



Fakulta elektrotechnická

Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

DIPLOMOVÁ PRÁCE

OPTIMALIZACE ROTORU RELUKTANČNÍHO MOTORU

Autor práce: Bc. Jan Kaska

Vedoucí práce: Ing. David Pánek, Ph.D.

Konzultant: Ing. Roman Pechánek, PhD.

Plzeň 2019

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2018/2019

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Jan KASKA**

Osobní číslo: **E17N0039P**

Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**

Studijní obor: **Průmyslová elektronika a elektromechanika**

Název tématu: **Optimalizace rotoru reluktančního motoru**

Zadávací katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

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

1. Proveďte podrobnou rešerši na téma tvarová a topologická optimalizace rotorů reluktančních motorů.
2. Vytvořte pro zadaný reluktanční motor model a proveďte optimalizaci rotoru.
3. Vytvořte výrobní dokumentaci motoru s optimalizovaným rotorem.
4. Navrhněte experiment pro porovnání vlastností motoru s původním a optimalizovaným rotorem.



Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah kvalifikační práce: 40 - 60 stran

Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

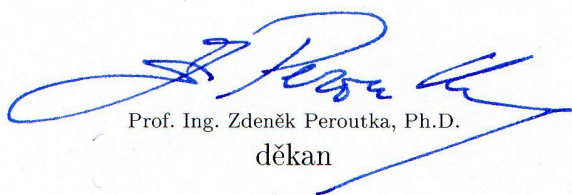
1. R. Krishnan, "Switched Reluctance Motor Drives: Modeling, Simulation, Analysis, Design, and Applications".
2. M.P. Bendsoe, O. Sigmund, "Topology optimization, Theory Methods and Applications".
3. G. Allaire: Shape Optimization by the Homogenization Method.

Vedoucí diplomové práce: Ing. David Pánek, Ph.D.

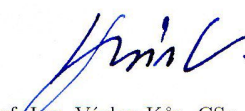
Katedra teoretické elektrotechniky

Datum zadání diplomové práce: 5. října 2018

Termín odevzdání diplomové práce: 30. května 2019


Prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.
děkan




Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 5. října 2018

Abstrakt

Diplomová práce se zabývá problémem tvarové a topologické optimalizace rotorů reluktančních strojů. Praktické části předchází obsáhlá rešerše. Zde je nejprve uvedeno obecnější rozčlenění z hlediska možných optimalizačních algoritmů, náhradních modelů a možností formalizace geometrie. Dále následují už přímo rozličné ukázky využití jednotlivých algoritmů a náhradních modelů v literatuře.

V další části je popsán praktický problém, jehož úkolem je nahradit rotor asynchronního motoru rotorem reluktančním a tento rotor optimalizovat. Pro tento záměr je vytvořena metodika parametrizace geometrie rotoru a následně je definován matematický model problému. Jsou zde rozepsány řešené rovnice elektromagnetického pole a jsou zde uvedeny i další pomocné výpočty a statistické nástroje vhodné k posouzení kvality návrhů. Navazující část popisuje zvolený optimalizační algoritmus NSGA-II, princip jeho funkce a implementace do úlohy. V dalších částech je diskutován průběh a samotné výsledky optimalizace reluktančního rotoru. Nakonec je provedena i citlivostní analýza, pro nejlepší rotory vytvořeny výrobní výkresy a navržen praktický ověřovací experiment.

Klíčová slova

reluktanční stroj, optimalizace rotoru, NSGA-II, citlivostní analýza

Abstract

This thesis deals with shape and topology optimization of rotor for reluctance machine. In the first section the investigation of optimization algorithms, meta and surrogate models and methods of geometry formalization used in literature is done. The methods and algorithms are described and organized according to their functional properties. Then, the possible uses of these algorithms and methods on specific examples in the literature are shown.

The following section presents a specific problem which is the replacement of asynchronous rotor by reluctance rotor following its shape optimization. For this purpose a method of parameterization of the rotor insulation barriers is created and in the next part the mathematical model of the problem is defined. This section describes the electromagnetic field equations, additional equations and statistical tools to determine the quality of rotor prototypes. The following section describes the chosen optimization algorithm NSGA-II, the principle of its function and its implementation into the optimization problem. Then the optimization process of reluctance rotor and its results are discussed. Finally, a sensitivity analysis is performed, production drawings for two best rotors are created and practical verification experiment is proposed.

Keywords

reluctance machine, rotor optimization, NSGA-II, sensitivity analysis

Prohlášení

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

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

.....

podpis

V Plzni dne 28. května 2019

Bc. Jan Kaska

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval především Ing. Davidu Pánkovi, Ph.D. za cenné rady a podporu po celou dobu vzniku práce, Ing. Romanu Pechánkovi, Ph.D. za jeho praktické připomínky a v neposlední řadě Bc. Janu Lefflerovi a Bc. Lukáši Sobotkovi za podnětné diskuse.

Obsah

Úvod	12
1 Optimalizace reluktančních strojů	13
1.1 Multikriteriální optimalizace	13
1.2 Náhradní modely	14
1.3 Geometrie	16
1.3.1 Binární formalismus	16
1.3.2 Pokročilé formalismy	17
1.4 Příklady optimalizací v literatuře	19
1.4.1 Funkční náhradní modely	21
1.4.1.1 Umělé neuronové sítě	22
1.4.1.2 Kriging	24
1.4.2 Fyzikální náhradní modely	25
1.4.3 Fuzzy algoritmy	27
1.4.4 Taguchiho metody	28
1.4.5 Další algoritmy a metody	29
2 Definice problému	31
2.1 Zvolený stroj	31
2.2 Konstrukce izolačních bariér	31
2.3 Dovolené hodnoty a meze	34
3 Matematický model	38
3.1 Elektromagnetické pole	38
3.2 Okrajové a počáteční podmínky	40
3.3 Točivý moment	42
3.4 Ztráty	44
3.5 Účinník stroje	46
4 Optimalizace stroje	47
4.1 Algoritmus	47
4.1.1 Třídění a selekce	47
4.1.2 Křížení	48
4.1.3 Mutace	48
4.1.4 Přírodní výběr	49
4.2 Průběh optimalizace	50
4.3 Nejlepší stroje	54

4.3.1	Geometrie nejlepších strojů	56
4.3.2	Chování nejlepších strojů	58
4.3.3	Citlivostní analýza	62
4.4	Ověřovací experiment	66
5	Závěr	67
5.1	Další vývoj	68
	Seznam použité literatury	69
	Seznam obrázků	80
	Přílohy	82

Seznam použitých symbolů a zkratek

\mathbf{A}	[Wb · m ⁻¹]	vektorový magnetický potenciál
\mathbf{B}	[T]	magnetická indukce
$\cos(\varphi)$	[-]	účinník
\mathbf{D}	[C · m ⁻²]	elektrická indukce
\mathbf{E}	[V · m ⁻¹]	intenzita elektrického pole
E	[MPa]	Youngův modul
f	[Hz]	frekvence
\mathbf{H}	[A · m ⁻¹]	intenzita magnetického pole
I	[A]	elektrický proud
\mathbf{J}	[A · m ⁻²]	hustota elektrického proudu
k_K	[-]	bezpečnostní koeficient
L	[H]	indukčnost
M	[N · m]	točivý moment
m	[-]	počet fází
n_m	[min ⁻¹]	mechanická rychlost otáčení
Δp_{Fe}	[-]	ztráty v železe
P_m	[W]	mechanický výkon
$2p$	[-]	počet pólů
Q	[-]	počet drážek
T	[s]	perioda
t	[s]	čas
U	[V]	elektrické napětí
\mathbf{v}	[m · s ⁻¹]	rychlost
γ	[S · m ⁻¹]	měrná elektrická vodivost
ε	[F · m ⁻¹]	permitivita
μ	[H · m ⁻¹]	permeabilita
σ	[N · m]	směrodatná odchylka
σ_{\max}	[MPa]	maximální mechanické napětí
Φ	[Wb]	magnetický indukční tok
ψ	[°]	úhel proudu
ω_m	[rad · s ⁻¹]	úhlová rychlost otáčení
(x, y, z)		kartézská soustava souřadnic
(r, θ, z)		cylindrická soustava souřadnic

Konstrukce izolačních bariér

D_3	[mm]	vnější průměr rotoru
D_h	[mm]	průměr hřídele
n_b	[-]	počet bariér
v_b	[mm]	vzdálenost středů bariér
k	[-]	koefficient míry odklonu
pev	[mm]	minimální vzdálenost prvků
poc	[mm]	počátek první bariéry
pos	[mm]	posun konce bariéry
x_b	[mm]	souřadnice konce bariéry x
y_b	[mm]	souřadnice konce bariéry y
γ	[°]	skutečný úhlový odklon bariéry
γ'	[°]	úhlový odklon bariéry

Zkratky

DoE	design of experiments	plánování experimentů
FEM	finite element method	metoda konečných prvků
GA	genetic algorithm	genetický algoritmus
MEC	magnetic equivalent circuit	náhradní magnetický obvod
NN	neural network	neuronová síť
NSGA	non-dominated sorting GA	nedominovaný třídící GA
PSO	particle swarm optimization	optimalizace hejnem částic
SRM	switched reluctance machine	spínaný reluktanční stroj
SynRM	synchronous reluctance machine	synchronní reluktanční stroj

Symboly a zkratky, které se v textu vyskytují pouze mimořádně, včetně symbolů veličin použitých pouze v mezivýpočtech, nejsou v tomto výčtu pro přehlednost uvedeny. Jejich význam je potom vždy vysvětlen v příslušné části textu.

Úvod

Ačkoliv poznatky ohledně principů reluktance u synchronních strojů s vyniklými póly sahají až do počátků 20. století, první praktická využití reluktančních strojů se objevila až v 60. a 70. letech 20. století s rozvojem frekvenčních měničů. Tyto motory byly řízeny skalárně a většinou tak ke své funkci vyžadovaly i klec nakrátko. Další vývoj těchto strojů přišel jednak s modernějšími algoritmy, které byly schopné stroje dobře řídit i bez použití této klece, jednak s kolísajícími cenami vzácných zemin využívaných pro permanentní magnety. [76]

Výhoda absence rotorového vinutí, případně permanentních magnetů je však u těchto strojů často vyvažována poměrně nízkými hodnotami účinnosti a účinníku a vysokým zvlněním momentu. Analyticko-empirické metody návrhu těchto strojů, především potom jejich rotorů, však často nejsou vždy schopny tyto nároky na provozní parametry splnit. S příchodem sofistikovaných multikriteriálních optimalizačních nástrojů a růstem výkonu výpočetní techniky se objevila další možnost jak tyto náročné úlohy řešit. Prvním úkolem práce tak je provedení rešerše dnes dostupných a používaných nástrojů tvarové a topologické optimalizace reluktančních strojů. Jsou zde nejprve spíše obecněji vysvětleny principy multikriteriální optimalizace a dělení jednotlivých algoritmů, dále jsou popsány využívané náhradní modely, které mohou při optimalizaci ušetřit značný čas a potřebný výpočetní výkon a zmíněny jsou i možnosti formalizace geometrie. V dalších podkapitolách, dělených podle náhradních modelů, případně využitých optimalizačních algoritmů, už jsou popsány konkrétní příklady optimalizací v literatuře.

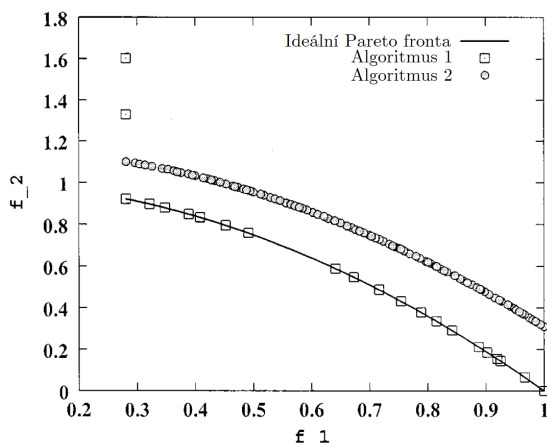
Druhá kapitola je věnována definici řešeného problému, tedy nahrazení rotoru malého asynchronního stroje rotorem reluktančním. Jsou zde popsány základní vlastnosti a rozměry tohoto stroje a následuje popis parametrizace zvolené topologie izolačních bariér a dovolených hodnot a mezí. Třetí kapitola je potom věnována popisu matematického modelu, rozebírány jsou zde řešené rovnice elektromagnetického pole včetně okrajových podmínek, výpočet točivého momentu, ztráty v železe a účinník stroje.

Poslední kapitola se věnuje samotné optimalizaci reluktančního rotoru, je zde blíže popsán použitý genetický algoritmus NSGA-II, jeho implementace do problému a dále popsán průběh optimalizace rotoru ve dvou variantách se třemi a čtyřmi izolačními bariérami. Pro každou variantu jsou dle zvolených kritérií vybrány dva stroje a ty dále porovnávány z hlediska geometrie a provozních parametrů. Následně je provedena i citlivostní analýza, jejímž úkolem je zjistit robustnost jednotlivých strojů. Nakonec je navrhnut experiment, při kterém by byl původní asynchronní stroj porovnán se strojem novým, reluktančním. Pro dva nejlepší rotory jsou v přílohách vytvořeny výrobní výkresy.

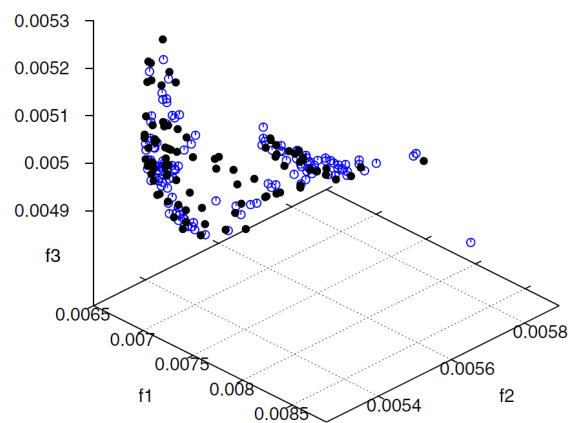
1 Optimalizace reluktančních strojů

1.1 Multikriteriální optimalizace

Problémy řešené v technické praxi jsou téměř vždy komplexní a počet požadavků ze stran nejen technických, ale i ekonomických může se složitostí problému značně narůst. Tyto požadavky (kritéria) jsou často ve vzájemném rozporu a u většiny problémů neexistuje jedno optimum. Řešení těchto úloh se označuje jako multikriteriální optimalizace (*multi-objective optimization*) a zavádí se zde pojem tzv. Pareto-optima. Možná Pareto-optimální řešení v rámci dvou a více kritérií potom tvoří Pareto-frontu, na jejímž základě mohou být jednotlivé optimalizační algoritmy porovnávány. Jedním z ukazatelů kvality algoritmu je rozprostření jednotlivých řešení po Pareto-frontě, dalším z ukazatelů je schopnost algoritmu konvergovat k optimálním řešením, tedy vzdálenost algoritmem dosažených řešení od ideální Pareto-fronty problému. Při porovnávání jednotlivých algoritmů je však nutná jistá obezřetnost. Podle populární „*No free lunch theorems for optimization*“ studie [96] totiž výraznou převahu jednoho z porovnávaných algoritmů nad ostatními na omezené skupině testovacích problémů nelze generalizovat. Ukázka Pareto-front je pak na obrázcích 1.1, obrázek (a) ukazuje porovnání dvou optimalizačních algoritmů. Zatímco první algoritmus byl schopen konvergovat až k ideální Pareto-frontě, algoritmus druhý má značně lepší rozprostření řešení v rámci obou kritérií. Obrázek (b) potom ukazuje řešení dvou optimalizačních algoritmů v rámci tří kritérií. [77]



(a) Dvě kritériální funkce



(b) Tři kritériální funkce

Obrázek 1.1: Pareto-fronty pro dvě a tři kritéria, převzato z [26] a [49]

Algoritmy používané pro multikriteriální optimalizace jsou buďto přímo schopny pracovat s více kritériálními funkcemi, případně jsou využity jednokriteriální algoritmy a optimalizace dle dílčích kritérií je prováděna paralelně, případně postupně. Další možností je z jednotlivých kritérií složit jednu kritériální funkci, nejčastěji formou sumace kritérií

s pomocí váhových koeficientů. Ačkoliv lze dle autorů [3] pomocí obou metod dosáhnout podobných výsledků, algoritmus implicitně schopný zacházení s více kriteriálními funkcemi těchto výsledků dosahuje značně rychleji.

Algoritmy lze dělit například na metody gradientní a metody znalost gradientu nevyžadující, metody deterministické a stochastické, metody založené na trajektoriích a populační metody, mezi ty patří hejnové či rojové algoritmy a algoritmy genetické. Běžné je též označovat některé algoritmy jako heuristické či meta-heuristické, což znamená, že jejich části fungují na základě randomizace, ovšem algoritmus jako celek využívá intuice či nabyté zkušenosti. Dle [87] je však výklad a používání pojmu meta-heuristika při označování algoritmů značně nekonzistentní. Další možná dělení mohou být podle toho, zdali algoritmus zaznamenává své pohyby v prostoru řešení a aktivně s nimi dále pracuje, případně zda pracuje v rámci problému lokálně nebo globálně. [49]

1.2 Náhradní modely

Optimalizované problémy, především ty modelované metodou konečných prvků (*finite element method – FEM*), pro výpočet kriteriálních funkcí často vyžadují značný výpočetní výkon. Ačkoliv je většina optimalizačních algoritmů stavěna tak, aby byl počet vyčíslování těchto funkcí, tedy výpočtů modelu co nejmenší a značná část těchto algoritmů dnes umožňuje paralelizaci výpočtů. Není-li problém zcela triviální, je k nalezení globálního extrému většinou zapotřebí stovek až tisíců vyčíslení. Ve snaze tuto náročnost alespoň částečně eliminovat, bylo v minulosti navrženo mnoho metod konstrukce tzv. náhradních modelů (*meta / surrogate models*). „Náhradní modely vychází z myšlenky, že reálné optimalizační problémy sice nejsou konvexní, ale jsou do jisté míry hladké.“ [54]

Kromě redukce potřebného výpočetního výkonu, a tedy i celkového času optimalizace, mohou některé náhradní modely eliminovat i numerický šum či částečné nespojitosti původního modelu. Náhradní model nemusí původnímu modelu odpovídat v celé šíři, většinou pro optimalizaci postačuje, když náhradní model odpovídá své předloze v prostoru nezávislých parametrů a jejich definovaných mezí. Jako nezávislé parametry se označují veličiny, pomocí jejichž přímé změny hledá algoritmus optimum v rámci kriteriálních funkcí. Přesnost náhradního modelu potom závisí především na zvolené metodě a požadavcích řešitele problému. V první řadě lze náhradní modely rozdělit na modely fyzikální a funkční. Fyzikálním náhradním modelem může být například model FEM s řidším zasítováním, zjednodušení analytických rovnic popisujících daný problém, případně popsání problému rovnicemi odlišného typu, například pomocí metody soustředěných parametrů. Do této kategorie jdou začlenit i metody náhradních magnetických obvodů (*magnetic equivalent circuit – MEC*). Dle [49] lze tvrdit, že fyzikální náhradní modely jsou většinou přesnější, než modely funkční, jejich výpočetní čas je oproti modelům funkčním téměř vždy delší. Pro tvorbu většiny fyzikálních modelů je navíc nutná teoretická znalost problému.

Funkční náhradní modely jsou definovány obecně a lze je aplikovat na většinu problémů bez ohledu na jejich fyzikální pozadí. K jejich konstrukci se využívá metodiky plánování experimentů (*design of experiments - DoE*), to je zastřešující název pro řadu metod a postupů, které pomáhají vybrat body v prostoru nezávislých parametrů, v nichž jsou následně vyčísleny kritériální funkce. Vyčíslení může proběhnout formou měření, či fyzikálním modelem, nejčastěji modelem FEM, či analytickými rovnicemi. Částečná teoretická znalost problému je tedy zapotřebí i zde, jelikož minimálně při měření je nutné znát meze nezávislých parametrů tak, aby nebylo měřené zařízení poškozeno.

DoE metod je celá řada, od těch spíše náhodných či kvazi-náhodných, jako latinské hyperkrychle (*latin hypercube sampling - LHS*), po faktoriální, centrálně kompozitní (*central composite design - CCD*), d-optimální, Taguchiho metodu či obecně metody ortogonálních polí. Tyto metody často automaticky doprovází i citlivostní analýza, která dokáže kvantifikovat vliv jednotlivých nezávislých parametrů na kritériální funkce a lze tak například dopředu eliminovat ty parametry, které nemají na tyto funkce vliv téměř žádný a redukovat tak jejich počet. [49]

Funkční náhradní modely lze dělit na aproximační (regresní), do této kategorie patří například lineární, kvadratická či polynomiální regrese, či metody odezvy plochy (*response surface method - RSM*) a modely interpolační, to jsou například metody radiální báze (*radial basis*), kriging, případně různé jejich hybridní varianty. Aproximační a interpolační metody jsou často v řešených úlohách kombinovány tak, že interpolační model udává chybu modelu aproximačního od původního přesnějšího modelu. Samostatnou kategorií jsou potom umělé neuronové sítě, jejich explicitní formalizace ve formě tzv. metody podpůrných vektorů (*support vector machines - SVM*), Bayesovské sítě (*Bayesian network - BN*). Někdy je jako jednoduchá neuronová síť označována i metoda radiální báze. Dále jsou hojně využívány i modely využívající principů fuzzy logiky, často v kombinaci s další metodou, například neuronovou sítí (*adaptive neuro-fuzzy inference system - ANFIS*).

Ke těmto náhradním modelům je třeba přistupovat iterativně a většinou nelze předpokládat, že prvotní nastavení modelu bude zcela vyhovující. Aproximace, interpolace, či řečeno terminologií neuronových sítí učení se, tedy probíhá vždy několikrát a nové body prostoru nezávislých parametrů vybrané pomocí DoE jsou spočteny jednak náhradním modelem, jednak modelem původním a výsledky porovnány. Tento proces probíhá do té doby, než náhradní model splní požadovanou přesnost. S náhradním modelem lze potom zacházet různě, buďto na něm může být prováděna optimalizace přímo a ověření přesnějším modelem proběhne až na samém konci optimalizace, případně může ověřování probíhat i v průběhu optimalizace. Zvláštním případem jsou potom algoritmy mapování prostoru (*space mapping - SM*) a mapování variet (*manifold mapping - MM*), fungující jako jistá forma nástavby schopná během optimalizace inteligentně zacházet se dvěma modely. Jeden model je vždy přesnější, ale výpočetně náročnější, druhý model je vždy zjednodušený, přičemž oba modely jsou většinou fyzikální (například FEM modely). Obě metody jsou potom samy schopny optimalizace. [49], [54], [32], [20], [77], [6]

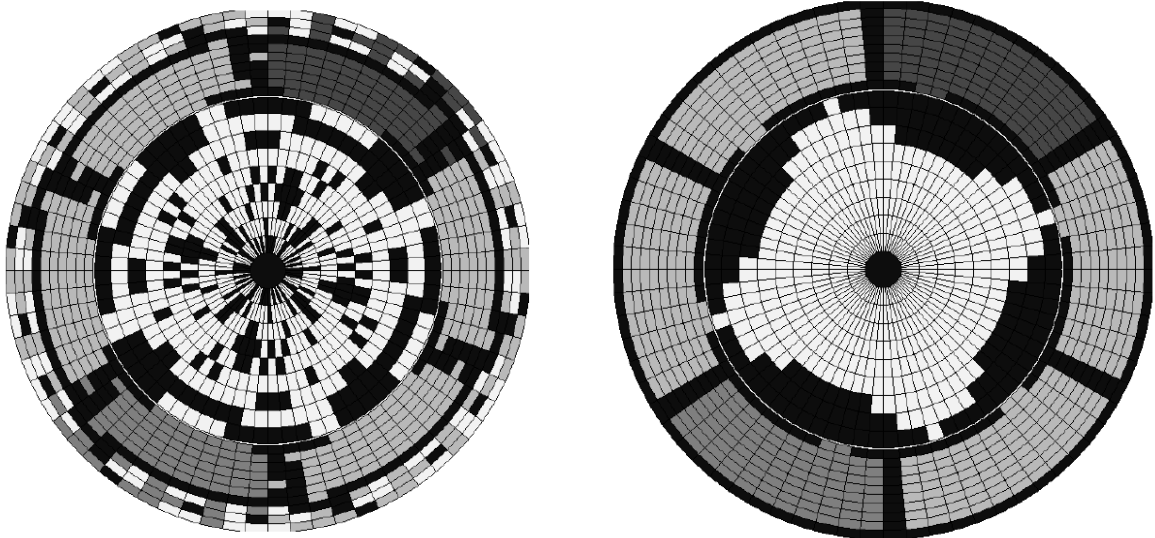
1.3 Geometrie

Důležitou roli při návrhu optimalizační strategie hraje způsob, jakým jsou definovány povolené změny geometrie problému. První z možností jak tyto změny definovat je princip parametrizace, přičemž jednotlivými nezávislými parametry mohou být jednak spojité veličiny, nejčastěji rozměry částí problému, jednak diskrétní veličiny, pro reluktanční stroj například počet pólů či počet izolačních bariér. S narůstajícím počtem parametrů narůstá stupeň volnosti problému a s tím i náročnost optimalizace. Pro nezávislé parametry je navíc nutné odvodit omezení a intervaly, v nichž se mohou pohybovat, tato omezení většinou nejsou konstantní, ale vzájemně provázaná. Odvozování těchto omezení mohou být při velkém počtu nezávislých parametrů velmi náročné. Autoři [11] upozorňují, že pevnou volbou uspořádání parametrizované geometrie se potenciální prostor řešení značně zmenšuje, přičemž často není předem jisté, zdali je řešitelem zvolené uspořádání to nejlepší možné. Nabízí se tak druhá možnost definice změn geometrie a to topologická. Zde je více možností jak topologii modifikovat, jednotlivé metody jsou někdy nazývány formalismy.

1.3.1 Binární formalismus

Jedním z jednodušších formalismů je binární dělení prostoru, kdy je daná optimalizovaná část rozdělena na určitý počet malých, například čtvercových, elementů, jejichž dílčí vlastnosti jsou potom našimi nezávislými parametry. To může být u magnetických problémů například relativní permeabilita materiálu, její změna potom udává, zda se daný element chová vůči magnetickému poli například jako feromagnetikum, nebo vzduch. Toto jednoduché dělení může postačovat, vystačíme-li si pouze s hrubým řešením. Pro řešení s vyšším rozlišením značně narůstá počet elementů, tedy i nezávislých parametrů. Autoři [27] navíc uvádějí, že binární formalismus často není schopen poskytnout optimální řešení. Jistá zlepšení v řešení přílišného počtu nezávislých parametrů uvádí [27]. Téměř vždy je totiž možné problém zjednodušit zavedením symetrií, případně použít menší elementy pouze pro určité části problému. Řešením může být i přidělování dílčích vlastností jednotlivým elementům nikoliv selektivně, ale pomocí distribučních funkcí. Příklad optimalizace s binárním formalismem je na obrázcích 1.2, obrázek (a) ukazuje stav řešení v 30 % optimalizačního procesu, obrázek (b) potom stav po skončení optimalizace.

Topologická optimalizace s binárním formalismem byla využita například v [53]. Průběh momentu spínaného reluktančního stroje (*switched reluctance machine – SRM*) byl optimalizován pomocí gradientní metody založené na sekvenčním lineárním programování (*sequential linear programming – SLP*). Tato metoda pro svou funkci vyžaduje citlivostní analýzu problému. Pro účely této analýzy byly metodou FEM vyhodnoceny indukčnosti pro několik natočení rotoru stroje, tyto hodnoty byly potom aproximovány Fourierovou řadou, pomocí které lze dále odvodit průběh napájecího proudu a momentu stroje v závislosti na úhlu natočení rotoru. Citlivostní analýza provedená na takto vytvořeném zjed-



(a) Stav v 30 % běhu algoritmu

(b) Finální stav

Obrázek 1.2: Binární formalismus, převzato z [41]

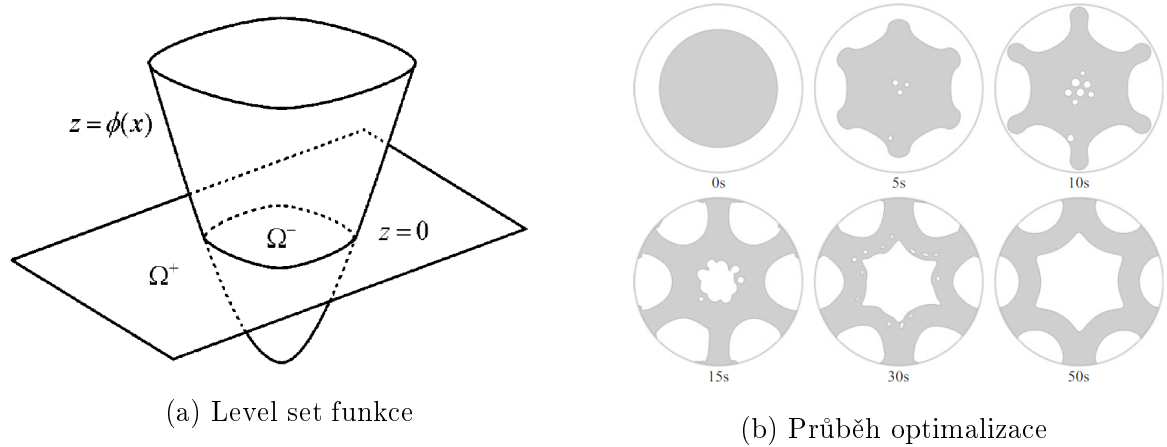
nodušeném analytickém modelu je oproti analýze pouze modelu FEM jednodušší a obě metody jsou dle autorů v dobré shodě. Pro přidělování vlastností jednotlivým elementům byly využity distribuční funkce a autoři dále uvádějí, že tyto funkce je vhodnější definovat pomocí reluktivity (převrácené hodnoty permeability), definice pomocí permeability totiž může vést k nestabilitě optimalizačního algoritmu. Díky symetriím bylo navíc možné optimalizovat pouze 1/8 rotoru a 1/12 statoru.

Příklad jednodušší binární topologické optimalizace SRM, tentokrát bez užití distribučních funkcí, je uveden v [41]. Stator i rotor čtyřpólového stroje byl symetricky zjednodušen na 1/4. V případě topologie statoru optimalizační algoritmus volil mezi feromagnetickým materiálem a mědí s kladnou či zápornou proudovou hustotou. Optimalizováno bylo tedy zjednodušeně i vinutí stroje. V případě rotoru bylo voleno mezi feromagnetickým materiálem a vzduchem. Ve FEM modelu nebylo pro zjednodušení uvažováno sycení feromagnetika, které však u těchto strojů hraje významnou roli. Pro maximalizaci momentu stroje bylo využito genetického algoritmu (*non-dominated sorting genetic algorithm - NSGA-II*) a algoritmu simulovaného žihání (*simulated annealing - SA*) [48]. Ačkoliv algoritmus SA konvergoval o poznání rychleji, není srovnání příliš vypovídající, jelikož se jedná o problém pouze s jedinou kritériální funkcí a NSGA-II funguje především jako multikritériální algoritmus.

1.3.2 Pokročilé formalismy

Lepším řešením potom mohou být sofistikovanější dynamické formalismy, založené například na principu Voroného buňek (*Voronoi formalism*), kdy je každá z buněk určena jednak polohou jejího středu, jednak všemi body ke středu přilehlými. V návaznosti na

použitý optimalizační algoritmus lze tvar, velikost, polohu a počet buněk adaptivně přizpůsobovat danému problému. Tam, kde je vyžadováno vyšší rozlišení řešení, mohou být buňky lokálně zhuštěny. Příklady použití tohoto formalismu lze nalézt v [12].



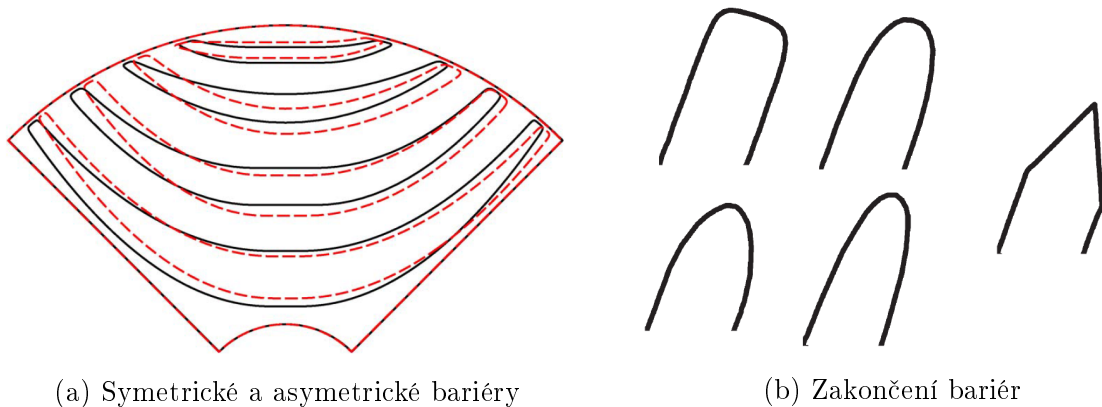
Obrázek 1.3: Level set optimalizace, převzato z [47] a [73]

Dalším z pokročilých formalismů je level-set metoda. Optimalizovaný tvar je v tomto případě určen řezem vícedimenzionální, tzv. level-set funkce, rovinou. Tvar tedy není měněn jako v předchozích případech vlastnostmi dílčích elementů, ale prostřednictvím deformací level-set funkce. Tato metoda je stále více využívána díky své schopnosti efektivně zvládat složitější topologické změny, jako je spojování, rozdělování či odebírání materiálu. První publikovaná level-set metoda byla problémová z hlediska zasíťování hranic jednotlivých materiálů při tvorbě modelu FEM. Okraje level-set funkce v rovinném řezu totiž často procházely středem elementu sítě. Tento problém byl řešen pomocí rozmazání skokové funkce (*smearred Heavyside function*) na hranici materiálů, tedy plynulým přechodem z jednoho materiálu do druhého, to ale vedlo k numerickým chybám. Tyto problémy nakonec vyřešila adaptivní level-set metoda (*adaptive level set method*). Sítí problému je v tomto případě vždy automaticky generována tak, aby co nej přesněji kopírovala okraj rovinného řezu level-set funkce. Ukázka level-set funkce a jejího řezu rovinou je potom vidět na obrázku (a) 1.3, na obrázku (b) je potom vidět průběh optimalizace reluktančního stroje pomocí této metody. [73], [70]

Level-set metoda je při optimalizaci vždy vázána s formou citlivostní analýzy, vycházející z teorie mechaniky kontinua (*continuum sensitivity method*), přičemž toto provázání samo o sobě funguje jako soběstačný optimalizační algoritmus. Této metody optimalizace bylo využito například v [47] pro optimalizaci synchronního reluktančního stroje (*synchronous reluctance machine – SynRM*). Pro každý nový tvar rotoru byla vyhodnocena energie systému vždy ve dvou jeho natočeních, v podstatě jde o podobný princip jako při maximalizaci rozdílu indukčností v osách d a q zmiňované v dalších kapitolách. Autoři [72] potom využili obdobné metody a dvě varianty SynRM, dvoupólovou a čtyřpólovou, optimalizovali nejprve pro maximální průměrný moment a následně pro jeho minimální zvlnění.

