

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A ELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING

OPTIMALIZACE STROJE S PERMANENTNÍMI MAGNETY NA
ROTORU POMOCÍ UMĚLÉ INTELIGENCE

DIZERTAČNÍ PRÁCE

DOCTORAL THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ing. JIŘÍ KURFÜRST

BRNO 2013



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A ELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONICS
ENGINEERING

OPTIMALIZACE STROJE S PERMANENTNÍMI MAGNETY NA ROTORU POMOCÍ UMĚLÉ INTELIGENCE

OPTIMIZATION OF THE PERMANENT MAGNET MACHINE BASED ON THE ARTIFICIAL
INTELIGENCE

DIZERTAČNÍ PRÁCE
DOCTORAL THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Ing. JIŘÍ KURFÜRST

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. ČESTMÍR ONDRŮŠEK, CSc.

BRNO 2013

ANOTACE

Dizertační práce se zabývá využitím optimalizačních algoritmů umělé inteligence při návrhu elektrického stroje s permanentními magnety na rotoru (SMPM). Hlavním cílem práce je aplikovat potenciální optimalizační metody při návrhu stroje a ověřit tak jejich efektivitu a vhodnost. Optimalizace jsou obecně zaměřeny na změnu materiálu magnetů (NdFeB nebo SmCo), na zvyšování účinnosti, snižování harmonického zkreslení, eliminace parazitních složek momentu (cogging) při zachování jmenovitých hodnot stroje. Jednalo se o povrchové optimalizace tvaru magnetů, tvaru vzduchové mezery a drážky statoru. Byly vybrány dva optimalizační algoritmy. Ve světě dobře známý Genetický Algoritmus (GA) a robustní Samo-Organizující se algoritmus (SOMA), jako jeden z českých algoritmů. Na příkladech je vysvětlena podstata algoritmů a jejich nejdůležitějších funkcí (penalizační a ohodnocovací). Z hlediska perspektivy a užitečnosti optimalizačních algoritmů jsou výsledky prakticky ověřeny na vibračním generátoru (VG) výkonu 7 mW (0,1g zrychlení) a na synchronním servomotoru s PM na rotoru o výkonu 1,1 kW (6tis. min⁻¹) vždy ve spolupráci s průmyslem. Metody se ukázaly jako vhodné pro optimalizace těchto typů strojů a jsou dále hypoteticky aplikovány u strojů se jmenovitými otáčkami do 10tis. min⁻¹ a 120tis. min⁻¹.

KLÍČOVÁ SLOVA

SMPM; SOMA; ATO; NdFeB; SmCo; Vibrační generátor; servo motor; nízkootáčkové stroje; vysokootáčkové stroje; optimalizace; umělá inteligence; Genetický Algoritmus; penalizační funkce; ohodnocovací funkce; zvyšování účinnosti, cogging moment; vyšší harmonické; ztráty; magnety.

ABSTRACT

The dissertation thesis deal with the design and the optimization of the permanent magnet synchronous machine (SMPM) based on the artificial intelligence. The main target is to apply potential optimization methods on the design procedure of the machine and evaluate the effectiveness of optimization and the optimization usefulness. In general, the optimization of the material properties (NdFeB or SmCo), the efficiency maximization with given nominal input parameters, the cogging torque elimination are proposed. Moreover, the magnet shape optimization, shape of the air gap and the shape of slots were also performed. The well known Genetic algorithm and Self-Organizing migrating algorithm produced in Czech were presented and applied on the particular optimization issues. The basic principles (iterations) and definitions (penalty function and cost function) of proposed algorithms are demonstrated on the examples. The results of the vibration generator optimization (VG) with given power 7mW (0.1g acceleration) and the results of the SMPM 1,1kW (6 krpm) optimization are practically evaluated in the collaboration with industry. Proposed methods are useful for the optimization of PM machines and they are further theoretically applied on the low speed machine (10 krpm) optimization and high speed machine (120 krpm) optimization.

KEYWORDS

SMPM; SOMA; ATO; NdFeB; SmCo; vibration generator; servo machines; low speed machines; high speed machines; optimization; artificial intelligence; Genetic algorithm; penalty function; cost function; maximization of efficiency; cogging torque; harmonics; losses; magnets.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KURFURST, J. *Optimalizace stroje s permanentními magnety na rotoru pomocí umělé inteligence*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2013, 132s. Vedoucí dizertační práce doc. Ing. Čestmír Ondrůšek, CSc.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou dizertační práci na téma: *Optimalizace stroje s permanentními magnety na rotoru pomocí umělé inteligence* jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího dizertační práce – školitelem doc. Ing. Čestmírem Ondrůškem, CSc. (Vysoké učení technické v Brně) a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené dizertační práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této dizertační práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č.121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.“

V Brně dne

.....

(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu dizertační práce doc. Ing. Čestmíru Ondrůškovi, CSc., za užitečnou metodickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé dizertační práce.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

Obsah

1 Úvod	6
1.1 MOTIVACE.....	7
1.2 MOHOU BÝT OPTIMALIZAČNÍ ALGORITMY UŽITEČNÉ?.....	8
1.3 CÍLE DIZERTAČNÍ PRÁCE.....	16
1.3.1 Analýza stroje a výběr optimalizační metody.....	16
1.3.2 Definice optimalizačních parametrů, účelová funkce.....	16
1.3.3 Koncept optimalizačního procesu, optimalizační úlohy.....	16
1.3.4 Porovnání vybrané optimalizační metody s jinými metodami.....	16
1.3.5 Citlivostní analýza optimalizovaných parametrů, porovnání s původním strojem.....	17
2 Analyzovaný stroj	18
2.1 NÁVRH A KONSTRUKCE PM STROJŮ.....	18
2.2 VÝPOČET ZÁKLADNÍCH ROZMĚRŮ ROTORU NA ZÁKLADĚ POŽADOVANÝCH PARAMETRŮ.....	23
2.3 NÁVRH POUŽITÝCH MAGNETŮ.....	25
2.4 GEOMETRIE STATORU.....	26
2.5 ANALYTICKÝ NÁVRH STROJE S PM.....	27
3 Optimalizační metody a jejich strategie	30
3.1 KLASIFIKACE OPTIMALIZAČNÍCH METOD.....	30
3.2 OPTIMALIZAČNÍ METODY.....	31
3.2.1 Genetický algoritmus – GA.....	31
3.2.2 Samo Organizující se Migrační Algoritmus – SOMA.....	32
3.2.3 Genetický algoritmus versus SOMA.....	33
3.3 PENALIZAČNÍ FUNKCE.....	34
3.4 ÚČELOVÉ FUNKCE.....	36
3.5 VÝBĚR VHODNÉ METODY PRO OPTIMALIZACE STROJŮ S PM.....	38
4 Ověření optimalizačních metod na funkčních prototypch	43
4.1 SPECIÁLNÍ STROJ S PM – VIBRAČNÍ GENERÁTOR.....	43
4.2 SYNCHRONNÍ STROJ S PM NA ROTORU – PMSM.....	49
5 Multi - fyzikální optimalizace vysokorychlostního stroje	55
5.1 POPIS STROJE A TECHNICKÉ PARAMETRY.....	55
5.2 CITLIVOSTNÍ ANALÝZA VYBRANÝCH PARAMETRŮ.....	56
5.2.1 Mechanická analýza.....	57
5.2.2 Elektromagnetická – tepelná analýza.....	60
5.3 OPTIMALIZAČNÍ PROCES.....	66
5.3.1 Navržený optimalizační koncept pro vysokorychlostní stroj s PM.....	68
5.3.2 X-Factors optimization.....	71
5.3.3 Získané výsledky provedené optimalizace.....	73
5.4 VÝPOČTY MKP.....	78
5.4.1 Magnetická indukce v podélném směru.....	78
5.4.2 Indukované napětí.....	79
5.4.3 Elektromagnetický moment, cogging.....	80
5.4.4 Výpočet ztrát v magnetech a železe.....	82
5.4.5 Výpočet hlavních indukčností stroje.....	85
5.5 SHRNUÍ KAPITOLY MULTI-FYZIKÁLNÍ OPTIMALIZACE HS.....	87

6 PMSM synchronní stroj	89
6.1 PARAMETRICKÝ MODEL PMSM	90
6.1.1 Volba kroku výpočtu, přesnost mesh modelu	90
6.2 OPTIMÁLNÍ TVAR DRÁŽKY A GEOMETRIE ROTORU PMSM.	91
6.3 ZMĚNA MATERIÁLU MAGNETU – OPTIMÁLNÍ TVAR MAGNETU	94
6.3.1 Podmínky optimalizace – penalizační funkce	95
6.3.2 Ohodnocovací funkce, průběh optimalizace tvaru magnetu	97
6.3.3 Definice optima pro Mod1 – Mod4.....	101
6.3.4 Parametr offset se nemění, Mod5, Mod6.....	105
6.3.5 Parametr MagThick se nemění, Mod7, Mod8	106
6.3.6 Parametr PoleArc se nemění, Mod9, Mod10.....	107
6.3.7 Parametr PoleArc a Offset se nemění, Mod11, Mod12	108
6.4 MINIMALIZACE ZTRÁT V MAGNETECH	109
6.4.1 Lineární segmentace magnetů bez zaoblení	110
6.4.2 Lineární segmentace magnetů se zaoblením.....	111
6.4.3 Nelineární segmentace magnetů.....	112
6.4.4 Lineární segmentace s nastavením parametru offset.....	114
6.5 PODROBNĚJŠÍ ANALÝZA STROJE PMSM S NOVÝMI MAGNETY	117
6.5.1 Výpočet magnetické indukce Brad.....	117
6.5.2 Indukované napětí – THD.....	118
6.5.3 Cogging torque	119
6.5.4 Ztráty v železe a v magnetech	120
6.6 ZÍSKANÉ VÝSLEDKY A DISKUZE.....	121
Závěr	125
Použitá literatura	126
Seznam použitých symbolů a zkratek.....	129
Příloha A – Optimalizační metody – rozšíření	a
Příloha B – Ověření OM - rozšíření	b
Příloha C – Optimalizace vysokorychlostního stroje s PM - rozšíření	d
Příloha D – Rozšíření optimalizace PMSM.....	k

Seznam obrázků

Fig. 1.1: Myšlenková mapa dizertační práce	7
Fig. 1.2: Eliminace cogging momentu přidáním otvorů nad magnety [9]	10
Fig. 1.3: Rozložení ztrát v železe v důsledku jejich příčiny, [24]	10
Fig. 1.4: Konvenční a optimalizované tvary magnetu [21].	11
Fig. 1.5: Tvary zubu statoru, [23].	11
Fig. 1.6: Ekvivalentní elektrický model IPMSM, [27]	12
Fig. 1.7: Optimalizace pomocí B-spline, [28].	14
Fig. 1.8: Exponenciální typ účelové funkce, [11]	15
Fig. 2.1: Návrh elektrického stroje s PM.	19
Fig. 2.2: Fázorový diagram stroje s permanentními magnety – provozní stavy, $R_s=0\Omega$	22
Fig. 3.1: Možné dělení optimalizačních strategií, [39]	30
Fig. 3.2: Strategie optimalizačního algoritmu SOMA, [39].	32
Fig. 3.3: Princip GA	34
Fig. 3.4: Princip SOMA - AllToOne	34
Fig. 3.5: Penalizační funkce	35
Fig. 3.6: Parametry WEB a BRIDGE u analyzovaného experimentálního vzorku	39
Fig. 4.1: Návrh a optimalizace VG	44
Fig. 4.2: Změřené hodnoty VG, porovnání se získanými hodnotami v pracovním bodě.	46
Fig. 4.3: Průběh vypočítaných hodnot během optimalizačního procesu s vyznačeným optimem ..	47
Fig. 4.4: Výchylka magnetické části v závislosti na elektrickém tlumení VG	48
Fig. 4.5: Synchronní stroj s PM na rotoru, funkční vzorek	49
Fig. 4.6: Průběh k_T a k_E a cogging parametrické analýzy stroje s PM vybraných kombinací	50
Fig. 4.7: Průběh cogging Pk2Pk pro různé nastavení <i>offset</i> a pólovém krytí stroje	51
Fig. 4.8: Průběh k_M a k_E všech změn <i>offset</i> definice oblasti optima	52
Fig. 4.9: Porovnání naměřených a simulovaných hodnot momentu nového stroje	54
Fig. 5.1: Vysokorychlostní stroj s PM na rotoru	56
Fig. 5.2: Parametrická analýza tloušťky bandáže carbon fiber	58
Fig. 5.3: Deformační oblast carbon fiber	58
Fig. 5.4: Mechanická analýza předložených materiálů pro vysokorychlostní stroj s PM	59
Fig. 5.5: Mechanické poměry – variace předpětí bandáže rotoru	60
Fig. 5.6: Teplota magnetů a ztráty ve stroji pro různé sycení statoru, split ratio 0.33	63
Fig. 5.7: Teplota magnetů a ztráty ve stroji pro různé sycení statoru, split ratio 0.43	64
Fig. 5.8: Teplota magnetů a ztráty ve stroji pro různé sycení statoru, split ratio 0.5	64
Fig. 5.9: Teplota magnetů a ztráty ve stroji pro různé sycení statoru, split ratio 0.33	65
Fig. 5.10: Teplota magnetů a ztráty ve stroji pro různé sycení statoru, split ratio 0.43	65
Fig. 5.11: Teplota magnetů a ztráty ve stroji pro různé sycení statoru, split ratio 0.5	66
Fig. 5.12: Proces vyhodnocení změny geometrie a výpočet výstupní parametrů HS	67
Fig. 5.13: Základní komunikační procedura optimalizace HS	70
Fig. 5.14: Struktura optimalizace	71
Fig. 5.15: Získané hodnoty provedené optimalizace HS pomocí SOMA-ATO	74
Fig. 5.16: Získané hodnoty provedené optimalizace HS pomocí GA	76
Fig. 5.17: Úspěšnost X-Factor optimalizace a porovnání získaných výsledků	78
Fig. 5.18: Průběh indukovaných napětí SOMA a GA návrhu	80
Fig. 5.19: Průběh jednotlivých složek momentu HS	81
Fig. 5.20: Vyznačení míst vzniku cogging momentu v případě SOMA a GA návrhu	82
Fig. 5.21: Ztráty v železe HS návrhu GA a SOMA	83
Fig. 5.22: Průběh a rozložení ztrát v rotoru HS pro návrh pomocí GA a SOMA	84
Fig. 5.23: Výpočet indukčností pro různé případy buzení fází stroje	86
Fig. 6.1: Geometrie PMSM	89
Fig. 6.2: Potlačení harmonických indukovaného napětí 10p/12s optim1 – snižování THD [45] ...	93
Fig. 6.3: Volba optimalizovaných parametrů stroje AMK8_160mm	94
Fig. 6.4: Průběh účelové funkce během optimalizace, úloha 1 – 3.	101
Fig. 6.5: Segmentace magnetů v axiálním směru	109
Fig. 6.6: Průběh ztrát v jednom pólu stroje během otáčení – 5segm.	111
Fig. 6.7: Průběh ztrát v jednom pólu stroje během otáčení – 5 segm.	112
Fig. 6.8: Průběh ztrát během otáčení – 5 nelin. Segm, step3.	113
Fig. 6.9: Porovnání ztrát magnetů pro všechny provedené typy segmentace magnetů	116

Fig. 6.10: Porovnání magnetické indukce v podélném směru Orig(NdFeB) a Mod7(SmCo)	117
Fig. 6.11: Porovnání indukovaného napětí Orig(NdFeB) a nového modelu Mod7(SmCo).....	118
Fig. 6.12: Porovnání cogging momentu Orig(NdFeB) a modelu Mod7(SmCo).....	119
Fig. 6.13: Průběh ztrát v jednom pólu stroje Mod7 a Orig	120
Fig. 6.14: Průběh ztrát v železe u modelu Mod7 a Orig	121

Seznam tabulek

Tab. 2.1: Typické hodnoty TRV [60]	24
Tab. 2.2: Vstupní požadované parametry stroje, pro analytický návrh geometrie	27
Tab. 2.3: Sumarizace výsledků získaných pomocí analytického návrhu PM stroje.....	28
Tab. 3.1: Získané výsledky analytické optimalizace test č. 1	40
Tab. 3.2: Získané výsledky analytické optimalizace test č. 2	41
Tab. 3.3: Porovnání doby trvání jedné iterace a jednoho výpočtu předložených algoritmů	41
Tab. 4.1: Sumarizace získaných výsledků optimalizace VG, [49].....	48
Tab. 4.2: Jednotlivé iterace úlohy ověřující vhodnost zvolené optimalizační metody SOMA	53
Tab. 4.3: Porovnání hodnot stroje s magnety typu NdFeB vs SmCo.....	54
Tab. 5.1: Základní parametry vysokorychlostního stroje s PM	55
Tab. 5.2: Materiálové vlastnosti carbon fiber [13], parametrická analýza	57
Tab. 5.3: Mechanické vlastnosti INCONEL [62], STAINLESS [63] a Titanu [64]	59
Tab. 5.4: Matice parametrů určené k vyhodnocení EM a T analýzy	61
Tab. 5.5: Sumarizované výsledky z EM a T analýzy – optimální sycení vzhledem k teplotě	62
Tab. 5.6: Porovnání získaných hodnot algoritmu ATO a GA.....	77
Tab. 5.7: Porovnání indukčností vinutí HS návrhu GA a SOMA.....	85
Tab. 6.1: Získané výsledky optimalizace PMSM	92
Tab. 6.2: Geometrické omezení optimalizovaných parametrů magnetu	95
Tab. 6.3: Matice generovaných rozměrů, výpočtu objectives a ohodnocování funkce, úloha 1.	96
Tab. 6.4: Matice vygenerovaných rozměrů, výpočet objectives funkce, úloha 2.	98
Tab. 6.5: Matice vygenerovaných rozměrů, výpočet objectives funkce, úloha 3.	99
Tab. 6.6: Matice vygenerovaných rozměrů, výpočet objectives funkce, úloha 4.	100
Tab. 6.7: Porovnání doby výpočtu, úloha č. 1 – 3 pro algoritmus SOMA a GA	102
Tab. 6.8: Navržená geometrie, úloha č. 1 – 4 pro algoritmus SOMA a GA	103
Tab. 6.9: Vlastnosti stroje, úloha č. 1 – 3 pro algoritmus SOMA a GA	103
Tab. 6.10: Konvergence jedinců ke stejnému řešení, úloha č. 3 – algoritmus SOMA.....	104
Tab. 6.11: Citlivostní optimalizace – offset = 0, všechny objectives.....	105
Tab. 6.12: Citlivostní optimalizace – offset = 0, objectives kE a cogging	105
Tab. 6.13: Citlivostní optimalizace - MagThick = 7mm, všechny objectives.....	106
Tab. 6.14: Citlivostní optimalizace – MagThick = 7mm, objectives kE a cogging	106
Tab. 6.15: Citlivostní optimalizace - PoleArc = 0.8833, všechny objectives	107
Tab. 6.16: Citlivostní optimalizace - PoleArc = 0.8833, objectives kE a cogging.....	107
Tab. 6.17: Citlivostní optimalizace - PoleArc = 0.8833, Offset =0mm, všechny objectives	108
Tab. 6.18: Citlivostní optimalizace - PoleArc = 0.8833, Offset =0, objectives kE a cogging.....	108
Tab. 6.19: Vliv segmentace na ztráty v železe a ztráty v magnetech, lin. segm.	110
Tab. 6.20: Vliv segmentace na ztráty v železe a ztráty v magnetech, nelin. segm.....	111
Tab. 6.21: Nelineární segmentace, délka jednotlivých segmentů včetně plochy	113
Tab. 6.22: Výpočet ztrát v železe a v magnetech – pět segmentů nel. segm. step 3	113
Tab. 6.23: Rozměry modelů Seg5_1, Seg5_2 a Seg5_3.	114
Tab. 6.24: Indukované napětí a cogging momentu modelů Seg5_1, Seg5_2 a Seg5_3.....	114
Tab. 6.25: Rozložení ztrát v magnetech a železe u modelů Seg5_1, Seg5_2 a Seg5_3.....	115
Tab. 6.26: Porovnání celkových ztrát segmentace magnetů se zkosením a bez zkosení hrany	116
Tab. 6.27: Tabulka parametrů modelu Mod7 a Orig pro podrobnější analýzu MKP.....	117
Tab. 6.28: Napěťové poměry modelů Orig(NdFeB) a Mod7(SmCo)	118
Tab. 6.29: Výpočet hodnot cogging momentu u optim modelu Mod7 a Orig	119
Tab. 6.30: Výpočet ztrát optimalizovaného modelu Mod7(SmCo)	120
Tab. 6.31: Porovnání provedených optimalizací pro AKM8_160mm	123

Seznam příloh

App. A. 1: Vypočítané hodnoty penalizačních funkcí z kapitoly 3.3	a
App. B. 1: Průběh cogging Pk2Pk pro různé nastavení <i>offset</i> a pólovém krytí stroje, $h_m=4\text{mm}$	b
App. B. 2: Detail cogging Pk2Pk pro různé specifické <i>offset</i> a pólovém krytí stroje, $h_m=4\text{mm}$	b
App. B. 3: Průběh k_E všech změn <i>offset</i> definice oblasti optima, $h_m=4\text{mm}$	c
App. B. 4: Průběh k_M a všech změn <i>offset</i> definice oblasti optima, $h_m=4\text{mm}$	c
App. C. 1: Parametric analysis, carbon fiber thickness variation.....	d
App. C. 2: Parametric analysis, speed variation of other materials.....	e
App. C. 3: EM a T analýza, doplňující vypočítané hodnoty η , J a proudu.....	f
App. C. 4: Analýza EM a T, ztráty ve stroji – doplňující informace	g
App. C. 5: Materiál rotorových a statorových plechů HS.	i
App. C. 6: Zbylé vypočítané parametry optimalizace pomocí GA	j
App. C. 7: Zbylé vypočítané parametry optimalizace pomocí SOMA-ATO.....	j
App. D. 1: BH Curves Steel M15 014 29 gauge – 0.35mm thickness	k
App. D. 2: BP Curves: Steel M15 014 29 gauge – 0.35mm thickness.....	k
App. D. 3: Tabulka parametrů magnetu ATMAX33H	l
App. D. 4: Vlastnosti magnetů SmCo a NdFeB, [65].....	l
App. D. 5: Konvergence jedinců ke stejnému řešení, úloha č. 1 – algoritmus SOMA	l
App. D. 6: Konvergence jedinců ke stejnému řešení, úloha č. 2 – algoritmus SOMA	m
App. D. 7: Konvergence jedinců ke stejnému řešení, úloha č. 4 – algoritmus GA.....	m
App. D. 8: Vliv segm. na Iron losses a vlastní ztráty v magnetech bez zaoblené hrany	n
App. D. 9: Průběh ztrát během otáčení se zaoblenou hranou lin. segmentace	p
App. D. 10: Vliv segm. na Iron losses a vlastní ztráty v magnetech se zaoblenou hranou	q
App. D. 11: Průběh ztrát během otáčení se zaoblenou hranou lin. segmentace	s
App. D. 12: Vliv nelin. segm. na Iron losses a vlastní ztráty v magnetech, 4 segm.	t
App. D. 13: Průběh ztrát během otáčení –versus celkové ztráty v magnetech, 4 segm.	v
App. D. 14: Vliv nelin. segm. na Iron losses a vlastní ztráty v magnetech, 5 segm.	w
App. D. 15: Průběh ztrát během otáčení – versus celkové ztráty v magnetech 5segm.	x

1 Úvod

Práce se zabývá problematikou optimalizací synchronních strojů s permanentními magnety na rotoru (PMSM) použitím optimalizačních algoritmů umělé inteligence. Jedná se o možnost kompletního návrhu stroje s optimálními provozními charakteristikami a s co největší možnou účinností. S tím je spojena cena, výkon stroje, oblasti použití, ale také proces nového návrhu stroje nebo konstrukčního zásahu uvnitř stroje. Na zvyšování těchto provozních parametrů jsou kladeny stále vyšší požadavky, což vyžaduje podrobnou analýzu poměrů ve stroji jak po stránce teoretické, tak i experimentální. V dnešní době se používají efektivní nástroje a metody, které umí spočítat řadu požadovaných výstupních parametrů.

Samostatný návrh stroje s permanentními magnety, od návrhu geometrie stroje, rozložení vinutí, tvarem a typem magnetů, apod., je složitý, časově a výpočetně náročný proces. Ve stroji se totiž vyskytuje mnoho citlivých parametrů, které mohou ve velké míře ovlivnit jak vlastnosti stroje, tak i jeho provozní charakteristiky. Různým nastavováním těchto parametrů stroje je možné získat řadu možných návrhových řešení, kde každé řešení odpovídá určitým vlastnostem stroje. Konstruktor, či projektant, všechna možná řešení propočítá a stanoví, které řešení je nejlepší, tzn. neoptimálnější vzhledem ke vstupním požadavkům. Optimalizační algoritmy umělé inteligence jsou založené na různých principech vyhledávání vhodného řešení daného problému. U strojů s PM je využití optimalizačních algoritmů široké, víceméně provádí řešitele možnými návrhovými řešeními a vybírá nejvhodnější. Velkým přínosem optimalizačních algoritmů je plně automatizovaný návrh celého stroje, celková doba návrhu stroje a efektivita.

Návrh stroje s PM je vytvořen v programovém prostředí Ansoft Maxwell a některé výpočetní operace v programu SPEED LABORATORY pro porovnání softwarových možností prováděných simulací a výpočtů. Koncept optimalizací uvedený v této práci je stavěn na komunikaci mezi výpočetním SW (Maxwell, Speed) a optimalizačním programem.

Optimalizační algoritmy je možné používat nejen pro elektro - mechanické optimalizace, tepelné výpočty, ale je možné optimalizovat parametry stroje po stránce ekonomické, apod. Pro nalezení vhodného tvaru magnetického obvodu stroje, spolu s tvarem magnetů v závislosti na maximální účinnosti stroje, byla vytvořena jedna z hlavních optimalizačních úloh.

Autorova myšlenková mapa, která vznikla před psaním dizertační práce, je zobrazena na Fig. 1.1. Čtenáři umožní lépe pochopit členění příslušných kapitol, jejich zařazení a význam v této práci.

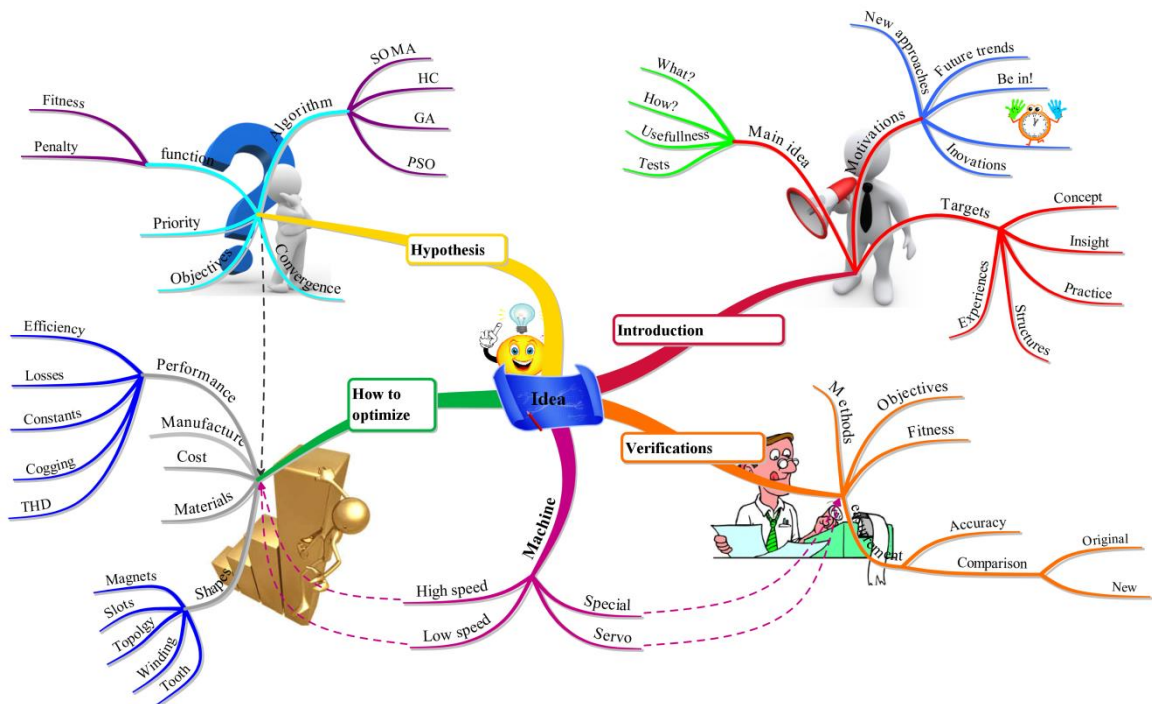


Fig. 1.1: Myšlenková mapa dizertační práce

1.1 Motivace

Legislativní předpisy EU požadují po výrobcích elektrických strojů vyšší účinnost celého stroje. Opakovaně analyticky propočítávat modely strojů s tím, že se změní vybraný parametr, nemusí být vždy efektivní metoda a mnohdy se spíše jedná o ztrátu času. V dnešní době za pomoci výpočetní techniky s velkým výpočetním potenciálem je možné využítí algoritmů, které vybírají kombinace „vhodných“ parametrů na základě principu zvoleného algoritmu, a tím si optimalizační proces hlídají a řídí „samy“. Jedná se tedy o automatický návrh stroje, kde se na základně vstupních parametrů stroje, modelu stroje a parametrů optimalizačního algoritmu, stroj optimálně navrhne nebo alespoň zpřesní předcházející návrh. Proto mohou být některé optimalizační postupy efektivní a vést ke zvýšení účinnosti.

Metody používané při výpočtech a návrhu strojů mohou být založeny na analytických výpočtech, na metodě konečných prvků, nebo v tom nejlepším případě na jejich kombinaci. Výpočty jsou mnohdy podle náročnosti a složitosti časově náročné, a proto se neustále vyhledávají nové postupy, jak návrhy strojů efektivně urychlit. Cílem

dosavadního vývoje jsou synchronní motory s permanentními magnety umístěnými na rotoru (PMSM), uvnitř rotoru (IPMSM) a metody umělé inteligence přispívající k efektivnímu řešení daných optimalizačních zadání.

Je nutné mít na paměti, že ne každý optimalizační algoritmus je vhodný pro řešení definované optimalizační úlohy. Tato skutečnost je v odborné literatuře pojmenována jako „No Free Lunch Teorém“ (NFL). Krom encyklopedií optimalizačních algoritmů [40] existuje velká spousta odborných knih s detailně vysvětleným principem algoritmů [35]-[39], kde jsou jejich vlastnosti popsány a je tedy možné provést výběr vhodného algoritmu. Výběr algoritmu je zdlouhavý proces, při němž je nutné algoritmus otestovat a v lepším případě porovnat s jinými.

Nejvýznamnější motivací, proč vznikla tato práce, je aplikace vybraných optimalizačních algoritmů na návrh elektromechanické soustavy, konkrétně na návrh synchronního stroje s permanentními magnety, vytvořeného na základě metody konečných prvků.

Velkou motivací a výzvou mohou být úlohy typu:

- Navrhnout stroj na požadovaný výkon v minimálním objemu s maximální účinností.
- Zlepšení parametrů stroje, například minimalizovat cogging, ztráty, zvlnění momentu, apod.
- Nalézt nějaké zajímavé uspořádání magnetů ve stroji, například optimální tvar povrchu magnetu vzhledem k požadovanému tvaru magnetické indukce ve vzduchové mezeře, indukovaného napětí, nebo vlastních ztrát v železe stroje vždy při zachování napěťové a momentové konstanty.
- Podobné otázky mohou být zaměřeny na tvar drážky statoru, speciální úpravy zubu statoru (drážkování, povrch, apod.), uměle vytvořené nesymetrie ve stroji, atd.

Algoritmy nemusí být vždy aplikovány na návrh stroje, ale mohou být použity například na ekonomická hlediska návrhu stroje, optimalizaci výroby a marketingu.

„Potenciál algoritmů je tedy velký, s velkými aplikačními možnostmi a jeho použití je spíše výzvou než rutinní záležitostí.“

1.2 Mohou být optimalizační algoritmy užitečné?

Optimalizační algoritmy umělé inteligence je možné používat v různých oblastech strojírenského, elektrického, energetického průmyslu, ale i v ekonomii, v chytrém plánování, atd. V následujících odstavcích se pojednává o optimalizaci synchronního stroje s permanentními magnety pomocí klasických metod návrhu stroje a různých optimalizačních algoritmů umělé inteligence.

Optimalizace stroje je globálně rozsáhlá problematika, která vyžaduje podrobné znalosti všech částí stroje. Cíleně je však zaměřena na konstrukční provedení příslušných částí, které mohou ovlivnit vlastnosti stroje nebo jeho chování v provozu. Vzhledem k tomu, že se jedná o stroje s permanentními magnety, jsou ve většině případů optimalizace zaměřeny na magnety. Klíčové pro optimalizaci jsou topologie, tvar, polarizace a správný návrh magnetů, [3], které ovlivňují rozložení magnetického pole uvnitř vzduchové mezery a podílí se na celkových ztrátách stroje [19] - [27]. S dalšími částmi stroje, například drážkami statoru, velikostí vzduchové mezery, tvarem vinutí [5], se provádí různé optimalizační úlohy [18]. Nejběžnější optimalizační úlohy jsou zvýšení celkové účinnosti, tj. snížení celkových ztrát na minimální hodnotu [3], a [30] redukce proudů THD_I a napětí THD_U vyšších harmonických [8], nebo snižování pulzačního momentu včetně jeho složek (cogging and ripple), [6]. Ve spolupráci s MKP může optimalizační úloha nabývat různé složitosti s příliš dlouhou dobou řešení iteračních kroků [27]. Optimalizační algoritmy umělé inteligence svým principem ve spolupráci s MKP zvyšují efektivitu a značným způsobem snižují dobu řešení iteračních kroků.

Elektromagnetický moment PMSM je vytvořen vzájemnou interakcí mezi magnetickým tokem statoru a tokem vzduchové mezery od magnetů na rotoru. V ideálním případě má proud na statoru a indukované napětí sinusový průběh, elektromagnetický moment je konstantní a neexistuje zvlněný moment. Ve skutečnosti vznikají od magnetů harmonické magnetické indukce ve vzduchové mezeře, které s harmonickými proudy ze statoru zapříčiní vzniku zvlněného momentu. Nevhodným návrhem permanentních magnetů na rotoru a počtem drážek na statoru vzniká cogging. Omezení cogging, a tím i zvlnění momentu, je možné provést zešíkmením drážek statoru [4] nebo rotoru tak, jak je naznačeno na Fig. 1.2 a. Cogging torque může být minimalizován až k nule, optimálním úhlem zešíkmení drážek na statoru nebo sražením hran magnetů. Další možnosti jak eliminovat cogging jsou uvedeny v [9]. V rotoru byly vyvrtány nad magnety otvory (Fig. 1.2 b), jejichž rozmístění v určitém úhlu a velikost těchto děr má značný vliv na pulzační moment stroje.

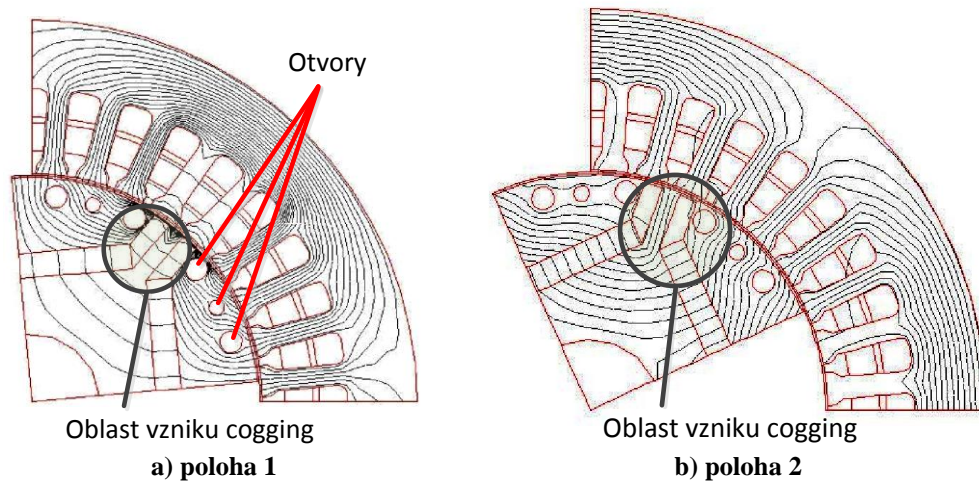


Fig. 1.2: Eliminace cogging momentu přidáním otvorů nad magnety [9]

Rozložení ztrát v železe v důsledku příčiny jejich vzniku, je ukázáno na Fig. 1.3, [24]. Například drážkové harmonické způsobují ztráty vířivými proudy na magnetech méně, než proudy vyšších harmonických injektované z použitého měniče.

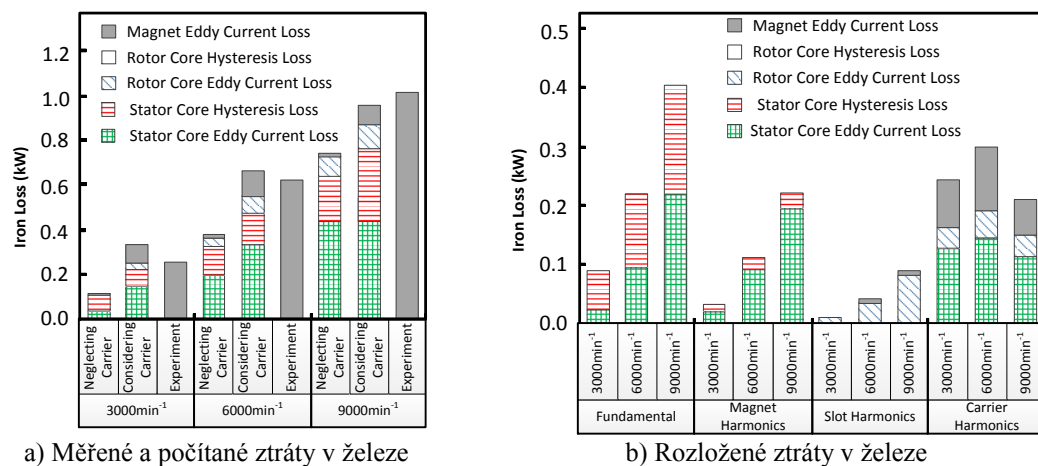


Fig. 1.3: Rozložení ztrát v železe v důsledku jejich příčiny, [24]

Vzhledem k omezeným regulacím samostatného stroje s permanentními magnety jsou používány stroje ve spolupráci s měniči, jimiž se stroj řídí. Statorové proudy vlivem PWM obsahují složky vyšších harmonických, které se projevují na ztrátách v železe. Velikost těchto ztrát je ovlivněna velikostí ztrát vířivých proudů a ztrát hysterezních v celém stroji, nejvíce pak na magnetech, [24]. Ztráty vířivými proudy je možné snížit tak, že magnety budou segmentovány tam, kde by délka segmentu neměla být větší než hloubka vniku vířivých proudů vytvořených od statorových proudů z měniče v závislosti na frekvenci.

Dalším možným způsobem jak snižovat ztráty způsobené nevhodnou regulací otáček stroje může být použití vhodnějšího řídicího algoritmu a strategie například vektorového řízení aplikovaného na stroj PMSM v [6], [30]. Vhodná strategie řízení

zvyšuje nejenom celkovou účinnost pohonu ale také účinnost samostatného motoru.

Rozložení ztrát ve stroji a rozložení magnetického pole ve stroji mimo jiné ovlivňuje uspořádání a tvar magnetů [21]. Konstrukční změna rotoru a změna tvaru magnetu Fig. 1.4 ovlivní celkové rozložení ztrát ve stroji, dále prostorové harmonické a složky proudů vyšších harmonických. Změna je vyvolána především polarizací magnetů a uměle vytvořenými vzduchovými mezerami. Nejvhodnější změnou v závislosti na snížení ztrát magnetů je optimalizovaný tvar Fig. 1.4 b).

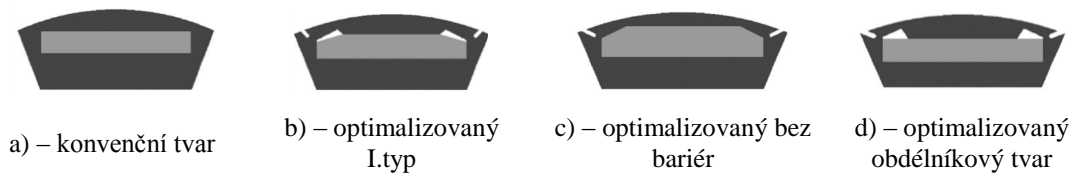


Fig. 1.4: Konvenční a optimalizované tvary magnetu [21].

Kritéria, podle kterých je možné analyticky navrhnout synchronní stroj s permanentními magnety s vysokou účinností, jsou uvedena v [23]. Jedná se o výpočet základních parametrů statoru (výška zubu, šířka zubu, vlastnosti vinutí, atd.), které jsou uvažovány jako návrhové omezení. Drážky statoru je možno složit z laminovaných plechů nebo použít magneticky měkké kompozitní materiály [10], Fig. 1.5 a, b) Snížení ztrát ve vinutí je možné dosáhnout redukováním neaktivní části cívky (čela vinutí) volbou cívkového kroku, počtem drážek na statoru Fig. 1.5 c, d) a rozložení vinutí s respektováním proudů vyšších harmonických složek.

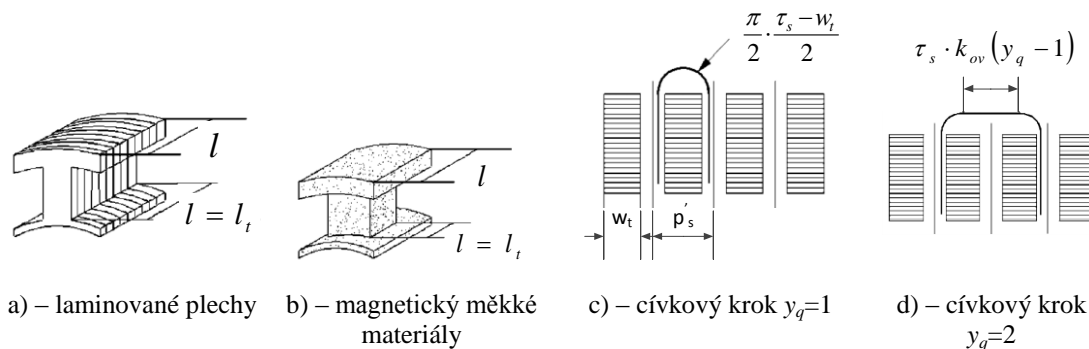


Fig. 1.5: Tvary zubu statoru, [23].

Analytické výpočty používané pro základní návrh stroje jsou dnes používány ve spolupráci s numerickými metodami. Nejznámější metodou je metoda konečných prvků (MKP). Pomocí výpočtů v [25], [23] je možné získat základní parametry, které se vloží do modelu a pomocí MKP se provede výpočet celého stroje. Další možností je využití ekvivalentního elektrického modelu Fig. 1.6, [27]. Pomocí ekvivalentního modelu je možné vypočítat základní parametry motoru, například velikost magnetické indukce a velikost magnetického toku ve vzduchové mezeře na pól. Výhodou tohoto

ekvivalentního modelu je rychlost výpočtu zmíněných základních parametrů stroje a možnost vytvoření hned několika nových návrhů stroje. Získané hodnoty pak lze použít ve výpočtu s MKP a přesněji tak stanovit poměry ve stroji. Vzhledem k tomu, že do ekvivalentního modelu není možné zakomponovat rozložení magnetů a topologii statoru a rotoru, je nutné konstrukční provedení přesně definovat u výpočtu MKP.

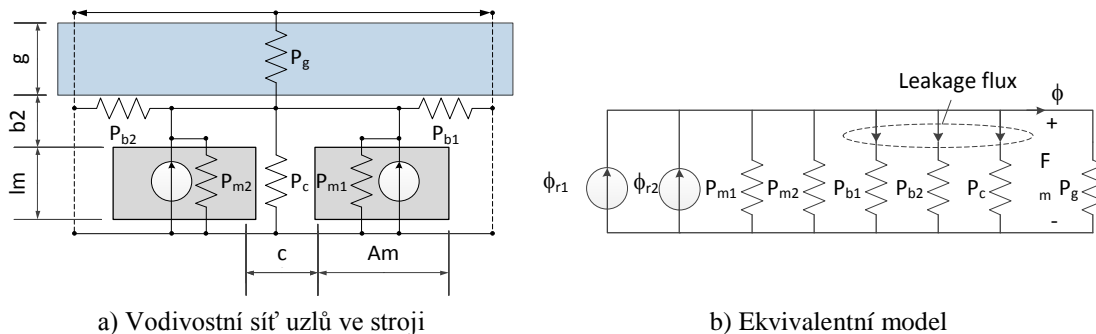


Fig. 1.6: Ekvivalentní elektrický model IPMSM, [27]

Na rozložení magnetického pole ve vzduchové mezeře se do jisté míry projeví polarizace magnetů. Magnety mohou být polarizovány paprskovitě, jednotně – ve stejném směru nebo pomocí Halbachova uspořádání magnetů, tj. například pěti segmentů na pól, [19]. V závislosti na objemu magnetů je možné zvýšit moment stroje s požadavkem na minimální hodnotu cogging momentu.

Optimalizační algoritmy slouží k nalezení minima dané účelové funkce tak, že hledají optimální numerickou kombinaci jejich argumentů. Tyto algoritmy je možné rozdělit do několika skupin podle principů jejich činnosti, složitosti a robustnosti [39]. Dále je použito uspořádání optimalizačních algoritmů [38], kde autor klasifikuje optimalizační algoritmy do 4 velkých skupin: enumerativní, deterministické, stochastické a smíšené (vysvětleno v kapitole 3.1). Do enumerativní skupiny spadají algoritmy, které řeší všechny možné kombinace daného problému. Skupina deterministických algoritmů je založena na rigorózních postupech klasické matematiky. Stochastické algoritmy využívají při řešení úlohy náhodný proces a smíšené algoritmy jsou kombinace deterministických a stochastických metod. Každá skupina algoritmů má své konkrétní oblasti použití. Vzhledem k rychlosti nalezeného řešení, robustnosti metod, komplexní optimalizaci systému, jsou nejvhodnější stochastické a smíšené metody.

Nejnámějším evolučním algoritmem (smíšené algoritmy, kapitola 3.1) umělé inteligence je genetický algoritmus, který je založen na principech evoluce. Typickým rysem GA je, že pracuje s binárním kódováním jedinců. Vzhledem k tomu, že GA je v praxi nejrozšířenější, je oblast použití široká. Optimalizace stroje PMSM, IPMSM různých optimalizačních úloh jsou uvedeny v [2], [6], [22] a [26].

Jeden z dalších používaných algoritmů je tzv. Particle Swarm Optimization (PSO), neboli rojení částic. Spadá do skupiny smíšených algoritmů, je založen na práci s populací jedinců, jejichž pozice je v prostoru možných řešení měněna tzv. rychlostním vektorem. V rámci sousedství pak dochází ke vzájemnému ovlivňování a putování jedinců k extrémům (rojení částic), které byly v daných sousedstvích nalezeny [35]. Zmíněné optimalizační algoritmy bývají často porovnávány s GA. Porovnání PSO s GA je provedeno v [2]. Jako vhodnější algoritmus byl zvolen PSO, kde rozhodujícím faktorem byla doba optimalizace. Optimalizace strojů PMSM a IPMSM jsou uvedeny v [1], [5],[7] a [19].

Optimalizační úloha může být chápána jako nalezení maxima nebo minima jednoho parametru účelové funkce optimalizační úlohy, ale také může řešit hned několik parametrů optimalizačních úloh zároveň, tzv. multi-objective (více parametrická) optimalizace. Požadavkem víceparametrické optimalizační úlohy může být například maximalizovat moment na hřídeli na požadovanou hodnotu, minimalizovat hodnotu napětí naprázdno pod určitou mez, minimalizovat tok v d-ose, zmenšit magnety a množství železa v rotoru pomocí GA, [27] nebo pomocí PSO [5].

Optimalizace strojů s permanentními magnety uvnitř rotoru s děleným a konvenčním statorem je uvedena v [18]. Snahou bylo porovnat metody „Monte Carlo“ (MC) a „Diferenciální evoluce“ (DE) na základě vybraných optimalizačních úloh. Pro každou úlohu bylo vybráno 10 optimalizačních proměnných popisujících základní geometrii statoru a rotoru a pomocí algoritmů „MC“ a „DE“ byla postupně provedena optimalizace na maximální moment stroje a THD_U . Ve třetím kroku byla provedena více-parametrická optimalizace s požadavkem na maximální moment stroje při minimálním THD_U . Na základě výsledků všech optimalizačních úloh byla jako efektivnější metoda zvolena Diferenciální Evoluce.

Taguchiho optimalizační metoda spojená s metodou konečných prvků urychluje optimalizaci nikoli ve výpočtu, ale ve vhodném výběru nového designu stroje. Návrh byl vypočítán pomocí ekvivalentního obvodu [27], [29]. Víceméně návrháře provádí možnými optimálními řešeními, kde je každé řešení ohodnoceno funkcí odpovídající vstupnímu požadavku maximalizovat nebo minimalizovat dané optimalizované funkce. Celý návrh je chápán jako multi-objektivní. Cílem bylo zvýšit magnetomotorickou sílu a mechanický moment, na druhou stranu minimalizovat parazitní (cogging) moment, pulzační moment a činitel THD_U [27] a [29].

Spolupráce optimalizačních algoritmů s metodou konečných prvků je náročná na dobu, po kterou je prováděn výpočet. U enumerativních optimalizací je doba extrémně dlouhá vzhledem k faktu, že se propočítávají všechna možná řešení. Algoritmy, které využívají stochastických principů (náhody), simulační dobu snižují, nepropočítávají se

všechna řešení, ale jenom ta, která vedou k vyřešení úlohy. K urychlení optimalizační úlohy může být využito metody D-optimal design, spadající pod RSM (Response Surface Methodology), [26]. RSM je soubor matematických a statistických technik, které jsou schopny ohodnotit systém pomocí několika návrhových proměnných a stanovit tak, jestli spadá do oblasti použitelných či nepoužitelných řešení.

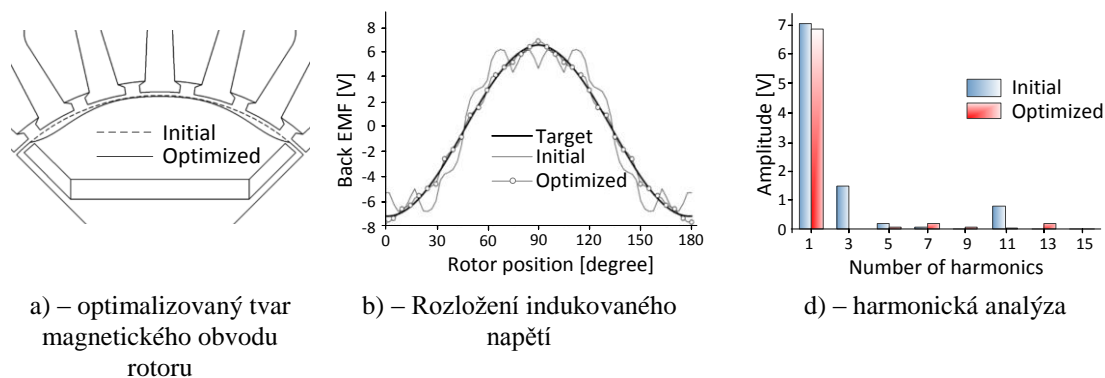


Fig. 1.7: Optimalizace pomocí B-spline, [28].

Před každou optimalizační úlohou je nutné definovat optimalizační proměnné. Vzhledem k požadovaným výstupním elektrickým a magnetickým parametrům mají optimalizační proměnné spíše geometrický charakter. Jinými slovy, každý zásah do geometrie stroje ovlivní jeho vlastnosti, především výstupní charakteristiky. Velmi důležitým parametrem optimalizace je citlivost optimalizačních proměnných na celkovou hodnotu účelové funkce. Citlivostní analýza optimalizačních proměnných na rozložení magnetického pole uvnitř vzduchové mezery byla provedena v [28]. Cílem bylo optimalizovat tvar magnetického obvodu rotoru tak, aby bylo rozložení indukovaného napětí co nejvíce podobné sinusovému průběhu a zjistit, které parametry se nejvíce na změně podílí. Velkou výhodou optimalizace byl uvnitř zabudovaný B-spline. Během optimalizace jsou měněny pouze kontrolní body a to tak, aby odpovídaly bodům ležících na hladké B-spline křivce. Optimalizační proměnné a kontrolní body souvisí s parametrizací, která je popsána v [28] B-spline křivky. Výsledky jsou porovnány na Fig. 1.7 před optimalizací a po optimalizaci stroje IPMSM.

Sdružováním evolučních optimalizačních metod je možné vytvářet hybridní metody, jejichž výkonnost je určena rychlostí konvergence k optimálnímu řešení, složitostí úlohy a robustností sdružovaných metod. Sloučení Particle Swarm Optimization (PSO) a Chaotic Algorithm (CHA) byla provedena v [3]. Optimalizace celého stroje pomocí nové hybridní optimalizace zvýšila účinnost synchronního motoru přibližně o 9%. Optimalizace byla cíleně zaměřena na snižování celkových ztrát stroje se zaměřením na magnety. Optimalizační proměnné popisující tvar a rozměry magnetu, včetně pólového krytí.

Důležitou částí optimalizačních algoritmů je správná volba účelové funkce.

