí s úpravami, (c) optimalizovaný s nejvyšší účinností, (d) optimalizovaný s nejvyšším účíníkem a (e) optimalizovaný kompromisní	73
5.5	Průběhy radiální složky magnetické indukce ve vzduchové mezeře zkoumaných strojů 2,5 kW.	76
5.6	Amplitudová spektra průběhů radiální složky magnetické indukce ve vzduchové mezeře zkoumaných strojů 2,5 kW.	76
5.7	Rozložení magnetické indukce v řezu stroje 2,5 kW (a) výchozí, (b) výchozí s úpravami, (c) optimalizovaný s nejvyšší účinností, (d) optimalizovaný s nejvyšším účíníkem a (e) optimalizovaný kompromisní	78

Seznam tabulek

1.1	Výhody a nevýhody typických představitelů vysokootáčkových strojů [4].	14
2.1	Srovnání vlastností vybraných rotorových topologií vysokootáčkových asynchronních strojů [4].	18
2.2	Srovnání parametrů vybraných materiálů pro plné rotory [33].	27
4.1	Hlavní rozměry vysokootáčkového asynchronního motoru [39].	52
4.2	Hlavní parametry vysokootáčkového asynchronního motoru [39].	53
4.3	Výsledky výpočtů parametrů stroje 2,5 kW.	56
4.4	Vypočtené parametry stroje s plechy 10JNEX900.	59
4.5	Vypočtené parametry stroje s měděnými konci rotoru.	60
4.6	Vypočtené parametry stroje s radiálními drážkami na povrchu rotoru.	62
4.7	Vypočtené parametry stroje s radiálními drážkami na rotoru s Cu konci.	64
4.8	Vypočtené parametry stroje s novým tvarem drážek statoru.	65
4.9	Vypočtené parametry stroje s úpravami na zvýšení účinnosti.	66
5.1	Optimalizační cíle.	69
5.2	Rozsahy optimalizovaných parametrů.	69
5.3	Parametry optimalizačního algoritmu.	70
5.4	Srovnání vstupních parametrů, materiálů a topologií výchozích a optimalizovaných strojů 2,5 kW.	74
5.5	Srovnání výstupních parametrů jednotlivých strojů 2,5 kW.	74
5.6	Srovnání magnetické indukce uprostřed zubu a jha statoru v nejvíce sycených místech jednotlivých strojů 2,5 kW.	79

Úvod

Vysokootáčkové elektrické stroje jsou v posledních letech předmětem rozsáhlého výzkumu a rozvoje. Důvodem jsou požadavky průmyslu na snižování spotřeby elektrické energie elektrickými stroji a zvyšování spolehlivosti, životnosti a účinnosti elektrických strojů. Díky výraznému pokroku v oblasti výkonové elektroniky, zejména se jedná o topologii frekvenčních měničů a metody řízení, je možné pro určité aplikace využít vysokootáčkového stroje, což umožňuje eliminovat nutnost použití převodovky. To má za následek nejen zlepšení účinnosti a spolehlivosti celého systému, ale také úsporu materiálů a zjednodušení údržby. Hlavními přednostmi vysokootáčkových strojů jsou vysoká hustota výkonu a menší rozměry v porovnání se standardními elektrickými stroji. Jsou často využívány v následujících aplikacích: systémy pro ukládání energie do setrvačnicků (v důsledku vysokých otáček má setrvačnick vysokou hustotu energie), turbomolekulární čerpadla (využívají se k dosažení a udržení vysokého vakua), pohon kompresorů, mikroturbíny a letectví [1][2].

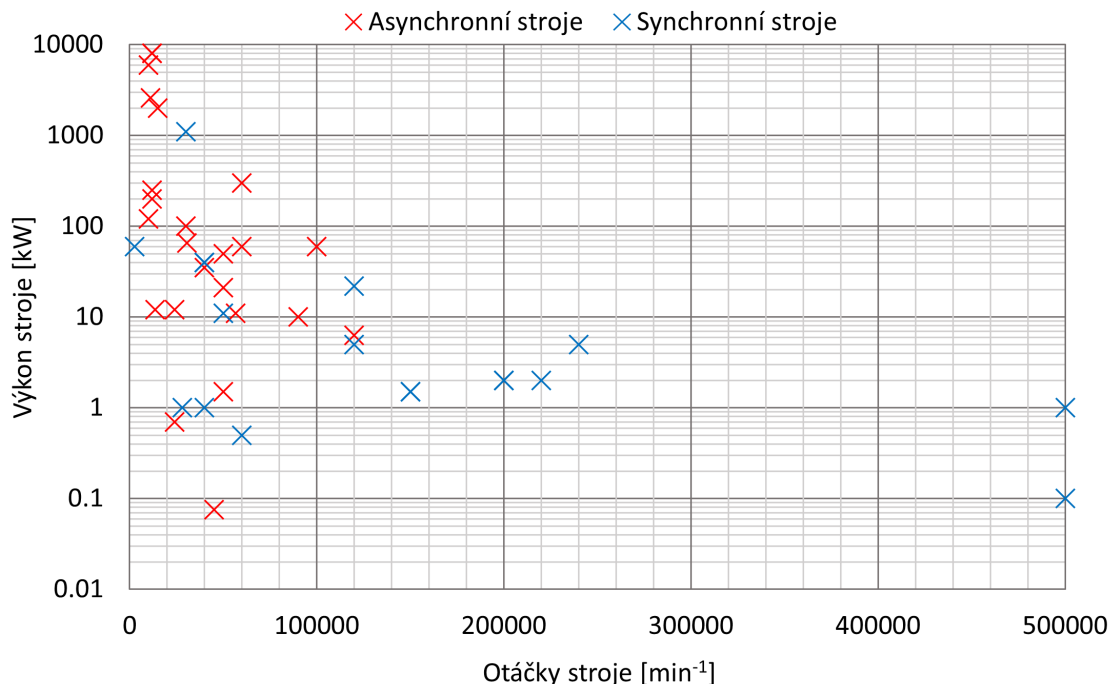
Elektrické motory v průmyslových aplikacích celosvětově spotřebují 30 - 40 % vyrobené elektrické energie. Proto je v současné době kladen důraz na zvyšování účinnosti všech točivých elektrických strojů. To může vést nejen ke snížení spotřeby elektrické energie, ale také ke zmírnění negativních dopadů na životní prostředí [3]. S tím souvisí také využití nejrůznějších optimalizačních algoritmů, které mohou pomoci k nalezení kvalitních řešení. Jedním z cílů této diplomové práce je navrhnout úpravy stávajícího vysokootáčkového asynchronního stroje za účelem zvýšení jeho účinnosti. Hlavním cílem práce potom je samotná optimalizace upraveného modelu stroje se zaměřením na vyšší účinnost při zachování výkonu na hřídeli 2 500 W.

Diplomová práce je členěna do pěti kapitol. Kapitola 1 se věnuje obecnému seznámení s problematikou vysokootáčkových strojů. Kapitola 2 obsahuje literární rešerši na téma vysokootáčkových asynchronních strojů. Jsou zde popsány především materiály používané v těchto strojích a různé druhy topologií rotoru. Detailně jsou zde rozebrány ztráty vznikající v těchto strojích. Kapitola 3 se věnuje seznámení s optimalizačními algoritmy, které se využívají pro optimalizaci elektrických strojů. Jsou zde také popsány některé principy využívající se při multi-kriteriální optimalizaci. Kapitola 4 je zaměřena na analýzu základního modelu metodou konečných prvků. Jsou zde také provedeny úpravy modelu vysokootáčkového stroje pro zvýšení jeho účinnosti. Kapitola 5 je zaměřena na optimalizaci modelu stroje pomocí vytvořeného optimalizačního algoritmu NSGA-II. Jsou zde prezentovány jak důvody volby optimalizačního algoritmu, tak i zvolený optimalizační postup. Závěr diplomové práce je věnován vyhodnocení výsledků optimalizace a srovnání optimalizovaných modelů s původním a upraveným modelem vysokootáčkového asynchronního stroje 2,5 kW.

1 Vysokootáčkové elektrické stroje

Vysokootáčkové stroje mají ve srovnání se standartními stroji výhodu ve větší hustotě výkonu a menších požadavcích na prostor. V současné době je možné se setkat s těmito typy vysokootáčkových elektrických strojů: asynchronní stroj, spínaný reluktanční stroj, homopolární synchronní stroj, synchronní reluktanční stroj a synchronní stroj s permanentními magnety [4]. Populárnějšímu synchronnímu stroji s permanentními magnety je stručně věnována následující podkapitola 1.1. Detailnímu popisu vysokootáčkového asynchronního stroje je pak věnována samostatná kapitola 2.

Synchronní stroje dosahují oproti indukčním strojům nejen vyššího účinníku, ale také vyšší účinnosti [5]. Nicméně asynchronní stroje disponují řadou nezanedbatelných výhod, které zahrnují především jednoduchost řízení, vyšší teplotní odolnost a nižší výrobní náklady [6]. Vlastnosti obou typů těchto strojů ukazují, že v případě vysokootáčkových aplikací jsou asynchronní a synchronní stroje rovnocennými partnery. Publikace [1] uvádí, že asynchronní stroje jsou více preferovány pro větší výkony a nižší otáčky, zatímco v případě synchronních strojů se jedná spíše o použití pro menší výkony a vyšší otáčky. Přehled realizovaných vysokootáčkových strojů je znázorněn na obrázku 1.1.



Obr. 1.1: Přehled realizovaných vysokootáčkových strojů [1].

1.1 Srovnání vlastností vysokootáčkových strojů

Srovnání výhod a nevýhod vysokootáčkového synchronního stroje s permanentními magnety a asynchronního stroje shrnuje tabulka 1.1. Samotným vysokootáčkovým asynchronním strojům je pak věnována detailně psaná kapitola 2.

Tab. 1.1: Výhody a nevýhody typických představitelů vysokootáčkových strojů [4].

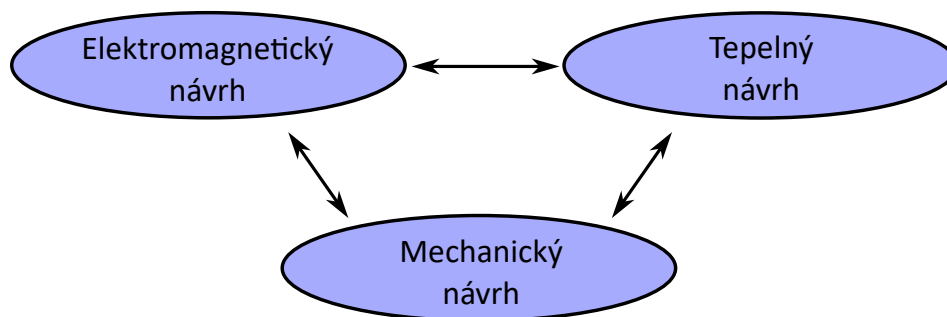
STROJ	VÝHODY	NEVÝHODY
Asynchronní	<ul style="list-style-type: none"> Robustní rotor Vysoká spolehlivost Snadné spouštění Regulace rychlosti v otevřené smyčce 	<ul style="list-style-type: none"> Vysoké rotorové ztráty Nízká odolnost proti poruchám
Synchronní s PM	<ul style="list-style-type: none"> Vysoká hustota výkonu Vysoká účinnost v plném rozsahu otáček Velká vzduchová mezera Jednoduchý měnič Nízká hmotnost 	<ul style="list-style-type: none"> Problémy s pevností rotoru Citlivost magnetů na vysoké teploty Vysoká cena

Hlavní doménou vysokootáčkových synchronních strojů s permanentními magnety je jejich vysoká účinnost, dobrý účinník, nízká hmotnost a kratší aktivní délka statoru ve srovnání s indukčním strojem. Tyto vlastnosti pak vedou k dobrému poměru výkonu stroje na jeho objem [7]. Tyto stroje jsou vhodnější pro nižší obvodové rychlosti, než je tomu u asynchronních strojů s pevným hladkým rotorem, případně pevným rotorem potaženým měděnou vrstvou. Dle publikace [5] se jedná o obvodové rychlosti typicky nižší než 250 m/s. Jsou s oblibou využívány v řadě průmyslových aplikací jako jsou plynové kompresory, vřetenové pohony v obráběcích strojích, sys-

témy pro ukládání energie do setrvačnicku, hybridní elektrická vozidla a vakuová čerpadla [8].

1.2 Náhled do návrhu vysokootáčkových strojů

Návrh vysokootáčkového stroje je poměrně náročný proces, kdy je zapotřebí, aby navržený stroj splňoval elektromagnetické, tepelné a mechanické požadavky. Jelikož jsou tyto požadavky navzájem propojené je žádoucí provést samotný návrh iterativním způsobem pro nalezení optimálního řešení [2].



Obr. 1.2: Provázanost požadavků kladených na vysokootáčkový stroj.

1.2.1 Elektromagnetický návrh

Elektromagnetický návrh zahrnuje určení základních rozměrů aktivních částí stroje a volbu topologie, materiálů a vinutí. Postup pro analytický výpočet nejen základních rozměrů, ale i požadovaných charakteristik stroje je popsán například v literatuře [9]. V dnešní době je však stále populárnější využít předběžně navržených rozměrů pro vytvoření modelu analyzovaného například v prostředí Ansys Maxwell pomocí metody konečných prvků.

Výhodou takového softwaru je také možnost provést například parametrickou analýzu, kdy je možné sledovat vliv vybraných parametrů (např. radiální délky vzduchové mezery, počtu závitů vinutí, aktivní délky magnetického obvodu, průměru rotoru, otevření statorové drážky a vnějšího průměru statoru) na elektromagnetické vlastnosti stroje.

1.2.2 Tepelný návrh

Je obecně známo, že zdrojem tepla ve stroji jsou jeho ztráty. Tato skutečnost ukazuje na úzkou provázanost tepelného a elektromagnetického výpočtu. Tepelný návrh zahrnuje důležitý výpočet ustáleného oteplení, kdy pro výpočet teplot jednotlivých částí stroje je možné využít například metodu tepelné sítě, případně časově náročnější numerickou metodu CFD (tj. výpočetní dynamika tekutin) [10]. Je nezbytné zkontrolovat, zda nedochází během provozu stroje k překročení maximálního dovoleného teplotního namáhání materiálů stroje. Mezi kritické části stroje se řadí zejména izolace statorového vinutí, ložiska a také permanentní magnety.

Je důležité si uvědomit, že oteplení ovlivňuje teplotní roztažnost materiálů, což má za následek přídatné mechanické namáhání. Zde se právě projevuje provázanost tepelného a mechanického návrhu. V případě vysokootáčkových strojů se pro odvod tepla využívá například vodního chlazení případně je možné vhánět vzduch do radiálního kanálu ve statoru a na čela vinutí [11].

1.2.3 Mechanický návrh

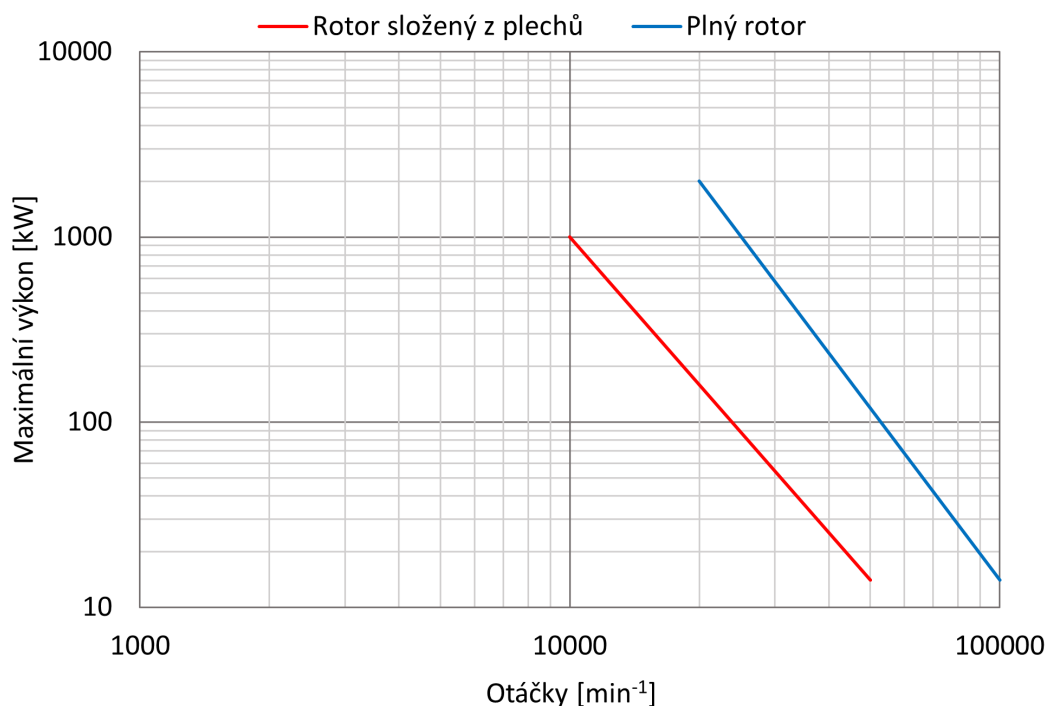
Stejně jako v případě elektromagnetického návrhu lze stroj analyzovat z hlediska mechaniky pomocí metody konečných prvků. Při mechanickém návrhu je zapotřebí zhodnotit nejen mechanické namáhání, ale i celkovou dynamiku rotoru. V důsledku vysokých rychlostí dochází ke vzniku značných odstředivých sil, které významně namáhají rotorový materiál. Problematický je také provoz stroje v blízkosti tzv. kritických otáček [12]. Na mechanické namáhání ve vysokootáčkových elektrických strojích je detailněji zaměřena kapitola 2.3.

2 Vysokootáčkové asynchronní stroje

Vysokootáčkové asynchronní stroje jsou využívány v mnoha aplikacích. Jedná se například o pohony v kompresorech, vývěvách, obráběcích strojích a turbogenerátorech. Dokonce existuje jejich využití i v automobilovém průmyslu [13][14]. Tyto stroje mají oproti vysokootáčkovým synchronním strojům s permanentními magnety řadu výhod, mezi které patří: vysoká mechanická odolnost (především u plného hladkého rotoru), vysoká tepelná odolnost, jednodušší a levnější výroba a snadnější řízení [4][5].

2.1 Topologie rotoru

V případě vysokootáčkových asynchronních strojů se převážně využívá plného rotoru. Důvodem je, že rotor složený z plechů má výrazně menší mechanickou odolnost. Rotor složený z plechů však dosahuje vyššího účíniku a také o cca 2-3 % vyšší účinnosti než plný rotor. Pokud to daný stroj umožňuje, je výhodnější využít rotoru, který je složen z plechů [1][4].



Obr. 2.1: Závislost maximálního výkonu na otáčkách pro rotorový materiál s mezí kluzu 700 MPa [12].

Obrázek 2.1 znázorňuje závislost maximálního výkonu na otáčkách v případě plného rotoru a rotoru složeného z plechů, kdy materiál rotoru disponuje mezí kluzu 700 MPa. Je patrné, že v případě rotoru složeného z plechů je maximálního výkonu (cca 14 kW) dosaženo při otáčkách $50\,000\text{ min}^{-1}$, zatímco u plného rotoru je tohoto výkonu dosaženo při $100\,000\text{ min}^{-1}$.

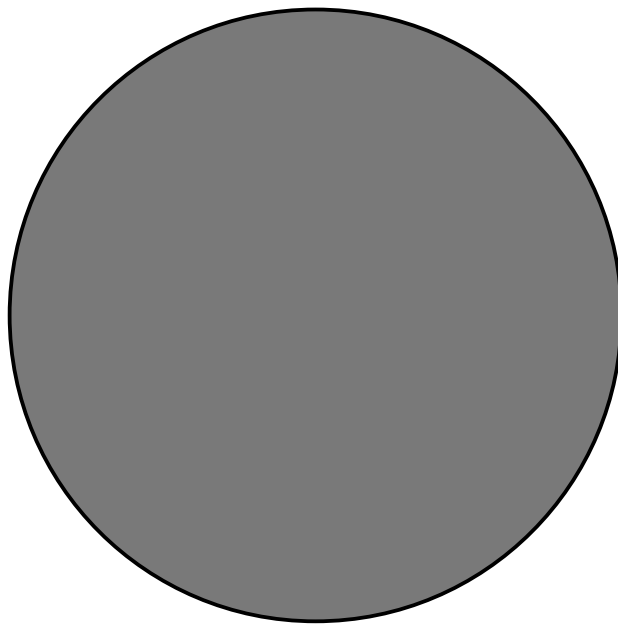
Konstrukčně nejjednodušším provedením je plný hladký rotor, který je vyroben z jednoho kusu feromagnetického materiálu. Tato topologie disponuje nejvyšší mechanickou odolností, ale nejhoršími elektromagnetickými vlastnostmi (nízký účinník, velké ztráty a skluz). K vylepšení elektromagnetických vlastností lze využít axiálního drážkování, případně je možné použít rotor potažený měděnou vrstvou. Z elektromagnetického hlediska se ale nejvýhodněji jeví rotor s klecí nakrátko [15].

Tab. 2.1: Srovnání vlastností vybraných rotorových topologií vysokootáčkových asynchronních strojů [4].

Plný rotor	Účinník	Účinnost	Robustnost	Odolnost
Hladký	nejnižší	nižší	nejvyšší	nejvyšší
Axiálně drážkovaný	nižší	nížká	vyšší	vyšší
Drážkovaný s měděnou vrstvou	střední	střední	vysoká	vysoká
Axiálně a radiálně drážkovaný	nízký	vysoká	vysoká	vysoká
Rotor z plechů	Účinník	Účinnost	Robustnost	Odolnost
Klec nakrátko	vysoký	vysoká	střední	nížká
Dvojitá klec	vyšší	vyšší	střední	nížká
Drápkový motor	nízký	střední	střední	vysoká
Spirálově složený z plechů	nejvyšší	nejvyšší	nížká	nížká

2.1.1 Plný hladký rotor

V případě plného hladkého rotoru se jedná o nejjednodušší konstrukční provedení, kdy rotor je tvořen pouze válcem, který je vyroben z jednoho kusu feromagnetického materiálu. Takové provedení rotoru disponuje nejvyšší mechanickou odolností, což mu umožňuje odolávat vznikajícím odstředivým silám, které v případě vysokootáčkových strojů nabývají značné velikosti [16]. Publikace [5] uvádí, že stroj vybavený pevným hladkým rotorem odolá obvodovým rychlostem vyšším než 400 m/s. Dalšími benefity v porovnání s ostatními typy rotorů jsou jednoduchost výroby, nízké náklady, vysoká teplotní odolnost a nízké ztráty způsobené třením rotoru o vzduch [15][17].



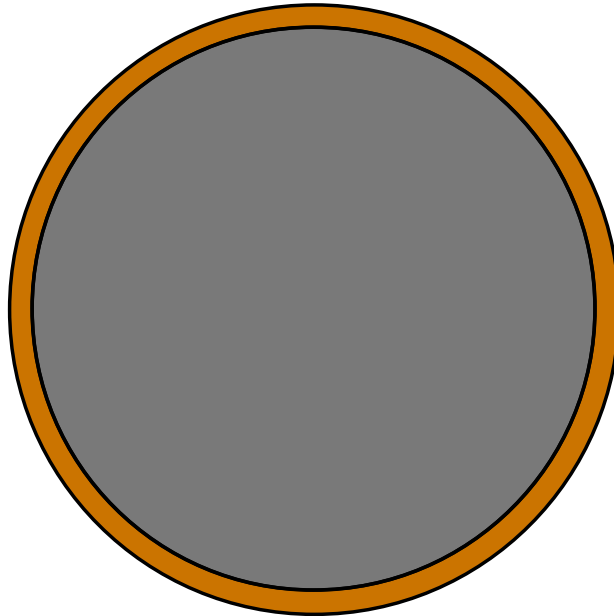
Obr. 2.2: Řez plným hladkým rotorem [18].

Tato topologie má však zdaleka nejhorší elektromagnetické vlastnosti jako je velký skluz a nízký účinník. To je dáno vlivem magnetického skin efektu. Materiál rotoru má nízkou elektrickou vodivost a vířivé proudy, které se koncentrují na povrchu rotoru způsobují špatné pronikáním magnetického toku do rotoru. Vnitřní část rotoru je tedy elektromagneticky nevyužitá. Zároveň jsou vířivé proudy na povrchu zdrojem velkých rotorových ztrát [16][19].

2.1.2 Plný hladký rotor potažený měděnou vrstvou

Pro vylepšení elektromagnetických vlastností hladkého rotoru je možné využít potažení měděnou vrstvou, která vlastně představuje nekonečný počet tyčí spojených

zkratovacími kroužky. Měděná vrstva je kvalitní cestou pro indukované proudy do rotoru, kdy na koncích rotoru často bývá větší tloušťka mědi, která ještě zvyšuje jejich vodivost [17]. Publikace [16] uvádí, že pro optimální elektromagnetické vlastnosti by se tloušťka vrstvy měla pohybovat okolo 1,5 mm bez ohledu na průměr rotoru. Silnější vrstva by totiž mohla mít nepříznivý vliv na výkon motoru. Důvodem je skutečnost, že měď má podobnou hodnotu relativní permeability jako vzduch a zvětšuje tak vzduchovou mezeru.



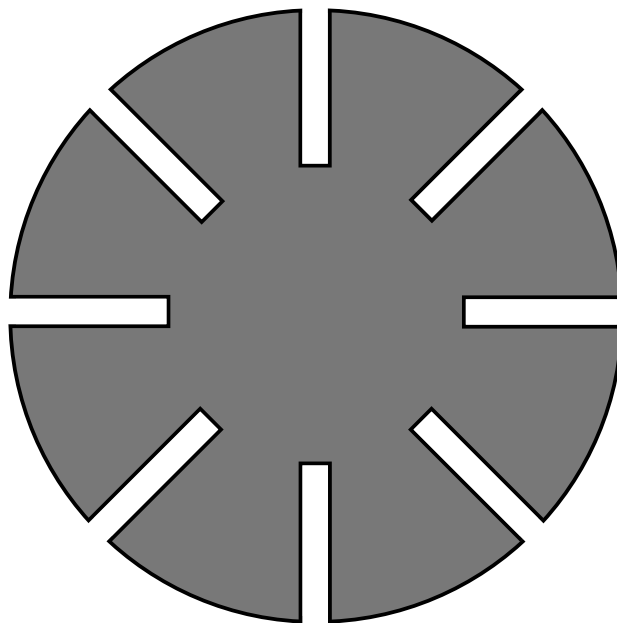
Obr. 2.3: Řez plným rotorem potaženým měděnou vrstvou [18].

Výhodou měděné vrstvy je potlačení vysokofrekvenčních harmonických složek průběhu magnetické indukce ve vzduchové mezeře, čímž dojde ke snížení ztrát vířivými proudy na povrchu rotoru a ztrát ve statorovém vinutí [16] [17]. Nevýhodou tohoto provedení je nižší mechanická odolnost ve srovnání s plným hladkým rotorem v důsledku mechanického napětí, které vzniká v místě styku mědi a feromagnetického materiálu. Další nevýhodou je vyšší cena a větší náročnost výroby [15].

2.1.3 Axiálně drážkovaný plný rotor

Další variantou, jak zlepšit elektromagnetické vlastnosti plného hladkého rotoru je využití axiálního drážkování. To zajistí lepší pronikání magnetického toku do rotoru. Zároveň dochází ke značnému zvýšení vysokofrekvenční impedance povrchu rotoru, což má za následek snížení ztrát vířivými proudy na povrchu rotoru. Naopak nízkofrekvenční impedance rotoru se sníží, díky čemuž se zvýší elektromagnetický

moment. Další výhodou je zlepšená schopnost chlazení rotoru v důsledku zvětšené chladicí plochy. Nevýhodou tohoto provedení je menší mechanická odolnost oproti plnému hladkému rotoru. Dochází také ke značnému nárůstu ztrát způsobených třením rotoru o vzduch [4][20][21].



Obr. 2.4: Řez axiálně drážkovaným plným rotorem [18].

V případě volby axiálně drážkovaného plného rotoru je zapotřebí správně zvolit rozměry drážek. Publikace [22], která se tímto provedením rotoru zabývá, doporučuje, aby hloubka drážky byla volena jako 40 – 50 % poloměru rotoru. To potvrzuje i studie provedená v [20], kde bylo dosaženo maximálního elektromagnetického momentu s minimálním napájecím proudem pro hloubku drážky rovnu 50 % poloměru rotoru. Hlubší drážky by znamenaly další snížení mechanické odolnosti rotoru, které by již nebylo přípustné. Jak je uvedeno v [12], šířka drážky by měla být volena jako 5 – 15 % drážkové rozteče rotoru. Opět je to potvrzeno studií v [20], kde je optimálních elektromagnetických parametrů dosaženo při šířce drážky rovné cca 11,5 % drážkové rozteče.

Výzvou je také stanovení vhodné kombinace počtu statorových a rotorových drážek. Vhodné kombinace jsou uvedeny například v literatuře [9]. V případě statorových drážek platí, že čím vyšší je jejich počet, tím získáme harmoničtější průběh magnetické indukce ve vzduchové mezeře. Zároveň je však zapotřebí zvolit takový počet, aby se drážková rozteč pohybovala v rozmezí 7 – 45 mm. Doporučený počet statorových drážek je možné určit ze vztahu:

$$Q_s = 2 \cdot p \cdot m \cdot q_s \quad (2.1)$$

kde p je počet pólparů, m je počet fází a q_s je zvolený počet drážek na pól a fázi.

Nevhodně zvolenou kombinací počtu statorových a rotorových drážek mohou vznikat nežádoucí synchronní a vibrační momenty. Potlačení synchronních momentů při stojícím motoru nastane, když pro počet drážek rotoru bude platit:

$$Q_r \neq 6 \cdot p \cdot g \quad (2.2)$$

kde g je libovolné kladné celé číslo.