1.4 Příklady optimalizací v literatuře

Rozsáhlou parametrickou optimalizací čtyř rotorových izolačních bariér SynRM lze najít v [36] a [35]. Osa každé bariéry byla definována třemi nezávislými parametry a dva další byly využity pro středovou a koncovou tloušťku bariéry, vzniklé body potom byly proloženy polynomem. Speciální pozornost byla věnována zakončením jednotlivých bariér, ty byly definovány dalšími třemi parametry a tyto body proloženy kubickým splajnem. Optimalizace kritériálních funkcí proběhla ve dvou krocích. Maximalizace průměrného momentu byla provedena gradientní metodou přípustných směrů (*method of feasible directions - MMFD*), pro minimalizaci zvlnění bylo následně užito metody sekvenčního lineárního programování (*sequential linear programming - SLP*).



Obrázek 1.4: Možnosti optimalizace izolačních bariér, převzato z [36]

Optimalizovány byly jednak symetrické a jednak asymetrické varianty bariér. Ukazuje se, že z hlediska velikosti průměrného momentu není mezi oběma variantami přílišný rozdíl, z hlediska zvlnění momentu však dosahují asymetrické varianty oproti variantám symetrickým až pětikrát lepších výsledků. Autoři [8] navíc uvádějí, že asymetrické bariéry jsou z hlediska citlivosti zvlnění momentu na výrobní tolerance méně citlivé než bariéry symetrické, přesto tento vliv nelze zanedbat. Výsledný tvar symetrických a červeně přerušovanou čarou naznačených asymetrických variant izolačních bariér je na obrázku (a) 1.4, na obrázku (b) jsou pak naznačena možná zakončení izolační bariéry.

Další minimalizace zvlnění bylo dosaženo zešíkmením bariér po délce rotoru. Optimální zešíkmení pak dle [36] závisí jednak na parametrech statorového vinutí, jednak na zvolené topologii rotoru. To je dále rozvedeno a demonstrováno například v [9] a [7]. Dle autorů je vhodnější volit spíše plochá než oblá zakončení bariér. Tato problematika byla řešena i v [29], kde byla porovnávána oblá a špičatá zakončení. Z hlediska elektromagnetického jsou si podle autorů obě varianty rovné, z hlediska mechanického poskytují oblá zakončení rovnoměrnější rozložení a nižší hodnoty mechanického namáhání.

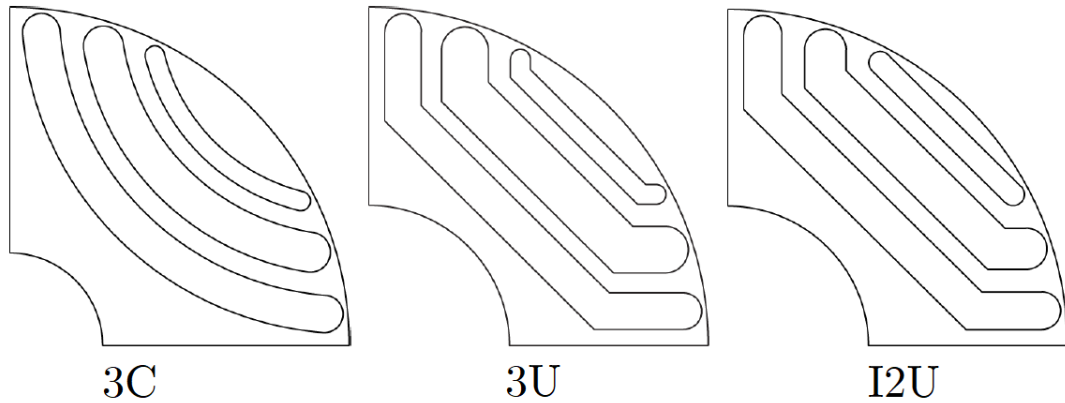
V případě 2D FEM modelu stroje je obtížné vliv zešíkmení simulovat. Možných přístupů je více, jednou z možností je odstranit z průběhu momentu, případně napájecího

proudu či napětí, harmonické složky, u kterých je předpokládáno, že budou zešikmením eliminovány. Takové předpoklady je však obtížné učinit. Další možností je multisekční metoda, kdy je plnohodnotný 3D FEM model stroje nahrazen několika 2D řezy po délce rotoru. Při nízkém počtu těchto řezů je však tato metoda nepřesná. Nejpřesnější, ale výpočetně nejnáročnější, potom zůstává metoda řešení plnohodnotným 3D FEM modelem. [82], [95]

V návaznosti na optimalizaci geometrie stroje je často optimalizován i úhel napájecího proudu tak, aby bylo při řízení dosaženo co nejvyšší hodnoty průměrného momentu. Tím by byl při zanedbání sycení feromagnetika úhel 45° . Pokud je však sycení uvažováno, ideální úhel se posouvá k vyšším hodnotám. Vhodné úhly proudu jsou někdy vysvětlovány na fenoménu tzv. křížové magnetizace (*cross magnetization*) mezi osami d a q . Tento jev se projevuje u vyniklých i hladkých rotorů a je přirovnáván k poli reakce kotvy stejnosměrných strojů. Studie [88] tento jev rozebírá a kritizuje rozdělování jednotlivých veličin strojů mezi osy d a q s jeho zanedbáním. Tyto veličiny působící ve stejném objemu nelze dle autorů bez chyb rozdělit.

Autoři [30] porovnávali dva možné přístupy k optimalizaci reluktančního stroje. Rychlý, výpočetně méně náročný, k problému přistupoval jako k magnetostatickému FEM modelu, který byl počítán v pěti natočeních rotoru v rámci jedné drážkové rozteče statoru. Kriteriaálními funkcemi byly průměrný moment a jeho zvlnění, nezávislými parametry potom tloušťka a úhel zakončení tzv. I2U izolačních bariér (dvě bariéry tvaru U, bariéra nejbližší povrchu tvaru I). Optimalizováno bylo blíže neurčeným multikriteriaálním algoritmem a pro každou novou geometrii byla zjednodušeně analyticky spočtena odstředivá síla působící na rotor a k ní adekvátní tloušťka pomocného žebra. Pokud vyšla tloušťka žebra příliš malá, byla pevnost konstrukce řešena pomocí vzdáleností bariér od povrchu rotoru.

V případě druhého, náročnějšího přístupu, byly mezi nezávislé parametry nově zařazeny i tloušťky pomocných žebířů a vzdálenosti bariér od povrchu. Elektromagnetický FEM model byl časově závislý a doplněn o další model mechanický. Autoři dále provedli citlivostní analýzu míry vlivu výrobních nepřesností velikostí pomocných žebířů a vzdáleností izolačních bariér od povrchu rotoru na velikost mechanického napětí. Ukázalo se, že změna vzdálenosti bariér $100\ \mu\text{m}$ od povrchu rotoru způsobí nárůst napětí až o 20 %, stejná změna rozměrů žebířů potom může zvýšit původní napětí až o 80 %. Rychlá optimalizace sice podle autorů zabere pouze pětinu času co optimalizace přesnější, je však následně třeba model prozkoumat a často vylepšit z hlediska problémů mechanického namáhání. Porovnání často využívaných tvarů bariér I2U, 3U a 3C z hlediska optimalizace, namáhání a možnosti osazení permanentními magnety bylo potom řešeno v [75]. Tyto tvary bariér jsou potom vidět na obrázku 1.5.



Obrázek 1.5: Tři běžné tvary izolačních bariér, převzato z [75]

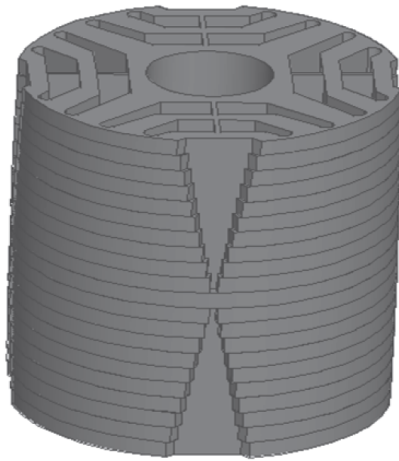
1.4.1 Funkční náhradní modely

Metody odezvy plochy (*response surface method - RSM*), jakožto náhradní modelu, využili autoři [74] při minimalizaci zvlnění momentu SynRM. Optimalizovány byly rozměry izolačních bariér. Aproximační polynom druhého řádu metody byl vytvořen pomocí vzorků z FEM modelu dle centrálně kompozitní metodologie. Jako kontroly přesnosti náhradního modelu bylo využito variační analýzy (*analysis of variance - ANOVA*).

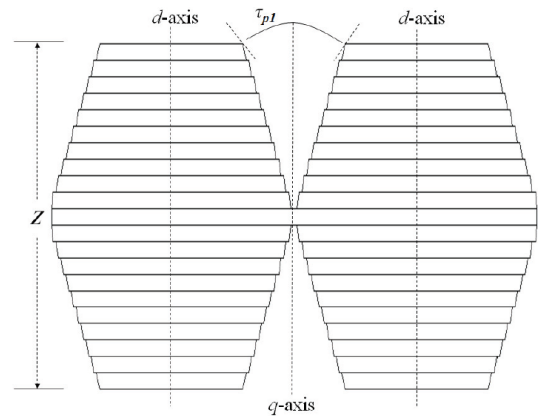
Tato metoda byla využita i v případě [31], zde autoři uvádějí, jako další možnost minimalizace zvlnění, různé tvary výřezů v povrchu rotoru. Metody ANOVA zde bylo využito pro hodnocení vlivu jednotlivých tvarů výřezů na funkční vlastnosti stroje. Ukazuje se, že tyto výřezy mají jistý vliv na průměrný moment a účinnost stroje, účinek výřezy výrazně ovlivněn není. Tyto výřezy jsou potom viditelné na obrázcích 1.6.

Autoři [100] hledali takový náhradní model SRM, na kterém by bylo možné rychle provádět rozličné analýzy stroje, včetně optimalizace jeho řízení. Stroj byl nejprve popsán analytickými rovnicemi, které byly pro druhou verzi modelu následně zjednodušeny tak, že dále nebylo uvažováno sycení feromagnetika, diferenciální rovnice fázových proudů, ani mechanismy jejich řízení. Na základě těchto dvou analytických modelů byly potom vytvořeny modely náhradní jednak pomocí metody mapování prostoru (*output space mapping proportional - OSMP*), jednak pomocí metody mapování variet (*manifold mapping - MM*). Tyto metody se liší především postupem, kterým je řešena korekce chyb méně přesného modelu. Samotná optimalizace parametrů řízení stroje byla potom provedena pomocí sekvenčního kvadratického programování (*sequential quadratic programming - SQP*). Výsledné hodnoty řídicích parametrů jsou pro oba z náhradních modelů téměř totožné, optimalizace pomocí OSMP však konvergovala rychleji. Autoři uvádějí, že pomocí těchto náhradních modelů je možné provádět přesné optimalizace, které jsou až o 80 % rychlejší, než by tomu bylo pouze s přesnějším analytickým modelem.

Optimalizace s ohledem na možnou degradaci feromagnetického materiálu magnetického obvodu proběhla v [19], za použití přesnějšího FEM modelu spolu s jednodušším



(a) 3D model rotoru



(b) Digram výřezů

Obrázek 1.6: Reluktanční stroj s výřezy na povrchu rotoru, převzato z [31]

MEC modelem, prostřednictvím další z metod mapování prostoru (*hybrid aggressive space mapping - HASM*) [2]. Pro porovnání byla provedena optimalizace pouze na MEC modelu pomocí simplexové metody (*Nelder-Mead simplex - NMS*). Obě optimalizace proběhly jednak s uvažováním a jednak bez uvažování degradace. Pro optimalizaci stroje bez uvažování degradačních efektů vyšly rozměry stroje větší než při uvažování těchto efektů. Pro pokusnou optimalizaci s vyššími hodnotami napájecího proudu, nebyly změny oproti optimalizaci bez uvažování degradačních efektů tolik znatelné, značné nasycení feromagnetického materiálu má totiž podobné účinky jako degradace. HASM metoda potom dospěla k výsledkům desetkrát rychleji než NMS metoda.

1.4.1.1 Umělé neuronové sítě

Autoři [63] zjednodušují optimalizační problém SynRM na jedinou izolační bariéru definovanou dvěma nezávislými parametry, tloušťkou a vzdáleností od vnějšího povrchu rotoru a navrhuje, že při optimalizaci s více izolačními bariérami lze vycházet z výsledků jednodušší jedno-bariérové optimalizace, jakožto prvním odhadem. Jako náhradní model byla zvolena Bayesovská neuronová síť (*Bayesian neural network - BRNN*) a optimalizováno bylo genetickým algoritmem. Data pro náhradní model byla poskytována FEM modelem, průměrný moment a jeho zvlnění v závislosti na nezávislých parametrech byly navíc vyhodnocovány pro 50, 100 a 200 % jmenovitého proudu stroje.

Neuronové sítě bylo využito i v [91] pro minimalizaci zvlnění momentu SynRM. Tentokrát ne z hlediska optimalizaci geometrie, ale při řízení stroje, kdy neuronová síť odhaduje ideální tvar napájecího proudu. Síť je založena na starším modelu adaptivního lineárního neuronu (*adaptive linear neuron - ADALINE*), nikoli na dnes obvyklejším modelu perceptronu. Podobné metody řízení bylo využito i v [97], kdy byly do napájecího proudu uměle přidávány vyšší harmonické složky. Pro vyhodnocení potřebných harmonických lze

podle autorů využít dvou metod. První je založena na frekvenční analýze průběhu momentu, metoda druhá k výpočtu vyžaduje znalost statorových indukčností. Autoři potom navrhují metodu, která vyžaduje pouze znalost napájecích proudů a průběhu momentu stroje. Dále upozorňují na problém této metody řízení, tedy, že harmonické složky způsobují další ztráty, navíc čím nižší řád harmonických je třeba do napájení uměle přidat, tím jsou ztráty vyšší.

Autoři [13], jakožto náhradní model pro optimalizaci komutací SRM, zvolili často využívanou neuronovou síť označovanou podle metodiky jejího učení jako zpětně propagační (*back propagation neural network - BPNN*). Někdy je tento druh učení označován v české literatuře jako zpětné šíření chyby. Autoři potom jako vhodnou metodu učení takovéto sítě vyzdvihují Levenberg-Marquardtovu metodu, tedy metodu nejmenších čtverců opatřenou tzv. tlumícím faktorem, který napomáhá stabilitě řešení. Vzorke pro učení sítě potom byla data ze statického měření momentu stroje v závislosti na velikosti napájecího proudu a mechanickém úhlu natočení rotoru. [80]

Stejně neuronové sítě bylo využito i v případě optimalizace tvaru izolačních bariér, vyplněných nemagnetickým materiálem v [46]. Dvěma optimalizačními algoritmy byla metoda optimalizace hejnem částic (*particle swarm optimization - PSO*) a populačních metoda (*teaching-learning based optimization - TLBO*) [81]. Optimalizace nejprve proběhla pouze na FEM modelu, v dalším kroku byla do problému implementována neuronová síť. V tomto případě klesl čas optimalizace na čtvrtinu původního s téměř identickými výsledky. TLBO algoritmus pak v obou případech konvergoval téměř dvakrát pomaleji než algoritmus PSO.

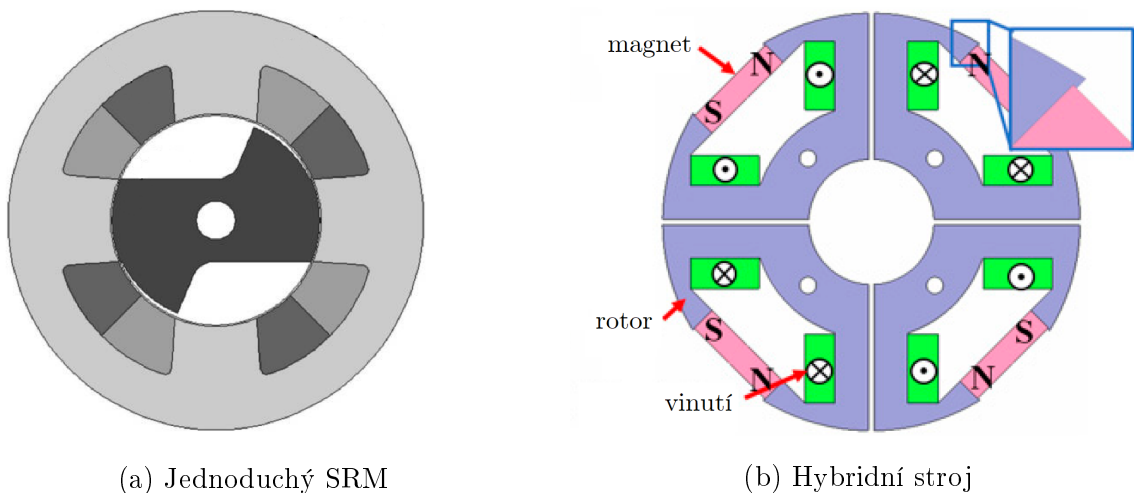
Regresní neuronové sítě (*general regression neural network - GRNN*) bylo využito pro optimalizaci velikostí statorových a rotorových zubů SRM v [83]. Tato síť je podle autorů schopná velmi rychlého učení a to i na malém vzorku poskytnutých dat. Navíc jsou v ní přímo integrovány algoritmy hledání globálních a lokálních extrémů a tak, sama o sobě, funguje jednak jako funkční náhradní model a jednak jako optimalizační algoritmus.

Atypická vlnková neuronová síť (*wavelet neural network - WNN*) byla využita v [84] při hledání vhodného modelu SRM. Trénována byla pomocí dvou algoritmů, genetického, vhodného spíše při hledání globálního extrému a gradientního sestupu (*gradient descent - GD*), schopného rychlé konvergence v místech lokálních extrémů. Optimální nastavení náhradního modelu SRM formou metody podpůrných vektorů *least squares support vector machine - LSSVM*), proběhlo v [40] pomocí tří algoritmů. Nejprve pomocí diferenciální evoluce (*differential evolution - DE*), následně genetického algoritmu a nakonec pomocí PSO. Nejmenší chyba vyšla s použitím algoritmu DE. Autoři uvádějí, že tento náhradní model může být vhodnou alternativou neuronových sítí i v dynamických případech, je například využitelný při řízení stroje.

1.4.1.2 Kriging

Další z typů náhradních modelů je kriging, toho bylo využito při optimalizaci rozměrů jednoduchého SRM v [52]. Požadován byl co nejvyšší moment při spouštění stroje, ideálně pro jakoukoliv počáteční polohu rotoru. Pro porovnání byly použity tři optimalizační algoritmy min-max algoritmus, NSGA a evoluční algoritmus (*strength Pareto evolutionary algorithm - SPEA*). Ačkoliv všechny algoritmy nakonec dospěly k podobným řešením, v případě min-max algoritmu však bylo nejprve nutné značně omezit prostor nezávislých parametrů. Ukázalo se, že první verze NSGA algoritmu nebyla schopná tak dobrého rozptřeni řešení na Pareto-frontě jako algoritmus SPEA. Tvar optimalizovaného stroje je potom na obrázku (a) 1.7. Optimalizaci podobné geometrie stroje pomocí genetického algoritmu lze najít i v [14].

Autoři [101] rovněž využili kriging náhradního modelu společně s PSO k optimalizaci vyniklých pólů SRM. Všechny nové geometrie byly podrobeny citlivostní analýze dle metodiky krizového scénáře (*worst case scenario - WCS*). Ta do problému zahrnuje nahodilé chyby a nepřesnosti, které mohou nastat při výrobě. Ve výsledku se ukázalo, že ačkoliv se robustní geometrie, které nahodilé chyby nejméně ovlivňují, od původně optimálních liší nižším průměrným momentem a lehce vyšším zvlněním, lze očekávat, že jejich vlastnosti budou ve výrobě lépe odpovídat předpokladům modelů.

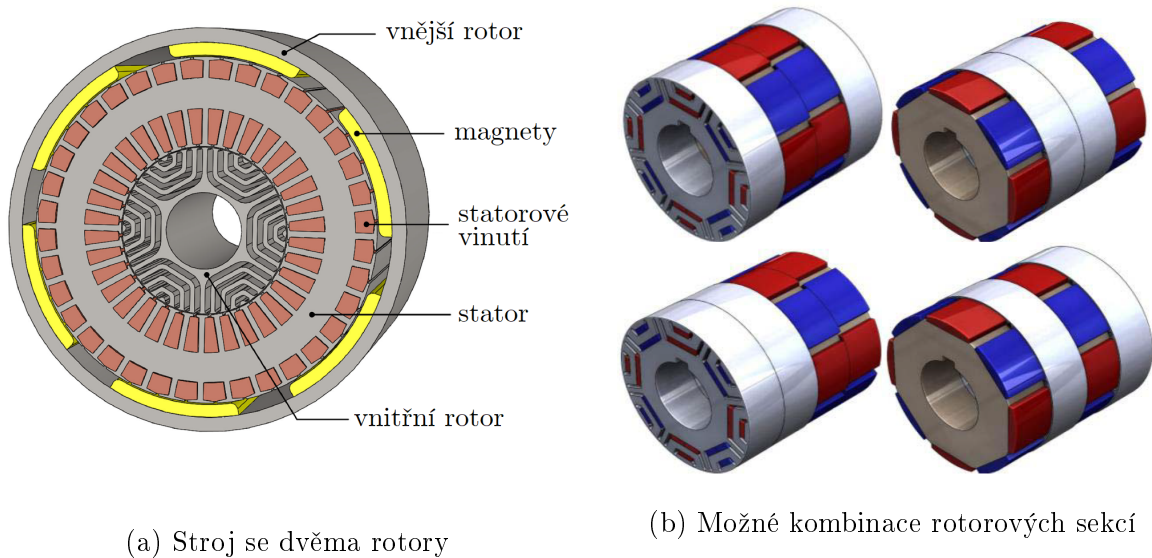


Obrázek 1.7: Možná provedení reluktančních strojů, převzato z [52] a [15]

Pomocí kriging modelu interpolujícího data poskytnutá FEM simulací dle metodiky latinské hyperkrychle (*latin hypercube sampling - LHS*) a GA byly optimalizovány rozměry rotoru SynRM v [15]. Ten má poměrně zvláštní topologii, rotor je totiž kombinací stejnosměrného vinutí, vyniklých pólů a permanentních magnetů. Provedení rotoru je potom na obrázku (b) 1.7. Stejně kombinace, tedy LHS, kriging náhradního modelu a genetického optimalizačního algoritmu využili autoři [102] pro minimalizaci zvlnění momentu. V případě tohoto hybridního stroje se střídají dva typy rotorových segmentů po jeho délce. První druh má konvenční strukturu stroje s povrchovými permanentními magnety,

druhý je rotor běžného synchronního reluktančního stroje s izolačními bariérami. Optimalizováno bylo kromě uložení magnetů a rozměrů bariér i natočení obou struktur vůči sobě.

Podobné uspořádání rotoru lze nalézt i v [67], případně v [94], kdy za sebe byly řazeny segmenty různých druhů asymetrických izolačních bariér. Další možností může být stroj s dvěma rotory [55], vnějším s permanentními magnety a vnitřním reluktančním rotorem. Optimalizovány byly v tomto případě rozměry magnetických obvodů, natočení obou rotorů vůči sobě a optimální úhel napájecího proudu. Využito bylo algoritmu NSGA, přičemž bylo vždy ověřováno i mechanické namáhání stroje. Obě zmiňovaná uspořádání jsou potom na obrázcích 1.8. Vlivem tvaru vnějšího reluktančního rotoru na účinek stroje se zabývali autoři [38].



Obrázek 1.8: Hybridní stroje, převzato z [55] a [67]

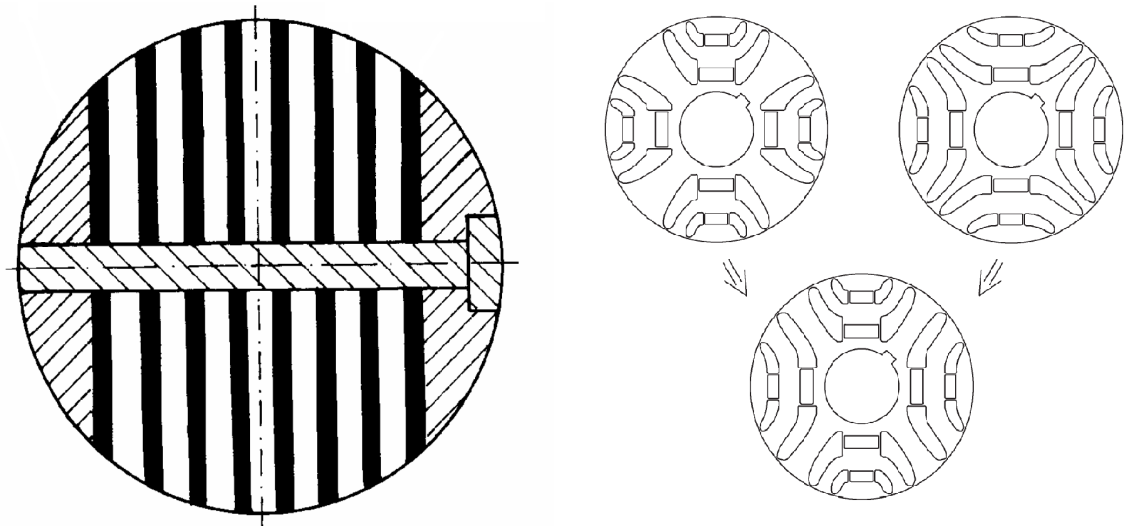
Studie [21] potom upozorňuje na to, že při tvorbě funkčního náhradního modelu s mnoha vstupními nezávislými parametry na značně nelineárním problému mohou výpočty FEM modelu pro dostatečné zpřesnění náhradního modelu přesáhnout únosnou mez. Autoři navrhují využití procesu přímé metody optimalizace (*refined direct optimization - RDO*), kdy se náhradní model sestává ze dvou dílčích náhradních modelů, fyzikálního FEM modelu s řídkým zasíťováním a funkčního kriging modelu, který iterativně interpoluje přesný, hustěji zasíťovaný FEM model a určuje chybu zjednodušeného FEM modelu.

1.4.2 Fyzikální náhradní modely

Celá řada autorů přistupuje k problému reluktančních strojů prostřednictvím zjednodušujícího analytického popisu stroje, často s využitím MEC. Výpočet kritériálních funkcí prostřednictvím těchto popisů pak může být řádově rychlejší než vyčíslování prostřednictvím modelů FEM. Tak, aby bylo možno pomocí těchto metod systém popsat, je často

nutné zavést jistá zjednodušení. Analytický popis byl použit například v [90] pro optimalizaci podélně laminovaného rotoru stroje staženého šroubem. Autoři zde uvažovali pouze základní harmonickou složku magnetomotorické síly, zanedbali vliv stahovacího šroubu, drážkování statoru bylo bráno v potaz prostřednictvím Carterova činitele a nelinearita materiálu byla uvažována pouze v ose d . Tvar rotoru je potom na obrázku (a) 1.9.

Výsledné vztahy, zahrnující rozměry jednotlivých částí rotoru, respektují i parametry statorového vinutí, BH křivku příslušného materiálu a velikost napájecího proudu. Jako hlavní parametry pro výpočty kritériálních funkcí problémů vyjádřených za pomoci analytických vztahů jsou často voleny indukčnosti v osách d a q . Průměrný moment je přímo závislý na rozdílu těchto indukčností a jejich podíl potom nepřímo udává účinnost stroje. Vlivem velikostí těchto indukčností na další parametry stroje se podrobně zabývaly studie [44] a [59].



(a) Laminovaný stroj stažený šroubem

(b) Kombinace dvou symetrických tvarů

Obrázek 1.9: Možné tvary reluktančních strojů, převzato z [90] a [7]

Další z analytických popisů je uveden v [7]. Zde se vycházelo z popisu lineární proudové hustoty po obvodu stroje pomocí Fourierova rozvoje. Následně byla vyjádřena magnetická indukce ve vzduchové mezeře a zanedbány byly všechny složky kromě radiální. Dle definice Lorentzovy síly pak byl pomocí magnetické indukce a lineární proudové hustoty vyjádřen průběh momentu po obvodu stroje. Autoři uvádějí, že pomocí symetrického tvaru bariér lze redukovat vždy pouze jeden řád harmonických složek, vytvořeny tak byly dva rotory, každý eliminující jeden řád harmonických a následně byly spojeny do jedné geometrie, přičemž oba typy bariér se střídají ob jeden pól čtyřpólového stroje. To je vidět na obrázku (b) 1.9.

Syntézu dvou metod analytického výpočtu SRM uvádí studie [37]. Metoda první, založená na řešení Laplacových, či Poissonových rovnic elektromagnetického pole, za současného využití komplexního tvaru Fourierova rozvoje proudové hustoty, poměrně přesně určuje průběh magnetické indukce ve vzduchové mezeře stroje. Tato metoda však dobře

funguje spíše pro méně až středně nasycené stroje. Metoda druhá, založená na okenní Fourierově transformaci (*windowed Fourier transform - WFT*), naopak dobře funguje i v značně nasycených polohách stroje, k výpočtu potom využívá i BH křivku materiálu. Tato metoda však zanedbává všechny složky magnetické indukce, kromě radiální. Spojením těchto dvou metod, kde metoda první je užita v místech, kde velikost magnetické indukce nepřesahuje 1,5 T a vice versa, autoři dosáhli shody s modelem FEM s chybou menší než 5 %.

Tak aby mohly být izolační bariéry popsány pomocí MEC je často nutné jejich tvar převést na tvar jednodušší, ideálně obdélníkový. K tomu je často využito konformního zobrazování jako v případě optimalizace dvou izolačních bariér SynRM v [89]. Autoři [4] uvádějí, že náhradní magnetické obvody jsou kompromisem mezi přesností modelů FEM a výpočetně nenáročných metod analytických. MEC metody se však často potýkají s problémy při popisu jevů, jako je kupříkladu vliv drážkování statoru na značně nasycené části rotoru, diskretizace okrajových částí rotoru, či vázání MEC obvodů s vnějšími elektrickými obvody. Poměrně složitý návrh MEC pak lze dle autorů obejít metodou, kdy je stroj rozdělen na tisíce elementárních objemů, z nichž každému náleží vlastní náhradní magnetický obvod. Celý objem je pak řešen uzlovou metodou. Nevýhodou této metody oproti běžným MEC je vyšší výpočetní náročnost.

Genetického optimalizačního algoritmu užili autoři [99] při optimalizaci rozměrů SRM s dvěma rotory pomocí sítě MEC. Výpočet jednotlivých reluktancí stroje byl v tomto případě značně sofistikovaný a výsledné průběhy veličin jsou pak téměř identické s výsledky modelu FEM. Značný byl i rozsah nezávislých proměnných. Kriteriaální funkce byla však pouze jedna a to derivace tzv. koenergie dle natočení rotoru, jejíž velikost určuje moment stroje.

Analytické a MEC metody spolu se statickou simulací metodou FEM tvoří rozsáhlý systém analýzy a optimalizace SRM v [60] a [39]. Kromě rozměrů stroje a parametrů vinutí je možno optimalizovat i jeho řízení. Kriteriaálními funkcemi potom kromě velikosti momentu a jeho zvlnění mohou být i velikosti napájecích proudů, včetně obsahu vyšších harmonických složek, účinnost, účinník, oteplení stroje i s přihlédnutím k lokálnímu přehřívání, kritické otáčky, vibrace a hluk stroje. Podobný nástroj v menším měřítku potom lze nalézt i v [57], výstupem jsou mimo jiné behaviorální mapy stroje.

1.4.3 Fuzzy algoritmy

Pomocí genetického fuzzy algoritmu (*genetic fuzzy algorithm - GFA*) byly optimalizovány téměř všechny možné rozměry SRM v [62]. Tak, aby byl počet vyčíslení kriteriačních funkcí problému definovaného pomocí MEC modelu co nejmenší, byl do optimalizace zaveden tzv. fuzzy prediktor. Vztahy mezi nezávislými parametry a kriteriačními funkcemi byly zjištěny pomocí citlivostní analýzy. Vzniklé trojúhelníkové funkce příslušnosti, dle kterých jsou fuzzy množiny definovány, byly následně za pomoci metody gradientního sestupu

(*gradient descent - GD*) vyjádřeny normálním rozdělením. Namísto MEC modelu potom optimalizace proběhla s pomocí tohoto fuzzy prediktoru.