Účelová funkce je funkce, která je složena z argumentů, jejichž optimální hodnoty vedou k nalezení minimální nebo maximální – „optimální hodnoty“ účelové funkce. Špatná interpretace účelové funkce ovlivní výsledky optimalizace včetně konvergenčních podmínek. Typ účelové funkce a její komplexnost určují rychlost dané optimalizační úlohy, [11]. Základní klasifikace je dána volbou argumentů funkce: lineární, exponenciální, logaritmická, iracionální, apod. U lineárního typu je rychlost konvergence k optimálním hodnotám stále stejná. U exponenciální nebo logaritmické se rychlost konvergence mění exponenciálně, respektive logaritmicky. Další metody jak urychlit konvergenci k požadovaným hodnotám jsou uvedeny v [31]. Příklad účelové funkce uvádí rovnice (1.1) a grafické znázornění (Fig. 1.8) exponenciálního typu účelové funkce. Zbylé koeficienty rovnice (1.1) jsou pro úplnost vyjádřeny v rovnici (1.2).

$$y = c_1 + (c_3 - c_1) \left(1 - \exp \left(- \frac{(f(x) - \min\{f\})^2}{\max\{f\} - \min\{f\}} \right) \right) \quad (1.1)$$

$$c_3 = c_1 + \frac{c_2 - c_1}{1 - \exp(\min\{f\} - \max\{f\})} \quad (1.2)$$

Parametry funkce c_1, c_2 představují váhové koeficienty postupně pro minimální a maximální mez, kterých může účelová funkce nabývat, parametr c_3 se dopočítává, x představuje optimalizovanou funkci. U víceparametrické optimalizace má každá optimalizovaná funkce vlastní účelovou funkci. Výstupem optimalizační úlohy je pak součet hodnot účelových funkcí.

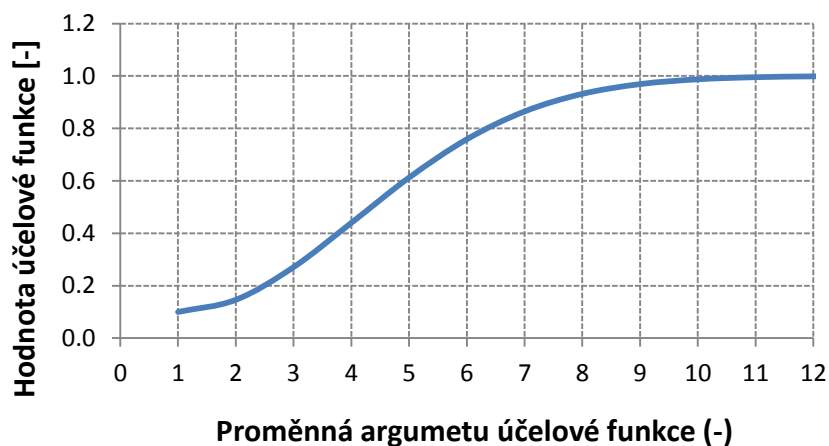


Fig. 1.8: Exponenciální typ účelové funkce, [11]

1.3 Cíle dizertační práce

Na základě literární rešerše a motivace, která vede k vytvoření této disertační práce, byly definovány cíle práce. Cílem je provést celkovou optimalizaci synchronního motoru s permanentními magnety na rotoru (PMSM) pomocí umělé inteligence. Optimalizace by měla být obecně zaměřena na zvyšování účinnosti stroje, na optimalizaci spotřeby materiálu, technologickou proveditelnost a zlepšování provozních vlastností. Cíle lze rozdělit do několika následujících bodů:

1.3.1 Analýza stroje a výběr optimalizační metody

Bude provedena analýza stroje, geometrie, tvorba výpočtového modelu a provedeny základní výpočty. Výpočty budou použity jako výchozí hodnoty a budou porovnávány s optimalizovaným strojem. V tomto bodě je nutné vybrat vhodnou optimalizační metodu, která bude funkční pro konkrétní typ úlohy řešeného systému, bude efektivní a její řešení bude konvergovat vždy k požadovaným hodnotám.

1.3.2 Definice optimalizačních parametrů, účelová funkce

Je nutné analyzovat model, který je určen pro optimalizaci. Identifikovat parametry, které ovlivňují rozložení magnetického pole podílející se na celkové účinnosti stroje.

Na základě vybraných parametrů a jasně stanovených požadavcích optimalizace je nutné vytvořit a otestovat účelovou – ohodnocovací funkci. Tato funkce představuje jádro celého optimalizačního procesu. V tomto bodě bude vytvořeno více účelových funkcí. Jednotlivé funkce se od sebe budou lišit typem funkce a váhovými koeficienty argumentů účelové funkce. Na jednoduchém příkladu bude účelová funkce testována, hodnoty budou porovnávány s ostatními hodnotami vytvořených účelových funkcí. Stejný postup bude proveden u víceparametrické optimalizace.

1.3.3 Koncept optimalizačního procesu, optimalizační úlohy

Cílem je vytvořit plně automatizovaný proces, do kterého se nadefinují vybrané optimalizační parametry, účelové funkce a zadají se požadované výstupy optimalizace. Dále definovat optimalizační úlohy, tj. co má být optimalizováno a jaké by měly být výstupy optimalizace. Ověření funkčnosti optimalizační úlohy bude ověřeno pomocí metody konečných prvků na již vyrobených funkčních vzorcích.

1.3.4 Porovnání vybrané optimalizační metody s jinými metodami

Zvolená optimalizační metoda bude porovnána na jednoduchých optimalizačních

úlohách. Budou uvedeny poznatky týkající se nových algoritmů, práce s nimi, jak se chovaly při řešení dané optimalizační úlohy, apod.

Všechny dosažené výsledky optimalizačních úloh budou ověřeny metodou konečných prvků. Na základě optimalizovaných parametrů a verifikace výsledků bude provedena výroba prototypu stroje a provedeno měření.

1.3.5 Citlivostní analýza optimalizovaných parametrů, porovnání s původním strojem

Pro optimalizované parametry bude provedena citlivostní analýza. Citlivostní analýza bude představovat informaci o tom, jak jsou jednotlivé parametry citlivé pro dané optimalizační úlohy. Ze zjištěné citlivosti parametrů by mělo být zřejmé, kterému z parametrů je nutné věnovat zvýšenou pozornost při běžném, klasickém řešení návrhu stroje a při výrobě.

Optimalizovaný stroj bude na základě výstupních parametrů optimalizace zkonstruován a bude provedeno měření provozních charakteristik. Změřené hodnoty budou porovnány s optimalizovanými hodnotami, tj. provede se srovnání experimentálního měření s numerickým výpočtem.

Při analýze problému se mohou objevit úlohy, které by mohly být zajímavé nejen z mechanického nebo elektrického optimalizačního hlediska.

2 Analyzovaný stroj

2.1 Návrh a konstrukce PM strojů

K návrhu elektrického stroje s PM je možné přistupovat různým způsobem. První oblast je věnována návrhu stroje, kde nezáleží na vnějších rozměrech. Návrh může být proveden pomocí analytických vztahů ze vstupních parametrů, jako jsou napětí, výkon, otáčky, frekvence, požadovaná účinnost a účinník. Tento návrh je opakovaně aplikovaný na většinu strojů například v [41], [42] a [60].

Druhá oblast návrhu elektrického stroje může být zaměřena na návrh s ohledem na vnější rozměry. Například návrh stroje na maximální účinnost nebo výkon z předem známého objemu. Tento způsob návrhu (fixní vnější parametry) může být použit při optimalizaci vybraných parametrů stroje, protože je většinou požadováno zachovat vnější rozměry a vybrané parametry zlepšit, jako například účinnost, výkon, oteplení, THD_U , apod. Tento odlišný způsob je aplikovaný při verifikaci parametrů stroje s PM [1], [16] a jejich optimalizace [2] a [5].

Návrhy strojů, které jsou prezentovány v této práci, jsou ve všech případech navrhovány z fixních vnějších rozměrů stroje jmenovitě z vnějšího průměru statoru a délky svazku, protože se jedná o optimalizace parametrů stávajícího stroje. Pomocí klasického návrhu stroje je tedy možné překontrolovat i vnější rozměry.

Blokové schéma návrhu stroje je prezentováno na Fig. 2.1. Návrh je rozdělen do tří oblastí, a to elektromagnetický návrh (EM), mechanický návrh a výpočet přenosu tepla (T). Světle podbarvené lichoběžníkové bloky představují vstupy pro potřebný návrh, popřípadě verifikaci parametrů stroje. Bílé obdélníkové bloky představují počítaný parametr, kde vazby mezi vstupním parametrem a počítaným jsou prezentovány šipkami.

V případě EM návrhu se jedná o fixní vnější rozměr statoru $StatorOD$, zvolené sycení v zubu statoru B_t a jhu B_{bi} stroje v obvodu naprázdno, rychlost otáčení $speed$, topologie stroje jako je topologie vinutí, počet drážek $SlotNumber$, činitel plnění drážky $SlotFill$ a proudovou hustotu. Dále je nutné znát požadovaný mechanický výkon stroje popřípadě podmínky zatěžování. Ze vstupních hodnot požadovaného výkonu stroje, otáček, požadované magnetické indukce ve vzduchové mezeře a magnetické intenzity, je možné vypočítat vnější průměr rotoru a délku stroje. Na základě informací o B_t a B_{bi} dopočítat základní rozměry magnetu h_m a statoru. V případě statoru se jedná o výpočet tloušťky zubu $ToothWidth$ a jha stroje $YokeThickness$ ze zadaných hodnot počtu drážek na statoru. Na základě vypočítané magnetické indukce ve vzduchové mezeře je možné vnitřní rozměry přizpůsobit a zpřesnit. Ze získaných rozměrů drážky, činitele plnění a zvolené proudové hustoty je možné navrhnout vinutí. Návrh spočívá ve výpočtu

parametrů vodiče, indukovaného napětí a elektrického zatěžování.

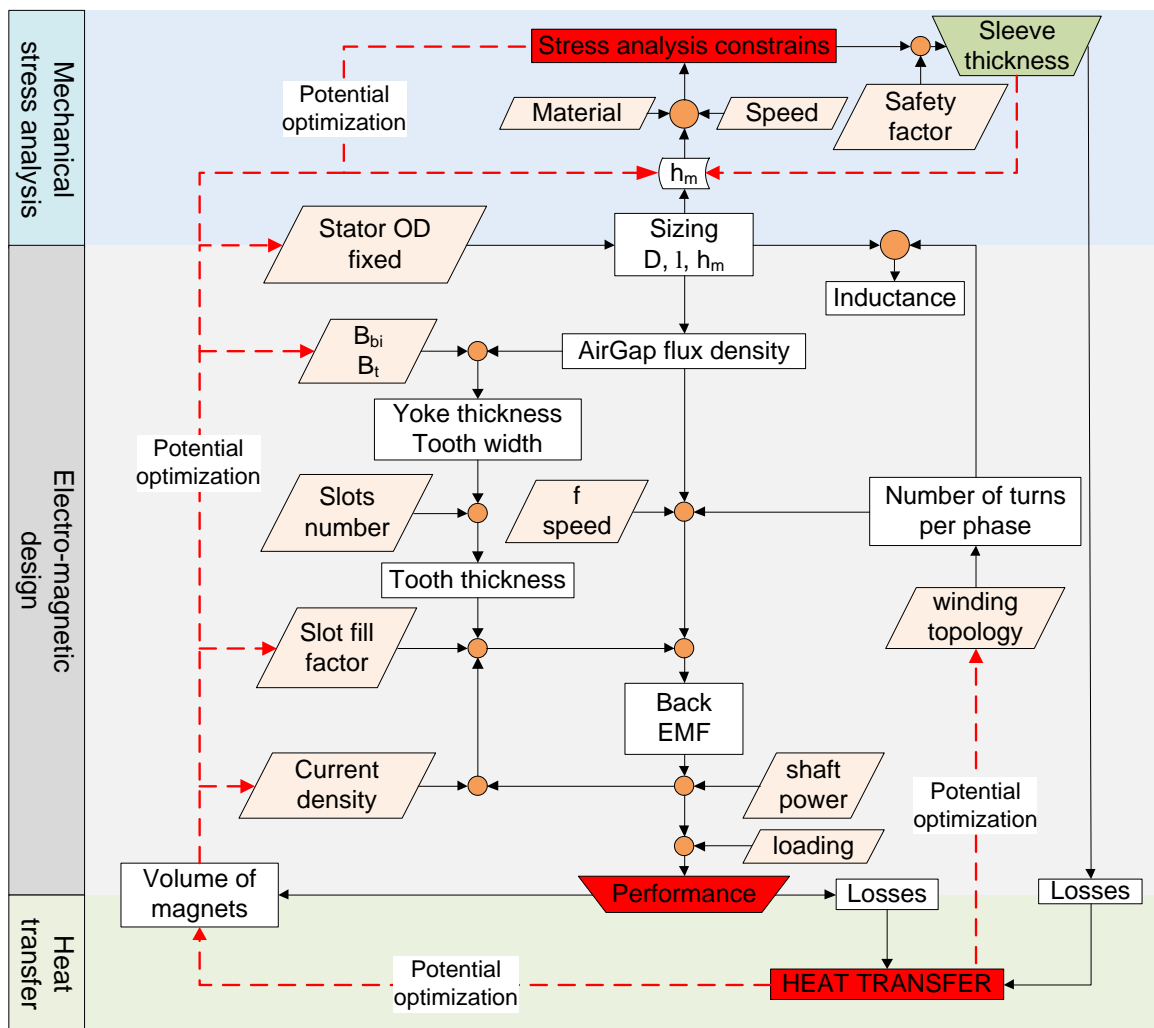


Fig. 2.1: Návrh elektrického stroje s PM.

Mechanický návrh prezentovaný na Fig. 2.1 představuje pouze návrh bandáže rotoru za splnění určitých podmínek. Hlavní podmínkou je to, aby bandáž byla dostatečně odolná mechanickým otáčkám stroje, odstředivým silám a provozní teplotě, tj. měla dostatečnou bezpečnost - *SafetyFactor*. Mechanická analýza stroje s PM je provedena v kapitole 5.2.1. Výstupem z tohoto mechanického návrhu je ideální tloušťka bandáže *SleeveThickness*, která splňuje požadavek na bezpečnostní faktor.

V případě tepelného výpočtu se jedná o ověření teploty, která byla původně pro provoz uvažovaná. Pro výpočet tepelných poměrů ve stroji je zapotřebí znát poměry ztrát v magnetech, v bandáži, v železe a ve vinutí. Informace o tom, jaká je skutečná provozní teplota na magnetech, může být dále použita za účelem volby chlazení u stroje, apod. Podrobná teplotní analýza byla provedena u stroje s PM v kapitole 5.2.2.

Červená čára na Fig. 2.1 naznačuje potenciální optimalizační úlohy, na které může

být zaměřena pozornost, už při základním návrhu stroje. Jinými slovy, objem magnetů ovlivňuje cenu stroje, proudovou hustotu ve vinutí, magnetickou indukci v zubu a jhu stroje, tloušťku bandáže, ztráty v magnetech apod. Například objem magnetů a samozřejmě další parametry musí být optimalizovány za účelem dosáhnout rovnováhy mezi ztrátami a oteplením ve stroji. Podobná úvaha může být zaměřena na vnější rozměry rotoru a statoru, protože vztah mezi nimi ovlivňuje výstupní parametry stroje.

Co se týká volby počtu pólů $2p$ a počtu drážek Q , tak tuto volbu ovlivňuje hned několik faktorů. Nejdůležitějším faktorem je počet otáček za minutu n a maximální přípustná napájecí frekvence f . Dále pak rozložení ztrát ve stroji, velikost momentu a typ použitého vinutí. Otáčky a frekvence jsou spolu ve vztahu (2.1) a je tedy možné na základě informací například od frekvence napájecího napětí vypočítat počet pólových dvojic p .

$$n = \frac{60 \cdot f}{p} \quad (2.1)$$

S volbou počtu pólů $2p$ je úzce spojena volba počtu drážek statoru. V případě počtu drážek statoru záleží na zvoleném vinutí. Teorie vinutí je dobře zpracována v literatuře [41] a [42]. Stručně řečeno, je možné ve stroji mít celočíselné vinutí $q \in N$ nebo zlomkové vinutí $q \notin N$. Do zlomkového vinutí patří rozložené vinutí nebo soustředné cívky, kde oba typy vinutí mohou být jednovrstvé nebo dvouvrstvé. Tomuto typu se říká fractional slot winding a u soustředných cívek s krokem jedna, je dosaženo toho, že čela vinutí jsou minimální a tedy i ztráty ve vinutí jsou minimalizovány [33]. Vinutí charakterizované parametrem počtu drážek na pól a fázi, pak mohou vytvořit kombinace, které jsou cíleně zaměřeny na minimální THD_U , minimální zvlnění momentu [16]. Hodnota maximálního magnetického toku ve statoru může mít vliv na rozptylové indukčnosti ve stroji [32]. Celkové uspořádání magnetů (počet pólů), energie magnetů a rozměry ovlivňují velikost proudové hustoty ve stroji [17], indukovaného napětí a momentu stroje. Pokud se jedná o nízkootáčkové stroje s velkým momentem, je vhodnější větší počet pólů a větší osová výška stroje. V případě kdy jsou stroje přepočítávány a nové návrhy vznikají ze stávajících modelových řad, je už dopředu kombinace známá, nebo je požadavek na zachování statoru skrze výrobní podmínky a rotor je potom navržen na nové parametry. Při vlastním návrhu je tedy vhodné uvažovat více kombinací počtu pólů/počtu drážek a vybrat tu, která splňuje vstupní požadavky.

Obecně lze stroje s PM popsat pomocí klasické teorie elektrického stroje. Transformací třífázového systému napájení $m=3$ do dvoufázového d-q je možné provést řadu zjednodušení, ať už samostatného řízení stroje, nebo pochopení jeho principu činnosti. d-osa se pak položí do osy fáze a společně se otáčí rychlostí ω . d-osa

představuje hlavní osu pólu (magnet) a q-osa je elektricky otočena o 90°. Příklad takového fázorového diagramu je zobrazen na Fig. 2.2 a), b) a c). Odpor statorového vinutí je pro zjednodušení zanedbaný $R_s=0\Omega$. Fázorový diagram je vytvořený na základě diferenciálních rovnic obecného elektrického stroje, které popisují stroj pomocí I. a II. Kirchhoffova zákona (2.2). Rovnice popisující transientní děj ve stroji jsou uvedeny níže. Napětí transformované do d-q souřadného systému je uvedeno v (2.2), sprážené toky (2.3) a výpočet celkového momentu stroje (2.4). Celkový moment je složen z elektromagnetického momentu a reluktančního momentu.

$$u_d = R_s i_d + \frac{d\psi_d}{dt} - \omega \psi_q \quad (2.2)$$

$$u_q = R_s i_q + \frac{d\psi_q}{dt} + \omega \psi_d$$

$$\psi_d = \psi_m + L_d i_d \quad (2.3)$$

$$\psi_q = L_q i_q$$

$$T = 0.5mp(\psi_d i_q - \psi_q i_d) \quad (2.4)$$

$$\omega = \omega_s + \frac{d\delta}{dt}$$

V ustáleném stavu jsou všechny časové derivace rovny $\frac{d\psi}{dt} = 0$ a je tedy možné rovnice přepsat do následujících tvarů pro statorové napětí d-q (2.5) a popsat stroj pomocí fázorového diagramu zobrazeného ve Fig. 2.2.

$$u_d = R_s i_d - \omega \psi_q \quad (2.5)$$

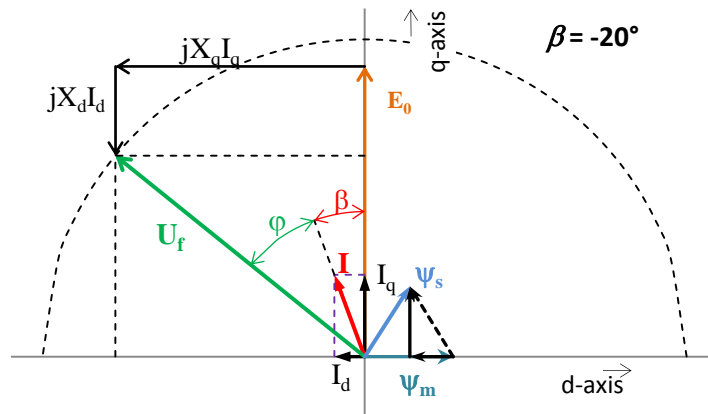
$$u_q = R_s i_q + \omega \psi_d$$

Dosazením sprážených toků rovnic (2.3) do (2.6) je možné vypočítat celkový moment stroje (2.6) a po úpravě získat (2.7) moment s lépe viditelnou složkou reluktančního momentu. V případě kdy je $L_d=L_q$ je reluktanční moment 0Nm.

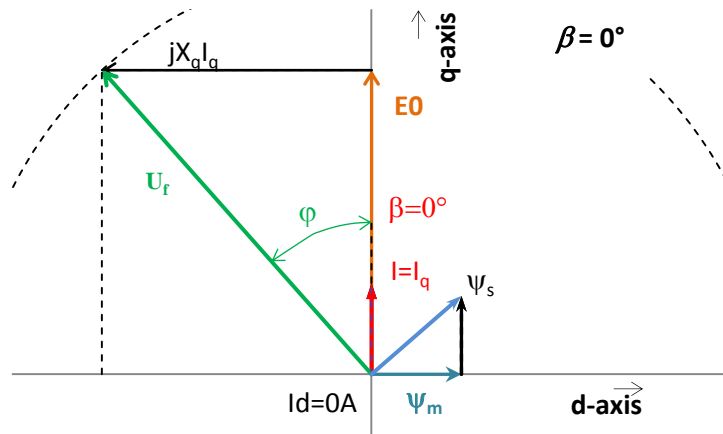
$$T = 0.5mp(\psi_d i_q - \psi_q i_d) \quad (2.6)$$

$$T = 0.5mp((\psi_m + L_d i_d) i_q - L_q i_q i_d) = 0.5mp(\psi_m i_q + i_d i_q (L_d - L_q)) \quad (2.7)$$

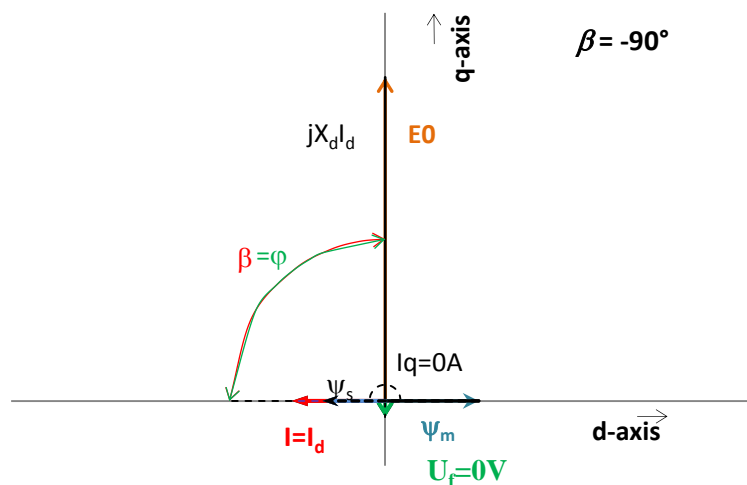
U reluktanční strojů s PM je reluktanční moment prospěšný, protože indukčnost L_d je navrhována na největší možnou velikost a reluktanční moment se přičítá k elektromagnetickému. V případě synchronních strojů s PM na rotoru jsou obě indukčnosti navrhovány na stejnou hodnotu pro eliminaci zvlnění momentu a hodnoty účinníku stroje.



- a) Úhel mezi I_q a I je $\beta = -20^\circ$, což představuje oblast odbuzování stroje d-složkou statorového toku, určení složek proudu I_d , I_q , zatížení na jmenovitou hodnotu proudu I a zatěžovacím úhlu $\delta = \varphi + \beta$.



- b) Úhel mezi I_q a I je $\beta = 0^\circ$, což představuje provozní stav, kdy je možné dosáhnout největšího momentu stroje – neexistuje tok v d-ose, tedy ani reluktační moment, který elektromagnetický moment snižuje. Určení složek proudu $I_d=0A$, I_q , zatížení na jmenovitou hodnotu proudu I a zatěžovacím úhlu $\delta = \varphi + \beta$.



- c) Úhel mezi I_q a I je $\beta = -90^\circ$, což představuje zkrat na svorkách generátoru, protože $U_f=0$, tedy veškerý tok statoru (od vinutí) působí proti toku magnetů, neexistuje tok v q-ose, tedy ani žádný moment. Určení složek proudu $I_d=I$, $I_q=0A$. Zatěžovací úhel $\delta = \varphi + \beta$.

Fig. 2.2: Fázorový diagram stroje s permanentními magnety – provozní stavy, $R_s=0\Omega$.

2.2 Výpočet základních rozměrů rotoru na základě požadovaných parametrů.

Na základě vstupních předpokladů, tj. požadované účinnosti, účinníku stroje a velikosti napájecího napětí je možné zkonstruovat fázorový diagram synchronního stroje pro ustálený stav (Fig. 2.2) podle následující rovnice (2.8). Předpoklad pro vytvoření Fig. 2.2 je zanedbání odporu statoru R_s a vlastní indukčnosti vinutí L_s

$$P_1 = mIU_f \cos \varphi = mIE_0 \sin \delta \quad (2.8)$$

$$E_0 = \sqrt{2}\pi k_w f N \phi \quad (2.9)$$

Kde I a U_f jsou vektory proudu a napětí, E_0 je indukované napětí počítané dle vztahu (2.9), φ je úhel mezi I a U_f , δ je zatěžovací úhel a k_w je činitel vinutí. Příkon je možné vypočítat v závislosti na požadované účinnosti η , výstupního výkonu P_N a účinníku stroje $\cos \varphi$ podle vztahu (2.10).

$$P_1 = \frac{P_N}{\eta} \quad (2.10)$$

Po dosazení vztahu (2.8) do vztahu (2.10) a vyjádření proudu I , dostáváme vztah pro výpočet jmenovitého proudu stroje (2.11) z fázové efektivní hodnoty napájecího napětí jedné fáze U_f .

$$I = \frac{P_N}{3 \cdot U_f \cdot \eta \cdot \cos \varphi} \quad (2.11)$$

Návrh stroje obvykle začíná pomocí rovnice (2.12), klasického návrhu geometrie stroje [1], kde D_i je vnitřní průměr statoru.

$$P_N = 0.5\pi^2 \cdot k_w \cdot B \cdot A \cdot D_i^2 \cdot l \cdot n \quad (2.12)$$

Ze zadaných hodnot magnetického B a lineární proudové hustoty A , hodnoty výkonu P_N a velikosti otáček stroje n je možné vypočítat hodnotu součinu $D_i^2 \cdot l$. Po úpravě je pak možné z poměru D_i / l jeden z rozměrů zvolit a druhý dopočítat. Podobným způsobem je řešeno dimenzování magnetů v [42], kde se vychází z výstupního koeficientu σ_p , (2.13). Po úpravě rovnice je možné získat součin $D_i^2 \cdot l$ v rovnici (2.14)

$$\sigma_p = \frac{P_N \cdot \varepsilon}{D_i^2 \cdot l \cdot n} = 0.5\pi^2 k_w A \cdot B \cdot \eta \cdot \cos \varphi \quad (2.13)$$

$$D_i^2 \cdot l = \frac{P_N \cdot \varepsilon}{\sigma_p n} \quad (2.14)$$

kde koeficient ε představuje, poměr mezi fázovou hodnotou indukovaného a napájecího napětí v závislosti na požadovaném výstupním výkonu P_N [42]. Lineární

proudová hustota A je definována jako proudová hustota kolem obvodu vzduchové mezery. Elektrické zatěžování je limitující faktor, který určuje velikost ztrát ve vinutí RI^2 a podílí se na tepelných poměrech ve stroji. Velikost se buď zvolí, provede se návrh stroje na zvolenou hodnotu A , a nebo je možné hodnotu ověřit pomocí vztahu (2.15) [42].

$$A = \frac{mNI}{\pi D_g} \quad (2.15)$$

Magnetické zatěžování (výpočet magnetické indukce) je definované jako střední hodnota magnetického toku rotoru a počítá se dle (2.16). V drážkovaných statorech a rotorech je hodnota magnetické indukce jednoho pólu limitována na hodnotu 1.6T vzhledem k magnetizačnímu proudu nebo ztrátám v železe.

$$\phi = B \cdot \frac{\pi D_g L}{2p} \quad (2.16)$$

Amplitudu magnetické indukce ve vzduchové mezeře B je možné odvodit na základě sycení v zubu B_t a poměrného čísla τ počítaného ze šířky zubu w_t ku drážkové rozteči τ_s , tedy $B_g = \tau B_t = \frac{w_t}{\tau_s} B_t$. Typická hodnota τ je 0.5 [42]. Elektromagnetický výkon ve vzduchové mezeře počítaný v (2.8) bude pak vlivem pohybu rotoru převeden na mechanický výkon $M \cdot \omega$, kde ω je úhlová rychlost otáčení hřídele stroje. Je tedy možné vypočítat velikost momentu M stroje z objemu rotoru V_r pomocí rovnice (2.17) [60].

$$TRV = \frac{M}{V_r} = \frac{M}{\frac{\pi D_g^2 L}{4}} = \frac{\pi}{\sqrt{2}} k_w AB \quad (2.17)$$

Hodnotu TRV (*torque per volume*) je možné získat z Tab. 2.1. Hodnota je úměrná součinu lineární proudové hustotě a magnetického zatěžování stroje (2.18). Například, $A = 20$ A/mm a $B = 0.5$ T bude hodnota TRV rovna 10 kN/m^3 . Vztah (2.17) je za podmínek, kdy je činitel vinutí $k_w = 0.95$, možné upravit a základní rozměr stroje vypočítat pomocí (2.18).

$$TRV \cong A \times B \quad (2.18)$$

Tab. 2.1: Typické hodnoty TRV [60]

Class of machine	TRV (kNm/m ³)
Small totally – enclosed motors (ferrite magnets)	7-14
Totally – enclosed motors (sintered Rare Earth or NdFeB magnets)	14-42
Totally – enclosed motors (Bonded NdFeB magnets)	20
Integral – hp industrial motors	7-30
High – performance servomotors	15-50
Aerospace machines	30-75
Large liquid – cooled machine (e.g. turbine – generator)	100-250

2.3 Návrh použitých magnetů

Pólová rozteč je počítána dle (2.19) pro požadovaný počet pólů z obvodu vnitřního průměru statoru $\pi \cdot D_i$.

$$\tau_p = \frac{\pi \cdot D_i}{2p} \quad (2.19)$$

Efektivní hodnota pólového krytí b_p je určena vztahem (2.20), kde $BetaM$ představuje poměrné využití plochy pólu.

$$b_p = BetaM \cdot \tau_p \quad (2.20)$$

Podle Balagurova, zmíněného v [25], je možné vypočítat celkový objem magnetů potřebných pro stroj a požadovaný výkon. Objem magnetů je tedy závislý na jmenovitém výkonu stroje P_N , napájecí frekvenci f , remanentní magnetické indukci B_r a koercitivní síle magnetu H_c . Koeficient C_v v rovnici (2.21) je možné vypočítat podle (2.22) a může nabývat hodnot 0,54 – 3,1 [42].

$$V_m = C_v \frac{P_N}{f \cdot B_r H_c} \quad (2.21)$$

$$C_v = \frac{2 \cdot k_{ocf} \cdot k_f \cdot k_{ad} \cdot (1 + \varepsilon)}{\pi^2 \xi} \quad (2.22)$$

Kde k_{ocf} je činitel přetížitelnosti (over-load capacity factor), k_f tvarový činitel (form factor), k_{ad} činitel reakce kotvy v d-ose (armature reaction factor in d-axis) a ξ je koeficient využití (coefficient of utilization), který může nabývat hodnot 0.3 - 0.7. Výpočet faktorů uvedených v tomto odstavci včetně detailního popisu je uveden v [42].

Výška magnetu kruhového tvaru h_m , je počítána v závislosti na poměrném využití plochy pólu $BetaM$, objemu magnetů V_m a délky stroje l podle rovnice (2.23). Ve vztahu (2.23) vystupuje součin $BetaM \cdot b_p$, který respektuje délku magnetu po jeho obvodu.

$$h_m = \frac{V_m}{2p \cdot BetaM \cdot b_p l} \quad (2.23)$$

Výška obdélníkového magnetu h_m je počítána z celkového objemu magnetu V_m , šířky magnetu b_p a délky rotoru l podle rovnice (2.24). V závislosti na segmentaci magnetů je pak délka l přepočítána na počet segmentů (magnetů) v axiální délce stroje. Obdélníkové magnety bývají většinou uloženy uvnitř rotoru.

$$h_{m1} = \frac{V_m}{2p \cdot b_p l} \quad (2.24)$$

2.4 Geometrie statoru

Vnější průměr statoru je možné vypočítat na základě poměru vnějšího průměru rotoru D_i (včetně vzduchové mezery) ku statoru D_o (split ratio) s_r , který může nabývat hodnot 0.3 – 0.7 [60]. Vnější průměr statoru je tedy možné vypočítat dle rovnice (2.25).

$$s_r = \frac{D_i}{D_o} \Rightarrow D_o = \frac{D_i}{s_r} \quad (2.25)$$

Výška statorového jha h_{bi} je možné vypočítat na základě rovnice (2.26), kde B_g je magnetická indukce ve vzduchové mezeře (obvykle se volí mezi 0.5 – 1T), B_{bi} je magnetická indukce jha stroje (hodnota se v prvním analytickém návrhu může pohybovat mezi 1 – 1.5T), D_i je vnitřní průměr statoru, respektive vnější průměr rotoru plus velikost vzduchové mezery a $2p$ počet pólů stroje, který zajistí, že veškeré siločáry projdou jhem statoru pro požadovanou magnetickou indukci.

$$h_{bi} = \frac{B_g \pi D_i}{2B_{bi} 2p} \quad (2.26)$$

Výška zubu je získána z vnějšího průměru statoru D_o , vnitřního průměru statoru D_i a tloušťky jha h_{bi} podle rovnice (2.27),

$$h_t = \frac{D_o - D_i}{2} - h_{bi} \quad (2.27)$$

Šířku zubu, pak v závislosti na požadovaném sycení magnetického obvodu naprázdno, je možné vypočítat dle (2.28). Šířka zubu dále závisí na počtu drážek Q a použitým magnetickým materiálem statorového plechu. Pokud je uvažována laminace statorových plechů, je axiální délka zubu menší jak délka rotoru. V případě mechanicky tvrdého materiálu plechů je axiální délka rotoru a statoru stejná a platí $l=l_t$ a vztah (2.28) bude zjednodušen, více v [23].

$$w_t = \frac{B_g \tau_s l}{B_t l_t} = \frac{B_g \pi D_i l}{B_t Q l_t} \quad (2.28)$$

Kde τ_s je drážkový krok. Objem použitého materiálu zubu statoru V_t a jha V_{bi} je možné vypočítat dle (2.29)

$$V_t = l \left(\frac{D_o - D_i}{2} - \frac{B_g \pi D_i}{2B_{bi} 2p} \right) \frac{B_g \pi D_i}{B_t} \quad (2.29)$$

$$V_{bi} = \pi l \left(\frac{D_o^2}{4} - \frac{(D_i + h_t)^2}{4} \right)$$

Počet drážek na statoru je daný vztahem (2.30), kde τ_s představuje drážkový krok (slot pitch). V závislosti na zvolené lineární proudové hustotě A , velikosti jmenovitého

proudu I a drážkovém kroku τ_s , je možné vypočítat potřebný počet závitů N vinutí stroje s PM dle (2.31).

$$Q = 2p \cdot m \cdot \tau_s \quad (2.30)$$

$$N = \frac{A \cdot p \cdot \tau_s}{\sqrt{2} \cdot m \cdot I} \quad (2.31)$$

2.5 Analytický návrh stroje s PM

Na základě vztahů (kapitola 2.2, 2.3 a 2.4) je možné vypočítat základní geometrii stroje pro požadované hodnoty. Příklad výpočtu je proveden pro stroj, jehož optimalizace je provedena v kapitole 6. Jedná se o stroj s PM na rotoru, který byl pro optimalizaci předložen, tedy byly známy všechny geometrické rozměry a parametry stroje včetně vinutí. Význam této kapitoly spočívá v aplikování analytického návrhu stroje (ověření hodnot geometrie původního stroje) a následného výpočtu MKP programu (SPEED Laboratory).

Tab. 2.2: Vstupní požadované parametry stroje, pro analytický návrh geometrie

Název	Symbol	Jednotka	Velikost	Poznámka
Výkon stroje	P_N	kW	16,9	
Jmenovité sdružené napájecí napětí	U_s	V	250	
Jmenovité otáčky	N	min ⁻¹	3000	
Maximální jmenovitá frekvence	f	Hz	400	
Požadovaný počet pólů	$2p$	-	10	
Požadovaná účinnost	η	%	95%	
Požadovaný účinník	$\cos\varphi$	-	0,96	
Materiál magnetů	-	SmCo	-	
Elektrické zatěžování	A	A/m	35000	
Magnetická indukce	B	T	0,6	
Koeficient ε	$\varepsilon = E_a/U_f$	-	0,95	Určeno [42]
Over load capacity factor	k_{ocf}	-	4	Určeno [42]
Coefficient of utilization of PM [45]	ξ	-	0,55	Určeno [42]
Počet vrstev vinutí	Vrstvy	-	2	
Počet drátů v jednoho vodiče	NSH	-	13	
Průměr drátu	d_{cu}	mm	0,675	
Počet drážek na pól a fázi	q	-	0,8	
Požadovaná magnetická indukce v zubu statoru	B_t	T	1,5	
Požadovaná magnetická indukce ve jhu statoru	B_{bi}	T	1,5	
Split ratio	s_r	-	0,6	
Předpokládaný činitel vinutí	k_w	-	0,95	

Vstupní požadované parametry stroje PMSM jsou definované v Tab. 2.2. Jedná se o prvotní přiblížení tomu, jak by stroj mohl vypadat. Zpřesnění dalších výpočtů je pak možné provést v programu, který řeší rozložení magnetického pole na základě metody

konečných prvků. Vstupní parametry byly převzaty z návrhu původního stroje, jehož návrh byl proveden a ověřen ve spolupráci s průmyslem.

Z požadovaného výkonu stroje, hodnoty účinnosti a účinníku je vypočítáný jmenovitý proud podle vztahu (2.11). Hodnoty účinnosti a účinníku pak mohou být dále upraveny podle potřeb při další iteraci a zpřesňování získaného řešení. Napájecí frekvence je po úpravě vypočítána pomocí vztahu (2.1) ze zadaného počtu pólů a požadovaných otáček stroje. Vnitřní průměr statoru je určen pomocí (2.14), kde se vycházelo ze zvolené hodnoty koeficientu $\varepsilon = 0,95$ dle [42], délky aktivní části svazku l , v prvním návrhu zvolené proudové hustoty $A = 35$ kA/m a zvoleného magnetického zatížení obvodu $B = 0,6$ T ve vzduchové mezeře. Na základě zvoleného poměrného pólového krytí $BetaM$ a koeficientů k_{fd} , k_f a k_{ad} odvozených a popsanych v literatuře [42] je vypočítáný koeficient C_v podle vztahu (2.22) a následně potřebný objem magnetu (2.21). Výpočet vinutí byl proveden pro dvouvrstvé vinutí ($Vrstvy$), s cívkovým krokem $y_q=1$ pro potřebný počet drážek na statoru (2.30).

Tab. 2.3: Sumarizace výsledků získaných pomocí analytického návrhu PM stroje

Název parametru	Symbol	Jednotka	Velikost	Č. rovnice	Originál
Efektivní jmenovitá hodnota proudu	I	A	42,79	(2.11)	48,08
Napájecí frekvence	f	Hz	250	(2.1)	250
Výstupní koeficient	σ_p	VAs/m ³	89785,77	(2.13)	-
Objem rotoru	$D_i^2 l$	m ³	0,0036	(2.14)	0,0031
Zvolená délka rotoru	l	mm	160,00		160
Vnitřní průměr statoru	D_i	mm	139,70		139,6
Pole pitch	τ_p	mm	43,89	(2.19)	43,89
Koeficient pólového krytí	$BetaM$	-	0,8833		0,8833
Efektivní hodnota pólové krytí	b_p	mm	38,77	(2.20)	-
Form factor pro PM na rotoru dle [45]	k_{fd}	-	1,00	dle [41]	-
Form factor pro budící pole	k_f	-	1,25	dle [41]	-
Faktor zahrnující reakci kotvy v d-ose	k_{ad}	-	0,80	dle [41]	-
Výstupní parametr pro návrh	C_v	-	2,87	(2.22)	-
Celkový objem všech magnetů	V_m	cm ³	231,28	(2.21)	372,8
Tloušťka magnetů [45]	h_m	mm	3,73	(2.23)	7
Počet závitů	N	-	42	(2.31)	31
Magnetický tok ve vzduchové mezeře	ϕ	Wb	0,00186	(2.16)	0,0049
Indukované napětí	E_0	V	143,86	(2.9)	118,03
Počet drážek statoru	Q	-	12,00	(2.30)	12
Slot pitch	τ_s	mm	36,57		36,55
Plocha vinutí	S_w	mm ²	393,57		288,42
Proudová hustota	J	A/mm ²	4,60		5,6
Vnější průměr statoru	D_o	mm	232,83	(2.25)	238
Tloušťka jha stroje	h_{bi}	mm	8,78	(2.26)	11
Výška zubu	h_t	mm	37,79	(2.27)	37,5
Šířka zubu	w_t	mm	14,63	(2.28)	21
Objem zubu	V_t	cm ³	1061,415	(2.29)	1134,762
Objem jha	V_{bi}	cm ³	2853,650		3176,727

Ze zvolené hodnoty lineární proudové hustoty (2.15) je následně vypočítaný počet závitů N dle (2.31), kde je vodič složen z NSH drátů a velikost indukovaného napětí (2.9). Vnější průměr statoru D_o je možné spočítat pomocí parametru split ratio $s_r = 0,6$, který byl před návrhem stroje zvolen podle [60]. Zbylé rozměry statoru, jako výška statorového jha (2.26), výška zubu (2.27) a šířka zubu (2.28), vycházejí ze vstupní podmínky, že magnetická indukce naprázdno v zubu a ve jhu je $B_t, B_{bi} = 1.5T$. Následně je možné proudové zatížení přepočítat pomocí vztahu (2.15) ze známé hodnoty jmenovitého proudu, počtu závitů a průměru vzduchové mezery D_g . Výstupní hodnoty z analytického návrhu jsou sumarizovány v Tab. 2.3 a rovněž porovnány s originálním návrhem původního stroje. Jednalo se pouze o výpočet základních parametrů předloženého stroje a jeho ověření pomocí analytických vztahů. Aby bylo dosaženo stejných výsledků, je nutné návrh několikrát opakovat. Nejvýznamnější kontrolované parametry byly D_i, h_m, D_o a J .

Počet závitů u originálního návrhu je $N = 31$, čemuž odpovídá tloušťka magnetu 7mm. U přepočítaného stroje je počet závitů $N = 42$, což odpovídá tloušťce magnetu 3,73mm stejného výkonu stroje. Návrh je spíše zaměřen na vyšší počet závitů a nižší tloušťku magnetů z hlediska jejich ceny a ztrátám, které v nich mohou vzniknout. Realizace je však opačná – snížit N a zvýšit h_m , a tím eliminovat značné ztráty v mědi a objemu neaktivních částí cívek (čel vinutí).

3 Optimalizační metody a jejich strategie

3.1 Klasifikace optimalizačních metod

Pro řešení optimalizačních úloh byla v posledních letech vyvinuta množina velmi efektivních a výkonných algoritmů. Tato množina nese název „evoluční algoritmy“, které jsou schopné řešit velmi složité soustavy efektivním a elegantním způsobem. Jedno z možných dělení optimalizačních algoritmů je uvedeno v [39] a zobrazeno na Fig. 3.1.

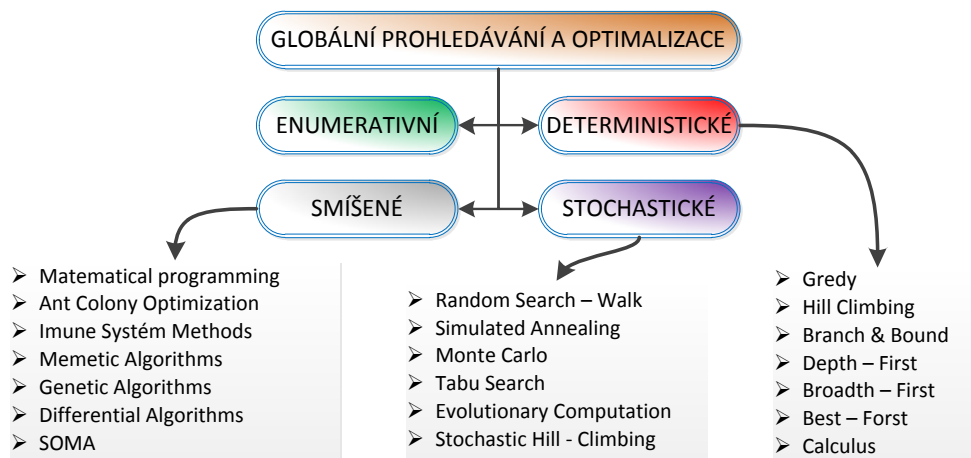


Fig. 3.1: Možné dělení optimalizačních strategií, [39]

Enumerativní

Jedná se o výpočet všech daných možných kombinací dané problematiky. Enumerativní přístup je vhodný pro problémy, u nichž jsou argumenty účelové funkce diskrétního charakteru, problémy které nabývají malého množství hodnot a zcela reálně by mohl potřebovat na úspěšné ukončení čas, který je delší nežli existence vesmíru.

Deterministické

Tato skupina algoritmů je postavena pouze na precizních metodách klasické matematiky. Algoritmy podávají efektivní výsledky jenom tedy, jsou-li známé předběžné předpoklady. Tyto předpoklady jsou nutnou podmínkou k úspěšnému vyřešení a obvykle s sebou nesou tyto informace:

- zda je problém lineární, zda je problém konvexní,
- prohledávaný prostor je malý, prohledávaný prostor je spojitý, účelová funkce má pouze jeden extrém, mezi parametry uvnitř účelové funkce nejsou nelineární interakce,
- dostupnost informace typu gradient atd., problém je definován v analytickém tvaru

Stochastické

Základním principem těchto algoritmů je využití náhody. V podstatě se jedná o čistě náhodné prohledávání prostoru a hledání hodnot argumentů účelové funkce s tím, že výsledkem je vždy to nejideálnější řešení, které bylo nalezeno během celého náhodného hledání.

Stochastické algoritmy mají tyto specifické vlastnosti: jsou pomalé, vhodné jen pro prohledávané prostory, kde se vyskytují možná řešení, prohledávané prostředí musí být malé, jsou vhodné pro hrubý odhad.

Smíšené

Ve smíšených algoritmech je zahrnuta směs metod deterministických a stochastických, které ve vzájemné spolupráci dosahují překvapivých výsledků. Dominantní postavení algoritmů tvoří skupina evolučních algoritmů. Tyto algoritmy se většinou vyznačují robustností - velmi často naleznou kvalitní řešení reprezentované většinou globálními extrémy, jsou efektivní a výkonné, díky malému počtu ohodnocení účelové funkce dokážou najít během procesu řešení, mají minimální, nebo žádné požadavky na předběžné informace, nepotřebují analytický popis problému a jsou schopny nalézt více řešení během jednoho spuštění.

3.2 Optimalizační metody

Čím více je parametrů popisující daný systém ve stroji, tím exponenciálně rostou jejich kombinace společných řešení a návrhář není schopen všechny propočítat, a tím si definovat svůj optimální návrh. Algoritmy umělé inteligence mají výhodu v tom, že na základě heuristických pravidel propočítávají jenom ty důležité kombinace parametrů vedoucích k optimálnímu řešení. Pravidla byla odvozena například na evolučním vývoji lidí (Genetický algoritmus), nebo na základě práce parametrů ve skupinkách například hledání potravy mravenců (Ant Colony), chování skupiny zvířat (PatternSearch), nebo vzájemném soutěžení parametrů ve skupinkách (SOMA), atd, dále v [12].

Uvážíme-li, že návrh celého stroje je spíše o iterativním způsobu (změna parametru výpočtového modelu a následné řešení) je umělá inteligence dobrý nástroj jak ušetřit čas návrháře.

3.2.1 Genetický algoritmus – GA

Genetický algoritmus (GA) je optimalizační algoritmus, který se pomocí potomků (z otce a matky), křížením nejlepších jedinců a jejich vzájemných mutací, řadí mezi nejnámější a nejpoužívanější robustní optimalizační algoritmy. Cílem algoritmu je prohledávat prostor možných řešení a nalézt globální optimum na základě daných zákonů a pravidel:

- Definovat optimalizované parametry do matice prvků zvané jako chromozomy. V tomto případě se jedná například o geometrii stroje, jehož parametry jsou definovány v určitém rozsahu.
- Vytvořit počáteční matici chromozomů. Jinými slovy se jedná o náhodně vygenerované parametry z předem definovaných rozsahů.
- Ohodnotit populační matici pomocí objectives a penalizačních funkcí a definovat tak nejhorší a nejlepší chromozomy populační matice.
- Následuje vytvoření potomků, tj. nových chromosomů z nejsilnějších chromosomů.
- Dále křížení
- Mutace

Proces je opakovaný tak dlouho, dokud nejsou splněny podmínky optimalizace.

3.2.2 Samo Organizující se Migrační Algoritmus – SOMA

Optimalizační algoritmus SOMA je založen na geometrickém principu. Metoda vznikla v roce 1999, autorem je Prof. Ivan Zelinka z univerzity Tomáše Bati ve Zlíně. Jako jeden z evolučních algoritmů pracuje s populací jedinců, kde se prostředí (prostor) kooperativně prohledává (migrací). Algoritmy, které se snaží nalézt globální extrém účelové – ohodnocovací funkce, lze rozdělit do několika strategií. Následující Fig. 3.2 tyto strategie popisuje.

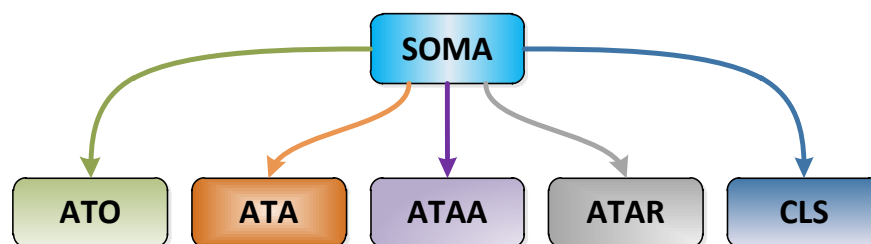


Fig. 3.2: Strategie optimalizačního algoritmu SOMA, [39]

Jednotlivé strategie mají význam:

ATO - AllToOne - všichni k jednomu

- Strategie založena na migraci populace k leaderovi mimo něj samotného.
- Jedná se o operativně-kooperativní chování nejchytřejších jedinců při řešení společného problému. V dalších odstavcích se budeme zabývat prvním případem strategie, Soma AllToOne (všichni k jednomu) [38], [39].

Popis strategie ATO se dá zjednodušeně demonstrovat na tomto elementárním příkladu. Jednotlivé kroky jsou rozděleny do fází, které vystihují podstatu procesu.

- V 1. fázi – „poznávání“, je celá populace tvořena jedinci, kteří mají informace o daném problému.
- V 2. fázi – „spolupráce“ si jedinci na své cestě (migraci) k určitým informacím vyměňují své získané informace o daném problému.
- V 3. fázi - „soutěžení“ se jedinci snaží nalézt nejlepší řešení problému. Jak si informace sdělují, tak zjistí, že nějaký jedinec našel vhodnější řešení než oni.
- Ostatní jedinci se tedy vydají v rámci „soutěžení“ k vedoucímu jedinci a snaží se zjistit (nalézt, vyhledat), jestli po cestě nenajdou ještě lepší řešení. Pokud nic nenajdou, cesta k optimální informaci se posiluje. Pokud najdou lepší řešení, opět si to sdělí a soutěž pokračuje.

ATA - AllToAll - všichni ke všem

ATAA - AllToAllAdaptive - všichni ke všem adaptivně (přizpůsobivě)

ATOR - AllToOneRand - všichni ke všem náhodně

CLS - Clusters - svazky (clusters), při pohybu jedinců se mohou svazky spojovat, nebo rozpadat

SOMA algoritmus se strategií All To One byla vybrána na základě úspěšně provedené optimalizace výkonového vibračního generátoru [47] a [48]. Tato metoda byla velice efektivně odzkoušená a otestovaná na optimalizaci vibračního generátoru, který slouží pro napájení senzorů. Jednalo se o kompletní optimalizaci, jak elektrického, tak i mechanického obvodu generátoru. SOMA strategie vykazovala schopnost rychlého nalezení globálního extrému a následně jemného dopočítávání konkrétních hledaných parametrů. Optimalizovaný systém byl složen z 22 hledaných parametrů, které byly popsány soustavou dynamických rovnic, více v kapitole 4.1.

3.2.3 Genetický algoritmus versus SOMA

SOMA algoritmus se řadí mezi robustní algoritmy. Jeho nejlepší vlastností je rychlá konvergence k pravděpodobnému globálnímu extrému na rozdíl od GA. Rychlejší konvergence (řešení získané během jedné jediné iterace) je způsobena vnitřním cyklem (Migration to the leader – perturbation -Fig. 3.4). Jedna iterace ke globálnímu extrému účelové funkce řeší $(popSize-1)$ $pertNumber$ pod-iterací, jinými slovy, vnořených vnitřních iterací. Kde výraz $(popSize-1)$ znamená velikost populační matice mimo nejsilnějšího jedince a výraz $pertNumber$ je počet perturbací pro dané migrační kolo. Například, velikost populační matice je $popSize = 11$ a velikost perturbačního vektoru je $pertNumber = 21$. Počet vnořených pod-iterací jedné iterace je roven 210.