Pro omezení synchronních momentů způsobených drážkovými harmonickými platí:

$$Q_r \neq Q_s \quad Q_r \neq 0,5 \cdot Q_s \quad Q_r \neq 2 \cdot Q_s \quad (2.3)$$

Synchronní momenty během chodu motoru je možné potlačit, když platí:

$$Q_r \neq 6 \cdot p \cdot g \pm 2 \cdot p \quad (2.4)$$

K potlačení nebezpečných drážkových harmonických dojde, pokud platí:

$$Q_r \neq Q_s \pm 2p \quad Q_r \neq 2Q_s \pm 2p \quad Q_r \neq Q_s \pm p \quad Q_r \neq 0,5Q_s \pm p \quad (2.5)$$

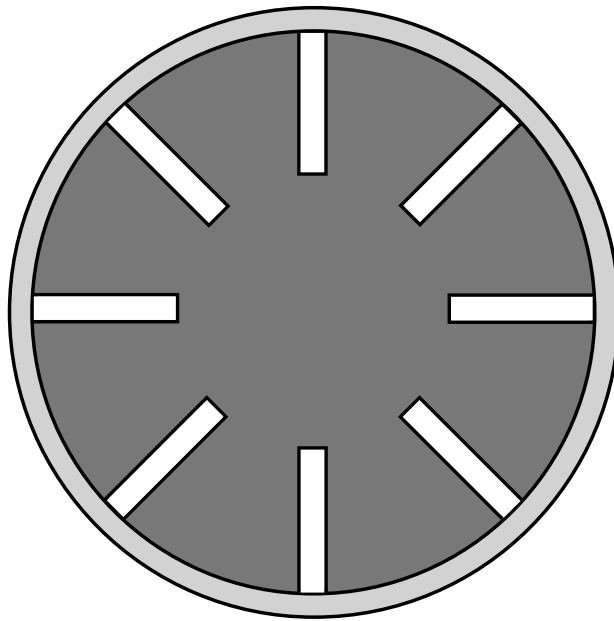
Omezení nebezpečných mechanických vibrací nastane když:

$$Q_r \neq 6pg \pm 1 \quad Q_r \neq 6pg \pm 2p \pm 1 \quad Q_r \neq 6pg \pm 2p \mp 1 \quad (2.6)$$

Ke snížení ztrát vířivými proudy na povrchu rotoru lze využít také radiálního drážkování povrchu rotoru, čímž dojde ke zkrácení cesty pro vířivé proudy [23]. Další možností, jak zlepšit elektromagnetické vlastnosti axiálně drážkovaného plného rotoru je využití měděných konců, které zkvalitní vodivou cestu pro proudy indukované do rotoru. Tím dojde ke zvýšení momentu a účinnosti [17][21].

Variantou je také potažení povrchu rotoru vrstvou buď z vysoce vodivého, nebo vysoce odporového materiálu viz. obrázek 2.5 Velkou výhodou je snížení mechanických ztrát, které jsou vlivem axiálního drážkování značné. Chladicí plocha se ale zmenší. Může také dojít ke snížení ztrát vířivými proudy na povrchu rotoru a celkovému zlepšení mechanické pevnosti rotoru. V případě vysoce vodivého materiálu (např. měď), dojde ke sloučení výhod axiálního drážkování s výhodami hladkého rotoru s měděnou vrstvou, který je popsán v kapitole 2.1.2. Nevýhodou je však snížení

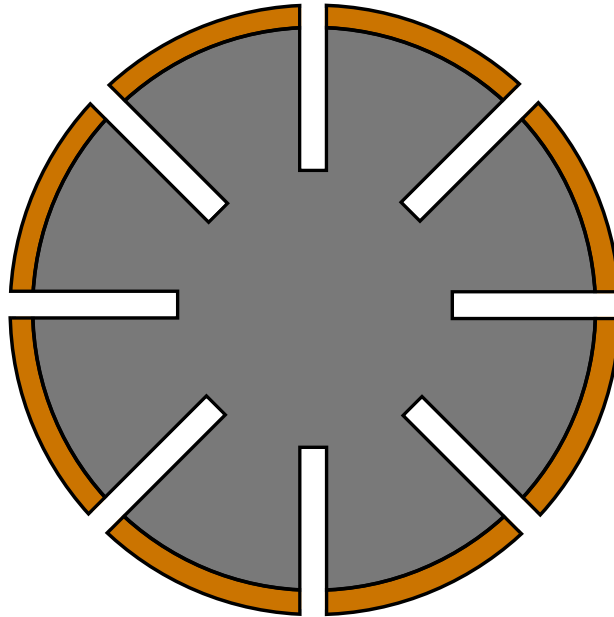
účinků axiálního drážkování. Tloušťka vrstvy musí být vhodně volena s ohledem na radiální délku vzduchové mezery a významné vyšší harmonické složky průběhu magnetické indukce ve vzduchové mezeře. Nevýhodou jsou vyšší náklady a také komplikovaná výroba, kdy je otázkou, zda takovéto provedení odolá značnému mechanickému namáhání, a to především v oblasti styku mědi a feromagnetického materiálu. Vysoce odporový materiál (např. nerezová ocel) se svaří s feromagnetickým materiálem rotoru, čímž se zlepší mechanická odolnost axiálně drážkovaného rotoru. Díky vysoké rezistivitě materiálu dojde také k potlačení vířivých proudů na povrchu rotoru. Analýza v publikaci [19] dokládá, že pro snížení ztrát vířivými proudy má být rezistivita materiálu vrstvy alespoň dvojnásobná oproti rezistivitě materiálu rotoru. Nejvyšší impedanci povrchu rotoru je možné dosáhnout vrstvou z materiálu o vysoké permeabilitě a nízké vodivosti [17][19][22]. K snížení čistě mechanických ztrát je možné využít nemagnetického materiálu jako je titan. Ten má však elektrickou vodivost podobnou jako materiál rotoru a může tak vytvářet další ztráty vířivými proudy. Hlavní nevýhodou je vysoká cena a komplikovaná výroba [17].



Obr. 2.5: Řez axiálně drážkovaným rotorem s vrstvou na povrchu [22].

Relativně novým vylepšením je potažení povrchu zubů rotoru měděnou vrstvou viz. obrázek 2.6. Měděná vrstva a měděné koncové kroužky představují v podstatě klec nakrátko, kam se indukují rotorové proudy, což umožňuje vznik vyššího elektromagnetického momentu. Navíc nedochází ke snížení výhodných vlastností axiálního drážkování jako u výše popsaného potažení celého axiálně drážkovaného rotoru a magnetický tok tak proniká hlouběji do rotoru. Tato koncepce je však stále ve fázi

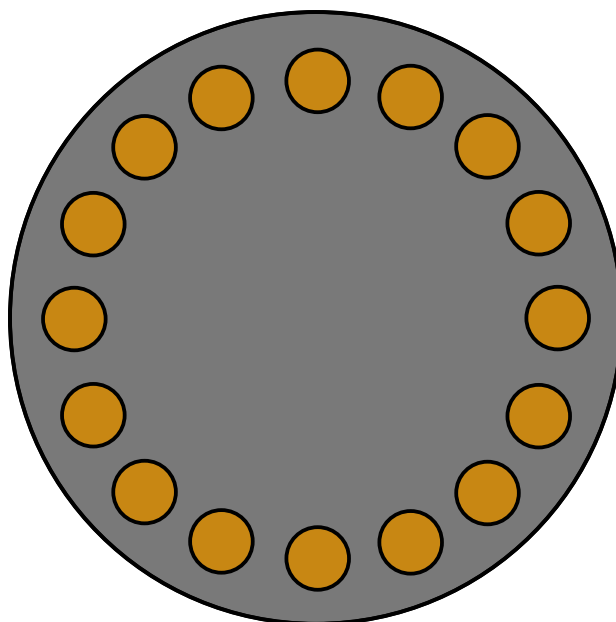
výzkumu. Nevýhodou je náročná výroba. Otázkou je také mechanická odolnost tohoto provedení především v oblasti spojení mědi s feromagnetickým materiálem rotoru [17][24][25].



Obr. 2.6: Řez axiálně drážkovaným rotorem s měděnou vrstvou na povrchu zubů [24].

2.1.4 Plný rotor s klecí nakrátko

Toto provedení dosahuje nejlepších elektromagnetických vlastností ze všech uvedených topologií. To znamená, že motor vybavený rotorem s klecovým vinutím disponuje menším skluzem, vyšším účínkem a vyšší účinností. Nevýhodou je však nižší mechanická odolnost, kdy kritickým místem jsou spoje tyčí se zkratovacími kruhy. Dalším problematickým místem je styk mědi s feromagnetickým materiálem, jelikož proud koncentrovaný v tyčích zvyšuje jejich teplotu a v důsledku rozdílných teplotních roztažností použitých materiálů dochází k dalšímu mechanickému namáhání [6][11][15]. Z tohoto důvodu se u vysokootáčkových strojů pro klecové vinutí využívá spíše slitin mědi s vyšší mezí kluzu [1]. Na základě výše popsaných nevýhod je tedy vhodné využít toto provedení rotoru spíše pro nižší otáčky.



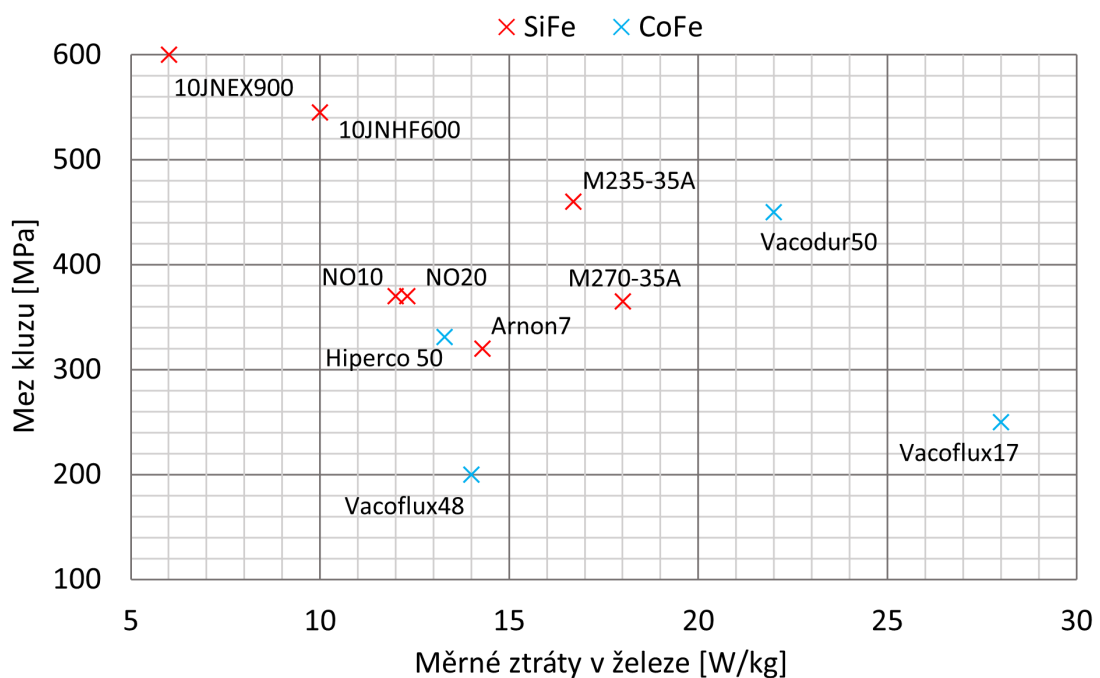
Obr. 2.7: Řez plným rotorem s klecí nakrátko [18].

2.2 Materiály pro vysokootáčkové asynchronní stroje

2.2.1 Elektrotechnické oceli

V případě statorových a rotorových plechů se pro jejich výrobu nejčastěji využívá různých slitin křemíku a železa (SiFe) a slitin kobaltu a železa (CoFe). Předností slitin CoFe je, že dosahují větších výkonových hustot, což je dáno vysokou saturací magnetické indukce, která je závislá na době a teplotě žíhání. I když jsou plechy ze slitin CoFe žíhány s ohledem na optimální mechanické vlastnosti, je saturace magnetické indukce asi o 20 % vyšší než u slitin SiFe. Plechy, které jsou vyrobeny ze slitin SiFe jsou však výrazně levnější, což je nakonec činí více využívanými [1][26]. Materiály CoFe jsou oblíbené především v leteckých a vesmírných aplikacích [27]. Při výběru statorových plechů pro vysokootáčkové stroje jsou kromě ceny rozhodujícím faktorem zejména generované ztráty v železe, které jsou v důsledku vysokých pracovních frekvencí ve vysokootáčkových strojích značné. Z hlediska plechů je velikost těchto ztrát závislá především na jejich tloušťce a použité metodě žíhání. V současné době je možné využívat plechů speciálně vyvinutých pro vysokofrekvenční aplikace, které jsou tenké až 0,1 mm. To má pozitivní vliv na snížení ztrát vířivými proudy [1][28][29]. Na obrázku 2.8 je zobrazeno srovnání některých materiálů z hlediska meze kluzu a měrných ztrát v železe.

Dalším podstatným faktorem, který je zapotřebí vzít v úvahu při výběru materiálu zejména pro rotorové plechy je mechanická pevnost, která je reprezentována mezí kluzu. Typickými představiteli slitin SiFe jsou plechy tenké 0,35 mm M270-35A a M235-35A, které běžně dosahují meze kluzu 350 a 450 MPa. Pro vysokootáčkové aplikace jsou však výhodnější tenčí plechy např. NO20 (0,2 mm) a Arnon7 (0,17 mm), které disponují nižší mezí kluzu 300-380 MPa. Jak již bylo výše uvedeno, pro redukci ztrát vířivými proudy jsou výhodné plechy, které jsou tenké až 0,1 mm. Jako příklad lze uvést JNEX10-Core s obsahem 6,5 % křemíku, který zlepšuje magnetické vlastnosti. Takovýto obsah křemíku sice zvyšuje mez kluzu, ale zároveň je materiál křehký [1][29][30].



Obr. 2.8: Srovnání vybraných materiálů pro plechy z hlediska meze kluzu a měrných ztrát v železe (při 1 T a 400 Hz) [1].

Typická slitina CoFe využívaná pro elektrické stroje je složena z 48-50 % kobaltu, cca 48 % železa a 2 % vanadu. Díky vysoké hustotě výkonu je možné snižovat velikost a hmotnost strojů [29]. Například plechy Vacoflux48 o tloušťce 0,35 mm mají výrazně nižší ztráty než materiál M235-35A. Mez kluzu je však pouze 200 MPa, což tento materiál činí nepoužitelným pro rotorové plechy. Cenou za zvyšování meze kluzu slitin CoFe je degradace jejich elektromagnetických vlastností [1]. Zajímavostí také je, že například plechy Vacoflux50 s tloušťkou 0,2 mm jsou oproti plechům M270-35A přibližně desetinásobně dražší [31].

2.2.2 Oceli pro plné rotory

Kvůli vysokým obvodovým rychlostem ve vysokootáčkových strojích je kladen důraz na mechanickou pevnost rotoru. Proto se místo rotoru z plechů využívá rotor, který je zhotoven z jednoho kusu feromagnetického materiálu. S tím souvisí také požadavek na dobrou tepelnou odolnost. Je však také zapotřebí, aby měl rotor dobré elektromagnetické vlastnosti, čímž je myšlena vhodná rezistivita materiálu, nízká hystereze a vysoká hodnota saturace magnetické indukce [6]. V publikaci [32] je ukázáno, že vodivost rotorového materiálu má významný vliv na velikost ztrát vířivými proudy na povrchu rotoru. Je tedy žádoucí, aby pro redukci těchto ztrát byla vodivost rotorového materiálu co nejmenší. Konkrétní požadavky na materiál jsou však vždy dány topologií daného rotoru. Běžně dostupnými materiály, které se využívají pro plné rotory jsou 41CrAlMo7, 41CrMo4 a S355J. V případě potřeby lze využít i oceli Marage a AerMet, které byly speciálně vyvinuty pro vojenské letadlové aplikace [6].

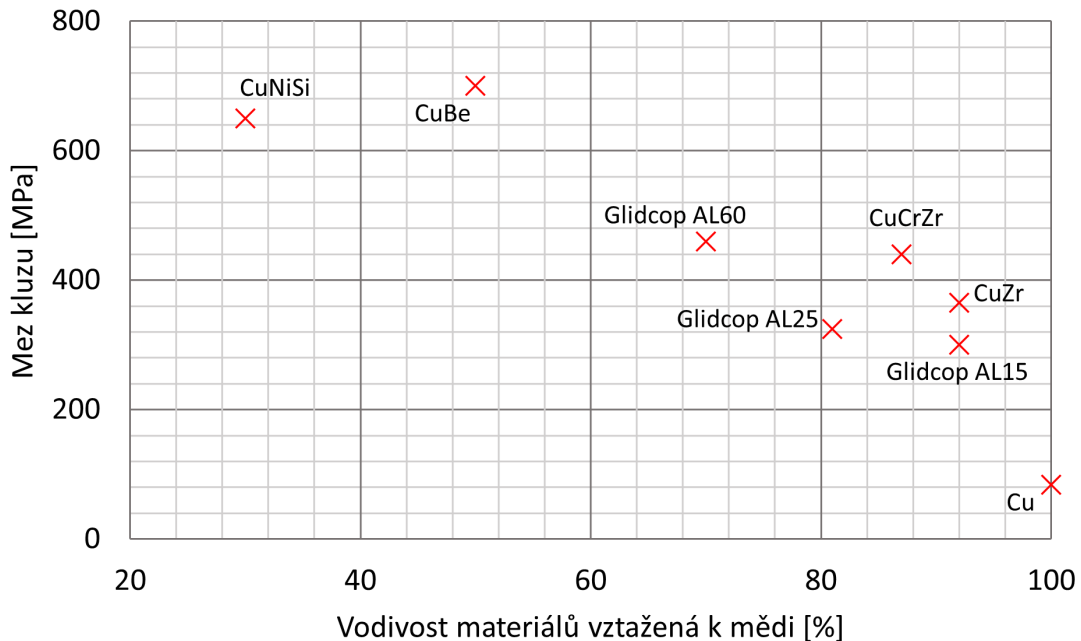
Tab. 2.2: Srovnání parametrů vybraných materiálů pro plné rotory [33].

Název	Materiál	Pevnost materiálu v tahu	Rezistivita při 20 °C (200 °C)	Saturace magnetické indukce
		[MPa]	[$\mu\Omega \cdot \text{cm}$]	[T]
Imacro M	4CrMn16-4	1100	25 (37,3)	1,63-1,95
AISI430	X6Cr17	600	25,7 (38)	1,66-1,74
Maraging	FeNiCoMoTi	2200	49	1,9
C15		440	15,9 (30)	1,9
Supermendur	Fe-V-Co	800	40	2,4
S355		520	25,7 (38)	1,9-2,1
FeNi		545	48,2	1,5
FeCu		-	11	1,6
Arnkorome III	Fe-Cr-Co	-	69	-
Vicalloy	Fe-Co-V	880	61,5	1,3
HyMu 80	Ni-Fe-Mo	930	58	-
Consument		345	13	2,15
Vim Var	CSiMnCrMoV	345	13	2,15
MuShield		620	58	1,9
Orvar	Cr-Mo-V	1820	52 (63)	1,9
X20Cr13		880	55 (66)	1,7-1,9
MoCN315M	34CrNiMo6	345	19 (33)	1,97-1,99

2.2.3 Slitiny mědi pro rotorové tyče

Důvodem, proč se pro klecové vinutí u vysokootáčkových asynchronních strojů nevyužívá čistá měď, je její nízká mez kluzu a její měknutí v případě vysokých teplot. Rotorové tyče přispívají ke zvýšení kritických otáček stroje, jelikož zvyšují tuhost rotoru. Využívá se tedy různých slitin mědi, které se vyznačují dobrou vodivostí a zároveň vysokou mezí kluzu [1][6].

Příkladem využívaných slitin mědi může být měď-zirkonium (CuZr), měď beryllium (CuBe) nebo měď-oxid hlinitý (CuAl₂O₃). Nevýhodou beryllia je jeho toxicita a nízká vodivost v porovnání s mědí. V současnosti jsou pro rotorové tyče vysokootáčkových asynchronních strojů využívány materiály z řady Glidcop, která se vyrábí technikou vnitřní oxidace [1][6]. Obrázek 2.9 porovnává parametry (mez kluzu a vodivost materiálu vztažená na vodivost mědi) vybraných materiálů využívaných pro rotorové tyče.



Obr. 2.9: Srovnání vybraných materiálů pro rotorové tyče z hlediska meze kluzu a vodivosti vztažené k mědi [1].

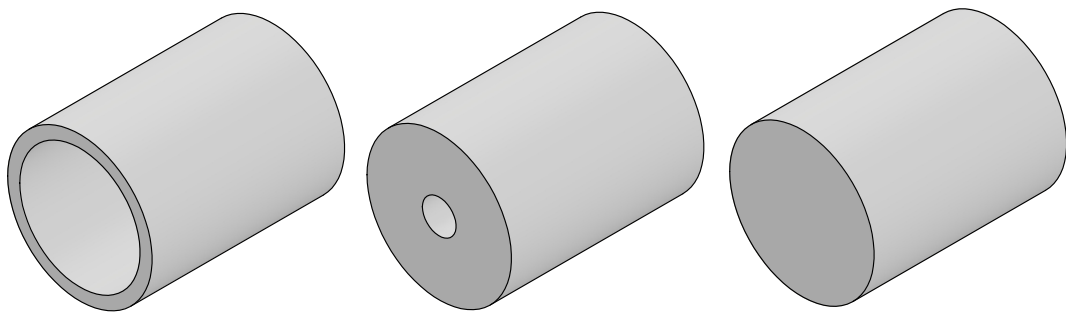
2.3 Mechanické namáhání

U vysokootáčkových strojů vznikají mechanická namáhání, která ovlivňují nejen volbu provedení rotoru včetně jeho rozměrů, ale také materiál, který bude využit

pro jeho výrobu. Mezi mechanická namáhání se řadí odstředivé síly a tzv. kritické otáčky.

2.3.1 Odstředivé síly

Otáčení rotoru kolem své osy způsobuje vznik odstředivých sil, které jsou v případě vysokootáčkových strojů značné. Tyto síly se pokoušejí doslova vytrhnout všechny části rotoru. Je tedy zapotřebí zvolit takovou konstrukci rotoru, aby v žádném místě nemohlo dojít k překročení dovolené meze kluzu rotorového materiálu, a tedy k jeho nevratné deformaci [34].



Obr. 2.10: Základní tělesa: tenkostěnný válec, válec s malou dírou, plný válec [9].

Odstředivé síly limitují především průměr rotoru, kdy platí, že se zvětšujícím se průměrem narůstá také velikost odstředivých sil [22]. V publikaci [9] se uvádí vztah pro maximální mechanické napětí, které je způsobeno právě vlivem odstředivých sil. Ze vztahu je patrné, že toto mechanické napětí je kromě otáček závislé také na čtverci poloměru rotoru. Tento vztah je možné využít pouze v případě plného rotoru:

$$\sigma_{\max} = C' \cdot \rho \cdot r_r^2 \cdot \omega^2 \quad (2.7)$$

kde ρ je hustota materiálu rotoru, r_r je poloměr rotoru, ω je úhlová rychlost rotoru. Z publikace [9] pro C' platí:

$$\text{Hladký homogenní válec : } C' = \frac{3 + \nu}{8} \quad (2.8)$$

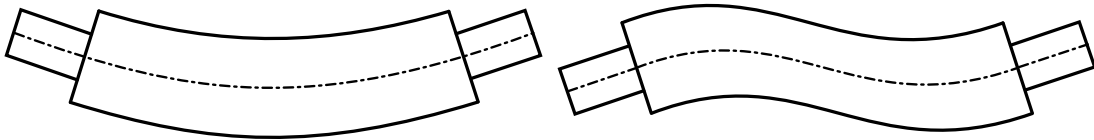
$$\text{Válec s malým otvorem : } C' = \frac{3 + \nu}{4} \quad (2.9)$$

$$\text{Tenkostěnný válec : } C' \approx 1 \quad (2.10)$$

kde ν je Poissonův poměr materiálu rotoru. U plného válce dochází k maximálnímu namáhání v jeho středu. V případě válce s otvorem se maximální napětí nachází na jeho vnitřním poloměru [11][22].

2.3.2 Kritické otáčky

V případě, že se vlastní frekvence rotoru a frekvence otáčení rotoru shodují jedná se o tzv. kritické otáčky. Pokud je stroj provozován v blízkosti kritických otáček dochází k nebezpečným vibracím, které způsobují nejen přetěžování ložisek, ale v krajním případě může dojít i k poškození samotného stroje [22][34]. Při prvních kritických otáčkách dochází k ohybu rotoru ve dvou bodech, kdežto při druhých kritických otáčkách se rotor ohýbá ve třech bodech do tvaru písmene S [9]. Na obrázku 2.11 jsou znázorněny ohybové tvary rotoru při prvních a druhých kritických otáčkách.



Obr. 2.11: Ohybové tvary rotoru pro první a druhé kritické otáčky [9].

Velikost kritických otáček je ovlivněna průměrem rotoru, mechanickými vlastnostmi použitého materiálu a také tuhostí ložisek [18]. Kritické otáčky nejvíce limitují především délku rotoru. Čím delší je rotor, tím jsou kritické otáčky nižší [22]. V publikaci [9] je uveden vztah, kterým lze určit bezpečnou délku rotoru l_{\max} zajišťující provoz stroje pod prvními kritickými otáčkami:

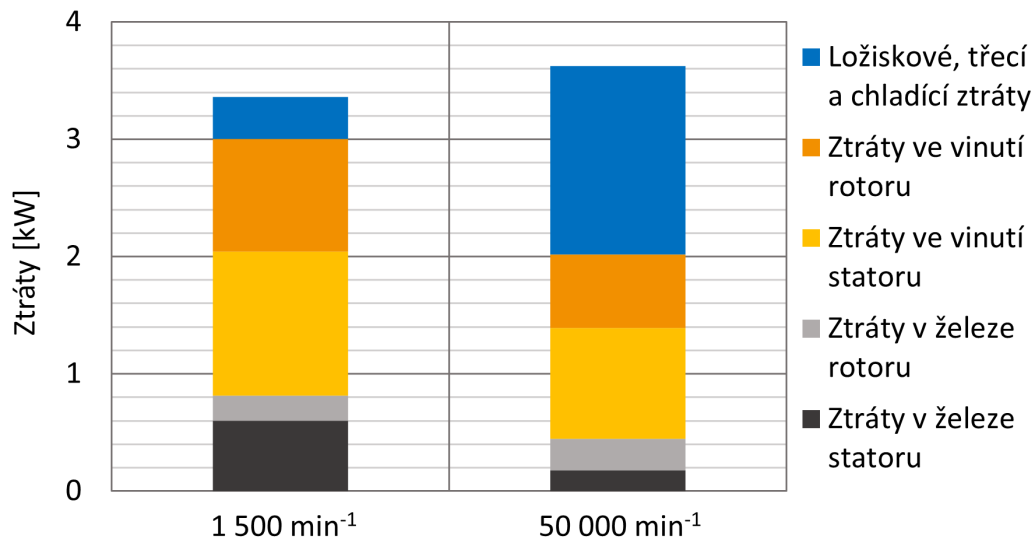
$$l_{\max}^2 = n_k^2 \cdot \frac{\pi^2}{k \cdot \omega} \cdot \sqrt{\frac{E \cdot I}{\rho \cdot S}} \quad (2.11)$$

kde n_k je řád kritických otáček, k je bezpečnostní koeficient, ω je úhlová rychlost rotoru, E je modul pružnosti materiálu rotoru, I je moment setrvačnosti válce, ρ je hustota rotorového materiálu a S je průřez válce.

2.4 Ztráty vysokootáčkových asynchronních strojů

Vysokootáčkové stroje se vyznačují vysokou pracovní frekvencí, která je příčinou značných ztrát. Kromě vysoké pracovní frekvence se však na velikosti ztrát významně podílí také vysoká rychlost otáčení rotoru [2]. U vysokootáčkových asynchronních strojů lze ztráty rozdělit na tyto významné složky: ztráty vířivými proudy na povrchu rotoru, mechanické ztráty, ztráty v železe statoru a ztráty ve vinutí. V publikaci [34]

je uvedeno srovnání ztrát standartního asynchronního stroje a vysokootáčkového asynchronního stroje s měděnou vrstvou na povrchu plného rotoru viz. obrázek 2.12.



Obr. 2.12: Ztráty standartního asynchronního stroje a vysokootáčkového asynchronního stroje s plným rotorem s Cu vrstvou 37 kW [34].

2.4.1 Ztráty ve vinutí

V důsledku vysoké pracovní frekvence vysokootáčkových strojů se ve vinutí oproti standartním strojům výrazněji projevuje skin efekt a proximity efekt. Jelikož je cílem získat co největší účinnost stroje, musí být tyto dva efekty zvyšující ztráty ve vinutí maximálně potlačeny [2].

V případě skin efektu platí, že pokud je průřez vodiče menší než hloubka vniku při dané pracovní frekvenci, je vliv skin efektu zanedbatelný. Z toho důvodu bývá vodič složen z několika vláken [35]. V publikaci [2] je definován vztah pro hloubku vniku:

$$\delta_v = \sqrt{\frac{\rho_v}{\pi \cdot f \cdot \mu}} \quad (2.12)$$

kde ρ_v je rezistivita vodiče, f je frekvence a μ je permeabilita vodiče.

Pro lepší ohebnost je pak vodič rozdělen do několika svazků s menším počtem vláken. Pro potlačení proximity efektu se v praxi využívá tzv. transpozice, a to jak u svazků, tak i u samotných vláken. Vliv proximity efektu je pak závislý na úrovni transpozice svazků a pramenů, kdy v případě plné transpozice svazků i jednotlivých pramenů jsou významně zredukovány svazkové vířivé proudy způsobující ztráty ve

vinutí [36]. Řešením je také volba tzv. Litz vodiče, který je určen speciálně pro vysokofrekvenční aplikace. Tento vodič je zkonstruován z mnoha transponovaných pramenů malého průřezu, které jsou rozděleny do několika transponovaných svazků. Počet jednotlivých pramenů a svazků je větší než u klasického transponovaného vodiče. Překážkou v jeho využití může být vysoká cena. Další nevýhodou je pak nízký činitel plnění drážky a vysoký tepelný odpor [2].

Je obecně známo, že Joulovy ztráty ve vinutí jsou úměrné odporu vinutí a čtverci procházejícího proudu. Pro snížení ztrát ve satorovém vinutí se tedy nabízí snížení odporu vinutí případně snížení odebíraného satorového proudu. Odpor vinutí je závislý na použitém materiálu, počtu závitů, délce jednoho závitu, průměru vodiče a teplotě vinutí [37]. Snížení odporu by se dosáhlo snížením počtu závitů, což zvýší sycení magnetického obvodu a dochází k nárůstu ztrát v železe. Díky nárůstu magnetizačního proudu pak tento proces může být kontraproduktivní a může ztráty ve vinutí naopak zvýšit. Zvýšení počtu závitů tedy snižuje odebíraný satorový proud. Další možností, jak snížit odpor vinutí, je zvětšení průměru vodiče. Zde je však zapotřebí vycházet z požadavku na maximální přípustný činitel plnění drážky [38]. Z parametrické analýzy provedené v publikaci [39] vyplývá, že pozitivní vliv na Joulovy ztráty ve vinutí satoru má zmenšování radiální délky vzduchové mezery, průměru rotoru a délky rotoru. Ve všech případech se snižuje velikost odebíraného proudu.