Jednodušší fuzzy logiky bylo potom využito v [69]. Pět dílčích kritériálních funkcí, mezi kterými byly zařazeny i požadavky na velikost částí stroje, bylo nakonec pomocí sumy a váhových koeficientů vyjádřeno jako jediná kritériální funkce. Autoři však uvádějí, že takový postup často vede k tomu, že velmi dobrý výsledek jedné z dílčích funkcí může skrýt špatné výsledky ostatních kritérií. Do optimalizačního algoritmu tak zařadili paralelní vyhodnocování dílčích funkcí, tentokrát s pomocí fuzzy pravidel. Výsledkem je opět jedno číslo, kterým je původní vážená suma dílčích funkcí vždy násobena. Podobné vyhodnocování kritériální funkce využili i autoři [65].

Tři různé náhradní modely stroje byly v [51] testovány tak, aby pro zadanou velikost proudu a magnetického indukčního toku dokázaly správně predikovat aktuální úhel natočení rotoru SRM. Testovanými modely byly jednodušší fuzzy model s 264 vnitřními pravidly, kombinace fuzzy logiky a neuronové sítě (*adaptive neuro-fuzzy inference system - ANFIS*) se 75 pravidly a umělá neuronová síť. Při porovnávání odhadů polohy rotoru jednotlivých modelů s měřeními stroje, vyšla jako nejpresnější právě neuronová síť, s dvojnásobnou chybou potom pracoval ANFIS a s desetinásobnou potom jednodušší fuzzy model. Všechny chyby modelů však byly v rámci 2 % odchylky oproti měření. ANFIS model spolu s PSO optimalizací byl využit i v [34] pro optimalizaci SRM s ohledem na vibrace stroje.

1.4.4 Taguchiho metody

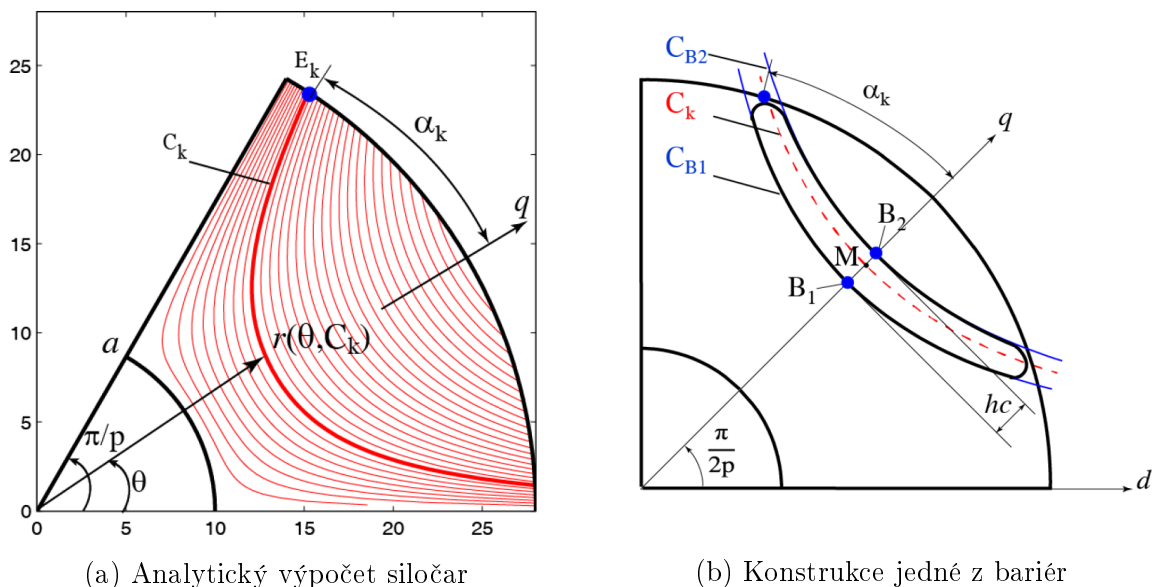
Taguchiho metoda byla využita při optimalizaci magnetického obvodu SRM v [68]. Tato metoda využívá dvou skupin faktorů. Tzv. control faktory jsou jednoduše ovlivnitelné, převážně to jsou nezávislé optimalizované parametry, naopak tzv. noise faktory lze ovlivnit pouze složitě nebo vůbec. Taguchiho optimalizace se potom snaží o to, aby noise faktory měly na kritériální funkce co nejmenší vliv a systém byl robustní. Noise faktory v tomto případě byly výrobní tolerance ve velikosti vzduchové mezery, nedokonalosti feromagnetika a úhel natočení rotoru, který by neměl mít na velikost momentu ideálně žádný vliv a zamezilo se tak zvlnění. Stejně metody bylo využito i v [56]. Šestifázový SynRM byl optimalizován mimo jiné s ohledem na cenu materiálu a výslednou váhu stroje. Optimalizace proběhla ve dvou krocích. Nejprve byly optimalizovány tvary izolačních bariér a následně geometrie statoru včetně vinutí. Data vypočtená modelem FEM a Taguchiho metodou převedená na poměr signálu k šumu byla však tentokrát předána k optimalizaci upravené metodě včelího roje (*altered bee colony optimization - AABC*) [45].

Pomocí Taguchiho metody byl optimalizován i SynRM v [23], zkušeny byly tři varianty geometrie s jednou, dvěma a třemi izolačními bariérami. Průběh momentu v závislosti na poloze rotoru byl počítán sérií statických FEM simulací a následně analyzován pomocí rychlé Fourierovy transformace (*fast Fourier transform - FFT*). Analýza harmo-

nických složek posloužila jako podklad pro navazující optimalizaci, přičemž autoři uvádějí, že v ideálním případě by průběh momentu obsahoval pouze základní harmonickou složku. Optimalizace následně proběhla podle čtyř „scénářů“ udávajících různé požadavky na maximalizaci rozdílu mezi amplitudou základní a amplitudou určitého součtu vyšších harmonických složek. Výsledky naznačují, že pro rotor se třemi bariérami se podařilo dosáhnout nejnižšího zvlnění momentu, rotor se dvěma bariérami má však větší průměrný moment.

1.4.5 Další algoritmy a metody

Nekonvenční postup konstrukce izolačních bariér je uveden v [33]. Tvar jednotlivých bariér totiž kopíruje siločáry magnetického pole vyjádřené za pomoci konformního zobrazení a Žukovského rovnic, původně míněných k popisu proudění kapalin mezi dvěma nekonečnými plochami svírajícími určitý úhel a kruhovou zátka uprostřed geometrie. Dvě plochy jsou v kontextu rotoru plochami symetrie jednoho pólu, zátka je potom hřídel stroje. Průběh siločar a konstrukce bariér jsou pak naznačeny na obrázcích 1.10.



Obrázek 1.10: Využití nekonvenčních postupů pro konstrukci bariér, převzato z [33]

Takovýto tvar bariér je vhodný i podle autorů [86], ti uvádějí, že ideální reluktanční rotor by byl takový, který by měl nekonečnou magnetickou vodivost v ose d a naopak nulovou v ose q , což by splňoval isotopický materiál, kopírující průběhy magnetických siločar.

Optimalizačním algoritmem potom byla diferenciální evoluce (*differential evolution - DE*). Pro porovnání byly spolu s těmito bariérami optimalizovány i bariéry konvenčního tvaru I2U. Ukazuje se, že popisy bariér s více stupni volnosti sice nekonvergují tak rychle, jako tvary jednodušší, svými vlastnostmi z hlediska průměrného momentu a jeho zvlnění však jednodušší tvary předčí. Experimenty též naznačují, že velmi nízkých hodnot zvl-

nění momentu I2U izolačních bariér se v praxi často kvůli výrobním tolerancím nepodaří dosáhnout.

Autoři [64] uvádějí, že ne vždy je vhodné optimalizovat společně geometrické a řídicí parametry, jako je například úhel napájecího proudu. Optimalizaci řídicích parametrů tak řešili v odděleném bloku, který pro každé, optimalizačním algoritmem nově navržené geometrie, našel optimální úhel proudu a ten algoritmu vrátil k vyhodnocení kritériálních funkcí. Separátní blok byl testován se čtyřmi vlastními optimalizačními algoritmy, Fibonacciho metodou, Newtonovou metodou, metodou zlatého řezu s parabolickou interpolací a nakonec stochastickým algoritmem (*efficient global optimization - EGO*) [42]. Jako nejpřesnější a nejrychlejší potom vyšly poslední dvě metody, tedy metoda zlatého řezu a EGO, ty navíc nevyžadují znalost gradientu.

Optimalizace lineárního reluktančního generátoru v [61] určeného pro získávání energie z mořských vln proběhla s pomocí dvou algoritmů, prvním byla PSO a druhým Boxova komplexní optimalizace (*Box's complex optimization*) [10]. Optimalizovány byly rozměry zubů rotoru a statoru tak, aby byla při rozhýbání „rotoru“ vlněním vyvinuta co největší elektromotorická síla. Z výsledků vyplývá, že Boxova optimalizace je vhodná pro rychlé řešení problému, z hlediska přesnosti se však blíže k optimu dostala metoda PSO.

Mezi relativně nové algoritmy testované na elektromagnetických problémech lze zařadit například dvoustupňový genetický algoritmus (*two-level genetic algorithm*) [20], navržený přímo pro využití s náhradními modely ať už fyzikálními nebo funkčními. Algoritmus však na náhradní modely nespolehá zcela a autoři uvádějí, že i pro špatně navržený náhradní model je algoritmus schopen tento problém odhalit a dokončit optimalizaci jako běžný genetický algoritmus fungující pouze s přesnějším modelem.

Neobvyklými algoritmy jsou například algoritmus simulující chování bakterie *Escherichia coli* (*smart bacterial foraging algorithm*) [24], využitý pro řízení SRM v [25], pro řízení stroje v [93] bylo využito (*big bang – big crunch - BBBC*) algoritmu [43], algoritmus založený na lidských schopnostech hledání s využitím paměti, zkušeností a nejistých úvah (*seeker optimization algorithm*) [24], byl využit pro optimalizaci rozměrů SRM v [66], případně algoritmus využívající principu větru vyrovnávajícího tlak [5], testovaný na optimalizaci stroje z měkkého magnetického kompozitu v [28]. Neobvyklost těchto algoritmů se stává relativní, oprostíme-li se od optimalizací reluktančních strojů či elektrických strojů obecně. Aplikovaných a vyvíjených optimalizačních algoritmů založených na chování zvířat, rostlin a entit mikro, makro či kvantového světa je nepřehledné množství. Zajímavý výčet lze nalézt například v [87].

2 Definice problému

2.1 Zvolený stroj

Strojem zvoleným pro účely optimalizace je polský asynchronní motor firmy BESEL. Kostra stroje se statorem a založeným vinutím je na fotografii 2.1. Nejdůležitější údaje ze štítku stroje jsou shrnuty v tabulce 2.1. Z těchto hodnot lze dopočítat dle vztahu (2.1) jmenovitý moment stroje, vychází přibližně 5,12 N · m.

$$M_n = \frac{P_m}{\omega_m} = \frac{P_m}{2\pi \frac{n_m}{60}} \quad (2.1)$$

Tabulka 2.1: Jmenovité údaje stroje

m	3	počet fází
P_m	0,75 kW	mechanický výkon
I_Δ/I_Y	3,3/1,92 A	napájecí proud
U_Δ/U_Y	220/380 V	napájecí napětí
$\cos(\varphi)$	0,78	účinnost
n_m	1400 min ⁻¹	rychlost otáčení
f	50 Hz	napájecí frekvence

Stroj je konstruován pro chod v režimu S1, má krytí IP44 a izolaci typu B, tedy maximální možnou teplotu 130 °C. Rozměry stroje v mm jsou uvedeny v příloze 1, u rotoru je uveden pouze jeho vnější poloměr a poloměr hřídele. Délka statorového paketu bez čel vinutí je potom 81 mm. Statorové vinutí je distribuované - koncentrické, jednovrstvé, s 24 drážkami. Úkolem následujících kapitol je nahradit původní rotor s klecí nakrátko rotorem reluktančním a to ve dvou možnostech parametrizované geometrie - se třemi nebo čtyřmi izolačními bariérami a následně tyto bariéry optimalizovat tak, aby bylo dosaženo co nejlepších vlastností stroje především z hlediska velikosti průměrného momentu a jeho zvlnění. Jelikož na stroj nejsou kladeny žádné upřesňující nároky, zohledňující jeho budoucí použití, je následný postup spíše obecný a parametry a konstanty v průběhu volené potom mohou být dle konkrétních požadavků vždy změněny.

2.2 Konstrukce izolačních bariér

Rozměry uváděné v této kapitole odkazují na výkres v příloze 2. Konstrukce každé ze zvoleného počtu n_b izolačních bariér vychází z principu proložení čtyř bodů (uzlů) uzavřeným kubickým b-splajnem, tedy spojitou křivkou tvořenou sérií aproximačních poly-



(a) Vnější pohled

(b) Vnitřek stroje

Obrázek 2.1: Fotografie kostry a statoru asynchronního motoru

nomů. Poloha těchto čtyř uzlů je dána sérií parametru, dle funkce je možné rozdělit je na konstrukční, nezávislé a závislé. Konstrukčními parametry jsou vnější průměr rotoru D_3 , průměr hřídele D_h , minimální povolená vzdálenost mezi jednotlivými prvky pev a bylo by sem možné zahrnout i počet pólů stroje $2p$, který určuje osy symetrie a velikost využitelné kruhové výseče.

Z konstrukčních hodnot lze dle (2.2) a následně (2.3) přímo spočítat dva závislé parametry. Parametr v_b určuje pomocí rozdělení využitelného prostoru v radiálním směru vzdálenost středů jednotlivých bariér, parametr poc potom určuje polohu konstrukčního počátku první bariéry, tedy vzdálenost jejího středu od počátku geometrie, v našem případě osy hřídele.

$$v_b = \frac{1}{n_b} \left(\frac{D_3}{2} - \frac{D_h}{2} - pev \right) \quad (2.2)$$

$$poc = \frac{D_h}{2} + \frac{v_b}{2} \quad (2.3)$$

Prvním z nezávislých parametrů je úhel γ_1 , určující polohu pomocného trojúhelníku ABD první bariéry v prostoru symetrické výseče, jinak řečeno, úhlový odklon úsečky AD od nejzazší polohy dané velikostí výseče, tedy 45° . Poloha bodu A určujícího konec bariéry v kartézských souřadnicích je následně spočtena dle (2.4) a (2.5) pomocí druhého nezávislého parametru pos , tedy posunu tohoto bodu od vnějšího průměru rotoru D_3 .

$$x_{b(i)} = \left(\frac{D_3}{2} - pos \right) \cos(\gamma_{(i)}) \quad (2.4)$$

$$y_{b(i)} = \left(\frac{D_3}{2} - pos \right) \sin(\gamma_{(i)}) \quad (2.5)$$

Následně je třeba určit tyto rozměry i pro ostatní bariéry. Pro výpočet úhlů γ' dalších bariér (před zavedením koeficientů dále v textu platí $\gamma' = \gamma$) je využito úhlu α (2.6), který je nyní pro všechny konstrukční trojúhelníky bariér stejný. Stejně tak je tomu u úhlu ε (2.7). Rovněž pomocné úsečky AC všech bariér jsou tak v této fázi výpočtu rovnoběžné.

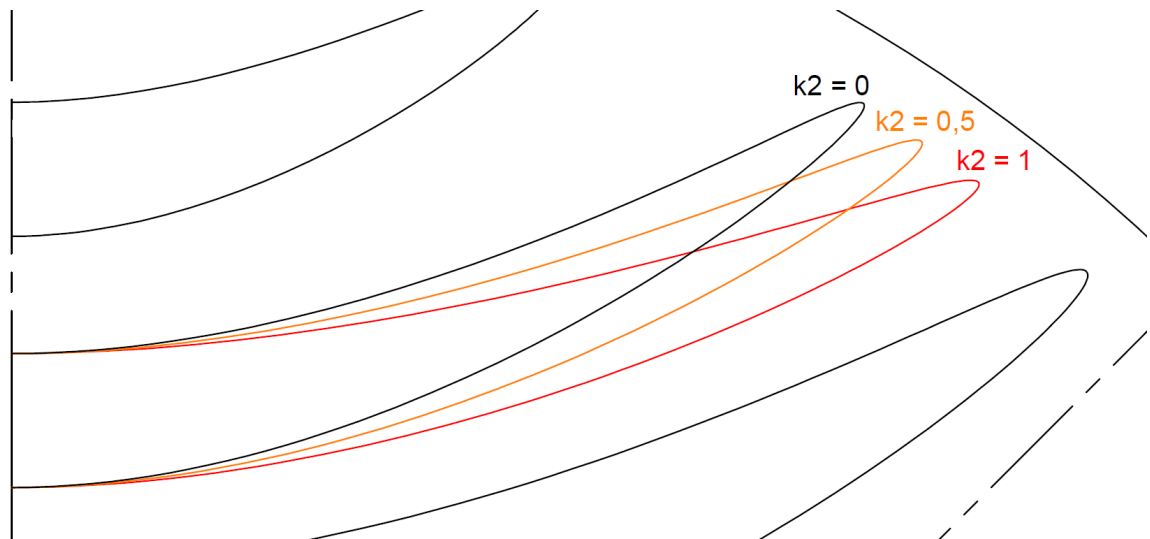
$$\alpha = \arctan \left(\frac{y_{b1} - poc}{x_{b1}} \right) \quad (2.6)$$

$$\varepsilon = \alpha + \frac{\pi}{2} \quad (2.7)$$

Pomocí úhlu ε , vnějšího průměru rotoru D_3 , parametrů poc , pos a vzdálenosti v_b je dopočten úhel β (2.8), který svírají úsečky AD a AC . Součet úhlů α a β (2.9) je potom hledaným úhlem γ' . Úhel β_1 nemá smysl počítat, jelikož úhel γ_1 je zvoleným nezávislým parametrem.

$$\beta_{(i+1)} = \arcsin \left(\frac{\sin(\varepsilon)}{\frac{D_3}{2} - pos} [poc + i \cdot v_b] \right); \quad i = \{1, \dots, n_b\} \quad (2.8)$$

$$\gamma'_{(i+1)} = \alpha + \beta_{(i+1)} \quad (2.9)$$



Obrázek 2.2: Vliv koeficientu k_2 na tvar bariéry

Počáteční rovnoběžnost úseček AC konstrukčních trojúhelníků jednotlivých bariér však neumožňuje dostatečnou volnost v rozměrech bariér a jejich poloze. Jako další nezávislé parametry jsou tak zavedeny koeficienty k určující míru odchýlení přímek AC od původní rovnoběžné polohy. Samotný úhel odchýlení ζ je potom spočten dle (2.10) jako maximální možný úhel, určený polovinou rozdílu úhlů γ' aktuální bariéry a úhlu γ_1 bari-

éry první, násobený koeficientem míry k . Tato úhlová odchylka je následně odečtena od úhlu γ' (2.11) a dostáváme tak konečnou velikost úhlů γ trojúhelníků ostatních izolačních bariér. Vliv tohoto koeficientu na jednu z bariér je znázorněn na obrázku 2.2.

$$\zeta_{(i+1)} = k_{(i+1)} \frac{\gamma'_{(i+1)} - \gamma_1}{2} \quad (2.10)$$

$$\gamma_{(i)} = \begin{cases} \gamma_1 & i = 1 \\ \gamma'_{(i)} - \zeta_{(i)} & i > 1 \end{cases} \quad (2.11)$$

Dopočítáme-li opět pomocí (2.4) a (2.5) polohy bodů A ostatních bariér, a to i s jejich zrcadlenými protějšky osou symetrie (směr úsečky DB), dostáváme pro každou z bariér první dva body pro proložení splajnem. Je tak třeba ještě určit zbývající dva body. Ty jsou definovány posledními nezávislými parametry s_b , určujícími šířky izolačních bariér v jejich nejširším místě. Tyto šířky jsou potom od středových poloh bariér ($poc + i \cdot v_b$) pro první z bodů odečteny a pro druhý bod přičteny, výsledná šířka bariér je tedy dvojnásobek této hodnoty. Nyní už disponujeme všemi čtyřmi body potřebnými pro proložení splajnem. Všechny zmiňované parametry jsou pro přehlednost uvedeny v tabulce 2.2.

Tabulka 2.2: Parametry bariér

nezávislé	závislé	konstrukční
γ_1	α	D_3
pos	$\beta_{(2, \dots, n_b)}$	D_h
$k_{(2, \dots, n_b)}$	$\gamma'_{(2, \dots, n_b)}$	pev
$s_{b(1, \dots, n_b)}$	$\gamma_{(2, \dots, n_b)}$	$2p$
	ε	
	poc	
	$\zeta_{(2, \dots, n_b)}$	
	v_b	
	$x_{b(1, \dots, n_b)}$	
	$y_{b(1, \dots, n_b)}$	

2.3 Dovolené hodnoty a meze

Nakonec je třeba určit meze, ve kterých se nezávislé parametry mohou pohybovat. Rozhodujícím parametrem je minimální vzdálenost mezi jednotlivými prvky pev , jejíž velikost závisí jednak na mechanických vlastnostech použitého materiálu rotoru, jednak na přesnosti výrobní technologie. Namáhání rotoru je kromě elektromechanických sil způsobeno především odstředivými silami při rotaci. Reluktanční stroj je většinou řízen pomocí frekvenčního měniče, umožňujícího otáčky vyšší než jmenovité. Jako maximální velikost

otáček n_m tak bude uvažován trojnásobek jmenovité hodnoty, tedy 4500 min^{-1} . Materiálem rotoru jsou potom elektrotechnické plechy M600-50A, jejichž vlastnosti lze dohledat v [17], ty nejdůležitější jsou potom uvedeny v tabulce 2.3. Bezpečnostní koeficient byl zvolen $k_K = 2$.

Tabulka 2.3: Mechanické vlastnosti M600-50A

σ_K	285 MPa	mez kluzu
E	$210 \cdot 10^3$ MPa	Youngův modul
ρ	$7,75 \text{ kg} \cdot \text{dm}^{-3}$	objemová hustota

Maximální mechanické napětí (2.12) je potom počítáno pomocí katalogové meze kluzu σ_K a zvolené hodnoty bezpečnostního koeficientu k_K . Podmínka pevnosti je řešena z hlediska hypotézy HMM (Huber-Miseses-Hencky), tedy porovnáváním maximálního dovoleného mechanického napětí s Misesovým napětím. [78] Toto napětí je počítáno pomocí jednoduchého 2D mechanického FEM modelu v softwaru COMSOL Multiphysics®. Jedinou uvažovanou silou působící na rotor je potom odstředivá síla určená zvolenou hodnotou otáček n_m .

$$\sigma_{\max} = \frac{\sigma_K}{k_K} = 142,5 \text{ MPa} \quad (2.12)$$

Rozměry jednotlivých nezávislých parametrů byly nejprve nastaveny na nejméně příznivou variantu z hlediska mechanického namáhání, tedy pro limitní vzdálenosti mezi jednotlivými izolačními bariérami a vzdálenosti konců bariér od povrchu rotoru. Následně byla hledána taková hodnota minimální vzdálenosti prvků pev (2.13), jejíž napětí by vyhovělo hypotéze HMM. Jelikož nejkritičtější nezávislým parametrem z hlediska namáhání se ukázal posun konců bariér od povrchu rotoru pos , je tato vzdálenost určena především vůči němu. Od této vzdálenosti byly následně odvozovány další dovolené hodnoty a meze.

$$pev = 0,5 \text{ mm} \quad (2.13)$$

Následující podmínky (2.14) až (2.16) zabraňují konfliktu jednotlivých bariér tak, že jejich minimální vzdálenost musí být právě pev . Podmínka (2.14) dále dovoluje pouze takovou šířku s_{b1} , aby bariéra nezasahovala do vymezené blízkosti hřídele, podobně (2.16) omezuje šířku poslední bariéry tak, aby respektovala vnější průměr rotoru D_3 , vzdálenost pev je v tomto případě dvojnásobná. Při prokládání velmi širokých bariér splajnem totiž v některých případech docházelo vlivem zakřivení polynomu v okolí koncových bodů k přesahům bariéry přes vnější průměr rotoru. To platilo pro rotor se čtyřmi bariérami, pro rotor s bariérami třemi bylo nutné tuto poslední podmínku ze stejných důvodů dále upravit a zvětšit tuto hodnotu na $3 \cdot pev$.

$$poc - s_{b1} - \frac{D_h}{2} - pev > 0 \quad (2.14)$$

$$v_b - s_{b(i)} - s_{b(i+1)} - pev > 0 \quad (2.15)$$

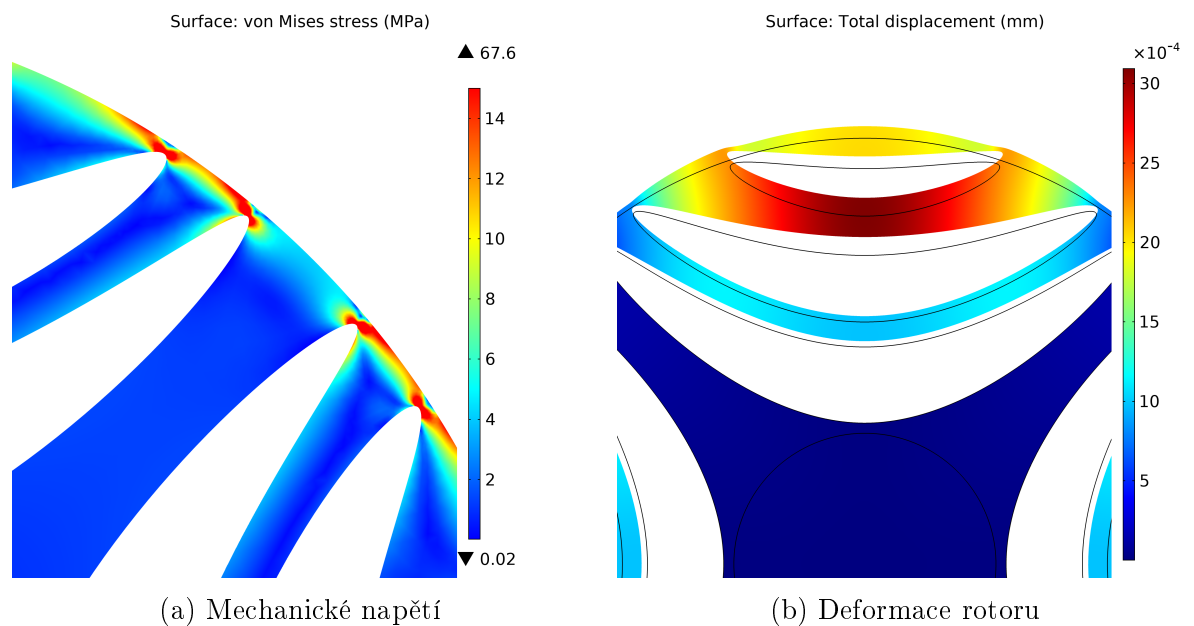
$$poc + (n_b - 1)v_b + s_{b(n_b)} - \frac{D_3}{2} + 2 \cdot pev < 0 \quad (2.16)$$

Podmínka (2.17) potom určuje minimální šířku izolační bariéry s_b , vzdálenost konců bariér od vnějšího průměru poc musí být dle (2.18) minimálně pev , maximální hodnota je potom omezena na 2 mm a rozmezí koeficientu k , reflektujícího odchylku úhlů γ od rovnoběžné polohy je potom pro každou z bariér dáno intervalem (2.19).

$$s_{b(i)} > 2 \cdot pev \quad (2.17)$$

$$poc = \langle pev, 2 \text{ mm} \rangle \quad (2.18)$$

$$k_{(i)} = \langle 0, 1 \rangle \quad (2.19)$$



Obrázek 2.3: Simulace mechanického namáhání stroje

Jelikož by bylo značně obtížné definovat podmínky na základě rovnic jednotlivých polynomiálních částí splajnů, je spodní mez úhlu γ_1 (2.20) určena na základě pokusu, kdy je šířka první izolační bariéry nastavena na maximální možnou, úhel γ_1 je následně zmenšován až do velikosti, kdy jsou od sebe okraje symetrických bariér v nejužším místě vzdáleny pev . To samozřejmě není vždy zcela správně, jelikož bariéra užší by tento úhel mohla mít i o něco menší. Tendence optimalizačního algoritmu tento úhel minimalizovat se však neprojevily, podmínka tak byla v této formě zachována. V případě rotoru se třemi bariérami může být šířka první bariéry o něco větší, spodní mez je pro tuto variantu nastavena

podle (2.21). Horní mez těchto intervalů vychází opět z mechanického FEM modelu, tak aby byl zachován zvolený koeficient bezpečnosti. Ukázka výsledků mechanického modelu je potom na obrázcích 2.3. Obrázek (a) ukazuje mechanické Misesovo napětí, jelikož jsou maximální hodnoty pouze na velmi malých místech u konců bariér, je barevné měřítko posunuto. Maximální hodnota napětí je potom 67,6 MPa. Na obrázku (b) je potom deformace rotoru vlivem tohoto napětí. Aby byl obrázek lépe názorný je skutečné posunutí zvětšeno 500krát. Model byl dále ověřena i v softwaru SolidWorks Simulation [®], tentokrát jako 3D problém. Při podobně hustém zasiťování problému vychází maximální namáhání o 20 % vyšší, je však nutno podotknout, že zde hraje velkou roli hustota a rozptřeni sítě v okolí zakončení bariér, kde se tyto hodnoty vyskytují. Maximální hodnota deformace potom vychází oproti předchozí simulaci o 7 % vyšší. Rozložení obou veličin po povrchu rotoru jsou však v případě obou simulací ve velmi dobré shodě.

$$\gamma_1 = \langle 46, 3; 60^\circ \rangle \quad (2.20)$$

$$\gamma_1 = \langle 46, 7; 60^\circ \rangle \quad (2.21)$$

Ačkoliv výše uvedené vztahy dobře fungují pro eliminaci konfliktních geometrií a uvedená minimální vzdálenost jednotlivých prvků do jisté míry zabraňuje překročení dovoleného namáhání, nejsou tyto podmínky zárukou mechanické pevnosti rotoru. Především geometrie s úzkými bariérami velmi blízko vnějšího okraje rotoru v některých případech překračují dovolené namáhání. Další zužování prostoru nezávislých parametrů by však mohlo značně omezit optimalizační algoritmus v hledání ideálních řešení a případné sestavení další série podmínek by bylo značně náročné. Po dokončení optimalizace tak bude nutné jednotlivá řešení prozkoumat z hlediska jejich odolnosti vůči namáhání odstředivou silou.

3 Matematický model

3.1 Elektromagnetické pole

Pro tvorbu modelu byl použit software COMSOL Multiphysics [®]. Při popisu pole je využito magnetického vektorového potenciálu, definovaného dle (3.2). Ačkoliv by bylo v částech problému, kde nefiguruje proudová hustota \mathbf{J} , posuvný proud $\frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$ a pro Ampérův zákon (3.1) platí $\nabla \times \mathbf{H} = 0$, možné využít i potenciálu skalárního, nemá to v případě dvoudimenzionálního problému příliš význam. Rovnice vektorového potenciálu se v těchto částech i tak značně zjednoduší a vektor \mathbf{A} působí pouze v axiálním (z) směru, ve smyslu cylindrických souřadnic (r, θ, z) . Navíc se vyhneme smíšeným hranicím ploch, kde by působily oba potenciály najednou.

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (3.1)$$

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A} \quad (3.2)$$

$$\mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} - \nabla \varphi \quad (3.3)$$

Vyjdeme-li z Ampérova zákona (3.1), kde \mathbf{H} je intenzita magnetické pole, \mathbf{J} proudová hustota a $\frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$ hustota posuvného proudu, kde \mathbf{D} je vektor elektrické indukce, a následně dosadíme za tyto veličiny dle konstitučních vztahů (3.4) a (3.5), při současném zanedbání kapacitních jevů ve stroji v podobě hustoty posuvných proudů, dostáváme kvazistacionární vztah (3.6). Zde nově figuruje magnetická indukce \mathbf{B} , intenzita elektrického pole \mathbf{E} , proudová hustota \mathbf{J}_{ext} , rychlost pohybu vodičů \mathbf{v} a materiálové veličiny permeabilita μ a konduktivita γ .