Genetický algoritmus je dobře známý a proto je provedeno porovnání použitého algoritmu (SOMA se strategií AllToOne) s GA. Princip GA je zobrazen na Fig. 3.3.

Konvergence jedné iterace není tak úspěšná jak v případě SOMA, ale časově je výrazně lepší. Pro GA je nutné definovat hodně iterací například 1000 (SOMA pouze 20). U GA je nutné vygenerovat větší populační matici (100) pro zajištění úspěšnosti konvergence. V případě SOMA algoritmu je postačující velikost 10, protože vlivem vnořeného cyklu perturbací, je matice různými způsoby měněna a přepočítávána. Oba algoritmy jsou úspěšné při řešení úloh týkající se elektromechanického návrhu. Další možné porovnání je provedeno v literatuře,[49].

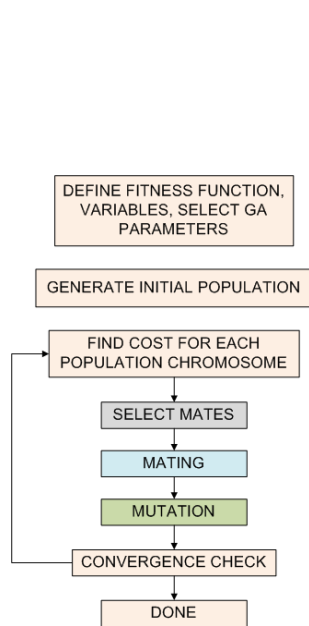


Fig. 3.3: Princip GA

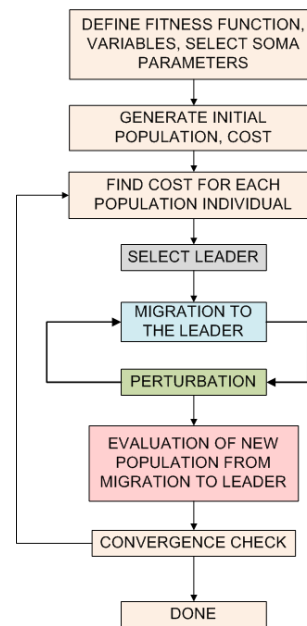


Fig. 3.4: Princip SOMA - AllToOne

3.3 Penalizační funkce

Aby bylo možné fyzikálně porovnávat různé veličiny definující účelovou funkci, jsou v optimalizaci definovány tzv. penalizační funkce. Tyto funkce jsou převodní funkce mezi požadovanou veličinou a veličinou bezrozměrnou. Převodem na bezrozměrnou veličinu je možné sledovat rozdíly mezi argumenty funkce neboli objective – rovnice (3.1) hodnota $8.89x^6$ představuje objective 1, $-33.74x^5$ objective 2, atd. Průběh této funkce je na programátorovi / návrháři elektrického stroje. Vždy záleží na tom, co se od požadované penalizační funkce (převodní křivky) očekává a jaký průběh by sledovaná veličina měla mít. Bylo vytvořeno několik penalizačních funkcí, které byly otestovány a z nich vybrány ty, které jsou „vhodné“ pro několik optimalizačních úloh.

Při tvorbě penalizačních funkcí je důležité mít na paměti dvě věci. První věc se týká strmosti křivky a druhá věc se týká tolerance v okolí nulové chyby popřípadě

100% chyby. Tyto aspekty jsou popsány níže na dvou příkladech penalizační funkce č. 1 (curve 1 - Fig. 3.5) a č. 2 (curve 2 - Fig. 3.5).

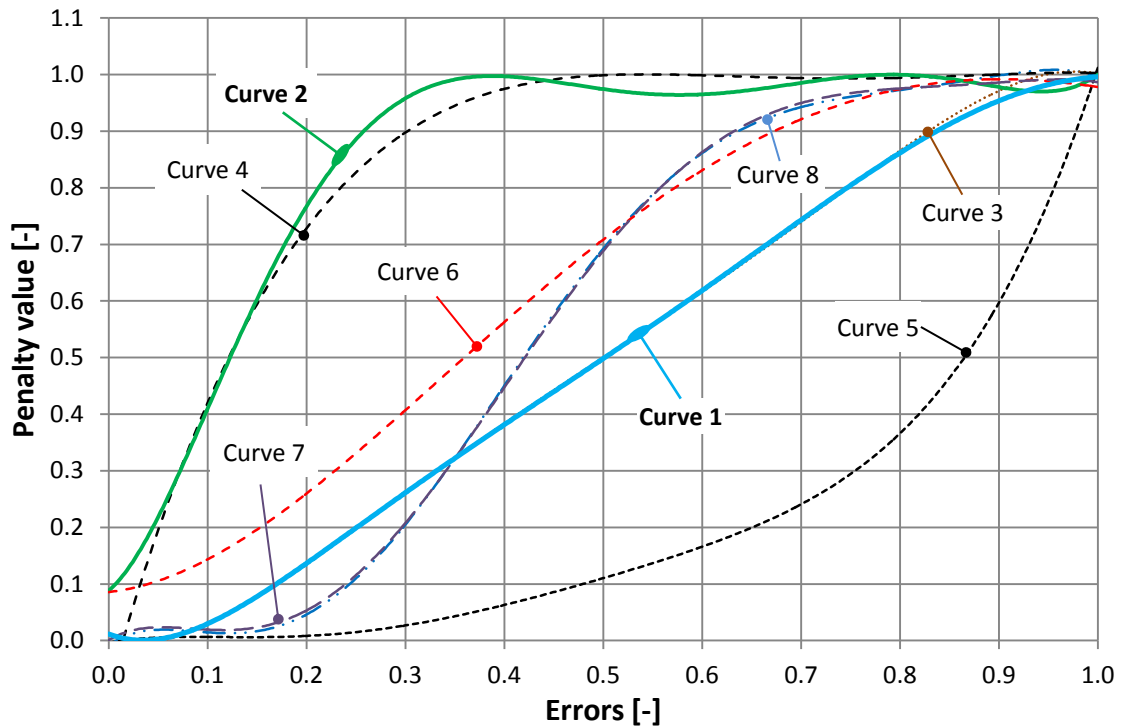


Fig. 3.5: Penalizační funkce

Průběh penalizační funkce č. 1 (curve 1 - Fig. 3.5) zajistí to, že plynulou změnou vypočítané chyby se mírně změní i hodnota penalty funkce. Rozsah penalty je od 0 do 1, stejně tak i rozsah chyby, která je penalizována. Přínosem funkce je to, že když chyba x požadované veličiny je nulová, je nulová i hodnota penalizační funkce $f_1(x)$. V opačném případě, kdy je rovna jedné, penalizační funkce je rovna jedné. Převodní křivka nemá charakter přímky, což je právě proto, že při dopočítávání, kdy se chyba přibližuje k nulovým hodnotám, se už hodnota penalizační funkce příliš nemění. Jinými slovy je tímto krokem zajištěna tolerance výsledku v určitém rozsahu například do 0,05 odchylky (už prostě nezáleží na tom, jestli je penalty 0 nebo 0.04). Rovnice, do které jsou chyby dosazovány je (3.1).

$$f_1(x) = 8.89x^6 - 33.75x^5 + 48.09x^4 - 33.03x^3 + 11.46x^2 - 0.68x + 0.01 \quad (3.1)$$

Penalizační funkce č. 2 (curve 2 - Fig. 3.5) je uvedena pro testování konvergence optimalizace k pravděpodobnému globálnímu extrému a porovnání získaných výsledků při změně parametrů, které mají na optimalizaci významný vliv. Charakter a průběh této penalizační funkce je zvolen proto, že při malé změně chyby x je očekávaná strmější změna penalizační hodnoty $f(x)_2$. Je to z toho důvodu, aby byla zohledněna citlivost výpočtu na danou velikost chyby. Dalším rysem je to, že chyba větší jak 0.35 bude mít

penalty vždy rovnu 1, což citlivost ještě více zdůrazňuje. Algoritmus by pak měl během výpočtu zjistit, že hrát si v konečném důsledku s touto chybou je efektivnější, než v případě penalizační funkce č. 1. Penalty funkce $f_2(x)$, do které je chyba x dosazována je uvedena v rovnici (3.2).

$$f_2(x) = 68.631x^6 - 220.76x^5 + 266.76x^4 - 144.88x^3 + 29.71x^2 + 1.4432x + 0.0884 \quad (3.2)$$

Další penalizační funkce je možné posoudit stejným způsobem jak funkce č. 1 a č. 2 na základě dvou aspektů zmíněných výše v práci (strmost, tolerance). Rovnice zbylých účelových funkcí jsou uvedeny níže, rovnice (3.3) - (3.8). Tabulka vypočítaných hodnot pro všechny zmíněné funkce je uvedena v příloze App. A. 1.

$$f_3(x) = -2 \cdot 10^{-8}x^6 - 8.5619x^5 + 24.405x^4 - 19.843x^3 + 8.36x^2 - 0.357x - 0.0014 \quad (3.3)$$

$$f_4(x) = -3.9714x^4 + 11.986x^3 - 13.192x^2 + 6.2676x - 0.087 \quad (3.4)$$

$$f_5(x) = -4.1671x^6 + 19.152x^5 - 26.33x^4 + 15.559x^3 - 3.521x^2 + 0.3234x - 0.0038 \quad (3.5)$$

$$f_6(x) = 1.9323x^4 - 5.733^3 + 4.5119x^2 + 0.181x + 0.0858 \quad (3.6)$$

$$f_7(x) = -42.435x^6 + 141.2x^5 - 172.22x^4 + 89.371x^3 - 15.973x^2 + 1.0469x + 0.0009 \quad (3.7)$$

$$f_8(x) = -52.122x^6 + 168.88x^5 - 201.28x^4 + 103.05x^3 - 18.784x^2 + 1.2666x - 0.0089 \quad (3.8)$$

3.4 Účelové funkce

Účelové funkce jsou funkce, kde se kombinací váhových koeficientů, penalizovaných objectives, vyhledávají extrémy právě této funkce. Účelová funkce je jeden z klíčových bodů definice podmínek optimalizace, protože je tvořena z argumentů, které popisují optimalizovaný stroj (objectives). Funkce může nabývat různých hodnot (*CostValues*). Podle toho, z kolika objectives je účelová funkce složena, se definuje komplexnost optimalizace.

Hodnotu účelové funkce (*CostValues*) je nutné počítat při každé změně optimalizovaných parametrů a to z toho důvodu, že rychlost konvergence, komplexnost optimalizované úlohy a přesnost výpočtu ovlivňují získané výsledky a podílí se na globálním extrému účelové funkce. Při řešení optimalizace je proto nutné věnovat pozornost definici účelové funkce a jejímu testování, například změnou váhových koeficientů, změnou penalizačních funkcí, přidávání a ubírání objectives, apod. Příklad účelové funkce složené z i -objectives je uveden v rovnici (3.9).

$$CostValues = \sum_{i=1}^n c_i \cdot objective_i \quad (3.9)$$

Hodnoty, které se nastavují pomocí váhových koeficientů c_1 , c_2 , c_3 a c_4 jsou voleny před zahájením iterací (konvergencí) k požadovanému globálnímu extrému. Vyhledávání minima účelové funkce je prováděno podle následujícího předpisu (3.10).

$$CostValues(x) \leq CostValues(x_0) \quad (3.10)$$

Matematická definice lokálních extrémů (minima a maxima) a dále globálních extrémů funkce je vysvětlena v [39]. Obecně je tedy účelová funkce geometrický problém, v jehož rámci se hledají extrémy v $N+1$ rozměrném prostoru. Počet dimenzí N je dán počtem optimalizovaných argumentů (objectives). V případě prediktivního řízení je možné účelovou funkci sestavit ve tvaru (3.11).

$$J(N_1, N_2, N_u) = \sum_{j=N_1}^{N_2} [y(k+j) - w(k+j)]^2 + \sum_{j=1}^{N_u} \lambda(j) [\Delta u(k+j-1_{vs})]^2 \quad (3.11)$$

V této účelové funkci mají jednotlivé symboly význam:

N_1 – minimální predikční horizont

N_2 – maximální predikční horizont

N_u – řídicí horizont

u – akční veličina

y – výstup ze systému

l_{vs} – váha pro rozdíly v sekvenci řídicích zásahů

k – aktuální pozice na časové ose

j – počet kroků do budoucnosti

Argumenty účelové funkce (objectives) by měly být definovány tak, aby jejich hodnota snižovala celkovou hodnotu účelové funkce. Argument definovaný dle předpisu (3.12) zajistí, že při zvyšování hodnoty (*power*) bude hodnota funkce snižována. Hodnota je vztažena na referenční hodnotu *ref_power*, která je definována před optimalizací. Hodnota *ref_power* by měla být volena s ohledem na to, aby poměr *power/ref_power* nebyl větší jak 1. Výsledný vztah pak udává, že při zvyšujícím se výkonu stroje se snižuje hodnota *objective_x*.

$$objective_x = abs\left(1 - \frac{power}{ref_power}\right) \quad (3.12)$$

Pokud se jedná o minimalizaci nějaké hodnoty (v tomto případě opět výkonu) například teploty nebo ceny stroje, je možné vytvořit argument ohodnocovací funkce předpisem (3.13). V samostatném návrhu stroje pak bude kladen důraz na to, aby byla hodnota *objective_y* minimalizována, tedy i výstupní výkon *power*.

$$objective_y = \frac{power}{ref_power} \quad (3.13)$$

V případě, kdy je během optimalizace vytvořen požadavek na zachování konstantní hodnoty nebo návrh na požadovanou hodnotu výkonu, je možné argument definovat dle předpisu (3.14), kde *desired_power* je požadovaná hodnota výkonu. Během optimalizace jsou pak parametry měněny tak, aby zlomky *desired_power/ref_power* a *power/ref_power* měly stejnou hodnotu. Tím bude zajištěno, že hodnota *objective_z* bude minimalizována.

$$objective_z = abs\left(\frac{desired_power}{ref_power} - \frac{power}{ref_power}\right) \quad (3.14)$$

Argumenty účelové funkce jsou pak v následujících kapitolách tvořeny způsobem popsaným rovnicemi (3.12), (3.13) a (3.14).

3.5 Výběr vhodné metody pro optimalizace strojů s PM

Vzhledem k rozsáhlému testování, který ze zmíněných algoritmů je vhodnější, popřípadě jeho strategie, jsou optimalizace provedeny na analytickém modelu synchronního stroje s PM vnořených v rotoru. Strategie algoritmů jsou opakovaně spouštěny s jinými vstupními podmínkami, čímž bude ověřena konvergence ke globálnímu extrému účelové funkce. Dále bude laborováno s tvarem účelové funkce a hodnotami jejich argumentů. Kapitola má velký význam obzvláště v pochopení toho, jak algoritmy pracují, jaké jsou potřeba nastavit podmínky, apod. Výběr vhodné metody později ovlivní to, jak bude v rozšířené optimalizaci postupováno.

Je vytvořen analytický model stroje s permanentními magnety vnořených do rotoru. Předpokládejme, že geometrie statoru se v průběhu celé optimalizace nemění, pozornost je věnována základním rozměrům magnetů a hloubce uložení magnetů v rotoru. Model stroje je vytvořen v programu SPEED Laboratory a struktura optimalizace vytvořena v programu MATLAB. Vstupní parametry určené k optimalizaci budou měněny tak, aby bylo dosaženo požadovaného momentu stroje na hřídeli M_R , maximální účinnosti stroje η , napětí při minimální hodnotě proudu I vinutím. Tato zdánlivě jednoduchá analytická optimalizace s sebou nese několik důležitých faktů, které budou zmíněny níže v této kapitole.

Parametry, popisující stroj, jsou uvedeny na Fig. 3.6 a popsány níže:

- WEB, který definuje nejmenší vzdálenost mezi sousedními póly stroje,
- BRIDGE, který určuje radiální vzdálenost konce pólu a vnějším průměrem rotoru v nejužším místě,

- I, jmenovitá hodnota proudu stroje.

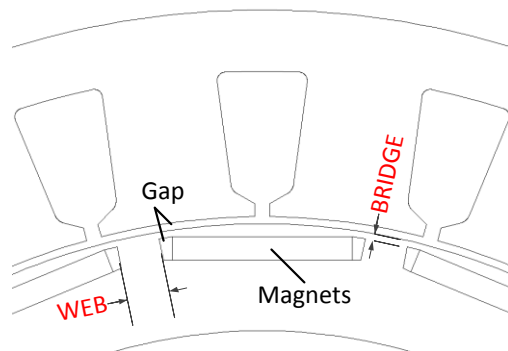


Fig. 3.6: Parametry WEB a BRIDGE u analyzovaného experimentálního vzorku

Aplikované algoritmy, popsané v kapitole 3.2, budou použity ve dvou případech, test č. 1 a test č. 2. Účelové funkce jsou tedy definovány v rovnicích v prvním testu (3.15) a ve druhém (3.16).

$$CostValue_1 = 35|M_C - M_R| + 0.1I + 10|U_{sC} - U_s| \quad (3.15)$$

$$CostValue_2 = 2\left|\frac{M_C}{M_{MAX}} - \frac{M_R}{M_{MAX}}\right| + 1\frac{I}{I_{MAX}} + 2\left|\frac{U_{sC}}{U_{MAX}} - \frac{U_s}{U_{MAX}}\right| \quad (3.16)$$

Kde samostatné symboly M představují moment stroje v jednom migračním kole, U napětí a I proud. Význam jednotlivých indexů je následující: C – počítaný, R – požadovaný, MAX - maximální a s – sdružená hodnota. V prvním testu se bude na problém pohlížet jako na matematickou lineární úlohu, tj. argumenty účelové funkce budou tak definovány. Ve druhém testu se na problém bude přihlížet jako na matematicky nelineární problém a argumenty budou pozměněny oproti prvnímu testu. Čísla uvedená u jednotlivých argumentů jsou brána jako váhové koeficienty určující prioritu optimalizace, která je určována od nejvyššího po nejnižší číslo.

U rovnice č. (3.15) jsou váhové koeficienty voleny tak, aby v konečném důsledku nevycházela účelová funkce jako vysoké číslo. Tento způsob zadávání argumentů do účelové funkce není příliš praktický, protože vyžaduje potřebné znalosti o úloze. Váhové koeficienty byly v tomto případě stanoveny v prvním kroku náhodně a dále byly upravovány tak, aby například ve druhé iteraci nedominoval první argument účelové funkce. Mohlo by se stát, že by algoritmus pak uvízl někde v lokálním extrému chybou špatného určení vah a definování argumentů funkce.

Ve druhém případě rovnice (3.16), jsou hodnoty převedeny do poměrných veličin a je tedy možné lépe určovat priority optimalizace. Převod argumentů do poměrných veličin má velkou výhodu v tom, že už při vytvoření optimalizační úlohy je zřejmé, který argument bude dominovat a který ne.

Hodnoty sumarizované v Tab. 3.1 a Tab. 3.2 byly vypočítány tak, že se pro každý algoritmus proces opakoval 4x a výsledky se porovnal na základě konvergence účelové funkce k minimu. Pokud je algoritmus dobře vytvořený (myšleno účelová funkce, správně definované vstupní parametry a omezující podmínky) měly by vstupní parametry mít stejnou nebo alespoň podobnou hodnotu. V tomto případě by při opakovaném spuštění bylo nalezeno vždy stejné řešení. Výsledky z analytické optimalizace prvního testu (3.15) jsou sumarizovány v Tab. 3.1 pro všechny zmíněné algoritmy GA, ATO, ATA a ATAR. Pro každý algoritmus jsou v příslušné tabulce podbarvené hodnoty s nejnižší hodnotou účelové funkce. Výsledkem tohoto experimentu je to, že konvergence ke stejné hodnotě účelové funkce je do jisté míry splněna a optimalizované parametry s výjimkou parametru *WEB* mají alespoň podobné hodnoty. Kdyby byly váhové koeficienty lépe definovány, je teoreticky možné, že by optimalizace byla přesnější. Hodnoty účelových funkcí nabývají velkých rozměrů, což je způsobeno volbou argumentů právě této funkce.

Tab. 3.1: Získané výsledky analytické optimalizace test č. 1

Methods	extreme	fitness	WEB	BRIDGE	GAP	I	η	M_c	U_s
	[-]	[-]	[mm]	[mm]	[mm]	[A]	[%]	[Nm]	[V]
GA	1	69,503	6,156	1,322	2,376	665,837	93,206	700,003	388,009
	2	69,189	5,840	1,380	2,344	667,008	93,185	700,043	388,192
	3	68,324	6,488	1,321	2,446	671,993	93,094	699,993	388,202
	4	68,221	6,222	1,386	2,434	675,481	93,031	699,995	388,239
ATO	1	66,221	5,819	1,339	2,307	660,835	93,296	700,000	388,275
	2	66,581	5,633	1,396	2,306	664,704	93,227	700,003	388,289
	3	67,506	6,057	1,408	2,412	675,051	93,039	700,000	388,289
	4	67,552	6,058	1,407	2,413	675,055	93,040	700,001	388,290
ATA	1	65,649	5,427	1,362	2,239	656,315	93,376	700,000	388,287
	2	66,894	6,074	1,333	2,359	665,112	93,219	700,010	388,284
	3	67,472	5,467	1,342	2,237	654,858	93,402	700,006	388,110
	4	67,704	5,827	1,376	2,337	666,117	93,201	700,004	388,193
ATAR	1	67,051	5,555	1,326	2,244	654,359	93,411	700,001	388,130
	2	66,324	5,991	1,326	2,336	662,545	93,265	700,000	388,283
	3	66,643	5,686	1,370	2,300	662,374	93,268	700,012	388,289
	4	67,028	6,236	1,301	2,373	664,118	93,237	700,006	388,249

Získané hodnoty z analytické optimalizace druhého testu (3.16) jsou sumarizovány v Tab. 3.2. Nejnižší hodnota účelové funkce je rovněž podbarvena. V případě algoritmu SOMA se strategií ATO, bylo při každém opakování procesu nalezeno stejné řešení. Dalo by se říci, že i v případě strategie ATAR. V porovnání s prvním testem je získané

řešení druhého testu přesnější i pro opakování příslušné úlohy. Je tedy zřejmé, že změna argumentů účelové funkce významně ovlivní výsledky optimalizace.

Tab. 3.2: Získané výsledky analytické optimalizace test č. 2

Methods	extreme	fitness	WEB	BRIDGE	GAP	I	η	M_C	U_{sC}
	[-]	[-]	[mm]	[mm]	[mm]	[A]	[%]	[Nm]	[V]
GA	1	0,952	5,892	1,363	2,304	661,446	93,277	699,133	389,496
	2	0,938	5,434	1,355	2,217	653,603	93,422	699,697	389,053
	3	0,927	5,276	1,323	2,171	647,510	93,532	699,926	388,811
	4	1,007	6,666	1,482	2,648	702,165	92,545	702,165	387,918
ATO	1	0,920	5,004	1,302	2,143	643,715	93,598	699,983	386,781
	2	0,920	5,024	1,301	2,144	643,463	93,601	699,697	386,751
	3	0,920	5,006	1,300	2,131	641,644	93,627	699,027	386,875
	4	0,920	5,000	1,305	2,135	641,987	93,610	699,031	386,751
ATA	1	0,937	5,186	1,300	1,979	607,938	94,033	676,771	386,173
	2	0,924	5,095	1,300	2,106	635,616	93,699	694,954	387,138
	3	0,930	5,255	1,301	2,090	628,655	93,771	688,825	386,636
	4	0,930	5,220	1,301	2,090	628,655	93,772	688,826	386,637
ATAR	1	0,922	5,018	1,307	2,152	644,878	93,578	700,010	386,616
	2	0,919	5,004	1,300	2,143	643,569	93,601	700,004	386,732
	3	0,919	5,000	1,300	2,141	643,379	93,604	699,964	386,762
	4	0,919	5,001	1,302	2,143	643,401	93,601	700,001	386,721

Tab. 3.3: Porovnání doby trvání jedné iterace a jednoho výpočtu předložených algoritmů

One iteration / strategy						
STRATEGY	TIME	REPEAT1	REPEAT2	REPEAT3	REPEAT4	NOTE
All2One	t(min)	1,86	1,83	1,81	1,79	Mig =15, PopSize = 10
GA	t(min)	3,36	3,42	3,63	3,88	Mig = 50, PopSize = 20
All2All	t(min)	4,34	4,33	4,37	4,41	Mig = 15, PopSize = 5
All2AllRand	t(min)	4,47	4,48	5,30	4,49	Mig = 15, PopSize = 5
One calculation / strategy						
STRATEGY	TIME	REPEAT1	REPEAT2	REPEAT3	REPEAT4	NOTE
All2One	t(s)	7,45	7,33	7,26	7,15	PopSize = 10
GA	t(s)	4,03	4,11	4,36	4,66	PopSize = 20
All2All	t(s)	17,36	17,31	17,49	17,66	PopSize = 5
All2AllRand	t(s)	17,90	17,92	21,22	17,96	PopSize = 5

Při řešení dalších optimalizačních úloh budou argumenty účelové funkce vždy

tvořeny tak, jak uvádí rovnice (3.16), protože by měla být zajištěna konvergence algoritmů ke stejnému řešení tohoto typu úlohy. Vzhledem k rychlosti výpočtu analytické optimalizace budou vždy uvažovány algoritmy GA a SOMA se strategií ATA.

Doba trvání jedné iterace optimalizace příslušné úlohy je uvedena v Tab. 3.3 pro všechny uvedené výpočty. V tabulce jsou uvedené dva hlavní nahledy, kterými je možné rychlost výpočtu posoudit. Největší význam posouzení, který algoritmus je časově více či méně náročnější, je přepočítání doby jedné iterace algoritmu na dobu výpočtu jedné simulace. V tomto případě je rychlejší GA a jako další strategie ATA algoritmu SOMA.

4 Ověření optimalizačních metod na funkčních prototypch

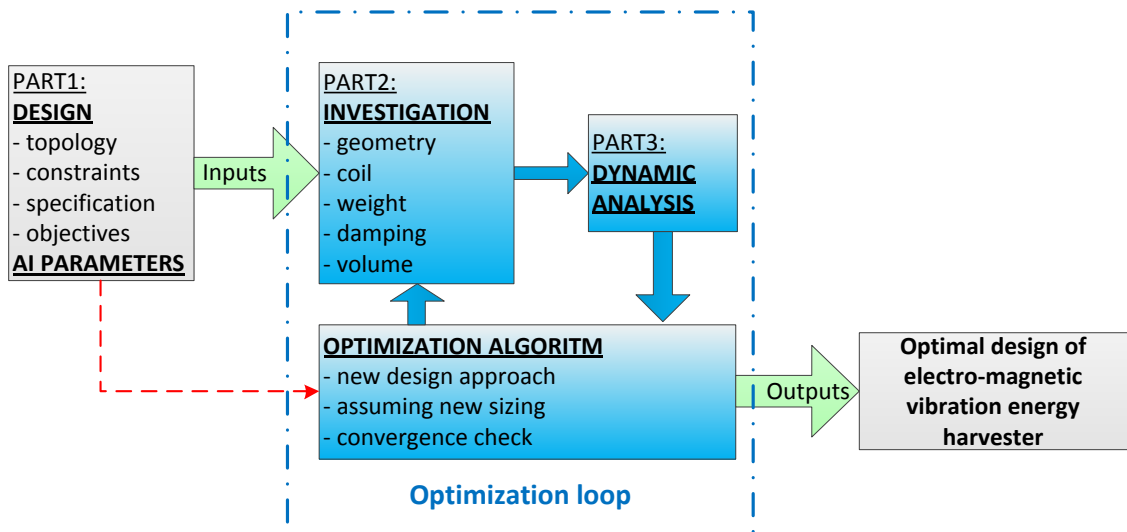
Ověření toho, zda je algoritmus v optimalizaci úspěšný či nikoliv, zda je ověřen „teorém“, je pečlivě provedeno na dvou optimalizačních úlohách. V kapitole 4.1 je provedena optimalizace speciálního vibračního synchronního stroje s permanentními magnety (Vibrační Generátor – VG). VG byl vyvíjen pod Evropským projektem WISE ve spolupráci s ÚMTMB Fakulty strojní VUT v Brně. Optimalizace je zaměřena na celkovou minimalizaci objemu VG při zachování nebo zlepšení provozních parametrů. Měření vyrobeného funkčního optimalizovaného vzorku a popis a aplikace použitých algoritmů jsou prezentovány v časopise *Microsystem Technologies* 2012 [49].

V kapitole 4.2 je provedena optimalizace synchronního stroje s PM na rotoru se zaměřením na změnu materiálu použitých magnetů. Cílem bylo zachovat vnější rozměry stroje, požadované provozní parametry stroje s novým typem magnetů. Praktické ověření optimalizace bylo provedeno na vyrobeném prototypu OSM_6000 ve spolupráci s průmyslem [58].

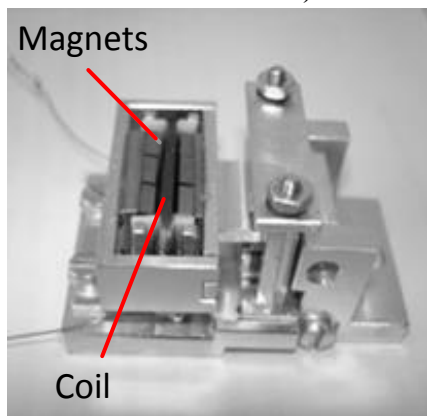
4.1 Speciální stroj s PM – vibrační generátor

Byl vyroben optimalizovaný funkční vzorek, který byl prakticky ověřený měřením, a získané hodnoty byly porovnané se získanými hodnotami z optimalizace. Analýza mechanického obvodu generátoru a návrh elektrického obvodu VG byl prezentovaný na konferencích. Odvození rovnic a tím i 22 parametrů mechanického a elektrického obvodu bylo za určitých podmínek řešeno a publikováno na konferencích MECHATRONICS 2009 [46] a s nově definovanou účelovou funkcí na konferenci LVEM 2009 [48]. Zpřesnění mechanického výpočtu a testování dalších účelových funkcí optimalizace byly prezentovány na mezinárodní konferenci MENDEL 2010 [44], kde byly stanoveny nové omezující podmínky. Úspěšnost použité optimalizační metody a její aplikace byla oceněna v soutěži EEICT 2010 [47], dále pak v soutěži nadace ČEZ.

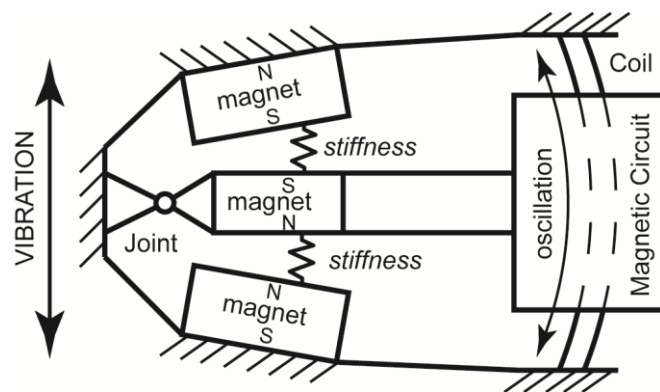
Praktické ověření optimalizačních metod SOMA se strategií ATO a GA, užití účelové funkce a návrhy mechanického a elektrického obvodu jsou provedeny na vyrobeném funkčním vzorku (Fig. 4.1 b) a publikovány v časopise *Microsystem Technologies* 2012 [49]. Hlavním cílem optimalizace bylo optimálně navrhnout VG na minimální celkový objem s maximálním možným vyprodukovaným výkonem pro zátěž 3500Ω a zrychlení vibrací 0,1g. Dále navržený VG pomocí ATO a GA porovnat s měřením na vyrobeném vzorku. Jednotlivé návrhy pomocí algoritmů byly opakovány celkem 5x a zjištěna tak konvergence do jednoho extrému účelové funkce. Konvergence byla potvrzena a vhodnost použitých metod byla rovněž potvrzena.



a) Struktura návrhu VG a optimalizační smyčka



b) Funkční vzorek [49]



c) Mechatronický obvod [49]

Fig. 4.1: Návrh a optimalizace VG

VG představuje systém, kde soustava magnetů na nosné pohyblivé části kmitá kolem elektrického vinutí (stacionární část) a indukuje v něm napětí Fig. 4.1 b). VG je složen z mechanické části, která má za úkol usměrnit vibrační náhodný pohyb do kmitání masy s jedním stupněm volnosti a části elektromagnetické, která z mechanické energie vyrábí energii elektrickou Fig. 4.1 c) pomocí magnetů a cívky. Oba obvody jsou propojeny zpětnou vazbou, která je reprezentována především elektrickým a mechanickým tlumením. Elektrické tlumení je způsobeno silami, které vznikají mezi vodičem protékáným proudem (v závislosti na indukovaném napětí, velikosti odporu vinutí a velikosti odporu připojené zátěže) a magnetickým polem magnetů. Elektrické tlumení uvnitř generátoru je závislé na uspořádání magnetického obvodu, velikosti odporu vinutí a odporu zátěže. Mechanické tlumení je reprezentované třením o vzduch a třením v ložisku [49].

Návrh stroje, struktura a smyčka optimalizace je vysvětlena na Fig. 4.1 a). Myšlenka je taková, že po matematickém odvození rovnic a specifikaci optimalizačních

podmínek je vytvořen analytický model (Part1). Analytický model je reprezentovaný dynamickými rovnicemi a to pohybovými a elektrickými. Optimalizované parametry (geometrie stroje) a vstupní parametry (vibrace – zrychlení, požadovaná zátěž) tvoří vstupy do dynamického modelu, který bude vyšetřovaný (Part2). Následuje řešení dynamických rovnic v časové oblasti, po ustálení obvodu jsou výstupní hodnoty (výchylka, výstupní výkon, indukované napětí a tlumení v elektrickém a mechanickém obvodu) vyhodnoceny pomocí optimalizačního algoritmu. Na základě získaných výsledků je provedena změna vstupních parametrů a proces opakovaný v tzv. optimalizační smyčce. Optimalizace bude ukončena buď na základě předem definovaném počtu iterací, nebo na základě opakujících se několika po sobě jdoucích hodnot účelové funkce.

Změřené hodnoty výstupního výkonu a výstupního napětí optimalizovaného VG jsou uvedeny na Fig. 4.2 a) a Fig. 4.2 b).

Výstupní výkon VG byl měřený pro různé zrychlení 0.1g – 0.5g (Fig. 4.2 a). Optimalizace byla provedena pro pracovní bod 3,5kΩ a 0.1g zrychlení vibrací. Výstupní výkon optimalizovaného VG (funkční vzorek) byl v pracovním bodě naměřen 7,725W. Vypočítaný výkon VG je 7,64mW v případě ATO algoritmu a 7,28mW v případě GA. Chyba výpočtu tedy byla 1,11% ATO algoritmus a 6,11% GA. Obě chyby jsou v toleranci mezi vypočtenými a naměřenými hodnotami do 10%. Chyba v případě algoritmu GA je velká, způsobená počtem 50 iterací. Aby se výsledek alespoň přiblížil výsledkům algoritmu ATO, je zapotřebí počet iterací zvýšit minimálně na hodnotu 100 iterací. Pro vyhodnocení, zda jsou algoritmy úspěšné, postačí počet iterací 50. V případě GA se jedná pouze o porovnání hodnot za stejných podmínek. Na modelu, který byl optimalizován pro pracovní bod, byla provedena simulace v jeho okolí. Je možné si všimnout, že hodnoty blízké okolí pracovního bodu jsou oproti naměřeným hodnotám odlišné. Může to být způsobeno tím, že v dynamickém modelu nejsou respektovány rozptylové indukčnosti magnetického obvodu, nebo to, že magnetická indukce ve vzduchové mezeře je počítaná na základě geometrických rozměrů analyticky. Hodnota magnetické indukce byla totiž ověřena MKP pouze pro pracovní bod.

Změřené a vypočítané optimalizované hodnoty výstupního napětí generátoru je možné porovnat na Fig. 4.2 b. I v tomto případě ověření úspěšnosti optimalizačních algoritmů bylo dosaženo maximální chyby výpočtu 0,5% ATO a 2,29% GA. Hodnoty jsou opět porovnány pro pracovní bod VG. V okolí pracovního bodu byla provedena rovněž simulace optimalizovaného modelu. Odchytky jsou různé, vzhledem k problémům, popsaných výše v textu. Důležitá hodnota je pracovní bod a pro ten je odchylka minimální.

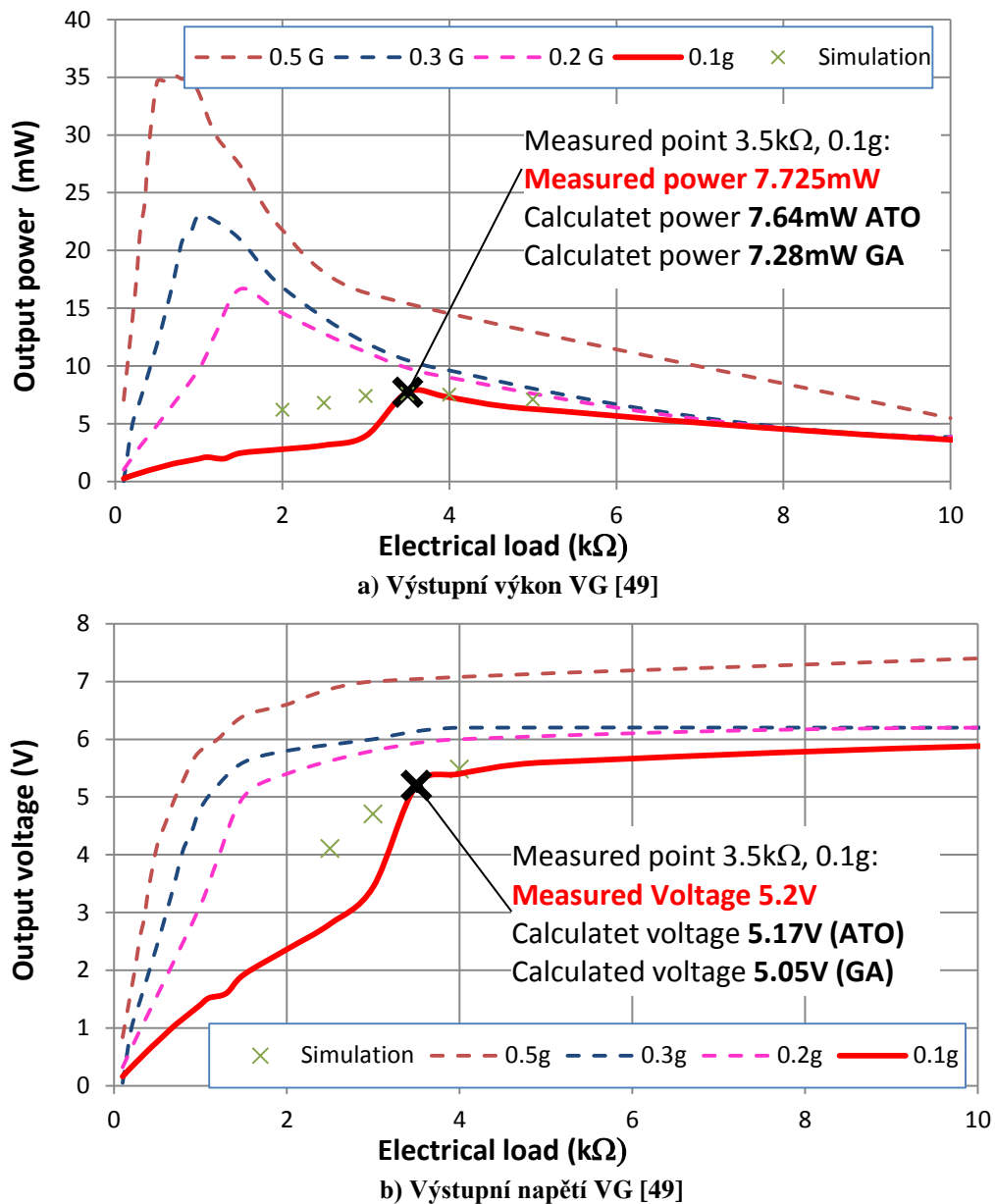
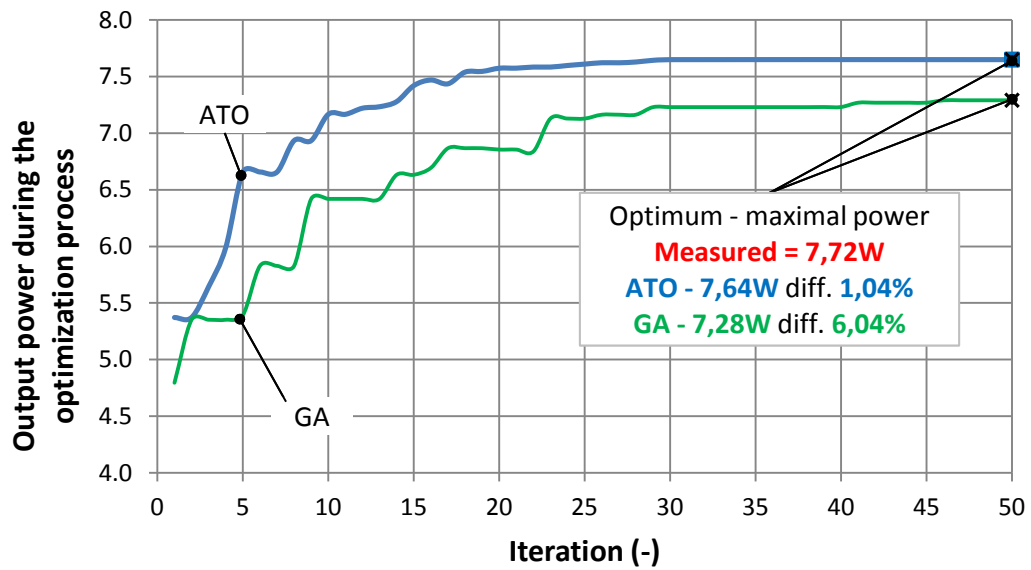
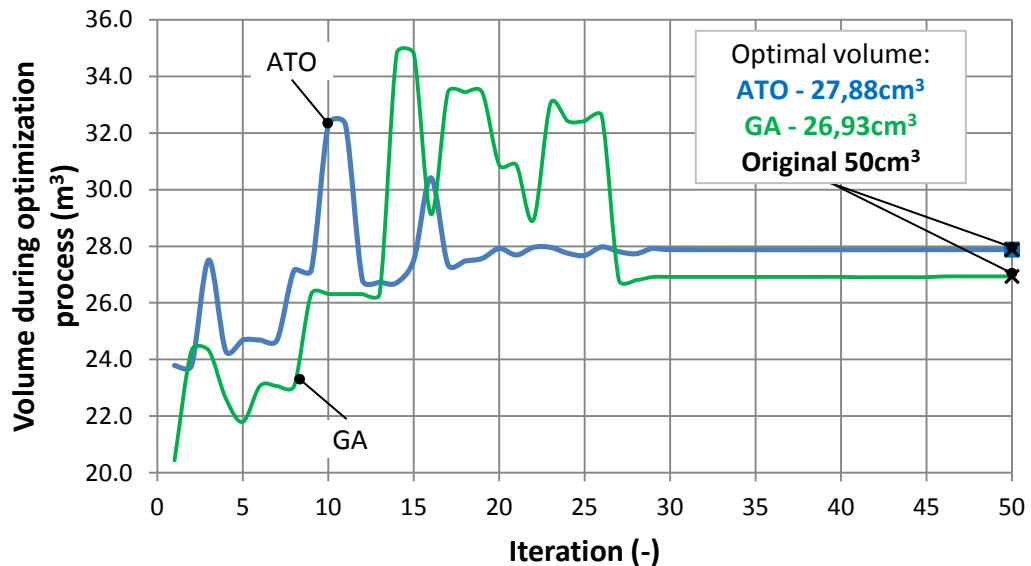


Fig. 4.2: Změřené hodnoty VG, porovnání se získanými hodnotami v pracovním bodě.

Průběhy sledovaných parametrů během optimalizace jsou zobrazeny na Fig. 4.3. Jedná se o výstupní výkon a celkový objem VG pro případ optimalizace pomocí ATO strategie a GA. Vypočítané hodnoty obou algoritmů jsou vyneseny do společného grafu vždy pro daný parametr a iterační krok. Například hodnota celkového objemu v 15. iteraci je přibližně 35cm^3 , výkon generovaný z tohoto objemu je přibližně $7,4\text{mW}$. Dalo by se říci, že výkon už je skoro optimální ($7,72\text{mW}$) a je nalezeno optimum, ale pouze lokální, protože algoritmus našel vhodnější geometrii pro vyšší hodnotu výkonu a nižší objem v 50. iteraci (globální - Fig. 4.3 b).



a) Průběh získaného výstupního výkonu optimalizační strategie ATO a GA [49]



b) Průběh získaného výstupního napětí optimalizační strategie ATO a GA [49]

Fig. 4.3: Průběh vypočítaných hodnot během optimalizačního procesu s vyznačeným optimem

Podrobný návrh elektrické části je proveden v [53], kde pozornost byla věnována vinutí VG. Bylo zjištěno, že parametry vinutí významným způsobem ovlivňují elektrické tlumení hlavně zvoleným průměrem použitého drátu, počtem závitů a délkou aktivní části cívky. V případě elektrického tlumení je tedy sledovaný parametr elektrický odpor cívky v závislosti na elektrickém tlumení generátoru. Elektrický odpor nebyl zahrnut, stejně tak ani tlumení generátoru v podmínkách optimalizace. Jinými slovy, parametr byl ponechán volný a jeho hodnoty byly vždy vypočítány v závislosti na aktuální geometrii. Důsledkem analýzy získaných výsledků byl algoritmus tak efektivní, že se snažil elektrické tlumení minimalizovat nebo navrhnout alespoň na stejnou hodnotu mechanického tlumení. Elektrické tlumení je totiž spjato nejen

s indukovaným napětím, ale i s výchylkou magnetické části generátoru. Pokud bude tlumení generátoru velké, nebude dostatečná výchylka magnetické části a tím dostatečná hodnota indukovaného napětí, potřebného po odečtení ztrát pro připojenou zátěž. Průběhy elektrického tlumení a výstupní výchylky magnetické části jsou zobrazeny na Fig. 4.4

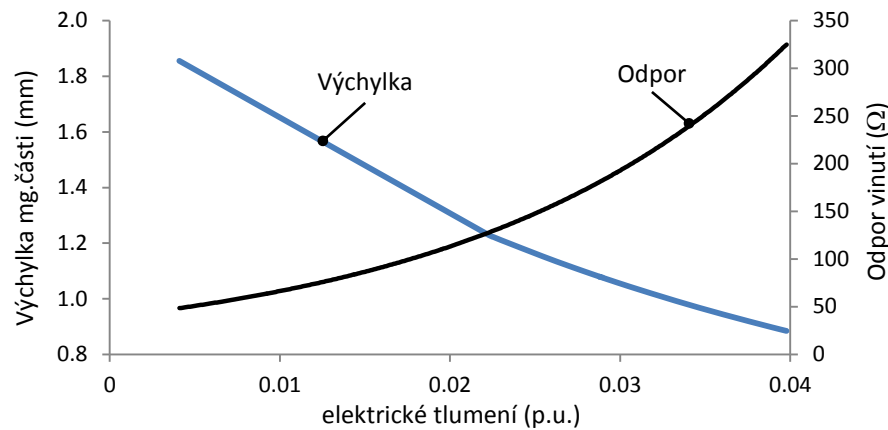


Fig. 4.4: Výchylka magnetické části v závislosti na elektrickém tlumení VG

Kdyby byla účelová funkce vytvořena pro optimalizaci pouze na maximální moment, pravděpodobně by optimalizace skončila v bodě 15. iterace.

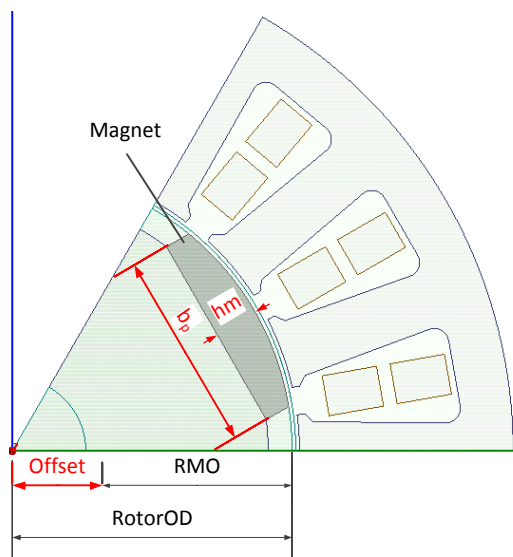
Čím více je argumentů účelové funkce, tím je získané optimum přesnější. Sumarizovaná data jsou uvedena v následující Tab. 4.1, kde jsou významné parametry porovnány s originálním vzorkem určeného k optimalizaci. Porovnat je možné výsledky obou aplikovaných algoritmů stejné účelové funkce. Nový generátor má stejné výstupní parametry jako originální, pouze s menším objemem magnetů a celkovým objemem VG. Významný zásah byl proveden u vinutí, kde nové návrhy mají o jeden řád nižší odpor, nižší počet závitů a tím i celkovou délku vinutí.

Tab. 4.1: Sumarizace získaných výsledků optimalizace VG, [49]

	PARAMETERS	UNITE	Original design	SOMA All2One design 1	GA design 2
Geometry	Magnet volume	cm ³	4,20	3,81	3,67
	Coil volume	cm ³	15,70	19,81	22,99
	Total volume	cm ³	40	27,88	27,94
EM Loading	No load Voltage	V	5	5,4	5,29
	On load Voltage	V	4,7	5,17	5,05
	Output power	mW	7	7,64	7,29
Others	Turns nuber	-	2000	1121	1203
	Coil length	m	210	171	181
	Coil resistance	Ω	1,5k	169	230
	Fitness fcn. value	-	-	0,2582	0,321

4.2 Synchronní stroj s PM na rotoru – PMSM

Jedná se o stroj, u kterého byl nahrazen materiál magnetů z NdFeB za SmCo z důvodu pracovních teplot magnetů a pořizovací ceny. Původní rozměry byly upraveny tak, aby byly zachovány parametry stroje, především stejná hodnota napěťové konstanty k_E , momentové k_M , stejné nebo menší hodnoty cogging a THD . Při návrhu bylo postupováno tak, že byla provedena parametrická analýza stroje s novým materiálem magnetů SmCo. Na základě parametrické analýzy byly definovány parametry popisující geometrii magnetu tj. šířka b_p , výška h_m a vnější rádius *offset* a stanoveny jejich rozsahy, ve kterých budou počítány parametry stroje. Smyslem této kapitoly je dokázat, že zvolené algoritmy jsou vhodné pro optimalizaci stroje s PM. Geometrie stroje s vyznačenými rozměry je zobrazena na Fig. 4.5.



a) Řez geometrie stroje



a) Funkční vzorek, [58]
KURFÜRST, J.; ONDRŮŠEK, Č.; DUROŇ, J.: OSM_6000; Optimalizovaný synchronní stroj s PM na rotoru. firma: Kollmorgen, s.r.o., Evropská 864, Modřice, 664 42. URL: <http://www.uvee.feec.vutbr.cz/fvzorky>

Fig. 4.5: Synchronní stroj s PM na rotoru, funkční vzorek

Z velmi přesné parametrické analýzy bylo graficky určeno optimum, vyhovující podmínce zachovat k_E , k_M s minimálním cogging momentem. Hodnota THD nebyla v parametrické analýze počítána, bude počítána ve vlastní optimalizaci tvaru magnetu. Bylo zjištěno, že pro specifickou kombinaci optimalizovaných parametrů magnetu existuje pouze jedno (manuálně nalezené) optimum, vyhovující podmínkám pro k_E , k_M a minimální cogging. Tato hodnota bude referenční, pro ověření konvergence optimalizace k tomuto optimu.

Vyniklost magnetu (*offset*) byla měněna v rozsahu 0mm – 6mm s krokem 0,25mm. Pro každou hodnotu *offset* byla měněna šířka magnetu v rozsahu 0,6 – 0,8 p.u. s krokem 0,025 p.u. pro tloušťku magnetu 3mm a 4mm. Jedná se tedy o propočítání 450 kombinací možných řešení geometrie magnetu ve zvoleném rozsahu parametrů.

Průběhy uvedené na Fig. 4.6 a) představují vypočítané hodnoty k_E a cogging

momentu, právě pro měněnou hodnotu $BetaM$ (Pole Embrace) při konstantní tloušťce magnetu 3mm a vyniklost magnetu (offset=0mm). Cogging byl uvažován jako Pk2Pk (peak-to-peak) hodnota zvolené kombinace parametrů při teplotě okolí 25°C. Napěťová konstanta byla vypočítána jako efektivní hodnota indukovaného napětí pro $n=1000\text{min}^{-1}$ (dále v textu $1000\text{min}^{-1}=\text{krpm}$) příslušné kombinace parametrů a pracovní teplotě magnetů 125°C. Na obrázku je definováno optimum pro minimální hodnotu cogging momentu (červená čárkovaná čára) a dále vyznačena hodnota požadované napěťové konstanty stroje $k_{Ereq}=47,33\text{V/krpm}$. Minimální hodnota cogging momentu je $cogging_{opt}=0,37\text{Nm}$ odpovídající pólovému krytí $BetaM = 0,705$.