2.4.2 Ztráty v železe

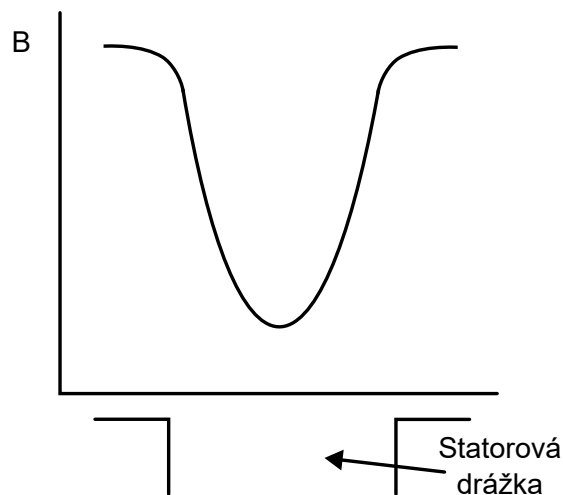
Ztráty v železe lze rozdělit na hysterezní, vířivými proudy a přídatné. Ztráty hysterezní jsou způsobeny přemagnetováváním feromagnetického materiálu. Naopak indukované napětí do feromagnetických částí stroje je příčinou ztrát vířivými proudy. Obecně pro tyto ztráty platí, že jsou závislé na frekvenci magnetického pole a sycení feromagnetického materiálu [37][40].

V důsledku vysoké pracovní frekvence u vysokootáčkových strojů mohou být ztráty v železe značné a je zapotřebí se věnovat jejich snížení. Ztráty vířivými proudy se dají efektivně snížit použitím tenčích plechů pro magnetický obvod. Dalším způsobem, jak snížit ztráty v železe je použití feromagnetického materiálu s nižšími měrnými ztrátami. U vysokootáčkových strojů se jedná například o tzv. amorfní oceli. Takový materiál má však nevýhodu ve zhoršení magnetických vlastností, kdy je koleno B-H charakteristiky položeno níže. Tím dojde k nárůstu magnetizačního proudu [28][38][41]. Možností, jak snížit měrné ztráty u plechů je využít žihání [38]. Snížit ztráty v železe lze také snížením sycení feromagnetického materiálu, což však vyžaduje zvětšení celkových rozměrů stroje [11].

2.4.3 Ztráty vířivými proudy na povrchu rotoru

U plných rotorů dochází ke vzniku značných ztrát způsobených vířivými proudy na povrchu rotoru. Důvodem je nesinusový průběh magnetické indukce ve vzduchové mezeře, který obsahuje vyšší harmonické složky. Tyto vyšší harmonické složky jsou především způsobeny rozložením vinutí do drážek statoru a samotným drážkováním statoru a rotoru. Jelikož vyšší harmonické složky od těchto dvou různých zdrojů mají stejný řád a frekvenci, bude nakonec docházet k jejich vzájemné superpozici. Pak hovoříme o tzv. drážkových harmonických [12][42].

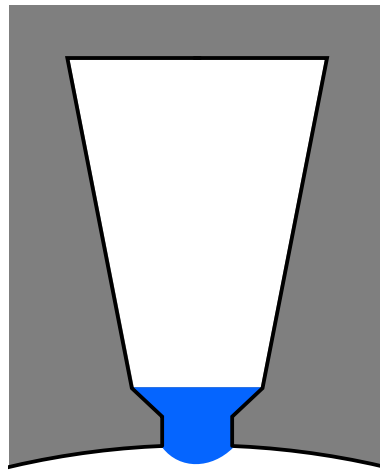
V důsledku rozložení vinutí do statorových drážek získá průběh magnetické indukce ve vzduchové mezeře schodovitý tvar [12]. Například pro 5. a 11. harmonickou složku platí, že rotuje proti základní harmonické, kdežto 7. a 13. složka rotuje ve směru základní harmonické. V případě drážkování statoru a rotoru v podstatě dochází v oblasti drážky k lokálnímu zvětšení vzduchové mezery, což se v tomto místě projeví poklesem velikosti magnetické indukce. Míra poklesu je pak závislá na velikosti otevření drážky [43].



Obr. 2.13: Pokles magnetické indukce vlivem drážkování statoru [12].

U strojů, které mají rotor složený z plechů, tvoří ztráty vířivými proudy na povrchu rotoru asi 2 až 5 % celkových ztrát. Naopak u vysokootáčkových strojů s plným rotorem jsou ztráty vířivými proudy na povrchu rotoru zastoupeny asi z 10 %. V případě, že návrh daného vysokootáčkového stroje není kvalitní, mohou ztráty vířivými proudy tvořit až 50 % celkových ztrát [12]. Je tedy zapotřebí se dostatečně věnovat potlačení vyšších harmonických složek průběhu magnetické indukce ve vzduchové mezeře za účelem efektivního snížení povrchových ztrát rotoru.

Základní variantou, jak efektivně snížit povrchové ztráty rotoru, je zvětšení radiální délky vzduchové mezery. Výsledkem je potlačení vyšších harmonických složek průběhu magnetické indukce ve vzduchové mezeře, které jsou generovány v důsledku drážkování statoru a rotoru. To je také důvod, proč se u vysokootáčkových strojů volí větší vzduchová mezera ve srovnání se standartními stroji. Dochází však k nárůstu magnetického odporu vzduchové mezery, což se projeví nárůstem magnetizačního proudu. Následkem je nárůst ztrát ve vinutí statoru a snížení účinníku. Je tedy zapotřebí volit radiální délku vzduchové mezery rozumně [12][42][44]. Využít lze také zúžení otevření statorových drážek, což je však omezeno požadavky statorového vinutí. Navíc dochází k nárůstu rozptylového toku, čímž se sníží generovaný moment [12]. Další možností, jak potlačit vyšší harmonické složky způsobené drážkováním statoru, je použití magnetických klínů. Ty mají nízkou relativní permeabilitu (typicky 2 – 5), která je však vyšší než u vzduchu. Obecně platí, že čím vyšší je relativní permeabilita magnetického klínu, tím lépe vede magnetický tok. Pokles magnetické indukce v oblasti otevření drážky bude tedy menší. Pro ještě kvalitnější výsledky je žádoucí, aby magnetický klín zasahoval až do vzduchové mezery způsobem naznačeným na obrázku 2.14. Dochází však ke zvětšení rozptylového toku, čímž se sníží generovaný moment. Nevýhodou je také složitější výroba a v některých případech stálost materiálových vlastností [12][45].



Obr. 2.14: Vhodný tvar magnetického klínu pro potlačení vlivu drážkování statoru na povrchové ztráty rotoru [12].

Velikost povrchových ztrát rotoru lze také ovlivnit počtem drážek statoru a rotoru. Obecně platí, že s větším počtem statorových drážek, ve kterých je uloženo vinutí, má průběh magnetické indukce ve vzduchové mezeře sinusovější tvar [46].

Počet drážek je limitován konstrukčními požadavky. Především je zapotřebí zvolit vhodnou kombinaci počtu drážek statoru a rotoru, aby nedocházelo ke vzniku drážkových harmonických, které způsobují nebezpečné asynchronní, synchronní a vibrační momenty viz. doporučení v kapitole 2.1.3 [9].

U axiálně drážkovaného plného rotoru je výhodné využít také radiálních drážek v aktivní části rotoru. Tím se zvětší impedance povrchu rotoru a dojde ke snížení ztát vířivými proudy. Impedance povrchu rotoru je pak závislá na vzdálenosti jednotlivých radiálních drážek. Hloubka drážek by měla být větší, než je hloubka vniku vyšších harmonických složek. Šířka drážky by měla být volena rozumně s ohledem na aktivní délku rotoru a zvolenou vzdálenost mezi drážkami. Implementací správně navržených radiálních drážek by měla být vodivost povrchu rotoru o 80 % menší, než je vodivost zbytku rotoru [17][23][46].

2.4.4 Mechanické ztráty

U vysokootáčkových strojů dochází v důsledku vysokých obvodových rychlostí ke vzniku značných mechanických ztrát. Ty jsou způsobeny především třením rotoru o okolní médium [2][47]. Významnost mechanických ztrát u vysokootáčkových strojů dokládá také srovnání na obrázku 2.12. Zde můžeme vidět, že v případě vysokootáčkového stroje dominují právě mechanické ztráty. Obecně se u elektrických strojů mezi mechanické ztráty řadí ventilační a třecí ztráty.

Kromě sníženého množství výkonu, kterého lze z elektrického stroje v důsledku tření rotoru o vzduch získat, dochází také ke zvýšení oteplení daného stroje. Problematiké jsou také různé konstrukční úpravy rotoru, kdy například u drážkovaného rotoru je sice plocha, ze které se odvádí teplo do okolí větší, ale zároveň okolní médium klade takovému rotoru větší odpor. V konečném důsledku jsou tedy mechanické ztráty a také oteplení vyšší [11][47]. Pro výpočet třecích ztrát lze využít vztahů z literatury [9]. Ztráty způsobené třením rotoru o okolní médium lze určit na základě vztahu:

$$P_{t1} = \frac{1}{32} \cdot k_1 \cdot C_{M,r} \cdot \pi \cdot \rho_t \cdot \omega^3 \cdot D_r^4 \cdot l_{rot} \quad (2.13)$$

kde k_1 je koeficient drsnosti povrchu (typicky roven 1-4, pro axiálně drážkovaný plný rotor se obvykle volí hodnota 2,5), $C_{M,r}$ je koeficient tření (případně momentový koeficient), D_r je průměr rotoru, l_{rot} je délka rotoru, ρ_t je hustota tekutiny ve vzduchové mezeře. Koeficient tření závisí na Reynoldsově číslu pro vzduchovou mezeru:

$$Re_\delta = \frac{\rho_t \cdot \omega \cdot D_r \cdot \delta}{2 \cdot \mu_k} \quad (2.14)$$

kde D_r je průměr rotoru, δ je radiální délka vzduchové mezery a μ_k je dynamická viskozita tekutiny.

Koeficient tření pro různé hodnoty Reynoldsova čísla lze určit pomocí vztahů:

$$C_{M,r} = 10 \cdot \frac{(2\delta/D_r)^{0,3}}{Re_\delta} \quad Re_\delta < 64 \quad (2.15)$$

$$C_{M,r} = 2 \cdot \frac{(2\delta/D_r)^{0,3}}{Re_\delta^{0,6}} \quad 64 < Re_\delta < 500 \quad (2.16)$$

$$C_{M,r} = 1,03 \cdot \frac{(2\delta/D_r)^{0,3}}{Re_\delta^{0,5}} \quad 500 < Re_\delta < 10^4 \quad (2.17)$$

$$C_{M,r} = 0,065 \cdot \frac{(2\delta/D_r)^{0,3}}{Re_\delta^{0,2}} \quad 10^4 < Re_\delta \quad (2.18)$$

Třecí ztráty koncových kruhů rotoru lze určit na základě vztahu:

$$P_{t2} = \frac{1}{64} \cdot C_{M,k} \cdot \rho_t \cdot \omega^3 \cdot (D_r^5 - D_{ri}^5) \quad (2.19)$$

kde $C_{M,k}$ je koeficient tření kruhů rotoru a D_{ri} je průměr hřídele. Koeficient tření koncových kruhů rotoru také závisí na Reynoldsově čísle, které lze určit z rovnice:

$$Re_k = \frac{\rho_t \cdot \omega \cdot D_r^2}{4 \cdot \mu_k} \quad (2.20)$$

Koeficient tření lze pro různé hodnoty Reynoldsova čísla stanovit pomocí těchto vztahů:

$$C_{M,k} = \frac{3,87}{Re_k^{0,5}} \quad Re_k < 3 \cdot 10^5 \quad (2.21)$$

$$C_{M,k} = \frac{0,146}{Re_k^{0,2}} \quad Re_k > 3 \cdot 10^5 \quad (2.22)$$

Snížení třecích ztrát vysokootáčkových strojů je možné snížením koeficientu drsnosti povrchu. Například u axiálně drážkovaného rotoru je možné využít potažení vrstvou vysoce vodivého, vysoce odporového nebo nemagnetického materiálu viz kapitola 2.1.3.

3 Optimalizační algoritmy

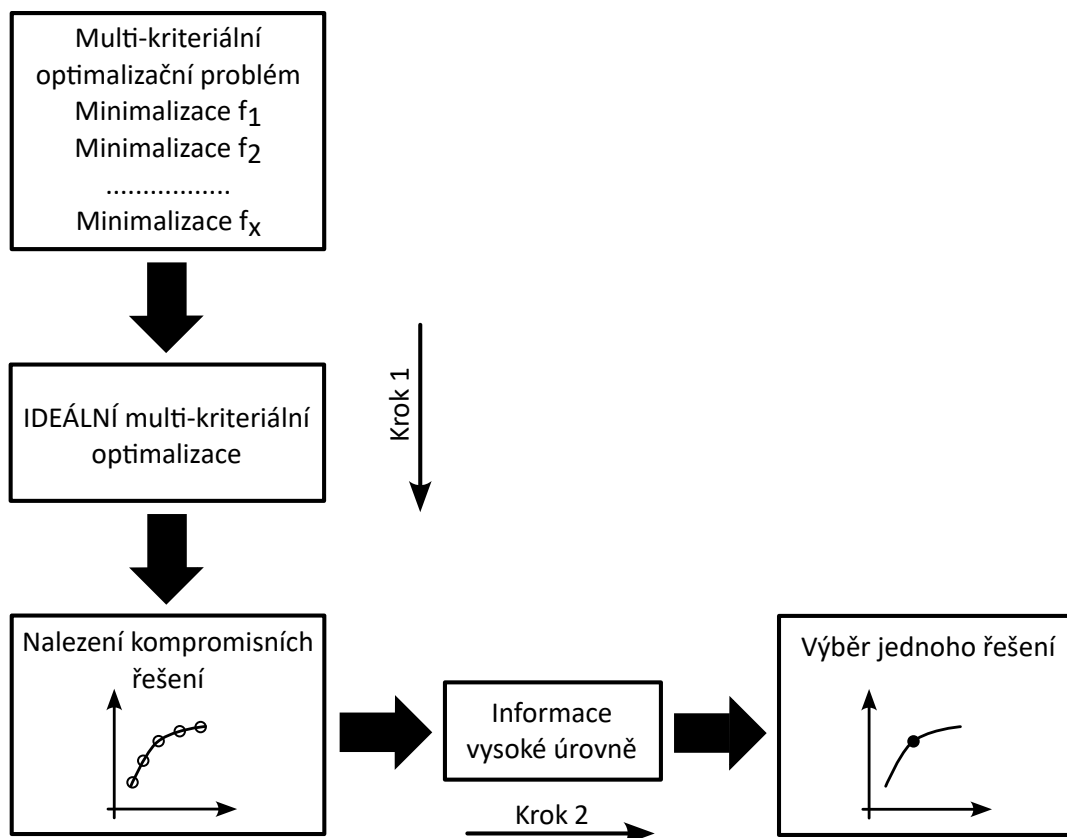
Tato kapitola je zaměřena na optimalizační algoritmy používané k optimalizaci návrhu elektrických strojů. Jsou zde představeny některé stochastické, deterministické a kombinované algoritmy.

V poslední době dochází k velkému vývoji výkonných výpočetních komponent, jejichž cena se navíc stále snižuje. Lze tedy říct, že poměr cena výkon je pro uživatele stále příznivější [48]. Díky těmto skutečnostem je využití optimalizačních algoritmů stále populárnější. Dle [49] je optimalizační algoritmus definován jako programovatelný proces nebo funkce, která přijímá vstupní parametr nebo hodnotu. Parametr nebo hodnota následně změní vlastnosti zařízení nebo funkce, aby našel maximální nebo minimální hodnotu výstupu. V případě, že je optimalizační problém hodnocen pouze na základě jednoho kritéria jedná se o tzv. jedno-kriteriální optimalizaci. Většina optimalizačních problémů je však složitější. Proto se využívá převážně tzv. multi-kriteriální optimalizace. Jako jednoduchý příklad lze uvést optimalizaci rozměrů elektrického motoru s cílem maximalizovat elektromagnetickou účinnost a moment. Změna některého rozměru stroje může jeden z elektromagnetických parametrů zlepšit, často se však jiný zhorší. Výhoda optimalizace pak spočívá v propočítání velkého množství modelů s různými rozměry. Cílem je pak najít takový návrh motoru, který bude splňovat požadavky definované uživatelem.

3.1 Ideální postup multi-kriteriální optimalizace

Tento obecný způsob řešení multi-kriteriální optimalizace je rozdělen do dvou kroků. Celý proces je znázorněn na obrázku 3.1. Výstupem prvního kroku je nalezení vícero kompromisních řešení, která jsou rozložena po křivce optimálních řešení. Jedná se o tzv. Pareto-optimální skupinu řešení. Druhým krokem je využití informací vyšší úrovně, kdy si uživatel vybírá z předem odhadovaných nejlepších kompromisních řešení. Výsledkem je výběr vhodného řešení o vyvážených kritériích [50].

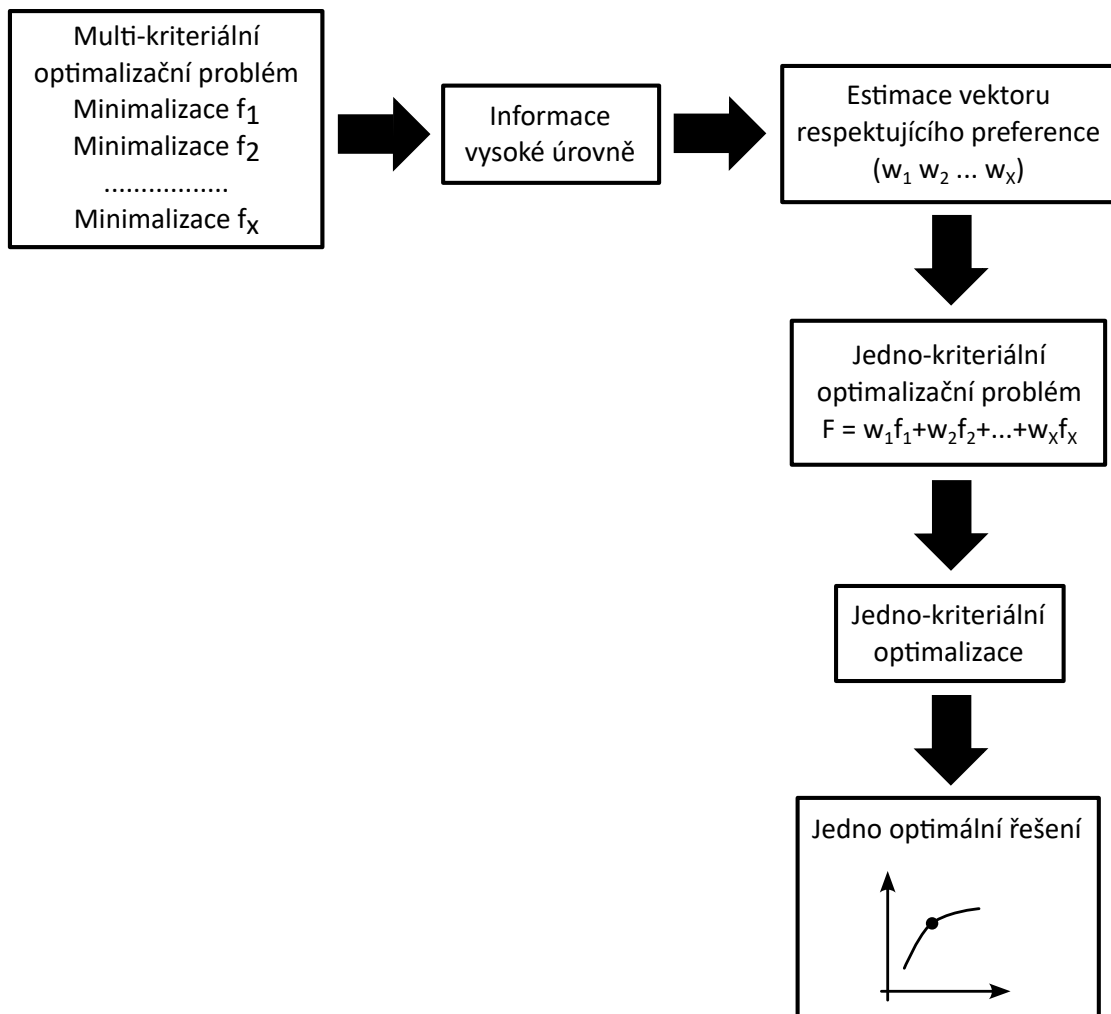
Při řešení multi-kriteriální optimalizace se velmi často používají funkce, které mají za cíl najít více Pareto-optimálních řešení. V kapitole 3.3.5 jsou popsány dvě funkce, které jsou využity při tvorbě optimalizačního algoritmu NSGA-II v této práci. Jedná se o: non-dominant sorting a crowding distance.



Obr. 3.1: Proces multi-kriteriální optimalizace využívající ideální postup [50].

3.2 Postup multi-kriteriální optimalizace založené na preferencích

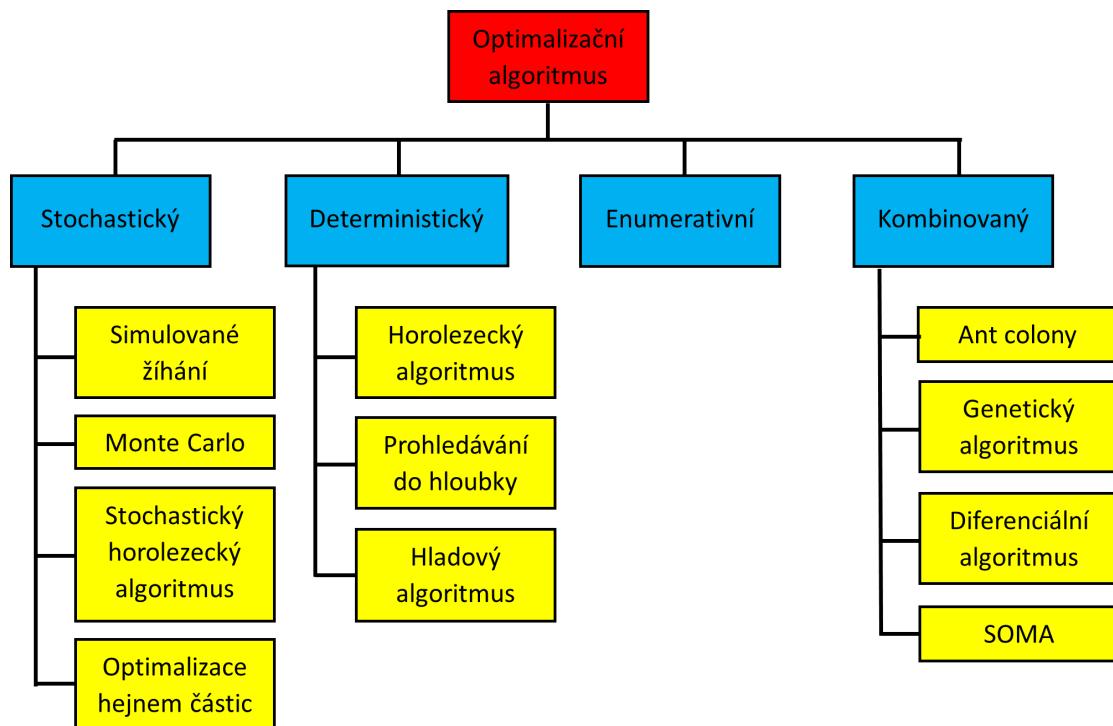
Alternativou je využití multi-kriteriální optimalizace založené na preferencích. Je zapotřebí definovat vektor, který se skládá z váhových koeficientů respektujících uživatelské preference jednotlivých cílů optimalizace. Nevýhodou oproti ideálnímu postupu je skutečnost, že informace vysoké úrovně je třeba do celého postupu zahrnout ještě před samotnou optimalizací. Informacemi vysoké úrovně je myšlen soubor informací, které není možné vyjádřit pomocí cílů optimalizace. Jako příklad lze uvést konstrukční problémy nebo proveditelnost výroby. Obtížnou úlohou je také vhodná volba váhových koeficientů [50][51]. Narozdíl od ideálního postupu je multi-kriteriální optimalizace založená na preferencích více subjektivní a méně praktická [50]. Postup této optimalizační metody je znázorněn na obrázku 3.2.



Obr. 3.2: Proces multi-kriteriální optimalizace založené na preferencích [50].

3.3 Rozdělení optimalizačních algoritmů

Existuje velké množství různých algoritmů, které je možné pro optimalizaci použít. Liší se od sebe způsobem hledání globálního optimálního řešení. Při výběru optimalizačního algoritmu je důležité udržet rovnováhu mezi složitostí algoritmu a účinností hledání nejlepšího řešení. Na obrázku 3.3 je znázorněno základní rozdělení optimalizačních algoritmů. Nejobecněji lze tyto algoritmy rozdělit na stochastické, deterministické, enumerativní a kombinované. Následující text je zaměřen na podrobnější popis jednotlivých skupin optimalizačních algoritmů. Podkapitoly jsou pak věnovány typickým představitelům jednotlivých skupin.



Obr. 3.3: Rozdělení optimalizačních algoritmů, čerpáno z [51].

Stochastické algoritmy pro hledání globálního optima využívají nahodilost. Motivací je snaha zvětšit pravděpodobnost nalezení globálního optima případně lepšího lokálního optima. Tento algoritmus bývá nazýván jako robustní, jelikož oproti deterministickým algoritmům má vyšší odolnost proti uvíznutí v lokálním optimu [52]. Stochastické algoritmy však bývají pomalé, a proto jsou vhodné jen pro prohledávání menších prostorů možných řešení [53]. Optimalizace hejnem částic a simulované žíhání jsou typickými představiteli stochastického algoritmu a jsou blíže popsány v podkapitolách 3.3.1 a 3.3.2.

Deterministické algoritmy jsou založeny na přesných matematických funkcích a výrazech [51]. Často využívají gradientní metody, jejichž výhodou je rychlá konvergence k nejlepšímu řešení v jistém okolí řešení. Velká nevýhoda spočívá v tendenci deterministického algoritmu uvíznout v lokálních optimech [51][53]. V podkapitole 3.3.3 je představen typický zástupce deterministického algoritmu tzv. horolezecký algoritmus.

Enumerativní algoritmy jsou založené na výpočtech všech možných kombinací problému. To je vhodné zejména pro problémy, které mají malé množství řešení [54].

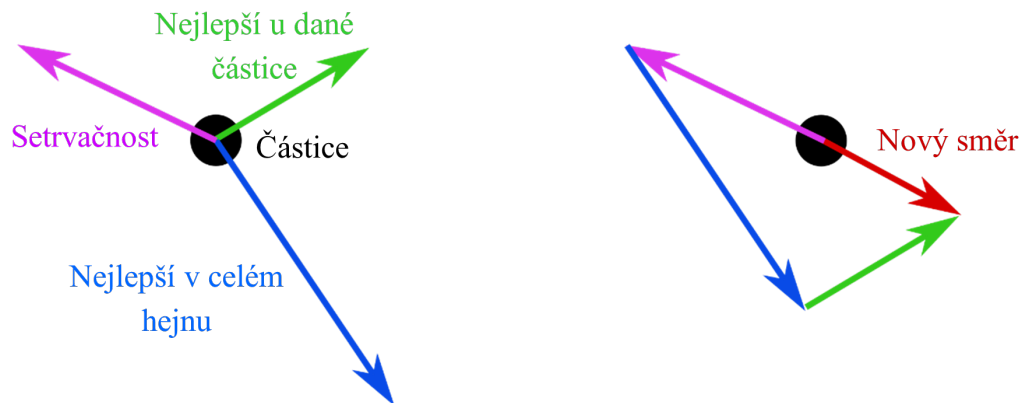
Kombinované algoritmy směšují deterministické a stochastické metody. Velkou výhodou je vysoká efektivita a výkonnost. Tyto algoritmy také umožňují nalézt více

optimálních řešení v rámci jednoho procesu. Mezi nejznámější kombinované algoritmy patří tzv. evoluční algoritmy [51][53]. V podkapitole 3.3.4 je stručně popsán samo organizující se migrační algoritmus (SOMA). Podkapitola 3.3.5 se potom detailně zabývá genetickým algoritmem NSGA-II, který byl použit v této práci pro optimalizaci návrhu vysokootáčkového asynchronního motoru.

3.3.1 Optimalizace hejnem částic

Optimalizace hejnem částic je v posledních letech pravděpodobně nejznámější a nejvyužívanější algoritmus ze skupiny stochastických algoritmů [51]. V tomto algoritmu je populace nazývána hejnem. Člen populace (resp. řešení) se nazývá částice. Ta se pohybuje prostorem řešení. Aktuální poloha, ohodnocení a rychlost patří mezi parametry každé částice. Jednotlivé částice navzájem ovlivňují své chování. Úskalí tohoto optimalizačního algoritmu spočívá v uvíznutí v lokálních optimech [55].

Optimalizace hejnem částic začíná náhodným vygenerováním počáteční populace, kdy se každá částice pohybuje prostorem řešení. Částice si navzájem sdělují své pozice a pamatují si kromě svých předchozích pozic také pozice ostatních částic. Během iterací se částice pohybují směrem k lepším pozicím, které jsou inspirovány předchozí nejlepší pozicí dané částice a také nejlepší pozicí v rámci celého hejna. Bere se také v úvahu setrvačnost částice [55]. Výsledný směr pohybu částice je znázorněn na obrázku 3.4.



Obr. 3.4: Pohyb částice v rámci optimalizace hejnem částic [56].