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \quad (3.4)$$

$$\mathbf{J} = \gamma (\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}) + \mathbf{J}_{\text{ext}} \quad (3.5)$$

$$\nabla \times ([\mu]^{-1} \mathbf{B}) = \gamma (\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}) + \mathbf{J}_{\text{ext}} \quad (3.6)$$

Dále lze za vektory \mathbf{B} a \mathbf{E} dosadit jejich vyjádření pomocí magnetického vektorového potenciálu \mathbf{A} , podle (3.2) a (3.3), nyní se v rovnici (3.7) kromě magnetického vektorového potenciálu, materiálových veličin, rychlosti a proudové hustoty dodané do systému zvenčí, nachází pouze jedna neznámá, elektrický skalární potenciál φ . Rovnice je v tomto tvaru

invariantní vůči kalibrační transformaci, tedy po dosazení $\mathbf{A}' = \mathbf{A} - \nabla f$ a $\varphi' = \varphi + \frac{\partial}{\partial t} f$ dostáváme stejný vztah.

$$\nabla \times ([\mu]^{-1} (\nabla \times \mathbf{A})) = \gamma \left(-\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} - \nabla \varphi + \mathbf{v} \times (\nabla \times \mathbf{A}) \right) + \mathbf{J}_{\text{ext}} \quad (3.7)$$

Gradient elektrického skalárního potenciálu φ má nenulovou složku pouze ve směru z , pokud by ovšem byly v tomto směru jakékoliv rozdíly v elektrických potenciálech, nebylo by zjednodušení problému do 2D podoby platné, je tak nutné pro tyto případy zvolit $\varphi = 0$. Nyní se o skalární pole rozšířený první člen pravé strany rovnice $-\frac{\partial}{\partial t} (\mathbf{A} - \nabla f)$, respektive jeho druhá část $\frac{\partial}{\partial t} (\nabla f)$ nemůže zkrátit s druhou částí členu, vyplývajícího z rozšíření gradientu skalárního potenciálu $-\nabla (\varphi + \frac{\partial}{\partial t} f)$, tedy se stejným výrazem opačného znaménka. Přidané skalární pole tak nyní zůstává součástí rovnice a řešení jsou unikátní. Tím se dostáváme k výsledné podobě rovnice (3.8). Do problému je následně zavedena podmínka zachování proudu $\nabla \cdot (\gamma \mathbf{A}) = 0$, která navíc napomáhá numerické stabilitě řešení. [79], [18], [92]

$$\nabla \times ([\mu]^{-1} (\nabla \times \mathbf{A})) + \gamma \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} - \gamma \mathbf{v} \times (\nabla \times \mathbf{A}) = \mathbf{J}_{\text{ext}} \quad (3.8)$$

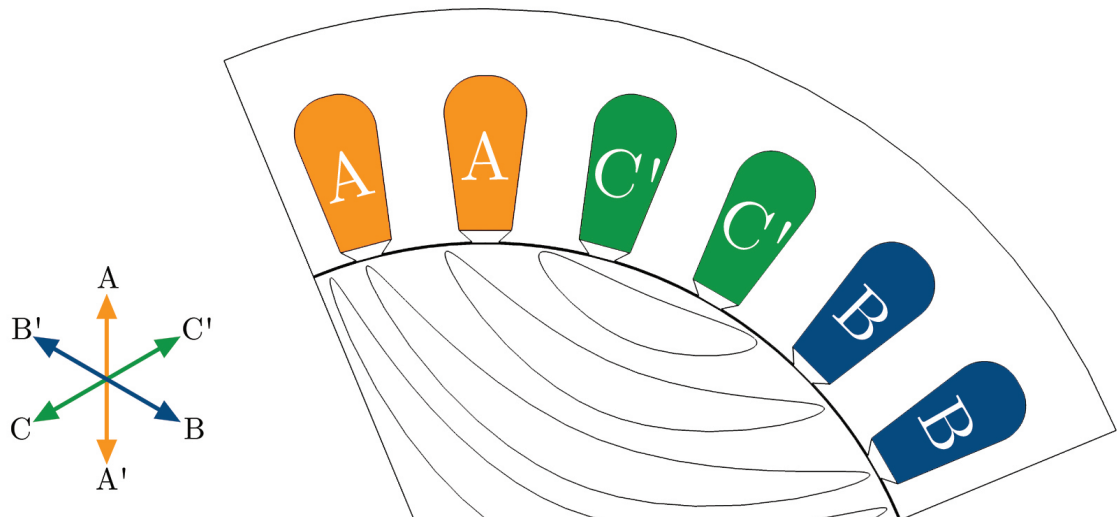
Proudová hustota \mathbf{J}_{ext} je do systému dodávána pomocí cívek statorového vinutí, definovaných dle (3.9), kde N je počet závitů cívky, I_i je protékající proud a S je její průřez, zjednodušeně odpovídající ploše jedné statorové drážky. Jednotlivé fázové proudy jsou potom dle (3.10), (3.11) a (3.12) vyjádřeny pomocí amplitudy I_m , úhlové rychlosti ω , jinak také jako $2\pi f$, kde f je frekvence napájecího zdroje, času t a fázového posunu ψ . Součin NI_m byl potom s ohledem na průřez zvolen tak, aby proudová hustota v drážce byla přibližně $5 \text{ A} \cdot \text{mm}^{-2}$, což odpovídá přibližně kolenu BH křivky použitého materiálu. Rozmístění jednotlivých fází v rámci antisymetrického výseku je znatelné z 3.1, antiperiodicky se tedy v další části za fází B bude nalézat fáze A' .

$$\mathbf{J}_{\text{ext}} = \left(0, 0, \frac{NI_i}{S} \right) \quad (3.9)$$

$$I_a = I_m \cos(\omega t + \psi) \quad \text{A} \quad (3.10)$$

$$I_b = I_m \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3} + \psi\right) \quad \text{A} \quad (3.11)$$

$$I_c = I_m \cos\left(\omega t + \frac{2\pi}{3} + \psi\right) \quad \text{A} \quad (3.12)$$

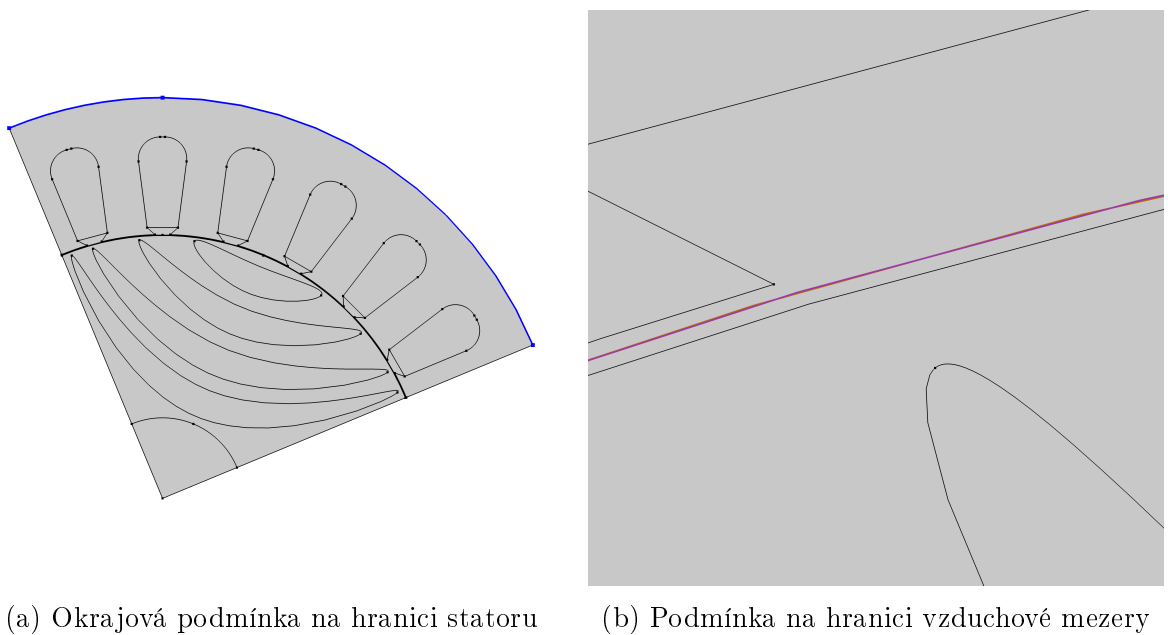


Obrázek 3.1: Rozložení fází po obvodu stroje

3.2 Okrajové a počáteční podmínky

Na vnějším okraji statoru, popsaného rovnicemi vektorového magnetického potenciálu je aplikována podmínka (3.13), definující nulovou hodnotu tangenciální složky potenciálu. Tato podmínka je dále použita i pro umělou hranici dělicí vzduchovou mezeru na dvě části, kde zajišťuje spojitost pole na obou částech hranice.

$$\mathbf{n} \times \mathbf{A} = 0 \quad (3.13)$$



(a) Okrajová podmínka na hranici statoru

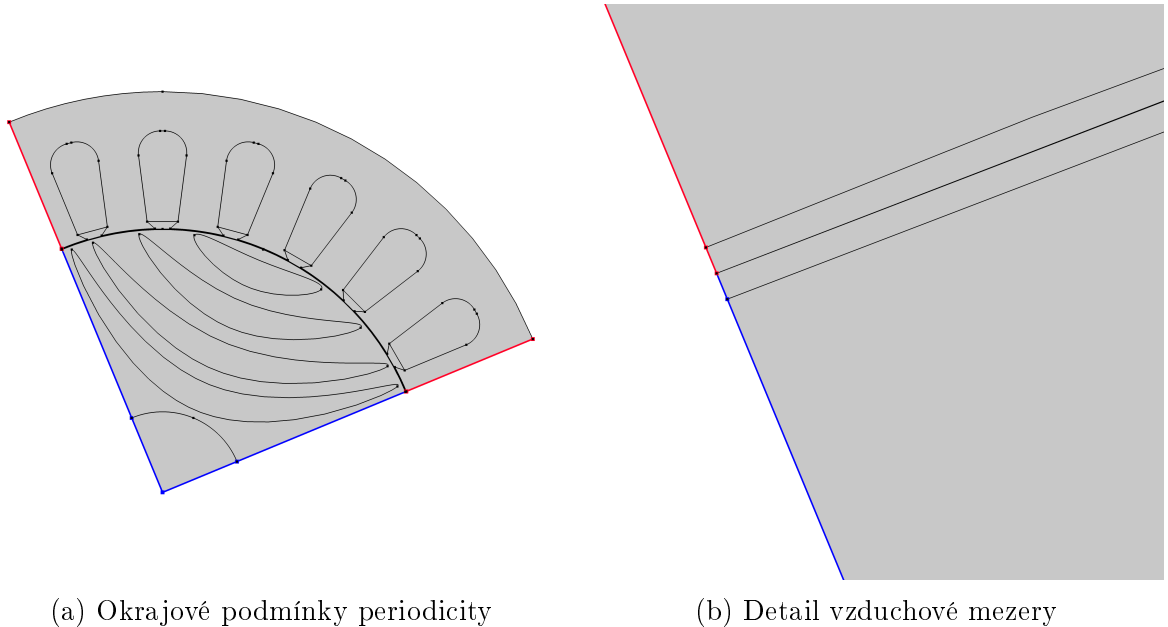
(b) Podmínka na hranici vzduchové mezery

Obrázek 3.2: Podmínky magnetického vektorového potenciálu

Jelikož je celý problém symetrický, respektive antisymetrický, lze bez větší chyby řešit pouze jeho čtvrtinu. Na okrajích čtvrtiny problému je tak třeba aplikovat podmínky

periodicity pro vektorový magnetický potenciál (3.14). Tato podmínka je dle obrázku 3.3 aplikována separátně pro statorovou a rotorovou část stroje. Chyba vzniklá tímto zjednodušením je asi 5 %, výpočetního času však klesl téměř na 1/4 původního.

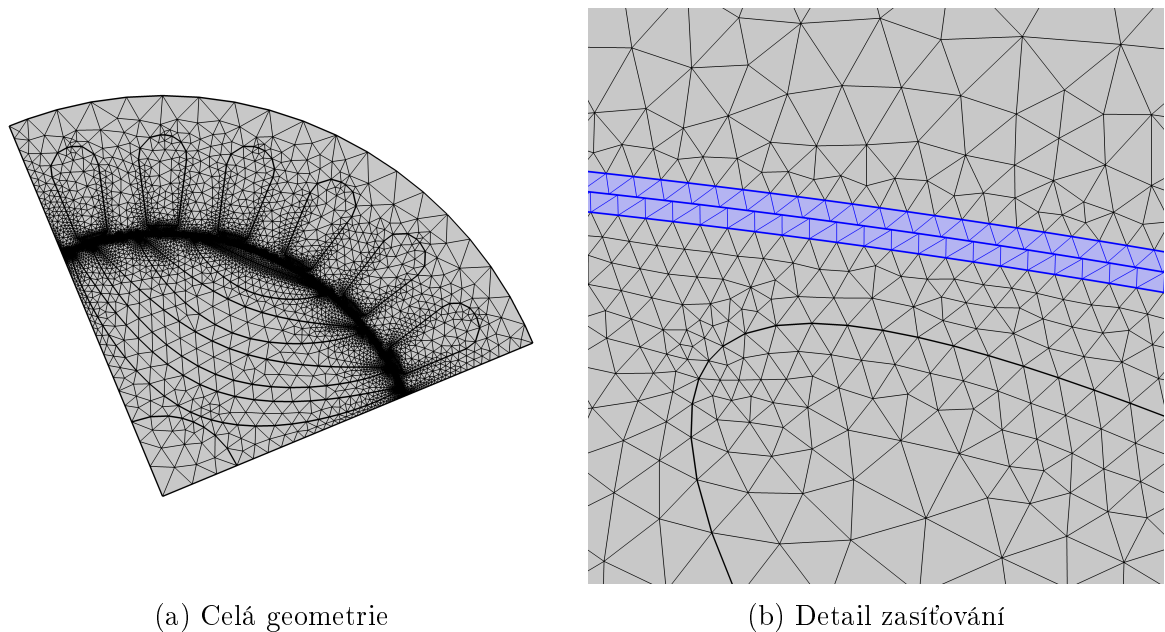
$$\mathbf{A}_1 = -\mathbf{A}_2 \quad (3.14)$$



Obrázek 3.3: Periodické podmínky magnetického vektorového potenciálu

Počáteční podmínka pro vektorový potenciál je $\mathbf{A} = [0, 0, 0]$ Wb · m⁻¹. To sice není zcela správná hodnota, která by vycházela z předešlého kroku ustálené simulace se stojícím rotorem a proudy odpovídající času $t = 0$, která by však musela proběhnout před každým výpočtem simulace dynamické. Přechodový děj simulace s proudovým zdrojem je však natolik rychlý, že už v prvním časovém kroku dynamické simulace se pole téměř neliší od pole simulace zcela ustálené a především velikost momentu prvního a posledního časového okamžiku jedné periody je totožná.

Elektrotechnické plechy statoru a rotoru jsou vzhledem k intenzitě magnetického pole nelineární a pro zjišťování jejich magnetické indukce je využito interpolace hodnot BH křivky z příslušného katalogu [16]. Síť problému je tvořena trojúhelníkovými elementy zřetelnými z (3.4), nejhustější je v oblasti vzduchové mezery a povrchu rotoru. Síť je adaptabilní a při každé změně geometrie se dle předepsané hustoty jednotlivých oblastí automaticky pozmění. Během tvorby modelu byla síť z prvotní velmi husté ředěna tak, aby byl výsledný počet elementů co nejmenší, ale zároveň abychom se při výpočtu nedopouštěli velké chyby.



(a) Celá geometrie

(b) Detail zasíťování

Obrázek 3.4: Zasíťování řešeného problému

3.3 Točivý moment

Celkový točivý moment rotoru je pak počítán pomocí (3.15), tedy plošného integrálu po obálce rotoru $\oint_{\partial\Omega}$, kde \mathbf{r} je rameno síly, tedy poloměr hranic rotoru s okolním vzduchem počítaný od \mathbf{r}_0 , geometrického středu rotoru. Dále \mathbf{n} je normálový vektor v každém bodě těchto hranic a \mathbb{T} je Maxwellův tenzor napětí. Ten je potom určen dle (3.16), pomocí elektrické a magnetické indukce \mathbf{D} , \mathbf{B} , intenzity elektrického a magnetického pole \mathbf{E} , \mathbf{H} a rychlosti pohybu \mathbf{v} , \mathbb{I} je potom jednotkový symetrický tenzor. Jelikož nás zajímá především moment v axiálním směru hřídele, je nutné užít vztahu (3.17).

$$\mathbf{M}_0 = \oint_{\partial\Omega} (\mathbf{r} - \mathbf{r}_0) \times (\mathbf{n}\mathbb{T}) \, dS; \quad \mathbf{r}_0 = [0, 0] \quad (3.15)$$

$$\mathbb{T} = -\frac{1}{2}(\mathbf{E}\mathbf{D} + \mathbf{H}\mathbf{B})\mathbb{I} + \mathbf{E} \otimes \mathbf{D} + \mathbf{H} \otimes \mathbf{B} + (\mathbf{D} \times \mathbf{B}) \otimes \mathbf{v} \quad (3.16)$$

$$M = \mathbf{r}_{ax}\mathbf{M}_0; \quad \mathbf{r}_{ax} = (0, 0, 1) \quad (3.17)$$

Symetrii lze nalézt i v rovině průběhů elektromagnetických veličin, které se periodicky opakují dle vztahu (3.18), kde ν je úhel natočení a ω_m rychlost otáčení rotoru. Tento úhel je potom spočten jako součin počtu drážek na pól a fázi q a drážkové rozteče t_d . Úhlovou rychlost lze potom vyjádřit pomocí rychlosti otáčení n . Z (3.19) je vidět, že součin nezávisí na počtu drážek, ale pouze na počtu pólů stroje $2p$ a počtu jeho fází m . Po dosazení tohoto vztahu zpět do (3.18) a následné úpravě, dostáváme konečný vztah pro velikost jedné periody (3.20).

$$T = \frac{\nu}{\omega_m} = \frac{q \cdot t_d}{2\pi \frac{n_m}{60}} \quad (3.18)$$

$$q \cdot t_d = \frac{Q}{2p \cdot m} \cdot \frac{2\pi}{Q} = \frac{2\pi}{2p \cdot m} \quad (3.19)$$

$$T = \frac{60}{2p \cdot m \cdot n_m} \quad (3.20)$$

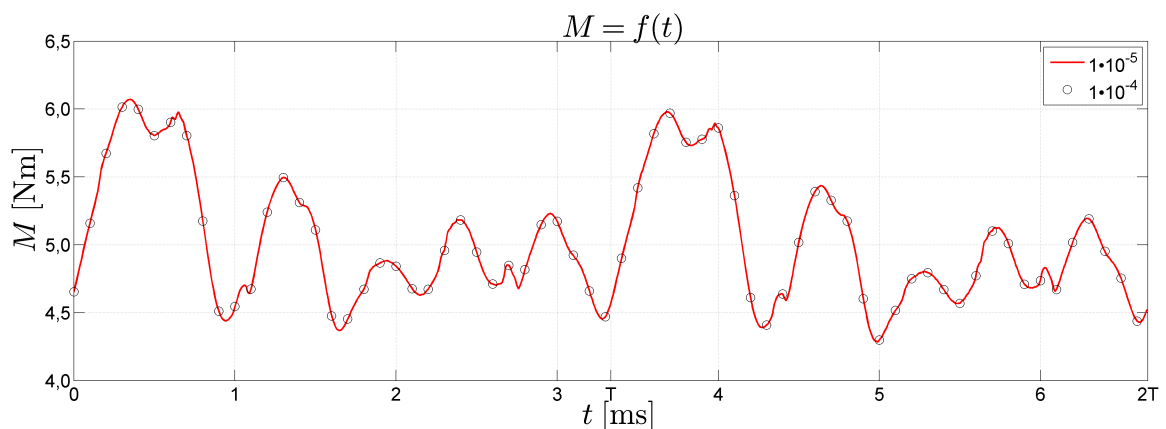
Pro porovnávání kvality jednotlivých možných geometrií rotoru stroje je zapotřebí jednoduchých ukazatelů. V případě točivého momentu jsou to průměrný moment \bar{M} , počítaný pomocí (3.21) z n hodnot v rámci jedné periody a jeho směrodatná odchylka σ , počítaná pomocí rozptylu $\text{Var}(M)$ dle (3.22) a (3.23). Tyto dvě hodnoty společně respektují velikost momentu a jeho zvlnění. A budou při optimalizaci použity jako kritériální funkce.

$$\bar{M} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n M_{(i)} \quad (3.21)$$

$$\text{Var}(M) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (M_{(i)} - \bar{M})^2 \quad (3.22)$$

$$\sigma = \sqrt{\text{Var}(M)} \quad (3.23)$$

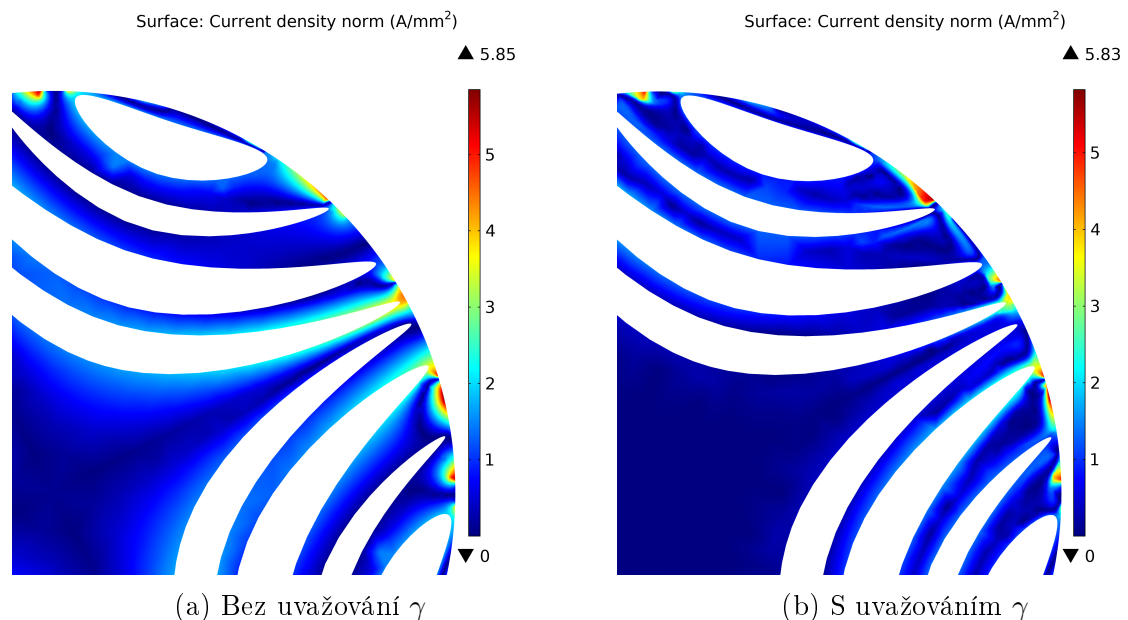
Obrázek 3.5 potom ukazuje průběh točivého momentu stroje v rámci dvou period T . Červený průběh plnou čarou je vypočten s krokem $1 \cdot 10^{-5}$ s, černé značky jsou potom velikosti momentu spočteného s krokem $1 \cdot 10^{-4}$ s. Ačkoliv se může zdát, že je průběh s menším krokem poměrně hrubý, rozdíl velikosti hodnot průměrného momentu \bar{M} a jeho rozptylu σ od přesnějšího průběhu není ani 0,5 %, přičemž výpočetní čas klesl o více než 1/3.



Obrázek 3.5: Průběh točivého momentu v čase

3.4 Ztráty

Zjednodušení modelu do 2D podoby sice přináší značné zkrácení výpočetní času, nelze však uvažovat mnohé jevy postihnutelné pouze u modelu plného. Jouleovy ztráty, dané odporem jedné fáze, počtem fází a proudem jimi protékajícím, včetně případného skin efektu, jsou vzhledem k napájení modelu proudovým zdrojem nezávislé na geometrii rotoru a nejsou tak v optimalizaci uvažovány. Dále nejsou uvažovány ztráty mechanické a dodatečné, způsobené např. rozptylovým magnetickým tokem v okolí kolem čel statorového vinutí. V případě mechanických ztrát sice lze uvažovat, že s tvarem izolačních bariér by se měnila jednak hmotnost rotoru, tedy zatížení ložisek, jednak by se měnily ventilační ztráty. Výpočet těchto ztrát je však značně komplikovaný a je též nutné uvést, že i při návrhu stroje jsou mechanické a dodatečné ztráty pouze odhadovány, či počítány dle různých empirických vztahů. [22]



Obrázek 3.6: Indukovaná proudová hustota v rotoru

Jistou roli však mohou hrát ztráty v železe, tedy ztráty vířivými proudy a ztráty hysterezní, ztráty povrchové, případně pulzační. Dělení ztrát na ztráty v železe, ztráty povrchové a pulzační je však spíše formální, přičemž příčinou je vždy změna magnetického indukčního toku v závislosti na čase, či poloze rotoru ve stroji. Ačkoliv se rotor otáčí synchronní rychlostí s magnetickým polem statoru, vznikají v něm v důsledku drážkování statoru, případně i vlivem vyšších harmonických složek napájení, ztráty. Fakt, že tenzor elektrické konduktivity γ může v 2D simulaci působit pouze v axiálním směru, spolu s předpokladem, že je stator i rotor stroje seskládán ze vzájemně izolovaných elektrotechnických plechů, vede k tomu, že nenulovou hodnotu tohoto tenzoru by bylo možné uvažovat pouze ve statorovém vinutí a hřídeli stroje. Pokud by byl rotor stroje složen z plechů vzájemně neizolovaných, případně z nelaminovaného feromagnetického materi-

álu, bylo by možné uvažovat nenulovou hodnotu konduktivity i v něm. To však vždy vede na přechodový jev, kdy několik period trvá, než se působení statorového a rotorového pole vzájemně ustálí. To by však znamenalo, že pro výpočet ztrát vířivými proudy bude třeba až desetinásobně delší výpočetní čas oproti původnímu modelu, což by nebylo pro účely optimalizace vhodné.

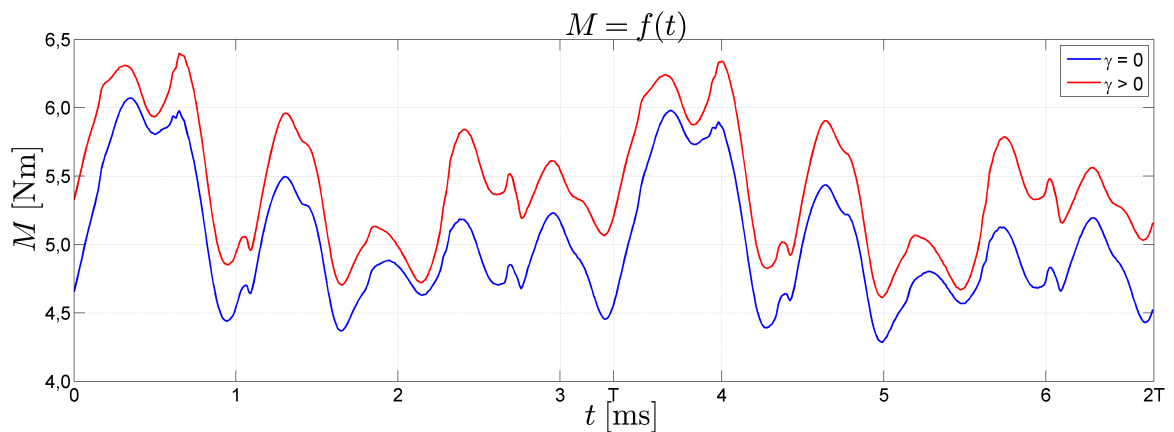
$$\mathbf{J} = -\gamma \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} \quad (3.24)$$

$$\Delta P = \int_V \frac{J^2}{\gamma} dV \quad (3.25)$$

Jednou z možností jak v simulaci respektovat ztráty vířivými proudy v rotoru stroje je využití zobecněné rovnice Jouleových ztrát v objemu (3.25). Tyto ztráty jsou určeny proudovou hustotou \mathbf{J} a elektrickou konduktivitou γ . Pokud vyjádříme proudovou hustotu pomocí časové derivace magnetického vektorového potenciálu \mathbf{A} dle (3.24) a původní integrál objemu zjednodušíme na integrál plošný, dostáváme výsledný vztah (3.26).

$$\Delta p_{\text{Fe}} \sim \int_0^T \int_V \gamma \left(\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} \right)^2 dV dt \sim \int_0^T \int_{\theta} \int_r \gamma \left(\frac{\partial A_z}{\partial t} \right)^2 dr d\theta dt \quad (3.26)$$

Tento výpočet je proveden vždy v návaznosti na simulaci bez uvažování tenzoru γ v rotoru. Takto získaná rozložení proudové hustoty dobře odpovídají modelu s vodivými plechy v oblasti povrchu rotoru, kde se nejvíce projevují ztráty drážkováním statoru, jelikož se však pole rotoru zjednodušené simulace nemůže bránit změnám, proniká proudová hustota částečně i hlouběji do jha a celkové ztráty jsou tak značně vyšší.



Obrázek 3.7: Porovnání průběhu momentu

Porovnání proudové hustoty indukované do rotoru z hlediska obou modelů je na obrázku 3.6. Porovnání průběhu momentu v čase obou modelů je potom viditelné z obrázku 3.7, ačkoliv jsou oba průběhy tvarově podobné, má stroj s uvažováním nenulového tenzoru γ větší zvlnění. Takto spočtenou hodnotu lze považovat pouze za informativní a využitelnou pouze ke srovnání jednotlivých strojů v rámci optimalizace. Ztráty hysterezní lze

numericky počítat například dle Jiles–Athertonova modelu, k tomu je však potřebná znalost značného počtu materiálových konstant, případně dle vztahů uvedených v [98].

3.5 Účinitel stroje

Dalším problémem, který zatím není zohledněn je účinitel, čili poměr činného a zdánlivého výkonu stroje. Jelikož je statorové vinutí v modelu napájeno proudovým zdrojem a samotné uspořádání vinutí je ve dvojrozměrné simulaci značně zjednodušeno, je pro určení účinitelu nutné použít jiných než výkonových veličin. Jednou z cest je využití indukčností L_d a L_q v souřadnicovém systému Parkovy transformace. K tomu je dle (3.27) a (3.28) zapotřebí znalost magnetických indukčních toků Φ a proudů I v daných osách. Tyto proudy jsou určeny rozložením efektivní hodnoty fázového proudu na dvě složky pomocí úhlu jeho fázového posunu ψ .

$$L_d = \frac{\Phi_d}{I_d} = \frac{\Phi_d}{\frac{I_m}{\sqrt{2}} \cos(\psi)} \quad (3.27)$$

$$L_q = \frac{\Phi_q}{I_q} = \frac{\Phi_q}{\frac{I_m}{\sqrt{2}} \sin(\psi)} \quad (3.28)$$

Jednotlivé toky jsou potom určeny pomocí (3.29), jako plošný integrál magnetické indukce v radiálním směru \mathbf{B}_r po povrchu rotoru, kde l je délka stroje, θ je úhlový směr a r je Jakobián cylindrické soustavy souřadnic. Celý problém je navíc zjednodušen tak, že horní a dolní mez θ se k sobě limitně blíží, integrováno je tak po elementárních plochách v osách d a q . Jelikož je tok vlivem drážkování statoru zvlněný, je následně určena jeho efektivní hodnota v rámci jedné periody.

$$\Phi = \iint_S \mathbf{B} \, dS = l \int_{\theta} r B_r \, d\theta \quad (3.29)$$

Po dosazení toků do rovnic (3.27) a (3.28) dostáváme obě hledané indukčnosti, je-li potom dle (3.30) určen jejich podíl, dostáváme číslo K_w udávající tzv. vyniklost rotoru, tedy poměr magnetických reluktancí v obou osách. Pokud je tato hodnota následně dosazena do (3.31), lze přibližně určit maximální možnou velikost účinitelu pro danou rotorovou geometrii. Tuto hodnotu je samozřejmě nutné, vzhledem k různým zjednodušením modelu, brát s rezervou. Hodnota však adekvátně reaguje na změny reálně ovlivňující jalovou složku výkonu stroje a lze ji tak využít pro hodnocení jednotlivých geometrií. [59]

$$K_w = \frac{L_d}{L_q} \quad (3.30)$$

$$\cos(\varphi)_{\max} = \frac{K_w - 1}{K_w + 1} \quad (3.31)$$

4 Optimalizace stroje

4.1 Algoritmus

Pro optimalizaci tvaru izolačních bariér byl zvolen multikriteriální evoluční algoritmus NSGA-II (*Non-dominated Sorting Genetic Algorithm*) [26]. Jedná se o populační metodu, prostor nezávislých parametrů je tak prohledáván více jedinci, což navíc umožňuje paralelizaci optimalizačního problému. NSGA-II (2002) navazuje na původní algoritmus NSGA (1994) [85] s vylepšením rychlosti třídění populace, zavedením elitismu a odlišným způsobem zajištění dobrého rozprostření jedinců po Pareto-frontě.

Pro vysvětlení principu algoritmu je nejprve nutné definovat pojmy, většinou převzaté z Darwinovy evoluční teorie a Mendelových genetických výzkumů. Jak už bylo naznačeno, množina řešení se nazývá populací a její jednotlivá řešení jsou označováni jako jedinci, přičemž každý jedinec obsahuje vektor nezávislých parametrů, označovaný jako chromosom. Ten může být v podobě reálných čísel, tedy přímo hodnot zadávaných parametrů, v tomto případě je označen jako fenotyp, případně kódován, například pomocí písmen, nejčastěji však binárně. Kódovaný genom se potom nazývá genotyp. Délka binárního zápisu jednotlivých parametrů potom určuje jejich přesnost. Pokud je přesnost příliš vysoká, může optimalizace problému trvat příliš dlouho, nízká přesnost však na druhou stranu může znemožnit konvergenci algoritmu. Iterace algoritmu se potom nazývají generace, přičemž starší populace generace je označována jako rodičovská a novější jako potomstvo. Potomci vznikají na základě křížení a mutací vybraných rodičů. Prvotní rodičovská populace o zvoleném počtu jedinců N je generována náhodně.

4.1.1 Třídění a selekce

Než může být přistoupeno k samotnému výběru jedinců ke křížení či mutaci, je nutné populaci ohodnotit. K tomu je využito metody třídění na základě dominance a metody třídění dle shlukové vzdálenosti. První ze jmenovaných metod přiřazuje jedincům hodnotu na základě toho, zda jim jiná řešení na Pareto-frontě výsledků kriteriálních funkcí dominují, či ne. Nejprve jsou vybráni ti jedinci, kterým žádná jiná řešení nedominují a je jim přiřazena hodnota 1, ti jsou následně prozatímně odebráni a ohodnoceni jsou následující nejlepší jedinci v řadě, tentokrát hodnotou 2. Tento proces se opakuje dokud nejsou ohodnocena všechna řešení. Menší hodnota tedy indikuje lepší řešení.

Třídění dle shlukové vzdálenosti potom udává, jak úzce je daný jedinec v prostoru řešení obklopený dalšími řešeními. V podstatě se jedná o vzdálenost nejbližších sousedních řešení jedince, normovanou maximální možnou vzdáleností v prostoru řešení. Jedinci s větší shlukovou vzdáleností mají při výběru přednost, jelikož lépe zajišťují diverzitu

řešení, tedy rozprostření jedinců Pareto-fronty.