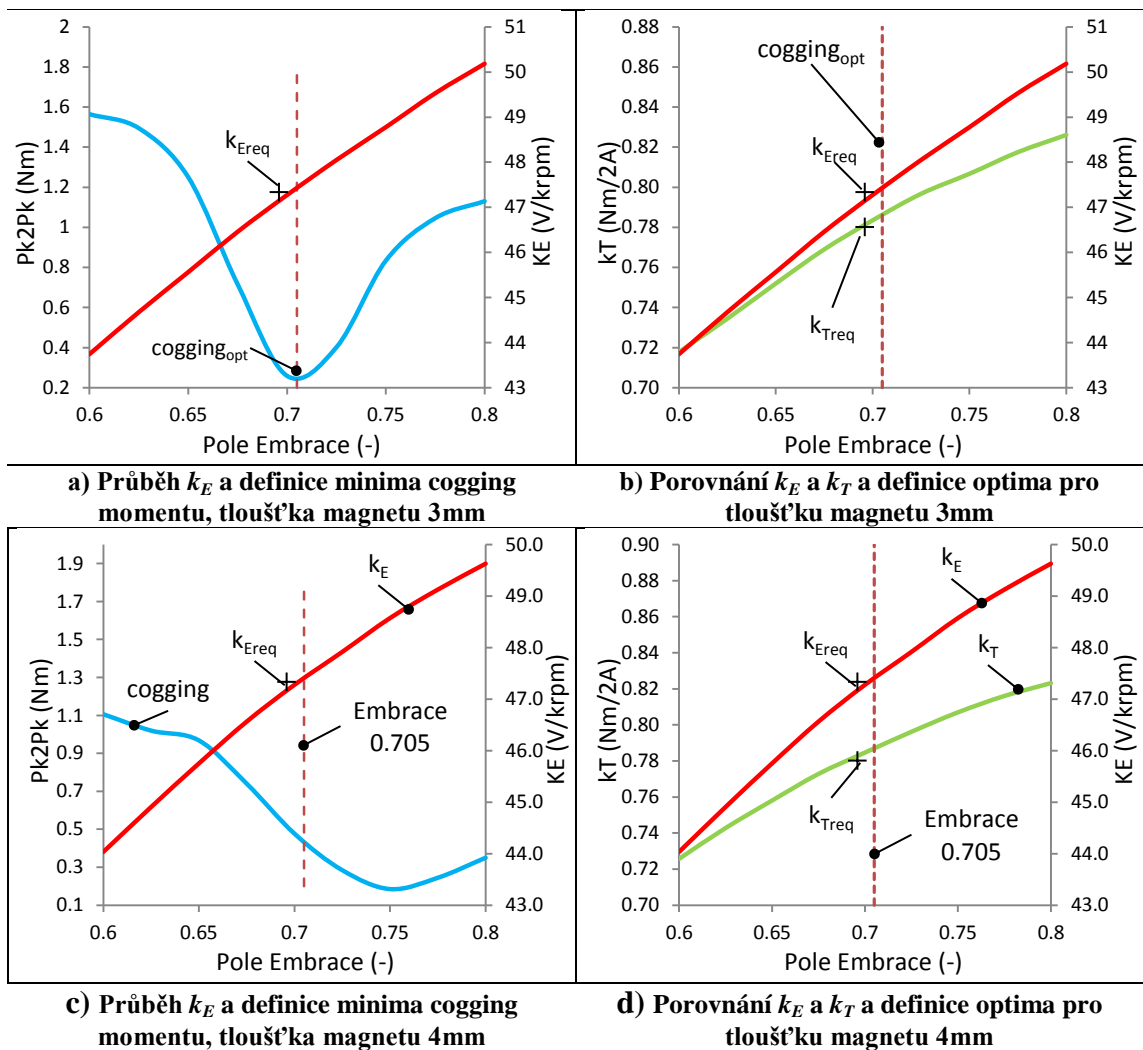


Fig. 4.6: Průběh k_T a k_E a cogging parametrické analýzy stroje s PM vybraných kombinací

Hodnota vypočítaného elektromagnetického momentu zvoleného zatěžovacího úhlu $\delta = 5^\circ$ a pracovního proudu $I=2\text{A}$ je zobrazena na Fig. 4.6 b) pro různé hodnoty $BetaM$, tloušťku magnetu h_m 3mm a $offset=0\text{mm}$. V grafu jsou rovněž zobrazeny požadované hodnoty $k_{Ereq}=47,33\text{V/krpm}$ a $k_{Mreq}=0,781\text{Nm/2A}$ ($k_{Mreq}=k_{Treq}$ a $k_M=k_T$ představuje ekvivalent mezi obrázkem, textem a hodnotami v příslušných tabulkách).

Minimální hodnotu cogging momentu představuje červená čárkovaná čára. Hodnoty vyznačené na Fig. 4.6 a) a b) jsou považovány za optimální odpovídající geometrii magnetu tloušťka=3mm, $offset=0mm$ a $BetaM=0,7$.

Parametrická analýza byla provedena pro magnet tloušťky 4mm za stejných podmínek jak v případě Fig. 4.6 a), b). Získané hodnoty jsou zobrazeny na Fig. 4.6 c), d). Aby pro zvolenou tloušťku magnetu bylo dosaženo $k_{Ereq}=47,33V/krpm$ a $k_{Mreq}=0,781Nm/2A$ byla analýza provedena pro vyniklost magnetu $offset=4,5mm$. V tomto případě nemá křivka cogging žádný extrém a jedná se spíše o návrh, kde musí být zachovány požadované parametry.

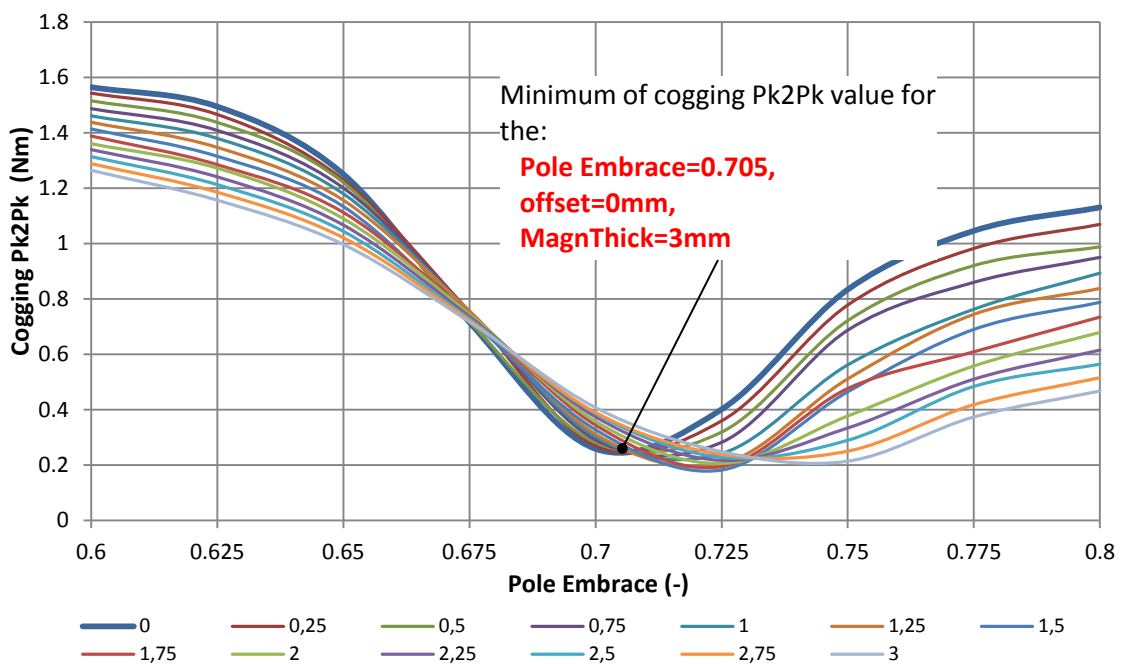


Fig. 4.7: Průběh cogging Pk2Pk pro různé nastavení $offset$ a pólovém krytí stroje

Zbylé hodnoty cogging momentu Pk2Pk pro provedené změny magnetu jsou zobrazeny na Fig. 4.7 pro tloušťku magnetu $h_m=3mm$. Pro každou hodnotu $offset$ (0-3) mm existovalo minimum hodnoty cogging Pk2Pk. Ne však každé odpovídá požadavku napěťové a momentové konstanty (viz výše). Silně zvýrazněná hodnota, tj. $offset=0mm$, odpovídá požadovaným parametrům stroje. Ostatní hodnoty napěťové konstanty k_E a momentové konstanty k_M jsou uvedeny na Fig. 4.8 a), b) s vyznačenou oblastí, kde by mohlo ležet optimum této úlohy. Se zvyšujícím se parametrem $offset$ a při konstantním h_m , k_E a k_M klesá. Důvodem je zmenšování objemu magnetu a tím i jeho energie. Hodnota k_M má v oblasti $BetaM=0,705$ minimum a se zvyšujícím se pólovým krytím roste hodnota k_M .

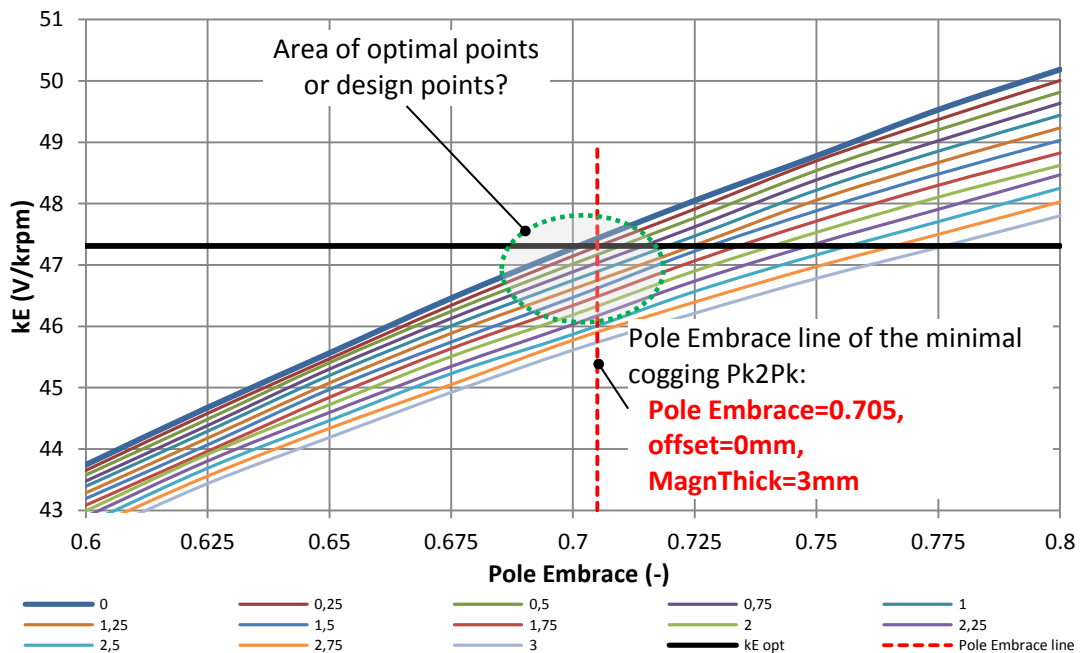
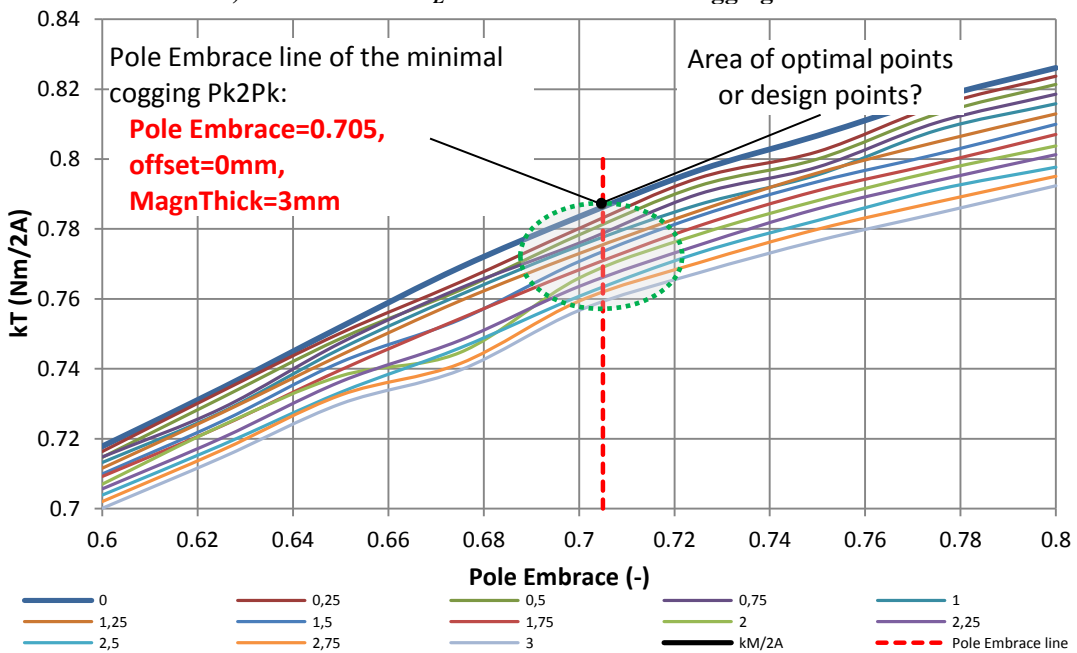

 a) Oblast návrhu k_E v okolí minimálního cogging momentu

 b) Oblast návrhu k_T v okolí minimálního cogging momentu

 Fig. 4.8: Průběh k_M a k_E všech změn offset definice oblasti optima

Hodnoty cogging a konstant motoru pro $h_m=4\text{mm}$ jsou uvedeny v App. B. 1 až App. B. 4. Optimum nebylo nalezeno, jednalo se tedy pouze o oblast možného potenciálního návrhu pro danou tloušťku magnetu.

Z parametrického návrhu stroje bylo definováno optimum pro tloušťku magnetů 3mm vzhledem k požadavku minimálního objemu magnetů a tedy i celkové ceně stroje. V následujícím kroku je provedena verifikace získaných výsledků. Byla vytvořena automatická optimalizační smyčka využívající SOMA algoritmus. Jsou definovány

stejné parametry jako v případě parametrické analýzy se stejnými rozsahy optimalizovaných parametrů. Záměrem je tedy získat shodné výsledky, ověřit tak iteraci do optima, které bylo nalezeno v případě parametrické analýzy a tím tak potvrdit vhodnost zvoleného optimalizačního algoritmu.

Jednotlivé iterace SOMA algoritmu jsou uvedeny v následující Tab. 4.2. Počet iterací byl záměrně nastaven na hodnotu 10, kde se počet iterací testoval v předešlých optimalizačních úlohách [50] a také s ohledem na celkové době výpočtu. Řídící parametry algoritmu SOMA jsou nastaveny tak, jak doporučuje autor algoritmu [38], [39]. Poslední iterace výpočtu je hledané optimum, tedy vhodná geometrie vzhledem k požadavkům napěťové konstanty, momentové konstanty, cogging momentu a THD.

Tab. 4.2: Jednotlivé iterace úlohy ověřující vhodnost zvolené optimalizační metody SOMA

Iteration	PoleArc (p.u.)	hm (mm)	kM (Nm/A)	kE (V/krpm)	THD (%)	CoggingPk2Pk (Nm)	MagArea (cm ²)	Cost (-)
1	0,8200	4,95	0,900	56,503	1,940	1,38	69,38	2,07
2	0,5590	3,01	0,687	43,718	2,915	1,54	30,04	1,45
3	0,6800	3,30	0,786	48,918	1,619	0,61	38,52	1,09
4	0,7106	3,71	0,819	50,862	1,428	0,20	45,34	0,94
5	0,7100	4,17	0,832	51,677	1,426	0,21	51,69	0,28
6	0,7106	3,86	0,823	51,157	1,426	0,20	47,41	0,22
7	0,7114	3,53	0,813	50,489	1,425	0,20	42,84	0,17
8	0,7114	3,53	0,813	50,489	1,425	0,20	42,84	0,17
9	0,7100	3,00	0,790	47,600	1,390	0,19	36,00	0,15
10	0,7100	3,00	0,790	47,600	1,390	0,19	36,00	0,15

Porovnáním hodnot uvedených v Tab. 4.2 s hodnotami na Fig. 4.8 jsou výsledky shodné. Tímto krokem je tedy potvrzeno, že se algoritmus SOMA hodí na optimalizace strojů s PM.

Získané hodnoty z příslušných simulací byly ověřeny měřením. Byl vyroben prototyp s nově navrženou geometrií magnetu a provedeno měření momentové konstanty kM a napěťové konstanty kE pro různé hodnoty proudů. Změřené hodnoty jsou porovnány na Fig. 4.9. Maximální chyba mezi měřeními a simulovanými hodnotami modelů je max 5%. Chyba je v toleranci do 10%, což je dobrý předpoklad správnosti vytvořeného modelu v programu MAXWELL a zvolené optimalizační metody. V oblasti jmenovitého proudu 2A je však chyba minimální do 1%. Hodnota napěťové konstanty je rovna 47,1V/krpm, hodnota momentu 0,82 Nm/A.

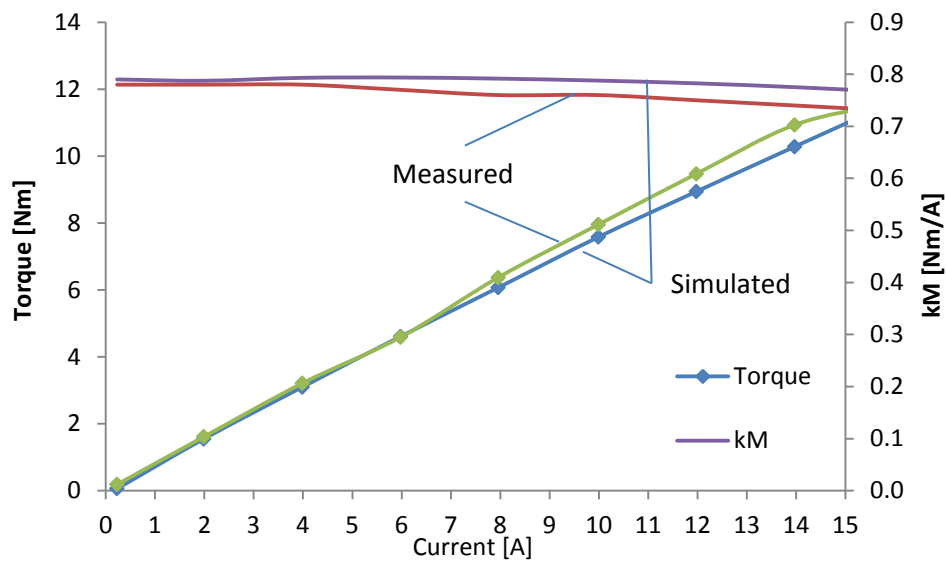


Fig. 4.9: Porovnání naměřených a simulovaných hodnot momentu nového stroje

Vlastnosti nového stroje jsou porovnány s původním stroje v Tab. 4.3. Změnou materiálu magnetu a volbou geometrie byla účinnost stroje zvýšena o 1,3%. Další pozitivní změnou je zvýšení hodnoty účinníku stroje o 2,4%. Další provedená měření na novém stroji jako ztráty, měření teploty jsou zpracovány v protokolu měření vyrobeného prototypu. Záměrem kapitoly bylo definovat úspěšnost zvolené metody, což bylo provedeno a další možné měření nejsou primárním předmětem této kapitoly.

Tab. 4.3: Porovnání hodnot stroje s magnety typu NdFeB vs SmCo

Parameters	NdFeB	SmCo	Difference (%)
<i>Voltage</i>	285,69 V	282,6 V	- 1,1 %
<i>Continuous Current</i>	2,41 A	2,34 A	- 2,9 %
<i>Efficiency</i>	87,90 %	89,20 %	1,3 %
<i>Power out</i>	1002,46 W	1003,54 W	0,1 %
<i>Power</i>	1140,46 W	1124,84 W	-1,4 %
<i>Cos φ</i>	0,957	0,980	2,4 %

5 Multi - fyzikální optimalizace vysokorychlostního stroje

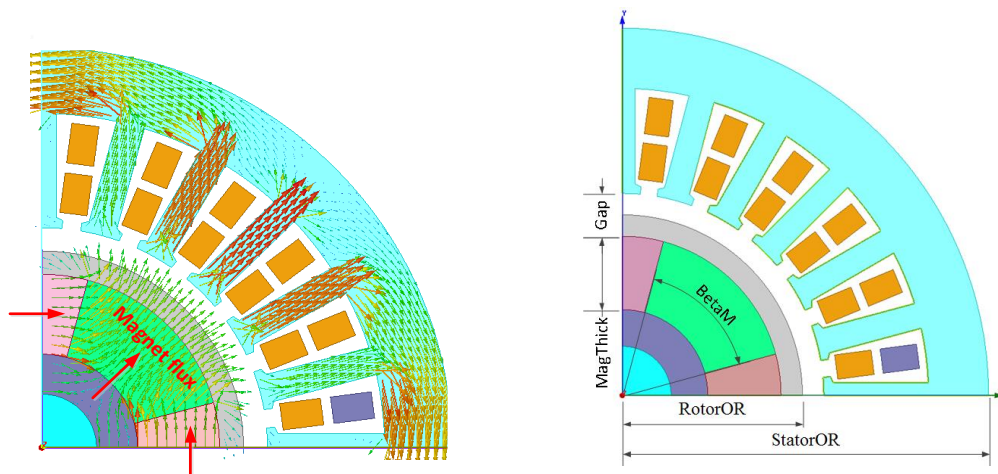
Kapitola pojednává o využití optimalizačních algoritmů během návrhu vysoko rychlostního stroje s permanentními magnety zaměřené na mechanický obvod, tepelný obvod, elektromagnetický obvod a jejich parametry. Stroj je vodou chlazený pomocí kanálů umístěných ve statoru. Celý proces návrhu stroje je pojatý jako multi fyzikální optimalizace. Jsou vytvořeny tři modely mechanický, elektromagnetický a tepelný, jejichž vstupní a výstupní data organizuje optimalizační algoritmus. V tomto případě se jedná o vylepšení konceptu optimalizace, rozšířeného v této práci o další důležité oblasti návrhu strojů. V této kapitole budou rovněž testovány další typy penalizačních funkcí a provedeno porovnání výsledků získaných pomocí algoritmu SOMA a GA. Oproti kapitole 4 je elektromagnetický model stroje vytvořen v programu SPEED Laboratory. V tomto ohledu jsou zde vysvětleny principy jak program ovládat pomocí Umělé inteligence a jak může být program efektivně využit s pomocí algoritmů. Vysokorychlostní stroj byl vyvíjen a optimalizován ve spolupráci s průmyslem. Koncept návrhu vysokorychlostního stroje, citlivostní analýza vybraných parametrů a optimalizace byly prezentovány na mezinárodní konferenci LVEM 2012 [52].

5.1 Popis stroje a technické parametry

Jedná se o synchronní stroj, který má magnety umístěné na rotoru. Uspořádání magnetů je Halbachovo (Fig. 5.1 a) s malým poměrem počtu pólů k počtu drážek na statoru. Základní technické parametry jsou v následující tabulce Tab. 5.1 a zobrazeny na Fig. 5.1 b). B-H a B-P křivky použitého materiálu jsou uvedeny v příloze C - App. C. 5. Materiál Arnon 7 s 3,25% Si [61] se vyznačuje především nízkými ztrátami při vysokých frekvencích a sycení. Například při 1T, 4kHz jsou ztráty 419W/kg. Jsou použity magnety Recoma28 (Sm₂Co₁₇), parametry jsou uvedeny v [61].

Tab. 5.1: Základní parametry vysokorychlostního stroje s PM

Název	Jednotka	Rozměr	Symbol	Poznámka
Počet pólů / počet drážek	(-)	2p=4/24	$2p/Q$	
Výkon	(kW)	5	P_N	
Jmenovité otáčky	(krpm)	120	n	
Napětí	(V)	144rms	U_s	
Vnější poloměr statoru	(mm)	30	$StatorOR$	
Vnější poloměr rotoru	(mm)		$RotorOR$	
Vzduchová mezera	(mm)		Gap	
Délka svazku	(mm)	30	$lstk$	
Výška magnetu			$MagThick$	
Iron materiál / Magnets	-	Arnon 7, 3.25%Si / Recoma28		



a) Halbachovo uspořádání magnetů, zobrazení magnetického toku ψ_m , $I=0A$ b) Přehled významných parametrů stroje

Fig. 5.1: Vysokorychlostní stroj s PM na rotoru

5.2 Citlivostní analýza vybraných parametrů

Citlivostní analýza je v tomto případě provedena ze dvou důvodů. V prvním případě jsou hledány vazby mezi jednotlivými modely z hlediska toho, jak jsou parametry důležité. Ve druhém případě jsou definovány hranice, ve kterých je možné optimalizované parametry hledat. Následující příklad by mohl demonstrovat nějaký limitní případ. Tloušťka magnetu je velká, tedy i bandáž rotoru musí být napočítána na silnější. Větší magnety a silnější fixace rotoru s sebou nesou to, že v nich budou i větší ztráty elektrického původu a stroj se bude zahřívat. Pro požadovaný výkon se silnějšími magnety to znamená nižší hodnotu proudu ve vinutí a tím nižší Joulovy ztráty. Kompromis v návrhu může být takový: vybrat optimální tloušťku magnetu a dopočítat takovou tloušťku bandáže, aby byly ztráty minimalizovány a stroj měl tak optimální teplotu jak magnetů, tak i bandáže rotoru a vinutí.

V analýze je proveden:

- Mechanický výpočet bandáže rotoru, vzhledem k bezpečnostnímu faktoru, otáčkové přetížitelnosti stroje a použitému materiálu bandáže.
- Elektromagnetický výpočet je zaměřen především na výpočet ztrát ve stroji a návrh geometrie vzhledem k požadovaným hodnotám indukovaného napětí, magnetické indukce ve vzduchové mezeře, výkonu stroje a celkového objemu stroje.
- Tepelný výpočet je na základě výpočtu ztrát v obvodu proveden pro analýzu oteplení důležitých částí stroje jako magnety (jejich demagnetizace) a vinutí.

5.2.1 Mechanická analýza

Mechanická analýza je provedena na základě dvou různých výpočtů, a to bandáž pomocí Carbon fiber materiálu [13] a bandáž pomocí metalické bandáže [14]. V prvním případě se jedná o bandáž rotoru pomocí vrstveného vlákna a ve druhém případě pomocí pevné bandáže. Tyto přístupy umožní definovat, která bandáž bude vhodnější pro práci při vysokých otáčkách a teplotě. V obou případech mechanického návrhu bude počítáno celkové σ_t a zbytkové napětí $\sigma_{t,max}$ bandáže. Zbytkové napětí je minimální napětí mezi magnetem a bandáží, které nezpůsobí mechanické zničení bandáže rotoru. Bezpečnostní faktor je definován jako celkové vypočítané napětí bandáže σ_t děleno maximálním napětím použitého materiálu $\sigma_{t,max}$, definovaného výrobcem. Je počítán dle následujícího vztahu (5.1)

$$\delta_s = \frac{\sigma_t}{\sigma_{t,max}} \quad (5.1)$$

Hlavní kritéria mechanického návrhu:

- Navrhnout minimální tloušťku bandáže tak, aby byl bezpečnostní faktor $\delta_s = 2$

Mechanický výpočet pro bandáž pomocí materiálu Carbon fiber

Výpočet byl proveden v [52] na základě vztahů, materiálových vlastností a postupu uvedených v [13]. Vstupní data pro výpočet jsou uvedena v Tab. 5.2.

Tab. 5.2: Materiálové vlastnosti carbon fiber [13], parametrická analýza

Bandage: Carbon Fiber				Magnet: Recoma28		Radius	safety	speed
E	density	Therm. expansion	max stress	density	h_m	RotorOD	δ_s	n
N/mm ²	kg/m ³	m/°C	N/mm ²	kg/m ³	mm	mm	-	rad/sec
2.40E+05	1300	0.000011	1100	8400	5	13	2	13823.0

Následně pak byla provedena parametrická změna tloušťky bandáže při konstantní rychlosti 13823.0 rad/sec, což odpovídá násobku $1.1 \cdot n = 1.1 \cdot 120$ rychlosti. Tloušťka magnetu h_m byla zvolena 5mm. Simulované hodnoty jsou uvedeny na Fig. 5.2. Cílem bylo vypočítat zbytkové napětí a předpětí bandáže ΔD . Správná oblast návrhu bandáže je vyznačena na Fig. 5.2. Oblast se vyznačuje tím, že celkové zbytkové napětí bandáže musí být kladná hodnota. Do této hodnoty jsou zahrnuta mechanická napětí v magnetech vlivem předpětí bandáže a napětí vlivem odstředivé síly. Tloušťka bandáže rotoru při zbytkovém napětí 10 N/mm² je přibližně 3mm, což by mělo bezpečně zabránit deformaci rotoru. Velikost předpětí bandáže byla vypočítána na 56 μ m v jednotkách prodloužení bandáže – bandage undersize Fig. 5.2. Numerické hodnoty jsou uvedeny v příloze App. C. 1.

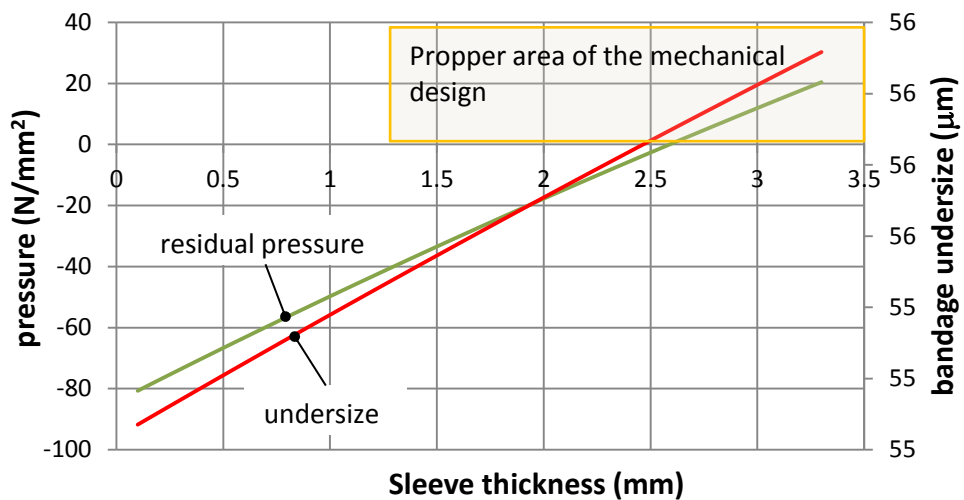


Fig. 5.2: Parametrická analýza tloušťky bandáže carbon fiber

Další analýza byla vytvořena pro změnu rychlosti otáčení až do hodnoty $140\,000\text{ min}^{-1}$ (140 krpm). Tloušťka bandáže byla zvolena z předcházející simulace na 3mm. Bylo počítáno zbytkové napětí bandáže a celkové napětí v bandáži. Cílem úlohy bylo posoudit, jak se bude měnit zbytkové napětí během různých rychlostí otáčení a stanovit tak oblast, kde nesmí být stroj provozován. Hodnoty jsou zobrazeny na Fig. 5.3.

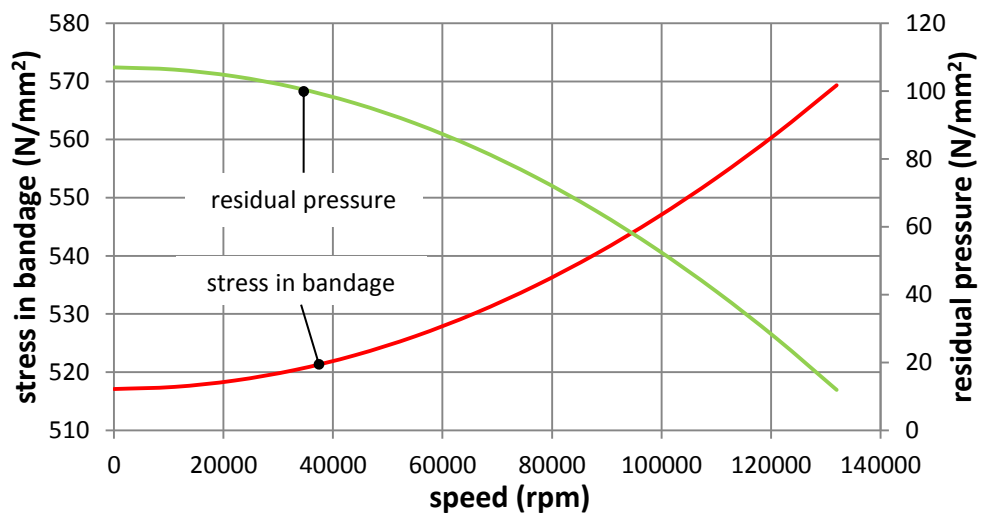


Fig. 5.3: Deformační oblast carbon fiber

Velkou nevýhodou této analytické kalkulace bylo to, že výpočty neuvažují teplotní závislosti. Uvedené hodnoty by musely být přepočítány na požadovanou pracovní teplotu v magnetech. V dalším kroku bylo použito nemagnetické ocele jako jednoho kusu, který by bylo možné nasunout na rotor a zabránit tak deformaci rotoru a magnetů. Při výpočtech už byla uvažovaná pracovní teplota.

Návrh bandáže pomocí nemagnetické ocele

Výpočet byl proveden v [52] na základě komplexnějších vztahů, různých materiálových vlastností a postupu uvedeného v [14]. Pro analýzu byly doporučeny tři různé materiály s různými mechanickými vlastnostmi INCONEL 718, STAINLESS Steel 340 grade a TITAN s označením Ti-6al-4v-AMS4911. Mechanické vlastnosti doporučených materiálů jsou uvedeny v Tab. 5.3.

Tab. 5.3: Mechanické vlastnosti INCONEL [62], STAINLESS [63] a Titanu [64]

unit	Young's (N/m ²)	Poisson's (-)	density (kg/m ³)	expansion coefficient (10 ⁻⁶ /°C)	Maximum temper. (°C)	Tensile Yield strength 204°C
magnet	1,4E+11	0,15	8300	0,402		N/mm ²
Inconel 718	2,01E+11	0,284	8220	13,5	1200	1172
STAINLESS	1,93E+11	0,3	8000	17	1200	205
Titan	1,14E+11	0,342	4430	17	1200	950

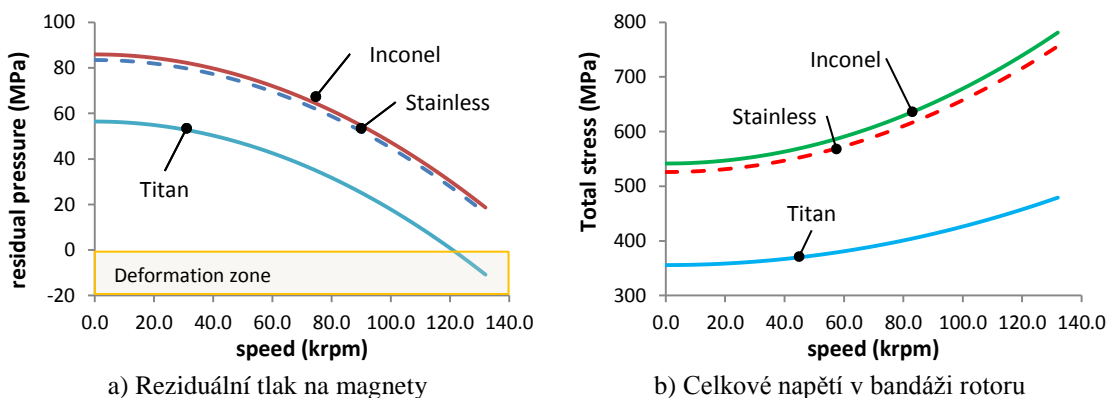


Fig. 5.4: Mechanická analýza předložených materiálů pro vysokorychlostní stroj s PM

Byla měněna rychlost otáčení a počítán reziduální tlak na magnety od bandáže Fig. 5.4 a) a dále celkové napětí bandáže Fig. 5.4 b) pro všechny zmíněné materiály. Hodnoty jsou získány na základě těchto podmínek: stejná tloušťka bandáže u všech materiálů 2,5mm, stejné interference fit 50 μ m. Bezpečnostní faktor je počítán pro každou změnu rychlosti a materiál. Vypočítané hodnoty reziduálních tlaků na magnety, celkového napětí bandáže a bezpečnostního faktoru každého materiálu jsou uvedeny v tabulce App. C. 2.

Další analýza, která byla provedena, je změna předeprnutí ocele (interference fit). Předeprnutí ocele ovlivňuje tloušťku bandáže a tlak na magnety především při nulových otáčkách. Analýza je provedena pro jmenovité otáčky $1.1 \cdot speed = 1.1 \cdot 120$ a stejnou tloušťku magnetů. Je počítán reziduální tlak na magnety a celkové napětí bandáže pro všechny zmíněné materiály. Mechanická vlastnost materiálu je zobrazena na Fig. 5.5

kde při předpětí mezi 0 - 2mm je Titan nevhodný.

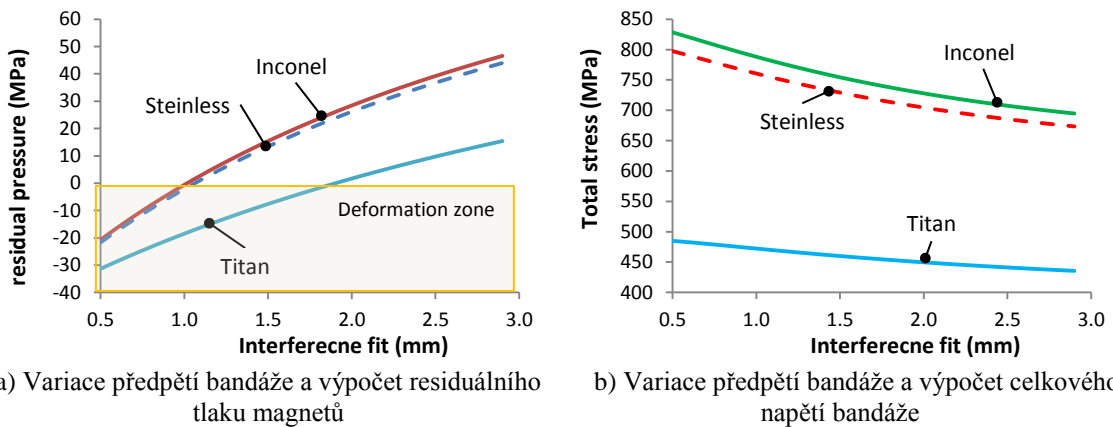


Fig. 5.5: Mechanické poměry – variace předpětí bandáže rotoru

Materiál Titan neudrží při rychlosti otáčení 120 krpm magnety a dojde k deformaci rotoru. Materiál STAINLESS zase nevyhovuje požadavku bezpečnosti, protože jeho maximální napětí je 205Nmm^{-2} . Z těchto tří materiálů je z hlediska residuálního tlaku a celkového napětí bandáže nejvhodnější INCONEL a dále s ním bude počítáno. Do mechanického návrhu budou vstupovat parametry typu tloušťka ocele a předpětí. Residuální tlak v magnetech, celkové napětí bandáže a bezpečnostní faktor budou počítány a brány jako výstupy z mechanického návrhu.

5.2.2 Elektromagnetická – tepelná analýza

Citlivostní elektromagnetická – tepelná analýza vybraných parametrů je důležitou částí optimalizace vysokorychlostního stroje s PM. V této části jsou stanoveny hranice optimalizovaných parametrů a definován tak jejich rozsah. Hlavním cílem této kapitoly je vypočítat rozložení ztrát v železe a vinutí pro následný tepelný výpočet. Rozložení ztrát bude počítáno pro různé hodnoty „split ratio“ (poměr mezi vnějším rozměrem rotoru a statoru) a dále různé tloušťky magnetu.

Pro zadanou hodnotu split ratio s_r (poměry 0.33, 0.43 a 0.5) a tloušťku magnetu (3mm s 6mm), jsou pro stav naprázdno dopočítávány zbylé rozměry statoru v závislosti na zvolené magnetické indukci od 0.7T – 1.4T v zubu a jhu statoru. Následně jsou vypočítány ztráty v železe obvodu naprázdno. V obvodu pod zatížením je nutné nastavit jmenovitou hodnotu proudu odpovídající jmenovitému výkonu a vypočítat zbylé ztráty ve vinutí a magnetech. Vzhledem k rozsahu provedené analýzy jsou v kapitole prezentovány pouze významné výsledky a zbylé jsou uvedeny v Příloze C.

Elektromagnetický model (EM) stroje s PM je vytvořen v programu SPEED Laboratory a tepelný (T) obvod je vytvořen v Excelu. Výhodou programu SPEED

Laboratory je jeho analytická část, kde se pomocí parametrů dosáhne požadovaných hodnot v krátkém čase a následně pomocí MKP modulu provede kontrola. Výsledky z MKP jsou použity tak, že analytický model je přizpůsoben MKP pomocí konstant tzv. X-faktorů. Nevýhodou je to, že přizpůsobení je nutné dělat ručně jak pro simulace obvodu naprázdno, tak pro zatížený obvod.

Matice parametrů, kterou je nutno propočítat je uvedena v Tab. 5.4. Vypočítané hodnoty geometrie odpovídající popisku LM6.M1.1 jsou uvedeny v App. C. 3

Tab. 5.4: Matice parametrů určené k vyhodnocení EM a T analýzy

1	RotorOD/ StatorOD	10/30	13/30	15/30	2	RotorOD/ StatorOD	10/30	13/30	15/30
	split ratio	0,33	0,43	0,5		split ratio	0,33	0,43	0,5
	B (T)					B (T)			
LM = 6mm	0,7	LM6.M1.1	LM6.M2.1	LM6.M3.1	LM = 3mm	0,7	LM3.M1.1	LM3.M2.1	LM3.M3.1
	0,8	LM6.M1.2	LM6.M2.2	LM6.M3.2		0,8	LM3.M1.2	LM3.M2.2	LM3.M3.2
	0,9	LM6.M1.3	LM6.M2.3	LM6.M3.3		0,9	LM3.M1.3	LM3.M2.3	LM3.M3.3
	1,0	LM6.M1.4	LM6.M2.4	LM6.M3.4		1,0	LM3.M1.4	LM3.M2.4	LM3.M3.4
	1,1	LM6.M1.5	LM6.M2.5	LM6.M3.5		1,1	LM3.M1.5	LM3.M2.5	LM3.M3.5
	1,2	LM6.M1.6	LM6.M2.6	LM6.M3.6		1,2	LM3.M1.6	LM3.M2.6	LM3.M3.6
	1,3	LM6.M1.7	LM6.M2.7	LM6.M3.7		1,3	LM3.M1.7	LM3.M2.7	LM3.M3.7
	1,4	LM6.M1.8	LM6.M2.8	LM6.M3.8		1,4	LM3.M1.8	LM3.M2.8	LM3.M3.8

Výpočet a simulace jednotlivých položek matice parametrů (Tab. 5.4) je rozdělen do několika hlavních bodů.

- 1) Nastavení tloušťky magnetů h_m a vnější radius rotoru *RotorOD*. Pro nastavenou hodnotu h_m a *RotorOD* je nutné vypočítat tloušťku bandáže rotoru za podmínek uvedených v 5.2.1. Dále nastavit teplotu okolí na 20°.
- 2) Zvolit si magnetickou indukci v zubu statoru a jhu stroje z Tab. 5.4. Na základě zvolené indukce je nutno vypočítat nové rozměry drážky a provést MKP výpočet, provést „ladění pomocí X-faktorů“ analytického modelu na MKP a odečíst ztráty naprázdno. Návrh vinutí spočívá v tom, že se upraví počet závitů ve vinutí na požadované indukované napětí.
- 3) Nastavit teplotu okolí na jmenovitou hodnotu 250°C na magnetech a 180°C ve vinutí. Následně se provede výpočet jmenovité hodnoty proudu na základě požadovaného jmenovitého výkonu a pomocí MKP se provede simulace. Dále se provede nastavení pomocí X-faktorů mezi analytickým modelem a MKP. V této fázi dochází ke zpřesnění magnetických toků stroje, na jejichž základě je pak možné analyticky vypočítat ztráty ve vinutí, celkovou účinnost stroje a proudovou hustotu.

- 4) Výsledné ztráty z výpočtu obvodu naprázdno (v železe) a pod zatížením (vinutí, magnety a bandáž) jsou použity v tepelném modelu, kde se počítá skutečné oteplení celého stroje.
- 5) Procesy 1 – 4 jsou prováděny pro všechny požadované hodnoty magnetické indukce v zubu statoru, jhu stroje a zvolené tloušťky magnetů.

Celý záměr EM a T analýzy spočívá ve zvolení optimálního sycení statoru vzhledem k minimálnímu oteplení magnetů a vinutí. Jinými slovy nalezení vhodného poměru mezi jednotlivými složkami ztrát stroje.

Výsledky z provedených simulací, tj. vyhodnocení matice parametrů Tab. 5.4 jsou sumarizovány v Tab. 5.5 pouze pro optimální sycení v zubu statoru a jhu stroje. Z tabulky je patrné, že ztráty v železe se zvyšují se zvyšujícím se poměrem „split ratio“ a také s tloušťkou magnetu ve všech optimálních případech, což je způsobeno větším objemem magnetů. Ztráty v mědi závisí na odporu vinutí a protékáním proudem, ztráty jsou proměnné právě proto, že vinutí bylo definováno v závislosti na indukovaném napětí a požadované proudové hustotě. Největší účinnost stroje je pro tloušťku magnetů 3mm a 6mm vždy při split ratio 0.33.

Výpočet ztrát a průběh vypočítané teploty magnetu jsou pro všechny zmíněné stavy (proměnná indukce, změna tloušťky magnetů a split ratio) zobrazeny na následujících Fig. 5.6 až Fig. 5.11. Minimální teplota magnetu (optimální bod) jsou v příslušných obrázcích rovněž vyznačeny. Dílčí výpočty jsou uvedeny v příloze C v příslušných tabulkách App. C. 3 a App. C. 4.

Tab. 5.5: Sumarizované výsledky z EM a T analýzy – optimální sycení vzhledem k teplotě

Parametr	Jednotka	Tloušťka magnetu = 3mm			Tloušťka magnetu = 6mm		
		split =0,33	split = 0,43	split = 0,5	split =0,33	split = 0,43	split = 0,5
Ztráty v železe	W	141,03	168,34	204,30	159,48	237,57	257,98
Ztráty v železe - zub	W	74,57	76,15	84,86	81,50	106,04	99,91
Ztráty v mědi	W	69,06	66,66	63,90	63,49	48,77	57,26
Ztráty v magnetech	W	0,0131	0,0083	0,0177	0,0044	0,0049	0,0037
Ztráty v bandáži	W	0,15	1,14	1,72	0,16	0,69	1,56
Ztráty dodatečné	W	8,07	23,09	34,47	9,07	23,09	39,93
Celkové ztráty	W	292,90	335,39	389,26	313,71	416,17	456,64
Teplota magnetů	°C	157,84	199,52	225,70	159,74	196,17	232,33
Teplota vinutí	°C	123,31	127,69	132,00	123,55	128,25	135,67
Proudová hustota	A/mm ²	10,22	9,93	10,90	10,45	9,44	11,65
Účinnost	%	94,46	93,71	92,77	94,09	92,31	91,63
Proud	A	20,32	19,27	20,73	18,26	18,68	23,12
Magnetická indukce	T	0,7	0,9	1	0,7	1	1,1
Průběh	-	Fig. 5.9	Fig. 5.10	Fig. 5.11	Fig. 5.6	Fig. 5.7	Fig. 5.8

Výpočet poměrů ve stroji - tloušťka magnetů 6mm

Na základě postupů výpočtu uvedených výše (1-5) je proveden výpočet stroje pro dílčí hodnoty magnetické indukce v zubu statoru a jhu stroje. Tloušťka magnetu je v prvním kroce nastavena na 6mm. Pro zvolený split ratio 0.33 je vnější rozměr rotoru nastaven na $RotorOD = 10\text{mm}$. Získané hodnoty pro tento případ jsou uvedeny na Fig. 5.6. Nejnižší hodnoty teploty na magnetech bude dosaženo, když bude v návrhu uvažována magnetická indukce v zubu a jhu 0,7T ve stavu naprázdno. Hodnota ztrát v železe je v tomto bodě vypočítána na $\Delta P_{iron} = 159\text{W}$ a v mědi $\Delta P_{Cu} = 63\text{W}$. Pro srovnání byly počítány i ztráty v magnetech $\Delta P_{mag} = 0,04\text{W}$ a bandáži $\Delta P_{bandaz} = 0,16\text{W}$ a dodatečné ztráty třením o vzduch $\Delta P_{windage} = 9\text{W}$. Hodnoty ztrát v magnetech, bandáži a dodatečných ztrát nejsou na Fig. 5.6 zobrazeny vzhledem k jejich velikosti. Pro tuto hodnotu magnetické indukce a vypočítaný proud vychází celková účinnost 94,09%. Minimální teploty by mohlo být přesněji dosaženo tím, že by se stroj propočítal pro nižší magnetické indukce B_t a B_{bi} než 0,7T. Odhadem by koleno křivky teploty magnetu mohlo být mezi 0.5 – 0.7 T.

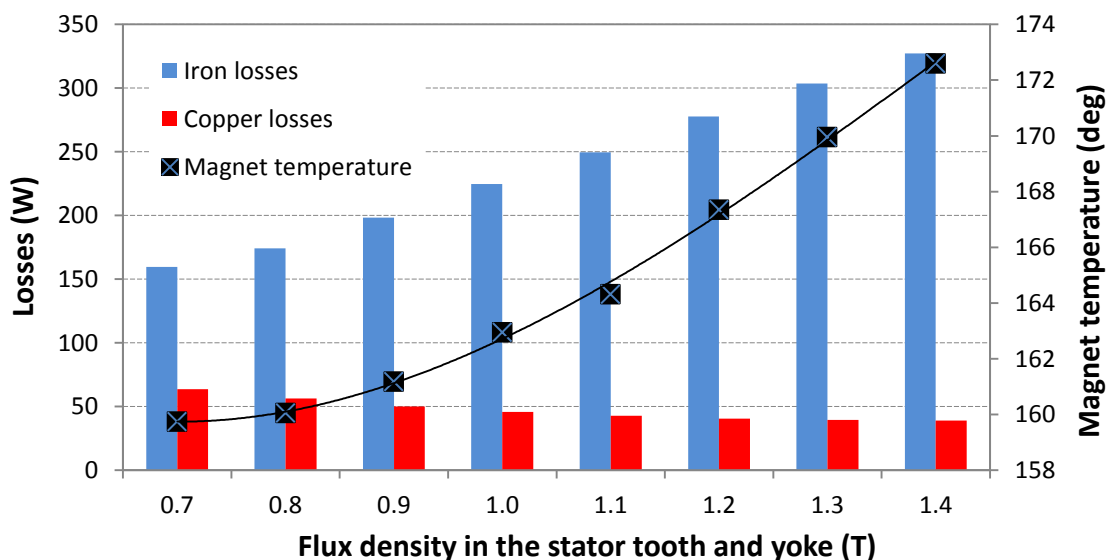


Fig. 5.6: Teplota magnetů a ztráty ve stroji pro různé sycení statoru, split ratio 0.33

Porovnáním hodnot uvedených na Fig. 5.6 s hodnotami uvedenými na Fig. 5.7 je koleno teploty magnetu vypočítané pro hodnotu, kde sycení v zubu statoru bylo 1.0T. V tomto bodě byly ztráty v železe vypočítány na $\Delta P_{iron} = 237\text{W}$ a v mědi $\Delta P_{Cu} = 106\text{W}$. Pro srovnání byly počítány i ztráty v magnetech $\Delta P_{mag} = 0,049\text{W}$, bandáži $\Delta P_{bandaz} = 0,69\text{W}$ a dodatečné ztráty třením o vzduch $\Delta P_{windage} = 23\text{W}$. Hodnoty ztrát jsou oproti předcházejícímu případu větší vlivem větší hmoty magnetů. Účinnost stroje je nižší, protože celkové ztráty jsou vyšší oproti poměru rotoru k/ke statoru 0.33. Teplota

magnetu dosahuje v optimálním případě hodnoty 196°C.

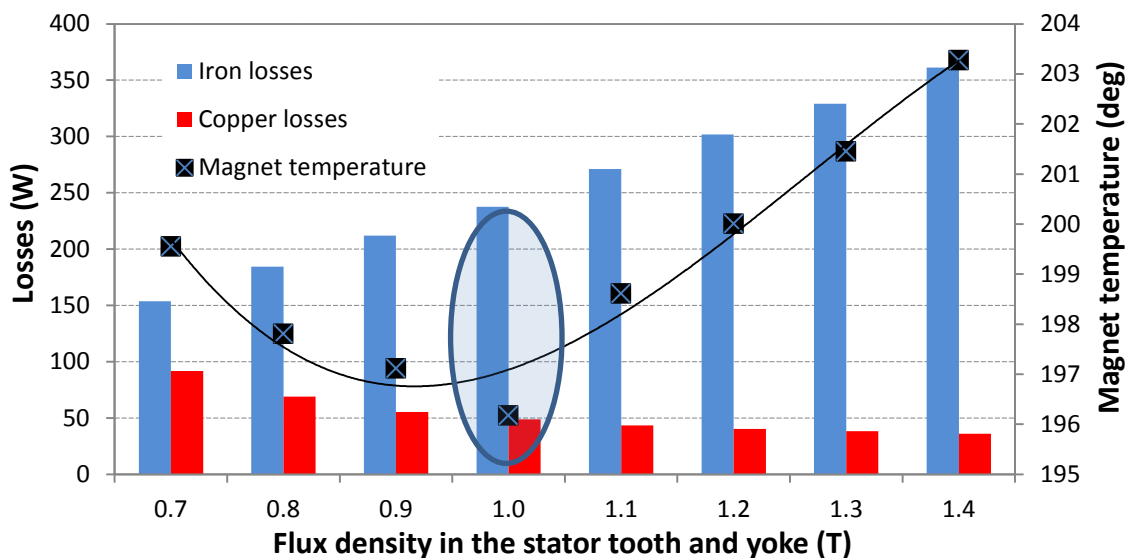


Fig. 5.7: Teplota magnetů a ztráty ve stroji pro různé sycení statoru, split ratio 0.43

Na Fig. 5.8 jsou zobrazeny výsledky pro výpočet třetího případu split ratio 0.5. V tomto případě vycházejí celkové ztráty největší 456W s účinností 91,63%. I v tomto případě je možné navrhnout stroj tak, aby byla teplota na magnetech minimální oproti ostatním případům.