3.3.2 Simulované žíhání

Simulované žíhání je inspirováno fyzikálním dějem, který se využívá v metalurgii. Jedná se o zahřátí kovu na vysokou teplotu a následné pomalé ochlazení zpět na pokojovou teplotu. Cílem je zlepšení vlastností kovů. Funkcí samotného algoritmu se zabývá například publikace [57]. Začátek algoritmu zahrnuje volbu počáteční teploty t_0 a počátečního řešení s_0 , kterým může být kterékoliv přijatelné řešení. Dalším krokem je volba funkce snižování teploty. Následující tři rovnice definují základní metody snižování teploty, kdy každá metoda snižuje teplotu jinou rychlostí a je vhodná pro optimalizaci jiných typů modelu. V rovnicích (3.1), (3.2) a (3.3) představují α a β konstanty.

$$\text{Lineární snižování teploty : } t = t - \alpha \quad (3.1)$$

$$\text{Geometrické snižování teploty : } t = t \cdot \alpha \quad (3.2)$$

$$\text{Pomalé snižování teploty : } t = \frac{t}{1 + \beta \cdot t} \quad (3.3)$$

Dalším postupem je výběr jednoho nového řešení z okolí řešení s_n a výpočet rozdílu hodnot jejich cenových funkcí. V případě, že je rozdíl větší než 0 je nové řešení lepší a nahradí tak řešení s_n . Pokud je však rozdíl menší než 0, dojde k vygenerování čísla mezi 0 a 1. Toto řešení pak nahradí řešení s_n v případě, že vygenerované číslo bude menší než hodnota P určená na základě rovnice známé z tepelné dynamiky, která je pro simulované žíhání zjednodušená:

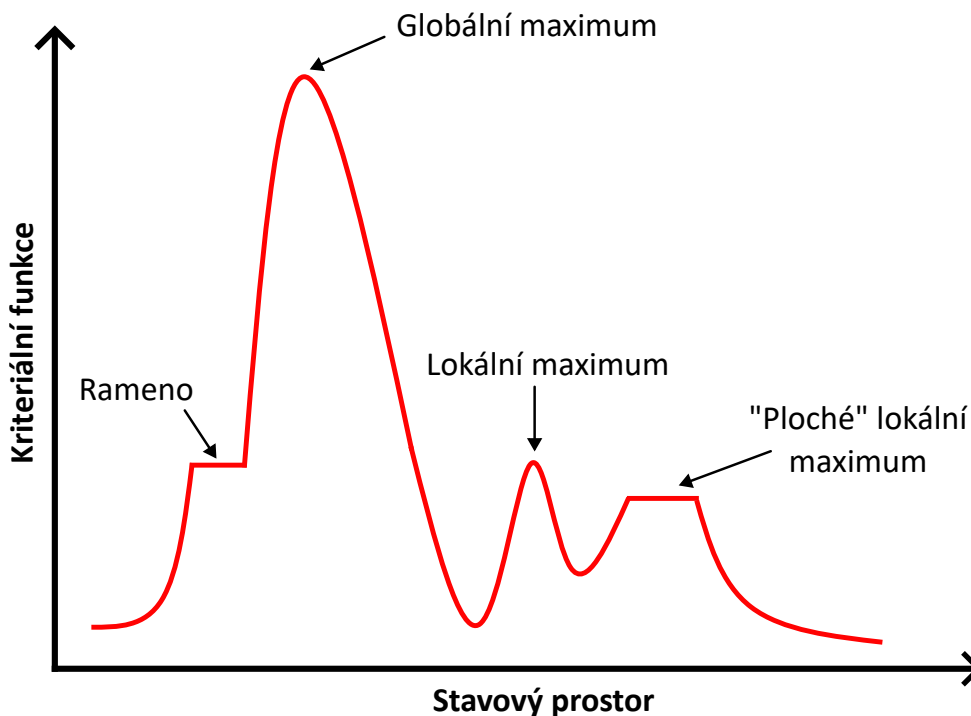
$$P = 1 \quad \text{pro } \Delta c \leq 0 \quad (3.4)$$

$$P = e^{-\frac{\Delta c}{t}} \quad \text{pro } \Delta c > 0 \quad (3.5)$$

kde P je pravděpodobnost, že bude nové řešení akceptováno, Δc je rozdíl hodnot cenové funkce pro současné a nové řešení a t je současná teplota. Z rovnice vyplývá, že v průběhu algoritmu, kdy je teplota vyšší, je větší pravděpodobnost přijetí horšího řešení. To je výhodné z hlediska kvalitního prozkoumání širší oblasti řešení. S postupným snižováním teploty se předpokládá zkoumání oblasti již kvalitního řešení, a proto je zde nízká pravděpodobnost přijetí horšího řešení, než je současné. Výhodou tohoto optimalizačního algoritmu je jeho snadná implementace a schopnost nalézt globální optimum. Nevýhodou může být náročnost na výpočetní výkon při velkém množství iterací a značné množství laditelných parametrů tohoto algoritmu.

3.3.3 Horolezecký algoritmus

Jedná se o jednoho z nejznámějších zástupců deterministických algoritmů. Horolezecký algoritmus, jak už jeho název napovídá, je inspirovaný chováním horolezce snažícího se vystoupat na vrchol hory. Jedná se o výpočetně efektivní algoritmus, jelikož vyhodnocuje pouze aktuální pozici, a to do doby, než je nalezena lepší sousední pozice [58]. Obrázek 3.5 znázorňuje jednotlivé pozice, ve kterých se algoritmus může ocitnout.

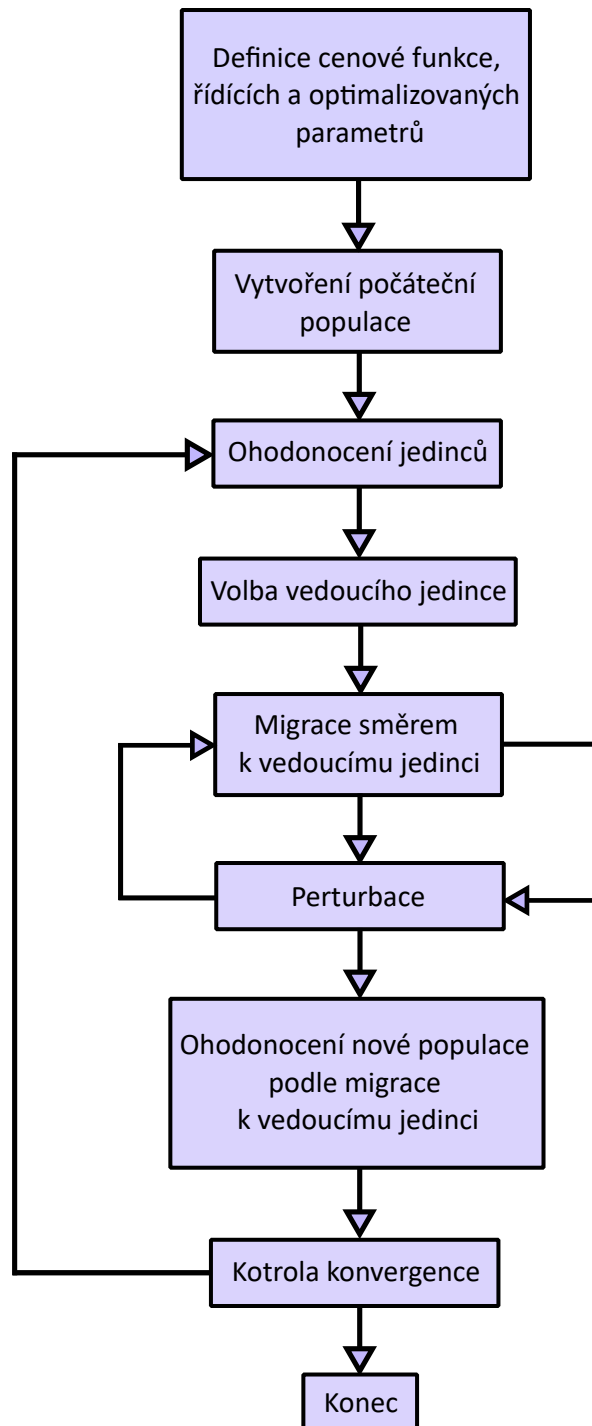


Obr. 3.5: Horolezecký algoritmus [58].

Z obrázku je patrné hned několik problémových pozic, do kterých se algoritmus může dostat. Jedná se například o rameno a "ploché" lokální maximum. Pokud je aktuální pozice právě v těchto rizikových místech, tak v blízkém okolí nedochází ke zvýšení hodnoty kriteriální funkce. Algoritmus v těchto místech uvízne a nenalezne tak globální optimum. Stejně se bude algoritmus chovat v případě lokálního optima, kdy v blízkém okolí také nedochází ke zvýšení hodnoty kriteriální funkce. Všechny tyto problémy řeší např. inteligentní horolezecký algoritmus popsáný v publikaci [59]. Pro lepší pokrytí prostoru řešení se zde využívá vzorkování pomocí tzv. Latin Hypercube Sampling.

3.3.4 SOMA

Samo-organizující se migrační algoritmus byl vynalezen v roce 1999 a byl použit pro optimalizaci cenové funkce. Jeho princip je znázorněn na obrázku 3.6.



Obr. 3.6: Princip funkce SOMA [61].

Základní princip tohoto algoritmu lze přirovnat k chování smečky vlků hledajících potravu. Vůdce této smečky je vždy nejbližší potravě a ostatní členové smečky se pohybují směrem k němu. Může také nastat situace, kdy se jeden z členů smečky dostane blíže k potravě než vůdce. Potom se sám stane vůdcem a smečka ho začne následovat. Potravou je zde myšleno hledané globální optimum. Samotný proces cestování se pak nazývá migrací [60].

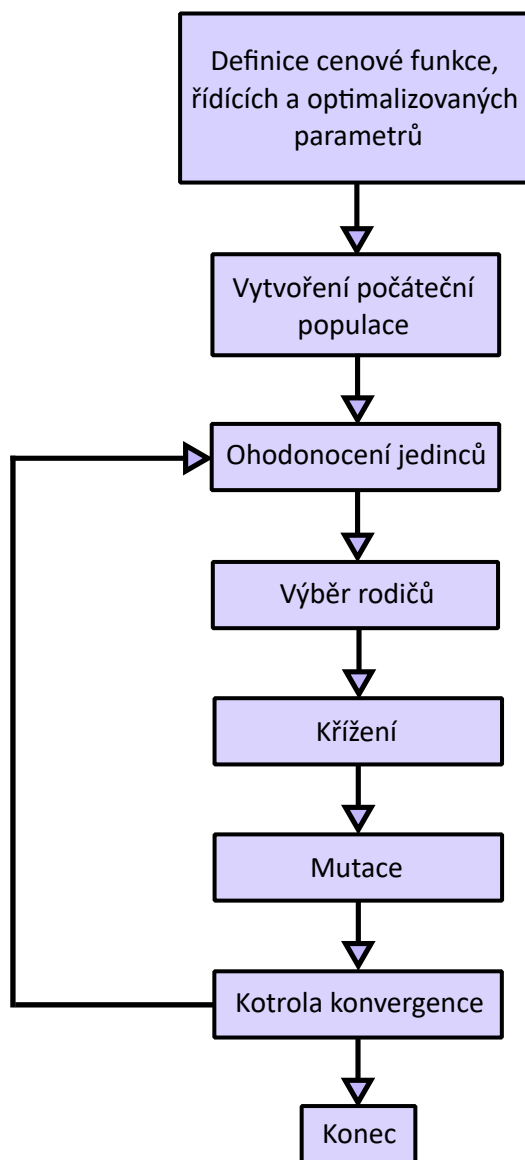
Při prohledávání prostoru řešení SOMA a snaze nalézt globální optimum, lze využít různé strategie [61]:

1. **AllToOne** – Jedná se o základní strategii, jejíž princip je znázorněn na obrázku 3.6. Všichni jedinci migrují k vedoucímu jedinci, který setrvává ve stejné pozici.
2. **AllToAll** – Neexistuje vedoucí jedinec, tudíž všichni jedinci migrují k ostatním. Tato strategie je poměrně časově náročná na výpočet.
3. **AllToAllAdaptive** – Oproti předchozí strategii zůstanou jedinci ve své nejlepší pozici, kterou našli.
4. **AllToOneRand** – Vedoucí jedinec je vybrán náhodně a ostatní jedinci k němu migrují.
5. **Clusters** – Hyperprostor je rozdělen na svazky a každý jedinec je testován v rámci daného svazku.

Podobně jako genetický algoritmus má SOMA měnitelné parametry, kterými lze ovlivnit kvalitu tohoto algoritmu. PathLength definuje, jakou vzdálenost musí jedinec urazit směrem k vedoucímu jedinci. Hodnota 1 znamená, že se jedinec zastaví na pozici vedoucího jedince. Step udává délku kroku během prohledávání prostoru jedincem. Čím menší délka bude tím podrobněji bude prostor prohledán. Parametr PRT slouží ke zkrácení přímé cesty jedinců pohybujících se směrem k vedoucímu jedinci. PopSize ovlivňuje počet jedinců použitých na prohledávání prostoru řešení. Migrations je počet migrací jedinců. V analogii s genetickým algoritmem se jedná o tzv. generace [51].

3.3.5 NSGA-II

Non-dominated sorting genetic algorithm II patří do skupiny genetických algoritmů, které lze využít pro multi-kriteriální optimalizaci. Základní myšlenka genetického algoritmu je založena na Darwinově evoluční teorii. Jedná se o přirozený výběr, kdy jsou vybráni nejschopnější jedinci, aby předali svoje vlastnosti další generaci [62][63]. Základní princip genetického algoritmu je znázorněn na obrázku 3.7 a jeho detailní popis je uveden v publikaci [49].

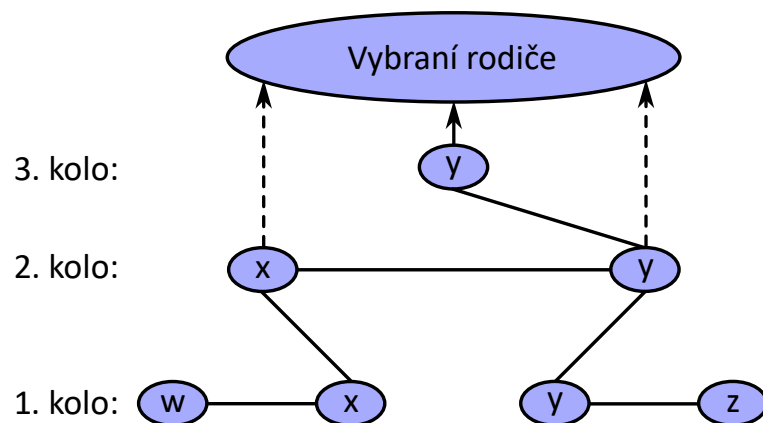


Obr. 3.7: Základní princip genetického algoritmu [49].

Na začátku je zapotřebí definovat cenovou funkci, řídicí a optimalizované parametry. Následuje vygenerování počáteční populace, to je možné provést náhodně, případně lze využít určitých strategií (např. Latin Hypercube Sampling), které zajistí rovnoměrné pokrytí prostoru a mohou tak zvýšit efektivitu nalezení globálního optima [62]. Jedinci v počáteční populaci jsou následně ohodnoceni. Na základě jejich ohodnocení jsou pak vybráni vhodní jedinci pro vytvoření nové generace. K tomu se využívá procesů křížení a mutace. Následuje kontrola konvergence a ukončení celého algoritmu.

Výběr kvalitních jedinců pro křížení je důležitou součástí genetického algoritmu,

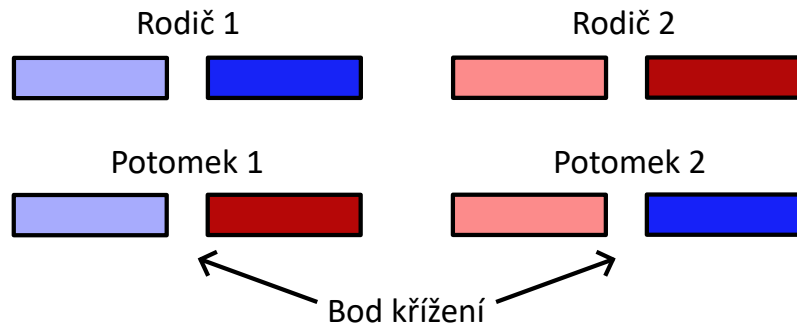
aby bylo možné konvergovat k optimálním řešením. Tento proces výběru je založen na ohodnocení jednotlivých jedinců v populaci. Velké množství výběrových strategií je založeno na náhodnosti. Jednou z populárních možností je tzv. ruleta. Ta vybírá jedince náhodně s rovnoměrným rozdělením. Pokud je nějaký jedinec dvakrát lepší než jiný, pak by měl mít oproti tomuto jedinci dvojnásobně větší pravděpodobnost, že bude vybrán. Další často využívanou strategií pro selekci jedinců je tzv. turnajový výběr (tournament selection), jehož princip je znázorněn na obrázku 3.8. Tato strategie spočívá v náhodném výběru množiny řešení, kdy každý jedinec má stejnou pravděpodobnost, že bude do této množiny vybrán. Z množiny řešení se následně vybere nejlépe ohodnocený jedinec, který se stane rodičem. Velikost této množiny pak také ovlivňuje efektivitu genetického algoritmu. Pokud je v ní větší počet jedinců, přispěje to k výběru jedince s dobrým ohodnocením. Úskalím je však vyšší pravděpodobnost uvíznutí algoritmu v lokálních optimech. Naopak pokud je počet jedinců menší, přispívá to k větší diverzitě (rodiči se stávají i jedinci s horším ohodnocením) a může se zvýšit pravděpodobnost nalezení globálního optima [49][62].



Obr. 3.8: Turnajový výběr (tournament selection) [64].

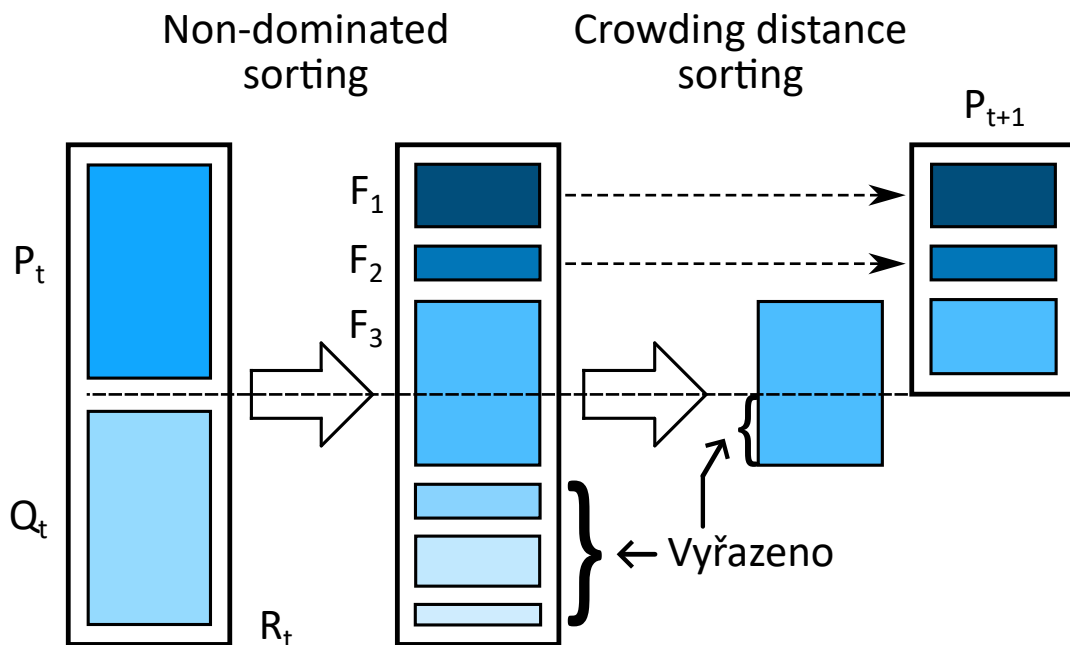
Po výběru rodičů následuje křížení. V přírodě dochází ke křížení mezi dvěma rodiči. V případě genetického algoritmu se může jednat o kombinaci genetického materiálu dvou nebo více rodičů, která je předána potomkům. Jedna ze známých variant křížení spočívá v náhodném umístění bodu křížení u dvou rodičů a podle [49] se nazývá jednobodové křížení. Vzniknou dva potomci, z nichž každý dědí část vlastností od obou rodičů [62]. Tento princip je znázorněn na obrázku 3.9. Lze využít také vícebodové křížení, kdy se vlastnosti rodiče rozdělí na n pozicích. Poslední operací v rámci genetického algoritmu je mutace, která naruší určité vlastnosti jedince. Je založena na náhodných změnách parametrů v rámci matice $N_{\text{populace}} \times N_{\text{parametry}}$, kdy pravděpodobnost, že mutace nastane je dána tzv. mírou mutace (mutation rate),

která nabývá hodnot od 0 do 1. Z toho vyplývá, že u vyšší hodnoty narůstá pravděpodobnost, že dojde k mutaci. Mutace přispívá k udržení rozmanitosti řešení a zabraňuje uvíznutí algoritmu v lokálních optimech [49][62].



Obr. 3.9: Křížení [62].

Optimalizační algoritmus NSGA-II využívá ideální postup multi-kriteriální optimalizace a je složen ze základního principu genetického algoritmu doplněného o funkce non-dominated sorting a crowding distance, které jsou popsány níže. Princip NSGA-II je znázorněn na obrázku 3.10.

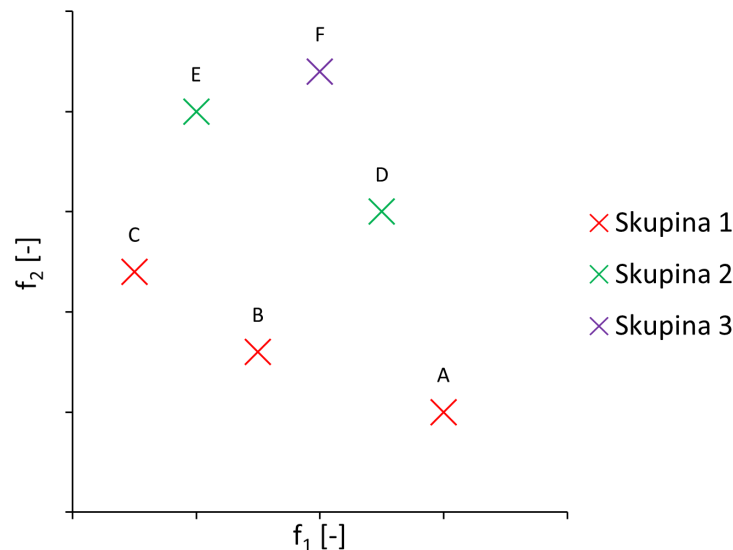


Obr. 3.10: Princip optimalizačního algoritmu NSGA-II [65].

Sečtením populace rodičů P_t a potomků Q_t vznikne populace $R_t = P_t \cup Q_t$. Tato populace je následně pomocí funkce non-dominated sorting rozdělena do jednotlivých skupin. Princip tohoto rozřazení je detailněji popsán níže. Nejlepší řešení pak náleží skupině F_1 . Pokud je počet řešení ve skupině F_1 menší, než je požadovaný počet řešení pro novou populaci P_{t+1} doplní se zbývající počet z dalších skupin F_2 a F_3 . Pokud však nastane situace jako na obrázku 3.10, kdy počet řešení ve skupině F_3 převyšuje počet volných míst v nové populaci P_{t+1} využívá se funkce crowding distance. Řešení ve skupině F_3 se seřadí sestupně podle velikosti hodnoty crowding distance a do nové populace P_{t+1} se doplní řešení s vyšší hodnotou. To napomáhá udržení rozmanitosti řešení, jak je popsáno níže. Následně se vytvoří nová populace potomků Q_{t+1} aplikováním turnajového výběru, křížením a mutací na populaci P_{t+1} [65].

Non-dominated sorting

Z počátku je dobré si ujasnit, co je zamýšleno pojmy dominance a nedominance. Je možné čerpat například z knihy [66]. Pro lepší vysvětlení je využito obrázku 3.11, na kterém je uvedeno šest řešení pro dvě funkce f_1 a f_2 . Cílem je hodnoty těchto funkcí minimalizovat. Například u řešení E lze říci, že mu dominuje řešení C. To je dáno nižšími hodnotami funkcí f_1 a f_2 u řešení C. Samotnému řešení C pak nedominuje žádné jiné řešení. Sice mají řešení A a B menší hodnoty funkce f_2 , ale řešení C má oproti nim významně nižší hodnotu funkce f_1 . Obecně pro dominantní řešení platí, že je ve všech kritériích lepší než nějaké jiné řešení.

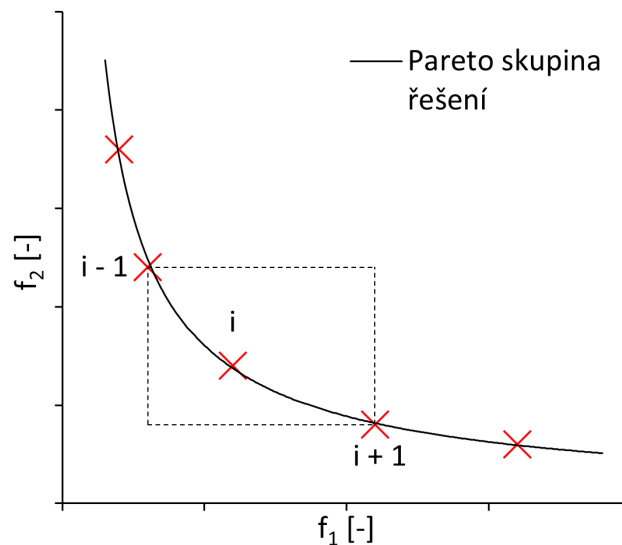


Obr. 3.11: Non-dominated sorting.

Cílem funkce non-dominant sorting je rozřadit jednotlivá řešení do skupin. Princip této funkce detailně popisuje například publikace [65]. Pro lepší porozumění je opět využito obrázku 3.11. Prvním krokem je ze všech šesti řešení vybrat ta, kterým žádná jiná řešení nedominují. Jedná se o řešení A, B a C. Tato řešení jsou pak zařazena do skupiny 1. Ve druhém kroku se postupuje obdobně pro zbývající tři řešení. To znamená, že při vynechání první skupiny řešení E a D nedominují žádná jiná řešení a jsou zařazena do skupiny 2. Tímto způsobem se postupuje, dokud nejsou všechna řešení rozříděna do jednotlivých skupin.

Crowding distance

Tato funkce pomáhá algoritmu udržet rozmanitost řešení. To je velice užitečné především při využití non-dominated sorting, kdy funkce crowding distance může uživateli pomoci vybrat nejlepší řešení z několika Pareto optimálních řešení. Základní myšlenka crowding distance spočívá ve vyhodnocení hustoty bodů kolem jednotlivých částí pareto skupiny řešení. Cílem je zabránit shlukování jednotlivých řešení a zajistit rovnoměrné rozložení řešení zastoupených ve výsledné populaci [62].



Obr. 3.12: Crowding distance.

Princip crowding distance je graficky zachycen na obrázku 3.12. Matematický popis pak poskytují rovnice (3.6) a (3.7) uvedené v [75]:

$$c(I_m(i)) = \sum_{m=1}^M c_m(I_m(i)) \quad (3.6)$$

$$c(I_m(i)) = \frac{f_m(I_m(i+1)) - f_m(I_m(i-1))}{f_{m,\max} - f_{m,\min}} \quad (3.7)$$

kde $I_m(i)$ je i -tý index z m -tého vektoru indexů, $f_{m,\max}$ a $f_{m,\min}$ jsou maximální a minimální hodnoty m -tého řešení v aktuální skupině řešení.

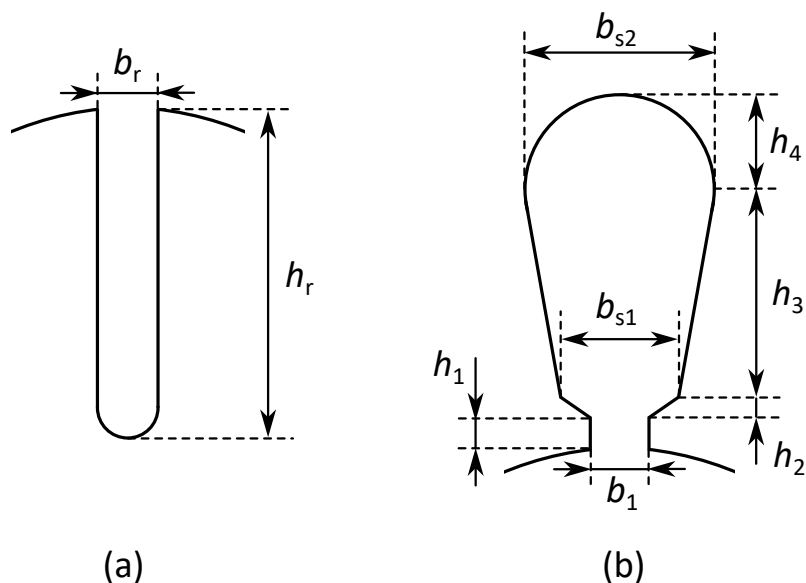
4 Analýza vysokootáčkového asynchronního stroje

Výchozím strojem této diplomové práce je vysokootáčkový asynchronní motor navržený v [39]. Stator stroje je složen z plechů materiálu NO10. Dvouvrstvé vinutí statoru se zkráceným krokem 5/6 je tvořeno Litz vodičem pro minimalizaci ztrát způsobených skin a proximity efektem. Při elektromagnetickém výpočtu je pro jednodušost uvažováno, že skin efekt a proximity efekt ve vinutí je zcela potlačen. Rotor je z plného materiálu 41CrMo4 a jeho povrch je axiálně drážkovaný. Tato kapitola se zabývá analýzou tohoto stroje, kdy je pro jeho elektromagnetický výpočet využito výpočetního programu Ansys Maxwell.

V tabulce 4.1 jsou uvedeny některé hlavní rozměry stroje. Na obrázku 4.1 je pak znázorněno provedení statorových a rotorových drážek. Tabulka 4.2 shrnuje základní parametry tohoto motoru.

Tab. 4.1: Hlavní rozměry vysokootáčkového asynchronního motoru [39].

Rozměr	Značka	Jenotka	Hodnota
Vnější průměr rotoru	D_r	mm	28,0
Vnější průměr statoru	$D_{s,out}$	mm	75,9
Aktivní délka rotoru	l_r	mm	48,2
Délka koncových kruhů rotoru	l_{kr}	mm	2,5
Délka vzduchové mezery	δ	mm	1,5
Výška jha statoru	h_{sy}	mm	10,9
Otevření statorové drážky	b_1	mm	2,0
Výška statorové drážky 1	h_1	mm	0,5
Výška statorové drážky 2	h_2	mm	0,5
Výška statorové drážky 3	h_3	mm	6,9
Výška statorové drážky 4	h_4	mm	3,7
Šířka statorové drážky 1	b_{s1}	mm	3,7
Šířka statorové drážky 2	b_{s2}	mm	7,3
Průřez statorové drážky	S_{cus}	mm ²	60,0
Výška rotorové drážky	h_r	mm	7,0
Šířka rotorové drážky	b_r	mm	0,83



Obr. 4.1: Provedení (a) rotorových a (b) statorových drážek.