Nyní je na základě výše uvedených hodnocení nutné vybrat N jedinců ke křížení či mutaci, přičemž to jestli dojde k jednomu či druhému, je úměrné nastaveným pravděpodobnostem. Obecně se pravděpodobnost křížení nastavuje vyšší. V našem případě je pravděpodobnost křížení 60 % a pravděpodobnost mutace 20 %. Jednou z možností výběru jedinců je metoda rulety, kdy je pravděpodobnost výběru jedince přímo úměrná jeho hodnoti. Algoritmus NSGA-II využitý v optimalizaci využívá metodu souboje, kdy je náhodně vybráno více jedinců, ti jsou porovnání na základě hodnoti a jedinec nejlepší, tedy s nejnižší hodnotí je vybrán jako rodič. Počet najednou srovnávaných jedinců potom udává tzv. selekční nátlak, tedy, zdali bude ve výsledku v rodičovské populaci spíše větší diverzita, případně bude-li spíše převažovat více kopií menšího počtu nejlepších jedinců. Souboje probíhají dokud není vybraných rodičů přesně N .

4.1.2 Křížení

Metod křížení je více, jednobodové křížení si na základě pravděpodobnostní funkce vybere v binárně kódovaném genomu pozici a následně pro dva různé potomky dosadí střídavě před a za tuto pozici část kódu obou rodičů. Další možností je dvoubodová obdoba této metody, případně uniformní křížení, kdy je možné náhodně kombinovat jednotlivé rodičovské bity. Ačkoliv jsou tyto metody použitelné i pro nekódované chromosomy, nemají stejné vlastnosti. Tak aby bylo jednobodové křížení využitelné i pro fenotypový zápis a zároveň byla zachována jeho důležitá vlastnost, tedy že aritmetický průměr decimálního vyjádření genotypu rodičů a potomků je totožný, což zajišťuje, že potomci jsou v prostoru nezávislých parametrů stejně vzdáleni od genetického průměru jejich rodičů, bylo vyvinuto tzv. simulované binární křížení [1]. Toho je využito i v našem případě. Tento postup navíc umožňuje nastavit, zda budou potomci od rodičů vzdáleni více či méně, což může být výhodné v různých fázích hledání řešení.

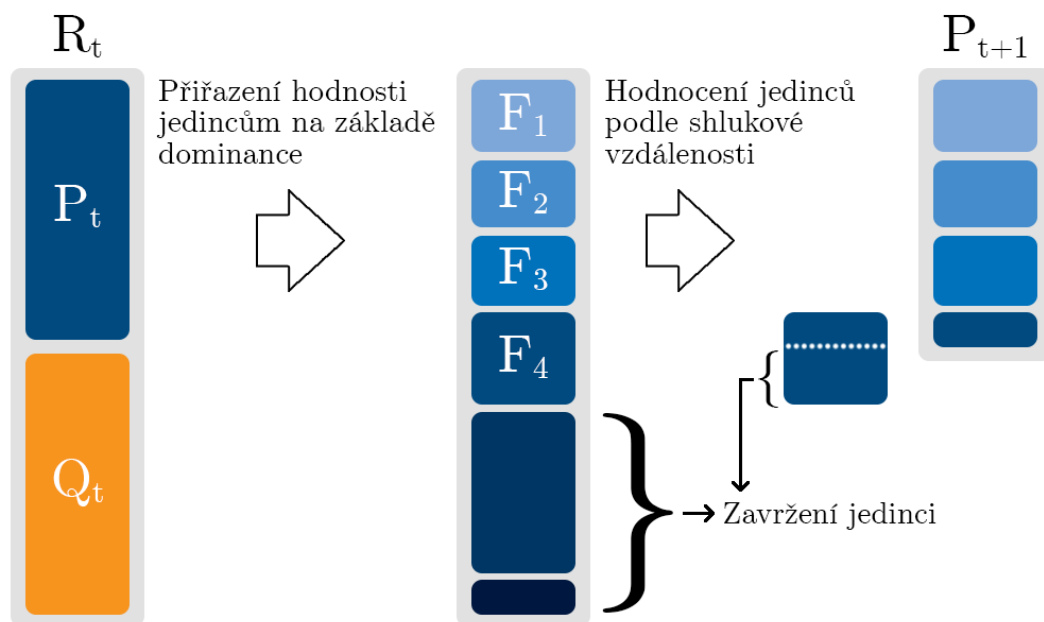
4.1.3 Mutace

Více postupů lze využít i v případě mutace. Pro binární kódování jsou vždy s určitou pravděpodobností měněny jeden, případně více bitů chromosomu, v případě reálného zápisu je k parametru rodiče přičteno číslo generované například na základě normálního rozdělení. V našem případě je využito polynomiální mutace, kdy je změna nezávislého parametru potomka generována na základě pravděpodobnostní funkce dané jednak mezemi daného parametru a jednak zvolené hodnoty, určující možnou vzdálenost mutovaného potomka od rodiče. Je to tedy jistá forma standardní odchylky.

4.1.4 Přírodní výběr

Nakonec je třeba určit, kteří jedinci přežijí do další generace, přičemž by jich mělo přežít vždy právě N . Princip tohoto výběru je nastíněn na obrázku 4.1. Jelikož algoritmus NSGA-II využívá elitismu, tj. ti nejlepší jedinci by měli beze změny přežít do dalších generací, je před výběrem nutné sloučit rodičovskou populaci označenou jako P_t a populaci potomků Q_t . Takto kombinované množině R_t o velikosti $2N$ je nutné znovu přidělit hodnotu na základě dominance. Následně jsou do přeživší populace nové generace P_{t+1} přidávány množiny jedinců F_i vzestupně dle jejich hodnoty. Pokud by další přidaná hodnota znamenala překročení počtu N , je přistoupeno k výběru příslušného počtu doplňujících jedinců z této množiny pomocí shlukové vzdálenosti. Tím je určena nová generace N jedinců P_{t+1} a postup se pro další a další generace stále opakuje.

Třídění dle hodnoty napomáhá konvergenci Pareto-fronty, shluková selekce pak dobrému rozprostření řešení po frontě. Problémem může být, že pro vysoký počet kriteriálních funkcí není většina jedinců v populaci nikým dominována a shluková selekce se tak stává jediným kritériem. Algoritmus potom ztrácí tlak na konvergenci k Pareto-optimalitě. Tento problém se může vyskytnout i v případě menšího počtu kriteriálních funkcí, je-li algoritmus velmi blízko konvergence a většině řešení opět žádná další nedominují. [77], [49] [71], [26], [85], [50], [58]

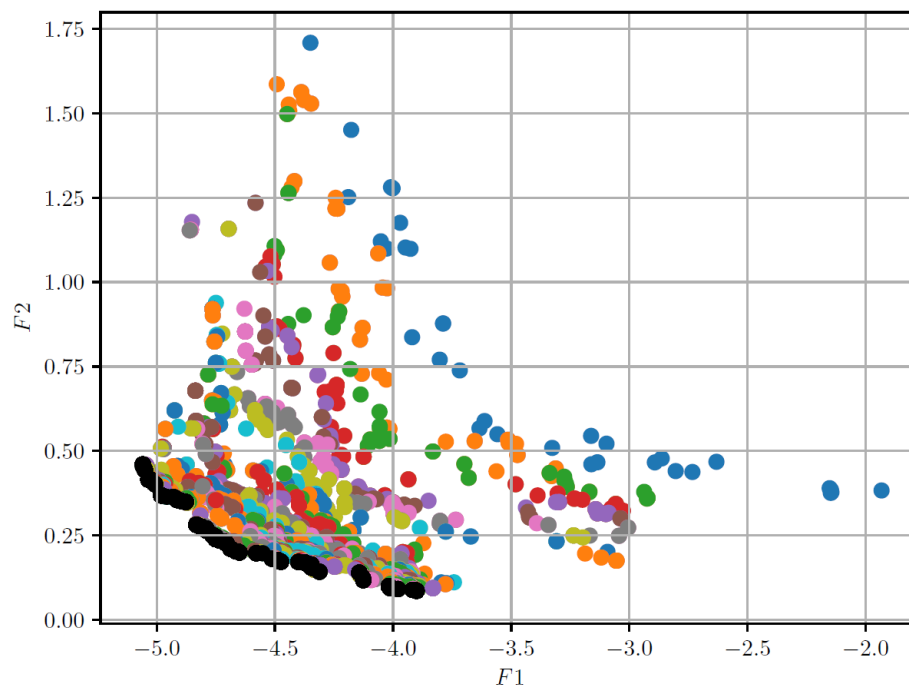


Obrázek 4.1: Metodika přírodního výběru, převzato z [26]

4.2 Průběh optimalizace

Optimalizovány byly dvě varianty geometrie rotoru, se čtyřmi a následně se třemi bariérami. Kriteriaálními funkcemi byly veličiny odvozené v podkapitole „Točivý moment“ kapitoly 3, tedy průměrný moment \overline{M} a jeho směrodatná odchylka σ , reprezentující zvlnění momentu. Cílem optimalizace bylo tento průměrný moment maximalizovat a zároveň minimalizovat jeho zvlnění. Nezávislých optimalizovaných parametrů potom bylo 9 pro stroj se čtyřmi bariérami a 7 pro stroj s bariérami třemi. Jejich výčet a bližší popis lze nalézt v podkapitole „Konstrukce izolačních bariér“ kapitoly 2, přičemž se dále v této kapitole nachází i podmínky, které musely být algoritmem respektovány.

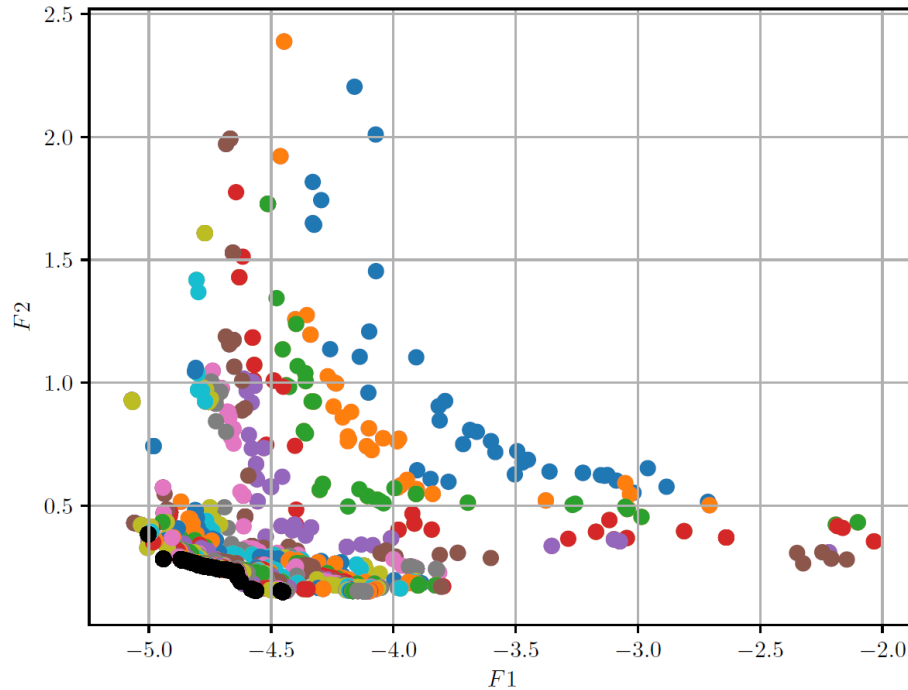
FEM model byl s optimalizačním algoritmem provázán pomocí prostředí Artap, vyvíjeném na katedře teoretické elektrotechniky Západočeské univerzity v Plzni. Prostředí je založeno na jazyku Python, který svými obsáhlými volně šiřitelnými matematickými a fyzikálními balíčky poskytuje poměrně efektivní zázemí pro vývoj a implementaci optimalizačních algoritmů včetně nástrojů pro další statistické, případně grafické zpracování dat. Nejprve bylo třeba algoritmus upravit tak, aby vždy respektoval všechny podmínky parametrizované geometrie a nedošlo tak k případnému selhání výpočtu modelu. Optimalizační algoritmus NSGA-II byl nastaven pro 50 generací a 80 jedinců v každé z nich. Celkem bylo tedy spočteno pro každou ze dvou optimalizačních úloh 4000 strojů.



Obrázek 4.2: Všechny spočtené stroje se čtyřmi bariérami

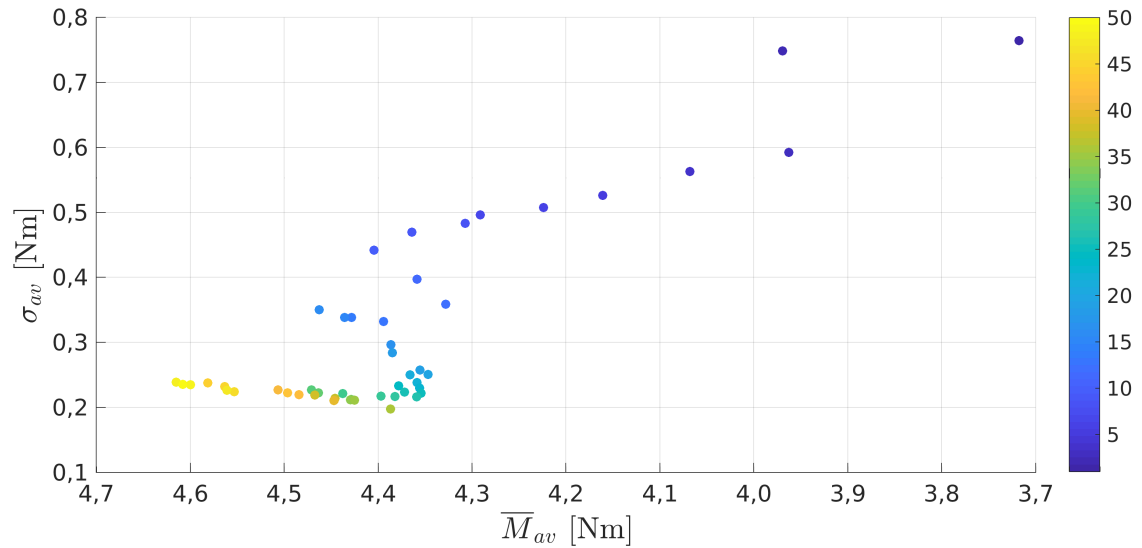
Využito bylo paralelizace výpočtů mezi 8 stroji výpočetního clusteru, přičemž průměrná doba trvání výpočtu jednoho stroje byla přibližně 46 s. Do celkového výpočetního času je však nutné brát i dobu práce optimalizačního algoritmu, který byl spuštěn na

odděleném počítači a samozřejmě zpoždění zasíláním úloh a výsledků mezi clusterem a ovládacím počítačem. Ne vždy byly také všechny stroje clusteru k dispozici. Celkový výpočet optimalizace stroje se čtyřmi bariérami tak nakonec trval přibližně 11 hodin. V případě stroje se třemi bariérami částečně selhala paralelizace úlohy, ovládací počítač byl navíc připojen pomalejším internetovým připojením, zde se celková doba běhu optimalizace blížila k 51 hodinám.

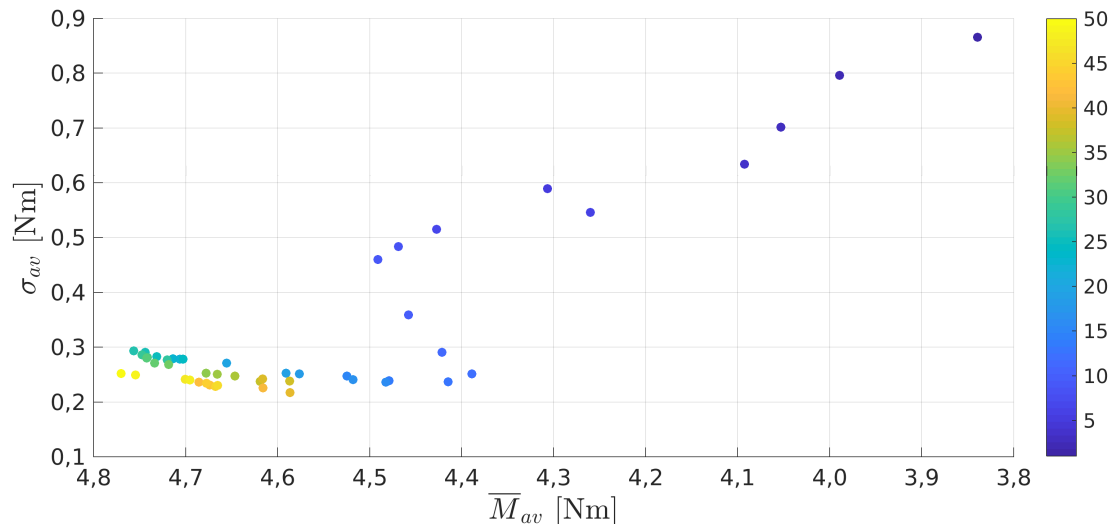


Obrázek 4.3: Všechny spočtené stroje se třemi bariérami

Na obrázcích 4.2 a 4.3 jsou zobrazeni všichni jedinci obou provedených optimalizací v rámci dvou kriteriálních funkcí. $F2$ reprezentuje velikost směrodatné odchylky, $F1$ potom velikost průměrného momentu. Hodnoty $F2$ jsou v tomto případě s opačným znaménkem, jelikož implicitní nastavení optimalizačního algoritmu je minimalizace, nikoli maximalizace dané funkce. Barevné dělení jedinců je potom rozlišení podle generací, ke kterým vždy 80 daných jednotlivců (strojů) přísluší. Modrá je generace první, černá potom generace poslední, tedy padesátá. Ačkoliv je takovéto vyobrazení konvergence poněkud nepřehledné, lze z něj pozorovat, že maximální průměrné momenty obou variant strojů jsou přibližně stejné, variantě se čtyřmi bariérami se však podařilo dosáhnout nižších hodnot zvlnění momentu. Viditelné je též lepší rozprostření jedinců poslední generace v rámci obou kriteriálních funkcí pro případ optimalizace se čtyřmi bariérami. V případě optimalizace se třemi bariérami je rozprostření na první pohled značně horší, jedinci poslední generace navíc netvoří Pareto-frontu, tedy, jedinci poslední generace nejsou v obou kriteriích lepší než všichni ostatní. To může ukazovat na problém s vyhodnocováním dominance jedinců, či problém s elitismem algoritmu. Vzhledem k tomu, že i přes tuto chybu algoritmus poměrně dobře konvergoval k výhodnějším řešením, nebyla optimalizace opakována.



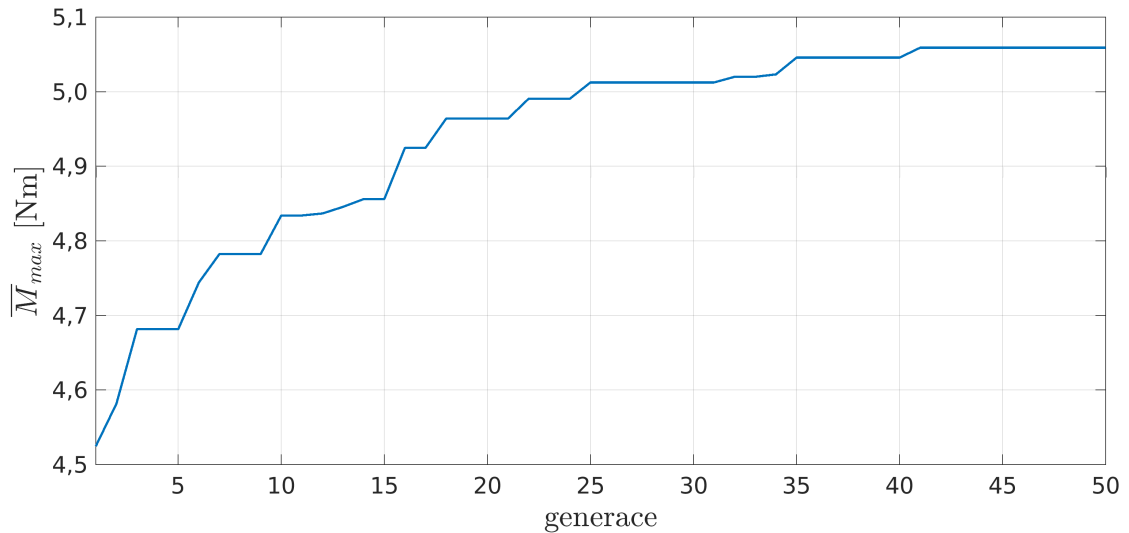
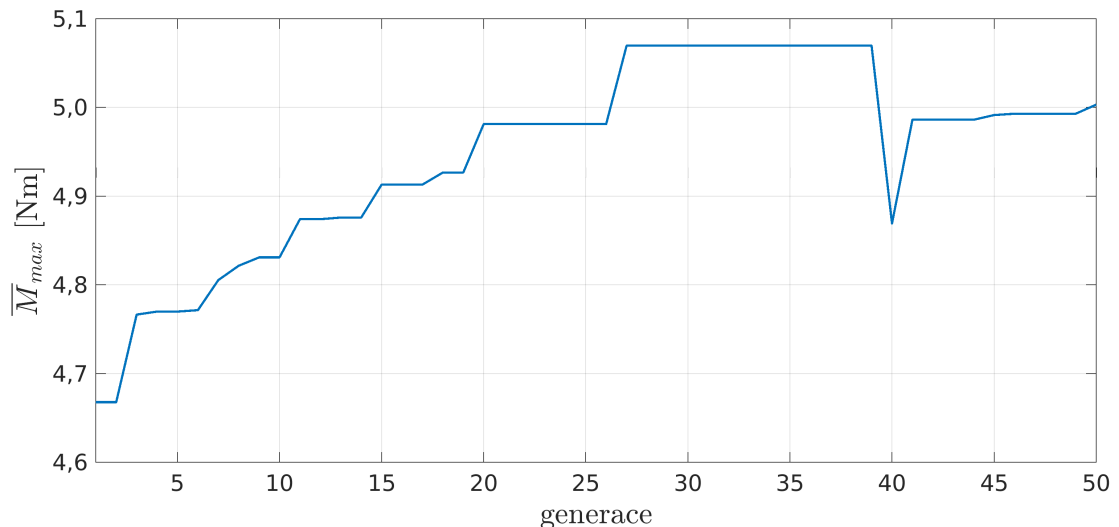
Obrázek 4.4: Průměrné hodnoty generací pro stroje se čtyřmi bariérami



Obrázek 4.5: Průměrné hodnoty generací pro stroje se třemi bariérami

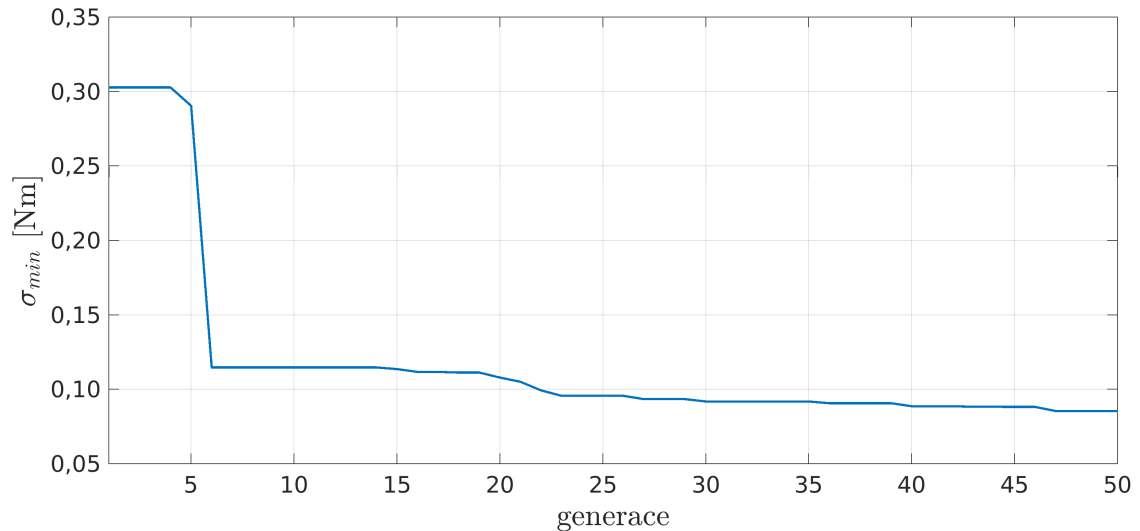
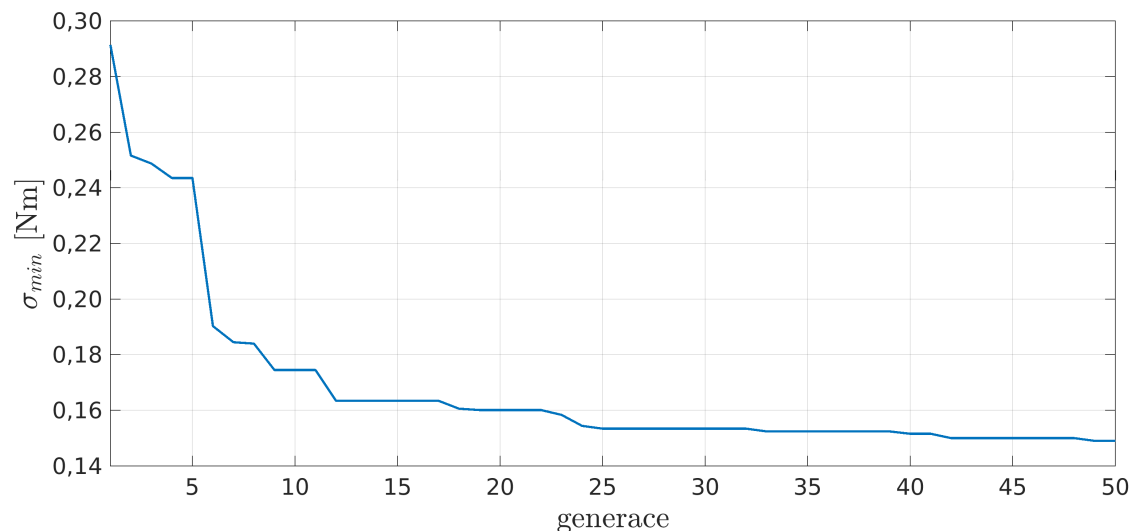
Přehlednější zobrazení konvergence algoritmu potom představují grafy 4.4 a 4.5. Zde jsou hodnoty obou kritériálních funkcí průměrovány pro všech 80 jedinců v každé z 50 generací. Na rozdíl od předchozích obrázků nelze z těchto grafů usuzovat příliš o nejlepších jedincích v rámci obou kritérií, lze však konstatovat, že v průměru dosahovaly generace strojů se třemi bariérami vyšších hodnot průměrného momentu, průměrná velikost zvlnění je potom pro obě varianty přibližně stejná.

Nejlepší náhled do konvergence optimalizačního algoritmu potom poskytují grafy vývoje maximálních hodnot průměrného momentu v každé generaci 4.6 a 4.7 a vývoje minimálního zvlnění v rámci každé generace 4.8 a 4.9. U všech průběhů je zřejmé, že v první generaci jsou počáteční maximální, resp. minimální hodnoty kritérií velmi podobné. V případě průměrného momentu jsou téměř totožné i nejvyšší dosažené hodnoty obou optimalizací. Na rozdíl od optimalizace se třemi bariérami se však algoritmu podařilo u stroje

Obrázek 4.6: Maximální hodnoty \overline{M} generací pro stroje se čtyřmi bariéramiObrázek 4.7: Maximální hodnoty \overline{M} generací pro stroje se třemi bariérami

se čtyřmi bariérami zachovat rostoucí trend. Maximální dosažený moment čtyřbariérové varianty je potom $5,0590 \text{ N} \cdot \text{m}$. V případě tří bariér algoritmus dosáhl nejvyšší hodnoty $5,0696 \text{ N} \cdot \text{m}$ už ve 27. generaci a už se mu jí dále nepodařilo zvýšit, naopak ve 40. generaci se plně projevuje chyba algoritmu, kdy nejlepší jedinec z hlediska zvlnění není zachován do další generace.

U průběhů konvergence zvlnění momentu je v obou případech zřejmý jasný, nepřerušovaný trend minimalizace, v případě stroje se čtyřmi bariérami pak v 6. generaci nastal větší skok, kdy se algoritmu podařilo nalézt značně výhodnější hodnoty nezávislých parametrů pro minimální zvlnění. Další minimalizace už je pomalejší a hodnota se až do poslední generace příliš nemění. Podobný trend s několika většími skoky, především v 6. generaci, je pozorovatelný i z grafu pro variantu se třemi bariérami. Nejnižší zvlnění této varianty je $0,1490 \text{ N} \cdot \text{m}$, u varianty čtyřbariérové je to $0,0853 \text{ N} \cdot \text{m}$.

Obrázek 4.8: Minimální hodnoty σ generací pro stroje se čtyřmi bariéramiObrázek 4.9: Minimální hodnoty σ generací pro stroje se třemi bariérami

4.3 Nejlepší stroje

Pro srovnání obou možných variant geometrie rotoru byly pro každou z nich vybrány dva stroje. První ze strojů byl vybrán ze všech spočtených jedinců striktně na základě maximální velikosti průměrného momentu \overline{M} , druhý ze strojů pak naopak dle minimální směrodatné odchylky, udávající zvlnění momentu σ . Průběh momentu těchto strojů byl následně přepočten s vyšší přesností, tedy s krokem $1 \cdot 10^{-5}$ s. Pro všechny tyto stroje byla dále provedena simulace mechanického namáhání pro trojnásobek jmenovitých otáček. Výsledné hodnoty těchto čtyř strojů jsou potom uvedeny v tabulce 4.1.

Při bližším pohledu na výsledky strojů s maximálním průměrným momentem, označených jako \overline{M}_{max} , je zřejmé, že se jejich průměrný moment liší pouze přibližně o $0,03 \text{ N} \cdot \text{m}$, značný rozdíl ale nastává v případě zvlnění σ , zde se oba stroje liší asi o 50 %. To by

Tabulka 4.1: Výsledky čtyř vybraných strojů

		[N · m]	4 bariéry		3 bariéry	
			\overline{M}_{max}	σ_{min}	\overline{M}_{max}	σ_{min}
Průměrný moment	\overline{M}	[N · m]	5,059	3,903	5,062	4,452
Směrodatná odchylka	σ	[N · m]	0,461	0,090	0,929	0,156
Ztráty v železe	Δp_{Fe}	[-]	429400	433880	645630	921880
Maximální účinník	$\cos(\varphi)_{max}$	[-]	0,782	0,657	0,761	0,678
Maximální napětí	σ_{max}	[MPa]	109,0	76,5	73,9	121,0

i s přihlédnutím ke ztrátám v železe Δp_{Fe} a maximálnímu možnému účinníku $\cos(\varphi)_{max}$ naznačovalo, že stroj se čtyřmi bariérami je téměř ve všech ohledech lepší. Při zpětném kontrole výčtu všech jedinců si však lze všimnout, že jedinec s takto velkým zvlněním je mezi nejlepšími stroji raritní a hned třetí nejlepší stroj z hlediska maximálního průměrného momentu má zvlnění téměř o 54 % nižší, přičemž průměrný moment je nižší pouze o 0,01 N · m. To lze částečně vidět i na obrázku 4.3. Vzhledem k chybě výsledků v případě menšího výpočetního kroku simulace, avizované v kapitole 3, činící 0,5 %, je nutné stroj opět přepočítat s menším krokem.

Po přepočtu se ukázalo, že má tento stroj, doposavad třetí v pořadí, o 5 tisícín větší průměrný moment než stroj původně uvažovaný. Hodnota ztrát v železe je téměř shodná, nižší je maximální mechanické namáhání, které v tomto případě dosahuje hodnoty 71,1 MPa. Velmi nízký je však účinník, který vyšel pouhých 0,532. Geometrie obou strojů se potom více liší pouze v úhlu rozevření bariér γ_1 , tento úhel je pro méně zvlněný stroj o 1,3 ° menší. Pro další vyhodnocování tak bude s tímto strojem i přes nízkou hodnotu účinníku počítáno jako s nejlepším tříbariérovým jedincem pro maximální průměrný moment.

Zde se nabízí otázka, zdali se po přepočtu nemohou objevit značně lepší stroje i v případě minimálního zvlnění tříbariérových variant, případně u srovnávaných hodnot strojů se čtyřmi bariérami. Ačkoliv je možné, že po přepočtu by vyšel některý ze strojů v rámci chyby 0,5 % lépe než stroj dříve vybraný, není zde důvod se domnívat, že by byly výsledné velikosti momentu a zvlnění od dříve vybraného stroje příliš odlišné, Pareto-fronta strojů se čtyřmi bariérami je velmi dobře rozložena v rámci obou kritérií a zároveň od sebe sousední jedinci nejsou v rámci těchto kritérií příliš vzdáleni. Žádní extrémně odlišní jedinci se nevyskytují ani v případě strojů s malým zvlněním momentu u varianty se třemi izolačními bariérami.

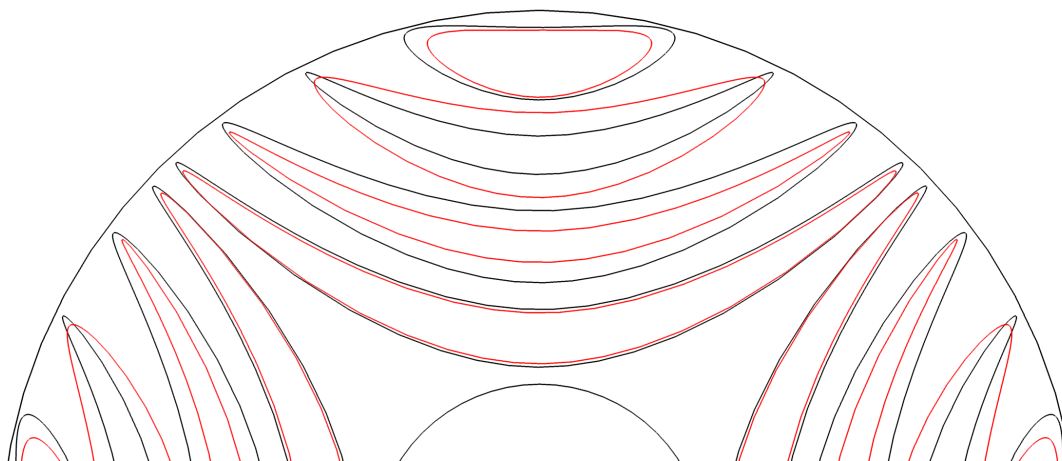
Z hlediska strojů s minimálním zvlněním, označených jako σ_{min} dosahuje nejlepší čtyřbariérová varianta až o 42 % nižšího zvlnění, nežli varianta tříbariérová. Ta má však naopak o 0,55 N · m vyšší průměrný moment. Účinník obou variant je srovnatelný, ztráty v železe jsou však u varianty se třemi bariérami dvojnásobné, stroj navíc dosahuje nejvyšší hodnoty mechanického napětí ze všech čtyř vybraných strojů, přesto není překročen stanovený limit namáhání.