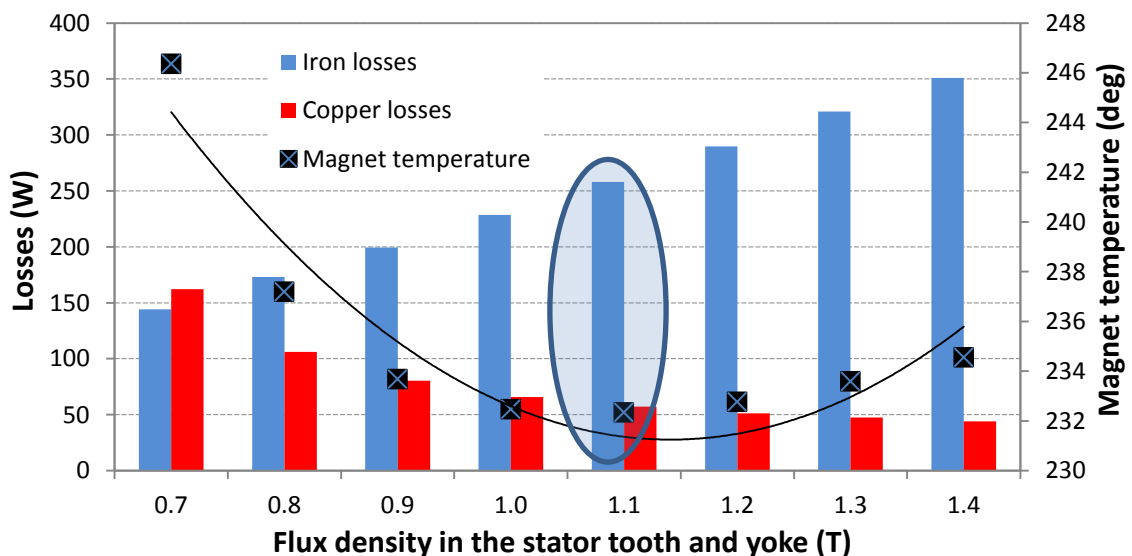


Fig. 5.8: Teplota magnetů a ztráty ve stroji pro různé sycení statoru, split ratio 0.5

Výpočet poměrů ve stroji - tloušťka magnetů 3mm

Stejně úvahy byly provedeny u návrhu stroje s tloušťkou magnetů 3mm. Kde geometrie s minimální teplotou magnetu je při návrhu na 0.7T (Fig. 5.9), 0.9T zobrazeno na Fig. 5.10 a v návrhu 1.0T zobrazeného na Fig. 5.11.

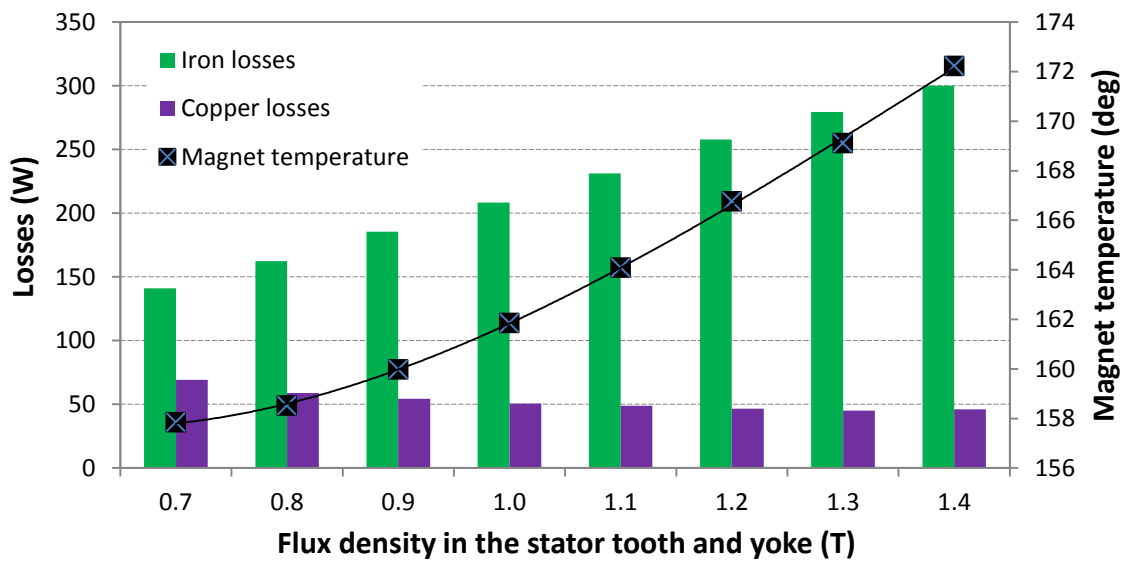


Fig. 5.9: Teplota magnetů a ztráty ve stroji pro různé sycení statoru, split ratio 0.33

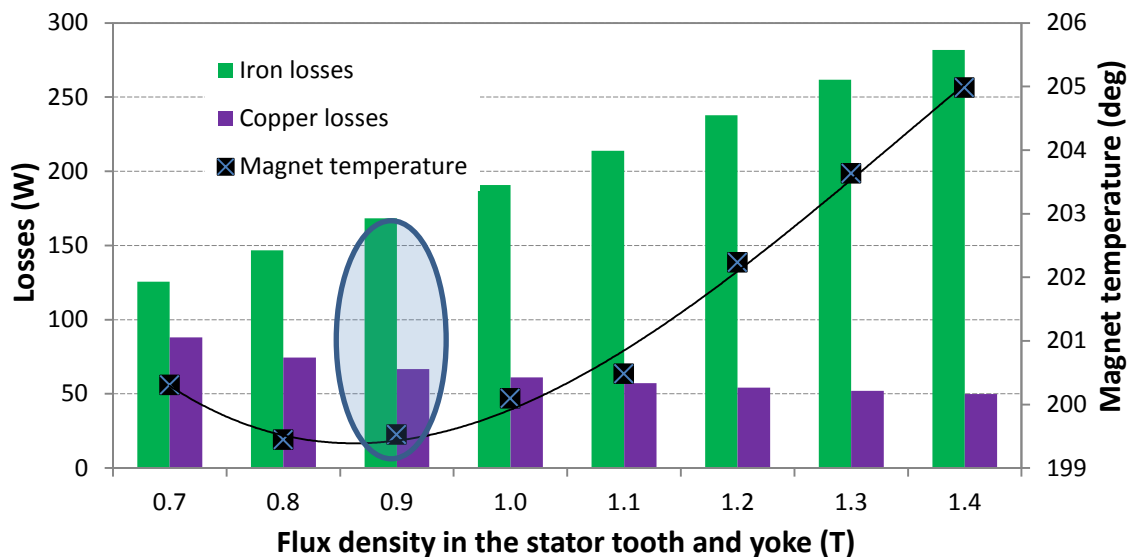


Fig. 5.10: Teplota magnetů a ztráty ve stroji pro různé sycení statoru, split ratio 0.43

Vyšší účinnosti jsou vypočítány pro stroj s menší tloušťkou magnetů (3mm) vlivem nižších ztrát ve stroji. Výstupem z EM a T analýzy jsou parametry typu tloušťka magnetu (*MagThick*), velikost bandáže a hodnota split ratio. Do optimalizace bude vstupovat požadavek na minimální teplotu magnetů s nejvyšší možnou účinností stroje a požadovaném výkonu. Rozsahy parametrů budou voleny tak, jak bylo provedeno v této kapitole. Dílčí výpočty jsou uvedeny v příloze C v příslušných tabulkách App. C. 3 a App. C. 4. Tepelný model, který byl naprogramován za účelem vypočítat teplotní poměry, je publikován v literatuře [15].

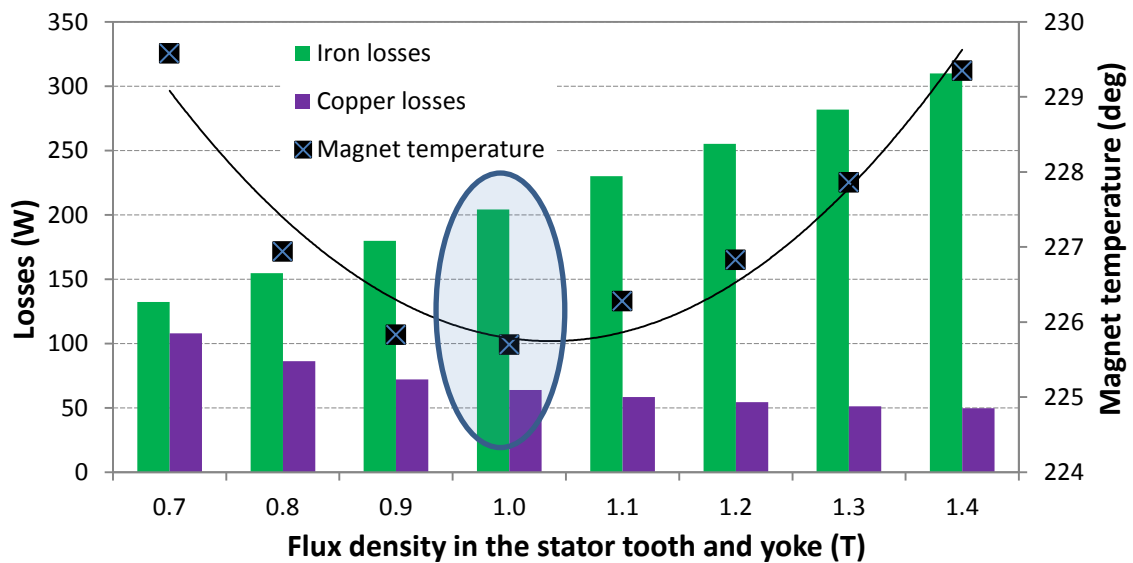


Fig. 5.11: Teplota magnetů a ztráty ve stroji pro různé sycení statoru, split ratio 0.5

5.3 Optimalizační proces

Multi-fyzikální optimalizace znamená optimalizovat parametry stroje na základě mechanického, elektromagnetického a teplotního výpočtu. Všechny získané výstupy z jednotlivých modelů jsou použity v hlavním optimalizačním procesu. Během hlavní optimalizace stroje, jsou využity pomocné optimalizace (dílčí), které optimálně nastavují ty parametry, které se v hlavní optimalizaci už neprojeví. Tím je hlavně myšleno automatické přizpůsobení MKP modelu SPEED na analytický model (vysvětleno níže).

Optimalizace by měla být zaměřena na tyto důležité části:

- Minimalizovat objem bandáže rotoru při otáčkovém přetížení stroje a požadovaném bezpečnostním faktoru (část mechanického návrhu).
- Minimalizovat ztráty (v železe, v magnetech, Cu, bandáž) vhodným geometrickým návrhem – například volba vzduchové mezery, tloušťka magnetů.
- Minimalizovat celkový objem magnetů, vzhledem k jejich prodejní ceně a tedy i celkové výrobní ceně stroje.
- Navrhnout rozměry magnetů tak, aby byla při zatížení minimální teplota ve vinutí a na samostatných magnetech (viz kapitola 5.2.2).

Takto definovaná optimalizační úloha znamená vytvořit čtyři modely stroje (mechanický, elektromagnetický naprázdno, při jmenovitém zatížení a tepelný) s vlastními optimalizačními smyčkami a jednou hlavní, protože je nutné znát objectives dílčích optimalizací. Pomocné optimalizace jsou vysvětleny níže v textu.

Základní myšlenkou této optimalizace je, že na základě jakékoliv změny geometrie jsou vypočítány hodnoty vytvořených modelů a výstupy použity jako vstupy do hlavní

optimalizační smyčky (Fig. 5.14). V hlavní optimalizační smyčce je pak iterativním způsobem dosaženo optima, na základě vstupních požadovaných veličin.

Mechanická optimalizace (Mechanical model Fig. 5.12) bude zaměřena na bandáž rotoru včetně magnetů pro 20% rychlostní přetížení. Hlavní účel této mechanické optimalizace spočívá v navržení bandáže s minimální tloušťkou pro různé tloušťky magnetů (h_m) a vnější rozměry rotoru ($RotorOD$). Bandáž by z mechanického hlediska měla splňovat požadavek na bezpečnostní faktor a minimální residuální napětí. Na základě citlivostní analýzy provedené v kapitole [5.2.1], je pro mechanický návrh bandáže použita detailnější metoda [14]. Mechanický model je vytvořený v programu MATLAB a pro optimální návrh parametrů bandáže bude použit algoritmus SOMA se strategií ATO.

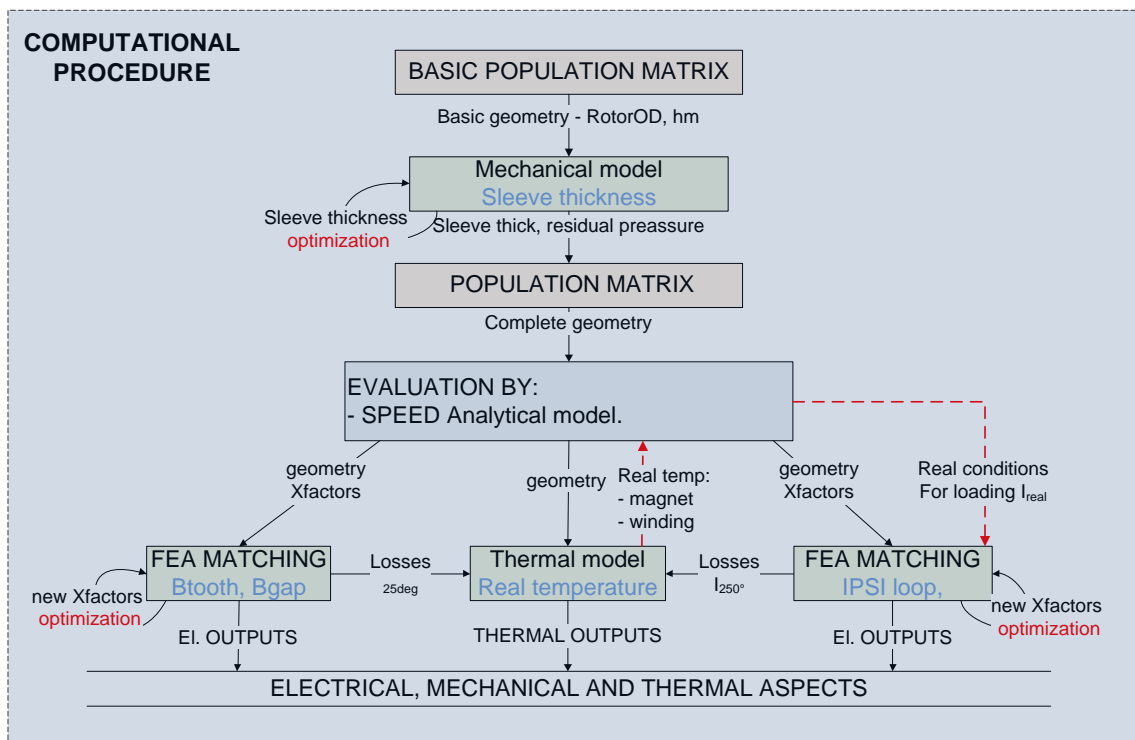


Fig. 5.12: Proces vyhodnocení změny geometrie a výpočet výstupní parametrů HS

Elektromagnetický návrh bude rozdělen do dvou částí. První část (FEA matching B_t , B_g - Fig. 5.12) je zaměřena na návrh stroje naprázdno a druhá část je zaměřena na návrh stroje při zatížení. Důvodem je bezpečnostní požadavek na ztráty naprázdno při teplotě 20°C. Elektrický stroj by měl být navržen pro požadovanou hodnotu magnetické indukce ve vzduchové mezeře, v zubu stroje, jhu stroje a velikosti indukovaného napětí naprázdno. V této fázi návrhu bude použit program SPEED Laboratory. Na základě analytického modelu SPEED, je geometrie stroje s požadovanými parametry navržena analyticky (výhoda rychlého nastavování parametrů a vypočítaných požadovaných

výstupů) a následně provedena kontrola pomocí MKP. Kontrola pomocí MKP spočítá v tom, že analyticky vypočtený stroj bude naladěn na MKP model a tím zaručena přesnost výsledků počítaných na základě analytických vztahů (viz kapitola 5.3.2). V této fázi se jedná o magnetickou indukci v zubu stroje, průběh magnetické indukce ve vzduchové mezeře, jhu stroje, ztrát v železe a hodnoty indukovaného napětí. Přizpůsobení modelu MKP na analytický je provedeno automaticky, pomocí optimalizace SOMA se strategií ATO, protože se jedná o použití přibližně 3 parametrů (X-Factors).

Ve druhém případě elektromagnetického návrhu se jedná o výpočet proudu regulátoru pro požadovaný moment nebo výkon (FEA matching IPSI loop Fig. 5.12. Pro jmenovitý proud je v programu SPEED proveden výpočet I-PSI (kapitola 5.3.2). Pomocí X-Factors je následně provedeno automatické přizpůsobení analytického modelu pomocí SOMA algoritmu. Veličiny, které jsou dále sledovány jsou výstupní výkon, celková účinnost a proudová hustota.

Teplotní analýza stroje (Thermal model - Fig. 5.12) je převzat z [15]. Na základě vypočítaných ztrát v železe, v magnetech, v bandáži a ve vinutí je pomocí teplotního modelu vypočítána skutečná teplota v magnetech a ve vinutí. Sledovaných kontrolních bodů teplotního výpočtu bylo více, ale pro optimalizaci stroje je teplota na magnetech (demagnetizace) a ve vinutí (chlazení) dostatečná.

5.3.1 Navržený optimalizační koncept pro vysokorychlostní stroj s PM

Navržený koncept je rozdělen do několika bodů, ze kterých by mělo být patrné, jak bylo při optimalizaci postupováno a jakých výsledků by mělo být dosaženo při optimalizaci vysokorychlostního stroje.

1) Citlivostní analýza vybraných parametrů vzhledem k rozložení ztrát ve stroji a jmenovitým provozním vlastnostem.

- Zjištění závislostí mezi použitou geometrií stroje, použitými materiály a zvolenou topologií na rozložení ztrát, výpočet provozních parametrů stroje a teplotního rozložení.
- Definice matice rozměrů, které mají být ohodnoceny a na základě získaných vypočítaných výstupních parametrů stroje provedena selekce těchto parametrů.
- Definice okrajových podmínek selektovaných parametrů.

2) Nezatížený stroj, návrh základních rozměrů.

- Geometrie *RotorOD*, h_m , *TWS* a *SD* budou náhodně generovány z rozměrové matice vzhledem k magnetické indukci v zubu $0.8T \geq B_i \leq 1.4T$

a jhu stroje $0.8T \geq B_{bi} \leq 1.4T$ a také vzhledem k požadovanému indukovanému napětí $E_0 \leq 144V$.

- Analytické řešení nezátíženého stroje bude provedeno při teplotních podmínkách $25^\circ C$.
- X-Factors optimalizace musí být provedena pro B_g a B_t

3) Mechanický výpočet.

- Tloušťka bandáže rotoru bude automaticky vypočítána pro každou změnu geometrie vzhledem k požadovanému bezpečnostnímu faktoru $\delta_s \geq 1$ a reziduálnímu napětí bandáže, které je přibližně 20% z odstředivého napětí.
- Automatický výpočet bude proveden na základě postupu popsáno výše v textu

4) Zatížený stroj – load conditions.

- Analytický výpočet zatíženého stroje je proveden pro teplotu magnetů $250^\circ C$ a teplotu ve vinutí $180^\circ C$, což představuje nejhorší provozní stav.
- Jmenovitá hodnota proudu odpovídající jmenovitému zatížení je zjištěna pomocí funkce auto-search přímo v programu SPEED. Proud bude automaticky počítán pro každou změnu geometrie a následně bude provedeno přizpůsobení analytického modelu na MKP pomocí IPSI loop a X-Factors.
- Výstupní parametry jako ztráty v železe, ve vinutí, magnetech a bandáži stroje budou ukládány pro každou změnu geometrie.

5) Teplotní výpočet – heat transfer.

- Všechny vypočítané ztráty odpovídající příslušné geometrii budou použity v teplotním modelu a bude tak vypočítána skutečná teplota oproti předpokladu $250^\circ C$ teplota magnetů, $180^\circ C$ teplota vinutí.
- Na základě skutečné teploty na magnetech T_{mag} a vinutí T_{wdg} budou přepočítány výstupní parametry stroje.

6) Optimalizační idea.

- Navrhnout HS stroj tak, aby byl minimální objem magnetů s minimální možnou pracovní teplotou a maximální účinností stroje v zadaném objemu.
- Optimalizace by měla být provedena na základě konečných prvků v programu SPEED Laboratory a MATLAB.

7) Dílčí iterační kroky pro dosažení optima účelové funkce

- Geometrie stroje bude měněna. Pro tyto změny budou provedeny výpočty popsané v bodech 2 a 5.

- Algoritmus dle předpisu účelové funkce bude geometrii určovat tak, aby se snižovala hodnota účelové funkce a byly tak splněny požadavky v bodě 6.

Základní komunikační diagram vytvořeného optimalizačního procesu je zobrazen na Fig. 5.13. V podstatě se jedná o hierarchii programu, který byl vytvořen v programu MATLAB pomocí funkcí (scriptů), kde černé šipky (Step1 – step5) představují jednotlivé kroky popsané v bodech 1-5. Červené čárkované šipky (global parameters, matrix, losses a temperatures) představují vypočítané hodnoty jednotlivých návrhů, které jsou využity pro definici globální optimalizace (bod č. 6). Iterace ke globálnímu extrému je zajištěna pomocí hlavní funkce **optim_system**, ve které je použit zvolený optimalizační algoritmus. Hlavní funkce si dále volá pomocné funkce **computational_procedures**, neboli dílčí optimalizace definovaných modelů.

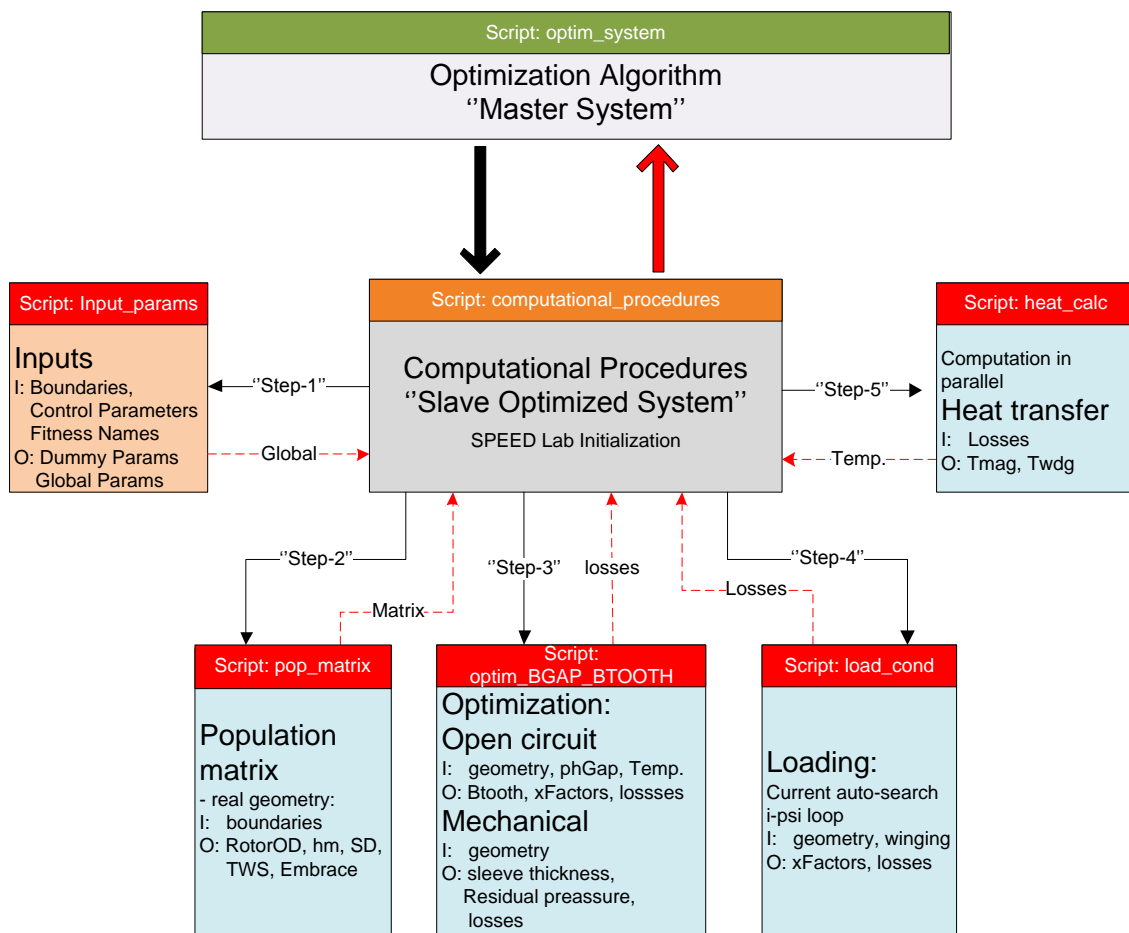


Fig. 5.13: Základní komunikační procedura optimalizace HS

Do celkové optimalizační struktury Fig. 5.14 je vnořen algoritmus SOMA se strategií ATO. Optimalizační smyčka začíná tehdy, kdy je ohodnocena počáteční matice parametrů pomocí ohodnocovací procedury Fig. 5.12. Na základě principu ATO (kapitola 3.2.2) může iterace ke globálnímu extrému začít. Při migraci parametrů

k vedoucímu jedinci dochází znova k ohodnocení modelů, protože postupně dochází ke změně původní populační matice a nahrazení horších řešení lepšími.

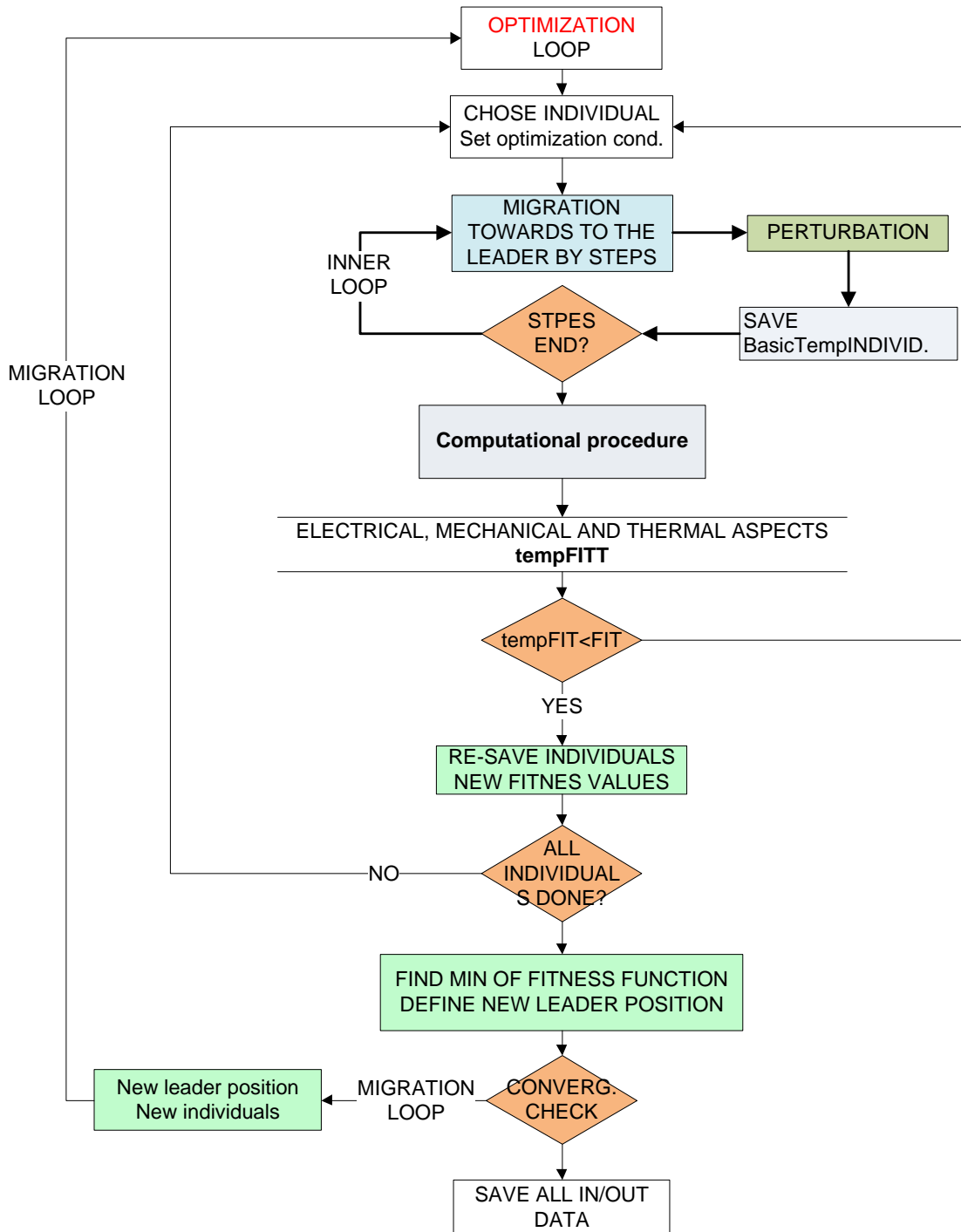


Fig. 5.14: Struktura optimalizace

5.3.2 X-Factors optimization

Pomocí X-Factors se interaktivně provádí přizpůsobení analytického modelu stroje na model vypočítaný pomocí metody konečných prvků. V programu SPEED

Laboratory je tzv. matching proveden pro nezatížený obvod a pro obvod zatížený. Program nemá automatickou funkci pro přizpůsobení jednotlivých modelů, proto bude za tímto účelem použita optimalizační metoda, která ladění provede automaticky v externím programu.

U nezatíženého obvodu se především jedná o grafické porovnání magnetické indukce uvnitř vzduchové mezery a v zubu statoru. Když získané průběhy nesouhlasí, je pomocí X-Factors provedeno ladění. Bylo zjištěno, že z možných 9 X-Factors (XBrt, XPtPk, XBetaM, Xtarc, XTW, XFringe, XSlotMod, Stf) pro nezatížený obvod, pouze 3 (XBrt, XPtPk, XBetaM) výrazným způsobem ovlivňují průběhy indukce. Správná kombinace X-Factors je nutná v závislosti na vypočítaných parametrech stroje nezatíženého obvodu. Přesný popis X-Factors u nezatíženého obvodu je proveden v [60].

V případě zatíženého obvodu je princip stejný. Provede se IPSI loop [60] výpočet a pomocí X-Factors se obvody přizpůsobí. Jedná se o výpočet spráženého toku pro různé hodnoty proudu do jmenovité hodnoty proudu na základě MKP. V tomto případě se jednalo rovněž o 9 parametrů (XBrt, XL, XLM, XLDiff, XLendt, X_R, U_lkg, BBsat a Stf), z nichž byly pouze dva, XBrt a XL, použity pro ladění zatíženého obvodu. Správná kombinace X-Factors je nutná v závislosti na vypočítaných parametrech stroje zatíženého obvodu, t.j. celkové účinnosti stroje, ztrátám stroje, indukčnosti a synchronním reaktancím v d a q osách [60].

V rámci ladění obou modelů, tj. nalezení optimální kombinace X-Factors parametrů, je vypočítána odchylka mezi skutečnou (MKP) a analyticky vypočítanou hodnotou funkce, kde funkce představuje magnetickou indukci nebo IPSI křivku. Pomocí algoritmu, který náhodně generuje parametry, je provedeno snižování těchto odchylek mezi MKP a analytickým modelem. Rozdíly hodnot zmíněných funkcí (mezi MKP a analytický modelem) byly penalizovány pomocí penalizační funkce (3.8). Přepis vytvořených objectives použitých v účelové funkci optimalizace je uveden v následujících rovnicích (5.2) a (5.3) a má za následek, že minimalizací chyby se minimalizuje hodnota objectives a tím i účelové funkce. Účelová funkce byla vytvořena na základě rovnice (3.9) v kapitole 3.4. Jako optimalizační algoritmus byla použita metoda SOMA se strategií ATO vzhledem k velmi rychlé konvergenci ke globálnímu extrému.

$$objective_{B_{gap}} = B_{gap_total}_{penalty} \quad (5.2)$$

$$objective_{B_{tooth}} = B_{tooth_total}_{penalty}$$

$$objective_{\psi} = \psi_{total}_{penalty} \quad (5.3)$$

5.3.3 Získané výsledky provedené optimalizace

V závislosti na podmínkách optimalizace uvedených v kapitole 5.3.1 byly definovány argumenty účelové funkce pomocí pravidel vytvořených v kapitole 3.4. Hlavní optimalizace je tedy složena ze 4 argumentů popisující teplotu magnetů (T_{mag}), teplotu vinutí (T_{wdg}), celkovou účinnost (η) a proudovou hustotu (J) s cílem minimalizovat teploty, maximalizovat účinnost s požadovanou proudovou hustotou J . Argumenty jsou vytvořeny postupně v rovnicích (5.4) až (5.7), kde $magMAX$, $wdgMAX$ a J_{MAX} představují maximální (referenční) hodnoty počítané veličiny.

$$objective_1 = \frac{T_{mag}}{T_{magMAX}} \quad (5.4)$$

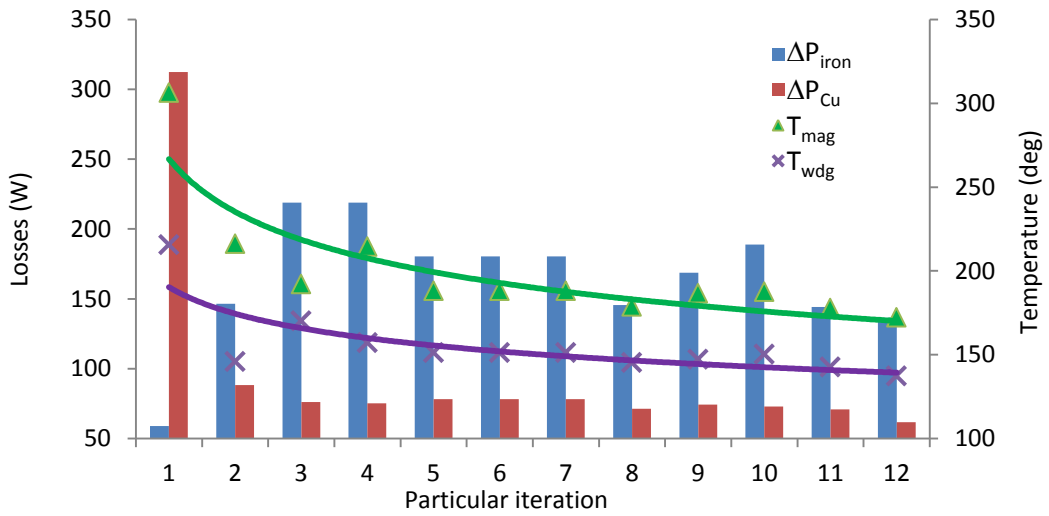
$$objective_2 = \frac{T_{wdg}}{T_{wdgMAX}} \quad (5.5)$$

$$objective_3 = 1 - \frac{\eta}{100} \quad (5.6)$$

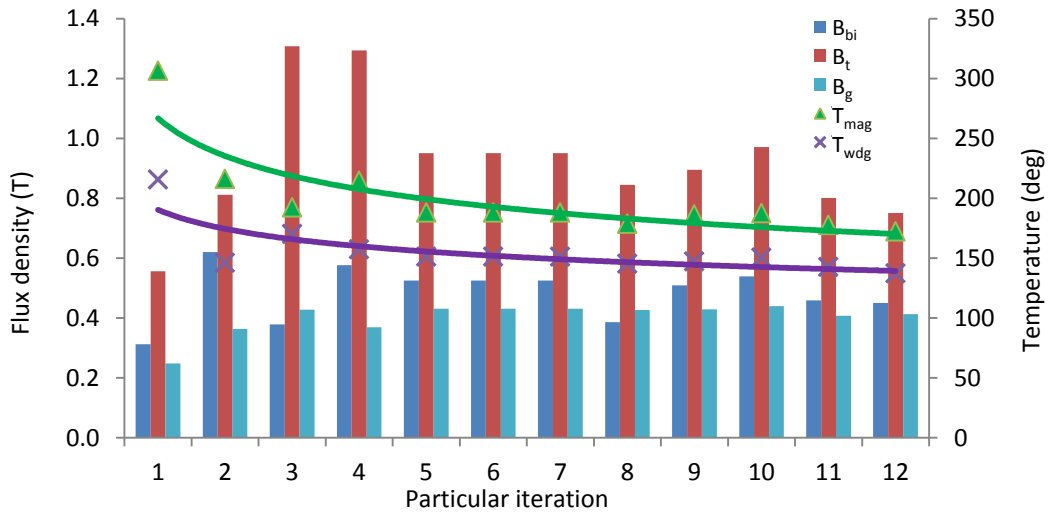
$$objective_4 = \frac{J}{J_{MAX}} - \frac{J_C}{J_{MAX}} \quad (5.7)$$

Získané hodnoty definované optimalizace vytvořeného optimalizačního procesu jsou uvedeny na Fig. 5.15 pomocí SOMA – ATO a v porovnání s GA na Fig. 5.16. Zbylé získané hodnoty, které byly dopočítány, jsou uvedeny v příloze C - App. C. 7. Při zpracování výsledků byla především věnována pozornost ztrátám v železe a v mědi a dále magnetické indukci v zubu, ve vzduchové mezeře a jhu stroje. Všechny zmíněné sledované veličiny jsou porovnány s teplotami na magnetech a ve vinutí. Hodnota odpovídající poslední iteraci je v této práci považovaná za optimální. V případě optimalizace HS doba jedné iterace trvá 2,5h s uvažováním tepelného výpočtu, mechanické optimalizace a optimalizace, kde se přizpůsobuje analytický model na MKP. Doba potřebná pro 13iterací je tedy 32,5h a pro 16iterací 40h.

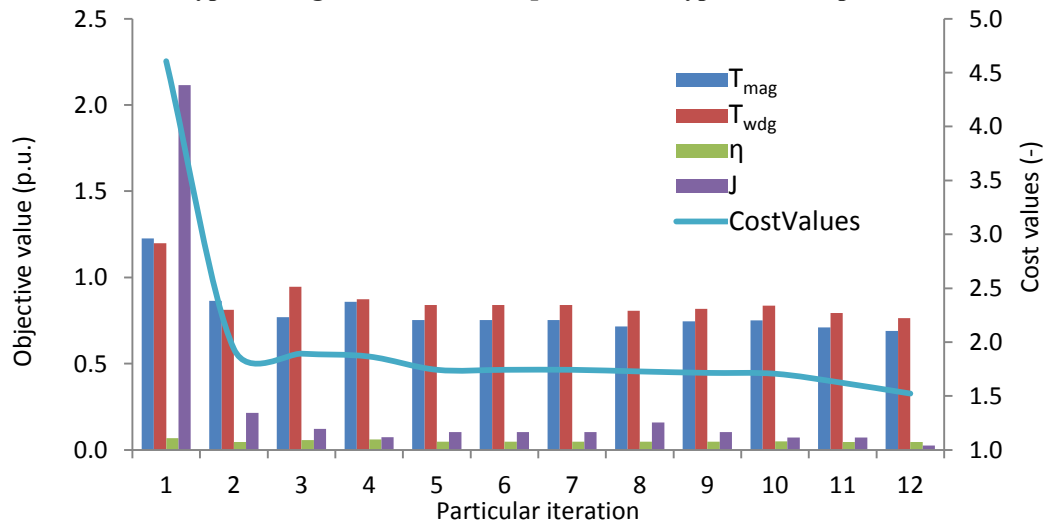
Průběh teploty během optimalizace je porovnán s vypočítanými ztrátami ve stroji Fig. 5.15 a). Například v iteraci č. 2 je konkrétní hodnota teploty ve vinutí nejnižší z celé optimalizace a přesto v tomto bodě nebylo nalezeno optimum. Důvodem jsou další požadavky na optimalizaci a to zvýšení celkové účinnosti. V tomto bodě je účinnost 94,5% (nejsou uvažovány mechanické ztráty a ztráty třením o vzduch při vysoké rychlosti otáčení). Magnetická indukce v zubu a jhu stroje je rovněž vysoká Fig. 5.15 b). Na základě informací z citlivostní analýzy není toto sycení stroje naprázdno vhodné. Optimalizace tedy pokračovala dále s ohledem na vhodnější kombinaci optimalizovaných parametrů.



a) Výpočet ztrát a teploty nejlepších parametrů během optimalizace



b) Výpočet magnetické indukce v porovnání s vypočítanou teplotou



c) Příspěvky jednotlivých objectives ohodnocovací funkce

Fig. 5.15: Získané hodnoty provedené optimalizace HS pomocí SOMA-ATO

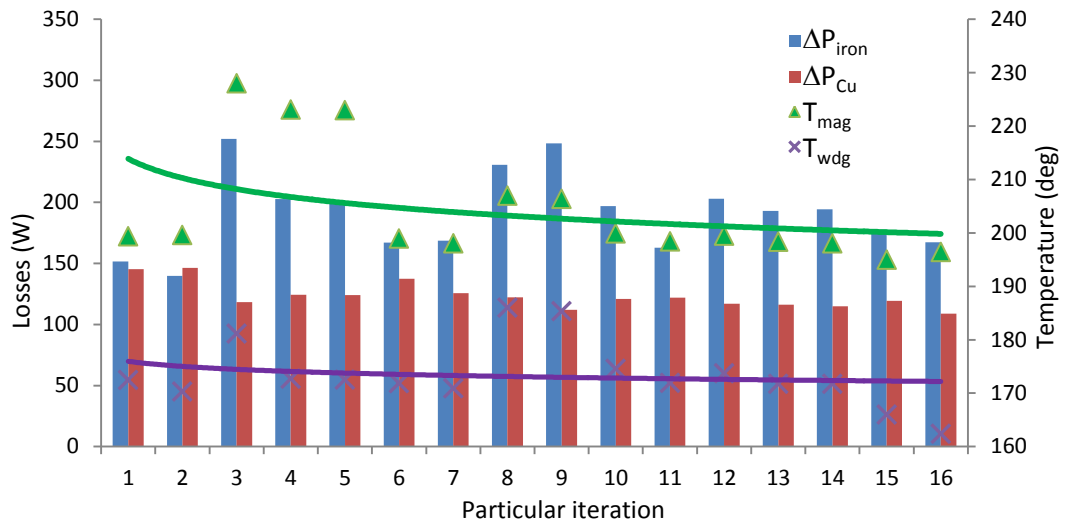
Vypočítané hodnoty teplot příslušné iterace jsou proloženy křivkou, která

ukazuje, že algoritmus vhodnou kombinací optimalizovaných parametrů má klesající charakter v obou případech algoritmů ATO a GA (teplota magnetů a teplota vinutí).

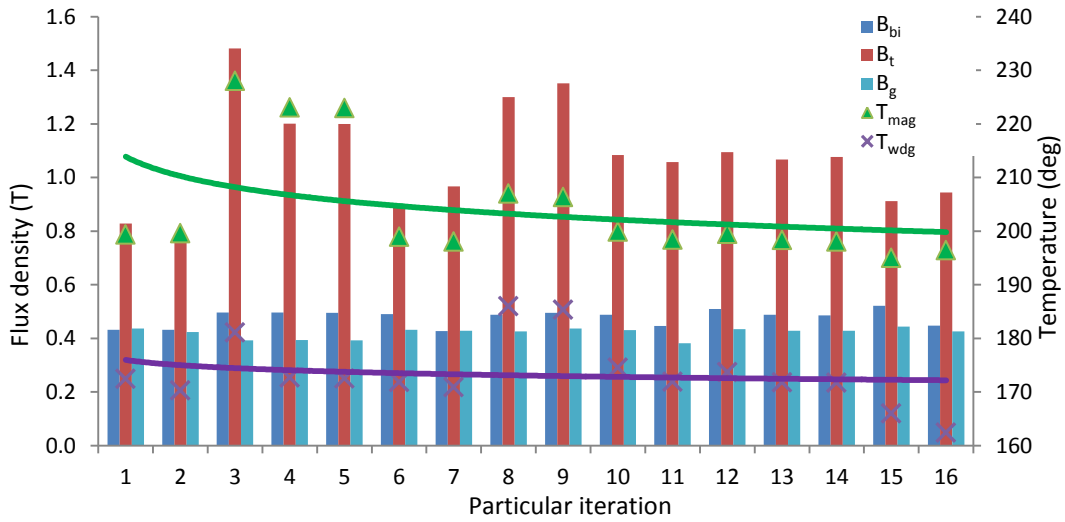
Jednotlivé příspěvky argumentů účelové funkce (objectives) jsou zobrazeny na Fig. 5.15 c). Účelová funkce včetně argumentů byla definována tak, aby se kombinací argumentů hodnota snižovala, což je splněno. Dále je vidět, že algoritmus ATO potvrzuje svoji vlastnost, a to nalézt velmi rychle extrém účelové funkce a v dalších iteracích hodnoty zpřesňovat. Porovnáním průběhu účelové funkce získané pomocí ATO s GA (Fig. 5.16 c) je patrné, že GA také pozvolna konverguje během optimalizace do stejného extrému.

Vypočítané hodnoty ztrát při jmenovitém zatížení stroje v případě GA jsou zobrazeny na Fig. 5.16 a), včetně vypočítané teploty magnetů. Klesání teploty v závislosti na kombinaci optimalizovaných parametrů je pozvolnější než v případě algoritmu ATO. Například v iteraci č. 8 a 9 vyšla konkrétní hodnota teploty nejvyšší oproti jiným iteracím. Tento výkyv je způsoben velkými ztrátami v železe a vinutí vlivem velké hodnoty magnetické indukce Fig. 5.16 b) a špatně zvolené tloušťky zubu statoru. Může se stát, že algoritmus uvízne v nějakém lokálním extrému účelové funkce a špatným vygenerováním zmutovaných parametrů (případ GA i ATO) dojde k takovému výkyvu sledovaného argumentu. Zbylé hodnoty z jednotlivých iterací jsou uvedeny v příloze C - App. C. 6.

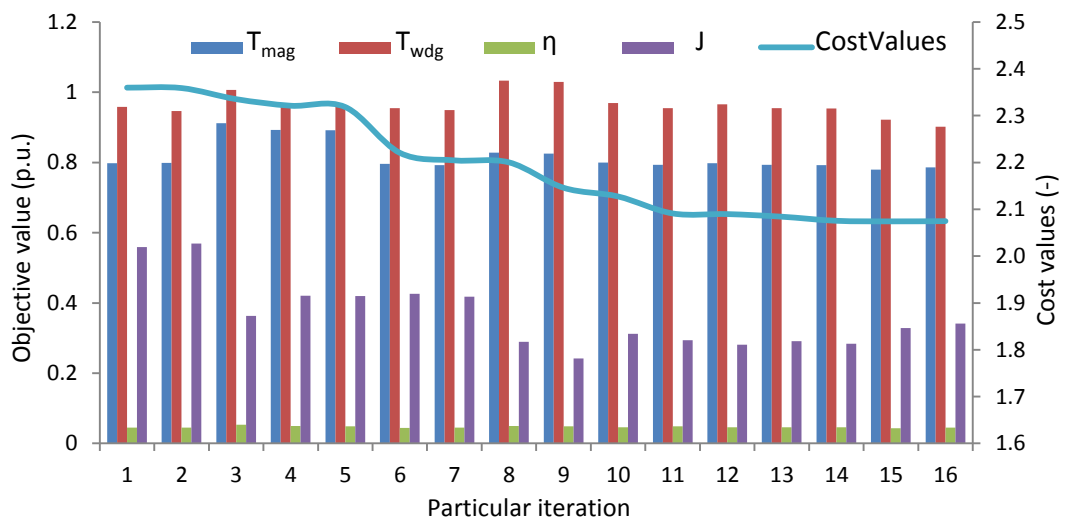
Pozornost byla věnována celkové době optimalizace HS. Vzhledem k tomu, že elektromagnetický návrh je proveden v programu SPEED pomocí MKP a tepelná síť řešena pomocí iterační metody Newton – Raphson, je v optimalizační struktuře zaveden paralelní výpočet. Celková doba simulace 10ti tepelných obvodů pomocí výpočtů řazených paralelně byla snížena ze 108 min na 15min. Je tedy možné pro nově vygenerovanou matici optimalizovaných parametrů provést teplotní analýzu paralelně. Na druhou stranu, elektromagnetický návrh a tím i mechanický návrh v programu SPEED Laboratory paralelně řešen není, protože program nepodporuje tento typ výpočtů. Pro zlepšení celkové doby optimalizace je tedy dobré využívat paralelní toolbox programu MATLAB. Kdyby byl SPEED nahrazen jiným programem s více licencemi, je možné provádět paralelní výpočty na všech uvažovaných modelech HS. Rychlost optimalizace je také ovlivněna tím, jak je jemná mesh uvažovaného elektromagnetického modelu a jak je jemná vodivostní síť teplotního modelu. Výpočetní krok, pomocí kterého se řeší transientní analýzy, ovlivňuje s použitou výpočetní sítí přesnost výpočtu a tím i dobu simulace. S větším výpočetním krokem a méně přesnější sítí bude výpočet proveden rychleji a s větší chybou. Po dokončení optimalizace je proto model přepočítán s vhodnější sítí a menším krokem simulace.



a) Výpočet ztrát a teploty nejlepších parametrů během optimalizace



b) Výpočet magnetické indukce v porovnání s vypočítanou teplotou



c) Příspěvky jednotlivých objectives ohodnocovací funkce

Fig. 5.16: Získané hodnoty provedené optimalizace HS pomocí GA

Cílem této kapitoly bylo jednak provést optimalizaci a následně vyhodnotit

použitelnost obou uvažovaných algoritmů, jejich optimalizačních podmínek a také toho, zda je zvolený typ účelové funkce postačující pro optimalizace HS. V závislosti na vypočítaných hodnotách, sumarizovaných v Tab. 5.6 a graficky zpracovaných hodnot účelové funkce na Fig. 5.15 c) a Fig. 5.16 c), jsou oba uvažované algoritmy použitelné pro optimalizaci vysokorychlostního stroje topologie 4 pólů a 24 drážek. Bylo dosaženo účinnosti 95% (ATO) a 92% (GA) s přibližně stejnou teplotou magnetů 195°C (GA) a 189°C (SOMA – ATO). Pro uvedenou účinnost existuje více možných geometrických návrhů. Jedním směrem se vydala SOMA – ATO s výškou magnetu 2.29mm a druhým směrem GA s výškou magnetu 6,26mm stejné osové výšky rotoru. Požadovaného indukovaného napětí bylo pak dosaženo změnou počtu závitů. GA v optimálním případě uvažoval 6 závitů s vyšší hodnotou proudové hustoty a SOMA – ATO 7 závitů s nižší hodnotou proudové hustoty. Obě možnosti jsou reálné, protože stroj je chlazen vodním chlazením. Drobné rozdíly mezi získanými hodnotami posledních iterací je možné zpřesnit jiným nastavením optimalizačního algoritmu. V případě GA je nutné rozšířit počet iterací a získat tak přesnější hodnotu účelové funkce. Parametry optimalizačního algoritmu SOMA – ATO byly ponechány v doporučených mezích tak, jak je uvedeno v literatuře [38]. Optimalizace pro jiné hodnoty parametrů optimalizačního algoritmu byly rovněž provedeny, ale algoritmus se nechoval dle předpokladů (pomalá konvergence)

Tab. 5.6: Porovnání získaných hodnot algoritmu ATO a GA

	RotorOD/2	h_m	T_{mag}	TWS	SD	h_s	Interference	B_g	B_t	B_{bi}
	(mm)	(mm)	(°C)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(T)	(T)	(T)
ATO	10.19	2.29	189	1.59	12.02	1.00	29.36	0.41	0.75	0.45
GA	10.64	6.26	195	1.39	10.46	1.64	30.39	0.43	0.94	0.45
	ΔP_{Cu}	ΔP_{Mag}	ΔP_{Bandaz}	$P_{celkrot}$	η	I	Cost values	N	U_s	SO
	(W)	(W)	(W)	(W)	(%)	(A)	(p.u.)	(-)	(V)	(mm)
ATO	61.75	0.006	0.1931	186,22	95.27	14.47	1.52	7	139.37	1.40
GA	109.00	0.0015	0.6014	307,89	92,31	21.67	2.07	6	128.23	1.40

Rozšířit optimalizace o další možné úlohy například snížení hodnoty THD je vzhledem ke zvolené struktuře optimalizace jednoduché. V elektromagnetickém modelu se provede výpočet hodnoty THD pro každou změnu optimalizovaných parametrů. V části programu, kde se definují hlavní argumenty účelové funkce, se vytvoří nové objectives. V každé další iteraci je tedy brán ohled na nově vytvořené objectives. Tímto způsobem je možné postupovat při rozšiřování vytvořeného optimalizačního SW HS.