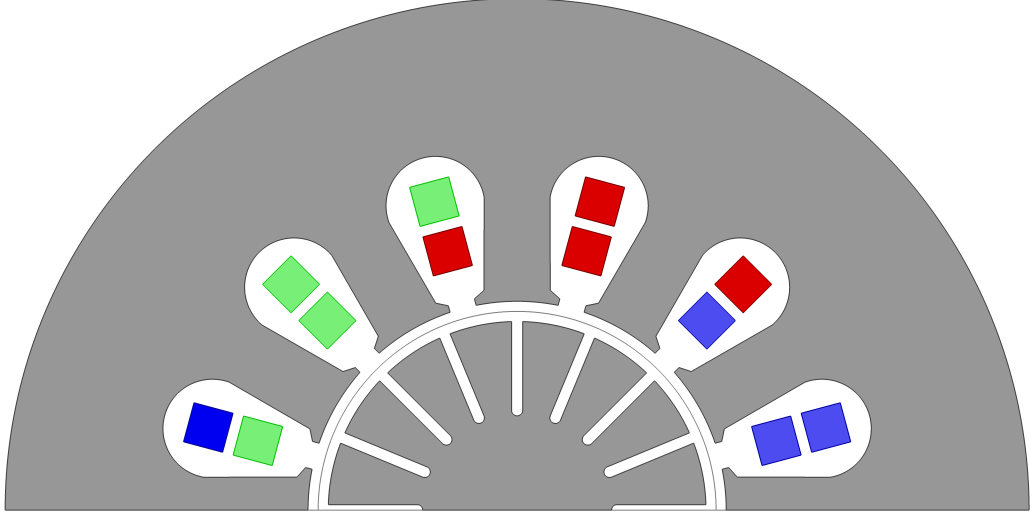
Tab. 4.2: Hlavní parametry vysokootáčkového asynchronního motoru [39].

Parametr	Značka	Jenotka	Hodnota
Jmenovitý výkon	P_n	W	2 500
Počet pólpárů	p	–	1
Počet fází	m	–	3
Napájecí frekvence	f_s	Hz	2 626
Amplituda fázového napětí	U_m	V	300
Počet statorových drážek	Q_s	–	12
Počet rotorových drážek	Q_r	–	16
Počet závitů vinutí statoru	N	–	32

4.1 Nastavení 2D modelu

Parametry a rozměry motoru byly využity k vytvoření 2D modelu v programu Ansys Maxwell. Pro napájení je uvažován zdroj ideálního sinusového napětí. Počáteční otáčky jsou nastaveny na synchronní velikost $157\,560\text{ min}^{-1}$. Zátěžný moment motoru je nastaven tak, aby výkon na hřídeli byl 2 500 W. Tlumení je uvažováno $10^{-8}\text{ Nm} \cdot \text{s} \cdot \text{rad}^{-1}$ a moment setrvačnosti je zmenšen pro urychlení přechodného děje. Simulovaný čas byl nastaven na 30 ms pro dosažení ustáleného stavu. Za účelem úspory výpočetního času byl pro ustálení přechodných jevů zvolen větší krok výpočtu. Po ustálení přechodných jevů byl krok výpočtu zjemněn na $1\text{ }\mu\text{s}$, což od-

povídá cca 1/400 periody otáčky rotoru. Mělo by se jednat o dostatečně jemný krok pro adekvátní elektromagnetický výpočet. Pro další úsporu výpočetního času bylo využito symetrické zjednodušení a řešení je tedy pouze jeden pól stroje. Na obrázku 4.2 je znázorněn vytvořený 2D model stroje.



Obr. 4.2: 2D model vysokootáčkového asynchronního motoru.

Jelikož se jedná pouze od 2D model je zapotřebí do něj zahrnout odpor vinutí R_w a indukčnost čela vinutí L_{ew} jedné fáze. K výpočtu lze využít vztahy z [9].

$$R_w = \frac{N \cdot l_c}{\sigma_{cu} \cdot S_{cs}} = 236,6 \text{ m}\Omega \quad (4.1)$$

$$L_{ew} = \frac{2 \cdot N^2 \cdot \mu_0}{p} \cdot (2 \cdot l_{ew} \cdot \lambda_{lew} + W_{ew} \cdot \lambda_{Wew}) = 54,37 \text{ }\mu\text{H} \quad (4.2)$$

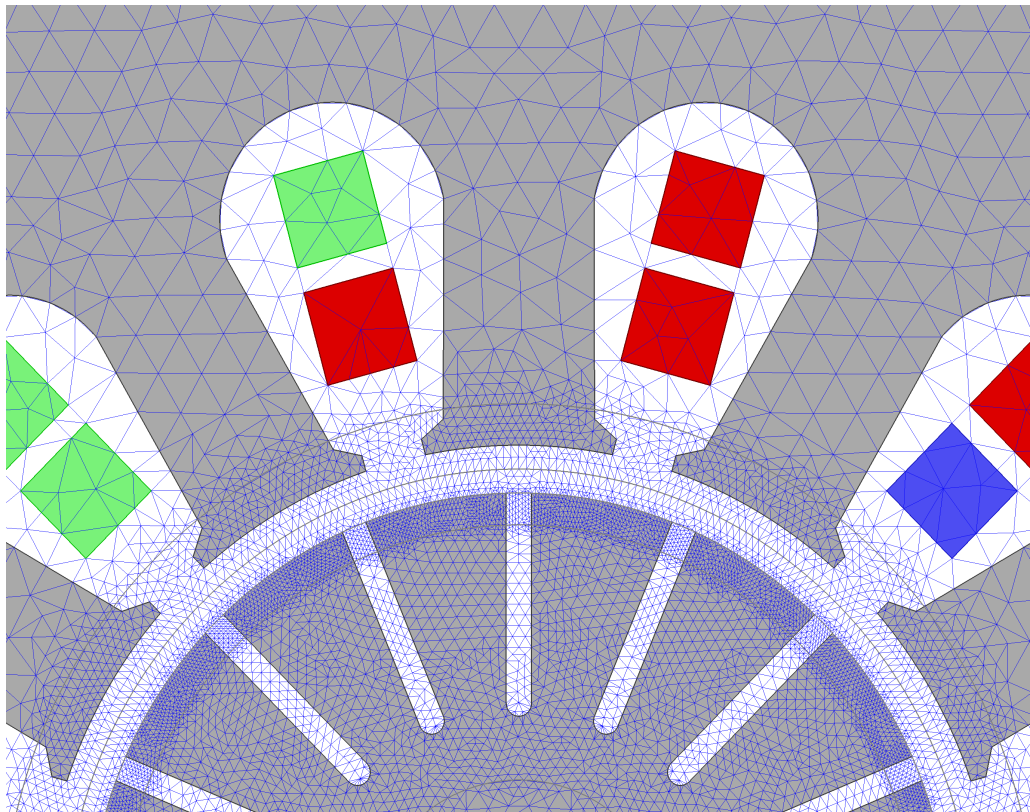
kde l_c je průměrná délka jednoho závitu cívky, σ_{cu} je vodivost materiálu vinutí při dané teplotě, S_{cs} je průřez jednoho závitu cívky, l_{ew} je délka vinutí od konce statorového svazku po oblouk čela vinutí a W_{ew} je střední hodnota rozpětí cívky. Permeanční koeficienty λ_{lew} a λ_{Wew} byly stanoveny pomocí doporučených hodnot v [9]. Dále je třeba uvažovat vliv odporu čel rotoru. Toho je možné docílit snížením vodivosti materiálu rotoru σ_{rot} pomocí koeficientu čel rotoru $k_{O'Kelly}$. Vztah pro výpočet tohoto koeficientu je uveden v [22].

$$k_{O'Kelly} = \frac{l_{rot}}{l_{rot} + \frac{\pi \cdot D_r}{2 \cdot p}} = 0,547 \quad (4.3)$$

kde l_{rot} je délka rotoru včetně konců.

$$\sigma_{O'Kelly} = \sigma_{\text{rot}} \cdot k_{O'Kelly} = 747\,235 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1} \quad (4.4)$$

Důležitou součástí nastavení modelu je vytvoření dostatečně husté výpočetní sítě, a to zejména v místech, kde dochází k velkým změnám některé z veličin. U vysokootáčkových elektrických strojů se jedná především o povrch rotoru. Tam dochází ke vzniku vířivých proudů v důsledku vyšších harmonických složek magnetické indukce ve vzduchové mezeře. Tyto proudy jsou pak zdrojem značných ztrát. Dále je hustší síť nastavena ve vzduchové mezeře a na koncích zubů statoru. Detail výpočetní sítě je zobrazen na obrázku 4.3.



Obr. 4.3: Výpočetní síť.

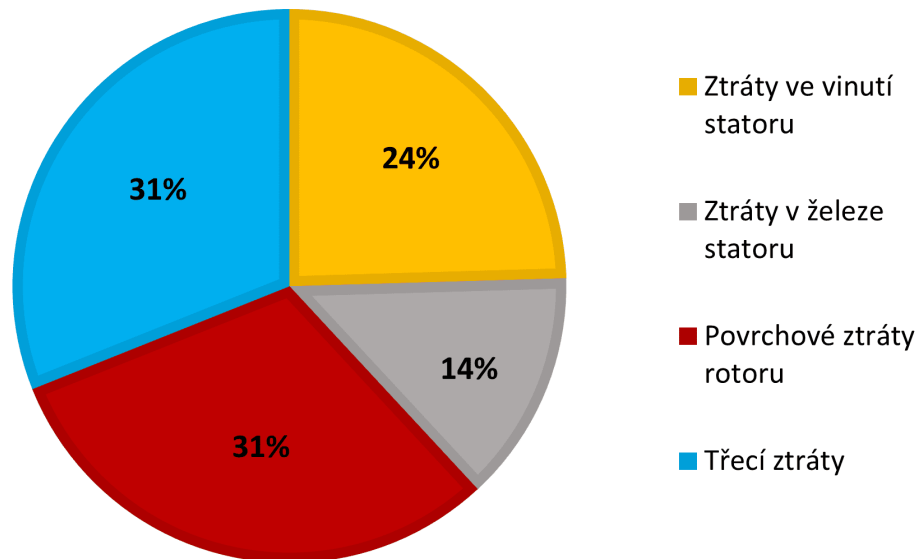
4.2 Výsledky elektromagnetických výpočtů

Z programu Ansys Maxwell byly odečteny výsledky elektromagnetických výpočtů, přičemž ztráty v železe statoru byly vynásobeny koeficientem 1,7. Tento koeficient

zahrnuje vliv výroby satoru [9]. Výpočet třecích ztrát byl proveden analyticky pomocí vztahů z kapitoly 2.4.4. Přehled vypočetných parametrů stroje je uveden v tabulce 4.3. Procentuální zastoupení ztrát ve stroji je pak znázorněno na obrázku 4.4.

Tab. 4.3: Výsledky výpočtů parametrů stroje 2,5 kW.

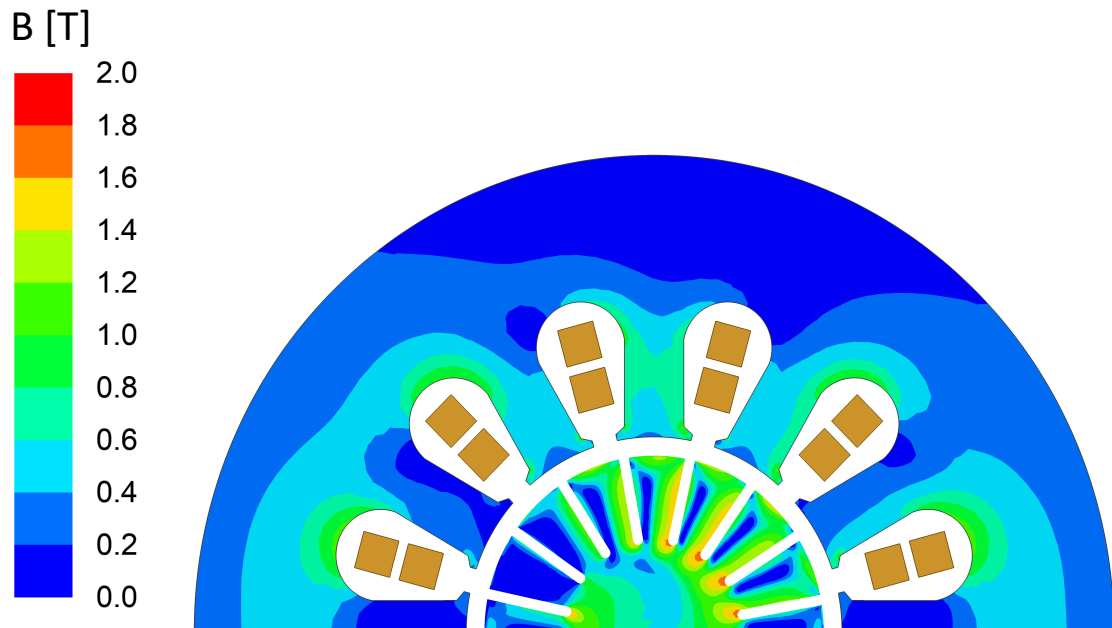
Parametr	Značka	Jenotka	Hodnota
Moment na hřídeli	M	mNm	160,1
Výkon na hřídeli	P	kW	2,5
Otáčky motoru	n	min^{-1}	149 090
Satorový proud	I_s	A	14,6
Účinník	$\cos \varphi$	–	0,34
Účinnost	η	%	80,5
Ztráty v železe satoru	P_{Fe}	W	82,1
Ztráty ve vinutí satoru	P_{Cu}	W	148,5
Ztráty v rotoru	P_{rot}	W	186,7
Třecí ztráty	P_t	W	187,9
Celkové ztráty	P_{ztr}	W	605,2



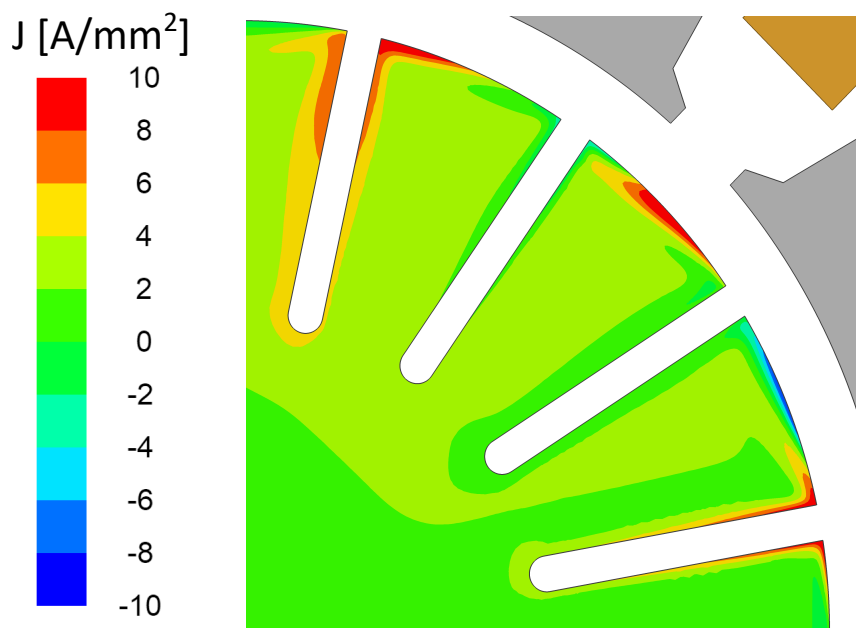
Obr. 4.4: Procentuální zastoupení ztrát ve stroji.

Na obrázku 4.5 je zobrazeno rozložení magnetické indukce v řezu stroje. Sator stroje není v žádném místě přesycován. U rotorových zubů lze pozorovat magnetický

skin efekt, kdy kraje zubů jsou přesycovány a naopak uprostřed zubu je magnetická indukce téměř nulová. K přesycení také dochází u zaoblění rotorových drážek.



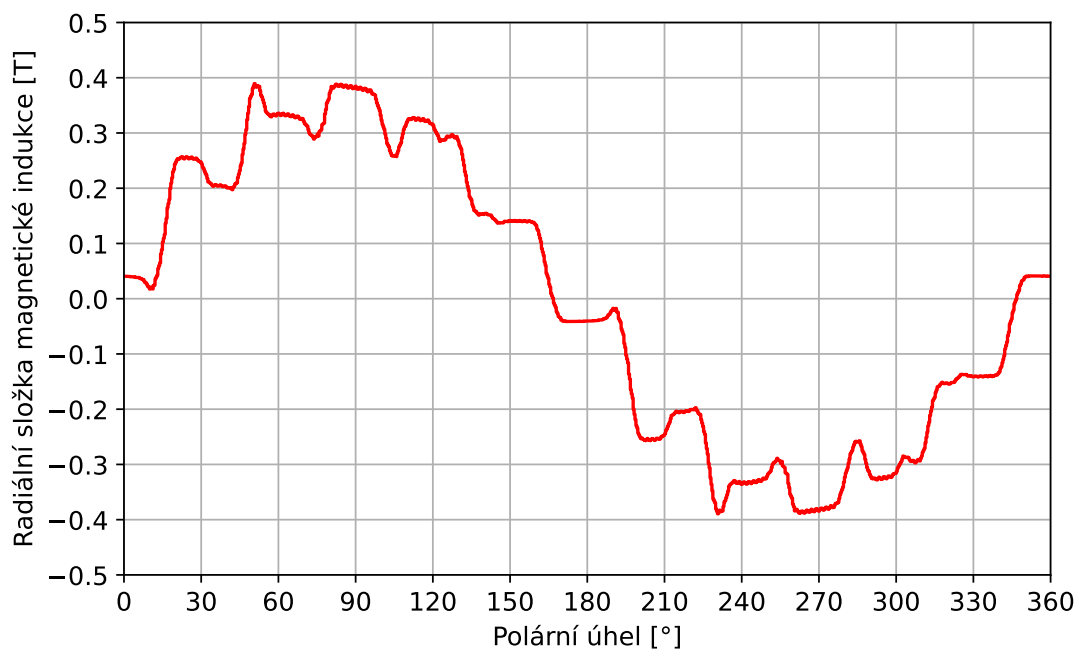
Obr. 4.5: Rozložení magnetické indukce v řezu stroje.



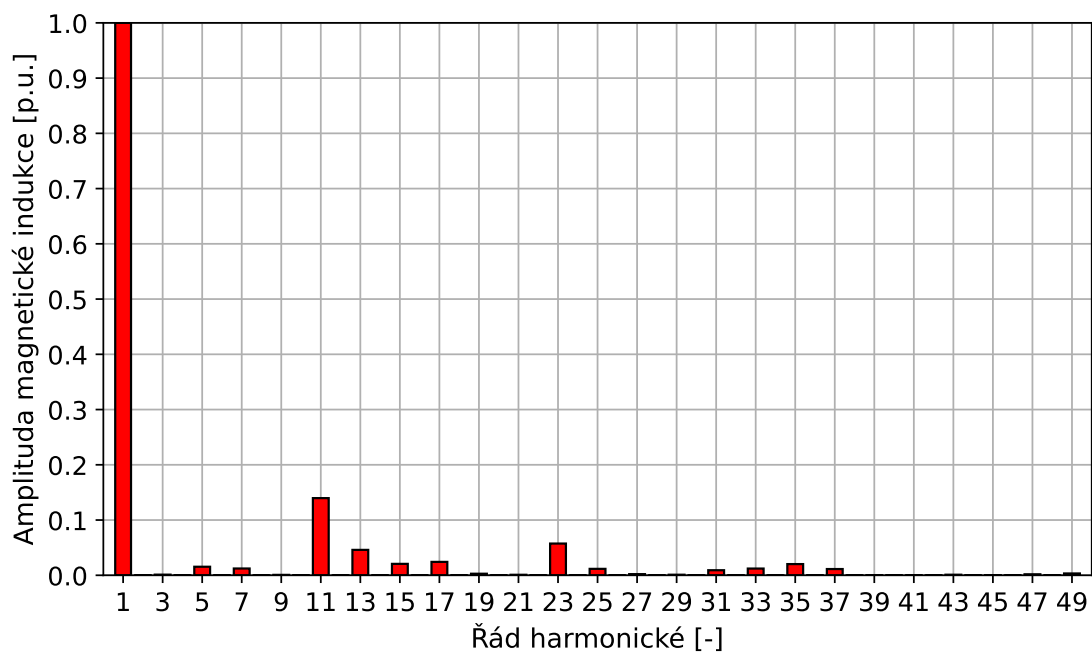
Obr. 4.6: Vířivé proudy na povrchu rotoru.

Obrázek 4.6 znázorňuje koncentraci vířivých proudů na povrchu rotoru, které jsou hlavním zdrojem rotorových elektromagnetických ztrát. Vznik těchto vířivých

proudů je silně závislý na vyšších harmonických složkách průběhu magnetické indukce ve vzduchové mezeře.



Obr. 4.7: Průběh radiální složky magnetické indukce ve vzduchové mezeře.



Obr. 4.8: Amplitudové spektrum průběhu radiální složky magnetické indukce.

Na obrázku 4.7 je zachycen průběh radiální složky magnetické indukce ve vzduchové mezeře. Schodovitý tvar průběhu je dán rozložením vinutí do drážek. Další deformace jsou způsobeny drážkováním statoru a rotoru. Vliv vyšších harmonických složek na rotorové ztráty je u vysokootáčkových strojů podstatný zejména kvůli vysoké napájecí frekvenci a plnému rotoru. Pro přehlednost je na obrázku 4.8 uvedeno amplitudové spektrum tohoto průběhu v poměrných jednotkách. Bázovou hodnotou je amplituda základní harmonické 0,357 T. Zde je možné si všimnout vlivu zkrácení kroku u statorového vinutí, kdy je významně potlačena 5. a 7. harmonická složka.

4.3 Vybrané možnosti zvýšení účinnosti stroje

Tato kapitola je věnována návrhům pro zvýšení účinnosti výchozího modelu vysokootáčkového asynchronního stroje. Navrženými změnami jsou: statorové plechy s nižšími měrnými ztrátami, radiální drážkování rotoru, měděné konce na rotoru a změna tvaru statorových drážek. Účinky těchto změn jsou následně vyhodnoceny pomocí elektromagnetického výpočtu v programu Ansys Maxwell.

4.3.1 Statorové plechy s nižšími měrnými ztrátami

Jednou z možností pro zvýšení účinnosti stroje je použití statorových plechů s nižšími měrnými ztrátami. Pro stator byly tedy vybrány plechy 10JNEX900 s tloušťkou 0,1 mm. Tyto plechy mají v porovnání s původně použitými plechy NO10 přibližně poloviční měrné ztráty, což vychází ze srovnání na obrázku 2.8.

Tab. 4.4: Vypočtené parametry stroje s plechy 10JNEX900.

Parametr	Značka	Jenotka	Hodnota	Abs. změna
Moment na hřídeli	M	mNm	160,1	0,0
Výkon na hřídeli	P	kW	2,5	0,0
Otáčky motoru	n	min^{-1}	149 095	5,0
Statorový proud	I_s	A	14,4	-0,2
Účinník	$\cos \varphi$	–	0,34	0,0
Účinnost	η	%	81,5	1,0
Ztráty v železe statoru	P_{Fe}	W	45,7	-36,4
Ztráty ve vinutí statoru	P_{Cu}	W	147,1	-1,4
Ztráty v rotoru	P_{rot}	W	186,6	-0,1
Třecí ztráty	P_t	W	187,9	0,0
Celkové ztráty	P_{ztr}	W	567,3	-37,9

Z výsledků je patrné, že využití statorových plechů, které disponují nižšími měrnými ztrátami, snížilo ztráty v železe statoru o 44,3 %. Tím došlo k navýšení celkové účinnosti stroje o 1 % při jmenovitém zatížení.

4.3.2 Měděné konce rotoru

Jelikož jsou ztráty v rotoru u vysokootáčkových strojů značné, je vhodné se zaměřit na zlepšení elektromagnetických vlastností rotoru. Jednou z možností, která vylepšuje elektromagnetické vlastnosti rotoru je využití měděných konců rotoru. Ty zajišťují kvalitnější cestu pro proudy indukované do rotoru. Vliv měděných konců se do 2D modelu stroje zahrne přepočtením koeficientu snižujícího vodivost materiálu rotoru (vztah 4.3). Tento přepočet je proveden pomocí vztahu, který uvádí publikace [23], kde pro měděné konce rotoru je koeficient $C = 0,3$:

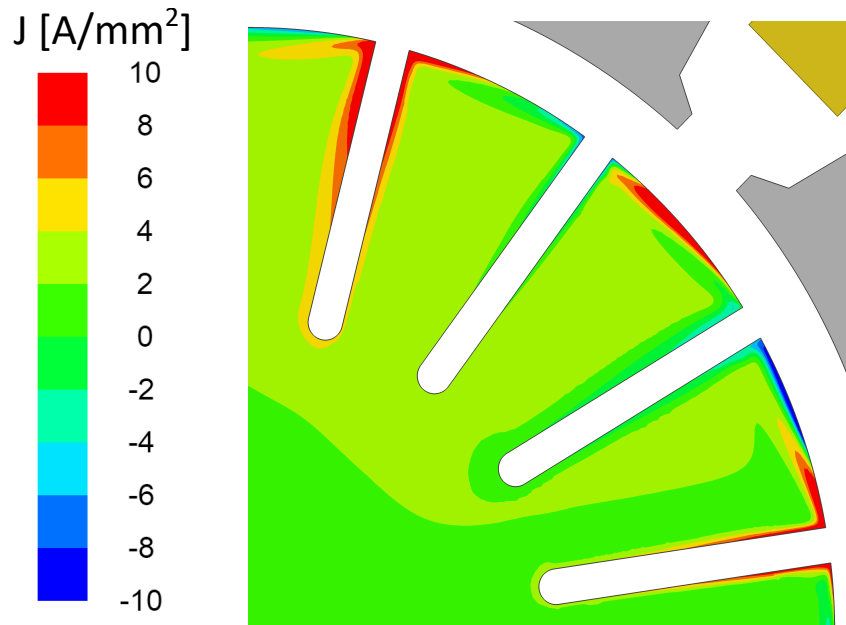
$$k_{\text{Cu,k}} = 1 + C \cdot (k_{\text{O'Kelly}} - 1) = 0,864. \quad (4.5)$$

Díky měděným koncům došlo k nárůstu otáček rotoru, čímž došlo ke snížení skluzu. Skluz se zmenšil z 5,4 % na 3,4 %. Díky lepším elektromagnetickým vlastnostem rotoru došlo ke snížení ztrát vířivými proudy na povrchu rotoru o 28,5 % ve srovnání s výchozím modelem. V důsledku vyšších otáček však došlo k nárůstu třecích ztrát o 7,1 %. Nicméně účinnost je oproti základnímu modelu vyšší o 1,1 %.

Tab. 4.5: Vypočtené parametry stroje s měděnými konci rotoru.

Parametr	Značka	Jenotka	Hodnota	Abs. změna
Moment na hřídeli	M	mNm	156,8	-3,3
Výkon na hřídeli	P	kW	2,5	0,0
Otáčky motoru	n	min^{-1}	152 285	3 195
Statorový proud	I_s	A	14,4	-0,2
Účinník	$\cos \varphi$	–	0,34	0,0
Účinnost	η	%	81,6	1,1
Ztráty v železe statoru	P_{Fe}	W	82,1	0,0
Ztráty ve vinutí statoru	P_{Cu}	W	147,2	-1,3
Ztráty v rotoru	P_{rot}	W	133,5	-53,2
Třecí ztráty	P_t	W	201,3	13,4
Celkové ztráty	P_{ztr}	W	564,1	-41,1

V důsledku nižší rezistivity rotoru však došlo ke zvýšení koncentrace vířivých proudů na povrchu rotoru. To je viditelné z obrázku 4.9, který znázorňuje vířivé proudy na povrchu rotoru. Jako možné vylepšení se tedy nabízí využít radiálního drážkování rotoru. Tato kombinovaná varianta je studována v kapitole 4.3.4.



Obr. 4.9: Vířivé proudy na povrchu rotoru s měděnými konci.

4.3.3 Radiální drážkování rotoru

Ztráty vířivými proudy na povrchu rotoru ve výchozím vysokootáčkovém stroji tvoří asi 31 % z celkových ztrát. Jako další způsob zvýšení účinnosti je tak zvoleno radiální drážkování rotoru. Toto opatření zajistí zvýšení rezistivity povrchu rotoru. Podrobněji je radiální drážkování popsáno v kapitole 2.1.3. Základem je stanovení hloubky drážky, která by měla být s rezervou větší, než je hloubka vniku nejbližšího řádu výrazné drážkové harmonické. Z obrázku 4.8 vyplývá, že hloubka drážky se bude odvíjet od 11. harmonické, která má z výrazných harmonických složek největší hloubku vniku. Hloubku vniku lze určit pomocí vztahu 2.12, kdy rezistivita $\rho_v = 7,326 \cdot 10^{-7} \Omega\text{m}$ a relativní permeabilita $\mu_r = 250$ materiálu rotoru 41CrMo4 je určena na základě katalogových údajů od výrobce:

$$\delta_v = \sqrt{\frac{\rho_v}{\pi \cdot f_{11} \cdot \mu}} = 0,16 \text{ mm} \quad (4.6)$$

Hloubka radiálních drážek je volena jako dvojnásobek hloubky vniku (0,32 mm), aby došlo ke snížení vlivu dominantní 11. harmonické, a také vlivu dalších vyšších harmonických složek na velikost povrchových ztrát. Dále byla zvolena vzdálenost jednotlivých radiálních drážek $l_{Fe,v} = 2,2 \text{ mm}$ s ohledem na dostatečné navýšení rezistivity povrchu rotoru. Šířka drážky 0,25 mm byla zvolena s ohledem na délku rotoru a vzdálenost jednotlivých radiálních drážek. Aby bylo možné zahrnout vliv radiálních drážek do 2D modelu stroje, je na základě publikace [23] určen koeficient

snížení vodivosti povrchu rotoru. Tento koeficient se vztahuje na tu část rotoru, do které zasahují radiální drážky (tj. do hloubky 0,32 mm). Koeficient zahrnující vliv radiálních drážek na vodivost povrchu rotoru lze určit pomocí vztahu:

$$k_{R,v} = 1 - \frac{2 \cdot \tau_{p,v}}{\pi \cdot l_{Fe,v}} \cdot \tanh \frac{\pi \cdot l_{Fe,v}}{2 \cdot \tau_{p,v}}, \quad (4.7)$$

kde $\tau_{p,v}$ je průměrná pólová rozteč harmonických polí statoru.

$$\tau_{p,v} = \frac{\tau_p}{v_{av}} = \frac{\pi \cdot (D_r + 2\delta)}{v_{av} \cdot 2p}, \quad (4.8)$$

kde v_{av} je průměrná hodnota výrazných vyšších harmonických složek (výrazná 11. a 13. harmonická):

$$v_{av} = \frac{11 + 13}{2} = 12, \quad (4.9)$$

potom z rovnice 4.9 $\tau_{p,v} = 4,1$ mm

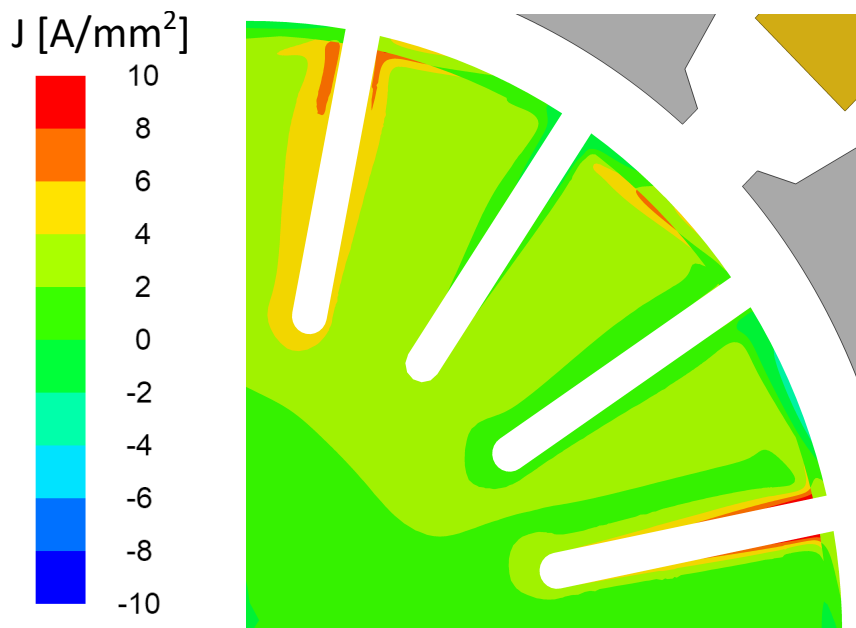
Z rovnice 4.7 pak lze určit koeficient zahrnující vliv radiálních drážek na vodivost povrchu rotoru:

$$k_{R,v} = 1 - \frac{2 \cdot \tau_{p,v}}{\pi \cdot l_{Fe,v}} \cdot \tanh \frac{\pi \cdot l_{Fe,v}}{2 \cdot \tau_{p,v}} = 0,1845. \quad (4.10)$$

Část rotoru od povrchu po hloubku radiálních drážek tedy bude mít 0,1845krát nižší vodivost, než je původní vodivost materiálu rotoru 41CrMo4. Tabulka 4.6 uvádí parametry stroje s radiálním drážkováním rotoru. Ztráty v rotoru klesly oproti původnímu stroji o 1 %. Jelikož má 1. harmonická daleko větší hloubku vniku oproti vyšším harmonickým složkám dochází pouze k mírnému poklesu otáček o 0,31 %.