4.3.1 Geometrie nejlepších strojů

V následující tabulce 4.2 už jsou uvedeny konkrétní rozměry nezávislých parametrů pro všechny čtyři vybrané stroje a na obrázcích 4.11 a 4.10 potom vizuální reprezentace jejich izolačních bariér. Černá linka označuje stroje s nejvyšším průměrným momentem, červená linka potom stroje s nejnižší hodnotou zvlnění momentu. V případě strojů s největším průměrným momentem je očividná snaha algoritmu co nejvíce zvětšit bariéru nejbližší vnějšímu okraji rotoru. Několik desetin milimetru široký feromagnetický můstek však může způsobovat problémy jednak z hlediska přesycování a jednak z hlediska mechanického napětí a technologie výroby.

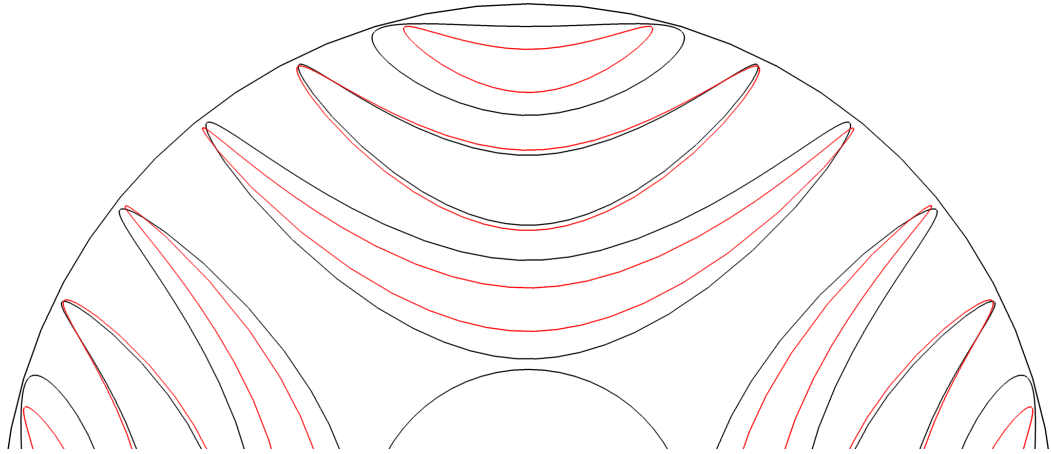
Tabulka 4.2: Nezávislé parametry čtyř vybraných strojů

		4 bariéry		3 bariéry	
		M_{max}	σ_{min}	M_{max}	σ_{min}
γ_1	[°]	46,785	46,717	50,502	51,096
s_{b1}	[mm]	1,913	1,684	3,267	1,474
s_{b2}	[mm]	2,383	1,035	2,372	2,270
s_{b3}	[mm]	1,271	2,808	2,856	1,461
s_{b4}	[mm]	2,404	2,228	-	-
pos	[-]	0,556	1,265	0,509	0,596
k_2	[-]	0,674	0,697	0,141	0,097
k_3	[-]	0,704	0,709	0,982	0,490
k_4	[-]	0,894	0,738	-	-



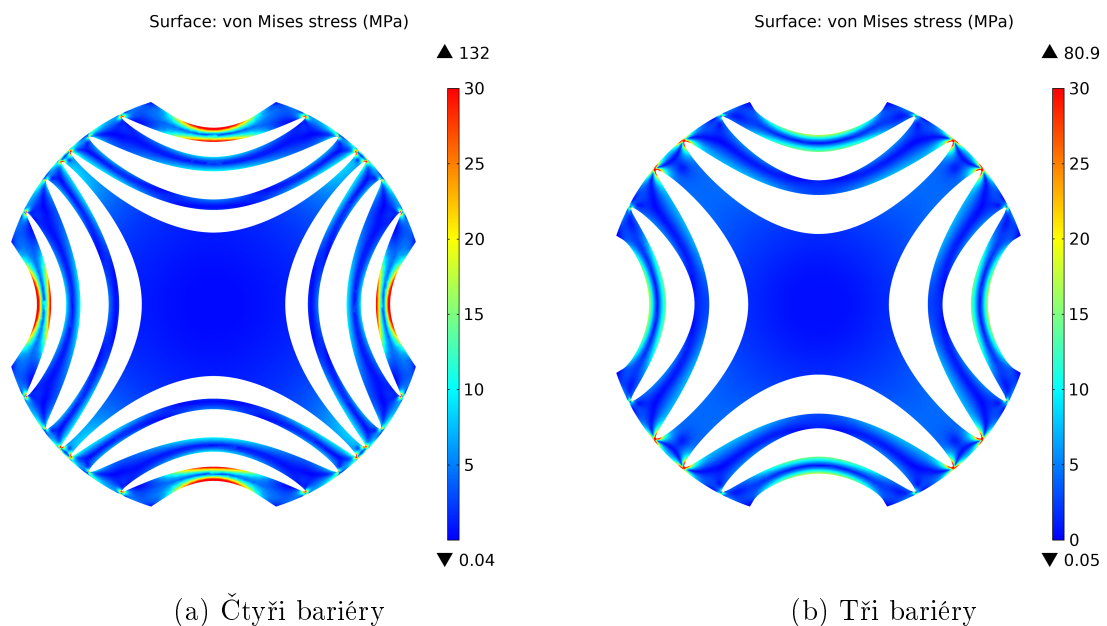
Obrázek 4.10: Srovnání výsledných geometrií strojů se čtyřmi bariérami

Řešením příliš úzkých můstků by mohlo být odříznutí veškerého zbývajících materiálu nad bariérou a otevřít ji tak do vzduchové mezery. Simulace se čtyřmi izolačními bariérami s tímto provedením sice dosahovaly průměrně o 0,35 N · m vyššího průměrného momentu, už tak velká hodnota zvlnění se však v některých případech téměř zdvojnásobila, přičemž ani průměrný moment, ani jeho zvlnění nijak nekorelovaly s velikostí



Obrázek 4.11: Srovnání výsledných geometrií strojů se třemi bariérami

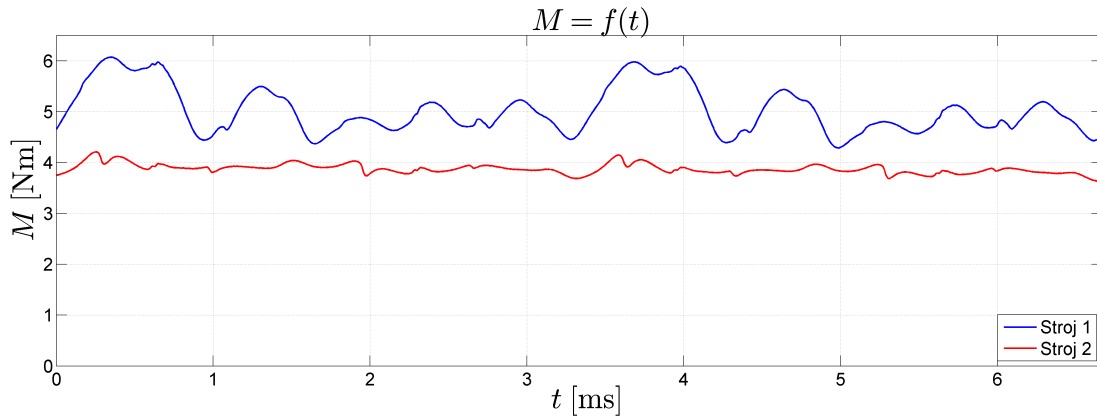
otevření výřezu. V případě odříznutí materiálu v tříbariérovém stroji se nárůst průměrného momentu neprojevil a ten zůstal až na drobné odchylky neměnný, zvlnění potom vždy stouplu průměrně o $0,12 \text{ N} \cdot \text{m}$. Pokud by takováto varianta rotoru byla využita, musela by proběhnout nová optimalizace s dalšími nezávislými parametry upřesňujícími tvar otevření. Zde už by vzhledem k počtu parametrů mohla být výhodná topologická optimalizace. Jedna z možných variant výřezu pro oba stroje je potom na obrázku s výsledky mechanických simulací 4.12. Zde se navíc ukazuje, že vyříznutí zhoršila maximální mechanické namáhání, které u čtyřbariérového rotoru stouplu o 23 MPa , u tříbariérové varianty potom pouze o 7 MPa . Porušením hladkého povrchu rotoru by navíc mohly narůst ventilační ztráty.



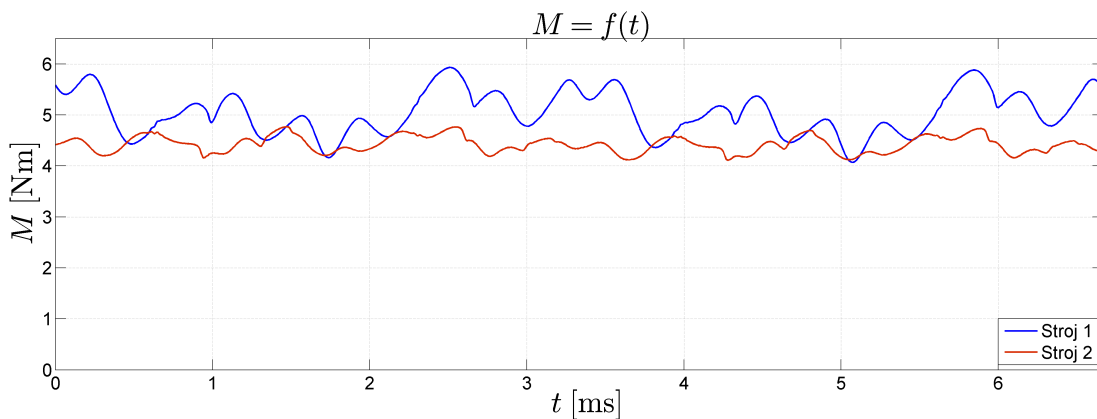
Obrázek 4.12: Simulace mechanického namáhání stroje

4.3.2 Chování nejlepších strojů

Následující obrázky 4.13 až 4.16 ukazují průběhy točivého momentu v čase, spočtené s krokem $1 \cdot 10^{-5}$ s vždy pro dvě periody. Obrázky 4.13 a 4.14 pak konkrétně ukazují průběhy momentu čtyř vybraných strojů pro obě varianty, tedy s největším průměrným momentem, označené jako *Stroj 1* a stroje s nejmenším zvlněním, označené jako *Stroj 2*.



Obrázek 4.13: Průběh momentu v čase pro stroje se čtyřmi bariérami

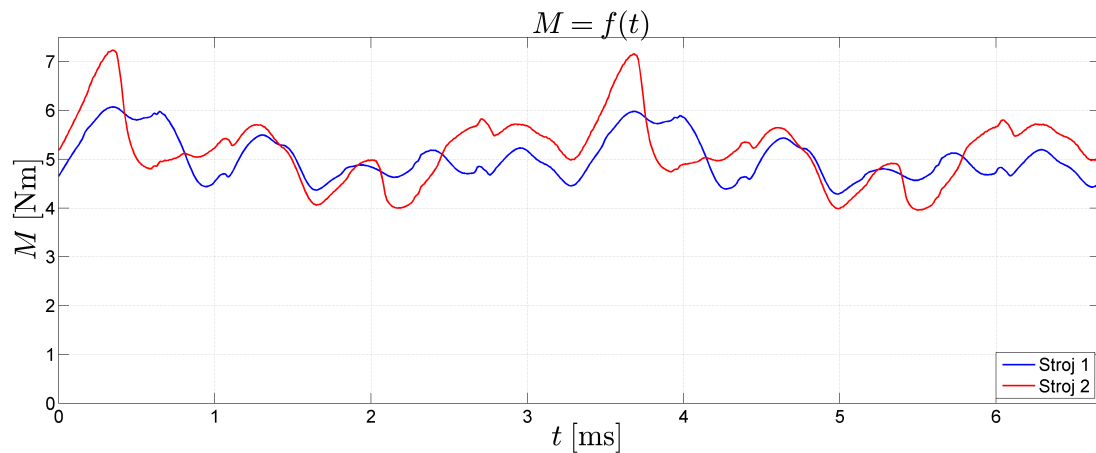


Obrázek 4.14: Průběh momentu v čase pro stroje se třemi bariérami

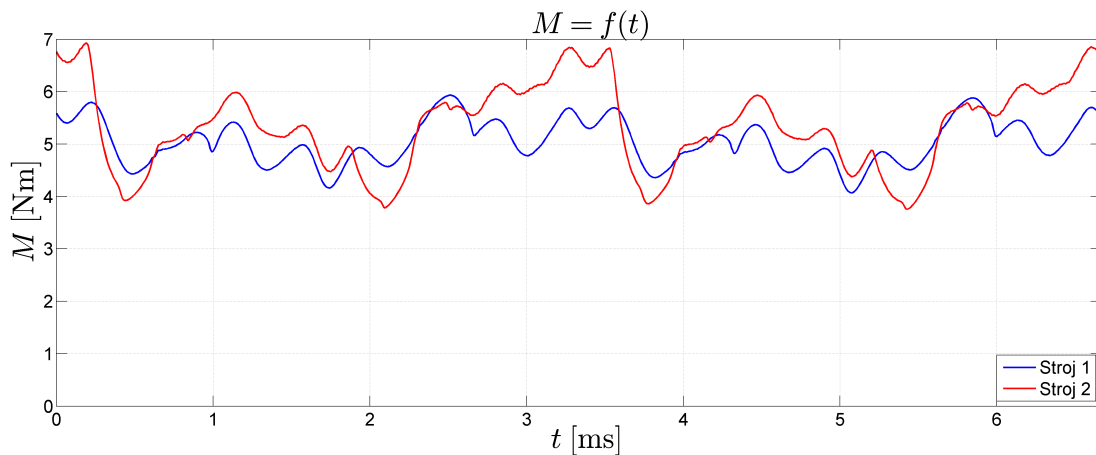
Ačkoliv mají oba stroje s maximálním průměrným momentem značně odlišný tvar průběhu, je zřejmé, že amplituda jejich zvlnění je podobná. Minimum průběhu momentu stroje se třemi bariérami je přibližně $4,07 \text{ N} \cdot \text{m}$, maximum potom $5,93 \text{ N} \cdot \text{m}$. V případě čtyř bariér je minimum průběhu $4,28 \text{ N} \cdot \text{m}$ a maximum $5,03 \text{ N} \cdot \text{m}$. Absolutní rozdíl těchto hodnot sice vede k závěru, že dle tohoto měřítka, je moment tříbariérového stroje zvlněn o něco více, než moment stroje čtyřbariérového, což se zdá v rozporu s dříve uvedeným tvrzením. Je však třeba mít na paměti, že směrodatná odchylka bere v úvahu i četnost výskytu těchto hodnot. I přesto je závěrem nutné konstatovat, že takovéto zvlnění momentu obou strojů je pro praktické využití nepřijatelné. Výkresy obou strojů s minimální hodnotou zvlnění se nacházejí v přílohách 3 a 4. Jelikož je tvar izolačních bariér poměrně složitý a předpokládá se, že výroba bude automatizována pomocí technologie CNC, jsou ve

výkresech uvedeny pouze základní rozměry, které mohou sloužit pro následnou manuální kontrolu výrobku.

V případě strojů s minimálním zvlněním je vidět, že varianta se třemi bariérami má v tomto provedení přibližně o $0,56 \text{ N} \cdot \text{m}$ vyšší moment, ovšem vyšší je i zvlnění odpovídající směrodatné odchylce, přibližně o $0,07 \text{ N} \cdot \text{m}$. Průběh momentu stroje se třemi bariérami má minimum $4,11 \text{ N} \cdot \text{m}$ a maximum potom $4,77 \text{ N} \cdot \text{m}$. Průběh stroje čtyřbariérového dosahuje minima $3,63 \text{ N} \cdot \text{m}$ a maxima $4,21 \text{ N} \cdot \text{m}$.



Obrázek 4.15: Průběh momentu v čase pro stroje se čtyřmi bariérami (výřezy)

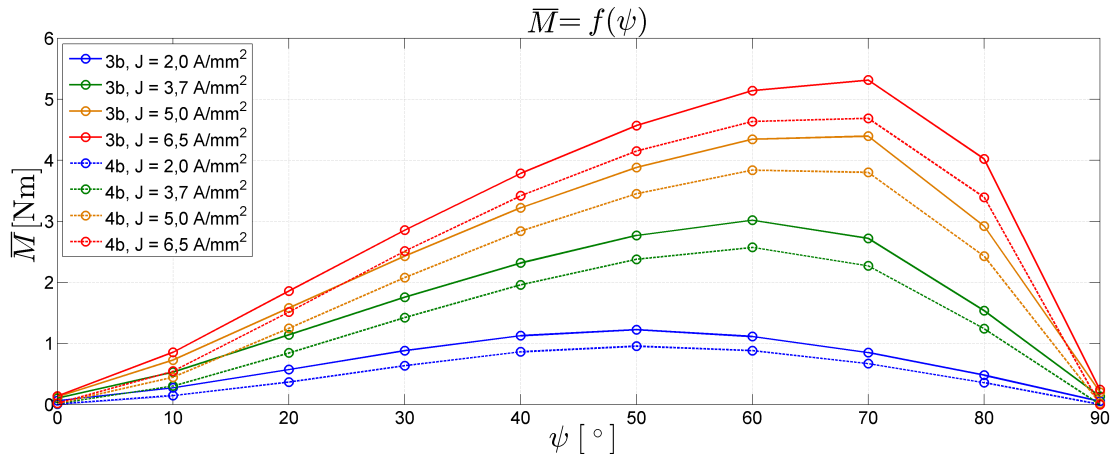


Obrázek 4.16: Průběh momentu v čase pro stroje se třemi bariérami (výřezy)

Průběhy 4.15 a 4.16 porovnávají dva původní stroje s maximálním průměrným momentem, označené jako *Stroj 1* a stroje s výřezy, jejichž geometrie je naznačena na obrázcích 4.12. Ačkoliv se tvar obou průběhů v některých časových okamžicích shoduje, stroje s výřezy mají značně vyšší zvlnění. Tyto odchylky zasahující do vysokých hodnot momentu nastávají v obou případech ve chvíli, kdy hrana výřezu přechází ze statorového zubu do oblasti drážky. Zaoblení těchto hran potom sice tyto nejvyšší odchylky snižuje, zvlnění je i přesto stále vysoké.

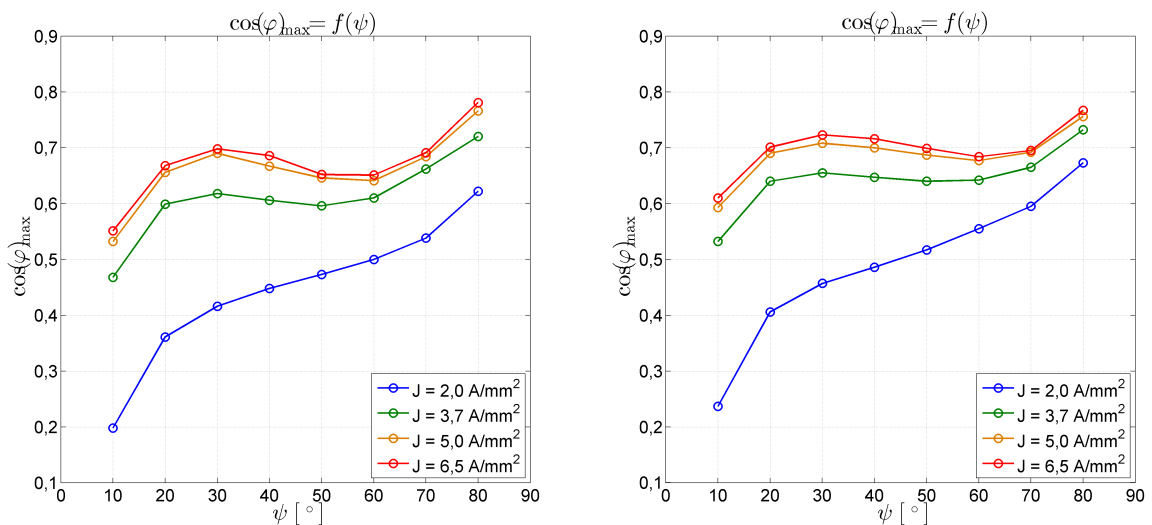
Jelikož optimalizace probíhala s proudovou hustotou v drážce $5 \text{ A} \cdot \text{mm}^{-2}$ a úhlem proudu 65° , pro který v rámci několika náhodně vygenerovaných geometrií vycházela

nejvyšší velikost průměrného momentu, bylo by vhodné tyto předpoklady ověřit. Obrázek 4.17 ukazuje závislost průměrného momentu na velikosti proudové hustoty v drážce a úhlu napájecího proudu. Jelikož byly oba stroje s maximálním průměrným momentem zavrženy pro přílišné zvlnění, byly pro tento test vybrány pouze stroje s minimálním zvlněním momentu.



Obrázek 4.17: Závislost průměrného momentu na velikosti J úhlu ψ

Plnou čarou je označen stroj se třemi a přerušovanou čarou stroj se čtyřmi bariérami. Je vidět, že se zvyšující se proudovou hustotou se feromagnetické části stroje začínají sytit a ideální úhel z hlediska maximální velikosti průměrného momentu se od původních 45° pro malé proudové hustoty posouvá do hodnot vyšších. Pro proudovou hustotu $6,5 \text{ A} \cdot \text{mm}^{-2}$ je tento úhel přibližně 70° . Zvlnění momentu v závislosti na proudové hustotě roste pro obě varianty lineárně, u čtyřbariérové varianty je pro $2 \text{ A} \cdot \text{mm}^{-2}$ pouze $0,041 \text{ N} \cdot \text{m}$ a pro $6,5 \text{ A} \cdot \text{mm}^{-2}$ potom $0,229 \text{ N} \cdot \text{m}$. U třibariérové varianty je hodnota zvlnění $0,491$ pro nejnižší proudovou hustotu a následně $0,699 \text{ N} \cdot \text{m}$ pro hustotu nejvyšší.

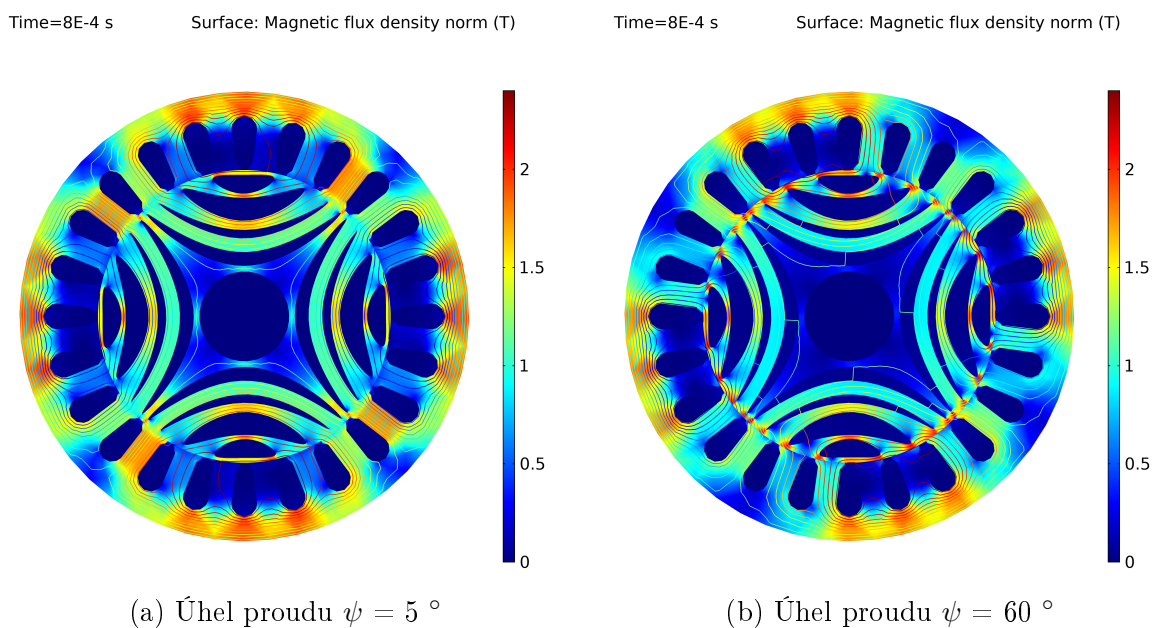


(a) Čtyřbariérový stroj

(b) Třibariérový stroj

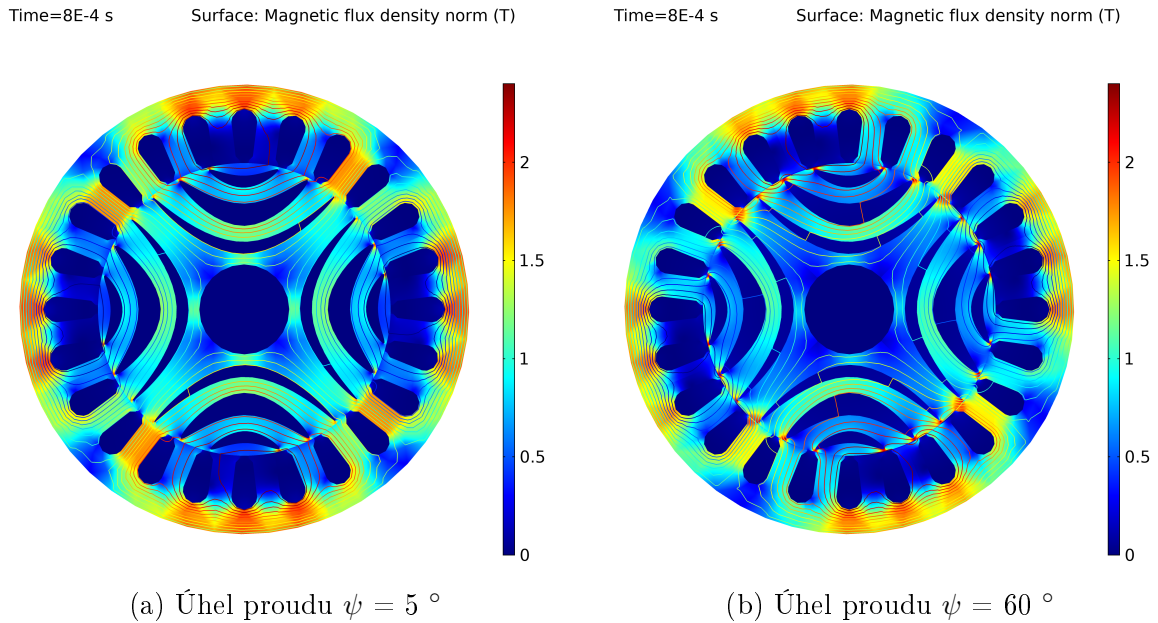
Obrázek 4.18: Závislost maximálního účinku na velikosti J úhlu ψ

Poměrně zajímavá je potom i tato závislost v případě maximálního účinku. Ten pro zvyšující se hodnoty proudové hustoty nejprve roste, následně se však nárůst ustaluje a pro proudové hustoty $5 \text{ A} \cdot \text{mm}^{-2}$ a $6,5 \text{ A} \cdot \text{mm}^{-2}$ už dosahuje téměř shodných velikostí. S vyšší proudovou hustotou v drážce roste tok v osách d a q , zatímco tok q roste v daném rozmezí proudových hustot lineárně, růstu toku d se při určité velikosti proudové hustoty začíná vlivem nasycení zpomalovat a tvar jeho průběhu v podstatě odpovídá BH křivce použitého materiálu. Pokud z těchto toků spočteme indukčnosti, zjistíme, že v závislosti na proudové hustotě jejich velikosti klesají, účinek potom závisí na jejich podílu, tzv. vyniklosti (podkapitola „Účinek stroje“ kapitoly 3). Pokud však stroj není v dostatečném nasycení a obě indukčnosti jsou si poměrně blízké, může mít vyniklost s rostoucí proudovou hustotou a poměrně strmě klesající indukčností L_q rostoucí charakter. Účinek pak do určité hodnoty proudové hustoty roste. Po dalším zvětšování proudové hustoty v drážce už hodnota L_d oproti L_q klesá značně strměji a účinek od určité velikosti proudové hustoty opět klesá. Takového chování bylo zaznamenáno už pro proudovou hustotu $9 \text{ A} \cdot \text{mm}^{-2}$.



Obrázek 4.19: Rozložení magnetické indukce čtyřbariérového stroje

Další obrázky 4.19 a 4.20 potom ukazují rozložení magnetické indukce v obou strojích s minimálním zvlněním, vždy pro dva úhly proudu, konkrétně 5° a pro 60° . V případě 5° je osa d statorového pole a osa d pole rotorového téměř ve shodě a siločáry indukce kopírují vnější tvary izolačních bariér. Průměrný moment pro tento úhel je menší než $0,5 \text{ N} \cdot \text{m}$. Jedná se tak téměř o chod motoru naprázdno. Pro úhel 60° už však izolační bariéry průchod magnetického indukčního toku značně mění. Z obrázku je pozorovatelná snaha siločar se zkracovat, čemuž tvar izolačních bariér brání. V některých případech šířka izolační bariéry napětí neodolá a tok projde skrz. Průměrný moment je v tomto případě, oproti předchozímu stavu, asi desetinásobný. U obou variant je viditelný i menší rozptyl v oblastech povrchu rotoru pro menší úhel proudu.



Obrázek 4.20: Rozložení magnetické indukce tříbariérového stroje

Při porovnání strojů se třemi a čtyřmi bariérami je na první pohled vidět vyšší hustota magnetického indukčního toku magneticky vodivých cest vymezených izolačními bariérami čtyřbariérového stroje, které jsou oproti druhé tříbariérové variantě mnohem užší. V případě čtyř bariér je pozorovatelný i větší rozptyl, který je dán větší radiální vzdáleností konců bariér od povrchu rotoru. Větší je zde i úhel rozevření bariér a izolační bariéry nejbližší hřídeli stroje jsou sevřeny tak, že do oblasti pod těmito bariérami už vniká pouze minimum toku.

4.3.3 Citlivostní analýza

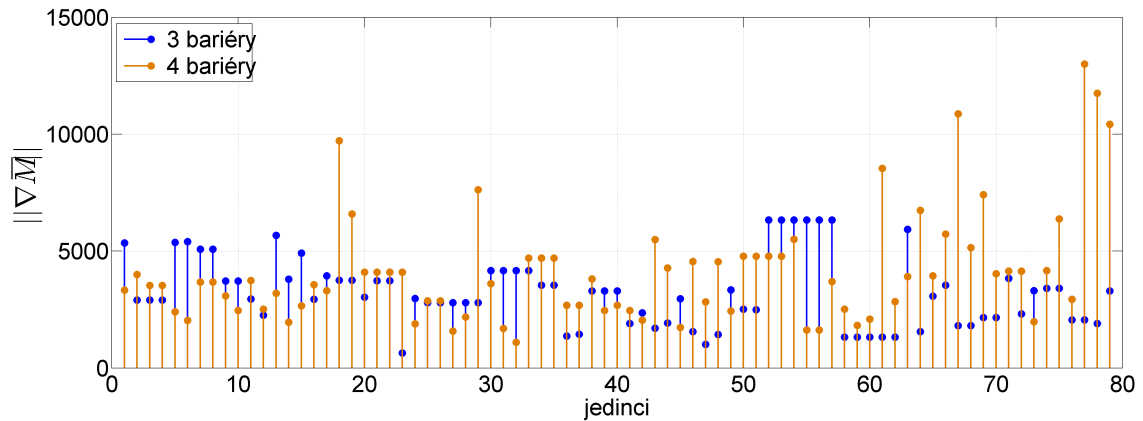
Další kritérium, které může rozhodnout o volbě optimálního stroje je jeho citlivost na výrobní tolerance, případně chyby daného materiálu. Pokud spočteme změny obou kritériálních funkcí v závislosti na změnách velikostí jednotlivých nezávislých parametrů, dostáváme pro každou z funkcí gradient v prostoru těchto parametrů. Pokud z těchto gradientů následně vypočteme normu, dle (4.1), jako odmocninu součtu druhých mocnin dílčích gradientů ∇F pro jednotlivé parametry i , dostáváme pro každý stroj číslo reprezentující míru jeho citlivosti.

$$\|\nabla F\| = \sqrt{\sum_{i=1}^n (\nabla F_i)^2} \quad (4.1)$$

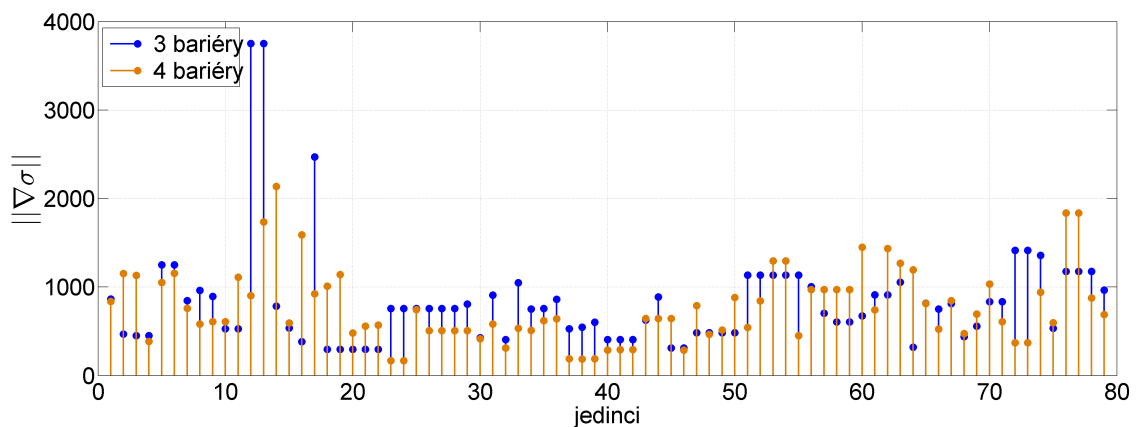
To bylo provedeno pro Pareto-fronty obou variant strojů. Výsledky těchto norem pro jednotlivce obou těchto front v rámci obou kritériálních funkcí, tedy průměrného momentu a jeho zvlnění jsou potom na obrázcích 4.21 a 4.22, přičemž jednotlivci jsou seřazeni podle jednotlivých kritériálních funkcí od nejlepších po nejhorší. První jedinec na obrázku 4.21

má tedy nejvyšší průměrný moment, první jedinec na obrázku 4.22 má potom nejnižší zvlnění.