5.4 Výpočty MKP

V programu Ansoft Maxwell jsou pomocí MKP výpočtů provedeny podrobnější analýzy optimalizovaného modelu a ověřeny tak získané výsledky z optimalizace. Byly vytvořeny dva modely, které odpovídají navržené geometrii pomocí optimalizace SOMA se strategií ATO a pomocí GA. V kapitole 5.4.1 jsou porovnány průběhy magnetické indukce a ladění X-faktorů pomocí SOMA. V dalších kapitolách jsou porovnány optimální parametry HS získaných pomocí SOMA – ATO a GA.

5.4.1 Magnetická indukce v podélném směru

Princip a analytický přístup programu SPEED Laboratory k návrhu elektrických strojů byl vysvětlen v kapitole 5.3.2 z pohledu X-faktorů. Pomocí SOMA jsou parametry měněny tak, aby se analyticky vypočítané B_g shodovalo s magnetickou indukci vypočítanou pomocí MKP (FEA SPEED). Získané průběhy jsou porovnány na Fig. 5.17 s hodnotami B_g vypočítaných pomocí FEA Maxwell. Hodnoty získané pomocí SW Maxwell jsou větší. Hodnoty jsou různé, což dokazuje, že použité sw pracují na různých principech výpočtu MKP (adaptivní mesh, jemnost simulačního kroku, ladění pomocí koeficientů, apod.). Na Fig. 5.17 je uveden průběh magnetické indukce v zubu počítaného v programu SPEED a úspěšnost ladění pomocí X-faktorů. Efektivní hodnota $B_g = 0,49T$ a $B_t = 0,75T$ odpovídá hodnotám získaných pomocí optimalizace SOMA se strategií ATO (hodnoty uvedeny v Tab. 5.6).

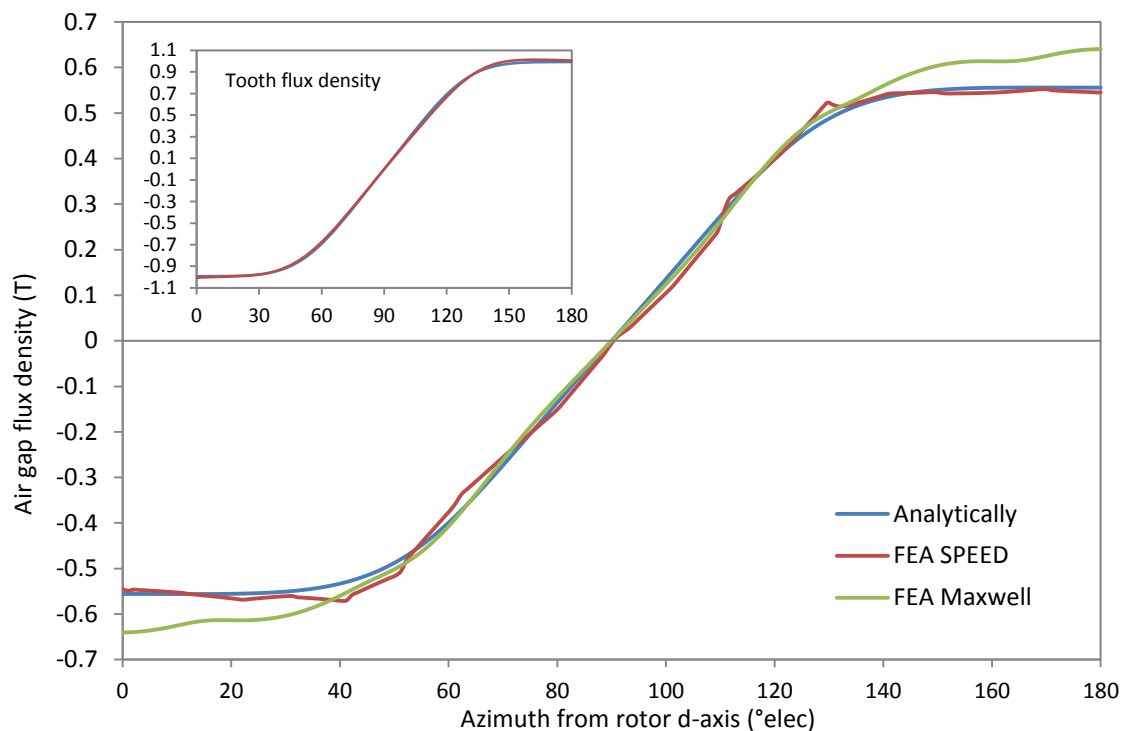


Fig. 5.17: Úspěšnost X-Factor optimalizace a porovnání získaných výsledků

Harmonická analýza je provedena pro magnetickou indukci ve vzduchové mezeře počítanou analyticky, pomocí FEA Speed a FEA Maxwell.

Analytical: $THD_B=0.4476$
SPEED: $THD_B= 0.4382$
MAXWELL: $THD_B= 0.5010$

Odchylna hodnoty činitele harmonického zkreslení magnetické indukce ve vzduchové mezeře THD_B od hodnoty počítané ve FEA Maxwell je 10% (analyticky) a 12% (FEA Speed). Rozdílnost je opět způsobena možnostmi zvoleného SW (adaptivní mesh, jemnost simulačního kroku, ladění pomocí koeficientů, apod.)

Cílem této kapitoly bylo ukázat úspěšnost metody SOMA aplikované na X-factor optimalizaci. Rychlost, efektivita a automatizace procesu ladění analytického modelu na MKP může být dále využita při vylepšování programu SPEED společností ADAPCO (vlastník licence). Návrh automatizovaného procesu může být přínosem k dizertační práci, hlavně ve využití ovládnutí výpočetního SW z externího programu.

V programu Maxwell byly vytvořeny dva modely s odpovídajícími optimálními rozměry (vypočítaných pomocí SOMA – ATO a GA Tab. 5.6). Mesh stroje byla nastavena s ohledem na přesnost výpočtu. Výpočty indukovaného napětí, cogging momentu, celkového momentu stroje a ztrát jsou provedeny pro jednu periodu napájecího napětí tj. $250\mu s$ (odpovídající 4kHz, $2p=4$, $n=120krpm$).

5.4.2 Indukované napětí

Průběhy indukovaných napětí, přepočítaných na sdruženou hodnotu U_{S1} , U_{S2} a U_{S3} , jsou zobrazeny na Fig. 5.18 pro odpovídající otáčky 120krpm. V prvním návrhu (výstupy ze SOMA algoritmu) jsou uvažovány tenké magnety h_m a menší vnější průměr *RotorOD* rotoru jak v případě druhém (výstupy z GA algoritmu). Hodnota pólového krytí zůstala nezměněna $BetaM = 0.666$. Tvar a vzájemné posunutí průběhů jsou způsobeny právě odlišností průměru rotoru a velikostí magnetů. Efektivní hodnota sdruženého indukovaného napětí je přibližně stejná, což je v případě GA návrhu $U_S = 141,05V$ (silné magnety) způsobeno nižším počtem závitů uvažovaného vinutí než v případě SOMA návrhu 134,51V. Vypočítané hodnoty indukovaného napětí pomocí programu Maxwell v porovnání s programem SPEED Laboratory jsou v toleranci 3% (SOMA - Fig. 5.18) a 8,44% (GA - Fig. 5.18).

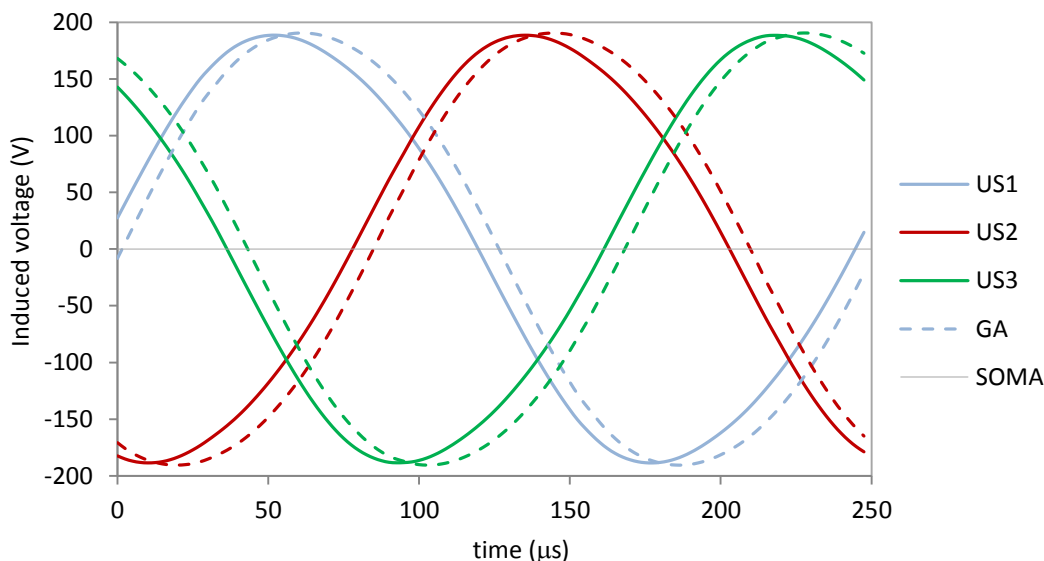


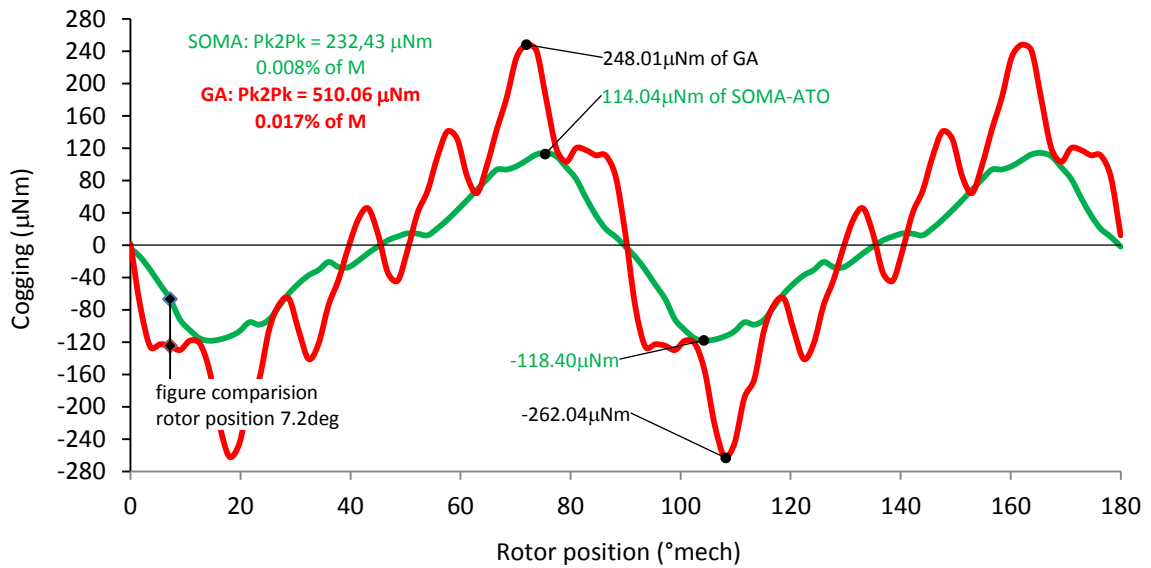
Fig. 5.18: Průběh indukovaných napětí SOMA a GA návrhu

5.4.3 Elektromagnetický moment, cogging

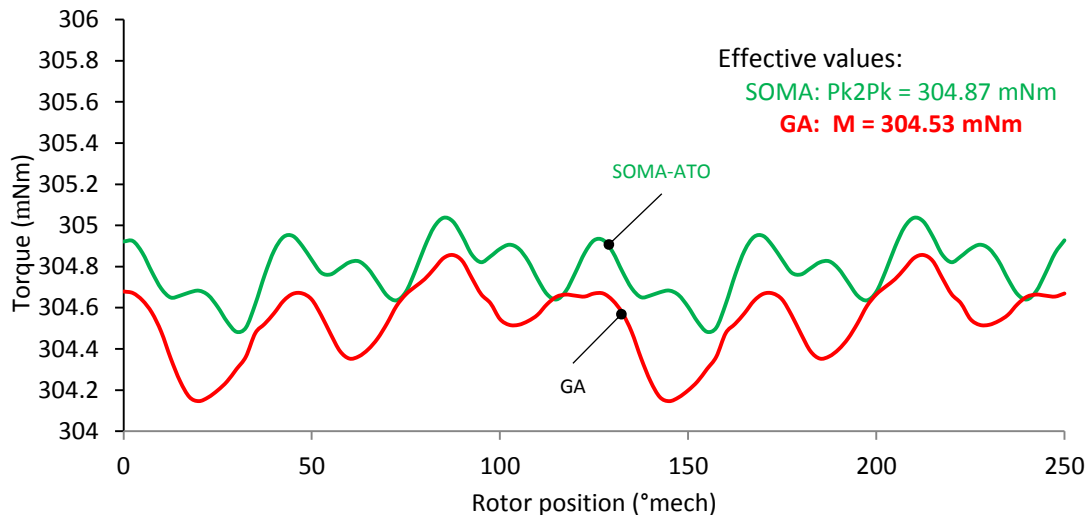
Průběh cogging momentu při nulovém proudu ve vinutí je zobrazen na Fig. 5.19 a) pro návrh pomocí GA a SOMA. Průběhy jsou zobrazeny v rozsahu 0-180° mechanických. Průběhy ustálených hodnot momentu stroje během otáčení jsou zobrazeny pro oba návrhy na Fig. 5.19 b). V případě GA návrhu hodnota cogging momentu (špička-špička) nepřevyšuje hodnotu 0,015% jmenovité hodnoty momentu stroje, v případě SOMA návrhu 0,008% jmenovité hodnoty. Maximální hodnoty cogging dosahují 248,01 μNm – GA a 114,04 μNm – SOMA návrh.

Rozdílné hodnoty jsou způsobeny odlišností v geometrii statoru a tedy i pracovním bodem magnetu na demagnetizační charakteristice. Procentuálně se jedná o velmi malé hodnoty cogging momentu, a tím i o dobrý návrh geometrie s ohledem na cogging. Na velikosti cogging momentu se přímo podílí i velikost vzduchové mezery (bez bandáže rotoru), čím je velikost větší, tím cogging klesá a naopak. Je nutné brát v potaz to, že velikostí vzduchové mezery se ovlivní celkové vlastnosti stroje, tj. indukované napětí, ztráty a velikost mechanického momentu.

Hodnoty elektromagnetického momentu (Fig. 5.19) v zatíženém stavu stroje odpovídají výkonu stroje a požadovaným otáčkám 120krpm. Velikost zatěžovacího úhlu byla nastavena na 7° s ohledem na požadovaný moment stroje. Hodnoty proudů ve vinutí byly nastaveny na 16A a 17A pro GA a SOMA návrhy. Ztráty v magnetech nebyly uvažovány pro tento typ výpočtu. Efektivní hodnota elektromagnetického momentu je 304,53 mNm – GA a 304,87 mNm – SOMA návrhu, což představuje 0,1% rozdíl.



a) Průběh cogging



b) Průběh momentu a výpočet zvlněného momentu

Fig. 5.19: Průběh jednotlivých složek momentu HS

Reprezentované návrhy dokazují také to, že různou velikostí magnetu a přizpůsobením geometrie statoru, je možné dosáhnout požadovaných hodnot výstupních veličin (Moment, indukované napětí). O tom, který návrh je pak vhodnější rozhodují výpočty, které pomocí cogging analýzy, THD analýzy, výpočtu ztrát a tedy i celkové účinnosti rozhodnou o tom, který návrh je vhodnější pro požadovanou aplikaci.

Na Fig. 5.19 a) je vyznačena oblast cogging momentu pro natočení rotoru $7,2^\circ$. Pro tyto body byly vykresleny magnetické siločáry (Fig. 5.20), které dokazují vznik cogging momentu polohy rotoru $7,2^\circ$ mechanických. Pro srovnání je zobrazena poloha 0° , kde cogging moment nevzniká. Poloha 0° mechanických je definována tak, že d-osa pólu je v ose zubu statoru.

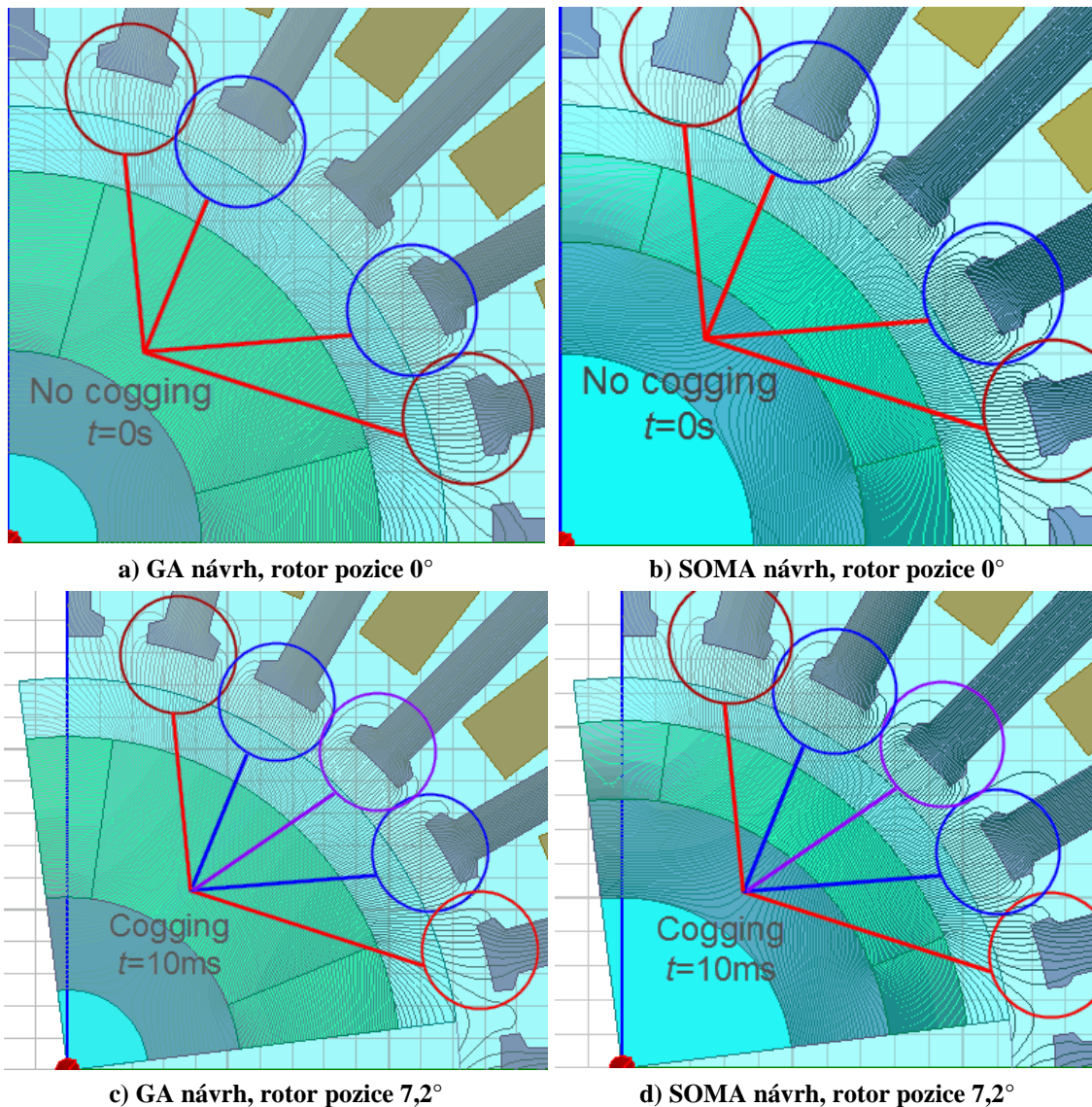


Fig. 5.20: Vyznačení míst vzniku cogging momentu v případě SOMA a GA návrhu

Na Fig. 5.20 a)-GA a b)-SOMA jsou magnetické siločáry symetrické vzhledem k d-ose pólu. Oblasti jsou vyznačeny modrými a červenými kruhy. Počet siločar a trajektorie jsou shodné právě pro vyznačené oblasti příslušných kruhů a jedná se tedy o rovnovážný stav, kdy je poloha rotoru rovna 0° . V případech, kdy je pozice $7,2^\circ$ Fig. 5.20 c) a d), jsou určité nesymetrie magnetických siločar vyznačených oblastí. Například, ve vyznačené oblasti červeným kruhem – levá strana od d-osy pólu, je větší hustota siločar jak na pravé straně od d-osy pólu. To platí i v případech zbylých oblastí. V rotoru pak vzniká cogging moment, tj. moment, který je potřebný pro natočení rotoru do rovnovážné polohy vzhledem ke statoru.

5.4.4 Výpočet ztrát v magnetech a železe

Při výpočtu ztrát ve stroji HS je velká pozornost věnována rozložení ztrát v železe

a dále ztrátám elektrického původu v magnetech a bandáži rotoru. Prezentované hodnoty odpovídají optimálním návrhům zvolených optimalizačních algoritmů SOMA a GA. V závěru kapitoly je porovnána efektivita optimalizačního algoritmu vzhledem k výpočtům ztrát.

Ztráty v železe jsou počítány u obou návrhů a porovnány tak místa s největším lokálním zatížením. Ztráty jsou počítány pomocí transientní analýzy, tj. s časově proměnným krokem simulace. Doba simulace odpovídá mechanickým otáčkám stroje. Průběh ztrát pro jednu periodu napájecího napětí je zobrazen na Fig. 5.21. Hodnota ztrát v případě GA návrhu je 124,5W a v případě SOMA návrhu 78,4W. Hodnota je odlišná proto, že magnet v GA návrhu má větší výšku a tím je ovlivněn pracovní bod magnetu a také to, že geometrie statoru (GA) má jiné rozměry. Rozložení ztrát ve stroji odpovídající natočení rotoru 0° je zobrazena ve stejném obrázku (Fig. 5.21). Největší hodnota ztrát GA návrhu – levá strana obrázku je $2,78e7 \text{ W/m}^3$. V porovnání se SOMA návrhem je hodnota $1,78e7 \text{ W/m}^3$. Vždy se jedná o místa statorového jha případně zubu statoru. Počítané ztráty odpovídají otáčkám 120krpm (4kHz). Materiál statoru je použit Arnon 7 s 3,25%Si (App. C. 5) se ztrátovým číslem $1,15\text{W/kg @ 60Hz, 1T}$.

Pozn.: Výsledné geometrie (Fig. 5.21) jsou uvedeny pro porovnání získaných výsledků z optimalizací vzhledem k celkovému času optimalizace (SOMA a GA stejné), nikoliv počtu iterací. Každý algoritmus vyžaduje své specifické nastavení parametrů a celková doba může ukázat vhodnost použité metody a to, zda se hodnoty pohybují v okolí pravděpodobného globálního extrému účelové funkce.

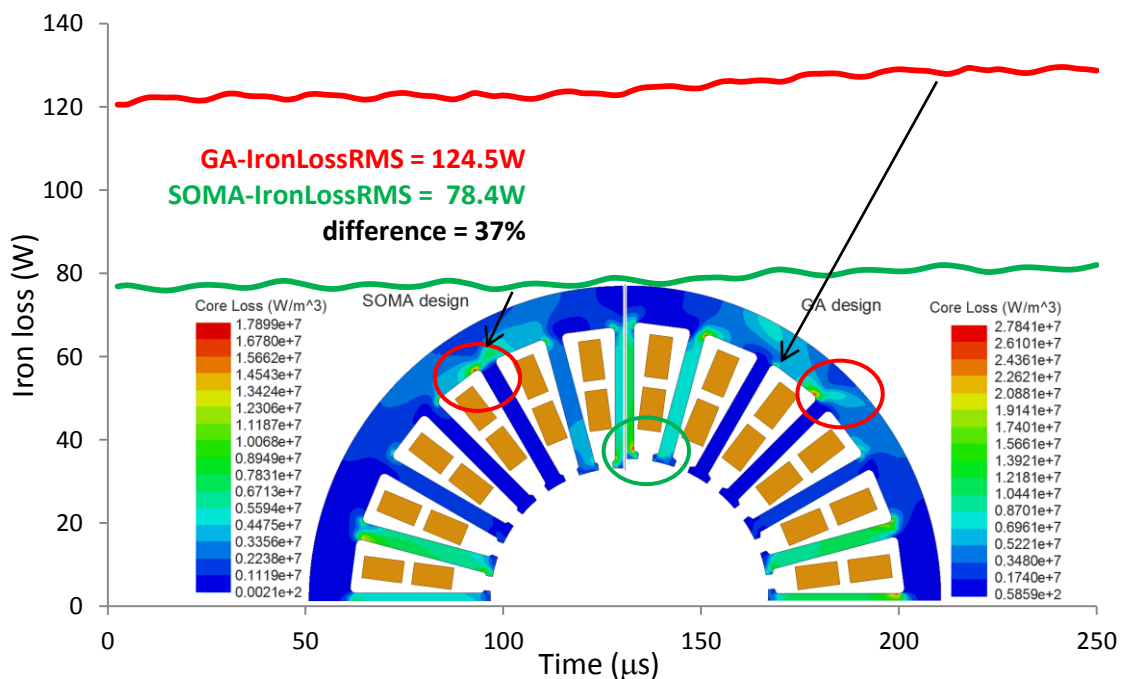


Fig. 5.21: Ztráty v železe HS návrhu GA a SOMA

Celkový průběh ztrát v rotoru (magnety a bandáž) jsou uvedeny na Fig. 5.22. Rozložení ztrát v rotoru je zobrazeno pouze v jeden časový okamžik, odpovídající 250 μ s. Průběh celkových ztrát v rotoru (suma ztrát v magnetech a bandáži rotoru) jsou zobrazeny na Fig. 5.22 a. Pro návrh pomocí SOMA algoritmu vychází ztráty 186,22mW a 307,89mW pro GA návrh. Hodnota je vyšší proto, že bandáž rotoru u GA návrhu je větší 1,64 mm (1mm – SOMA návrh). Rozložení ztrát v bandáži rotoru je zobrazeno na Fig. 5.22 c. V případě GA návrhu jsou ztráty situovány po vnější straně bandáže ve větší míře jak v případě SOMA. Vliv vířivých proudů je o to větší, o kolik je větší vnější rádius bandáže rotoru – GA 12,28mm , SOMA.11,19mm. Velikost vzduchové mezery je v obou případech stejný 1,5mm. Elektrická vodivost bandáže je 826446,28S/m [63].

Vzhledem k tomu, že bandáž rotoru je menší než v případě GA, je tedy magneticky menší i vzduchová mezera. Vliv velikosti vzduchové mezery se projeví na velikosti ztrát vířivými proudy a hysterezních ztrát v magnetech. Průběh ztrát v magnetech je zobrazen na Fig. 5.22 b. V tomto případě vychází ztráty v magnetech menší u GA návrhu 1,458mW (6,079mW SOMA), což byl předpoklad. Rozložení ztrát je zobrazeno na Fig. 5.22 d, kde je možné si všimnout hloubky vniku vířivých proudů a oblasti, kde jsou ztráty v magnetech nejvýraznější.

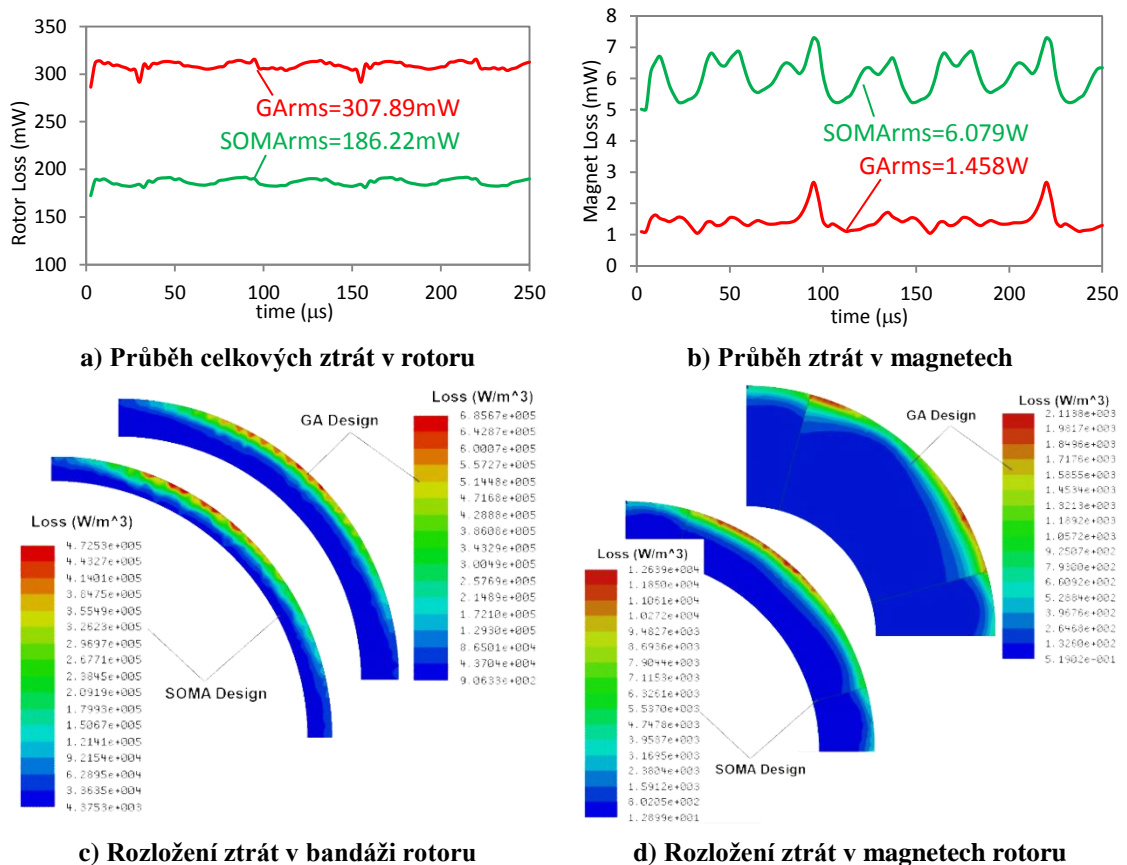


Fig. 5.22: Průběh a rozložení ztrát v rotoru HS pro návrh pomocí GA a SOMA

5.4.5 Výpočet hlavních indukčností stroje

Cílem této kapitoly bylo zjistit, jakým způsobem jsou odlišné indukčnosti stroje v případě GA návrhu a SOMA návrhu. Vzhledem k tomu, že výpočet indukčností v d-ose a q-ose přímo nefiguroval v optimalizaci, jsou porovnání důležitá. Každý optimální návrh (GA a SOMA) má jinou geometrii (Tab. 5.6) a tím i indukčnosti. Indukčnost v programu MAXWELL byla vypočítána na základě transformace třífázového napájecího proudu do d-q souřadného systému. V programu byl vytvořen model se statickou analýzou a definováno vinutí. V případě statické analýzy je nutné jmenovitou hodnotu proudu přepočítat na celkový proud v drážce (hodnotu proudu vynásobit počtem závitů) a provést analýzu. Výsledkem analýzy je hodnota spřaženého toku příslušné fáze. Po transformaci do d-q souřadného systému je pak možné dle vztahu (5.8) získat příslušnou indukčnost.

$$L_d = \frac{\Psi_d}{I_d}; L_q = \frac{\Psi_q}{I_q} \quad (5.8)$$

Indukčnost je vypočítána pro tři případy, kdy je stroj napájen čistě složkou:

- d-proudu, $I_d = 96\text{A}$, $I_q = 0$,
- q-proudu, $I_d=0\text{A}$, $I_q=96\text{A}$,
- d-proudu a q-proudu, tj maximálního proudu vinutím.

Tab. 5.7: Porovnání indukčností vinutí HS návrhu GA a SOMA

Name	Unit	GA			SOMA		
coil angle	(°ele)	-15			-15		
I_d	(A)	96	0	92.73	119	0	114.95
I_q	(A)	0	96	24.85	0	119	30.80
I_1	(A)	92.73	24.85	96.00	114.95	30.80	119.00
I_2	(A)	-67.88	67.88	-48.00	-84.15	84.15	-59.50
I_3	(A)	-24.85	-92.73	-48.00	-30.80	-114.95	-59.50
ψ_1	(Wb)	0.01083	0.00290	0.01121	0.01922	0.00515	0.01989
ψ_2	(Wb)	-0.00793	0.00793	-0.00561	-0.01407	0.01407	-0.00995
ψ_3	(Wb)	-0.00290	-0.01083	-0.00561	-0.00515	-0.01922	-0.00995
ψ_d	(Wb)	0.01121	0.00000	0.01083	0.01990	0.00000	0.01922
ψ_q	(Wb)	0.00000	0.01121	0.00290	0.00000	0.01990	0.00515
L_d	(mH)	0.70070	0.00000	0.70072	1.00327	0.00000	1.00319
L_q	(mH)	0.00000	0.70076	0.70074	0.00000	1.00320	1.00318

Pozn.: Rozdíly v Tab. 5.7 jsou dané jinou tloušťkou magnetů a počtem závitů. Výpočet indukčností je tedy proveden pro odpovídající proudy daného návrhu

Hodnoty pro definované případy a návrhy geometrie jsou uvedeny v Tab. 5.7. Kontrola toho, zda je transformace správně provedena, může být provedena pomocí součtu hodnot proudů $I_1+I_2+I_3=0A$. Ve třetím případě výpočtu indukčností, tj. I_d a I_q jsou voleny s ohledem na jmenovitou hodnotu proudu vinutím, jsou indukčnosti v případě GA návrhu v d a q ose rovny 0,7mH, v případě SOMA jsou přibližně rovny 1mH. Změna se dala očekávat, protože u SOMA návrhu je o jeden závit více. Vinutí stroje je tedy navrženo tak, že výsledný poměr indukčností v d a q ose je roven 1. Vhodným nastavením proudů je pak možné stroj odbuzovat ať už v d-ose nebo q-ose. Výpočet indukčností je proveden bez buzení statoru, magnety nejsou při výpočtech uvažovány.

Rozložení magnetického pole pro všechny uvažované případy je zobrazeno na Fig. 5.23 jak pro GA návrh Fig. 5.23 a), b) a c), tak SOMA návrh Fig. 5.23 d), e), f).

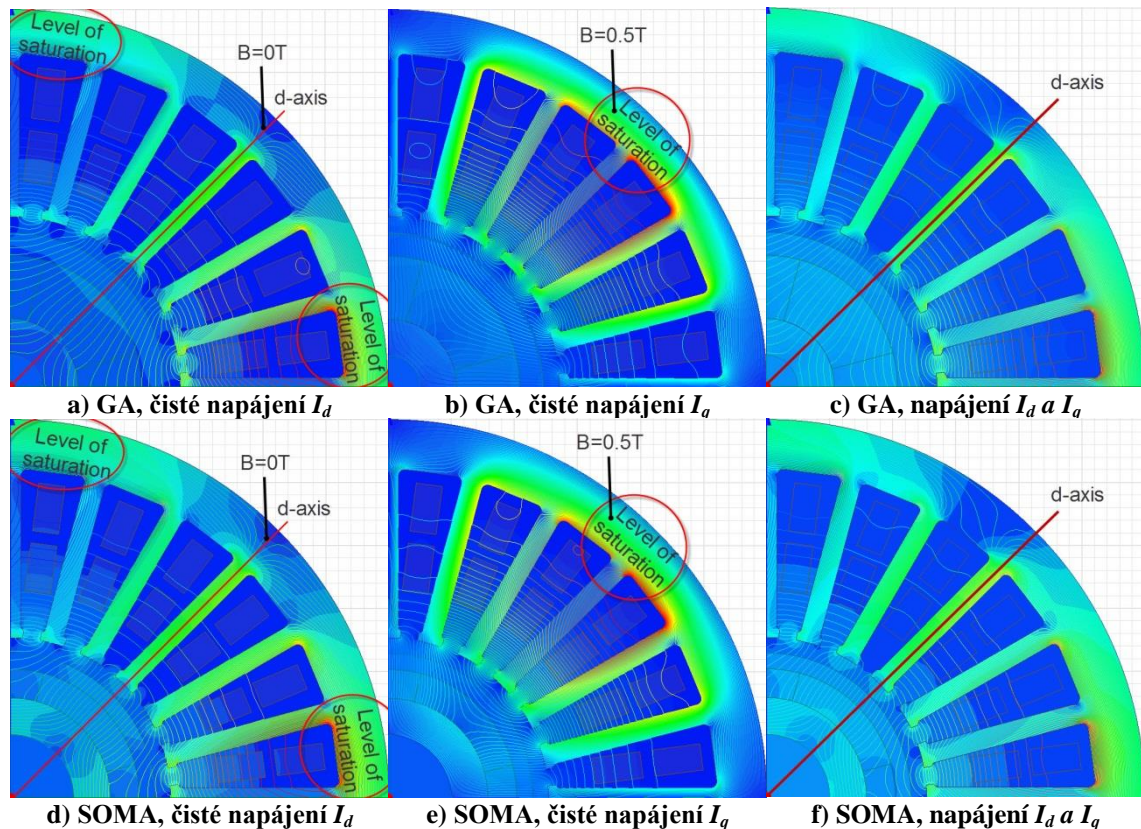


Fig. 5.23: Výpočet indukčností pro různé případy buzení fází stroje

5.5 Shrnutí kapitoly multi-fyzikální optimalizace HS

Cílem kapitoly bylo představit koncept multi-fyzikálního návrhu vysokorychlostního stroje s permanentními magnety na rotoru s využitím optimalizačních algoritmů umělé inteligence. Na základě teoretického rozboru optimalizačních algoritmů (kapitola 3) byly vybrány algoritmy GA a SOMA s cílem dosáhnout co nejlepších hodnot účinnosti a mechanických a teplotních parametrů. Zmíněné disciplíny návrhu stroje jsou řešeny systémově, tj. iterativním způsobem je dosaženo požadovaného výsledku. Pro jednotlivé disciplíny návrhu je provedena parametrická analýza – mechanická, tepelná, na jejímž základě je možné předpovědět optimum příslušného návrhu vzhledem k požadovaným elektromechanickým-teplotním vlastnostem stroje.

Mechanická parametrická analýza se týkala především vlivu tloušťky materiálu bandáže rotoru na residuální dotykové napětí mezi magnety a bandáží rotoru s ohledem na vysoké rychlosti 120krpm. Analýza byla provedena pro různé použité materiály (INCONEL, STEINLESS, Titanium a Carbon fiber). Jako nejvhodnější materiál pro bandáž rotoru HS byl zvolen INCONEL vzhledem ke svým lepším mechanickým a teplotním vlastnostem. Podmínkou výběru materiálu bandáže rotoru bylo to, že materiál musí snášet teploty kolem 300°, vydržet mechanické poměry vlivem vysokých otáček stroje a držet celý rotor tak, aby nedošlo k jeho deformaci. Dosažené výsledky z parametrických analýz jsou prezentovány v kapitole 5.2.1.

Další parametrická analýza byla provedena v závislosti na pracovní teplotě magnetů. Teplotní výpočet byl proveden pro každou změnu vybraných parametrů, geometrie rotoru a statoru, a tím posuzován vliv ztrát stroje na teplotu magnetů a vinutí. Při této parametrické analýze se potvrdil fakt, že existuje taková kombinace parametrů, při které existuje minimum pro různé stavy sycení zubů a jha stroje, více v kapitole (5.2.2). Byla tedy nalezena geometrie s minimální požadovanou teplotu magnetů. Teplota v magnetech byla snížena o 3,8% při snížení magnetické indukce v zubu z 1,4T na 1,0T (Fig. 5.7). Snížením magnetické indukce v zubu (stav naprázdno), je dosaženo pomocí změny geometrie statoru (větší šířka zubu – menší B_r při stejných vnějších rozměrech statoru a rozměrech magnetu). Tato analýza pomohla pochopit, proč na úlohu nelze nahlížet jako na elektromagnetický problém, a proč je nutné v návrhu zohlednit právě teplotní a mechanické výpočty.

Na základě parametrických analýz byly definovány rozsahy parametrů určených k optimalizaci a byla vytvořena smyčka, pomocí které se iterativně počítaly požadované hodnoty jako například indukované napětí, ztráty, teplota magnetů, účinnost, apod. Smyčka byla řízena pomocí algoritmu a výsledky průběžně analyzovány s ohledem na

maximální účinnost a minimální teplotu magnetů v požadovaném objemu stroje (kapitola 5.3.1). Každá optimalizace byla spuštěna několikrát po sobě s ověřením konvergence do globálního extrému účelové funkce. Výsledkem optimalizace HS jsou dva koncepční návrhy (tloušťky magnetů a geometrie statorových plechů), kde jeden je proveden pomocí GA a druhý pomocí SOMA algoritmu při stejných podmínkách optimalizace (penalizační a účelová funkce, rozsahy optimalizovaných parametrů, optimalizační proces, apod.).

V závěru jsou provedeny přesnější výpočty v programu MAXWELL jako dalšího nástroje, kam je možné implementovat otevřenou smyčku optimalizace HS. Jsou provedeny především výpočty indukovaného napětí, *THD*, cogging momentu, elektromagnetického momentu v ustáleném stavu, ztrát ve stroji a hlavních indukčností pro oba zmíněné optimální návrhy HS (kapitola 5.4). Vzhledem k definované prioritě získat maximální možnou účinnost při požadovaném momentu stroje a minimální teplotě magnetů, byl algoritmus SOMA úspěšnější. Optimální hodnoty hledaných parametrů jsou sumarizovány v Tab. 5.6.

Hlavním přínosem optimalizace HS je to, že proces získání optimálních výsledků je otevřený (možnost editace scriptu, změny struktury optimalizace, algoritmu a modelů) s možností napojení na jakýkoliv výpočetní nebo MKP program, ale také to, že oba algoritmy našly minimum účelové funkce při dosažení požadovaných parametrů (momentová konstanta, napěťová konstanta). Algoritmy byly využity i při řešení dílčích úloh například automatické ladění analytického modelu na MKP model pomocí X-factors v programu SPEED Laboratory (kapitola 5.3.2).

6 PMSM synchronní stroj

Tato kapitola byla vytvořena ve spolupráci s průmyslem v rámci řešení projektu MPO FR-TI1/082. Nejedná se o komerční využití výsledků výzkumu a vývoje, ale spíše o publikaci možností řešení projektu aplikovaných technických možností optimalizačních algoritmů prováděných v příslušných letech 2009 - 2013. Vzhledem k tomu, že dílčí výzkumné zprávy [54] - [57] jsou evidovány u spoluřešitele, jsou v seznamu použité literatury uvedeny pouze jejich citace. Cílů projektu bylo vymezeno několik, ale nejvýznamnější pozornost byla věnována optimalizaci samostatného magnetu jak po teoretické stránce, tak po praktické stránce. Teoreticky získané výstupy z aplikovaných optimalizačních algoritmů určité úlohy mohou být s určitou nepřesností považovány za relevantní, což bylo dokázáno v kapitole 4.

Tato kapitola byla vytvořena za účelem rozšířit oblast, kde mohou být optimalizační algoritmy užitečné a co je možné s nimi provádět u strojů se jmenovitou rychlostí do 6000rpm. To jaké algoritmy jsou pro tyto účely použity, je určeno v předcházejících kapitolách. Bude využito stejného postupu pro definování struktury optimalizace, definice účelové funkce, váhových koeficientů a penalizační funkce, jako v kapitole 3 a následně 4. V předcházející kapitole byl elektromagnetický model vytvořen v programu SPEED Laboratory a pomocí m-file kódu (MATLAB) napojeného na SPEED a provedena optimalizace. V této kapitole bude využita stejná myšlenka, pouze s tím rozdílem, že elektromagnetický model bude vytvořen v programu MAXWELL, který bude ovládaný m-file kódem z MATLABU. Tento koncept s sebou přináší další možnosti využitelnosti otevřeného optimalizačního skriptu ve spolupráci s dalším programem, využívajícím MKP [59].

Řez stroje s vyznačením důležitých optimalizovaných parametrů je uveden na Fig. 6.1. Technické parametry stroje jsou uvedeny v Tab. 6.1 pro topologie 10 pólů, 12drážek aktivní délka 160mm a 8 pólů, 12drážek délka 130mm.

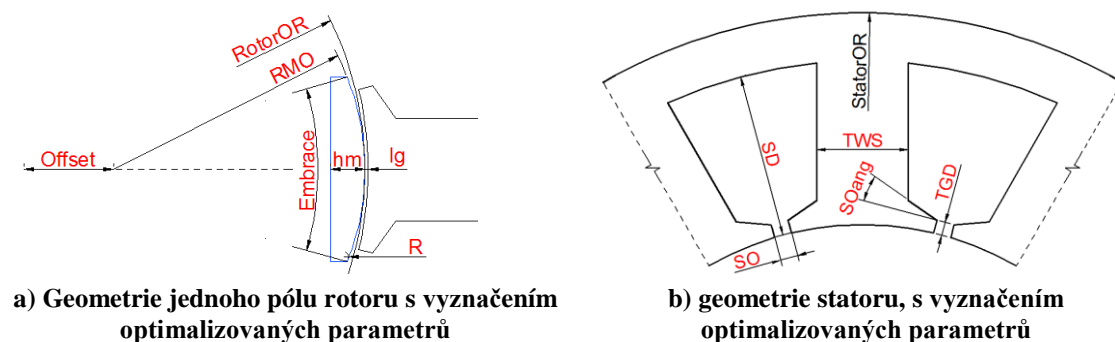


Fig. 6.1: Geometrie PMSM

Jedná se o stroje se jmenovitou rychlostí 3000 rpm, momentem 50Nm. NdFeB magnety typu ATMAX33EH jsou umístěny na rotoru s paralelní magnetizací,

parametry použitého magnetu jsou uvedeny v Příloze D - App. D. 3. Je použit materiál plechů M15 29 tloušťky 0.35mm, parametry BH a BP křivek jsou uvedeny v příloze D App. D. 1 a App. D. 2.

6.1 Parametrický model PMSM

Cílem parametrického modelu je vytvořit geometrii stroje tak, aby bylo možné během návrhu stroje měnit alespoň základní rozměry.

V parametrickém modelu bude možné měnit základní rozměry magnetu jako tloušťka magnetu v podélném směru h_m (mm), velikost pólového krytí magnetu *Embrace* (p. u.), vnější radius magnetu RMO – popřípadě vyniklost *offset* (mm) a v případě parametrizace velikosti zaoblení hrany magnetů i parametr R (mm). V Maxwellu je možné kreslit objekty ve 2D i 3D, ale jejich parametrizace není vždy užitečná. V konkrétním případě není možné vytvořit parametrický model se zaoblenou hranou ve 2D a je tedy nutné přistoupit k parametrizaci jiným způsobem – výpočtem předem zvolených bodů v závislosti na základních rozměrech stroje. Tímto postupem je možné vytvořit více segmentů na povrchu magnetu a tím docílit i určité přesnosti výpočtu. K výpočtu dílčích bodů byly použity průsečíky rovnic přímek, kružnic a oblouků, které jsou počítány v souřadném systému $[x, y, z]$, kde pro 2D model byla hodnota $z = 0$. V případě zaoblení hran zase tečné body přímek a kružnic.

Parametrizace modelu může být například využita při změně materiálu PM a následném návrhu nových rozměrů magnetu. K tomu může být použito právě optimalizačních algoritmů, kde mohou být rozměry navrhovány a upravovány z různých návrhových hledisek, jako je úprava materiálu, cena, celkový objem materiálu, vlastnosti, apod.

6.1.1 Volba kroku výpočtu, přesnost mesh modelu

Volba časového kroku a doby simulace ovlivňuje přesnost výpočtu i celkovou dobu simulace. Použitím metod konečných prvků v optimalizačních úlohách jsou zvyšovány nároky na dobu výpočtu stroje a zároveň zvyšovány požadavky na použitý hardware výpočetní stanice. V této kapitole je stanovena doba výpočtu jedné simulace včetně použitých kroků vzhledem k co možné nejmenší přípustné hodnotě (doby simulace) a tedy rychlejší konvergenci optimalizační metody. Volba časového kroku bude stanovena na přípustnou mez, tedy na mez, kdy bude odchylka, respektive chyba výpočtu, maximálně do 10% od přesného výpočtu.

Přesný výpočet jakéhokoliv modelu bude stanoven pro výpočet, kdy bude spočítáno minimálně 200 vzorků (kroků, apod.) na jednu periodu výpočtu. Následující analýzy jsou provedeny pro výpočet indukovaného napětí a cogging momentu a to pro

200 vzorků, 100 vzorků, 50 vzorků a 40 vzorků na periodu výpočtu. Výsledky jsou publikovány v článku [50] a [57], kde nejpřesnější výsledek byl považovaný pro 200 vzorků.

Doba simulace (výpočtu) jedné periody indukovaného napětí může být stanovena dle následujícího vztahu (6.1). Při výpočtu stroje je nutné znát napět'ovou konstantu stroje, která je vztažena na 1000 otáček (1000rpm). Pro otáčky 1000rpm a počet pólových dvojic $2p = 10$ je tedy hodnota periody 4ms.

$$f = \frac{p \cdot n}{60} = \frac{5 \cdot 1000}{60} = 83.3\bar{3} \text{ Hz} \Rightarrow t = \frac{1}{f} = 12.12 \text{ ms} \quad (6.1)$$

Při výpočtu ztrát stroje, je zase nutné počítat ztráty při otáčkách 3000rpm, tedy pro $2p = 10$, bude doba simulace dle vztahu (6.2)

$$f = \frac{p \cdot n}{60} = \frac{5 \cdot 3000}{60} = 250 \text{ Hz} \Rightarrow t = \frac{1}{f} = 4 \text{ ms} \quad (6.2)$$

U cogging momentu, který vzniká především vlivem reakce rozptylových magnetických toků mezi hranou magnetu a otevřením drážky ve směru otáčení, je určení doby výpočtu obtížnější. Při optimalizaci stroje AKM8 délky 160mm je cogging moment analyzován při pohybu pouze přes jednu polovinu drážky statoru, tedy $7,5^\circ$. Cogging moment byl nejprve spočítán pro celou půlku stroje a po odečtení hodnot jedné periody byla hodnota $7,5^\circ$ dostačující.

Po provedení výpočtů obou modelů (Indukovaného napětí a cogging momentu) je možné každou hodnotu zpřesnit změnou kroku simulace popřípadě použité mesh modelů. Dále je volbu kroku vhodné měnit v závislosti na tom, co od výpočtu požadujeme, jestli přesnost výpočtu, rychlost výpočtu, nebo obojí.

S volbou kroku simulace dále souvisí mesh stroje. Jinými slovy, pokud bude mesh stroje špatně nastavena a doba kroku výpočtu bude velmi malá, stále mohou být získané výsledky ovlivněny chybou. Proto je dobré před vlastním výpočtem provést několik kroků jemnosti meshe a doby kroku výpočtu a pak teprve stanovit vhodnost použité mesh a kroku výpočtu.

6.2 Optimální tvar drážky a geometrie rotoru PMSM.

Kapitola je zaměřena na optimalizaci vybraných geometrických rozměrů (Fig. 6.1 b) s cílem minimalizovat objem magnetů, maximalizovat účinnost stroje a zachovat moment stroje. Technické parametry stroje jsou uvedeny společně se získanými optimálními rozměry v následující Tab. 6.1. Podrobnější popis provedených optimalizací je také uveden ve výzkumné zprávě 2011 [56] a výsledky publikované na mezinárodní konferenci LVEM 2011 [50], POWERENG 2011 [43] a LVEM 2012 [51].

Získané výsledky jsou porovnány s originálním strojem příslušné topologie. Hodnoty optimalizovaných parametrů včetně výstupních hodnot z optimalizace jsou sumarizovány v Tab. 6.1. Byly vytvořeny dvě optimalizační úlohy Optim1 a Optim2. Cílem bylo vždy získat maximální možnou účinnost při zachování vnějších rozměrů stroje, momentu a indukovaného napětí. Další sledované parametry byly THDu, magnetická indukce B_t , B_{bi} . Účelová funkce byla v první simulaci (Optim1) definována pouze pro požadované hodnoty momentu na hřídeli M , napětí E_0 , magnetické indukce statoru B_t , požadavek maximální účinnosti a minimální hodnoty THD_u . V druhé simulaci (optim2) byla účelová funkce doplněna o požadavek na minimální objem použitých magnetů za stejných podmínek Optim1. Každá optimalizace byla opakována dvakrát pro zjištění přesnosti konvergence k minimální hodnotě účelové funkce. V tabulce je možné porovnat tyto skutečnosti na silně zvýrazněném řádku objemu magnetů. Toto rozšíření bylo doplněno za účelem ukázat, že optimalizace je možné rozšířit o jakýkoliv další objective, například o ekonomické optimalizace, tepelné požadavky, popřípadě mechanické vlastnosti stroje. Celková účinnost stroje je 96%, pro všechny případy.