Tab. 4.6: Vypočtené parametry stroje s radiálními drážkami na povrchu rotoru.

Parametr	Značka	Jenotka	Hodnota	Abs. změna
Moment na hřídeli	M	mNm	160,6	0,5
Výkon na hřídeli	P	kW	2,5	0,0
Otáčky motoru	n	min ⁻¹	148 630	-460
Statorový proud	I_s	A	14,6	0,0
Účinník	$\cos \varphi$	—	0,34	0,0
Účinnost	η	%	80,5	0,0
Ztráty v železe statoru	P_{Fe}	W	82,1	0,0
Ztráty ve vinutí statoru	P_{Cu}	W	150,4	1,9
Ztráty v rotoru	P_{rot}	W	184,8	-1,9
Třecí ztráty	P_t	W	187,5	-0,4
Celkové ztráty	P_{ztr}	W	604,8	-0,4



Obr. 4.10: Vířivé proudy na povrchu rotoru s radiálními drážkami.

Obrázek 4.10 znázorňuje koncentraci vířivých proudů na povrchu rotoru. Z porovnání obrázků 4.6 a 4.10 je patrné, že koncentrace vířivých proudů na povrchu rotoru je díky radiálnímu drážkování snížena. Avšak jsou zde stále vířivé proudy které se koncentrují u axiálních štěrbin hlouběji v rotoru. Řešením by bylo hlubší provedení radiálních drážek podél axiálních drážek rotoru. Nevýhodou je však složitější výroba a negativní dopad na pracovní základní harmonickou. Účinnost stroje zůstává stejná jako u základního stroje.

4.3.4 Radiálně drážkovaný rotor s měděnými konci

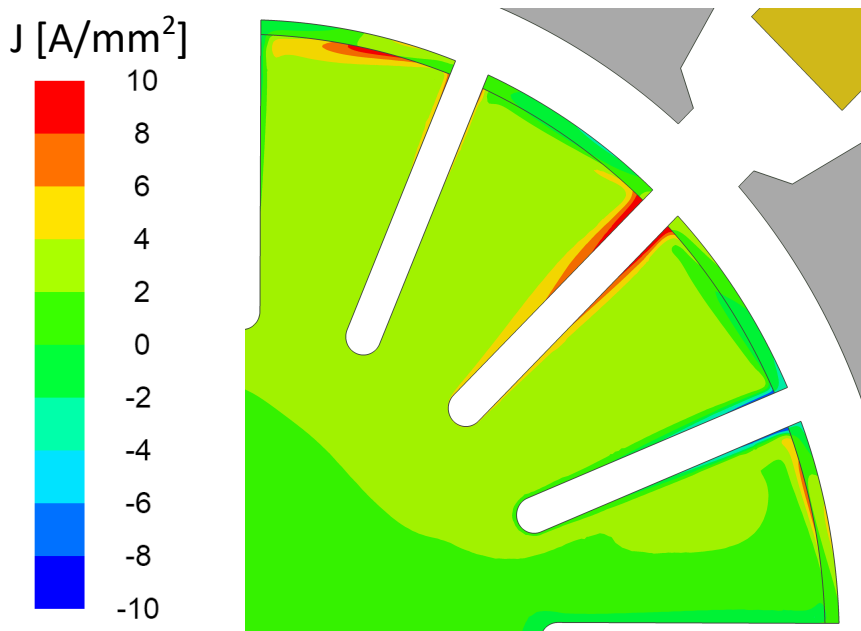
Jak se ukázalo v kapitole 4.3.2, tak měděné konce rotoru mají pozitivní vliv na celkovou účinnost stroje. Došlo však také ke zvýšení třecích ztrát v důsledku vyšších otáček rotoru. Dalším nepříznivým jevem je zvýšení koncentrace vířivých proudů na povrchu rotoru viz. obrázek 4.9.

Jako vhodný způsob zvýšení účinnosti se tedy jeví využití kombinace měděných konců rotoru a radiálního drážkování. Tabulka 4.7 uvádí parametry stroje s radiálně drážkovaným rotorem s měděnými konci.

Tab. 4.7: Vypočtené parametry stroje s radiálními drážkami na rotoru s Cu konci.

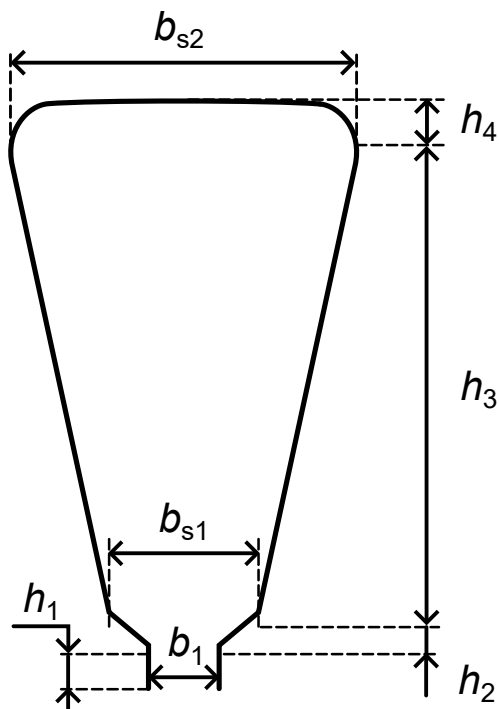
Parametr	Značka	Jenotka	Hodnota	Abs. změna
Moment na hřídeli	M	mNm	157,1	-3,0
Výkon na hřídeli	P	kW	2,5	0,0
Otáčky motoru	n	min^{-1}	151 975	2 885
Statorový proud	I_s	A	14,5	-0,1
Účinník	$\cos \varphi$	–	0,33	-0,01
Účinnost	η	%	81,9	1,4
Ztráty v železe statoru	P_{Fe}	W	82,1	0,0
Ztráty ve vinutí statoru	P_{Cu}	W	149,1	0,6
Ztráty v rotoru	P_{rot}	W	121,8	-64,9
Třecí ztráty	P_t	W	200,6	12,7
Celkové ztráty	P_{ztr}	W	553,6	-51,6

Díky radiálnímu drážkování došlo k poklesu povrchových ztrát rotoru o 8,76 % oproti modelu stroje využívající pouze měděné konce rotoru, který byl studován v kapitole 4.3.2. Celková účinnost se tak oproti tomuto stroji zvýšila o 0,3 %. V porovnání se základním modelem stroje je účinnost vyšší o 1,4 %. Koncentrace vířivých proudů na povrchu radiálně drážkovaného rotoru s měděnými konci je prezentována na obrázku 4.11.



Obr. 4.11: Vířivé proudy na povrchu radiálně drážkovaného rotoru s Cu konci.

4.3.5 Změna tvaru satorové drážky



Obr. 4.12: Nové provedení satorových drážek.

Tab. 4.8: Vypočtené parametry stroje s novým tvarem drážek satoru.

Parametr	Značka	Jenotka	Hodnota	Abs. změna
Moment na hřídeli	M	mNm	160,1	0,0
Výkon na hřídeli	P	kW	2,5	0,0
Otáčky motoru	n	min^{-1}	149 093	3
Satorový proud	I_s	A	14,5	-0,1
Účinník	$\cos \varphi$	—	0,34	0,0
Účinnost	η	%	80,7	0,2
Ztráty v železe satoru	P_{Fe}	W	88,6	6,5
Ztráty ve vinutí satoru	P_{Cu}	W	130,2	-18,3
Ztráty v rotoru	P_{rot}	W	186,9	0,2
Třecí ztráty	P_t	W	190,7	2,8
Celkové ztráty	P_{ztr}	W	596,4	-8,8

Ztráty ve vinutí satoru tvoří u původního návrhu vysokootáčkového asynchronního stroje asi 24 % celkových ztrát viz. obrázek 4.4. Návrh nového tvaru satorových

drážek umožní použít větší průřez vodičů vinutí statoru. viz. obrázek 4.12. Ztráty ve vinutí statoru klesly o 12,3 %. V důsledku většího průřezu drážek však došlo ke zvýšení sycení magnetického obvodu statoru a tedy k nárůstu ztrát v železe statoru o 7,9 %. Celková účinnost se však zvedla o 0,2 %.

4.3.6 Kombinace všech vybraných způsobů zvýšení účinnosti

Tato kapitola prezentuje výsledky ztrát ve stroji při využití všech uvedených způsobů zvyšování účinnosti: statorové plechy s nižšími měrnými ztrátami, radiální drážkování rotoru, měděné konce rotoru a změna tvaru statorové drážky.

Tab. 4.9: Vypočtené parametry stroje s úpravami na zvýšení účinnosti.

Parametr	Značka	Jenotka	Hodnota	Abs. změna
Moment na hřídeli	M	mNm	157,1	-3,0
Výkon na hřídeli	P	kW	2,5	0,0
Otáčky motoru	n	min^{-1}	151 980	2 890
Statorový proud	I_s	A	14,3	-0,3
Účinník	$\cos \varphi$	–	0,33	-0,01
Účinnost	η	%	83,3	2,8
Ztráty v železe statoru	P_{Fe}	W	49,6	-32,5
Ztráty ve vinutí statoru	P_{Cu}	W	129,4	-19,1
Ztráty v rotoru	P_{rot}	W	121,8	-64,9
Třecí ztráty	P_t	W	201,4	13,5
Celkové ztráty	P_{ztr}	W	502,2	-103,0

V porovnání s původním strojem jsou ztráty v železe statoru nižší o 39,6 %, ztráty ve vinutí statoru jsou nižší o 12,9 % a ztráty v rotoru klesly o 34,8 %. V důsledku vyšších otáček však vzrostly ztráty třením o 7,2 %. Celková účinnost narostla o 2,8 %. Detailní srovnání s výchozím modelem a optimalizovanými modely strojů je uvedeno v kapitole 5.3.

5 Optimalizace zadaného stroje

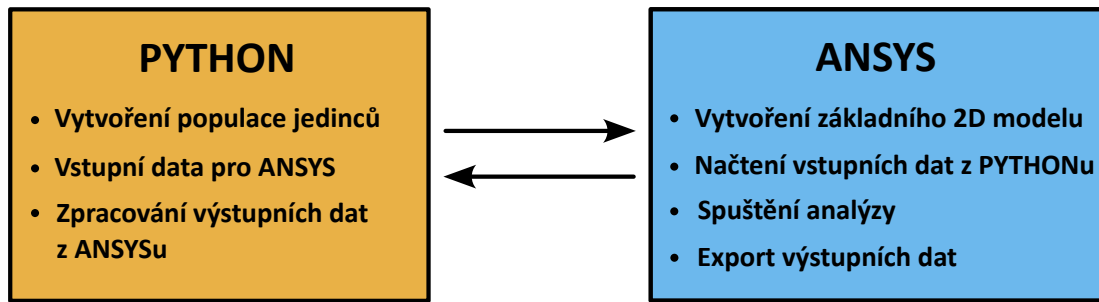
U většiny návrhů elektrických strojů se jedná o multi-kriteriální problém, kdy je zapotřebí současně minimalizovat či maximalizovat několik objektivních funkcí [67]. Právě z důvodu většího počtu cílů optimalizace a parametrů stroje určených k optimalizaci je vhodné použít ideální postup multi-kriteriální optimalizace popsany v kapitole 3.1. To dokládá i srovnání provedené v publikaci [51], kde multi-kriteriální optimalizace využívající ideální postup poskytla kvalitnější výsledky ve srovnání s multi-kriteriální optimalizací založené na preferencích.

Pro optimalizaci zadaného vysokootáčkového asynchronního stroje byl vybrán optimalizační algoritmus NSGA-II. Jedná se o jeden z nejpopulárnějších a nejvyužívanějších optimalizačních algoritmů v oblasti multi-kriteriální optimalizace, a to díky jeho schopnosti udržovat kvalitní řešení a současně zachovávat diverzitu řešení [68][69].

Ve srovnání s multi-kriteriální optimalizací hejnem částic dosahuje NSGA-II algoritmus obecně lepších výsledků [70][71]. V publikaci [72] bylo provedeno srovnání těchto algoritmů přímo pro optimalizaci elektromagnetického návrhu stroje. Zde je NSGA-II lepší jak v rychlosti konvergence, tak také v kvalitě nalezených řešení. Pro optimalizaci by bylo možné využít také multi-kriteriální verzi méně známého algoritmu SOMA. Jeho použitelnost pro optimalizaci elektrického stroje byla ověřena v publikaci [60], kde výsledky optimalizace byly srovnatelné s výsledky, které poskytoval algoritmus NSGA-II. Pro multi-kriteriální optimalizaci lze však využít i další kvalitní algoritmy jako je například multi-kriteriální evoluční algoritmus založený na dekompozici MOEA/D prezentovaný v [73] a [74]. Tato kapitola je věnována optimalizaci zadaného vysokootáčkového asynchronního stroje s axiálně drážkovaným rotorem.

5.1 Optimalizační postup

Rozměry 2D modelu jsou navzájem vhodně provázány, aby se při změně např. radiální délky vzduchové mezery odpovídajícím způsobem upravily i ostatní rozměry. Dále byla vytvořena komunikace s programem Ansys Maxwell prostřednictvím skriptů napsaných v jazyce Python. Tyto skripty zajišťují vytvoření počáteční populace jedinců, zasílání jednotlivých vstupních dat (rozměry, indukčnost čel vinutí statoru, atd.) do 2D modelu v Ansysu, spuštění analýzy a zpracování výstupních dat z Ansysu. V jazyce Python byl také napsán samotný optimalizační algoritmus NSGA-II. Optimalizační postup je znázorněn na obrázku 5.1.



Obr. 5.1: Optimalizační postup.

5.1.1 Zpracování výstupních dat

Hlavním cílem optimalizace vysokootáčkového asynchronního stroje je maximalizovat účinnost při zachování výkonu na hřídeli 2 500 W. Jako další cíl optimalizace byla zvolena maximalizace účinníku a minimalizace zvlnění momentu. Aby bylo možné tato kritéria vyhodnotit, je zapotřebí výstupní data z Ansysu zpracovat. K tomu byl využit export potřebných veličin v závislosti na simulovaném čase do souboru s daty oddělenými tabulátorem. Pro výpočet účinnosti bylo zapotřebí exportovat data o ztrátách v železe statoru, ztrátách ve vinutí statoru a rotorových ztrátách. Pro analytický výpočet třecích ztrát bylo zapotřebí exportovat data o otáčkách motoru. Poté byla vypočítána průměrná hodnota těchto veličin z posledních dvou period a ztráty v železe statoru byly vynásobeny korekčním koeficientem 1,7, který zohledňuje vliv výroby statoru. Účinnost lze následně vypočítat jako:

$$\eta = \frac{P_n}{P_n + P_{Fe} + P_{Cu} + P_{rot} + P_t} \cdot 100 \quad (5.1)$$

Pro výpočet účinníku bylo zapotřebí kromě ztrát vypočítat také efektivní hodnoty proudů a napětí v jednotlivých fázích:

$$\cos \varphi = \frac{P_n + P_{Fe} + P_{Cu} + P_{rot} + P_t}{U_{A,rms} \cdot I_{A,rms} + U_{B,rms} \cdot I_{B,rms} + U_{C,rms} \cdot I_{C,rms}} \quad (5.2)$$

Pro výpočet zvlnění momentu byla stanovena maximální, minimální a průměrná hodnota elektromagnetického momentu z poslední dvou period:

$$TR = \frac{M_{max} - M_{min}}{M_{elmg}} \cdot 100 \quad (5.3)$$

Tab. 5.1: Optimalizační cíle.

Parametr	Priorita
Účinnost	Maximalizace
Účíník	Maximalizace
Zvlnění momentu	Minimalizace

5.1.2 Optimalizované parametry motoru

Pro optimalizaci byly vybrány tyto parametry: průměr rotoru D_r , radiální délka vzduchové mezery δ , počet závitů vinutí statoru N , výška jha statoru h_{sy} , výška drážky rotoru h_r a šířka drážky rotoru b_r . Vnější průměr statoru a délka rotoru je zachována stejná jako u původního modelu stroje. Rozsahy pro optimalizované parametry jsou vypsány v tabulce 5.2. Rozsah pro výšku drážky rotoru je vztažen k průměru rotoru. Rozsah pro šířku drážky rotoru je vztažen k drážkové rozteči rotoru. Kromě těchto parametrů je zapotřebí pro každý model vypočítat v jazyce Python odpovídající hodnotu indukčnosti čela vinutí jedné fáze statoru L_{ew} , odporu jedné fáze statorového vinutí R_w a vodivosti rotorového materiálu zohledňující čela a radiální drážky rotoru.

Tab. 5.2: Rozsahy optimalizovaných parametrů.

Značka	Jenotka	MIN	MAX
D_r	mm	20	38
δ	mm	0,6	2,5
N	–	20	40
h_{sy}	mm	6	12
h_r	mm	$0,15 \cdot D_r$	$0,25 \cdot D_r$
b_r	mm	$0,05 \cdot \tau_{ur}$	$0,2 \cdot \tau_{ur}$

5.1.3 Nastavení parametrů optimalizačního algoritmu

Vytvořený optimalizační algoritmus NSGA-II má několik nastavitelných parametrů, kterými lze částečně ovlivnit efektivitu a kvalitu optimalizace. Pro výběr rodičů v tomto algoritmu byl zvolen turnajový výběr popsáný v kapitole 3.3.5. Zde lze ovlivnit velikost turnaje (tournament size), tj. počet náhodně vybraných jedinců, z nichž budou vybráni dva nejlepší jedinci pro křížení. Křížení bylo zvoleno vícebodové. To

znamená, že u každého parametru stroje (např. průměr statoru, počet závitů vinutí statoru, atd.) se rozhodne, zda bude potomkovi předán od prvního nebo druhého rodiče. Pravděpodobnost předání od každého z rodičů lze řídit pomocí parametru křížení. Dále lze ovlivnit pravděpodobnost mutace, velikost počáteční populace, počet generací a počet jedinců v generaci. Pro vytvoření počáteční populace byla zvolena následující strategie. V rámci rozsahů optimalizovaných parametrů došlo k vydělení velikostí počáteční populace. To zajistí rovnoměrné rozložení hodnot v rámci daného optimalizovaného parametru. K vytvoření jednotlivých jedinců pak byla využita nahodilost, kdy se hodnoty v rámci daného optimalizovaného parametru náhodně promíchaly. Přehled zvolených parametrů optimalizačního algoritmu je v tabulce 5.3.

Tab. 5.3: Parametry optimalizačního algoritmu.

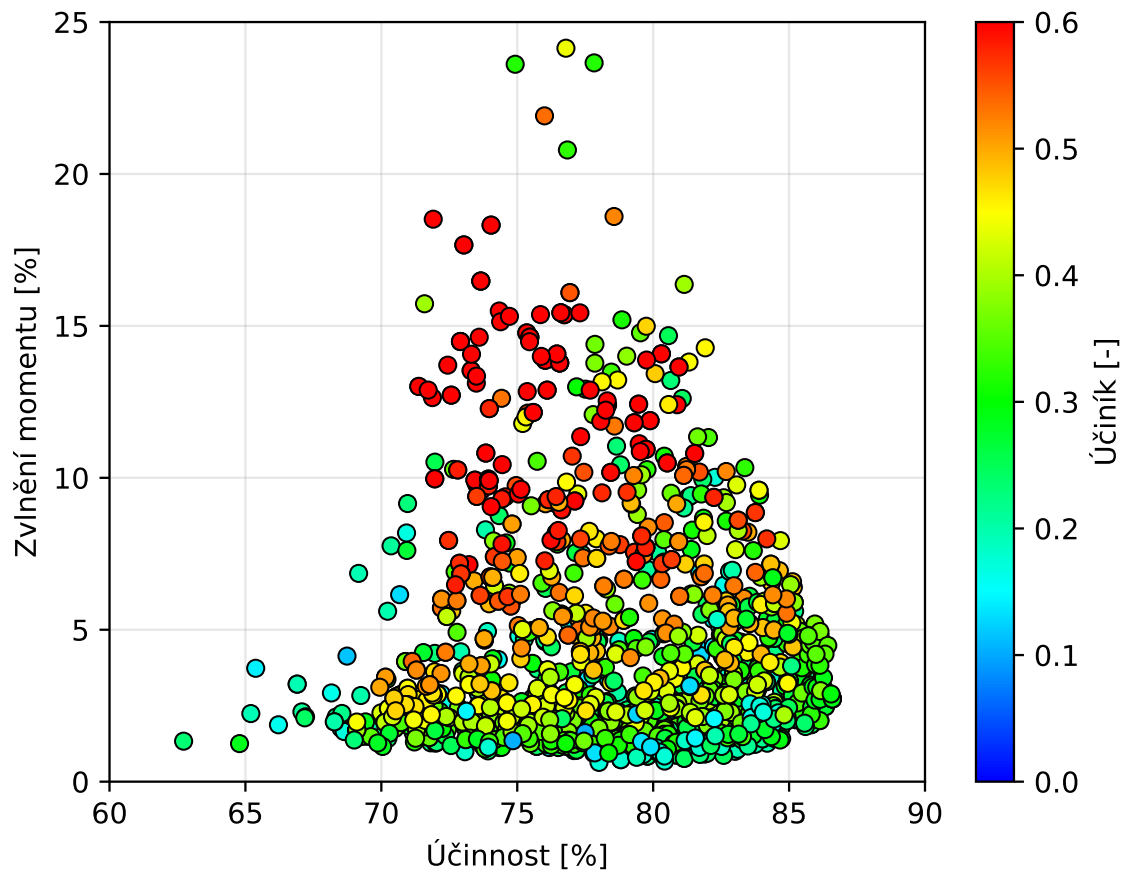
Velikost počáteční populace	1000
Počet generací	9
Počet jedinců v generaci	100
Velikost turnaje	8
Křížení	0,5
Pravděpodobnost mutace	0,1

5.2 Výsledky optimalizace

Tato kapitola je věnována vyhodnocení výsledků optimalizace vysokootáčkového asynchronního stroje 2,5 kW. Optimalizován byl výchozí model stroje s navrženými úpravami pro zvýšení účinnosti, který byl analyzován v kapitole 4.3. Celkově bylo vyhodnoceno 1900 modelů. Po vyfiltrování nevyhovujících jedinců (špatná geometrie, neustálení přechodných jevů, atd.) byl celkový počet vyhodnocených jedinců snížena na 1656.

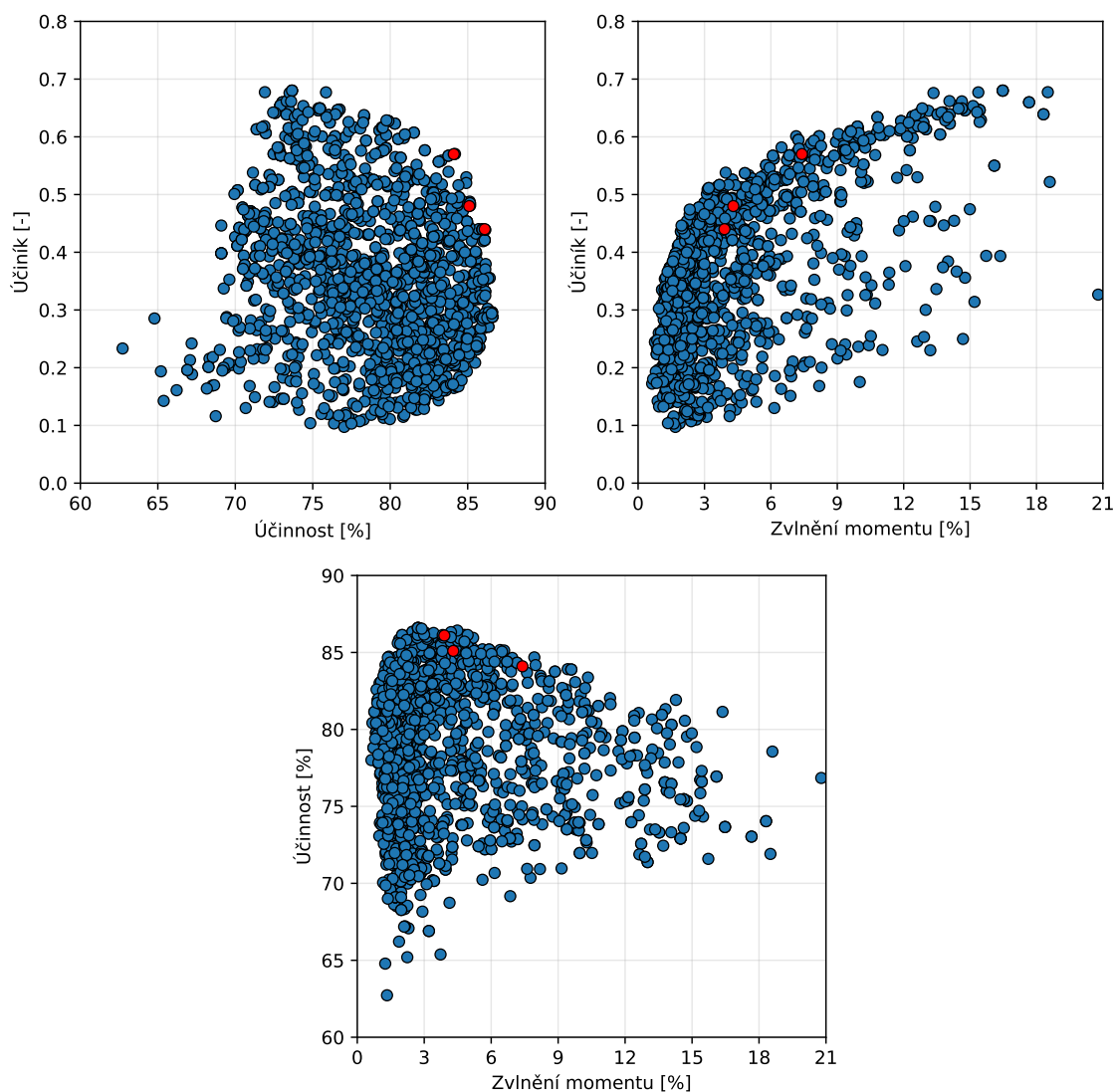
Hlavní prioritou této optimalizace bylo zvýšit účinnost stroje při zachování výkonu na hřídeli 2,5 kW. Jako doplňující optimalizační cíl byla zvolena maximalizace účinníku a minimalizace zvlnění momentu. Srovnání jednotlivých modelů z hlediska optimalizačních cílů (účinnost, účinník a zvlnění momentu) je graficky znázorněno na obrázku 5.2. Na obrázku 5.3 jsou zobrazeny výsledky optimalizace vždy pouze z hlediska dvou výstupních parametrů. Červenými body jsou vyznačena zajímavá řešení,

kteřá budou dále analyzována. Z obrázku 5.3 je patrné, že při narůstajícím účinníku roste také zvlnění momentu, což je dáno menší radiální délkou vzduchové mezery, která posiluje vyšší harmonické složky průběhu magnetické indukce ve vzduchové mezeře. Současně se vliv vyšších harmonických negativně projevuje i na účinnosti, která je nižší v důsledku vyšších ztrát vířivými proudy na povrchu rotoru.



Obr. 5.2: Výsledky optimalizace stroje 2,5 kW pomocí algoritmu NSGA-II.