Ani pro jednu z kritériálních funkcí v rámci Pareto-fronty neplatí, že by s její rostoucí, či klesající hodnotou rostla, či klesala její citlivost. Stroje svou citlivostí značně vybočující z průměru se v případě průměrného momentu nachází především mezi stroji se čtyřmi bariérami, v případě zvlnění momentu se naopak značně odlišují hodnoty strojů se třemi bariérami. Ani v jednom případě se však nejedná o nejlepší jedince v daných kritériích.



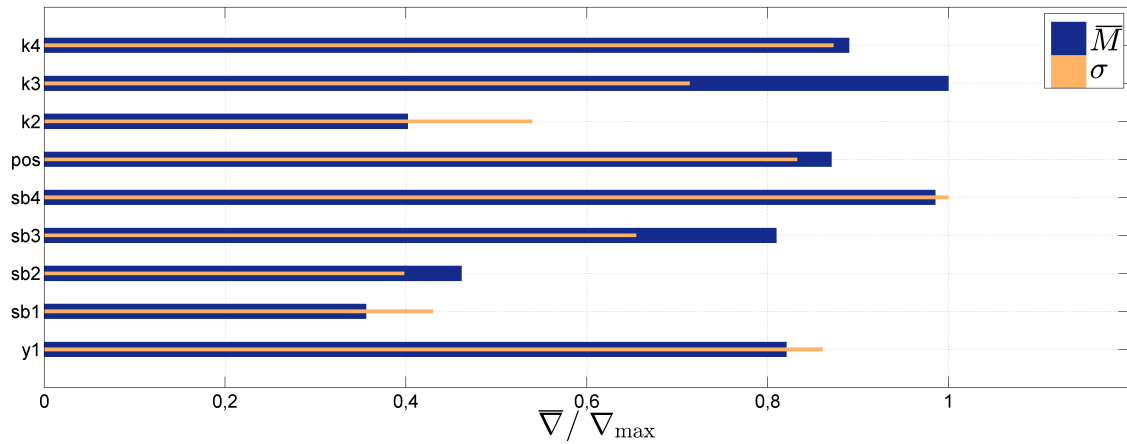
Obrázek 4.21: Citlivost průměrného momentu poslední generace strojů



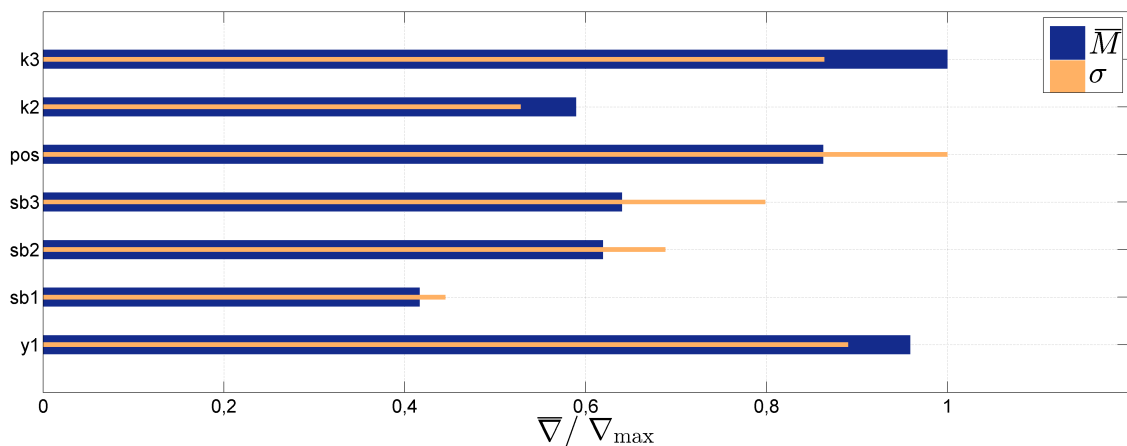
Obrázek 4.22: Citlivost zvlnění momentu poslední generace strojů

Další náhled do citlivosti v rámci jednotlivých nezávislých parametrů poskytují grafy 4.23 a 4.23. Gradienty jsou zde pro všechny stroje obou Pareto-front zprůměrovány a vztaženy k jejich maximální hodnotě. V případě strojů se čtyřmi bariérami se ukazuje, že průměrný moment je nejvíce citlivý na změny koeficientu náklonu třetí bariéry k_3 , šířky čtvrté bariéry (nejblíže okraji rotoru) s_{b4} a koeficientu jejího náklonu k_4 . Poměrně značně je průměrný moment citlivý i na vzdálenost zakončení bariér od povrchu rotoru pos . Téměř srovnatelná citlivost je pak v případě parametrů γ_1 a s_{b3} , reprezentující úhlové rozevření bariér a šířku třetí bariéry. Výčet nejdůležitějších parametrů je podobný i v případě směrodatné odchylky, míra vlivu je však odlišná. Na směrodatnou odchylku má největší vliv

šířka čtvrté bariéry s_{b4} a koeficient k_4 . Následuje úhel γ_1 , vzdálenost pos a šířka s_{b3} . Ačkoliv nám tyto hodnoty mohou naznačit na které parametry je třeba brát při návrhu, případně při výrobě, zřetel, stále se jedná pouze o průměr všech 80 strojů v rámci každé varianty.

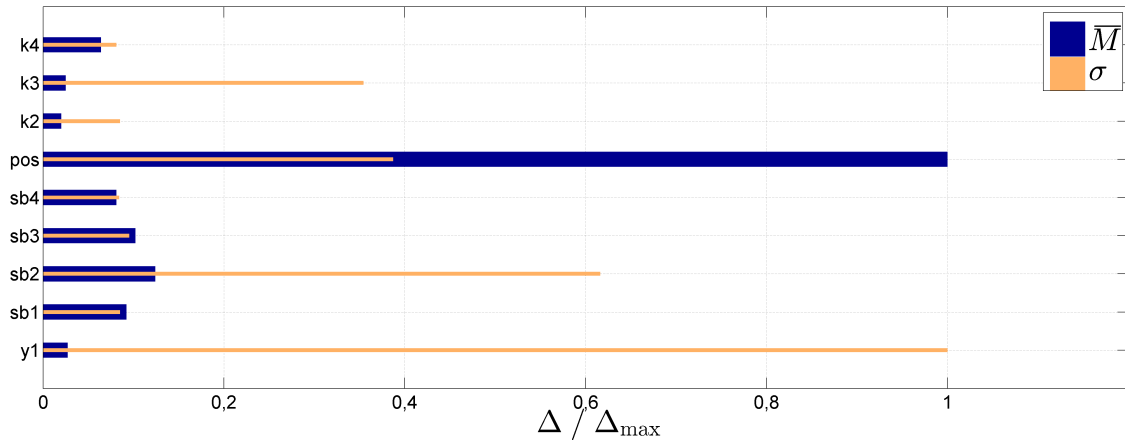


Obrázek 4.23: Citlivost v rámci jednotlivých nezávislých parametrů (čtyři bariéry)

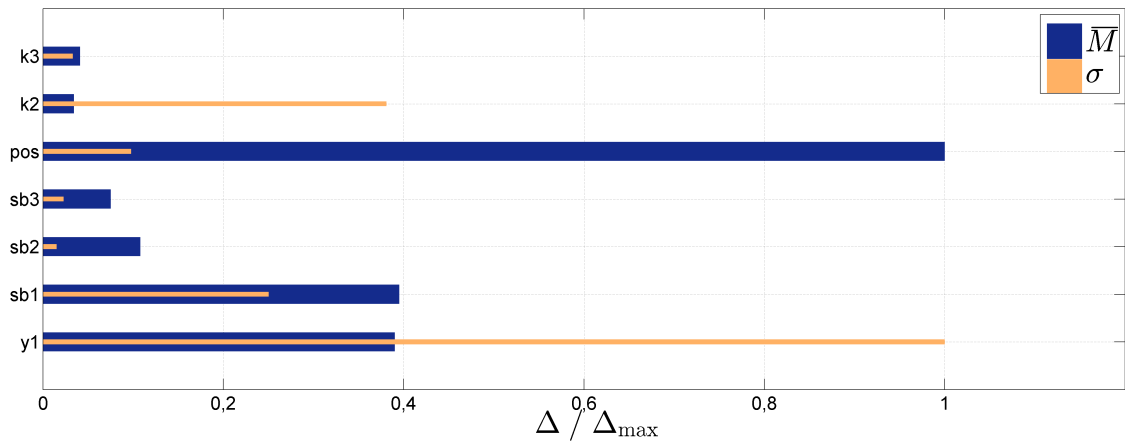


Obrázek 4.24: Citlivost v rámci jednotlivých nezávislých parametrů (tři bariéry)

Následující grafy 4.25 a 4.26 potom ukazují, jak jsou citlivé dva nejlepší stroje s nejnižším zvlněním momentu. Tentokrát je zvolen postup, kdy jsou hodnoty nezávislých parametrů zvětšeny a zmenšeny tak, aby byl výsledný geometrický posun ovládaného rozměru vždy $\pm 0,5$ mm, to znamená změnu úhlu γ_1 přibližně o $\pm 1^\circ$, parametrů k o $\pm 0,1$, vzdálenosti pos a šířky bariér s_b potom o $\pm 0,5$ mm, zde je však třeba počítat s tím, že celková tloušťka bariéry je dvojnásobek tohoto parametru. Následně byly pomocí FEM modelu spočteny nové hodnoty kritérií pro všechny tyto změny a ty odečteny od hodnot kritériálních funkcí původních geometrií. Pro tyto rozdíly byla následně absolutní hodnotě spočtena průměrná změna. Pokud zmenšení, či zvětšení rozměru u některých parametrů z důvodu dovolených mezí nebylo možné, byla namísto průměru brána pouze absolutní hodnota této jedné změny.



Obrázek 4.25: Citlivost čtyřbariérového stroje



Obrázek 4.26: Citlivost třibariérového stroje

Je vidět, že tyto závislosti se značně liší od dříve uvedených. Průměrný moment je u obou variant nejvíce citlivý na změnu vzdálenosti konců bariér od rotoru pos . Při zvětšení tohoto rozměru o 0,5 mm se průměrný moment zmenšil přibližně o 0,57 N · m v případě čtyřbariérového stroje, v případě třibariérového potom o 0,7 N · m. U čtyřbariérového stroje potom bylo možné i zmenšení tohoto rozměru, to potom vedlo k nárůstu průměrného momentu o 0,56 N · m, ovšem za současného nárůstu zvlnění o 0,25 N · m. Citlivost průměrného momentu v rámci dalších parametrů už je v porovnání se vzdáleností pos v případě čtyřbariérového stroje poměrně malá. Větší vliv v případě tří bariér mají potom ještě parametry s_{b1} a γ_1 .

Největší změna nastává v případě zvětšení γ_1 a zmenšení s_{b1} . Pro zvětšení γ_1 se průměrný moment snižuje o 0,43 N · m, v případě zmenšení s_{b1} moment klesne o 0,51 N · m. Čtyřbariérový stroj na tyto změny reaguje až v rámci druhého desetinného místa. V případě směrodatné odchylky opět panuje v obou variantách shoda, kdy největší vliv má úhel γ_1 , v případě čtyř bariér má potom značný vliv i šířka druhé bariéry s_{b2} následovaná parametrem k_2 , ten je potom druhý nejdůležitější i v případě tří bariér. Snížení i zvýšení úhlu γ_1 má potom na zvlnění podobný vliv a zvlnění v obou případech roste v průměru

o $0,66 \text{ N} \cdot \text{m}$ pro tříbariérový stroj a o $0,43 \text{ N} \cdot \text{m}$ pro stroj čtyřbariérový. Při změně rozměru s_{b2} dochází u čtyřbariérového stroje k nárůstu zvlnění v průměru o $0,27 \text{ N} \cdot \text{m}$. O $0,25$ se potom v průměru zvětší zvlnění v případě změny koeficientu k_2 , tato hodnota je stejná pro obě varianty stroje.

4.4 Ověřovací experiment

Všechny doposud spočtené průběhy a velikosti veličin byly pouze výsledkem FEM modelů, vycházejících z rozměrů statoru použitého motoru a charakteristik materiálů. Bylo by tedy vhodné ověřit, zdali takto spočtené hodnoty, jejich velikosti a tvary průběhů odpovídají předpokladům. Před samotnou výrobou rotoru by bylo možné zjistit parametry statorového vinutí, konkrétně jeho činný odpor a indukčnost. Tak aby bylo provedené měření univerzální a nezávislé na budoucím typu rotoru, muselo by proběhnout s vyjmutým rotorem, zde je však třeba počítat s velkou rozptylovou indukčností. Pokud by tyto hodnoty impedance byly známy, mohl by být do simulace zařazen externí obvod, který by chování stroje reprezentoval lépe než dosavadní proudový zdroj, pevně určující velikost proudové hustoty v drážce. Takovýto obvod doplněný i o pohybové rovnice by mohl pomoci s nastavením rychlosti rozběhu frekvenčním měničem, případně modelovat poruchy a funkční stavy stroje. Takovéto multifyzikální úlohy jsou však poměrně výpočetně náročné.

Jelikož se jedná o malý stroj, následné testování vyrobeného rotoru by mohlo proběhnout při zatěžování na plný výkon i bez zpětné rekuperace energie do sítě. Vhodným zařízením pro zatěžování stroje by mohl být některý z typů rotačního dynamometru hřídeli spojeného s měřeným reluktančním motorem. Pokud by bylo vyrobeno více variant reluktančního stroje, mohly by se tyto stroje zatěžovat vzájemně, měření momentu by potom mohlo proběhnout i prostřednictvím měření úhlového zrychlení, to však vyžaduje znalost setrvačného momentu soustrojí, případně pomocí tenzometrů, či reluktanční metody měření momentu. Vzhledem k poměrně malým změnám momentu, převážně u průběhů nejméně zvlněných variant, by bylo vhodné, aby vzorkovací perioda měření byla alespoň $1 \cdot 10^{-4} \text{ s}$, ideálně potom $1 \cdot 10^{-5} \text{ s}$, tedy shodná jako v případě modelu. Rozběh měřeného stroje by pak musel proběhnout buďto za pomoci frekvenčního měniče, případně pomocí zatěžovacího stroje. Vektorové řízení by pak mohlo poskytnout i další cenné informace o chování stroje.

Kromě průběhu momentu by bylo vhodné změřit i napájecí proudy a napětí, z nichž lze následně dopočítat příkon a účinek, případně provést jejich rozbor pomocí Fourierovy analýzy. Vhodné by bylo i měření naprázdno a nakrátko pro určení ztrát a dále by též bylo možné provést oteplovací zkoušku stroje či měření hluku a vibrací.

5 Závěr

Úkolem práce bylo splnit čtyři cíle. Prvním bylo provedení podrobné rešerše tvarové a topologické optimalizace rotorů reluktančních strojů. Zde byla nejdříve obecně nastíněna problematika multikriteriální optimalizace, možnosti snížení výpočetního času pomocí náhradních modelů a používané druhy formalizace geometrie. Následně už byly uvedeny ukázky využití těchto algoritmů v literatuře. Ukázky byly rozděleny do podkapitol podle využívaných funkčních či fyzikálních náhradních modelů. Uvedeny byly různé přístupy k optimalizaci od jednodušších jednokriteriálních až po sofistikovanější multikriteriální, využívající kombinace více náhradních modelů. Kromě optimalizací tvarových a topologických byly uvedeny například i způsoby optimalizace řízení těchto strojů. Ukázalo se, že ačkoliv je paleta optimalizačních nástrojů a využívaných náhradních modelů poměrně pestrá, často není brán ohled na robustnost problému.

Druhým cílem bylo vytvořit model reluktančního stroje a optimalizovat jeho rotor. Pro tento účel byl vybrán malý asynchronní motor, jehož rotor byl v modelu nahrazen rotorem reluktančním. Nejprve byl vytvořen postup parametrizace geometrie izolačních bariér, který tvar těchto bariér popisuje sérií nezávislých parametrů. Parametrizace proběhla s co nejvíce obecnými vztahy tak, aby platila pro libovolný počet bariér. To se však zcela nepodařilo pro definice přípustných mezí, které musí být pro odlišný počet izolačních bariér, případně jiných rozměrů rotoru, vždy dodatečně pozměněny. K tomuto záměru posloužily i dodatečné mechanické simulace. Tyto meze byly pro účely této práce definovány pouze pro tři a čtyři bariéry. Následně byl sestaven matematický model, popsány řešené rovnice elektromagnetického pole včetně okrajových a počátečních podmínek, uvedena všechna použitá zjednodušení a diskutován jejich vliv na přesnost modelu. Dále byly odvozeny vztahy pro výpočet průměrného točivého momentu a jeho zvlnění a zjednodušené vztahy pro rychlý výpočet ztrát a účinníku stroje.

V následující části byly vysvětleny jednotlivé funkční části zvoleného optimalizačního algoritmu NSGA-II, jeho nastavení a implementace do problému skrze prostředí Artap. Dále už byl popsán samotný průběh optimalizace z hlediska trvání optimalizace, konvergence v rámci obou kriteriálních funkcí a dosažených výsledků čtyř a tříbariérového rotoru. Okomentovány byly i nastalé problémy algoritmu v rámci optimalizace tříbariérové varianty. Ze všech spočtených jedinců potom byly dle dvou zvolených kritérií, tedy maximálního průměrného momentu a minimálního zvlnění, vybráni čtyři zástupci a následně porovnání z hlediska dalších sledovaných parametrů. Porovnána byla i geometrie všech rotorů a diskutovány možnosti řešení velmi tenkých můstků feromagnetického materiálu u obou variant s nejvyšším průměrným momentem. Oba stroje s nejvyšším průměrným momentem byly nakonec zavrženy pro přílišné zvlnění momentu a pro dvě varianty strojů s nejnižším zvlněním byly vytvořeny výkresy uvedené v přílohách, čímž byl splněn třetí

bod zadání. Dále byly prozkoumány závislosti průměrného momentu, jeho zvlnění, účinníku a rozložení magnetické indukce na velikosti proudové hustoty v drážce a úhlu proudu. Nakonec byla provedena citlivostní analýza, kde se ukázalo, že ne všechny spočtené stroje jsou stejně robustní a na příkladu dvou vybraných strojů bylo ukázáno, jaký vliv mají malé změny v rozměrech na velikost průměrného momentu a jeho zvlnění.

Posledním cílem bylo navržení experimentu pro porovnání původního asynchronního motoru s novým strojem reluktančním. Zde byly nastíněny různé možnosti zatěžování a měření takového stroje s cílem získat průběhy a parametry vhodné pro porovnání s FEM modelem. Případně další měření vhodná k testování prototypu točivého stroje.

5.1 Další vývoj

Jak už bylo naznačeno výše, před jakýmkoliv dalším rozšiřováním modelu by bylo vhodné na prototypu rotoru ověřit, zdali se tento model opravdu shoduje s naměřenými závislostmi, parametry a průběhy a popřípadě tento model korigovat. Další vývoj by se měl soustředit především na možnosti geometrie rotoru, buďto například rozšířit stávající parametrizaci o možnost přesnějšího tvarování zakončení bariér, případně zvolit cestu topologické optimalizace a nechat tak optimalizačnímu algoritmu více volnosti. Optimalizovat by bylo možno i dle více kritérií, přičemž dalším kritériem by mohl být kupříkladu účinník stroje, nebo mechanické napětí rotoru. Zajímavé by bylo i porovnání více různých optimalizačních algoritmů z hlediska jimi dosažených výsledků v rámci jednotlivých kritérií a výpočetní náročnosti optimalizace, možná by byla i implementace některé z metod náhradních modelů.

Vhodné by bylo i rozšíření modelu o pohybové rovnice a externí napájecí obvod, který by lépe odpovídal skutečnému chování stroje. Podle takového modelu by mohlo být navrženo a optimalizováno i řízení stroje, případně by tento model umožňoval výzkum využití rozběhové klece. Další možností by bylo vytvořit elektromagnetický model ve 3D a modelovat tak nejen okrajové jevy v čelech vinutí, ale i efekty zkosení izolačních bariér, případně vliv výřezů po povrchu rotoru. 3D model by mohl sloužit i pro výpočty oteplení a metod chlazení stroje, případně pro vibroakustické analýzy.

Seznam použité literatury

- [1] AGRAWAL, R. B. – DEB, K. Simulated binary crossover for continuous search space. *Complex systems*. 1995, 9, 2, s. 115–148.
- [2] BAKR, M. H. et al. A hybrid aggressive space-mapping algorithm for EM optimization. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. Dec 1999, 47, 12, s. 2440–2449. ISSN 0018-9480. doi: 10.1109/22.808991.
- [3] BALAJI, M. – KAMARAJ, V. Evolutionary computation based multi-objective pole shape optimization of switched reluctance machine. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2012, 43, 1, s. 63–69. ISSN 0142-0615. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2012.05.011>. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142061512002013>.
- [4] BASH, M. L. – PEKAREK, S. D. Modeling of Salient-Pole Wound-Rotor Synchronous Machines for Population-Based Design. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. June 2011, 26, 2, s. 381–392. ISSN 0885-8969. doi: 10.1109/TEC.2011.2105874.
- [5] BAYRAKTAR, Z. et al. The Wind Driven Optimization Technique and its Application in Electromagnetics. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. May 2013, 61, 5, s. 2745–2757. ISSN 0018-926X. doi: 10.1109/TAP.2013.2238654.
- [6] BERKA, P. *Dobývání znalostí z databází - Přednáška 7: Neuronové sítě* [online]. 2019. Dostupné z: http://mech.fsv.cvut.cz/~leps/teaching/mmo/prednasky/prednaska13_Meta.pdf.
- [7] BIANCHI, N. et al. Rotor Flux-Barrier Design for Torque Ripple Reduction in Synchronous Reluctance and PM-Assisted Synchronous Reluctance Motors. *IEEE Transactions on Industry Applications*. May 2009, 45, 3, s. 921–928. ISSN 0093-9994. doi: 10.1109/TIA.2009.2018960.
- [8] BIANCHI, N. – DEGANI, M. – FORNASIERO, E. Sensitivity Analysis of Torque Ripple Reduction of Synchronous Reluctance and Interior PM Motors. *IEEE Transactions on Industry Applications*. Jan 2015, 51, 1, s. 187–195. ISSN 0093-9994. doi: 10.1109/TIA.2014.2327143.
- [9] BOMELA, X. B. – KAMPER, M. J. Effect of stator chording and rotor skewing on average torque and torque ripple of reluctance synchronous machine. In *1999 IEEE Africon. 5th Africon Conference in Africa (Cat. No.99CH36342)*, 2, s. 687–690 vol. 2, Sep. 1999. doi: 10.1109/AFRCON.1999.821849.

- [10] BOX, M. J. A New Method of Constrained Optimization and a Comparison With Other Methods. *The Computer Journal*. 04 1965, 8, 1, s. 42–52. ISSN 0010-4620. doi: 10.1093/comjnl/8.1.42. Dostupné z: <https://dx.doi.org/10.1093/comjnl/8.1.42>.
- [11] BRAMERDORFER, G. et al. Modern Electrical Machine Design Optimization: Techniques, Trends, and Best Practices. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. Oct 2018, 65, 10, s. 7672–7684. ISSN 0278-0046. doi: 10.1109/TIE.2018.2801805.
- [12] BRUYERE, A. et al. Comparison Between NEM and FEM in 2-D Magnetostatics Using an Error Estimator. *IEEE Transactions on Magnetics*. June 2008, 44, 6, s. 1342–1345. ISSN 0018-9464. doi: 10.1109/TMAG.2007.915951.
- [13] CAI, Y. – GAO, C. Torque Ripple Minimization in Switched Reluctance Motor Based on BP Neural Network. In *2007 2nd IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications*, s. 1198–1202, May 2007. doi: 10.1109/ICIEA.2007.4318597.
- [14] CHAI, K. S. – POLLOCK, C. Using genetic algorithms in design optimization of the flux switching motor. In *2002 International Conference on Power Electronics, Machines and Drives (Conf. Publ. No. 487)*, s. 540–545, June 2002. doi: 10.1049/cp:20020174.
- [15] CHAI, W. – LIPO, T. – KWON, B. Design and optimization of a novel wound field synchronous machine for torque performance enhancement. *Energies*. 2018, 11, 8, s. 2111.
- [16] COGENT POWER. *Typical data for SURA® M600-50A* [online]. Dostupné z: <https://cogent-power.com/cms-data/downloads/m600-50a.pdf>.
- [17] COGENT POWER. *Katalog - Electrical steel, non oriented, fully processed* [online]. Dostupné z: <https://perso.uclouvain.be/ernest.matagne/ELEC2311/T2006/NOFP.pdf>.
- [18] COMSOL. *COMSOL Multiphysics. AC/DC Module User's Guide*.
- [19] CREVECOEUR, G. – DUPRE, L. – VAN DE WALLE, R. Space Mapping Optimization of the Magnetic Circuit of Electrical Machines Including Local Material Degradation. *IEEE Transactions on Magnetics*. June 2007, 43, 6, s. 2609–2611. ISSN 0018-9464. doi: 10.1109/TMAG.2007.893409.
- [20] CREVECOEUR, G. et al. A Two-Level Genetic Algorithm for Electromagnetic Optimization. *IEEE Transactions on Magnetics*. July 2010, 46, 7, s. 2585–2595. ISSN 0018-9464. doi: 10.1109/TMAG.2010.2044186.

- [21] CREVECOEUR, G. et al. Two-level refined direct optimization scheme using intermediate surrogate models for electromagnetic optimization of a switched reluctance motor. *Engineering with Computers*. 04 2012, 28, s. 199–207. doi: 10.1007/s00366-011-0239-5.
- [22] ČERVENÝ, J. *Přednášky k předmětu KEV/SES1,2* [online]. 2016. Dostupné z: <https://courseware.zcu.cz/portal/studium/courseware/kev/ses1/prednasky.html>.
- [23] ČOROVIĆ, S. – ZUPANČIČ, D. – MILJAVEC, D. Smoothing the static torque characteristic of synchronous reluctance motor by Taguchi optimization method. *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*. s. 1–17.
- [24] DAI, C. – CHEN, W. – ZHU, Y. Seeker Optimization Algorithm. In *2006 International Conference on Computational Intelligence and Security*, 1, s. 225–229, Nov 2006. doi: 10.1109/ICCIAS.2006.294126.
- [25] DARYABEIGI, E. – DEHKORDI, B. M. Smart bacterial foraging algorithm based controller for speed control of switched reluctance motor drives. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2014, 62, s. 364–373. ISSN 0142-0615. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2014.04.055>. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142061514002506>.
- [26] DEB, K. et al. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. *Evolutionary Computation, IEEE Transactions on*. 05 2002, 6, s. 182–197. doi: 10.1109/4235.996017.
- [27] DEHEZ, B. – DENIES, J. – BEN AHMED, H. Design of electromagnetic actuators using optimizing material distribution methods. In *2008 18th International Conference on Electrical Machines*, s. 1–7, Sep. 2008. doi: 10.1109/ICELMACH.2008.4800017.
- [28] DI BARBA, P. et al. Optimization and measurements of switched reluctance motors exploiting soft magnetic composite. *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*. 2018, s. 1–11.
- [29] DI NARDO, M. et al. End barrier shape optimizations and sensitivity analysis of synchronous reluctance machines. In *IECON 2015 - 41st Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, s. 2914–2919, Nov 2015. doi: 10.1109/IECON.2015.7392545.
- [30] DI NARDO, M. et al. Comparison of multi-physics optimization methods for high speed synchronous reluctance machines. In *IECON 2015 - 41st Annual Conference*

- of the *IEEE Industrial Electronics Society*, s. 002771–002776, Nov 2015. doi: 10.1109/IECON.2015.7392521.
- [31] DOORSAMY, W. et al. Investigation into effects of a novel rotor cut-off design for synchronous reluctance machines. In *2017 IEEE 26th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)*, s. 315–320, June 2017. doi: 10.1109/ISIE.2017.8001266.
- [32] DUAN, Y. – IONEL, D. M. A Review of Recent Developments in Electrical Machine Design Optimization Methods With a Permanent-Magnet Synchronous Motor Benchmark Study. *IEEE Transactions on Industry Applications*. May 2013, 49, 3, s. 1268–1275. ISSN 0093-9994. doi: 10.1109/TIA.2013.2252597.
- [33] GAMBA, M. – PELLEGRINO, G. – CUPERTINO, F. Optimal number of rotor parameters for the automatic design of Synchronous Reluctance machines. In *2014 International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, s. 1334–1340, Sep. 2014. doi: 10.1109/ICELMACH.2014.6960355.
- [34] HASHEMI, Z. – ZOHRABI, F. – MARDANEH, M. A Multi-objective Optimization of Switched Reluctance Motor using a Hybrid Analytic-ANFIS Model Considering the Vibrations. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Electrical Engineering*. s. 1–11.
- [35] HOWARD, E. – KAMPER, M. J. Weighted Factor Multiobjective Design Optimization of a Reluctance Synchronous Machine. *IEEE Transactions on Industry Applications*. May 2016, 52, 3, s. 2269–2279. ISSN 0093-9994. doi: 10.1109/TIA.2016.2532287.
- [36] HOWARD, E. – KAMPER, M. J. – GERBER, S. Asymmetric Flux Barrier and Skew Design Optimization of Reluctance Synchronous Machines. *IEEE Transactions on Industry Applications*. Sep. 2015, 51, 5, s. 3751–3760. ISSN 0093-9994. doi: 10.1109/TIA.2015.2429649.
- [37] HU, S. – ZUO, S. Analytical Modeling of Magnetic Field Considering the Saturation in Switched Reluctance Motor. *Applied Computational Electromagnetics Society Journal*. 2018, 33, 12.
- [38] INTE, R. – JURCA, F. – MARTIS, C. A study of the rotor design influence in power factor value of ORSynRM. In *2018 ELEKTRO*, s. 1–6, May 2018. doi: 10.1109/ELEKTRO.2018.8398287.
- [39] JAŹDŹYŃSKI, W. – MAJCHROWICZ, M. Searching for An Optimal Switched Reluctance Motor Design. *Archives of Electrical Engineering*. 12 2014, 63, s. 667–682. doi: 10.2478/ae-2014-0046.

- [40] JEBARANI EVANGELINE, S. – SURESH KUMAR, S. – JAYAKUMAR, J. Torque modeling of Switched Reluctance Motor using LSSVM-DE. *Neurocomputing*. 2016, 211, s. 117–128. ISSN 0925-2312. doi: <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2016.02.076>. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925231216305690>. SI: Recent Advances in SVM.
- [41] JONATHAN, D. – BRUNO, D. – HAMID, B. A. Simulated annealing and genetic algorithms in topology optimization tools: A comparison through the design of a Switched Reluctance Machine. In *SPEEDAM 2010*, s. 1247–1252, June 2010. doi: [10.1109/SPEEDAM.2010.5545100](https://doi.org/10.1109/SPEEDAM.2010.5545100).
- [42] JONES, D. R. – SCHONLAU, M. – WELCH, W. J. Efficient global optimization of expensive black-box functions. *Journal of Global optimization*. 1998, 13, 4, s. 455–492.
- [43] KAAAN EROL, O. – EKSIN, I. A new optimization method: Big Bang–Big Crunch. *Advances in Engineering Software*. 02 2006, 37, s. 106–111. doi: [10.1016/j.advengsoft.2005.04.005](https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2005.04.005).
- [44] KAMPER, M. J. – VOLSDHENK, A. F. Effect of rotor dimensions and cross magnetisation on Ld and Lq inductances of reluctance synchronous machine with cageless flux barrier rotor. *IEE Proceedings - Electric Power Applications*. July 1994, 141, 4, s. 213–220. ISSN 1350-2352. doi: [10.1049/ip-epa:19941261](https://doi.org/10.1049/ip-epa:19941261).
- [45] KARABOGA, D. An idea based on honey bee swarm for numerical optimization. Technical report, Erciyes university, Engineering faculty, Computer engineering department, 2005.
- [46] KHEIREDDINE, B. et al. Application of PSO and TLBO algorithms with neural network for optimal design of electrical machines. *COMPEL - The international journal for computation and mathematics in electrical and electronic engineering*. 2018, 37, 2, s. 549–564. doi: [10.1108/COMPEL-12-2016-0532](https://doi.org/10.1108/COMPEL-12-2016-0532). Dostupné z: <https://doi.org/10.1108/COMPEL-12-2016-0532>.
- [47] KIM, Y. S. – PARK, I. H. Topology Optimization of Rotor in Synchronous Reluctance Motor Using Level Set Method and Shape Design Sensitivity. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. June 2010, 20, 3, s. 1093–1096. ISSN 1051-8223. doi: [10.1109/TASC.2010.2040725](https://doi.org/10.1109/TASC.2010.2040725).
- [48] KIRKPATRICK, S. – GELATT, C. D. – VECCHI, M. P. Optimization by simulated annealing. *science*. 1983, 220, 4598, s. 671–680.
- [49] KOZIEL, S. – YANG, X. *Surrogate-Based Methods*, s. 33–59. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2011. doi: [10.1007/978-3-642-20859-1_3](https://doi.org/10.1007/978-3-642-20859-1_3). Dostupné z: https://doi.org/10.1007/978-3-642-20859-1_3. ISBN 978-3-642-20859-1.