Tab. 6.1: Získané výsledky optimalizace PMSM

Name	Unit	8 poles , 12 slots			10 poles, 12 slots		
		Orig.	optim1	optim2	Orig.	optim1	optim2
RotorOR	mm	65	71.04	67.50	69.80	70.50	70.56
l_g	mm	0.7	1.42	1.20	0.7	1.21	1.80
h_m	mm	8.848	10.000	7.000	7.000	9.060	7.081
Embrace	°ele	160	151	130	159.00	149.78	130.01
RMO	rad	38	39.99	30.00	51.4	37.53	39.79
SD	mm	37	35.83	40.00	37.5	38.51	38.33
TWS	mm	21	19.23	17.30	21	17.04	15.79
SO	mm	4	3.00	1.50	4	1.00	3.60
TGD	mm	3	3.20	3.60	3	3.80	2.10
SOAng	°	20	19.70	18.00	20	17.10	20.40
I	A	46	41.03	44.40	41	56.77	45.15
N	-	52	56.00	58.00	37	31.00	41.00
Cost values	-	-	0.13	10.16	-	0.06	0.64
PP	-	4	4.00	4.00	2	2.00	2.00
B_t	T	1.6	1.60	1.60	1.6	1.60	1.60
B_{bi}	T	1.6	1.60	1.47	1.6	1.60	1.54
S_m	cm ³	304.3	360.76	190.35	175	215.58	150.40
M	Nm	50	49.99	49.99	50	50.00	50.00
E_0	V	280	280	280	280	280	280
THD_u	%	1.00	0.51	0.44	9.50	5.31	9.8
η	-	0.96	0.96	0.96	0.96	0.96	0.97
J	Amm ⁻²	2.49	2.50	2.71	3.42	4.74	3.77

Porovnáním vypočítaných hodnot originálního stroje s optimálními hodnotami Optim1 a Optim2, došlo ke zlepšení vlastností stroje.

V případě topologie 8p/12s – optim1 jsou magnety a geometrie navrženy tak, že THD je sníženo z původní hodnoty 1% na 0.51%. Nebyla však respektována plocha magnetů. V tomto případě byl magnet navržen na $h_m=10\text{mm}$, což vedlo ke snížení magnetizačního proudu požadovaného momentu. Algoritmus zvýšil vnější rozměr rotoru a vzduchovou mezeru a tím zmenšil prostor pro vinutí. Počet závitů byl zvýšen pro zachování hodnoty indukovaného napětí z toho důvodu, že byly magnety navrženy s nižším pólovým krytím. V případě Optim2 byl parametr magnetu h_m snížen na hodnotu 7mm a pólové krytí na 0.72. Počet závitů byl zvýšen vzhledem k požadovanému E_0 (menší plocha magnetu v řezu S_m než v případě Optim1 a originálního stroje). Na snížení THD_u má výrazný vliv i minimalizace parametru SO, což představuje otevření drážky.

Topologie 10p/12s – optim 1 dosáhla výrazného zlepšení THD_u bez respektování objemu magnetů pro $SO=1\text{mm}$. Velikost vzduchové mezery a parametr $RotorOR$ byly rovněž zvýšeny oproti původnímu návrhu. V případě Optim 2 nedošlo ke zlepšení THD_u , ale ke zmenšení plochy magnetů S_m . Hodnota THD_u byla přibližně stejná. Parametr h_m byl navržen na stejnou hodnotu jako originál. Dalo by se říci, že v případě Optim2 jsou hodnoty podobné s rozdílem vzduchové mezery, což může mít pozitivní vliv na výrobu a kompletaci stroje. Potlačení harmonických indukovaného napětí je zobrazeno na Fig. 6.2. Došlo k výraznému snížení harmonické 11. a 13. řádu, což odpovídá drážkovým harmonickým. Sníženy byly i harmonické 5. a 7. řádu.

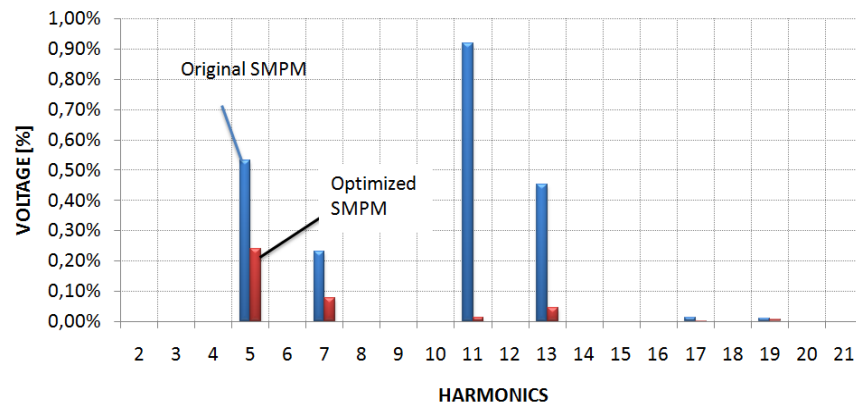


Fig. 6.2: Potlačení harmonických indukovaného napětí 10p/12s optim1 – snižování THD [45]

Získané poznatky z optimalizace tvaru magnetu mohou být využity při optimalizaci některého řádu harmonické indukovaného napětí. Zvýšení/snížení harmonické příslušného řádu může být hypoteticky využito při řízení stroje, kdy je možné identifikovat polohu rotoru právě z velikosti harmonické nebo minimalizaci nějakých prostorových harmonických momentu, které způsobují oteplení stroje, popřípadě pulzace [34].

6.3 Změna materiálu magnetu – optimální tvar magnetu

Magnety, použité ve stroji AKM8 byly vytvořeny pomocí parametrického modelu popsaného v kapitole 6.1. Vzhledem k velikosti stroje a počtu elementů mesh, dále k požadovaným výstupům stroje jsou zvoleny tyto následující optimalizované parametry. Vyniklost magnetů se v parametrickém modelu nastavuje pomocí parametru *Offset*, kterým se dopočítává vnější rádius magnetu *RMO* (Magnet Outer Radius). V případě kdy *Offset* = 0mm, bude mít *RMO* stejný rozměr jako vnější rozměr rotoru (*RotorOR*), tedy konstantní velikost vzduchové mezery celého pólu stroje. Dalším parametrem je tloušťka magnetu v podélném směru *MagThick* (mm), zaoblení hrany magnetu *R* (mm) a velikost pólového krytí *Embrace* (p. u.). Parametry uvádí Fig. 6.3, zvýrazněné červenou barvou. Ostatní parametry stroje, tj. rozměr drážky, vnější rozměry stroje, jsou po celou dobu optimalizace stejné. Vnější rozměry stroje jsou uvedeny v předešlých výzkumných zprávách [56] a [57]. Uvažovaná axiální délka stroje je nastavena na 160mm. Parametry nového materiálu PM jsou uvedeny v příloze D App. D. 4 a). Jedná se o SmCo typu SCYXG-30HNinGangNom s teplotními parametry a vodivostí uvedených v App. D. 4 b) zdroj [65].

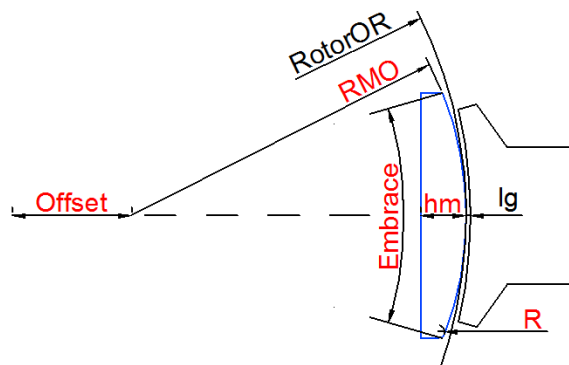


Fig. 6.3: Volba optimalizovaných parametrů stroje AMK8_160mm

Optimalizované parametry jsou voleny s ohledem na změnu materiálu magnetů a s požadavkem stejných vlastností stroje (indukované napětí, cogging). V nově navrženém stroji je samozřejmě možné sledovat více charakteristik, ale pro optimalizaci tvaru magnetu a hlavně materiálu magnetu jsou sledované veličiny dostatečné.

Omezení geometrických parametrů, respektive hranice minimálního a maximálního rozměru, jsou voleny tak, aby bylo možné vygenerovat reálnou geometrii magnetu a následně bylo přihlédnuto k vyrobiteľnosti magnetu. Před definováním rozsahu parametrů byly pak jednotlivé parametry cíleně měněny a následně vyhodnoceny a stanoveny přípustné meze.

2D tvar magnetu je definovaný tak, že pomocí zmíněných základních rozměrů je povrch tvořen z kruhu, zaoblení tvořeno z křivky kopírující obvod kruhu a zbylé části

magnetu jsou přímky. Nově definovanému materiálu magnetu pak byla přiřazena odpovídající polarizace, která je pro celý magnet (popřípadě úseky, elementy) stejná a to buď odpovídající severnímu pólu, nebo jižnímu pólu magnetu. Hodnoty definovaných geometrických rozměrů magnetu uvádí Tab. 6.2.

Tab. 6.2: Geometrické omezení optimalizovaných parametrů magnetu

Name	Unit	Min bound	Max bound	Note
<i>Embrace</i>	(p.u.)	0.6 (108°ele.)	0.9 (162°ele.)	Pole arc
<i>MagThick</i>	(mm)	5	8	Magnet thickness
<i>Offset</i>	(mm)	0	30	Magnet saliency
<i>R</i>	(mm)	0.01	2	Magnet corner rounding

V dalším kroku je náhodně vygenerována matice optimalizovaných parametrů pomocí funkce *rand* v MATLABu. Matice kombinací příslušných parametrů je použita jako vstupní matice hodnot do modelu stroje a následně vypočítány příslušné veličiny.

Z průběhu indukovaného napětí je následně zjištěna hodnota napětí první harmonické – tzv. napěťová konstanta stroje k_E (V/1000rpm) a činitel harmonického zkreslení indukovaného napětí THD_U (%). Vzhledem k tomu, že indukované napětí je počítané pro každou fázi stroje, jsou výsledné hodnoty k_E a THD_U brány jako průměrné hodnoty sdružených hodnot všech tří fází indukovaného napětí.

Z průběhu cogging momentu jsou získány maximální a minimální hodnoty špiček průběhu pro příslušné periody. Jsou vypočítány hodnoty $Pk2Pk$ (peak – to – peak) a následně určena průměrná hodnota zvlnění cogging momentu.

Dalším sledovaným parametrem během optimalizace stroje je celková plocha magnetu jednoho pólu S_m (mm²). Demagnetizace magnetů nebyla uvažována během optimalizace stroje, čili mezi optimalizované parametry není zařazena.

6.3.1 Podmínky optimalizace – penalizační funkce

Všechny zmíněné sledované veličiny k_E , THD_U , $Pk2Pk$ a V_m jsou určeny jako jedny z hlavních kritérií optimalizace stroje a jsou použity jako start zvoleného optimalizačního algoritmu (v práci budou nazvány jako objectives).

Vzhledem k jednoduchosti převodní charakteristiky je dobré sledované veličiny přepočítat například na relativní chyby, popřípadě procentuální odchylky od nějaké správné hodnoty. Tyto hodnoty pak porovnat v penalizační funkci a tím si zajistit, že penalizované parametry budou mít stejný přínos v celkové optimalizaci.

Penalizační funkce č. 1, Fig. 3.5 je použita pro penalizaci napěťové konstanty stroje k_E , dále pro cogging $Pk2Pk$ a plochu magnetu S_m . Výpočty jednotlivých chyb a odchylek jsou počítány následovně dle vztahů (6.3) - (6.5). Na základě penalizační

funkce uvedené na příslušných obrázcích jsou penalizovány funkce *IV*, *CT*, *HD* a *MA* (vysvětleno níže)

Výpočet chyb pro penalty funkci 1, relativní chyba napěťové konstanty *IV*:

$$IV = \text{abs}\left(\frac{kE_{req} - kE}{kE_{req}}\right) \quad (6.3)$$

Kde kE_{req} je hodnota napěťové konstanty původního stroje (požadovaná hodnota), kE je napěťová konstanta nově navrženého stroje. Výpočet chyb pro penalty funkce 1, relativní chyba cogging momentu *CT*:

$$CT = \frac{Pk2Pk}{Cogg_{max}} \quad (6.4)$$

Kde $Cogg_{max}$ je definovaná maximální hodnota cogging momentu (hodnota špička špička), $Pk2Pk$ je vypočítaný cogging nově navrženého stroje. *HD* – Harmonic Distorsion, odpovídá $THD_U/100$. Výpočet chyb pro penalty funkce 1, relativní chyba plochy magnetu *MA*:

$$MA = \frac{S_m}{S_{m,max}} \quad (6.5)$$

Kde $s_{m,max}$ je definovaná maximální hodnota plochy magnetu, V_m je plocha nově navrženého magnetu. Následný průběh penalizační funkce č. 1 zajistí to, že plynulou změnou vypočítané chyby (*IV*, *CT*, *MA*, *HD*), se mírně změní i hodnota penalty funkce (*PIV*, *PCT*, *PMA*, *PHD*).

Matice náhodně vygenerovaných optimalizovaných parametrů včetně vypočítaných objectives uvádí Tab. 6.3. Velikost matice je záměrně nastavena na 10, to odpovídá 10x náhodnému vygenerování parametrů, protože pro optimalizaci bude použit robustní optimalizační algoritmus SOMA (Self Organizing Migrating Algorithm) se strategií „All-2-one“ – všichni k jednomu.

Tab. 6.3: Matice generovaných rozměrů, výpočtu objectives a ohodnocení funkce, úloha 1.

Part.	Embrace (p.u.)	Optimized parameters			Calculated objectives				Mod1 CostValues (-)
		MagThick (mm)	Offset (mm)	R (mm)	kE (V/krpm)	THD (%)	Pk2Pk (Nm)	S _m (mm ²)	
1	0,87	7,38	28,78	1,31	292,85	5,61	0,67	219,22	5,21
2	0,61	7,55	28,02	1,36	257,11	8,50	3,97	179,67	5,57
3	0,83	7,23	11,77	1,31	305,30	8,21	4,53	224,30	5,69
4	0,65	7,12	0,95	0,56	279,14	4,85	7,63	187,89	5,04
5	0,61	5,29	24,70	1,39	245,78	8,81	4,31	122,33	6,24
6	0,70	7,85	1,03	0,88	292,18	4,32	0,99	220,29	5,19
7	0,71	7,30	23,86	0,38	280,75	3,31	0,08	197,13	0,65
8	0,75	6,34	19,39	1,42	283,43	4,09	2,54	175,30	5,06
9	0,83	5,83	20,39	1,31	287,40	6,03	3,03	167,70	5,10
10	0,65	5,36	14,95	1,92	260,45	5,82	6,14	132,62	5,42

Hlavní podmínky optimalizace:

- 1) Optimalizované parametry nesmí skončit mimo definované hranice, v krajním případě mohou být stejné.
- 2) Napěťová konstanta nově navrženého stroje musí být stejná jako u originálního stroje tj. $k_E = 280V/1000rpm$.
- 3) Činitel harmonického zkreslení THD u nově navrženého magnetu, včetně nově vybraného materiálu by měl být co nejmenší, v ideálním případě nulový.
- 4) Cogging moment, respektive hodnota zvlnění cogging momentu $Pk2Pk$ by měla být minimalizována oproti původní hodnotě.
- 5) Nové rozměry magnetu by měly být voleny s ohledem na co nejmenší plochu magnetu.
- 6) Jako další kritérium optimalizace je doba výpočtu všech požadovaných objectives během jedné změny optimalizovaných parametrů, protože s tím souvisí konkrétnější nastavení výpočtového modelu v programu MAXWELL.

V Tab. 6.3 je uvedena hodnota *CostValues*, což je hodnota výsledné účelové funkce, která je vysvětlena v následující kapitole 6.3.2. Vypočítané hodnoty objectives jsou veličiny, které ještě nebyly penalizovány pomocí zmíněných penalizačních funkcí.

Správný sled toho, jak se v optimalizaci postupuje je to, že se vygeneruje matice, spočítají se objectives, provede se penalizace objectives, definují se váhy jednotlivých penalizovaných funkcí a na závěr se spočítá hodnota účelové (ohodnocovací) funkce.

6.3.2 Ohodnocovací funkce, průběh optimalizace tvaru magnetu

V této kapitole je definována účelová funkce a jsou provedeny různé výpočty pro rozdílné váhové koeficienty této funkce. Dále budou uvedeny další náhodně definované matice, kde byly parametry ohodnoceny za různých podmínek (různé váhové koeficienty). Rozsahy parametrů definované v předcházející kapitole se neměnily. Obecně je účelová funkce definována rovnicí (3.9). V konkrétním případě podobu účelové funkce určuje vztah (6.6). Jednotlivé symboly a koeficienty jsou vysvětleny v předcházejících kapitolách.

$$CostValues = c_1 \cdot PIV + c_2 \cdot PCT + c_3 \cdot PHD + c_4 \cdot PMA \quad (6.6)$$

Hodnoty, které se nastavují pomocí váhových koeficientů c_1 , c_2 , c_3 a c_4 jsou voleny před zahájením iterací (konvergenčí) k požadovanému globálnímu extrému. Hodnoty *CostValues*, které uvádí Tab. 6.3 odpovídají váhovým koeficientům uvedených v následujícím vztahu (6.7).

$$[c_1 \ c_2 \ c_3 \ c_4] = [5 \ 5 \ 5 \ 0] \quad (6.7)$$

$$[c_1 \ c_2 \ c_3 \ c_4] = [5 \ 2 \ 2 \ 2] \quad (6.8)$$

$$[c_1 \ c_2 \ c_3 \ c_4] = [1 \ 1 \ 1 \ 1] \quad (6.9)$$

Pro zpřesnění uvedených výsledků, jsou vygenerovány další dvě populační matice s různými váhovými koeficienty (6.8) a (6.9).

Optimalizační úlohy 1 – 4 jsou rozděleny dle následujících kritérií:

- V prvním případě (6.7) se optimalizace zaměřuje pouze na první tři definované objectives a poslední (S_m) se v optimalizaci neobjeví ($c_4 = 0$), mezi ostatními objectives je stejná váha ($c_1 = c_2 = c_3$).
- Ve druhém případě (6.8) do optimalizace vstupuje požadavek na minimální hodnotu S_m s tím, že během optimalizace bude největší váha kladena na první objectives (Indukované napětí) a mezi zbylými stejná váha ($c_1 = c_2 = c_3 > c_4$).
- Ve třetím případě (6.9) jsou všechny objectives položeny do stejné roviny se stejnou váhou ($c_1 = c_2 = c_3 = c_4$)
- Ve čtvrtém případě, kdy je použit Genetický Algoritmus (GA), jsou váhové koeficienty nastaveny tak, jak uvádí (6.9). Algoritmus GA je použit pro porovnání použitých metod a zpřesnění získaných výsledků. U GA, vzhledem k jeho principu, je nutné zvolit velký počet vygenerovaných parametrů. U SOMA algoritmu postačí 10 – 15, u GA je nutno zvolit minimálně 30, aby GA měl možnost kombinovat nejlepší možná řešení mezi sebou.

Jsou tedy definovány tři optimalizační úlohy se stejným cílem, ale různými podmínkami. První tři optimalizační úlohy využívají strategie SOMA a poslední případ strategii GA. Hodnoty, které uvádí Tab. 6.3, Tab. 6.4 a Tab. 6.5 jsou určeny jako startovní podmínky optimalizačního algoritmu SOMA, hodnoty, které uvádí Tab. 6.6 jsou použity pro GA.

Tab. 6.4: Matice vygenerovaných rozměrů, výpočet objectives funkce, úloha 2.

Part.	Optimized parameters				Calculated objectives				Mod2
	PoleArc (p.u.)	MagThick (mm)	Offset (mm)	R (mm)	kE (V/1000rpm)	THD (%)	Pk2Pk (Nm)	S_m (mm ²)	CostValues (-)
1	0,61	5,16	0,62	1,37	258,13	7,40	9,13	126,06	2,52
2	0,78	5,34	23,89	1,36	273,30	3,93	2,34	143,48	2,10
3	0,62	5,21	4,08	1,31	258,75	7,08	8,63	127,51	2,49
4	0,63	5,71	7,31	0,56	263,59	6,40	7,91	142,26	2,31
5	0,86	7,09	22,01	1,39	298,36	6,98	1,44	215,44	2,38
6	0,75	5,98	19,85	0,88	281,71	4,30	2,73	164,99	2,05
7	0,64	5,06	28,93	0,38	244,57	7,87	3,31	117,26	3,33
8	0,64	6,40	19,70	1,42	263,42	6,21	5,71	158,67	2,32
9	0,83	6,67	12,83	1,31	301,43	7,98	4,08	203,92	2,50
10	0,83	7,70	21,85	1,92	299,49	6,49	2,96	232,40	2,42

Nejvhodnější kandidát na nejlepší řešení úlohy č. 1, které uvádí Tab. 6.3, má hodnotu účelové funkce $CostValues = 0.65$ (7. jedinec). Nejvhodnější kandidát na nejlepší řešení úlohy č. 2, které uvádí Tab. 6.4, má hodnotu účelové funkce

$CostValues = 2.05$ (6. jedinec). Nejvhodnější kandidát na nejlepší řešení úlohy č. 3, které uvádí Tab. 6.5, má hodnotu účelové funkce $CostValues = 1.008$ (4. jedinec). Z principu SOMA popsaného v minulých výzkumných zprávách budou tito jedinci použiti jako nejlepší doposud získané řešení a start pro iterační – migrační kola. Nejvhodnější kandidát na nejlepší řešení úlohy č. 4, které uvádí Tab. 6.6, má hodnotu účelové funkce $CostValues = 0.187$ (1. jedinec). V celé této populační matici je pak dle principů GA prováděn výběr otce, matky, jsou vytvářeni potomci, atd. Získané hodnoty mohou být použity pro parametrickou analýzu a je tedy možné nějakým způsobem říci, v jakém rozsahu se může řešení pohybovat a předpovídat, kam se optimalizace bude ubírat.

Tab. 6.5: Matice vygenerovaných rozměrů, výpočet objectives funkce, úloha 3.

Part.	Optimized parameters				Calculated objectives				Mod3 CostValues (-)
	PoleArc (p.u.)	MagThick (mm)	Offset (mm)	R (mm)	kE (V/1000rpm)	THD (%)	Pk2Pk (Nm)	S _m (mm ²)	
1	0,69	6,92	23,59	0,59	275,31	3,59	1,59	182,22	1,014
2	0,75	7,46	17,85	1,08	291,97	4,62	3,35	212,91	1,038
3	0,70	6,24	23,82	0,69	271,36	3,59	1,25	162,25	1,025
4	0,74	6,10	20,39	1,14	279,65	3,75	1,91	166,13	1,008
5	0,80	6,47	11,95	0,96	297,31	7,08	5,67	192,41	1,068
6	0,62	6,23	29,07	1,56	250,72	8,50	3,63	145,96	1,183
7	0,82	7,30	22,70	1,69	295,43	5,93	3,13	215,96	1,056
8	0,83	7,94	3,34	0,80	313,67	9,52	4,90	255,83	1,241
9	0,75	5,77	1,11	1,95	291,48	5,94	6,06	165,62	1,035
10	0,82	5,44	4,44	1,41	297,33	8,64	6,20	163,67	1,068
11	0,71	5,23	12,33	0,29	275,24	3,84	1,26	139,93	1,015
12	0,84	7,79	0,14	1,30	315,33	10,06	4,45	254,03	1,264
13	0,80	5,76	25,30	0,59	278,57	4,39	2,20	158,74	1,009
14	0,61	5,28	23,94	1,43	245,02	9,13	4,31	121,53	1,259
15	0,84	6,87	24,76	0,08	292,01	5,79	2,04	201,62	1,038

Populační matice, kterou uvádí Tab. 6.6, je seřazena od nejlepšího jedince (1.) po nejhoršího (40.). Nejlepší jedinec má sice nejnižší hodnotu cogging momentu 0,07 Nm, ale napěťová konstanta a plocha magnetu jsou v nepřijatelných hodnotách. Pouze v některých případech byla geometrie vygenerována tak, aby alespoň napěťová konstanta stroje byla rovna požadovanému napětí $k_E = 280$ V/krpm (4., 7. a 8.). Zaměříme-li se na jedince č. 4, na hodnotu cogging momentu, je jeho velikost rovna 6,4 Nm (špička-špička) a hodnotu $THD_U = 4\%$. V tomto případě je dokázáno, že když jeden parametr splňuje požadavek ze zadání, stroj nebude zdaleka optimální, popřípadě vhodně navržen. Vždy je potřeba, aby do optimalizace vstupovaly požadavky na minimálně dvě důležité vlastnosti stroje (např. napětí a cogging), tím by měl být zajištěn vhodnější návrh geometrie stroje a průběh optimalizace. V těchto případech optimalizačních úloh není nikde definován optimální počet optimalizovaných

parametrů, záleží na zkušenostech návrháře elektrických strojů, jeho zkušenostech s optimalizačními algoritmy a také tím, do jakých podrobností sahají jeho znalosti o optimalizovaném stroji. Před zahájením optimalizace je dobré pečlivě analyzovat populační matici, hlavně jak se změny v geometrii projeví na vlastnostech stroje a analyzovat citlivost parametrů na vybrané vlastnosti. Například, tloušťka magnetu a velikost pólového krytí ovlivňuje velikost indukovaného napětí, vyniklost magnetů (offset) a rádius zaoblení hrany magnetu (MagCorRad) ovlivňují velikost cogging momentu. Na všech změnách se podílí vzduchová mezera, která není stejná a mění se v závislosti na velikosti zaoblení magnetu (offset). Udělat závěr, který parametr je nejcitlivější, je obtížné, ale do jisté míry proveditelné a v každém případě pomůže pochopit to, co se ve stroji během změn geometrie děje a jak by se stroj mohl chovat v provozu.

Tab. 6.6: Matice vygenerovaných rozměrů, výpočet objectives funkce, úloha 4.

Part.	Optimized parameters				Calculated objectives				Mod4 CostValues (-)
	Embrace (p.u.)	MagThick (mm)	Offset (mm)	R (mm)	kE (V/1000rpm)	THD (%)	Pk2Pk (Nm)	S _m (mm ²)	
1	0,89	6,65	17,36	1,72	301,95	8,38%	0,07	207,41	0,187
2	0,71	6,32	10,06	1,64	283,69	3,92%	0,27	173,23	0,862
3	0,71	5,90	16,40	0,49	276,32	3,55%	0,28	157,51	0,887
4	0,66	7,94	7,86	0,20	280,65	4,58%	6,40	210,25	1,008
5	0,79	5,33	20,39	1,64	278,20	4,69%	2,99	146,53	1,010
6	0,79	5,68	20,37	1,96	282,48	5,02%	3,20	158,73	1,011
7	0,82	6,29	27,40	0,09	282,63	4,57%	1,78	176,76	1,011
8	0,73	7,13	23,37	1,30	282,69	3,44%	0,83	195,18	1,011
9	0,69	7,77	26,56	1,37	276,00	3,85%	2,17	203,94	1,013
10	0,72	6,14	7,87	1,49	285,02	4,24%	1,60	169,76	1,015
11	0,74	6,31	29,64	0,95	270,57	3,29%	0,36	164,80	1,017
12	0,73	5,67	21,45	1,60	273,82	3,45%	1,11	150,68	1,018
13	0,67	7,43	24,03	1,01	273,40	4,36%	3,21	192,53	1,019
14	0,75	5,89	26,73	0,87	272,75	3,35%	1,30	156,34	1,021
15	0,83	5,79	19,61	1,04	288,52	6,36%	2,86	167,68	1,024
16	0,75	5,96	10,02	1,65	288,66	5,36%	4,77	169,04	1,025
17	0,75	6,81	14,83	1,95	289,64	4,59%	3,04	192,70	1,028
...
29	0,69	5,35	27,11	0,91	258,52	4,59%	1,72	132,64	1,101
30	0,66	5,55	23,89	0,15	258,14	5,70%	3,66	136,26	1,104
31	0,62	6,23	21,64	0,31	258,14	7,22%	5,45	150,73	1,104
32	0,83	5,77	4,10	1,45	301,96	9,25%	4,96	177,75	1,105
33	0,60	5,69	6,95	0,07	257,63	7,95%	8,03	137,57	1,109
34	0,67	5,62	28,89	0,37	255,99	5,66%	2,49	136,92	1,124
35	0,88	7,63	14,66	1,24	309,88	9,12%	0,48	246,61	1,147
36	0,84	6,52	5,93	0,28	306,55	9,35%	3,47	204,93	1,152
37	0,63	6,05	27,87	1,81	252,19	7,92%	3,94	143,07	1,166
38	0,81	7,71	2,96	1,05	309,98	8,74%	7,52	242,34	1,192
39	0,83	6,93	2,57	0,07	310,28	9,70%	4,20	220,87	1,196
40	0,88	6,78	3,20	1,32	312,98	10,61%	1,95	222,62	1,232

6.3.3 Definice optima pro Mod1 – Mod4

Průběh účelové funkce během optimalizace ukazuje Fig. 6.4. Optimum bylo dosaženo ve dvou případech úlohy č. 3, kdy byl použit algoritmus SOMA a GA. V úloze č. 1 a č. 2 konvergovala v závislosti na podmínkách použitého algoritmu. Obrázek dokazuje, jak je algoritmus citlivý na jeho parametry. Podmínky pro všechny zmíněné úlohy jsou definované v předcházející kapitole 6.3.2 vztahy (6.7), (6.8), (6.9). Vzhledem k časům, které jsou potřebné pro řešení příslušných migrací (Tab. 6.7) byly výsledky porovnávány pouze pro 10 migrací.

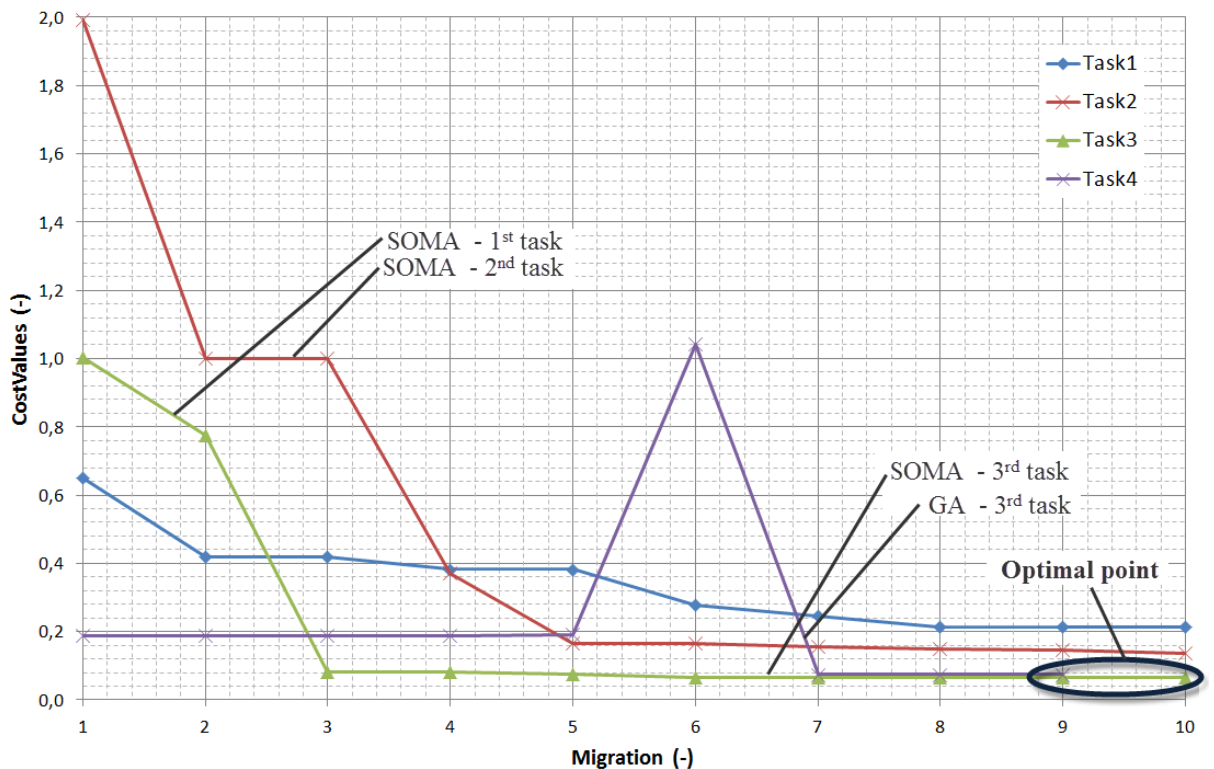


Fig. 6.4: Průběh účelové funkce během optimalizace, úloha 1 – 3.

V úloze č. 1 a 2 byl použit algoritmus SOMA, kde doba jedné migrace trvala přibližně 2.86hod. Ve zbylé úloze pro algoritmus SOMA, byla doba řešení jedné iterace delší, protože velikost populační matice byla $popSize = 15$. Dobu iterace ovlivňuje krok, se kterým SOMA počítá, tyto parametry byly vysvětleny v předešlých zprávách. Optimální krok v algoritmu SOMA je dlouhodoběji testován na elektrických strojích obzvláště s permanentními magnety a jeho velikost je $step = 0.5$. Délka vektoru mezi aktuálním řešením a leaderem daného migračního kola je nastavena na $pathLength = 2,2$. Což je hodnota, kterou doporučuje Zelinka v knize Evoluční výpočetní techniky [39].

Doba výpočtu všech změn ve stroji během jedné migrace - iterace $TimeChange$ je definována v (6.10).

$$TimeChange = (popSize - 1) \cdot \left(\frac{pathLength}{step} + 1 \right) \cdot t_1 \quad (6.10)$$

Kde t_1 je doba, pouze jedné jediné změny geometrie. Doba t_1 je definována parametry modelu, jinými slovy jak je kvalitní mesh modelu (kapitola 6.1.1), jaké jsou nastaveny kroky pro tranzientní analýzy, velikost stroje (celý, polovina), atd. Model byl v tomto případě nastaven tak, aby se doba výpočtu jedné změny vstupních parametrů nepočítala déle než 3,81min/model. Celková doba výpočtu je pak definována vztahem (6.11), kde počet migrací *migration* násobí počet změn ve stroji a dobou t_1 .

$$TotalTime = migration \cdot (popSize - 1) \cdot \left(\frac{pathLength}{step} + 1 \right) \cdot t_1 \quad (6.11)$$

Tab. 6.7: Porovnání doby výpočtu, úloha č. 1 – 3 pro algoritmus SOMA a GA

Time consumption of the best results				Notes
SOMA popSize=10	SOMA popSize=10	SOMA popSize=15	GA popSize=40	Algorithm Conditions
migration=10 1 st task t(h)	migration=10 2 nd task (t)	migration=10 3 rd task (t)	migration=9 3 rd task (t)	
Mod1	Mod2	Mod3	Mod4	
2,86min	2,86 min	4,35 min	1,68 min	Best time

Výsledná řešení „optimální geometrie stroje“ ve všech uvedených případech uvádí Tab. 6.8 a vypočítané objectives zvolené optimalizace Tab. 6.9. Výsledné hodnoty, které uvádí příslušné tabulky, jsou do jisté míry shodné pro všechny případy, co se geometrie týká. GA konvergoval jiným způsobem a řešení bylo shodné pro úlohu č. 3 s tím, že SOMA našla přesnější řešení odpovídající nižšímu *THD* než u algoritmu GA, Tab. 6.9 – zvýrazněný řádek. Co se týká napěťové konstanty stroje k_E byla konvergence v případě SOMA algoritmu úspěšnější než v případě GA.

Porovnáním hodnot plochy magnetu *MagArea*, algoritmus GA našel lepší geometrii s ohledem na plochu. Otázkou v tomto případě je to, jestli se návrhář spokojí s tak velkým *THD_U* a napěťovou konstantou stroje k_E . Přirozený výběr mezi požadovanými objectives nebyl totiž nastaven, protože váhy byly rovny pro všechny objectives stejné ($c_1=1$, $c_2=1$, $c_3=1$ a $c_4=1$).

Pro zpřesnění získaných výsledků algoritmu GA je nutno provést výpočet pro větší počet migrací a hodnoty opět porovnat.

Pozn.: V příslušných tabulkách jsou uvedeny parametry originálního stroje AKM8 160mm.

Tab. 6.8: Navržená geometrie, úloha č. 1 – 4 pro algoritmus SOMA a GA

Name (unit)	Geometry				Original design AKM
	SOMA 1 st task	SOMA 2 nd task	SOMA 3 rd task	GA 3 rd task	
	Mod1	Mod2	Mod3	Mod4	
PoleArc (p.u.)	0,72	0,72	0,72	0,89	0.88
MagThick (mm)	7,88	6,59	6,57	5,58	7.00
Offset (mm)	29,57	23,68	23,39	17,70	18.40
R (mm)	0,35	1,24	0,90	0,98	0

Tab. 6.9: Vlastnosti stroje, úloha č. 1 – 3 pro algoritmus SOMA a GA

Name (unit)	Objectives				Original design AKM
	SOMA 1 st task	SOMA 2 nd task	SOMA 3 rd task	GA 3 rd task	
	Mod1	Mod2	Mod3	Mod4	
KE (V/1000rpm)	279,46	277,05	276,95	292,25	271.00
THD (%)	3,22	3,31	3,32	7,68	6,22
Pk2Pk (Nm)	0,04	0,04	0,05	0,04	0.59
S _m (mm ²)	211,73	175,94	175,32	166,85	219.6

Zmíněné odlišné výsledky, obzvláště dosažené pro GA, jsou způsobeny malým počtem migrací, zvolených před optimalizací stroje. Cílem této kapitoly bylo porovnat, jak moc budou odlišné výsledky získané algoritmem SOMA a algoritmem GA pro stejný počet migrací a jak moc odlišná bude nově navržená geometrie stroje.

Dalším možným způsobem jak porovnat získané výsledky z použitých algoritmů je určení kolik jedinců konvergovalo ke stejnému řešení v daném migračním kole. Porovnání je provedeno pouze pro zvolené optimální řešení, tj. úlohu č. 3, kdy byl použit SOMA algoritmus, Tab. 6.10. Zbylé tabulky úlohy č. 1 a 2. SOMA a dále úloha č. 3 pro GA u optimálních řešení (poslední migrační kolo 10) jsou postupně uvedeny v App. D. 5, App. D. 6 a App. D. 7.

Počet jedinců určující populační matici Tab. 6.10 je posouzen a výsledky, zda je konvergence zajištěna pro všechny jedince matice, ukazují na dvě možné skupiny výsledků. Řádky, které nejsou podbarveny, ukazují parametry stroje první skupiny řešení, podbarvené řádky ukazují na skupinu č. 2. První skupinu od druhé odlišuje velikost účelové funkce průměrně na hodnotě 0,064, v opačném případě druhá skupina 0,17. Výsledky byly určeny porovnáním průměrných hodnot všech uvažovaných jedinců. V tomto případě optimalizační úlohy je možné říci, že konvergence k optimálnímu řešení byla zajištěna.

Porovnáme-li výsledky u ostatních úloh, zjistíme, jak úspěšně byly nastaveny podmínky pro konvergenci zbylých optimalizačních úloh a použitého algoritmu. Čtyři

skupiny možných optim určovaných v úloze č. 1 – SOMA algoritmus ukazuje v App. D. 5. Vzhledem k tomu, že velikost populace byla 10, tak čtyři možná řešení (čtyři nalezené extrémy funkce) v posledním migračním kole je velký počet a výsledek je víceméně relevantní. Přesnost výpočtu by do jisté míry ovlivnil počet migrací, který by bylo dobré zvýšit a výsledky opět porovnat. V případě GA, úlohy č. 4 je *CostValues* v posledním migračním kole rovna 0.0737. Velikost populační matice je 40 a tedy získané výsledky jsou relevantní a do jisté míry něco vypovídají o daném algoritmu a jeho nastavení. Dá se předpokládat, že v případě GA a vyššího počtu migrací budou výsledky přesné a aplikovatelné na příslušném stroji. V ideálním případě by se měla všechna řešení potkat v jednom bodě a vypočítat jediné společné řešení. V ideálním případě by stroj bylo dobré popsat nejlépe jedním parametrem a počítat jedno objectives, s tím že parametr kompletně popisuje celý stroj a objectives vlastnosti.

Tab. 6.10: Konvergence jedinců ke stejnému řešení, úloha č. 3 – algoritmus SOMA

Optimized parameters				Calculated objectives				Mod4	
PoleArc (p.u.)	MagThick (mm)	Offset (mm)	R (mm)	kE (V/1000rpm)	THD (%)	Pk2Pk (Nm)	S_m (mm ²)	CostValues (-)	Groups
0,72	6,56	23,45	0,89	276,838	3,324	0,053	174,988	0,064	1
0,72	6,64	22,97	0,91	277,735	3,335	0,057	177,745	0,070	1
0,72	6,57	23,39	0,90	276,953	3,325	0,052	175,318	0,062	1
0,72	6,56	23,39	0,90	276,927	3,325	0,053	175,198	0,064	1
0,72	6,60	23,38	0,91	277,183	3,325	0,054	176,340	0,066	1
0,72	6,26	23,02	0,90	275,038	3,343	0,059	165,939	0,078	1
0,72	6,58	23,39	0,92	277,054	3,324	0,053	175,740	0,063	1
0,72	6,80	25,67	0,90	276,676	3,279	0,054	181,040	0,066	1
0,72	6,57	23,39	0,90	276,953	3,325	0,052	175,316	0,062	1
0,72	6,56	23,33	0,85	276,945	3,327	0,056	175,206	0,069	1
0,72	6,56	23,38	0,90	276,916	3,325	0,053	175,134	0,063	1
0,72	6,67	23,56	0,80	277,456	3,321	0,060	178,308	0,075	1
0,90	5,98	25,03	0,86	287,222	6,101	0,083	174,837	0,138	2
0,72	6,70	25,78	1,21	276,111	3,273	0,062	178,364	0,082	2
0,90	6,24	24,62	0,99	290,537	6,480	0,099	185,093	0,195	2

Výsledky z prováděných optimalizací v následujících kapitolách 6.3.4 - 6.3.7 jsou členěny do dvou oblastí. V první oblasti jsou v ohodnocovací funkci požadavky na optimalizaci napěťové konstanty, minimální cogging, THD a plochy magnetů. Ve druhé oblasti optimalizace bude v účelové funkci figurovat pouze požadavek na napěťovou konstantu a cogging, zbylé vlastnosti jako minimální objem a THD nebudou uvažovány. Důvodem je rozšíření citlivosti do různých oblastí. Ve všech dále zmíněných optimalizacích byl parametr zaoblení hrany magnetu ponechán volně. Dalšími poznatky z těchto kapitol je to, jak budou ovlivněny získané výsledky tím, že se některý optimalizovaný parametr vynechá (bude po celou dobu optimalizace konstantní).

Záměrně tak bude snižovaný počet optimalizovaných parametrů a úloha bude zjednodušena. Parametr, který bude konstantní v příslušné optimalizaci, bude mít stejný rozměr jako u originálního stroje, Tab. 6.8 – sloupec original design AKM.

Algoritmus SOMA byl zvolen pro provádění citlivostní analýzy ve všech případech. Byla provedena změna v ukončení prováděných optimalizací. V okamžiku, kdy budou mít tři po sobě jdoucí migrace stejnou hodnotu účelové funkce, optimalizace se zastaví. Jako další podmínka byla vložena podmínka maximálního počtu migrací. Tato podmínka byla nastavena na hodnotu 5 pro všechny případy. Kdyby počet migrací nestačil, bude provedena do-optimalizace úlohy. Parametry algoritmu SOMA zůstanou nezměněny pro všechny prováděné úlohy, $pathLength = 2.2$ a $step = 0.55$.

V příslušných tabulkách budou uvedeny hodnoty z prováděných migračních kol včetně výpočtu objectives a vykreslena ohodnocování funkce prováděné optimalizace. Porovnání hodnot bude provedeno rovněž v těchto kapitolách mezi sebou.

6.3.4 Parametr offset se nemění, Mod5, Mod6

Parametr offset na pólu určuje posunutí středu rádiusu magnetu ohledně středu rádiusu rotoru stroje. Určuje jak moc je magnet vyniklý oproti středu vzduchové mezery. Citlivost tohoto parametru bude především na *THD* a na *cogging*, vzhledem k optimalizacím prováděným v kapitole 6.3.3.

Tab. 6.11: Citlivostní optimalizace – offset = 0, všechny objectives

Mod5 Iteration	Optimized parameters			Calculated objectives				Offset = 0mm	
	PoleArc (p.u.)	MagThick (mm)	R (mm)	kE (V/1000rpm)	THD (%)	Pk2Pk (Nm)	S_m (mm ²)	CostValues (-)	Time (h)
1	0,65	7,10	1,45	279,79	4,77	8,10	187,93	1,0080	1,96
2	0,66	6,63	0,20	280,20	4,49	5,91	176,90	1,0079	1,87
3	0,66	6,58	0,13	280,00	4,49	5,86	175,45	1,0078	2,22
4	0,66	6,56	0,11	280,00	4,47	5,79	174,91	1,0078	2,45
5	0,66	6,56	0,11	280,00	4,46	5,79	174,87	1,0075	2,44

Tab. 6.12: Citlivostní optimalizace – offset = 0, objectives kE a cogging

Mod6 Iteration	Optimized parameters			Calculated objectives				Offset = 0mm	
	PoleArc (p.u.)	MagThick (mm)	R (mm)	kE (V/1000rpm)	THD (%)	Pk2Pk (Nm)	S_m (mm ²)	CostValues (-)	Time (h)
1	0.696	5.55	0.95	281.20	4.28	1.06	151.17	1.0090	1.93
2	0.703	5.14	0.82	279.76	4.41	1.38	139.85	1.0080	1.90
3	0.704	5.19	1.24	279.98	4.39	1.09	141.45	1.0078	2.05
4	0.703	5.17	0.82	280.00	4.41	1.39	140.75	1.00781	1.96
5	0.703	5.17	0.82	280.00	4.41	1.39	140.75	1.00781	2.34

Průběh optimalizace uvádí Tab. 6.11. Hodnoty účelové funkce (*CostValues*) se příliš nemění. Do jisté míry to ukazuje na to, že variabilitou tohoto parametru budou

významně ovlivněny výsledky optimalizace. Parametr je obzvláště citlivý na THD a B_g . Z příslušné tabulky plyne to, že optimum bylo nalezeno během 2. iterace. Ve zbylých iteracích nedošlo k významné změně OP.

V dalším kroku je provedena optimalizace, kdy je z účelové funkce odstraněno objectives THD a S_m . Získané hodnoty uvádí Tab. 6.12. Za povšimnutí stojí to, že ploch magnetu S_m byla zmenšena na hodnotu $140,75\text{mm}^2$ (oproti $174,87\text{mm}^2$ 1. případ)

6.3.5 Parametr MagThick se nemění, Mod7, Mod8

Tloušťka magnetu v podélném směru ovlivní maximální energii magnetu, kde špatně zvolená výška magnetu nemusí ležet na maximu křivky BH. Dalším kritériem je demagnetizace magnetu (DA). Vzhledem k tomu, že u originálního stroje byla tloušťka 7mm (vyhovuje DA) je optimalizace provedena právě pro tento případ. Optimalizace je provedena pro 5 migrací. Hodnoty optimalizovaných parametrů se při optimalizaci seskupily do dvou oblastí, čili optimalizace byla úspěšně provedená. Další migrační kola by zpřesnily výsledky, pro účely popsané v této kapitole jsou hodnoty dostačující.

Hodnoty počítané pro všechny objectives v případě, kdy se nemění *MagThick* uvádí Tab. 6.13. Optimální hodnoty této úlohy jsou uvedené v 5. iteraci. Návrh magnetu s minimální plochou byla v optimalizaci zohledněna 186.52mm^2 (190.96mm^2 Tab. 6.14 bez ohledu na plochu magnetu).

Tab. 6.13: Citlivostní optimalizace - MagThick = 7mm, všechny objectives

Mod7 Iter.	Optimized parameters			Calculated objectives				MagThick=7mm	
	PoleArc (p.u.)	Offset (mm)	R (mm)	kE (V/1000rpm)	THD (%)	Pk2Pk (Nm)	S_m ý(mm ²)	CostValues (-)	Time (h)
1	0.7205	27.06	0.81	276.80	3.26	0.07	186.52	0.101	1.96
2	0.7205	27.06	0.81	276.80	3.26	0.07	186.52	0.101	1.95
3	0.7227	28.56	0.93	275.49	3.26	0.05	185.55	0.065	2.07
4	0.7214	27.19	0.95	276.77	3.25	0.05	186.52	0.060	2.07
5	0.7216	27.21	0.99	276.76	3.25	0.04	186.52	0.050	2.15

Tab. 6.14: Citlivostní optimalizace – MagThick = 7mm, objectives kE a cogging

Mod8 Iteration	Optimized parameters			Calculated objectives				MagThick=7mm	
	PoleArc (p.u.)	Offset (mm)	R (mm)	kE (V/1000rpm)	THD (%)	Pk2Pk (Nm)	S_m (mm ²)	CostValues (-)	Time (h)
1	0.712	17.40	1.51	283.31	3.54	0.31	191.10	0.952	1.69
2	0.718	18.30	1.26	283.82	3.59	0.55	191.87	0.942	1.96
3	0.715	17.89	1.51	283.52	3.55	0.14	191.45	0.331	2.03
4	0.712	18.14	1.27	283.02	3.52	0.11	190.97	0.227	2.04
5	0.713	18.30	1.28	282.98	3.52	0.10	190.96	0.171	2.08

Hodnoty, které uvádí Tab. 6.14 dokazují to, že v případě, kdy do optimalizovaných parametrů volně vstupuje offset, hodnoty *cogging* 0.1Nm a *THD* 3.52% jsou výrazně lepší jak v případě uvedeném v kapitole 6.3.4 Tab. 6.11 a Tab. 6.12 (1.39Nm, 4.41%). I přes to, že požadavek na minimální THD byl v tomto případě zanedbán, výsledné hodnoty jsou více než dobré.

6.3.6 Parametr PoleArc se nemění, Mod9, Mod10

V této optimalizační úloze byl parametr *PoleArc* konstantní, tedy roven 0.8833 p. u. v obou případech, Tab. 6.15 a Tab. 6.16. Porovnání vypočítaných hodnot s předcházejícími, se konstantní *PoleArc* na citlivosti nijak zvláště neprojevil. V optimalizacích figuruje parametr *offset*, který ovlivní jak *THD*, tak i *cogging* (Pk2Pk). Hodnota *CostValues* vychází větší jak jedna ve druhém případě (Tab. 6.16) proto, že podmínka pro napěťovou konstantu nebyla splněna (289V), v tomto případě by bylo vhodné nastavit více migračních kol.

Tab. 6.15: Citlivostní optimalizace - PoleArc = 0.8833, všechny objectives

Mod9 Iteration	Optimized parameters			Calculated objectives				PoleArc = 0.8833	
	MagThick (mm)	Offset (mm)	R (mm)	kE (V/1000rpm)	THD (%)	Pk2Pk (Nm)	S_m (mm ²)	CostValues (-)	Time (h)
1	5.14	16.02	0.054	289.01	7.64	0.061	151.60	0.092	1.74
2	5.05	15.67	0.053	288.34	7.63	0.060	148.66	0.088	1.95
3	5.26	16.43	0.053	289.96	7.67	0.049	155.67	0.076	2.12
4	5.27	16.47	0.053	290.05	7.67	0.048	156.07	0.075	2.20
5	5.27	16.50	0.053	290.10	7.67	0.048	156.29	0.075	2.56

Tab. 6.16: Citlivostní optimalizace - PoleArc = 0.8833, objectives kE a cogging

Mod10 Iteration	Optimized parameters			Calculated objectives				PoleArc = 0.8833	
	MagThick (mm)	Offset (mm)	R (mm)	kE (V/1000rpm)	THD (%)	Pk2Pk (Nm)	S_m (mm ²)	CostValues (-)	Time (h)
1	7.68	18.55	1.38	306.93	8.41	0.071	244.73	1.244	1.77
2	7.00	19.06	1.11	302.52	8.14	0.082	218.63	1.225	1.95
3	6.56	18.55	0.94	299.98	8.08	0.047	202.55	1.132	1.78
4	6.08	17.51	0.98	297.23	8.06	0.047	185.70	1.111	1.98
5	6.09	17.52	0.97	297.28	8.06	0.046	185.92	1.110	2.12

V porovnání s předcházejícími kapitolami 6.3.4 a 6.3.5 byl *PoleArc* proměnný. Hodnoty *THD* v těchto případech byly vždy pod 5%. V případě kdy je parametr *PoleArc* nastavený jako konstantní a jeho velikost je menší než 0.71 p.u., se hodnota *THD* se výrazně sníží.

6.3.7 Parametr PoleArc a Offset se nemění, Mod11, Mod12

V tomto případě optimalizace jsou parametry *PoleArc* a *Offset* konstantní. Do-optimalizována bude pouze tloušťka magnetu a zaoblení hrany magnetů. *PoleArc* a *Offset* značným způsobem ovlivňují *THD* a *cogging* (6.3.4, 6.3.5, 6.3.6). Tato úloha má zajistit do jaké míry se zbylé optimalizační parametry projeví na *THD*, *cogging* momentu a ploše magnetu. Výsledné hodnoty uvádí Tab. 6.17 (Mod11) a Tab. 6.18 (Mod12).

Tab. 6.17: Citlivostní optimalizace - PoleArc = 0.8833, Offset = 0mm, všechny objectives

Mod11 Iteration	Optimized parameters		Calculated objectives				PoleArc = 0.8833 Offset = 0mm CostValues Time	
	MagThick (mm)	R (mm)	kE (V/1000rpm)	THD (%)	Pk2Pk (Nm)	S_m (mm ²)	(-)	(h)
1	4.78	1.06	300.40	0.11	2.667	148.72	1.0926	1.76
2	4.55	1.72	297.15	0.10	1.553	139.49	1.0679	1.65
3	4.51	1.91	296.48	0.10	1.112	137.73	1.0634	1.68
4	4.51	1.91	296.48	0.10	1.112	137.73	1.0634	1.86
5	4.51	1.97	296.43	0.10	0.988	137.67	1.0631	1.80

Tab. 6.18: Citlivostní optimalizace - PoleArc = 0.8833, Offset = 0, objectives kE a cogging

Mod12 Iteration	Optimized parameters		Calculated objectives				PoleArc = 0.8833 Offset = 0mm CostValues Time	
	MagThick (mm)	R (mm)	kE (V/1000rpm)	THD (%)	Pk2Pk (Nm)	S_m (mm ²)	(-)	(h)
1	4.66	0.29	299.17	10.62	2.930	144.40	1.0815	1.73
2	4.50	0.64	297.25	10.49	2.669	138.39	1.0675	1.78
3	4.52	1.56	296.95	10.39	1.795	138.70	1.0655	1.94
4	4.50	1.88	296.48	10.31	1.170	137.69	1.0624	1.76
5	4.50	1.91	296.43	10.30	1.101	137.58	1.0620	1.79

Výsledky, které uvádí Tab. 6.17 a Tab. 6.18 poukazují na to, že rozměry magnetu *Offset* a *PoleArc* hrají významnou roli při minimalizaci *cogging* momentu a *THD*. V těchto dvou případech byly z optimalizace vyjmuty (konstantní velikost) a konvergence k dosaženým extrémům z předchozích optimalizačních úloh nebyly dosaženy.