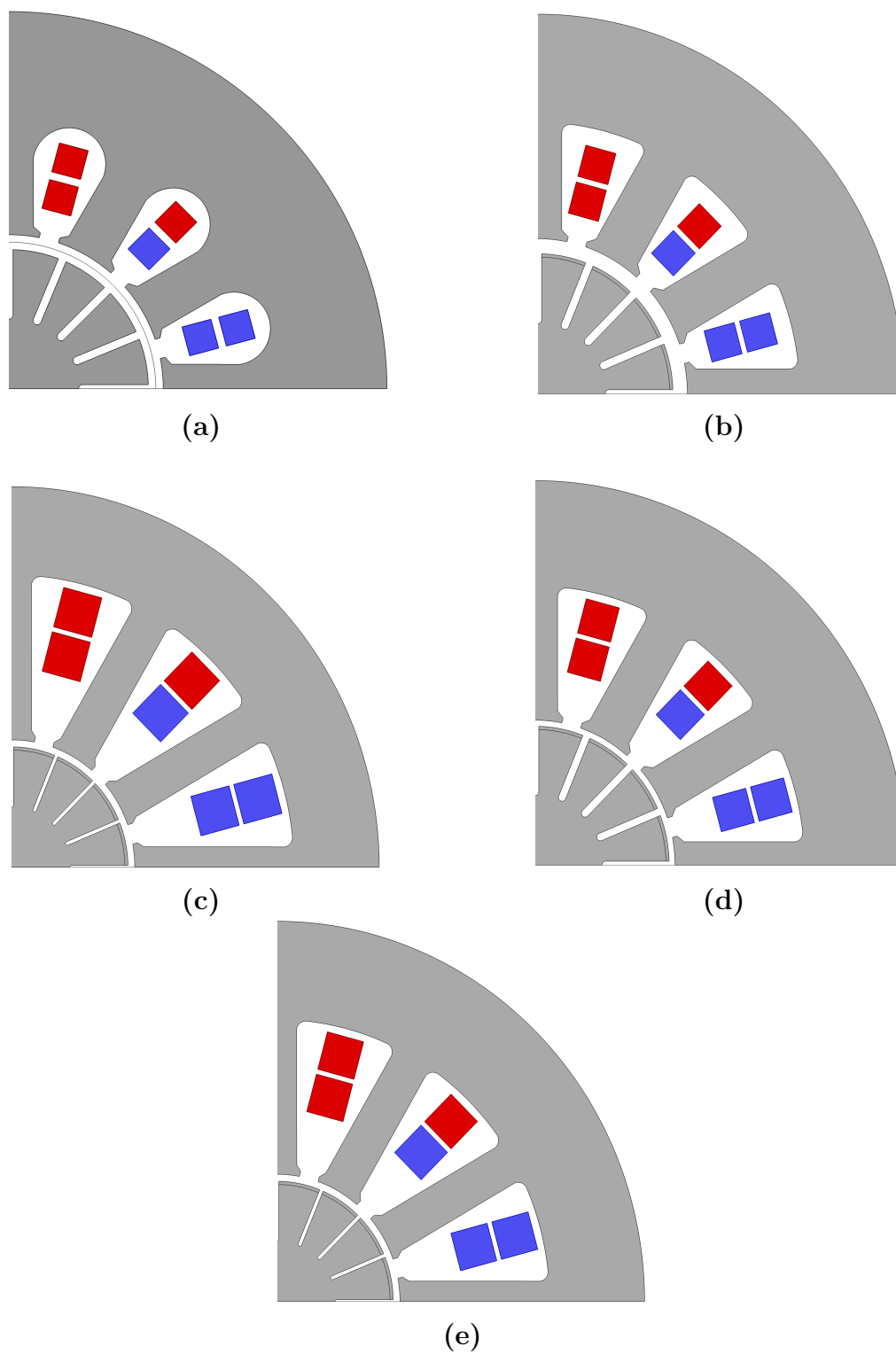
Z obrázku 5.3 je patrné, že drtivá většina modelů s účinností vyšší než 84 % má přijatelné zvlnění momentu. Pro snadnější výběr zajímavých modelů byla konečná množina optimalizovaných řešení omezena na modely s účinností nad 84 % a s účinníkem nad 0,4. V rámci této množiny pak byl nalezen model s nejvyšší účinností 86,1 %. Model s nejvyšším účinníkem dosahoval hodnoty 0,57. Dále bylo vybráno kompromisní řešení s účinností 85,1 % a s účinníkem 0,48. Tyto vybrané modely vysokootáčkového asynchronního stroje jsou v kapitole 5.3 analyzovány pomocí elektromagnetického výpočtu v programu Ansys Maxwell. Je zde také provedeno srovnání s vchozím modelem a upraveným původním modelem.



Obr. 5.3: Výsledky optimalizace vysokootáčkového asynchronního stroje 2,5 kW.

5.3 Srovnání navržených strojů

Na obrázku 5.4 jsou srovnány geometrie výchozích a optimalizovaných návrhů vysokootáčkového asynchronního stroje 2,5 kW. Je patrné, že v případě optimalizovaného modelu (c) s nejvyšší účinností a modelu (e) s kompromisními výstupními parametry (účinnost, účíník a zvlnění momentu) jsou drážky rotoru výrazně užší než u zbývajících modelů. Také průměr rotoru je u těchto modelů menší. U všech třech optimalizovaných modelů je pak podstatně menší radiální délka vzduchové mezery ve srovnání s výchozím modelem. Vstupní parametry (rozměry, atd.), materiály a topologie jednotlivých strojů jsou porovnány v tabulce 5.4.



Obr. 5.4: Srovnání geometrií jednotlivých modelů stroje 2,5 kW (a) výchozí, (b) výchozí s úpravami, (c) optimalizovaný s nejvyšší účinností, (d) optimalizovaný s nejvyšším účíníkem a (e) optimalizovaný kompromisní

Tab. 5.4: Srovnání vstupních parametrů, materiálů a topologií výchozích a optimalizovaných strojů 2,5 kW.

Komponenta	Výchozí	Upravený	Opt 1	Opt 2	Opt 3
Vnější průměr rotoru [mm]	28,0	28,0	24,0	27,4	24,0
Délka vzduchové mezery [mm]	1,5	1,5	0,7	0,6	0,7
Výška jha statoru [mm]	10,9	10,8	8,8	10,4	9,8
Výška rotorové drážky [mm]	7,0	7,0	6,0	6,85	6,0
Šířka rotorové drážky [mm]	0,83	0,83	0,38	0,75	0,38
Počet závitů vinutí statoru	32	32	32	36	36
Měděné konce rotoru	NE	ANO			
Radiální drážkování	NE	ANO			
Materiál statorového svazku	NO10	10JNEX900			
Materiál rotoru	41CrMo4				
Axiální drážkování	ANO				

Optimalizované modely byly přepočítány pomocí elektromagnetického výpočtu v programu Ansys Maxwell. Pro následné vyhodnocení byl proveden export důležitých výstupních parametrů. V tabulce 5.5 jsou srovnány důležité výstupní parametry výchozích a optimalizovaných návrhů vysokootáčkového asynchronního stroje 2,5 kW. Optimalizovaný model s nejvyšší účinností je v tabulce 5.4, 5.5 a 5.6 označen jako Opt 1, model s nejvyšším účínkem je označen jako Opt 2 a zvolené kompromisní řešení je označeno jako Opt 3.

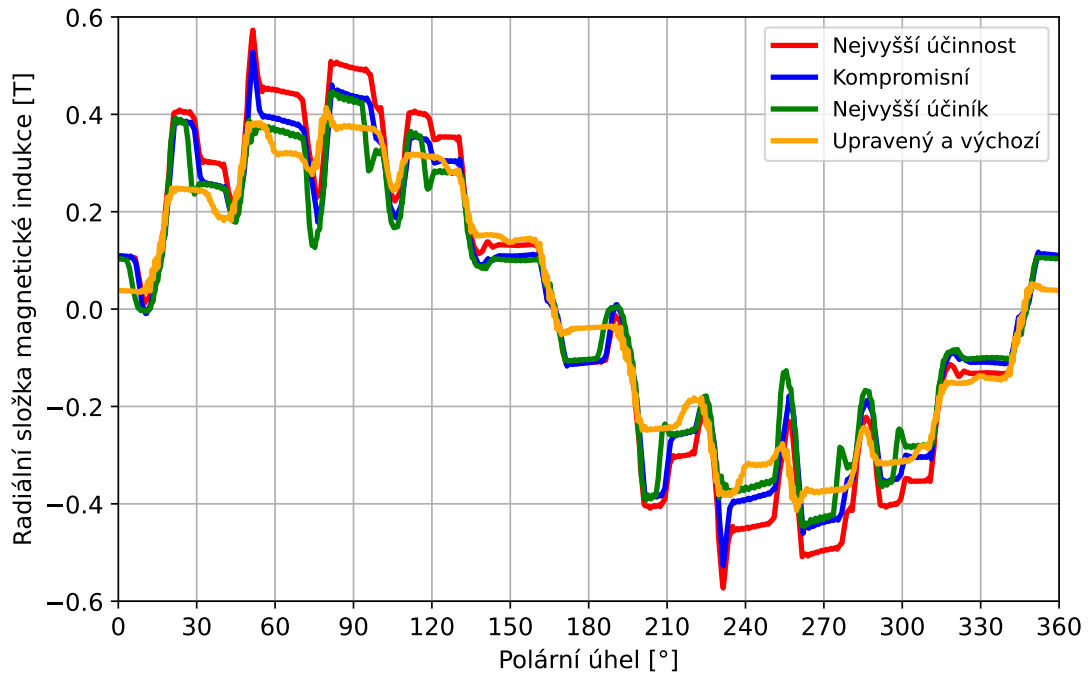
Tab. 5.5: Srovnání výstupních parametrů jednotlivých strojů 2,5 kW.

Parametr	Výchozí	Upravený	Opt 1	Opt 2	Opt 3
Moment na hřídeli [mNm]	160,1	157,1	158,2	158,4	161,3
Otáčky motoru [min^{-1}]	149 090	151 980	150 938	150 706	148 000
Statorový proud [A]	14,6	14,3	10,4	8,2	9,5
Zvlnění momentu [%]	1,5	1,6	3,9	7,4	4,3
Účíník [-]	0,34	0,33	0,44	0,57	0,48
Účinnost [%]	80,5	83,3	86,1	84,1	85,1
Ztráty v železe statoru [W]	82,1	49,6	69,7	47,8	50,7
Ztráty ve vinutí statoru [W]	148,5	129,4	42,0	44,8	48,9
Ztráty v rotoru [W]	186,7	121,8	183,0	208,5	236,5
Třecí ztráty [W]	187,9	201,4	108,8	171,4	102,5
Celkové ztráty [W]	605,2	502,2	403,5	472,5	438,6

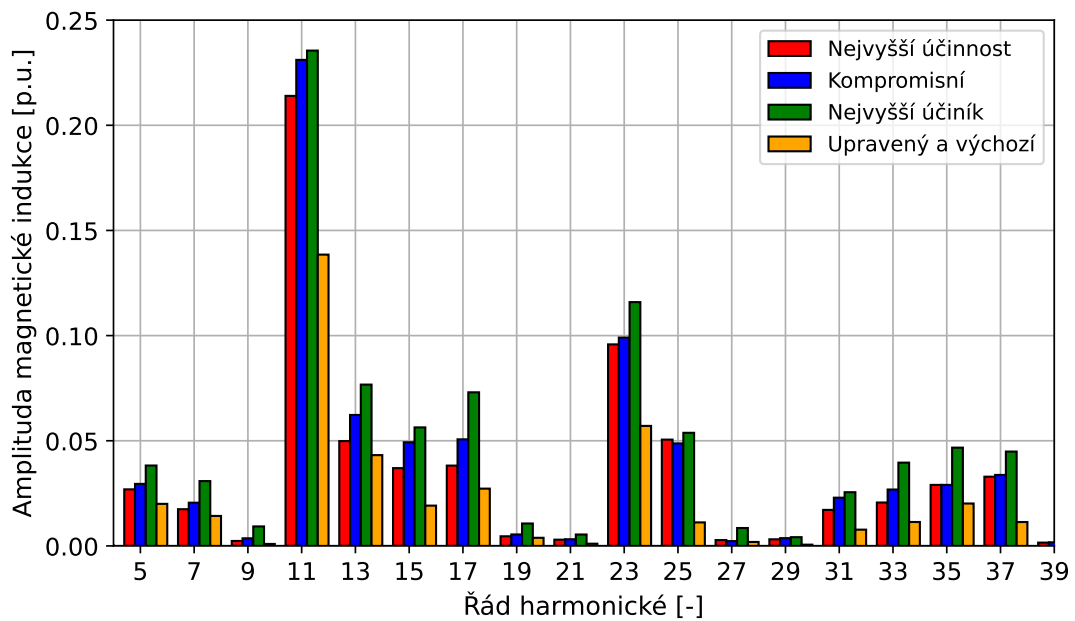
Optimalizovaný model stroje s nejvyšší účinností 86,1 % disponuje nejnižšími ztrátami ve vinutí statoru. To je dáno kromě většího průřezu vodičů také nízkou velikostí statorového proudu, díky poměrně malé radiální délce vzduchové mezery. Pozitivem nízkého statorového proudu je také vyšší účinník ve srovnání s výchozími návrhy. Tento model má nejmenší výšku statorového jha a úzké zuby statoru, což se projevilo vyššími ztrátami v železe statoru. Tyto ztráty má vyšší pouze výchozí model, který však uvažuje plechy statoru NO10, které mají v porovnání s plechy 10JNEX900 zhruba dvojnásobné měrné ztráty. Ztráty třením rotoru o vzduch jsou závislé na třetí mocnině průměru rotoru. Díky menšímu průměru rotoru jsou tak třecí ztráty tohoto stroje poměrně nízké. Ztráty vířivými proudy na povrchu rotoru jsou srovnatelné s výchozím návrhem, který však nedisponoval radiálním drážkováním rotoru. Příčinou je zhruba poloviční radiální délka vzduchové mezery, která způsobuje posílení vyšších harmonických složek průběhu magnetické indukce ve vzduchové mezeře. Vyšší harmonické mají také nepříznivý vliv na zvlnění momentu, které je vyšší oproti původním návrhům.

Optimalizovaný model s nejvyšším účinníkem 0,57 má díky nejmenší radiální délce vzduchové mezery 0,6 mm nejmenší velikost statorového proudu. Takto malá vzduchová mezera má však za následek posílení vyšších harmonických složek průběhu magnetické indukce ve vzduchové mezeře. To se projevilo nárůstem ztrát vířivými proudy na povrchu rotoru. Dalším negativním důsledkem je největší zvlnění momentu ze všech srovnávaných strojů. I přes menší velikost statorového proudu má tento model stroje vyšší ztráty ve vinutí než optimalizovaný model s nejvyšší účinností. To je dáno vyšším odporem vinutí v důsledku většího počtu závitů vinutí statoru a menšího průřezu jednotlivých vodičů. Průměr rotoru je větší než u ostatních optimalizovaných modelů, což se projevilo vyššími třecími ztrátami.

Jako poslední byl zkoumán model s kompromisními výstupními parametry. Účinnost je 85,1 %, účinník je 0,48 a zvlnění momentu je 4,3 %. Tento model má nejvyšší ztráty vířivými proudy ze všech srovnávaných modelů. Ve srovnání s modelem s nejvyšší účinností má většinu vstupních parametrů shodnou. Má však vyšší počet závitů statorového vinutí a dochází tak k nárůstu momentu na hřídeli. To se projeví větším skluzem a tedy i větší frekvencí rotorových proudů, které vytlačují magnetické siločáry k povrchu rotoru. Střední část rotoru je tak magneticky hůře využita, což je patrné i z obrázku 5.7. Sycení povrchu rotoru roste, což způsobuje hlubší penetraci vířivých proudů do rotoru. Nižší otáčky pak mají výhodu ve snížení ztrát třením.



Obr. 5.5: Průběhy radiální složky magnetické indukce ve vzduchové mezeře zkoumaných strojů 2,5 kW.

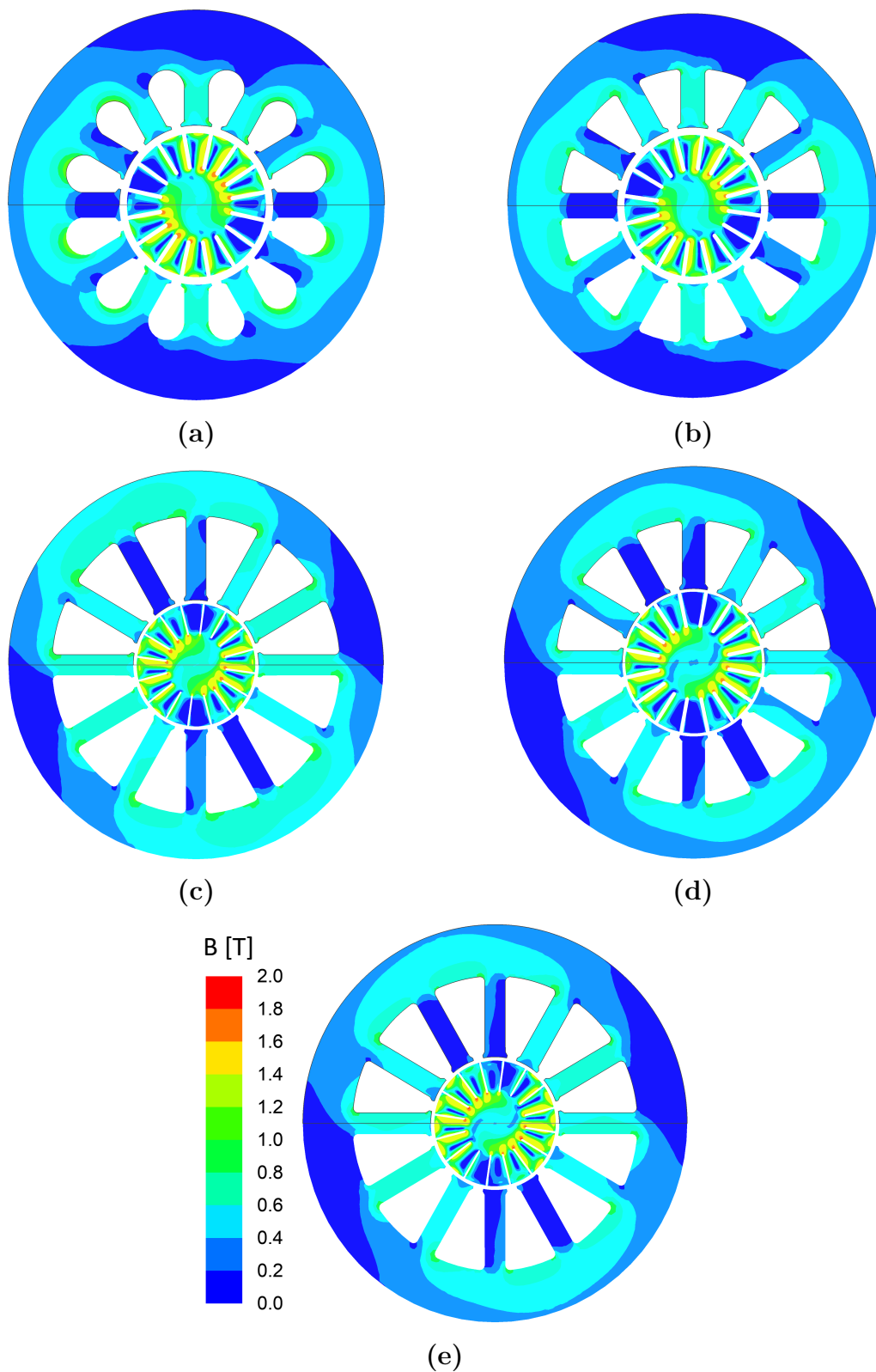


Obr. 5.6: Amplitudová spektra průběhů radiální složky magnetické indukce ve vzduchové mezeře zkoumaných strojů 2,5 kW.

Jelikož mají vyšší harmonické složky průběhu magnetické indukce ve vzduchové mezeře velký vliv jak na ztráty v rotoru, tak také na zvlnění momentu, jsou na obrázku 5.5 porovnány tyto průběhy pro jednotlivé modely strojů. Pro lepší přehlednost bylo pomocí Fourierovy transformace následně získáno amplitudové spektrum každého průběhu v poměrných jednotkách viz. obrázek 5.6. Bázovou hodnotou byla zvolena vždy amplituda základní harmonické složky. Ta má velikost pro výchozí a upravený model stroje 0,375 T, pro optimalizovaný model s nejvyšší účinností 0,435 T, pro optimalizovaný model s nejvyšším účínkem 0,35 T a pro optimalizovaný model s kompromisními výstupními parametry 0,381 T.

Z amplitudových spekter průběhů magnetické indukce ve vzduchové mezeře na obrázku 5.6 je patrné, že nejvýraznější vyšší harmonické složky má optimalizovaný model s nejvyšším účínkem. Je to způsobeno malou vzduchovou mezerou tohoto stroje, která má zásadní vliv na velikost účínku. S rostoucí vzduchovou mezerou roste velikost magnetizačního proudu a účínk klesá. V důsledku takto výrazných vyšších harmonických má tento model stroje největší zvlnění momentu ze všech srovnávaných strojů. Upravený výchozí model stroje má zdaleka nejmenší ztráty vířivými proudy na povrchu rotoru. Důvod je patrný jak z porovnání amplitudových spekter, tak také ze samotných průběhů magnetické indukce. Průběh magnetické indukce ve vzduchové mezeře pro upravený a výchozí model stroje je nejbližší požadovanému sinusovému průběhu. Z porovnání těchto dvou strojů je patrné, jak důležitou roli má v případě účinnosti radiální drážkování rotoru, které výrazně přispívá ke snížení ztrát vířivými proudy na jeho povrchu. Vysoký účínk lze zajistit převážně zmenšením délky vzduchové mezery, což však vede k posílení vyšších harmonických složek průběhu magnetické indukce ve vzduchové mezeře, které jsou zodpovědné za značné ztráty rotoru. Nebýt radiálního drážkování, tak jsou ztráty rotoru optimalizovaných strojů výrazně vyšší.

Obrázek 5.7 znázorňuje rozložení magnetické indukce v řezu jednotlivých srovnávaných strojů. Tabulka 5.6 pak srovnává velikost magnetické indukce uprostřed zubu a jha statoru v nejvíce sycených místech jednotlivých strojů. Z tohoto srovnání je patrné, že po úpravách na zvýšení účinnosti provedených na výchozím modelu stroje došlo v důsledku změny materiálu plechů a zvětšení průřezu statorových drážek k nárůstu sycení statorových plechů. Největší sycení statoru má optimalizovaný stroj s nejvyšší účinností. To je dáno nejmenší výškou statorového jha a úzkými zuby statoru. Optimalizovaný stroj s kompromisními parametry má velmi podobnou geometrii jako model s nejvyšší účinností. Má však vyšší jho statoru, což snižuje sycení statorových plechů. Rozdíl je také v počtu závitů, který je u kompromisního řešení větší. To přispívá k dalšímu snížení sycení statorových plechů.



Obr. 5.7: Rozložení magnetické indukce v řezu stroje 2,5 kW (a) výchozí, (b) výchozí s úpravami, (c) optimalizovaný s nejvyšší účinností, (d) optimalizovaný s nejvyšším účíníkem a (e) optimalizovaný kompromisní

Tab. 5.6: Srovnání magnetické indukce uprostřed zubu a jha statoru v nejvíce syce-
ných místech jednotlivých strojů 2,5 kW.

	Výchozí	Upravený	Opt 1	Opt 2	Opt 3
Jho statoru [T]	0,48	0,55	0,68	0,51	0,54
Zub statoru [T]	0,61	0,63	0,77	0,61	0,68

Závěr

Tato diplomová práce je zaměřena na problematiku multi-kriteriální optimalizace v oblasti elektrických strojů. Hlavním cílem práce je návrh úprav pro zvýšení účinnosti výchozího vysokootáčkového asynchronního stroje 2,5 kW a jeho následná optimalizace pomocí genetického algoritmu NSGA-II.

V první kapitole je popsáno rozdělení vysokootáčkových strojů včetně jejich výhod a nevýhod. Byly také shrnuty podstatné informace k problematice návrhu vysokootáčkových strojů, který se skládá z elektromagnetické, mechanické a tepelné části.

Druhá kapitola je věnována srovnání topologií rotoru, které se používají ve vysokootáčkových asynchronních strojích. Byl srovnán plný hladký rotor, axiálně drážkovaný plný rotor, plný rotor potažený měděnou vrstvou a plný rotor s klecí nakrátko. Následně byly shrnuty materiály používané pro vysokootáčkové asynchronní stroje. Podstatná část této kapitoly je věnována ztrátám ve vysokootáčkových asynchronních strojích. Tyto poznatky byly dále využity pro návrh úprav na zvýšení účinnosti zadaného stroje.

Třetí kapitola je zaměřena na obecné seznámení s problematikou multi-kriteriální optimalizace. V úvodu jsou zde popsány rozdíly mezi multi-kriteriální optimalizací s ideálním postupem a multi-kriteriální optimalizací založené na preferencích. Tyto dva přístupy jsou posouzeny zejména z hlediska praktičnosti a subjektivity. Dále je tato kapitola zaměřena na základní rozdělení a popis nejznámějších optimalizačních algoritmů, jedná se o: optimalizaci hejnem částic, simulované žíhání, horolezecký algoritmus a samo-organizující se migrační algoritmus. Jako poslední je zde detailně popsán algoritmus NSGA-II, který byl využit pro optimalizaci návrhu elektrického stroje v této práci.

Ve čtvrté kapitole je provedena analýza zadaného axiálně drážkovaného vysokootáčkového asynchronního stroje. Na základě zadaných rozměrů byl vytvořen 2D model stroje v programu ANSYS Maxwell, který byl dále analyzován pomocí metody konečných prvků. Účinnost tohoto stroje dosahuje 80,5 % při jmenovitém výkonu na hřídeli 2 500 W. Ztráty v železe statoru jsou ve stroji zastoupeny ze 14 %, ztráty ve vinutí statoru ze 24 %, třetí ztráty z 31 % a povrchové ztráty tvoří 31 % celkových ztrát. Na základě těchto údajů bylo přistoupeno v další části této práce k následujícím úpravám stroje: statorové plechy s nižšími měrnými ztrátami (10JNEX900), radiální drážkování rotoru, měděné konce na rotoru a změna tvaru statorových drážek. Tyto úpravy byly nejdříve zkoumány jednotlivě a jejich účinek byl ověřen pomocí numerických výpočtů v programu Ansys Maxwell. Jako nejúčinnější se jeví varianta,

kdy se využívá měděných konců rotoru spolu s radiálním drážkováním aktivní části rotoru. U tohoto modelu se účinnost zvětší o 1,4 % na 81,9 %. Nicméně všechny zkoumané varianty vedly ke snížení celkových ztrát. Proto bylo přistoupeno ke kombinaci všech uvedených úprav. Takto upravený stroj měl účinnost 83,3 % při výkonu na hřídeli 2 500 W. To je o 2,8 % vyšší účinnost než u zadaného stroje. Velikost jednotlivých ztrát se po úpravách změnila takto: ztráty ve vinutí se snížily o 12,9 % díky menšímu odporu vinutí, ztráty v železe statoru se snížily o 39,6 % díky menším měrným ztrátám použitých plechů 10JNEX900, povrchové ztráty rotoru se snížily o 34,8 % díky radiálnímu drážkování rotoru s měděnými konci a ztráty třením se v důsledku vyšších otáček motoru zvýšily o 7,2 %.

Pátá kapitola se věnuje už samotné optimalizaci upraveného modelu vysokootáčkového asynchronního stroje 2,5 kW. V případě elektrického stroje se ve většině případů jedná o problematiku s více optimalizačními cíli. Jako vhodný optimalizační přístup byla zvolena multi-kriteriální optimalizace s ideální postupem. Hlavním důvodem je menší míra subjektivity a větší praktičnost v porovnání s multi-kriteriální optimalizací založené na preferencích. To se projeví zejména v případě většího množství optimalizačních cílů. Jako optimalizační cíle byla zvolena maximalizace účinnosti, maximalizace účinníku a minimalizace zvlnění momentu. K optimalizaci pak byly vybrány tyto parametry: průměr rotoru D_r , radiální délka vzduchové mezery δ , počet závitů vinutí statoru N , výška jha statoru h_{sy} , výška drážky rotoru h_r a šířka drážky rotoru b_r . Vnější průměr statoru a délka rotoru je zachována stejná jako u původního modelu stroje. Jako optimalizační algoritmus byl zvolen zástupce genetických algoritmů NSGA-II. Tento algoritmus byl napsán v jazyce Python, kde byla mimo jiné vytvořena také celá komunikace mezi algoritmem a programem Ansys Maxwell. Dále byly zvoleny parametry samotného optimalizačního algoritmu (velikost počáteční populace, velikost turnaje, křížení, pravděpodobnost mutace, počet generací a počet jedinců v generaci).

Počáteční populace obsahuje 1000 jedinců. Při optimalizaci bylo propočítáno 9 generací o 100 jedincích. Celkově tak bylo propočítáno 1900 modelů. Po vyfiltrování nevyhovujících jedinců (špatná geometrie, neustálení přechodných jevů, atd.) byl celkový počet vyhodnocených jedinců snížen na 1656. Pro zjednodušení výběru kvalitních strojů byla dále množina řešení zúžena na modely strojů dosahujících minimální účinnosti 84 % a minimálního účinníku 0,4. Z této množiny byl následně vybrán model s nejvyšší účinností 86,1 %, který disponuje účinníkem 0,44. Dále byl vybrán model s nejvyšším účinníkem 0,57 dosahující účinnosti 84,1 %. Jako poslední bylo zvoleno kompromisní řešení s účinností 85,1 % a účinníkem 0,48. Tyto modely byly dále analyzovány pomocí elektromagnetického výpočtu v programu Ansys Maxwell.

Závěrečná část této práce byla věnována porovnání zvolených optimalizovaných modelů s výchozím a upraveným modelem vysokootáčkového asynchronního stroje. Srovnány byly nejen výstupní parametry jako je účinnost, účiník, zvlnění momentu a jednotlivé ztráty, ale také geometrie, rozložení magnetické indukce v řezu a průběhy magnetické indukce ve vzduchové mezeře jednotlivých strojů. Optimalizovaný model s kompromisními výstupními parametry má v provnání s upraveným modelem stroje vyšší účinnost o 1,8 %. Ztráty ve vinutí se snížily o 62,2 % díky výrazně nižšímu statorovému proudu a menšímu odporu vinutí, ztráty v železe statoru se zvýšily o 2,2 % v důsledku většího sycení statoru a povrchové ztráty rotoru se zvýšily o 94,2 % kvůli daleko menší radiální délce vzduchové mezery, která značně posílila vyšší harmonické složky průběhu magnetické indukce ve vzduchové mezeře. Ztráty třetím se v důsledku nižších otáček motoru a menšího průměru rotoru snížily o 49,1 %. V porovnání s výchozím strojem bez úprav má optimalizovaný model s kompromisními výstupními parametry vyšší účinnost o 4,6 %. Úspěšně se tedy podařilo snížit ztráty ve vysokootáčkovém asynchronním stroji, a to při zachování výkonu na hřídeli 2,5 kW. K tomu přispěl především radiálně drážkovaný rotor s měděnými konci a použití statorových plechů s nižšími měrnými ztrátami. Optimalizací geometrie stroje, pak bylo dosaženo snížení ztrát ve vinutí a ztrát třením. Díky menší vzduchové mezeře došlo také k navýšení účiníku.