- [50] KUBALÍK, J. *Evolutionary Algorithms: Introduction - Diskrétní EA. Binární reprezentace, permutace*. [online]. 2018. Dostupné z: http://cw.fel.cvut.cz/b181/_media/courses/a0m33eoa/prednasky/a0m33eoa_sga_2016.pdf.
- [51] LACHMAN, T. – MOHAMAD, T. R. – FONG, C. H. Nonlinear modelling of switched reluctance motors using artificial intelligence techniques. *IEE Proceedings - Electric Power Applications*. Jan 2004, 151, 1, s. 53–60. ISSN 1350-2352. doi: 10.1049/ip-epa:20040025.
- [52] LEBENSZTAJN, L. et al. A multi-objective analysis of a special switched reluctance motor. *COMPEL - The international journal for computation and mathematics in electrical and electronic engineering*. 2005, 24, 3, s. 931–941. doi: 10.1108/03321640510598247. Dostupné z: <https://doi.org/10.1108/03321640510598247>.
- [53] LEE, J. – HUN SEO, J. – KIKUCHI, N. Topology optimization of switched reluctance motors for the desired torque profile. *Structural and Multidisciplinary Optimization*. 11 2010, 42, s. 783–796. doi: 10.1007/s00158-010-0547-1.
- [54] LEPŠ, M. *Moderní metody optimalizace - přednáška 13: Metamodeling* [online]. 2018. Dostupné z: http://mech.fsv.cvut.cz/~leps/teaching/mmo/prednasky/prednaska13_Meta.pdf.
- [55] LI, Y. – BOBBA, D. – SARLIOGLU, B. Design and Optimization of a Novel Dual-Rotor Hybrid PM Machine for Traction Application. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. Feb 2018, 65, 2, s. 1762–1771. ISSN 0278-0046. doi: 10.1109/TIE.2017.2739686.
- [56] LIN, C. H. – HWANG, C. C. High performances design of a six-phase synchronous reluctance motor using multi-objective optimization with altered bee colony optimization and Taguchi method. *Energies*. 2018, 11, 10, s. 2716.
- [57] LÓPEZ-TORRES, C. et al. Development of a Behavior Maps Tool to Evaluate Drive Operational Boundaries and Optimization Assessment of PMa-SynRMs. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. Aug 2018, 67, 8, s. 6861–6871. ISSN 0018-9545. doi: 10.1109/TVT.2018.2823339.
- [58] MAREK, M. *Toolbox pro vícekritériální optimalizační problémy*. Diplomová práce, VUT Brno, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky, 2016.
- [59] MATSUO, T. – LIPO, T. A. Rotor design optimization of synchronous reluctance machine. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. June 1994, 9, 2, s. 359–365. ISSN 0885-8969. doi: 10.1109/60.300136.

- [60] MATVEEV, A. *Development of methods, algorithms and software for optimal design of switched reluctance drives*. Disertační práce, Department of Electrical Engineering, 2006.
- [61] MENDES, R. P. G. – CALADO, M. R. A. – MARIANO, S. Particle swarm and Box's complex optimization methods to design linear tubular switched reluctance generators for wave energy conversion. *Swarm and Evolutionary Computation*. 01 2016, 28. doi: 10.1016/j.swevo.2015.12.003.
- [62] MIRZAEIAN, B. et al. Multiobjective optimization method based on a genetic algorithm for switched reluctance motor design. *IEEE Transactions on Magnetics*. May 2002, 38, 3, s. 1524–1527. ISSN 0018-9464. doi: 10.1109/20.999126.
- [63] MOHAMMADI, M. H. et al. A Computationally Efficient Algorithm for Rotor Design Optimization of Synchronous Reluctance Machines. *IEEE Transactions on Magnetics*. March 2016, 52, 3, s. 1–4. ISSN 0018-9464. doi: 10.1109/TMAG.2015.2491306.
- [64] MOHAMMADI, M. H. – SILVA, R. C. P. – LOWTHER, D. A. Finding Optimal Performance Indices of Synchronous AC Motors. *IEEE Transactions on Magnetics*. June 2017, 53, 6, s. 1–4. ISSN 0018-9464. doi: 10.1109/TMAG.2017.2662705.
- [65] MOUSAVI-AGHDAM, S. R. – FEYZI, M. R. – EBRAHIMI, Y. A New Switched Reluctance Motor Design to Reduce Torque Ripple using Finite Element Fuzzy Optimization. *Iranian Journal of Electrical and Electronic Engineering*. 03 2012, 8, s. 91–96.
- [66] NAVARDI, M. J. – BABAGHORBANI, B. – KETABI, A. Efficiency improvement and torque ripple minimization of Switched Reluctance Motor using FEM and Seeker Optimization Algorithm. *Energy Conversion and Management*. 2014, 78, s. 237–244. ISSN 0196-8904. doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.11.001>. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890413007115>.
- [67] OCAK, O. – AYDIN, M. A New Hybrid Permanent Magnet Synchronous Motor With Two Different Rotor Sections. *IEEE Transactions on Magnetics*. Nov 2017, 53, 11, s. 1–5. ISSN 0018-9464. doi: 10.1109/TMAG.2017.2709787.
- [68] OMEKANDA, A. M. Robust torque and torque-per-inertia optimization of a switched reluctance motor using the Taguchi methods. *IEEE Transactions on Industry Applications*. March 2006, 42, 2, s. 473–478. ISSN 0093-9994. doi: 10.1109/TIA.2006.870031.
- [69] OWATCHAIPHONG, S. – FUENGWARODSAKUL, N. H. Multi-objective based optimization for switched reluctance machines using fuzzy and genetic algorithms. In

- 2009 *International Conference on Power Electronics and Drive Systems (PEDS)*, s. 1530–1533, Nov 2009. doi: 10.1109/PEDS.2009.5385926.
- [70] ŠPANĚL, M. – BERAN, V. *Obrazové segmentační techniky - Přehled existujících metod* [online]. 206. Dostupné z: <http://www.fit.vutbr.cz/~spanel/segmentace/>.
- [71] PANNEER SELVAM, P. – RENGARAJAN, N. Multiobjective Optimization of Electrical Machine, a State of the Art Study. *International Journal of Computer Applications*. 10 2012, 56, s. 975–8887. doi: 10.5120/8953-3136.
- [72] PARK, I. H. Shape and topology optimization of rotor in synchronous reluctance motor using continuum sensitivity and adaptive level set method. In *2013 International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, s. 129–133, Oct 2013. doi: 10.1109/ICEMS.2013.6754538.
- [73] PARK, I. H. *Continuum Shape Design Sensitivity of Electrostatic System*, s. 29–112. 01 2019. doi: 10.1007/978-981-13-0230-5_3. ISBN 978-981-13-0229-9.
- [74] PARK, J. M. et al. Rotor Design on Torque Ripple Reduction for a Synchronous Reluctance Motor With Concentrated Winding Using Response Surface Methodology. *IEEE Transactions on Magnetics*. Oct 2006, 42, 10, s. 3479–3481. ISSN 0018-9464. doi: 10.1109/TMAG.2006.879501.
- [75] PELLEGRINO, G. – CUPERTINO, F. – GERADA, C. Barriers shapes and minimum set of rotor parameters in the automated design of Synchronous Reluctance machines. In *2013 International Electric Machines Drives Conference*, s. 1204–1210, May 2013. doi: 10.1109/IEMDC.2013.6556286.
- [76] PELLEGRINO, G. et al. *The Rediscovery of Synchronous Reluctance and Ferrite Permanent Magnet Motors*. 01 2016. doi: 10.1007/978-3-319-32202-5.
- [77] PILÁT, M. *Evolutionary Algorithms for Multiobjective Optimization*. Disertační práce, Charles University in Prague, Faculty of Mathematics and Physics, 2013.
- [78] PLÁNIČKA, F. – ZAJÍČEK, M. – ADÁMEK, V. *Pružnost a pevnost 1 - Napjatost a hypotézy pevnosti* [online]. 2019. Dostupné z: <https://www.kme.zcu.cz/kmet/pp/napjatost-a-hypotezy-pevnosti/shrnuti.pdf>.
- [79] PYRHONEN, J. – JOKINEN, T. – HRABOVCOVA, V. *Design of rotating electrical machines*. John Wiley & Sons, 2013. doi: 10.1002/9780470740095. ISBN 978-0-470-69516-6.
- [80] QUESADA, A. *5 algorithms to train a neural network* [online]. 2018. Dostupné z: https://www.neuraldesigner.com/blog/5_algorithms_to_train_a_neural_network.

- [81] RAO, R. – SAVSANI, V. – VAKHARIA, D. Teaching-learning-based optimization: A novel method for constrained mechanical design optimization problems. *Computer-Aided Design*. 2011, 43, 3, s. 303–315. ISSN 0010-4485. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cad.2010.12.015>. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0010448510002484>.
- [82] ROGER-FOLCH, J. – LÁZARO JOARES, V. – GOMEZ-LAZARO, E. Analysis of skewed slots in induction machines by using 2D finite element method. *COMPEL: The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering*. 04 1998, 17, s. 212–218. doi: 10.1108/03321649810203152.
- [83] SAHRAOUI, H. – ZEROUG, H. – TOLYAT, H. A. Switched Reluctance Motor Design Using Neural-Network Method With Static Finite-Element Simulation. *IEEE Transactions on Magnetics*. Dec 2007, 43, 12, s. 4089–4095. ISSN 0018-9464. doi: 10.1109/TMAG.2007.907990.
- [84] SONG, S. et al. Accurate modeling of switched reluctance machine based on hybrid trained WNN. *AIP Advances*. 2014, 4, 4, s. 047130. doi: 10.1063/1.4873535. Dostupné z: <https://doi.org/10.1063/1.4873535>.
- [85] SRINIVAS, N. – DEB, K. Multiobjective Optimization Using Nondominated Sorting in Genetic Algorithms. *Evolutionary Computation*. Sep. 1994, 2, 3, s. 221–248. ISSN 1063-6560. doi: 10.1162/evco.1994.2.3.221.
- [86] STATON, D. A. – MILLER, T. J. E. – WOOD, S. E. Maximising the saliency ratio of the synchronous reluctance motor. *IEE Proceedings B - Electric Power Applications*. July 1993, 140, 4, s. 249–259. ISSN 0143-7038. doi: 10.1049/ip-b.1993.0031.
- [87] ŠANDERA, Č. *Hybridní model metaheuristických algoritmů*. Disertační práce, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav matematiky, 2015.
- [88] TAVNER, P. Cross-magnetisation effects in electrical machines. *Electric Power Applications, IEE Proceedings -*. 06 2004, 151, s. 249–259. doi: 10.1049/ip-epa:20040345.
- [89] TESSAROLO, A. Modeling and Analysis of Synchronous Reluctance Machines With Circular Flux Barriers Through Conformal Mapping. *IEEE Transactions on Magnetics*. April 2015, 51, 4, s. 1–11. ISSN 0018-9464. doi: 10.1109/TMAG.2014.2363434.
- [90] TORAC, I. – ARGESSEANU, A. Analytical model of the synchronous reluctance motor with axially laminated rotor for optimization purpose. In *2008 11th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment*, s. 27–32, May 2008. doi: 10.1109/OPTIM.2008.4602382.

- [91] TRUONG, P. H. et al. Torque ripple minimization in non-sinusoidal synchronous reluctance motors based on artificial neural networks. *Electric Power Systems Research*. 2016, 140, s. 37–45. ISSN 0378-7796. doi: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2016.06.045>. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378779616302541>.
- [92] VANDERLINDE, J. *Classical Electromagnetic Theory*. Fundamental Theories of Physics. Springer Netherlands, second edition edition, 2010. Dostupné z: <https://books.google.cz/books?id=w9R-cgAACAAJ>. ISBN 9789048167074.
- [93] WANG, J. J. Parameter optimization and speed control of switched reluctance motor based on evolutionary computation methods. *Swarm and Evolutionary Computation*. 2018, 39, s. 86–98. ISSN 2210-6502. doi: <https://doi.org/10.1016/j.swevo.2017.09.004>. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2210650217303462>.
- [94] WANG, K. et al. Torque ripple reduction of synchronous reluctance machines: using asymmetric flux-barrier. *COMPEL - The international journal for computation and mathematics in electrical and electronic engineering*. 2015, 34, 1, s. 18–31. doi: 10.1108/COMPEL-11-2013-0367. Dostupné z: <https://doi.org/10.1108/COMPEL-11-2013-0367>.
- [95] WILLIAMSON, S. – FLACK, T. J. – VOLSCHENK, A. F. Representation of skew in time-stepped two-dimensional finite-element models of electrical machines. In *Proceedings of 1994 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*, 1, s. 143–148 vol. 1, Oct 1994. doi: 10.1109/IAS.1994.345486.
- [96] WOLPERT, D. H. – MACREADY, W. G. No free lunch theorems for optimization. *IEEE transactions on evolutionary computation*. 1997, 1, 1, s. 67–82.
- [97] WU, H. – DEPERNET, D. – LANFRANCHI, V. Analysis of torque ripple reduction in a segmented-rotor synchronous reluctance machine by optimal currents. *Mathematics and Computers in Simulation*. 2019, 158, s. 130–147. ISSN 0378-4754. doi: <https://doi.org/10.1016/j.matcom.2018.07.001>. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378475418301721>. ELECTRIMACS 2017, The International Conference on Modeling and Simulation of Electric Machines, Converters and Systems (IMACS TC 1).
- [98] YAMAZAKI, K. – FUKUSHIMA, N. Torque and Loss Calculation of Rotating Machines Considering Laminated Cores Using Post 1-D Analysis. *IEEE Transactions on Magnetism*. May 2011, 47, 5, s. 994–997. ISSN 0018-9464. doi: 10.1109/TMAG.2010.2089501.

- [99] YAO, W. S. Rapid Optimization of Double-Stators Switched Reluctance Motor with Equivalent Magnetic Circuit. *Energies*. 2017, 10, 10, s. 1603.
- [100] ZAHARIA, M. V. et al. Fast determination of the optimal control parameters of a switched reluctance machine using space mapping technique. *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*. 2018, s. 1–14.
- [101] ZHANG, D. – KOH, C. Multi-objective worst-case scenario robust optimal design of switched reluctance motor incorporated with FEM and Kriging. In *2013 International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, s. 716–719, Oct 2013. doi: 10.1109/ICEMS.2013.6754483.
- [102] ZHAO, W. et al. A New Hybrid Permanent Magnet Synchronous Reluctance Machine With Axially Sandwiched Magnets for Performance Improvement. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. Dec 2018, 33, 4, s. 2018–2029. ISSN 0885-8969. doi: 10.1109/TEC.2018.2876938.

Seznam obrázků

1.1	Pareto-fronty pro dvě a tři kritéria, převzato z [26] a [49]	13
1.2	Binární formalismus, převzato z [41]	17
1.3	Level set optimalizace, převzato z [47] a [73]	18
1.4	Možnosti optimalizace izolačních bariér, převzato z [36]	19
1.5	Tři běžné tvary izolačních bariér, převzato z [75]	21
1.6	Reluktanční stroj s výřezy na povrchu rotoru, převzato z [31]	22
1.7	Možná provedení reluktančních strojů, převzato z [52] a [15]	24
1.8	Hybridní stroje, převzato z [55] a [67]	25
1.9	Možné tvary reluktančních strojů, převzato z [90] a [7]	26
1.10	Využití nekonvenčních postupů pro konstrukci bariér, převzato z [33]	29
2.1	Fotografie kostry a statoru asynchronního motoru	32
2.2	Vliv koeficientu k_2 na tvar bariéry	33
2.3	Simulace mechanického namáhání stroje	36
3.1	Rozložení fází po obvodu stroje	40
3.2	Podmínky magnetického vektorového potenciálu	40
3.3	Periodické podmínky magnetického vektorového potenciálu	41
3.4	Zasíťování řešeného problému	42
3.5	Průběh točivého momentu v čase	43
3.6	Indukovaná proudová hustota v rotoru	44
3.7	Porovnání průběhu momentu	45
4.1	Metodika přírodního výběru, převzato z [26]	49
4.2	Všechny spočtené stroje se čtyřmi bariérami	50
4.3	Všechny spočtené stroje se třemi bariérami	51
4.4	Průměrné hodnoty generací pro stroje se čtyřmi bariérami	52
4.5	Průměrné hodnoty generací pro stroje se třemi bariérami	52
4.6	Maximální hodnoty \overline{M} generací pro stroje se čtyřmi bariérami	53
4.7	Maximální hodnoty \overline{M} generací pro stroje se třemi bariérami	53
4.8	Minimální hodnoty σ generací pro stroje se čtyřmi bariérami	54
4.9	Minimální hodnoty σ generací pro stroje se třemi bariérami	54
4.10	Srovnání výsledných geometrií strojů se čtyřmi bariérami	56
4.11	Srovnání výsledných geometrií strojů se třemi bariérami	57
4.12	Simulace mechanického namáhání stroje	57
4.13	Průběh momentu v čase pro stroje se čtyřmi bariérami	58
4.14	Průběh momentu v čase pro stroje se třemi bariérami	58

4.15 Průběh momentu v čase pro stroje se čtyřmi bariérami (výřezy)	59
4.16 Průběh momentu v čase pro stroje se třemi bariérami (výřezy)	59
4.17 Závislost průměrného momentu na velikosti \mathbf{J} úhlu ψ	60
4.18 Závislost maximálního účinníku na velikosti \mathbf{J} úhlu ψ	60
4.19 Rozložení magnetické indukce čtyřbariérového stroje	61
4.20 Rozložení magnetické indukce třibariérového stroje	62
4.21 Citlivost průměrného momentu poslední generace strojů	63
4.22 Citlivost zvlnění momentu poslední generace strojů	63
4.23 Citlivost v rámci jednotlivých nezávislých parametrů (čtyři bariéry)	64
4.24 Citlivost v rámci jednotlivých nezávislých parametrů (tři bariéry)	64
4.25 Citlivost čtyřbariérového stroje	65
4.26 Citlivost třibariérového stroje	65

Přílohy

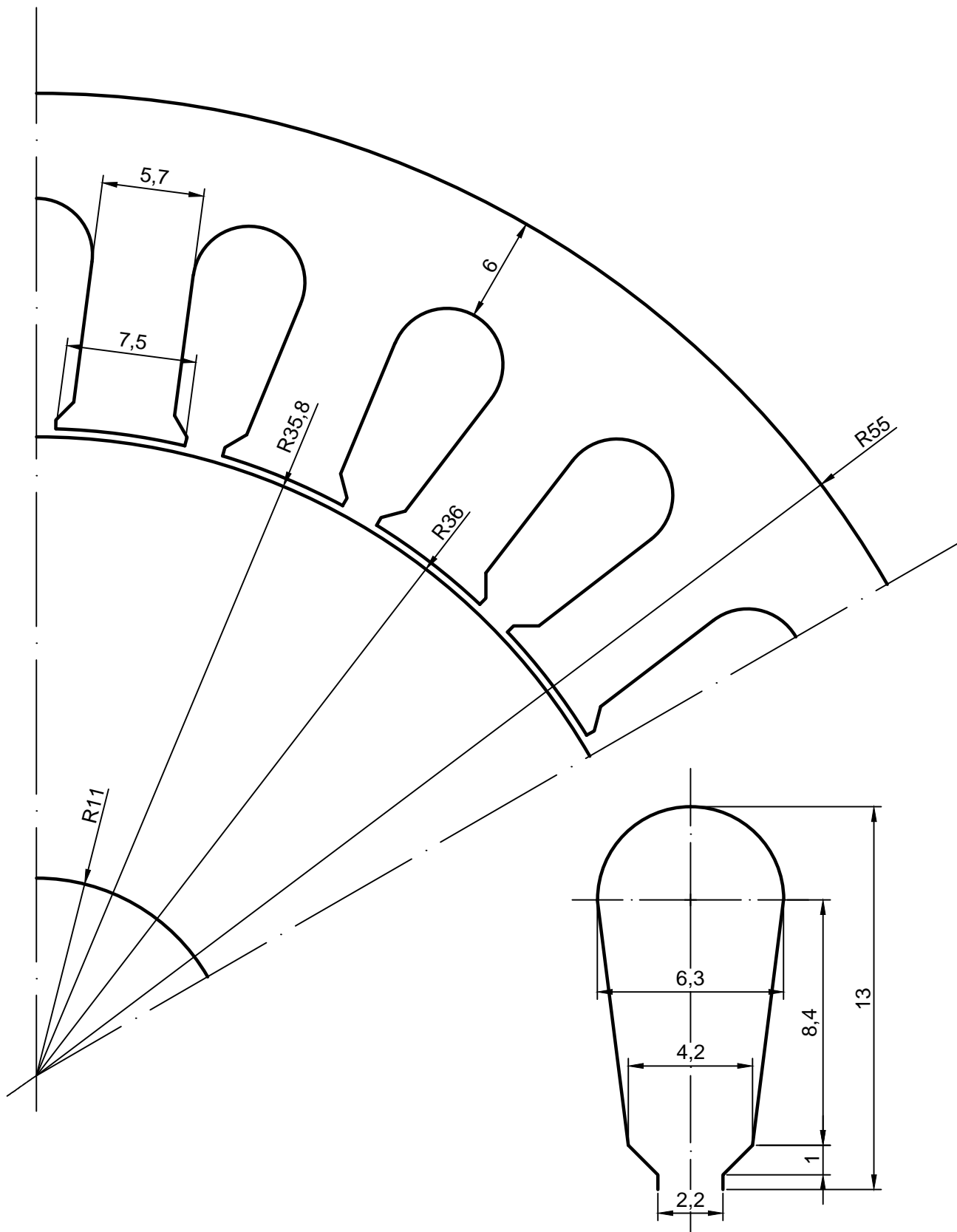
Seznam příloh

Příloha 1 - Výkres pevných rozměrů stroje

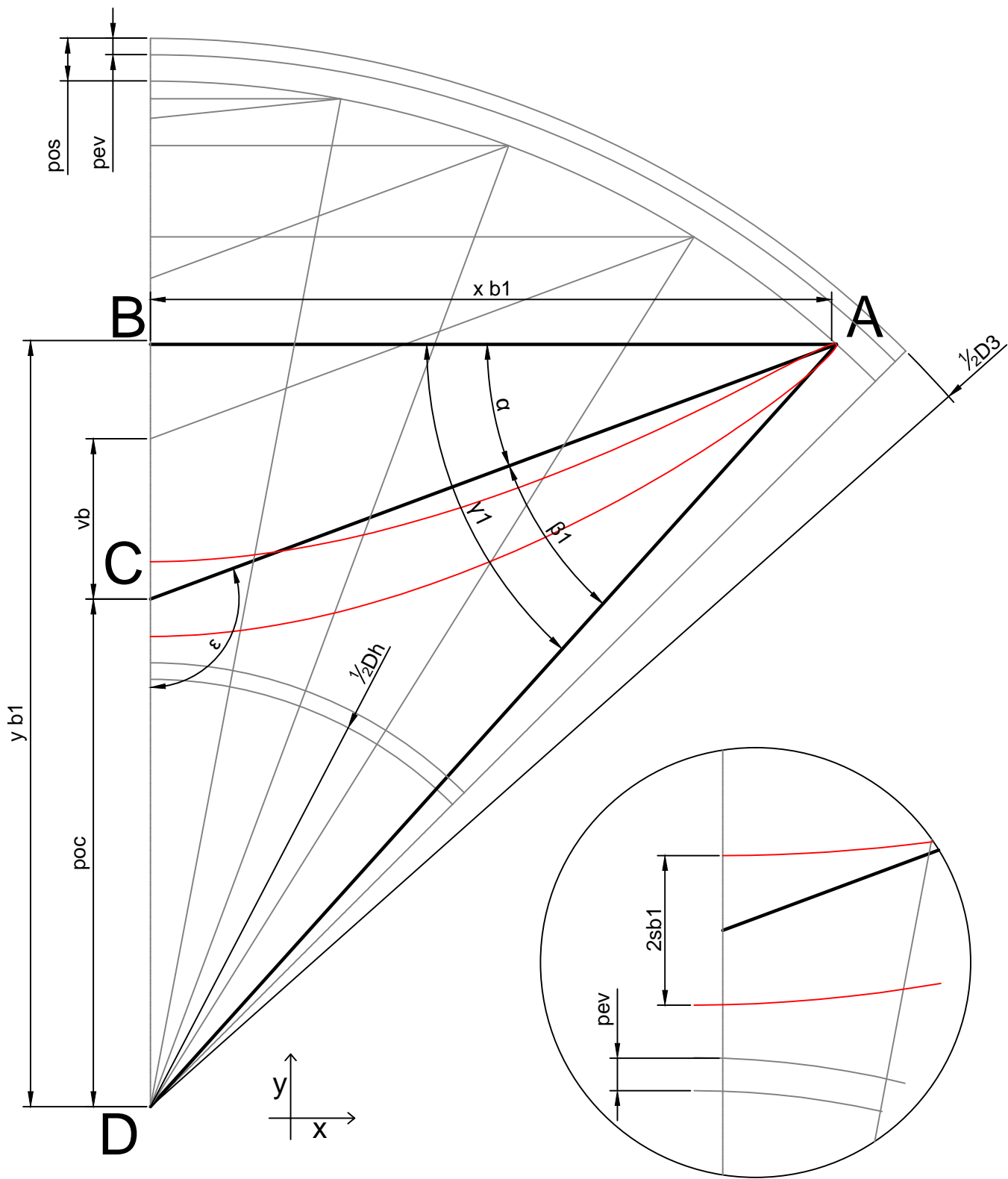
Příloha 2 - Výkres konstrukce bariér

Příloha 3 - Výkres rotoru se třemi bariérami

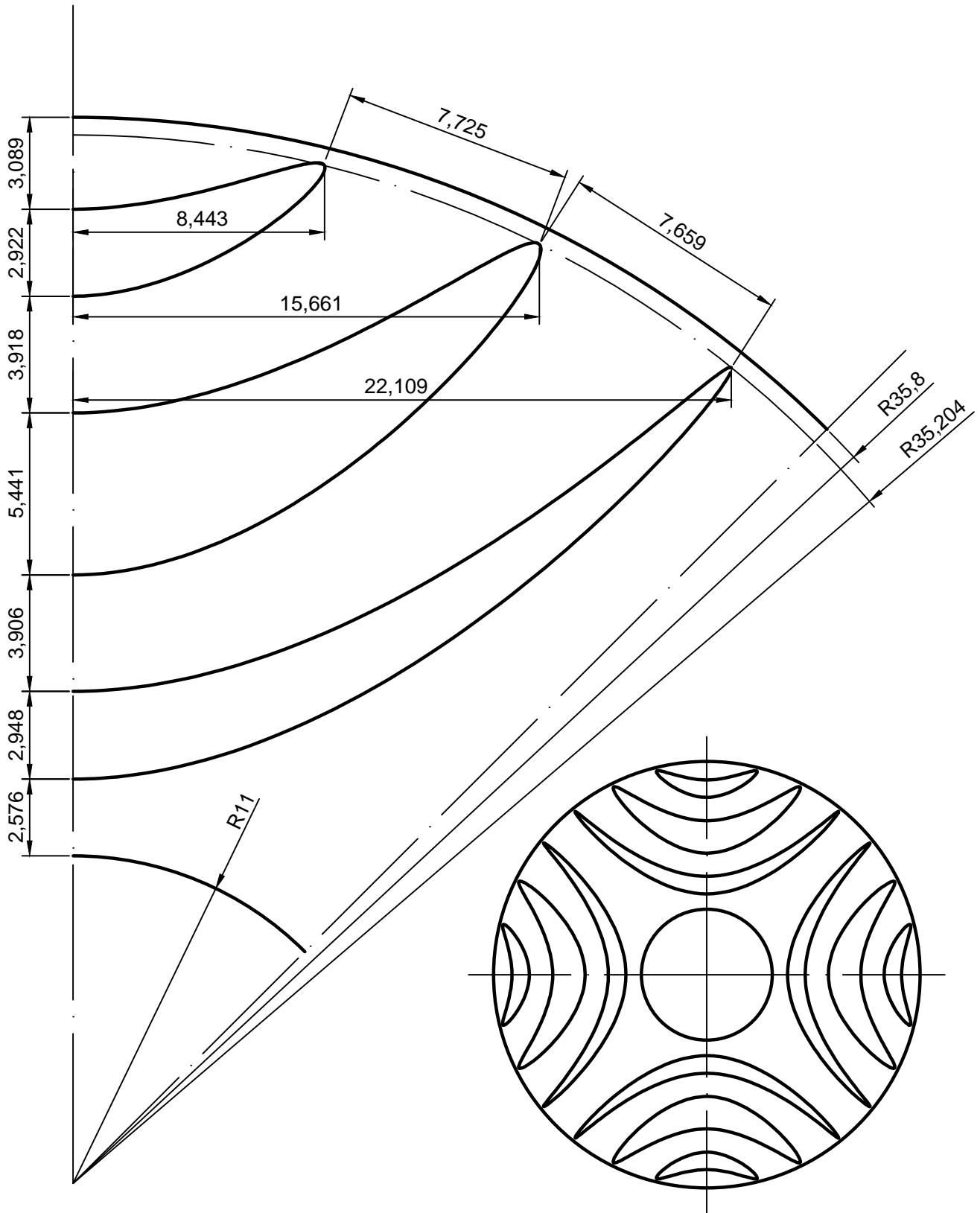
Příloha 4 - Výkres rotoru se čtyřmi bariérami



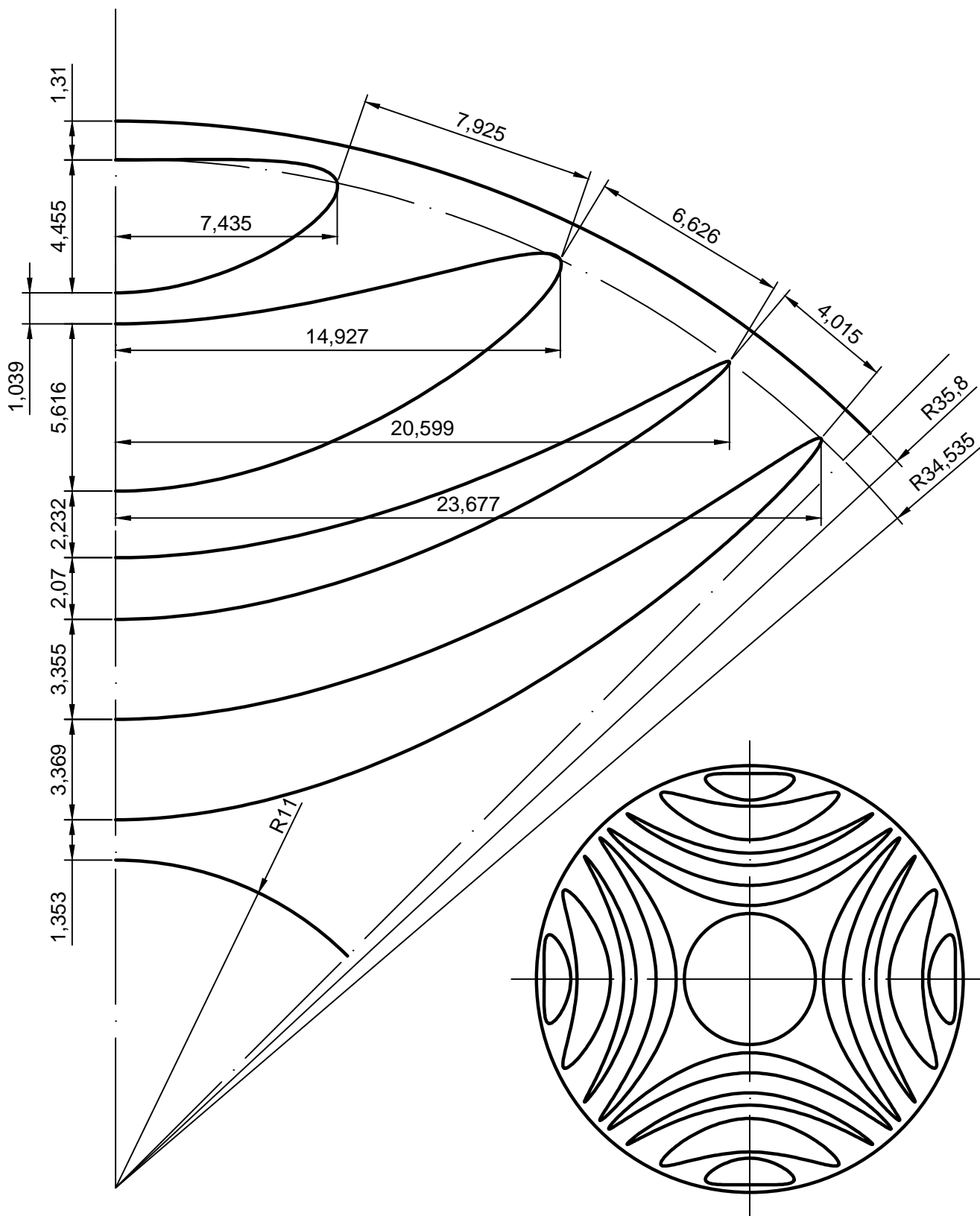
<p>Název Výkres rozměrů stroje</p>	<p>Dokument Příloha DP 1</p>	
<p>Autor Jan Kaska</p>	<p>Měřítko 3:1 / 5:1</p>	<p>Datum 22.3.2019</p>



Název Výkres konstrukce izolačních bariér		Dokument Příloha DP 1	
Autor Jan Kaska		Měřítko 5:1	Datum 22.3.2019



<p><i>Název</i> Výkres rotoru se třemi bariérami</p>	<p><i>Dokument</i> Příloha DP 3</p>	
<p><i>Autor</i> Jan Kaska</p>	<p><i>Měřítko</i> 5:1 / 1:1</p>	<p><i>Datum</i> 13.5.2019</p>



<p>Název Výkres rotoru se čtyřmi bariérami</p>	<p>Dokument Příloha DP 4</p>	
<p>Autor Jan Kaska</p>	<p>Měřítko 5:1 / 1:1</p>	<p>Datum 13.5.2019</p>