Literatura

- [1] GERADA, David; MEBARKI, Abdeslam; BROWN, Neil L.; GERADA, Chris; CAVAGNINO, Andrea et al. High-Speed Electrical Machines: Technologies, Trends, and Developments. Online. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2014, roč. 61, č. 6, s. 2946-2959. ISSN 0278-0046. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/TIE.2013.2286777>. [cit. 2021-10-05].
- [2] LI, Silong; LI, Yingjie; CHOI, Wooyoung a SARLIOGLU, Bulent. High-Speed Electric Machines: Challenges and Design Considerations. Online. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*. 2016, roč. 2, č. 1, s. 2-13. ISSN 2332-7782. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/TTE.2016.2523879>. [cit. 2021-10-21].
- [3] DE ALMEIDA, Anibal T.; FERREIRA, Fernando J. T. E. a QUINTINO, Andre. Technical and economical considerations on super high-efficiency three-phase motors. Online. In: *48th IEEE Industrial & Commercial Power Systems Conference*. IEEE, 2012, s. 1-13. ISBN 978-1-4673-0651-5. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/ICPS.2012.6229618>. [cit. 2024-01-14].
- [4] MA XIAOHE; SU RONG; TSENG KING JET; WANG SHUAI; ZHANG XIAOLONG et al. Review of high speed electrical machines in gas turbine electrical power generation. Online. In: *TENCON 2015 - 2015 IEEE Region 10 Conference*. IEEE, 2015, s. 1-9. ISBN 978-1-4799-8639-2. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/TENCON.2015.7372765>. [cit. 2023-02-24].
- [5] ARKKIO, A.; JOKINEN, T. a LANTTO, E. Induction and permanent-magnet synchronous machines for high-speed applications. Online. In: *2005 International Conference on Electrical Machines and Systems*. Tianjin, Čína: IEEE, 2005, 871-876 Vol. 2. ISBN 7-5062-7407-8. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/ICEMS.2005.202668>. [cit. 2021-10-17].
- [6] BARTA, Jan; UZHEGOV, Nikita; LOSAK, Petr; ONDRUSEK, Cestmir; MACH, Martin et al. Squirrel-Cage Rotor Design and Manufacturing for High-Speed Applications. Online. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2019, roč. 66, č. 9, s. 6768-6778. ISSN 0278-0046. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/TIE.2018.2879285>. [cit. 2021-10-16].
- [7] HE, Tianran; ZHU, Ziqiang; EASTHAM, Fred; WANG, Yu; BIN, Hong et al. Permanent Magnet Machines for High-Speed Applications. Online. *World Electric Vehicle Journal*. 2022, roč. 13, č. 1. ISSN 2032-6653. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/wevj13010018>. [cit. 2023-02-26].

- [8] XU, Hao; GENG, Haipeng; LIN, Hao; QI, Yonghong a YIN, Xiliang. Rotor Design and Analysis of a High Speed Permanent Magnet Synchronous Motor for Cryogenic Centrifugal pump. Online. In: *2019 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA)*. Tianjin, Čína: IEEE, 2019, s. 1756-1760. ISBN 978-1-7281-1698-3. ISSN 2152-744X. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/ICMA.2019.8816583>. [cit. 2021-10-17].
- [9] PYRHÖNEN, Juha; JOKINEN, Tapani a HRABOVCOVÁ, Valéria. *Design of rotating electrical machines*. 2nd edition. Chichester: Wiley, 2014. ISBN 978-1118581575.
- [10] BOGLIETTI, Aldo; CAVAGNINO, Andrea; STATON, David; SHANEL, Martin; MUELLER, Markus et al. Evolution and Modern Approaches for Thermal Analysis of Electrical Machines. Online. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2009, roč. 56, č. 3, s. 871-882. ISSN 0278-0046. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/TIE.2008.2011622>. [cit. 2023-02-25].
- [11] BÁRTA, Jan. *Návrh elektrického stroje 6 kW, 120 000 ot/min pro turbocirkulátor hélia*. Online, Dizertační práce, vedoucí doc. Ing. Čestmír Ondrůšek, CSc. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2018. [cit. 2021-10-16].
- [12] HUPPUNEN, Jussi. *High-Speed Solid-Rotor Induction Machine - Electromagnetic Calculation and Design*. Online, Diss. Acta Universitatis Lappeenrantaensis 197. Lappeenranta: Lappeenranta University of Technology, 2004. ISBN 951-764-944-4. [cit. 2021-10-20].
- [13] KLIMA, Jiri a VITEK, Ondrej. Analysis of high-speed induction motor. Online. In: *Proceedings of the 16th International Conference on Mechatronics - Mechatronika 2014*. IEEE, 2014, s. 85-91. ISBN 978-80-214-4816-2. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/MECHATRONIKA.2014.7018240>. [cit. 2023-02-28].
- [14] KLIMA, Jiri; MACH, Martin a VITEK, Ondrej. Analysis of high speed squirrel cage induction motors. Online. In: *2015 IEEE 15th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC)*. Rome, Italy: IEEE, 2015, s. 1302-1305. ISBN 978-1-4799-7993-6. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/EEEIC.2015.7165358>. [cit. 2023-02-28].
- [15] ZHOU, Hao a WANG, Fengxiang. Comparative study on high speed induction machine with different rotor structures. Online. In: *2007 International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*. Seoul, Korea

- (South): IEEE, 2007, s. 1009-1012. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/ICEMS12746.2007.4411955>. [cit. 2021-11-13].
- [16] MCGUINNESS, Daniel Tunc; GULBAHCE, Mehmet Onur a KOCABAS, Derya Ahmet. A performance comparison of different rotor types for high-speed induction motors. Online. In: *2015 9th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO)*. Bursa, Turkey: IEEE, 2015, s. 584-589. ISBN 978-6-0501-0737-1. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/ELECO.2015.7394606>. [cit. 2021-11-13].
- [17] BÍLEK, Vladimír. *Elektromagnetická analýza a modelování asynchronního stroje s plným rotorem*. Diplomová práce, vedoucí Jan Bárta. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky, 2021.
- [18] KLÍMA, Petr; ONDRŮŠEK, Čestmír a MACH, Martin. Návrh vysokootáčkového asynchronního motoru. Online. *Elektrorevue*. 2021, roč. 23, č. 2, s. 49-54. ISSN 1223-1539. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/214146>. [cit. 2021-10-16].
- [19] AHO, T.; NERG, J. a PYRHONEN, J. Analysing the effect of the rotor coating on the rotor losses of medium-speed solid-rotor induction motor. Online. In: *International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, 2006. SPEEDAM 2006*. Taormina, Italy: IEEE, 2006, s. 103-107. ISBN 1-4244-0193-3. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/SPEEDAM.2006.1649752>. [cit. 2023-03-01].
- [20] OGUZ, Ahmet Hakan; GULBAHCE, Mehmet Onur a KOCABAS, Derya Ahmet. Design and optimization of an axially-slitted high-speed solid rotor induction motor. Online. In: *2015 9th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO)*. Bursa, Turkey: IEEE, 2015, s. 568-573. ISBN 978-6-0501-0737-1. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/ELECO.2015.7394553>. [cit. 2021-10-28].
- [21] GESSESE, Yoseph a BINDER, Andreas. Axially slitted, high-speed solid-rotor induction motor technology with copper end-rings. Online. In: *2009 International Conference on Electrical Machines and Systems*. Tokyo, Japan: IEEE, 2009, s. 1-6. ISBN 978-1-4244-5177-7. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/ICEMS.2009.5382761>. [cit. 2023-03-11].
- [22] AHO, Tuomo. *Electromagnetic Design of a Solid Steel Rotor Motor for Demanding Operation Environments*. Online, Diss, vedoucí Professor Juha Pyrhönen.

- Acta Universitatis Lappeenrantaensis 292. Lappeenranta: Lappeenranta University of Technology, 2007. ISBN 978-952-214-499-7. [cit. 2021-10-20].
- [23] GESSESE, Yoseph; BINDER, Andreas a FUNIERU, Bogdan. Analysis of the effect of radial rotor surface grooves on rotor losses of high speed solid rotor induction motor. Online. In: *SPEEDAM 2010*. Pisa, Italy: IEEE, 2010, s. 1762-1767. ISBN 978-1-4244-4986-6. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/SPEEDAM.2010.5544763>. [cit. 2023-03-11].
- [24] GULBAHCE, Mehmet Onur; MCGUINNESS, Daniel Tunc a KOCABAS, Derya Ahmet. Shielded axially slitted solid rotor design for high-speed solid rotor induction motors. Online. *IET Electric Power Applications*. 2018, roč. 12, č. 9, s. 1371-1377. ISSN 1751-8660. Dostupné z: <https://doi.org/10.1049/iet-epa.2018.5210>. [cit. 2023-04-01].
- [25] MCGUINNESS, Daniel Tunc; GULBAHCE, Mehmet Onur a KOCABAS, Derya Ahmet. Novel rotor design for high-speed solid rotor induction machines. Online. In: *2015 9th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO)*. IEEE, 2015, s. 579-583. ISBN 978-6-0501-0737-1. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/ELECO.2015.7394607>. [cit. 2023-04-01].
- [26] DI NARDO, Mauro; GALLICCHIO, Gianvito; PALMIERI, Marco; MARFOLI, Alessandro; CALZO, Giovanni Lo et al. High Speed Synchronous Reluctance Machines: Materials Selection and Performance Boundaries. Online. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*. S. 1-1. ISSN 2332-7782. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/TTE.2021.3109452>. [cit. 2021-11-12].
- [27] FERNANDO, Nuwantha; VAKIL, Gaurang; ARUMUGAM, Puvan; AMANKWAH, Emmanuel; GERADA, Chris et al. Impact of Soft Magnetic Material on Design of High-Speed Permanent-Magnet Machines. Online. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2017, roč. 64, č. 3, s. 2415-2423. ISSN 0278-0046. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/TIE.2016.2587815>. [cit. 2023-03-17].
- [28] ENOKIZONO, Masato; WAKABAYASHI, Daisuke; TSUCHIDA, Yuji; UENO, Shohei a SODA, Naoya. Core Loss Reduction for High-Speed Motor. Online. In: *2018 XIII International Conference on Electrical Machines (ICEM)*. Alexandroupoli, Greece: IEEE, 2018, s. 2586-2592. ISBN 978-1-5386-2477-7. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/ICELMACH.2018.8506781>. [cit. 2023-03-21].
- [29] KRINGS, Andreas; COSSALE, Marco; TENCONI, Alberto; SOULARD, Juliette; CAVAGNINO, Andrea et al. Magnetic Materials Used in Electrical Machines: A Comparison and Selection Guide for Early Machine Design. Online.

- IEEE Industry Applications Magazine*. 2017, roč. 23, č. 6, s. 21-28. ISSN 1077-2618. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/MIAS.2016.2600721>. [cit. 2023-03-17].
- [30] OU, Jing; LIU, Yingzhen; BREINING, Patrick; GIETZELT, Thomas; WUNSCH, Torsten et al. Study of the Electromagnetic and Mechanical Properties of a High-silicon Steel for a High-speed Interior PM Rotor. Online. In: *2019 22nd International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*. Harbin, Čína: IEEE, 2019, s. 1-4. ISBN 978-1-7281-3398-0. ISSN 2642-5513. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/ICEMS.2019.8921800>. [cit. 2021-11-12].
- [31] CENTNER, Matthias; HANITSCH, Rolf a SCHAFER, Uwe. Comparison of high-speed induction motors employing cobalt-iron and silicon electrical steel. Online. In: *2008 18th International Conference on Electrical Machines*. Vilamoura, Portugal: IEEE, 2008, s. 1-6. ISBN 978-1-4244-1735-3. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/ICELMACH.2008.4799929>. [cit. 2023-03-17].
- [32] ZHAO, Haisen; CHU, Chengyang; ELDEEB, Hassan H.; ZHAN, Yang; XU, Guorui et al. Optimal Design of High-speed Solid Rotor Cage Induction Motors Considering Ferromagnetic Materials Behavior and Manufacturing Process. Online. *IEEE Transactions on Industry Applications*. S. 1-1. ISSN 0093-9994. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/TIA.2020.2984479>. [cit. 2023-03-18].
- [33] LINDH, Pia; IMMONEN, Paula; DI, Chong; DEGANO, Michele a PYRHONEN, Juha. Solid-Rotor Material Selection for Squirrel-Cage High-Speed Solid-Rotor Induction Machine. Online. In: *IECON 2019 - 45th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*. Lisbon, Portugal: IEEE, 2019, s. 1357-1361. ISBN 978-1-7281-4878-6. ISSN 2577-1647. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/IECON.2019.8926736>. [cit. 2023-03-18].
- [34] LÄHTEENMÄKI, Jussi. *Design and Voltage Supply of High-Speed Induction Machines*. Online, doctoral dissertation. Espoo: Helsinki University of Technology, 2002. ISBN 951-666-607-8. [cit. 2021-10-20].
- [35] BIRNKAMMER, Florian; CHEN, Junquan; BACHINSKI PINHAL, Daniel a GERLING, Dieter. Influence of the Modeling Depth and Voltage Level on the AC Losses in Parallel Conductors of a Permanent Magnet Synchronous Machine. Online. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. 2018, roč. 28, č. 3, s. 1-5. ISSN 1558-2515. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/TASC.2018.2801292>. [cit. 2021-11-13].

- [36] REDDY, Patel B. a JAHNS, T. M. Analysis of bundle losses in high speed machines. Online. In: *The 2010 International Power Electronics Conference - ECCE ASIA* -. Sapporo, Japan: IEEE, 2010, s. 2181-2188. ISBN 978-1-4244-5394-8. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/IPEC.2010.5542354>. [cit. 2023-03-19].
- [37] PETROV, G.N. *Elektrické stroje 2*. Praha: Academia, 1982.
- [38] MACH, Martin. *Analýza ztrát asynchronních motorů malého výkonu*. Dizertační práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2015.
- [39] CAJZL, Jakub. *Vysokootáčkový asynchronní stroj*. Bakalářská práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky, 2022.
- [40] CIPÍN, Radoslav. *Modely asynchronních strojů*. Habilitační práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2017.
- [41] DEMS, Maria a KOMEZA, Krzysztof. Performance Characteristics of a High-Speed Energy-Saving Induction Motor With an Amorphous Stator Core. Online. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2014, roč. 61, č. 6, s. 3046-3055. ISSN 0278-0046. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/TIE.2013.2251739>. [cit. 2023-03-21].
- [42] BÁRTA, Jan. The Eddy Current Losses of High-Speed Solid Rotor Induction Machine as Function of the Radial Air-Gap Length. Online. In: *Proceedings of the 22nd Conference STUDENT EEICT 2016*. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2016, s. 507-511. ISBN 978-80-214-5350-0. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/83985>. [cit. 2021-10-23].
- [43] HELLER, Bedřich a HAMATA, Václav. *Přídavná pole, síly a ztráty v asynchronním stroji*. Praha: Nakladatelství Československé akademie věd, 1961.
- [44] YAMAZAKI, Katsumi; SUZUKI, Akihiro; OHTO, Motomichi; TAKAKURA, Teruyuki a NAKAGAWA, Satoshi. Harmonic loss analysis and air-gap optimization of high speed induction motors. Online. In: *2010 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*. Atlanta, GA, USA: IEEE, 2010, s. 3963-3970. ISBN 978-1-4244-5286-6. ISSN 2329-3748. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/ECCE.2010.5617797>. [cit. 2023-03-28].

- [45] KARÁSEK, Ladislav. *Návrh vysokootáčkového motoru 350 kW 40 000 min⁻¹*. Diplomová práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2016.
- [46] KLIMA, Petr; RURA, David a VITEK, Ondrej. Analysis and Reduction of Eddy Current Losses in High-Speed Solid Outer Rotor Induction Machine. Online. In: *2022 International Conference on Electrical Machines (ICEM)*. Valencia, Spain: IEEE, 2022, s. 1022-1026. ISBN 978-1-6654-1432-6. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/ICEM51905.2022.9910785>. [cit. 2023-03-28].
- [47] SVĚTLÍK, Martin. LOSSES AND HEAT IN HIGH-SPEED MACHINES. Online. *Proceedings I of the 26th Conference STUDENT EEICT 2020*. 2020, roč. 26. [cit. 2021-10-24].
- [48] DAI, Wei a BERLEANT, Daniel. Benchmarking Contemporary Deep Learning Hardware and Frameworks: A Survey of Qualitative Metrics. Online. In: *2019 IEEE First International Conference on Cognitive Machine Intelligence (CogMI)*. Los Angeles, CA, USA: IEEE, 2019, s. 148-155. ISBN 978-1-7281-6737-4. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/CogMI48466.2019.00029>. [cit. 2023-10-13].
- [49] HAUPT, Randy L. a HAUPT, S. E. *Practical genetic algorithms*. 2nd ed. Hoboken: John Wiley, 2004. ISBN 9780471455653.
- [50] DEB, Kalyanmoy. *Multi-objective optimization using evolutionary algorithms*. Chichester, New York: John Wiley & Sons, 2001.
- [51] KNEBL, Ladislav. *Návrh a optimalizace ferity asistovaného vysokomomentového synchronního reluktančního motoru*. Online, Disertační práce, vedoucí Ondřej Vítek. Brno: Vysoké učení technické v Brně. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky, 2022. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/203947>. [cit. 2023-10-20].
- [52] BROWNLEE, Jason. *A Gentle Introduction to Stochastic Optimization Algorithms*. Online. Machine Learning Mastery. 2021. Dostupné z: <https://machinelearningmastery.com/stochastic-optimization-for-machine-learning/>. [cit. 2023-10-20].
- [53] MRÁZKOVÁ, Jitka. *Optimalizační metody v oděvní výrobě*. Bakalářská práce. Liberec: Technická univerzita v Liberci, Fakulta textilní, 2005.
- [54] POHL, Jan. *Algoritmus s pravděpodobnostním směrovým vektorem*. Dizertační práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2014.

- [55] BABALOLA, Asegunloluwa Eunice; OJOKOH, Bolanle Adefowoke a ODILI, Julius Beneoluchi. A Review of Population-Based Optimization Algorithms. Online. In: *2020 International Conference in Mathematics, Computer Engineering and Computer Science (ICMCECS)*. Ayobo, Nigeria: IEEE, 2020, s. 1-7. ISBN 978-1-7281-3126-9. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/ICMCECS47690.2020.240856>. [cit. 2023-10-21].
- [56] ADYATAMA, Arga. *Particle Swarm Optimization*. Online. RPubs. 2019. Dostupné z: <https://rpubs.com/argaadya/intro-pso/>. [cit. 2023-10-21].
- [57] LIANG, Frank. *Optimization Techniques: Simulated Annealing*. Online. Medium, Towards data science. 2020. Dostupné z: <https://towardsdatascience.com>. [cit. 2023-10-21].
- [58] *Hill Climbing Algorithm in Artificial Intelligence*. Online. JavaTpoint. Dostupné z: <https://www.javatpoint.com/hill-climbing-algorithm-in-ai>. [cit. 2023-10-22].
- [59] XI, Bowei; LIU, Zhen; RAGHAVACHARI, Mukund; XIA, Cathy H. a ZHANG, Li. A smart hill-climbing algorithm for application server configuration. Online. In: *Proceedings of the 13th international conference on World Wide Web*. New York, NY, USA: ACM, 2004, s. 287-296. ISBN 158113844X. Dostupné z: <https://doi.org/10.1145/988672.988711>. [cit. 2023-10-22].
- [60] KNEBL, Ladislav; BARTA, Jan; BRAMERDORFER, Gerd; VITEK, Ondrej a ONDRUSEK, Cestmir. Multi-Objective Optimization of a Line-Start Synchronous Machine Using a Self-Organizing Algorithm. Online. *IEEE Transactions on Magnetics*. 2021, roč. 57, č. 6, s. 1-4. ISSN 0018-9464. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/TMAG.2021.3056403>. [cit. 2023-11-12].
- [61] KURFÜRST, Jiří. *Optimalizace stroje s permanentními magnety na rotoru pomocí umělé inteligence*. Online, Disertační práce, vedoucí Čestmír Ondrůšek. Brno: Vysoké učení technické v Brně. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky, 2013. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/24951>. [cit. 2023-11-12].
- [62] KRAMER, Oliver. *Genetic Algorithm Essentials*. Cham : Springer International Publishing, 2017. ISBN 978-3-319-52156-5.
- [63] MALLAWAARACHCHI, Vijini. *Introduction to Genetic Algorithms - Including Example Code*. Online. Towards Data Science. 2017. Dostupné z: <https://towardsdatascience.com>. [cit. 2023-11-23].

- [64] PARVEZ, Riyad. *Selection in Evolutionary Algorithm*. 2014.
- [65] DEB, K.; PRATAP, A.; AGARWAL, S. a MEYARIVAN, T. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. Online. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*. 2002, roč. 6, č. 2, s. 182-197. ISSN 1089778X. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/4235.996017>. [cit. 2023-10-14].
- [66] GOLDBERG, David Edward. *Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning*. Boston: Addison-Wesley, 1989. ISBN 978-0-201-15767-3.
- [67] LIM, Dong-Kuk; WOO, Dong-Kyun; YEO, Han-Kyeol; JUNG, Sang-Yong; RO, Jong-Suk et al. A Novel Surrogate-Assisted Multi-Objective Optimization Algorithm for an Electromagnetic Machine Design. Online. *IEEE Transactions on Magnetics*. 2015, roč. 51, č. 3, s. 1-4. ISSN 0018-9464. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/TMAG.2014.2359452>. [cit. 2023-11-25].
- [68] RAHIMI, Iman; GANDOMI, Amir H.; NIKOO, Mohammad Reza a CHEN, Fang. A comparative study on evolutionary multi-objective algorithms for next release problem. Online. *Applied Soft Computing*. 2023, roč. 144. ISSN 15684946. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2023.110472>. [cit. 2023-11-25].
- [69] MAHBUB, Md Shahriar. A comparative study on constraint handling techniques of NSGAI. Online. In: *2020 International Conference on Electrical, Communication, and Computer Engineering (ICECCE)*. IEEE, 2020, s. 1-5. ISBN 978-1-7281-7116-6. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/ICECCE49384.2020.9179174>. [cit. 2023-11-25].
- [70] PARAYOGA, Rachmat a ASIH, Anna Maria Sri. Empirical study of MOPSO and NSGA II comparison in multi-objective location routing problem incorporating the service level of delivery. Online. In: . Indonesia: Department of Mechanical and Industrial Engineering Universitas Gadjah Mada, 2021. Dostupné z: <https://ieomsociety.org/proceedings/2021indonesia/282.pdf>. [cit. 2024-01-03].
- [71] HOJJATI, Ali; MONADI, Mohsen; FARIDHOSSEINI, Alireza a MOHAMMADI, Mirali. Application and comparison of NSGA-II and MOPSO in multi-objective optimization of water resources systems. Online. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*. 2018, roč. 66, č. 3, s. 323-329. ISSN 0042-790X. Dostupné z: <https://doi.org/10.2478/johh-2018-0006>. [cit. 2024-01-03].

- [72] DONG-KUK, Lim; DONG-KYUN, Woo; HAN-KYEOL, Yeo; SANG-YONG, Jung; JONG-SUK, Ro et al. A Novel Surrogate-Assisted Multi-Objective Optimization Algorithm for an Electromagnetic Machine Design. Online. *IEEE Transactions on Magnetics*. 2015, roč. 51, č. 3, s. 1-4. ISSN 0018-9464. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/TMAG.2014.2359452>. [cit. 2024-01-03].
- [73] SILVA, Rodrigo C. P.; LI, Min; RAHMAN, Tanvir a LOWTHER, David A. Surrogate-based MOEA/D for electric motor design with scarce function evaluations. Online. In: *2016 IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation (CEFC)*. IEEE, 2016, s. 1-1. ISBN 978-1-5090-1032-5. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/CEFC.2016.7816151>. [cit. 2024-01-04].
- [74] CHANG, Pei Chann; CHEN, Shih Hsin; ZHANG, Qingfu a LIN, Jun Lin. MOEA/D for flowshop scheduling problems. Online. In: *2008 IEEE Congress on Evolutionary Computation (IEEE World Congress on Computational Intelligence)*. IEEE, 2008, s. 1433-1438. ISBN 978-1-4244-1822-0. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/CEC.2008.4630982>. [cit. 2024-01-04].
- [75] DAVENDRA, Donald a ZELINKA, Ivan. *Self-Organizing Migrating Algorithm: Methodology and Implementation*. Studies in Computational Intelligence, 2016. ISBN 978-3-319-28159-9.

Seznam symbolů a zkratek

CoFe	slitina kobalt-železo
CuAl₂O₃	slitina měď-oxid hlinitý
CuBe	slitina měď-beryllium
CuZr	slitina měď-zirkonium
MOEA/D	multi-kriteriální evoluční algoritmus založený na dekompozici
NSGA-II	non-dominated sorting genetic algorithm II
SiFe	slitina křemík-železo
SOMA	samo-organizující se migrační algoritmus

B	magnetická indukce	[T]
b_1	otevření statorové drážky	[m]
b_r	šířka rotorové drážky 1	[m]
b_{s1}	šířka statorové drážky 1	[m]
b_{s2}	šířka statorové drážky 2	[m]
C	koeficient	[–]
$C_{M,k}$	koeficient tření kruhů rotoru	[–]
$C_{M,r}$	koeficient tření rotoru	[–]
C'	konstanta	[–]
D_r	vnější průměr rotoru	[m]
D_{ri}	průměr hřídele	[m]
$D_{s,out}$	vnější průměr statoru	[m]
E	modul pružnosti	[Pa]
f	frekvence	[Hz]
F_1	skupina řešení 1	[–]
F_2	skupina řešení 2	[–]
F_3	skupina řešení 3	[–]
f_s	napájecí frekvence	[Hz]
g	kladné celé číslo	[–]
h_1	výška statorové drážky 1	[m]
h_2	výška statorové drážky 2	[m]
h_3	výška statorové drážky 3	[m]
h_4	výška statorové drážky 4	[m]
h_r	výška rotorové drážky	[m]
h_{sy}	výška jha statoru	[m]
I	moment setrvačnosti	[kg · m ²]
$I_{A,rms}$	efektivní hodnota proudu ve fázi A	[A]
$I_{B,rms}$	efektivní hodnota proudu ve fázi B	[A]
$I_{C,rms}$	efektivní hodnota proudu ve fázi C	[A]
I_s	efektivní hodnota statorového proudu	[A]
J	proudová hustota	[A · m ⁻²]
k	bezpečnostní koeficient	[–]
k_1	koeficient drsnosti povrchu rotoru	[–]
$k_{O'Kelly}$	koeficient čel rotoru	[–]
$k_{R,v}$	koeficient radiálních drážek rotoru	[–]
l_c	průměrná délka jednoho závitu cívky	[m]
L_{ew}	indukčnost čela vinutí jedné fáze	[H]

l_{ew}	délka vinutí od konce statoru po oblouk čela vinutí	[m]
$l_{Fe,v}$	vzdálenost radiálních drážek	[m]
l_{kr}	délka kruhů rotoru	[m]
l_{max}	maximální délka rotoru	[m]
l_r	aktivní délka rotoru	[m]
l_{rot}	délka rotoru	[m]
M	moment na hřídeli motoru	[Nm]
m	počet fází	[–]
M_{elmg}	elektromagnetický moment	[Nm]
M_{max}	maximální hodnota momentu	[Nm]
M_{min}	minimální hodnota momentu	[Nm]
N	počet závitů vinutí statoru	[–]
n	otáčky motoru	[min ⁻¹]
n_k	řád kritických otáček	[–]
n_n	jmenovité otáčky	[min ⁻¹]
P	výkon na hřídeli motoru	[W]
p	počet pólpárů	[–]
P_a	pravděpodobnost přijetí nového řešení	[–]
P_{Cu}	ztráty ve vinutí statoru	[W]
P_{Fe}	ztráty v železe statoru	[W]
P_n	jmenovitý výkon	[W]
P_{rot}	ztráty v rotoru	[W]
P_t	populace rodičů	[–]
P_{t1}	třetí ztráty rotoru	[W]
P_{t2}	třetí ztráty kruhů rotoru	[W]
P_{t+1}	nová populace rodičů	[–]
P_{ztr}	celkové ztráty	[W]
Q_r	počet rotorových drážek	[–]
Q_s	počet statorových drážek	[–]
q_s	počet drážek na pól a fázi	[–]
Q_t	populace potomků	[–]
Q_{t+1}	nová populace potomků	[–]
r_r	poloměr rotoru	[m]
R_t	populace rodičů a potomků	[–]
R_w	odpor vinutí jedné fáze	[’]
Re_k, Re_δ	Reynoldsovo číslo	[–]
S	průřez válce	[m ²]
s_0	počáteční řešení	[–]

S_{cs}	průřez jednoho závitů cívků	$[m^2]$
s_n	nové řešení	$[-]$
t	aktuální teplota	$[^\circ C]$
t_0	počáteční teplota	$[^\circ C]$
TR	zvlňňení momentu	$[\%]$
$U_{A,rms}$	efektivní hodnota napětí fáze A	$[V]$
$U_{B,rms}$	efektivní hodnota napětí fáze B	$[V]$
$U_{C,rms}$	efektivní hodnota napětí fáze C	$[V]$
U_m	amplituda fázového napětí	$[V]$
v	Poissonův poměr materiálu rotoru	$[-]$
v_{av}	průměrný řád výrazných vyšších harmonických	$[-]$
W_{ew}	střední hodnota rozpětí cívků	$[m]$
α	konstanta (simulované žíhání)	$[-]$
β	konstanta (simulované žíhání)	$[-]$
δ	délka vzduchové mezery	$[m]$
Δc	rozdíl hodnot cenové funkce	$[-]$
δ_v	hloubka vniku	$[m]$
η	účinnost motoru	$[\%]$
λ_{lew}	permeanční koeficient	$[-]$
λ_{Wew}	permeanční koeficient	$[-]$
μ	permeabilita	$[H \cdot m^{-1}]$
μ_k	dynamická viskozita	$[Pa \cdot s]$
μ_0	permeabilita vákua	$[H \cdot m^{-1}]$
ρ	hustota materiálu rotoru	$[kg \cdot m^{-3}]$
ρ_t	hustota tekutiny	$[kg \cdot m^{-3}]$
ρ_v	rezistivita vodiče	$[\cdot m]$
σ_{cu}	vodivost materiálu vinutí	$[S \cdot m^{-1}]$
σ_{max}	maximální mechanické napětí	$[Pa]$
$\sigma_{O'Kelly}$	vodivost materiálu rotoru zahrnující konce rotoru	$[S \cdot m^{-1}]$
σ_{rot}	vodivost materiálu rotoru	$[S \cdot m^{-1}]$
τ_p	pólová rozteč statoru	$[m]$
τ_{pv}	průměrná pólová rozteč harmonických polí statoru	$[m]$
τ_{ur}	drážková rozteč rotoru	$[m]$
ω	úhlová rychlost	$[rad \cdot s^{-1}]$
$\cos \varphi$	účinník	$[-]$