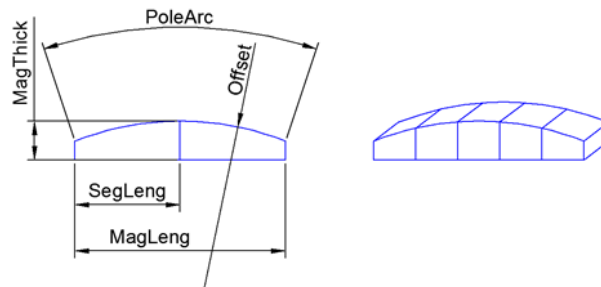
Dále z této optimalizační úlohy plyne citlivost zaoblení hrany magnetu na velikost *cogging* momentu. První iterace kdy *R* je roven 1.06 (Tab. 6.17), byl *cogging* moment přibližně roven 3Nm. Po páté iteraci 0.98Nm, což odpovídá zaoblení hrany magnetu *R* = 1.91mm.

Ve druhém případě (Tab. 6.18), první iterace při *R* = 0.29mm je *cogging* *Pk2Pk* = 2.93Nm. Pátá iterace *R* = 1.91mm, vypočítaný *cogging* je *Pk2Pk* = 1.101Nm.

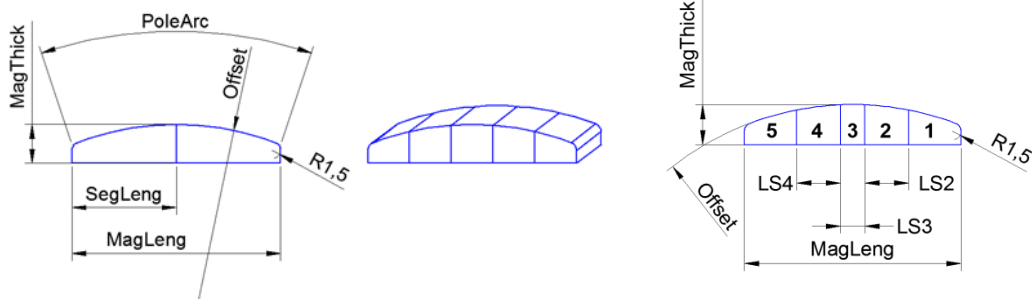
6.4 Minimalizace ztrát v magnetech

Při změně materiálu magnetů jsou vypočítány ztráty v použitých magnetech. Ztráty jsou počítány při chodu naprázdno jako vířivé a hysterezní, které jsou v magnetech z důvodu otáčivého pohybu rotoru a otevření drážek. Snížení těchto ztrát je provedeno tak, že magnety jsou segmentovány v podélném směru. Ztráty jsou počítány pro počet segmentů 1 – 5, rozměry magnetů odpovídají rozměrům, které byly optimalizovány. **Segmentace byla provedena pro tři případy:**

- 1) Lineární segmentace bez zaoblení hran magnetů - Fig. 6.5 a).
- 2) Lineární segmentace se zaoblením hran magnetů - Fig. 6.5 b).
- 3) Nelineární segmentace se zaoblením hran magnetů - Fig. 6.5 c).



a) Lineární segmentace bez zaoblení hran



b) Lineární segmentace se zaoblením hran

c) Nelineární segmentace

Fig. 6.5: Segmentace magnetů v axiálním směru

Následující analýza výpočtu ztrát v magnetech je provedena pro teplotu magnetů 125°C. Vypočítané hodnoty jsou uvedeny v příslušných tabulkách, ve kterých jsou vždy uvedeny efektivní hodnoty ztrát v jednotlivých segmentech, celková hodnota ztrát v magnetech pro celý stroj a ztrát v železe. Tabulky, odpovídají posloupnosti zvolených segmentací magnetů v podélném směru postupně pro jeden segment (celý magnet), dva segmenty, tři a čtyři segmenty. Počet elementů je 12764, z toho ve vzduchové mezeře 2061, rotor 1100 a stator 5064. Výsledná mesh je pro výpočet magnetické indukce postačující a bude využita i při výpočtu ztrát v železe a v magnetech. Délka segmentů je pro počet segmentů 1, 2, 3, 4, 5 rovna 38.24mm, 19.12mm, 12.74mm, 9.56mm a 7.648mm v případě lineární segmentace.

V každé kapitole, která se zabývá segmentací magnetů, 6.4.1 - 6.4.4 jsou uvedeny a popsány získané hodnoty ze segmentace, kdy byl magnet rozdělen na 5 částí. V grafech jsou uvedeny dva důležité průběhy, tj. průběh okamžité hodnoty ztrát v jednom pólu $SumOfSeg = \sum_{i=1}^5 Seg_i$ a další průběh odpovídá celkovým ztrátám ve všech magnetech (TOTAL) pro jednu periodu napájecího napětí.

6.4.1 Lineární segmentace magnetů bez zaoblení

Hodnota celkových ztrát byla získána tak, že byly sečteny okamžité hodnoty ztrát v magnetech, které odpovídaly stejnému časovému okamžiku. Vzhledem k tomu, že ztráty v magnetech vznikají jako interakce mezi pohybem rotoru a drážkováním statoru, výsledné ztráty mají 12 špiček, což odpovídá 12ti drážkám na statoru. Dalším, krokem jak snížit ztráty v magnetech je otevření drážky vzhledem k šířce segmentu a velikosti vzduchové mezery.

V případě lineární segmentace, kdy nejsou zaobleny hrany magnetů, odpovídají průběhy okamžitých hodnot ztrát magnetu č. 1, bráno zleva, Fig. 6.6. Vypočítané ztráty v magnetech pro 5 segmentů (seg1-seg5) jednoho pólu stroje je uveden v Tab. 6.19.

Tab. 6.19: Vliv segmentace na ztráty v železe a ztráty v magnetech, lin. segm.

Method	Part	Magnet Losses (W)					TOTAL	Core Losses (W)	Open Circuit Losses (W)
		Mag1	Mag2	Mag3	Mag4	Mag5			
AVG	Seg1	2.51	2.52	1.85	1.72	1.78	121.05	379.12	500.17
	Seg2	3.01	2.21	2.08	2.17	3.05			
	Seg3	2.55	2.43	2.63	3.61	3.47			
	Seg4	2.08	2.29	3.11	2.93	2.13			
	Seg5	1.92	2.60	2.41	1.75	1.72			
MAX	Seg1	10.60	10.60	10.57	10.60	10.60			
	Seg2	11.21	11.20	11.21	11.21	11.21			
	Seg3	12.03	11.92	11.92	12.04	12.03			
	Seg4	10.81	10.78	10.82	10.82	10.81			
	Seg5	10.37	10.36	10.28	10.29	10.14			

Pozn. Hodnoty ztrát v příslušných segmentech magnetů jsou počítány funkcí v programu Maxwell (W/m3) a přepočítány pro příslušný segment na hodnotu výkonu. Maximální hodnota z Tab. 6.19 je dána pozicí rotoru vůči statoru (pól-zub), rychlostí otáčení, velikostí vzduchové mezery a materiálovými vlastnostmi. Hodnota by měla být maximální pro prostřední segment magnetů Fig. 6.5 vzhledem k nejmenší vzduchové mezeře mezi pólem a statorovým paketem.

Zbývající tabulky, které odpovídají posloupnosti zvolených segmentací magnetů v podélném směru pro jeden segment (celý magnet), dva segmenty, tři a čtyři segmenty jsou uvedeny App. D. 8. Průběhy ztrát jsou zobrazeny na příslušných grafech App. D. 9.

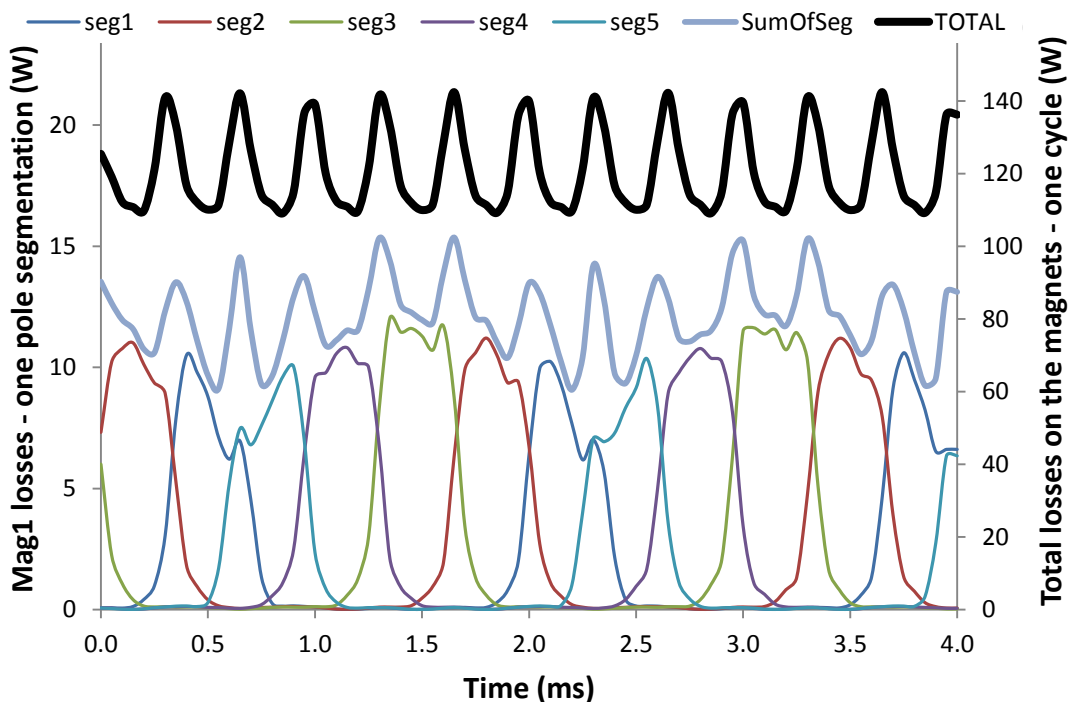


Fig. 6.6: Průběh ztrát v jednom pólu stroje během otáčení – 5segm.

6.4.2 Lineární segmentace magnetů se zaoblením

Hodnota ztrát v magnetech je 119.49W, ztrát v železe 376.63W, celková hodnota ztrát naprázdno je 496.12W (Tab. 6.20). Efektivní hodnoty ztrát v magnetech pro dílčí segmenty uvádí Fig. 6.7. Největší efektivní hodnota ztrát v magnetu odpovídá v Mag4 Seg3, což může být způsobeno směrem otáčení stroje a maximální hodnotě ztrát, které jsou počítány na hraně magnetu. Přesnější analýzou ztrát by bylo, kdyby hodnoty jednoho elementu meshe byly aproximovány (průměrná hodnota za tři bodů trojúhelníka). Problém u získání hodnot z MAXWELLU spočívá v tom, že získaná data odpovídají bodům vytvořené mesh, nikoliv však průměru hodnot v daném elementu.

Tab. 6.20: Vliv segmentace na ztráty v železe a ztráty v magnetech, nelin. segm.

Method	Part	Magnet Losses (W)					TOTAL	Core Losses (W)	Open Circuit Losses (W)
		Mag1	Mag2	Mag3	Mag4	Mag5			
AVG	Seg1	2.44	2.44	1.79	1.67	1.73	119.49	376.63	496.12
	Seg2	2.99	2.20	2.07	2.16	3.02			
	Seg3	2.55	2.43	2.63	3.61	3.47			
	Seg4	2.06	2.28	3.09	2.91	2.12			
	Seg5	1.85	2.52	2.35	1.70	1.66			
MAX	Seg1	10.50	10.50	10.36	10.50	10.50	119.49	376.63	496.12
	Seg2	11.08	11.08	11.08	11.07	11.07			
	Seg3	11.93	11.94	11.95	11.93	11.93			
	Seg4	10.78	10.86	10.86	10.82	10.82			
	Seg5	10.17	10.17	10.09	10.09	10.03			

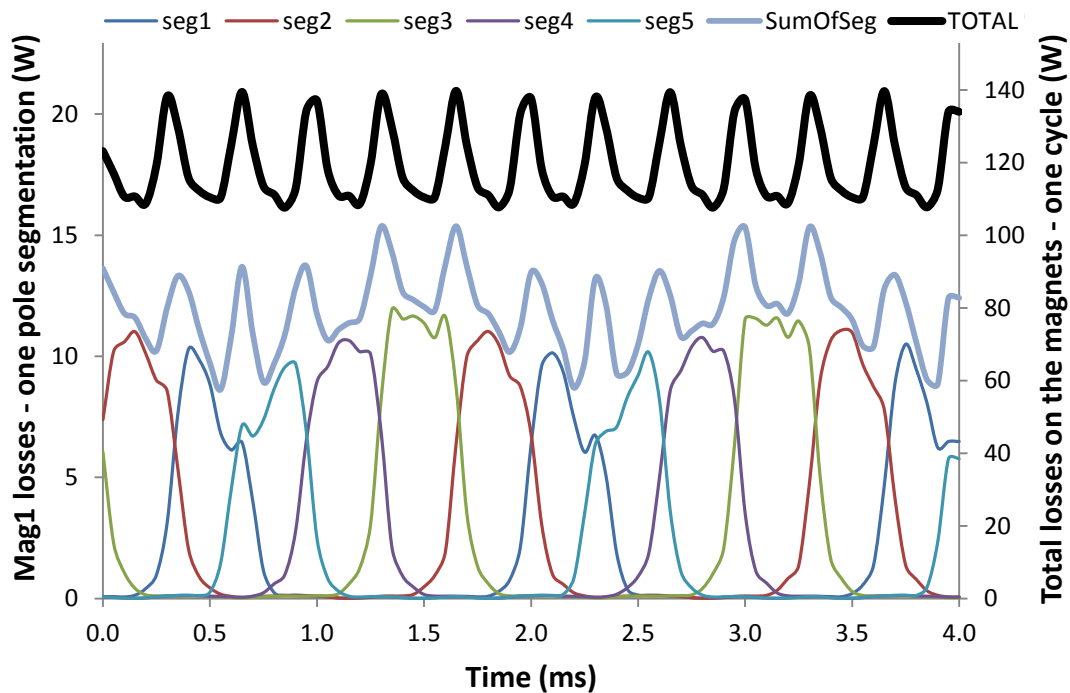


Fig. 6.7: Průběh ztrát v jednom pólu stroje během otáčení – 5 segm.

Dosažené výsledky pro zbylé segmenty jsou porovnány s výpočty bez zaoblení hrany pro lineární segmentaci a také pro nelineární segmentaci v kapitole 6.4.3.

Průběhy, které uvádí Fig. 6.7, obzvláště pro seg1 a 5 (krajní segmenty magnetu) jsou nejmenší, protože segmenty mají nejmenší objem a velikost vzduchové mezery nad celým segmentem není konstantní vlivem zaoblení hrany. Rozptylové toky jsou dále ovlivněny sousedními póly stroje a vliv otevření drážky je tak limitován. Vypočítané hodnoty ztrát ve zbylých segm. jsou uvedeny v App. D. 10 a průběhy v App. D. 11.

6.4.3 Nelineární segmentace magnetů

Nelineární segmentace magnetů spočívá v tom, že každý segment bude mít jinou šířku segmentu. Nelineární segmentace je provedena pouze pro počet segmentů 4 a 5. Pro každou segmentaci jsou ztráty počítány ve třech různých délkách segmentu daného magnetu tak, jak uvádí Tab. 6.21. Šířky jednotlivých segmentů jsou v parametrickém modelu vztaženy ke středu magnetu, důvodem byla jednoduchost parametrického modelu a symetrie magnetu. Příklad jednoduché nelineární segmentace uvádí Fig. 6.5c).

Šířka celého jednoho magnetu zvoleného pólového krytí je 38.24mm, plocha magnetu odpovídá 233.71mm². Vypočítané hodnoty ztrát (step1-3 dle Tab. 6.21) pro 4segmenty pólu jsou uvedeny v App. D. 12 a průběhy ztrát v App. D. 13. V této kapitole jsou prezentovány pouze výsledky pro 5 segmentů step3 dle Tab. 6.21, zbylé vypočítané hodnoty ztrát jsou uvedeny v App. D. 14 a zobrazeny v App. D. 15.

Tab. 6.21: Nelineární segmentace, délka jednotlivých segmentů včetně plochy

		4 segments				5 segments					Note
step1	Length (mm)	10.56	8.56	8.56	10.56	8.72	7.05	6.70	7.05	8.72	Rep. Rep.
	S_m (mm ²)	58.36	58.35	58.35	58.36	46.61	46.74	46.72	46.74	46.61	
step2	Length (mm)	14.12	5.00	5.00	14.12	10.07	7.05	4.00	7.05	10.07	
	S_m (mm ²)	82.15	34.70	34.70	82.15	55.28	47.59	27.96	47.59	55.28	
step3	Length (mm)	9.12	10.00	10.00	9.12	10.62	5.00	7.00	5.00	10.62	
	S_m (mm ²)	49.25	67.60	67.60	49.25	58.82	33.63	48.80	33.63	58.82	

Průměrné hodnoty ztrát jsou uvedeny v Tab. 6.22 a zobrazeny na Fig. 6.8 pro nelineární segmentaci. Rozměry jednotlivých segmentů a jejich plochy jsou uvedeny v Tab. 6.21 (poznámka – první, druhý řádek). Pro zbylé segmenty jsou hodnoty uvedeny v kap. 6.4.4 a porovnány s ostatními způsoby segmentace magnetů v podélném směru. Nejvyšší hodnoty ztrát jsou ve třetím segmentu všech pólů stroje, což je do jisté míry způsobeno velikostí tohoto segmentu 6.7mm a polohou rotoru vzhledem ke statoru.

Tab. 6.22: Výpočet ztrát v železe a v magnetech – pět segmentů nel. segm. step 3

Method	Part	Magnet Losses (W)					TOTAL	Core Losses (W)	Open Circuit Losses (W)
		Mag1	Mag2	Mag3	Mag4	Mag5			
AVG	Seg1	2.44	2.44	1.79	1.67	1.73	119.49	376.63	496.12
	Seg2	2.99	2.20	2.07	2.16	3.02			
	Seg3	2.55	2.43	2.63	3.61	3.47			
	Seg4	2.06	2.28	3.09	2.91	2.12			
	Seg5	1.85	2.52	2.35	1.70	1.66			

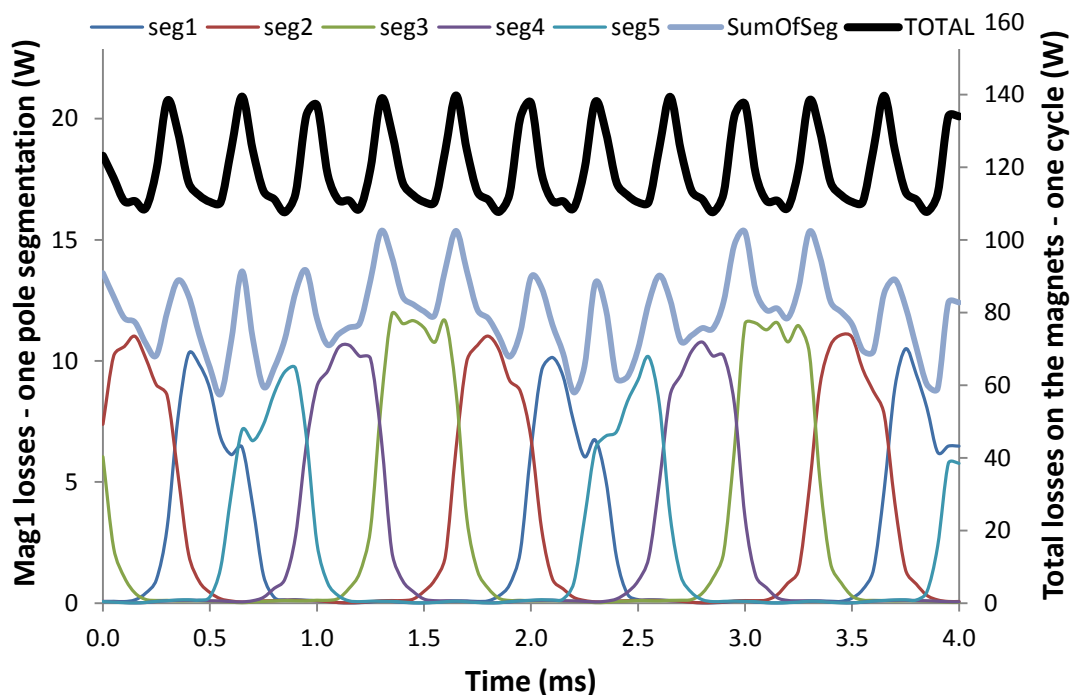


Fig. 6.8: Průběh ztrát během otáčení – 5 nelin. Segm, step3.

Celková hodnota ztrát v magnetech je 119.49W, což je přibližně stejně u lineární segmentace. V tomto případě byla šířka segmentu volena tak, aby objem magnetů byl pokud možno stejný. Tento krok měl zajistit, že ztráty budou v každém segmentu stejné. Vířivé a hysterezní ztráty v magnetech a jejich rozložení ovlivňuje šířka plochy, do které ztráty pronikají víc, než je hloubka vniku. Jinými slovy, vyšší segmentace pólu stroje snižuje celkové ztráty v magnetech.

6.4.4 Lineární segmentace s nastavením parametru offset

Tato kapitola je věnována snižováním ztrát již předložených modelů stroje s označením Seg5_1, Seg5_2 a Seg5_3. Model s označením Seg5_1 představuje stroj se segmentovanými magnety (5segmentů) s rozměry uvedenými v kapitole 6.4.2. Model s označením Seg5_2, představuje stroj (5segmentů) stejných rozměrů jako u Seg5_1 pouze s jiným parametrem $offset = 18,4\text{mm}$. V tomto případě se zkoumá vliv parametru na velikost ztrát v magnetech stroje. Model s označením Seg5_3 představuje stroj se segmentovanými magnety (5segmentů) s rozměry odpovídajícími optimálnímu modelu Mod7, opět snižování ztrát podélnou segmentací. Jednotlivé rozměry uvádí Tab. 6.23.

Tab. 6.23: Rozměry modelů Seg5_1, Seg5_2 a Seg5_3.

Model	Optimized parameters			
	Embrace (p.u.)	h_m (mm)	Offset (mm)	R (mm)
Seg5_1	0.8833	7.0	0	1.500
Seg5_2	0.8833	7.0	18.4	1.5
Seg5_3	0.7216	7.00	27.21	0.990

Pro jednotlivé modely Seg5_1, Seg5_2 a Seg5_3 je vypočítáno indukované napětí včetně THD a maximálního napětí, cogging moment Pk2Pk (Tab. 6.24) a rozložení ztrát v magnetech a železe Tab. 6.25. Vypočítané hodnoty segmentovaného modelu jsou podbarveny a označeny (Seg5_3). Kde e_1 je max. hodnota napětí 1. harmonické.

Tab. 6.24: Indukované napětí a cogging momentu modelů Seg5_1, Seg5_2 a Seg5_3

Method	Model	Seg5_1 (SmCo)				Seg5_2 (SmCo)				Seg5_3 (SmCo)			
		L1	L2	L3	AVG	L1	L2	L3	AVG	L1	L2	L3	AVG
Induced voltage	RMS (V)	227.20	226.63	222.47	225.43	217.39	216.38	212.62	215.46	198.49	196.51	193.47	196.16
	THD (%)	11.44	11.46	10.28	11.06	8.55	8.64	7.60	8.26	2.18	3.05	4.50	3.24
	kE (V/krpm)	317.85	317.46	313.79	316.37	304.88	304.09	300.65	303.21	279.01	277.33	274.18	276.84
	e_1 (V)	282.57	282.38	282.36	282.44	280.29	280.09	280.08	280.15	277.22	276.90	276.89	277.01
Cogging torque	Min (Nm)		-1.8629				-0.1133				-0.0343		
	Max (Nm)		1.8655				0.0971				0.0223		
	RMS (Nm)		1.0835				0.0655				0.0162		
	Pk2Pk (Nm)		3.7284				0.2104				0.0567		

Tab. 6.25: Rozložení ztrát v magnetech a železe u modelů Seg5_1, Seg5_2 a Seg5_3

Model	Method	Part	Magnet Losses (W)					TOTAL	Core Losses (W)	Open Circuit Losses (W)
			Mag1	Mag2	Mag3	Mag4	Mag5			
Seg5_1	RMS	Seg1	2.44	2.44	1.79	1.67	1.73	119.49	376.63	496.12
		Seg2	2.99	2.20	2.07	2.16	3.02			
		Seg3	2.55	2.43	2.63	3.61	3.47			
		Seg4	2.06	2.28	3.09	2.91	2.12			
		Seg5	1.85	2.52	2.35	1.70	1.66			
Seg5_2	RMS	Seg1	0.88	0.86	0.63	0.59	0.63	83.24	352.58	435.82
		Seg2	2.42	1.76	1.67	1.76	2.47			
		Seg3	2.47	2.35	2.56	3.51	3.37			
		Seg4	1.67	1.81	2.51	2.38	1.72			
		Seg5	0.65	0.90	0.85	0.61	0.59			
Seg5_3	RMS	Seg1	0.52	0.44	0.35	0.35	0.46	59.34	282.96	342.30
		Seg2	1.70	1.23	1.22	1.39	1.82			
		Seg3	1.83	1.77	1.86	2.67	2.57			
		Seg4	1.21	1.24	1.80	1.79	1.32			
		Seg5	0.35	0.46	0.52	0.42	0.35			

Nejnižších ztrát bylo dosaženo v případě Seg5_3 (59.35W). Vliv parametru offset – optimální hodnota 27.21mm a zaoblení hrany se významným způsobem podílelo i na snížení ztrát v železe o 20% oproti Seg5_2.

Vypočítané hodnoty celkových ztrát v magnetech, celkových ztrát v železe a celkových ztrát v magnetickém obvodu naprázdno v případě lineární a nelineární segmentace magnetů uvádí Tab. 6.26. U nelineární segmentace je analýza provedena pouze pro 4 a 5 segmentů a vybrána nejnižší hodnota celkových ztrát, pro zbylé segmenty je nelineární segmentace zbytečná (obzvlášť u dvou segmentů magnetu).

Porovnáním hodnot je zřejmé, že zvyšováním počtu segmentů v magnetu celkové ztráty v magnetech klesají. Hodnotu ztrát a hlavně jejich rozložení ovlivňuje i to, zda jsou rohy magnetů zaobleny. Nelineární segmentace magnetů se na celkových ztrátách projeví nepatrně. Výhodou nelineární segmentace je to, že se může cíleně zaměřit na určitý segment a tím ovlivnit i ztráty v něm. Obecně platí fakt, že velikost ztrát ovlivňuje počet zvolených segmentů magnetu jak v podélném směru, tak v axiálním. Dalším důležitým parametrem, který ovlivňuje velikost ztrát v rotoru je počet drážek na statoru a počet pólů stroje. Výrazně se projevuje velikost vzduchové mezery, vyniklost pólů, různá zaoblení hran a tloušťka magnetu.

Kdybychom se ve stroji zaměřili pouze na ztráty v magnetech, uvažovanými změnami bychom ovlivnili ostatní parametry stroje jako je moment, indukované napětí apod. Vzhledem k těmto ostatním parametrům stroje je proto segmentace nejuvhodnější, protože indukované napětí a moment zůstane stejný nebo nepatrně jiný v závislosti na efektu způsobeného vířivými proudy a hysterezními ztrátami. Jednou

z nevýhod segmentace magnetů může být celková cena magnetů, větší technologická náročnost a tím cena celého stroje.

Tab. 6.26: Porovnání celkových ztrát segmentace magnetů se zkosením a bez zkosení hrany

	Classification	Unit	Seg1	Seg2	Seg3	Seg4	Seg5	
Linear segm.	Total Mag	(W)	161.81	145.20	145.77	128.15	121.05	
	None round	Core losses	(W)	377.39	377.47	377.57	377.55	379.12
		Open circuit	(W)	539.20	522.67	523.34	505.69	500.17
	Total Mag	(W)	158.44	141.25	145.77	126.38	119.49	
	Rounded corners	Core losses	(W)	375.64	375.59	377.57	376.13	376.63
		Open circuit	(W)	534.07	516.84	523.34	502.52	496.12
Nolin. Segm.	Total Mag	(W)				124.43	119.49	
	Rounded corners - nonlinear segm.	Core losses	(W)			375.97	376.63	
		Open circuit	(W)			500.40	496.12	

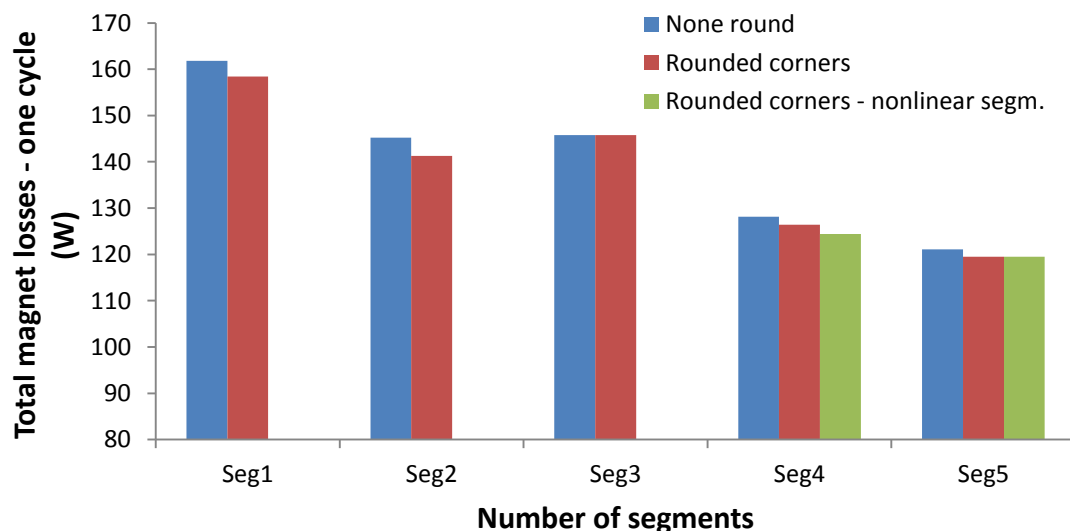


Fig. 6.9: Porovnání ztrát magnetů pro všechny provedené typy segmentace magnetů

V celkovém hodnocení vychází nelineární segmentace magnetů se zaoblenými hranami nejvýhodněji (step3 6.4.4) pro největší počet segmentů, v případě této zprávy pro 5 segmentů. Grafické porovnání vypočítaných hodnot ve všech případech segmentace a metody segmentace uvádí Fig. 6.9. Vliv nelineární segmentace ukazuje Fig. 6.9 v případě 4 a 5 segmentů na magnet. Porovnáním dosažených hodnot vypočítaných ztrát pěti segmentů magnetu u nelineární segmentace s ostatními typy je zřejmé, že jsou ztráty nejnižší. V porovnání se čtyřmi segmenty nelineární segmentace se už ztráty od ostatních typu příliš neliší. Dalo by se říci, že v případě šesti segmentů na pólu magnetu by mohla být nelineární segmentace efektivnější, co se týká snižování ztrát v magnetech a celém stroji.

6.5 Podrobnější analýza stroje PMSM s novými magnety

Základní výpočty jsou provedeny pro Mod7 a vždy porovnány s původním strojem (Orig). Základní rozměry uvádí Tab. 6.27.

Tab. 6.27: Tabulka parametrů modelu Mod7 a Orig pro podrobnější analýzu MKP

	Embrace (-)	h_m (mm)	Offset (mm)	R (mm)	kE (V/krpm)	THD (%)	Pk2Pk (Nm)	S_m (mm ²)
Orig	0.8833	7	18.4	0	271	6.22	0.24	219.00
Mod7	0.7216	7.00	27.21	0.990	276.76	3.25	0.04	186.52

Magnetická indukce a cogging moment jsou vypočítány pro 25° na magnetech a okolí. Indukované napětí a ztráty v železe a magnetech při teplotě 125°. Segmentace magnetů v příčném podélném směru byla provedena pro případ, kdy byl offset = 0, na požadavek zadavatele.

6.5.1 Výpočet magnetické indukce B_{rad}

Průběh magnetická indukce stroje s označením Mod7 a originálního stroje Orig uvádí Fig. 6.10. Efektivní hodnota magnetické indukce v radiálním směru (B_{rad}) ve vzduchové mezeře je 0.73T (Orig 0.84T).

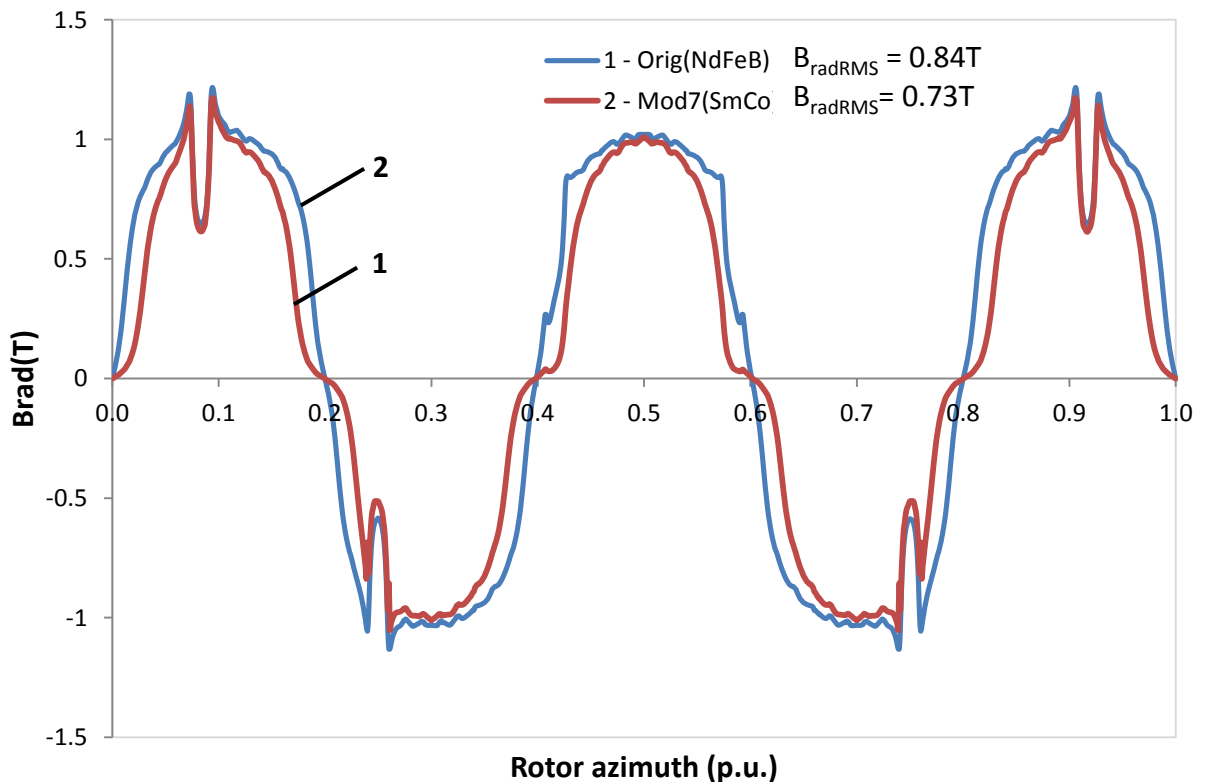


Fig. 6.10: Porovnání magnetické indukce v podélném směru Orig(NdFeB) a Mod7(SmCo)

6.5.2 Indukované napětí – THD

Indukované statorové napětí (sdružené hodnoty) uvádí Fig. 6.11. Hodnoty je možné porovnat s originálním strojem. Dílčí hodnoty napětí jako efektivní hodnota RMS, činitel harmonického zkreslení *THD*, napěťová konstanta *kE* a maximální hodnota indukovaného napětí e_1 uvádí Tab. 6.28. Z tabulky vyplývá, že optimalizovaný stroj (Mod7) má oproti originálnímu (Orig) o 4.5% nižší hodnotu RMS napětí, hodnota THD se zlepšila z původní hodnoty 6.21% na 2.151, čemuž odpovídají napěťové konstanty 277.398 (Mod7) a 271.2149 (Orig). Vzhledem k takovému zkreslení THD u originálního stroje jsou maximální hodnoty odlišné od napěťové konstanty stroje. U nově navrženého stroje Mod7 je maximum první harmonické $e_1 = 277.525V$

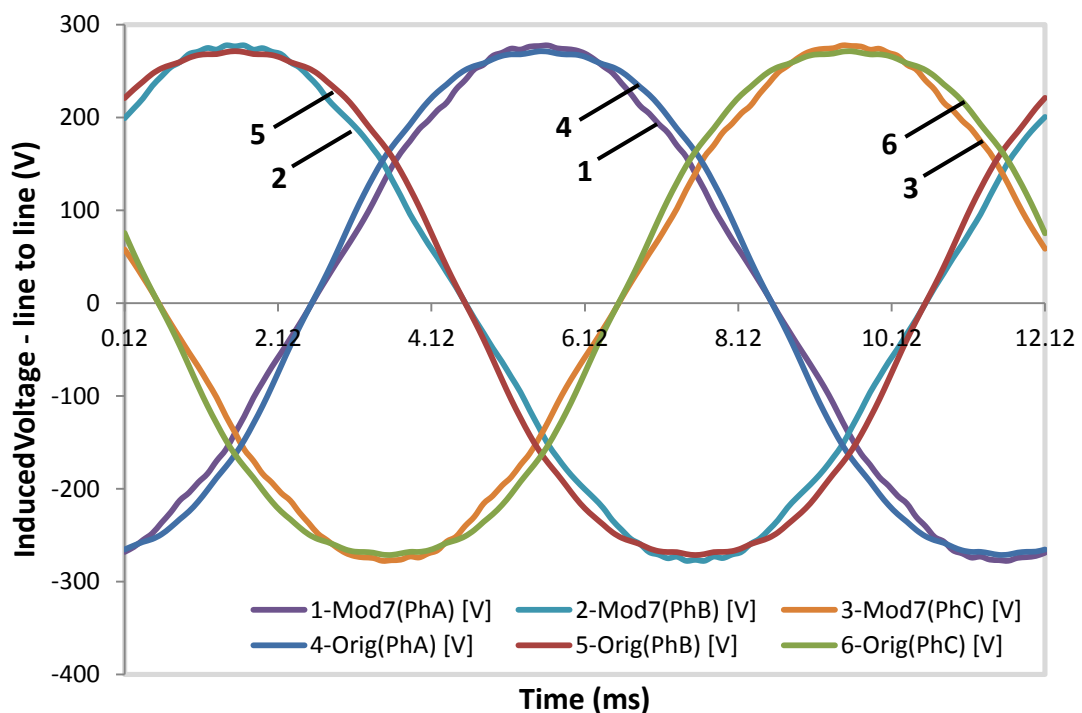


Fig. 6.11: Porovnání indukovaného napětí Orig(NdFeB) a nového modelu Mod7(SmCo)

Pozn. Indukované napětí v programu MAXWELL je počítáno z magnetické indukce ve vzduchové mezeře

Tab. 6.28: Napěťové poměry modelů Orig(NdFeB) a Mod7(SmCo)

	Mod7 (SmCo)				Orig (NdFeB)			
	L1	L2	L3	AVG	L1	L2	L3	AVG
RMS (V)	197.024	196.254	195.340	196.206	205.7471	205.264	204.2122	205.0744
THD (%)	1.699	2.102	2.651	2.151	6.430131	6.464218	5.758696	6.217682
kE (V/krpm)	278.5688	277.4696	276.1542	277.398	271.1364	271.3062	271.202	271.2149
e_1 (V)	277.5017	277.5278	277.5452	277.525	288.9058	288.2284	286.8891	288.0078

6.5.3 Cogging torque

Cogging moment byl řešený stejným způsobem, jak u originálního stroje. Vypočítaný cogging a jeho průběh zobrazuje Fig. 6.12. Porovnání získaných hodnot uvádí Tab. 6.29. Hodnota cogging momentu u stroje Mod7 je 0.0472Nm (peak – peak), oproti původnímu stroji Orig 0.2408Nm. Efektivní hodnota cogging momentu byla snížena na hodnotu 0.032Nm. Výměna materiálu a následná optimalizace tvaru magnetu globálně zlepšila cogging moment bez ohledu na to, zda jsou natočeny drážky.

Poznámka: Cogging moment je v programu MAXWELL řešen bez natočení drážek.

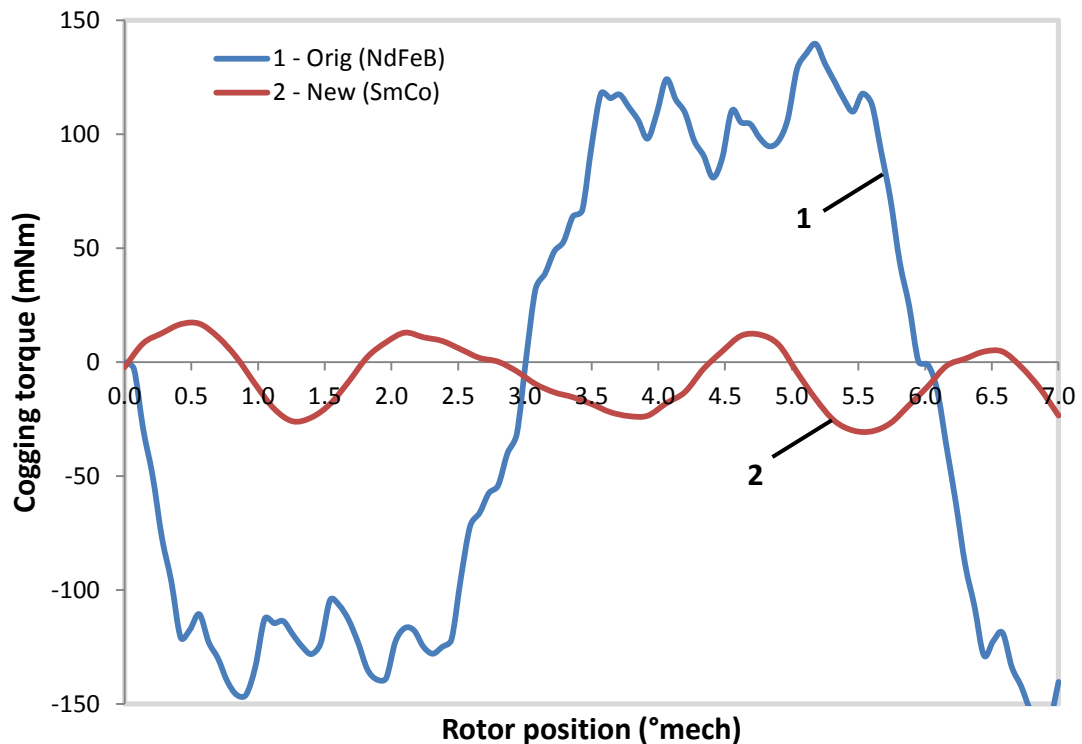


Fig. 6.12: Porovnání cogging momentu Orig(NdFeB) a modelu Mod7(SmCo)

Výsledky, které uvádí Fig. 6.12, jsou do jisté míry ovlivněny chybou zvoleného kroku výpočtu (7° mech po 0.05° krok výpočtu), která může ovlivnit chybu výpočtu. V případě stroje Mod7, kdy je nastaven offset (vyniklost pólu) je cogging omezen na minimum s tím, že perioda momentu je trojnásobná. To může mít za následek menší rozptylové pole v okolí magnetu a tedy nižší cogging efekt mezi hranami magnetu a hranou drážky. Dalším důvodem může být jiné pólové krytí magnetu (Tab. 6.27).

Tab. 6.29: Výpočet hodnot cogging momentu u optim modelu Mod7 a Orig

	Min (Nm)	Max (Nm)	RMS (Nm)	Pk2Pk (Nm)	Note
Mod7	-0.0304	0.0168	0.0151	0.0472	SmCo
Orig	-0.1460	0.0948	0.1055	0.2408	NdFeB

6.5.4 Ztráty v železe a v magnetech

V optimalizovaném modelu stroje Mod7(SmCo) jsou ztráty v jednom pólu magnetu rozloženy do jisté míry rovnoměrně ve srovnání s původním strojem Orig(NdFeB). Hodnoty vypočítaných ztrát během jedné elektrické otáčky zobrazuje Fig. 6.13. Velikosti jednotlivých ztrát v magnetech odpovídající polovině stroje (Mag1 – Mag5) uvádí Tab. 6.30. V případě Mod7 jsou celkové ztráty naprázdno (včetně ztrát v železe) 732,62W. Průběh ztrát v železe zobrazuje Fig. 6.14.

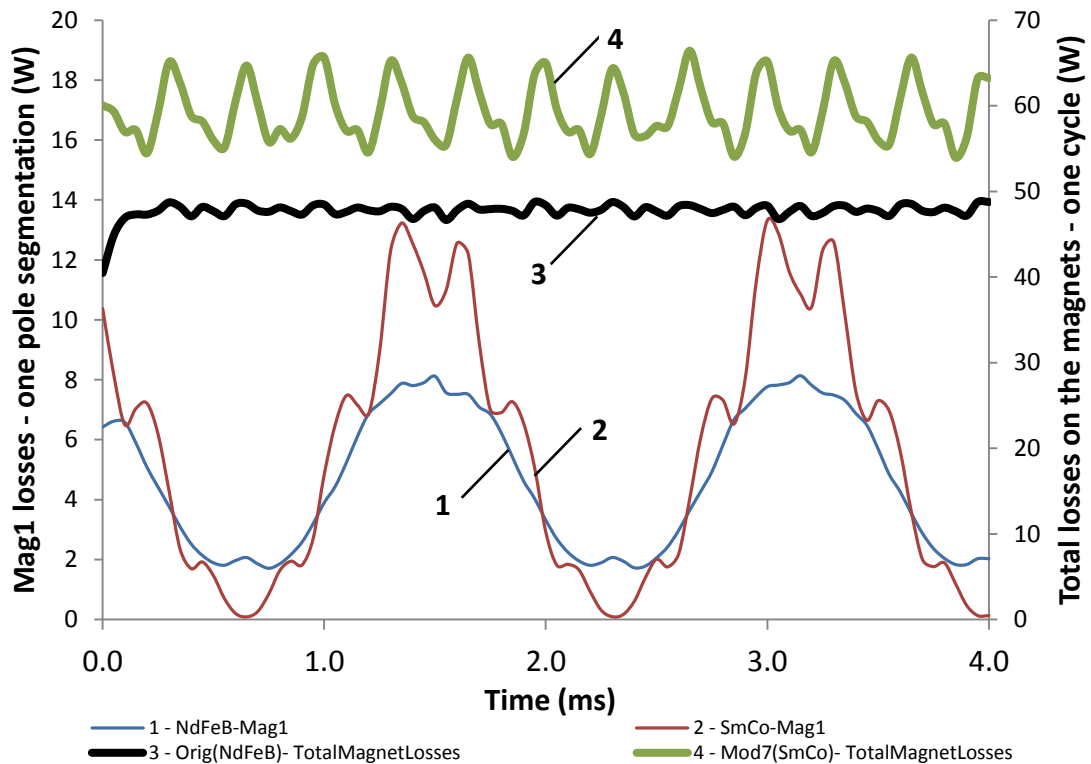


Fig. 6.13: Průběh ztrát v jednom pólu stroje Mod7 a Orig

Tab. 6.30: Výpočet ztrát optimalizovaného modelu Mod7(SmCo)

Model	METHOD	Part	Magnet Losses (W)					TOTAL	Core Losses (W)	Open Circuit Losses (W)
			Mag1	Mag2	Mag3	Mag4	Mag5			
Orig	RMS	Seg1	4.63	4.35	4.70	5.13	5.06	45.75	289.73	335.48
	MAX	Seg1	8.14	8.14	8.19	8.19	8.10			
Mod7	AVG	Seg1	5.62	5.15	5.75	6.63	6.53	59.34	282.96	342.30
	MAX	Seg1	13.32	13.32	13.28	13.27	13.23			

Vzhledem k vysokým ztrátám u modelu Mod7, je provedena segmentace magnetu v podélném směru (6.4.4) a výsledky jsou sumarizovány v závěru zprávy (Tab. 6.31).

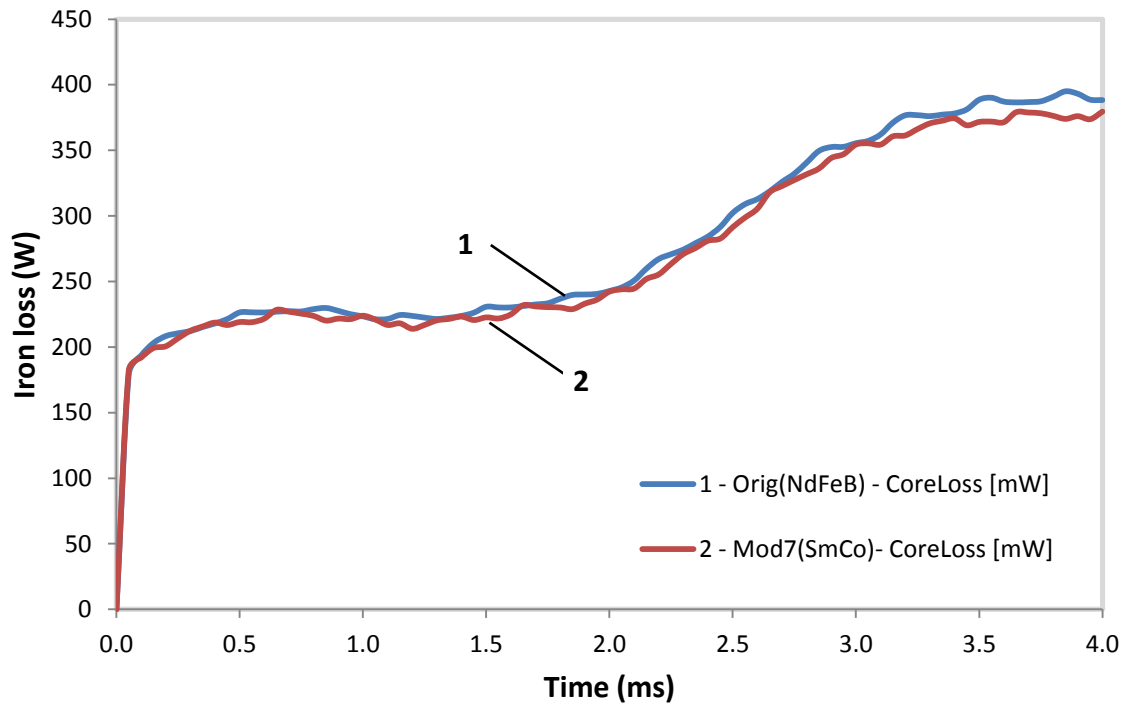


Fig. 6.14: Průběh ztrát v železe u modelu Mod7 a Orig

6.6 Získané výsledky a diskuze

V kapitole bylo představeno několik možností optimalizace synchronního stroje se jmenovitými otáčkami do 10krpm s permanentními magnety na rotoru. Rozložení magnetického pole a výpočet elektrických parametrů stroje je proveden na základě metody konečných prvků. V úvodu kapitoly je provedeno pojednání o vhodném modelu, nastavení meshe a kroku výpočtu vzhledem k době výpočtu jedné iterace, přesnosti výpočtu a celkové době optimalizace – několik iterací.

Byly definovány základní geometrické rozměry – optimalizované parametry, pomocí kterých byla měněna převážně geometrie stroje a měněny tak vlastnosti stroje. Byla představena optimalizace tvaru magnetů, tvaru vzduchové mezery a tvaru statorové drážky jako jedné společné úlohy. Sledovanými výstupními vlastnostmi byly následující parametry: B_t , B_g , B_y , M , E_0 , V_m , η , ΔP a I . V rámci projektu MPO byla optimalizace aplikována na stroj topologie 2p=8, Q=12, délka 80mm a 2p=8, Q=12 délky 160mm. Získané výsledky jsou sumarizované v Tab. 6.1.

Byla provedena optimalizace stroje se zaměřením na změnu materiálu, kde hlavním požadavkem bylo zachovat vlastnosti stroje, tj. napěťovou konstantu (hodnota indukovaného sdruženého napětí 1. harmonické). Dále minimalizovat cogging moment, THD a plochu použitých magnetů. Pro řešení byly použity algoritmy SOMA a GA, kde

byly výsledky následně porovnány a definovány nové rozměry stroje. Hodnoty a porovnání jsou zaznamenány v kapitole 6.3.3.

Další krok optimalizace stroje spočíval ve snižování optimalizačních proměnných, tzv. citlivostní optimalizace. Podmínky optimalizace byly zachovány, pouze v optimalizační matici byly parametry postupně nastavovány na fixní hodnoty. Tento krok vedl k zajímavým výsledkům a do jisté míry stanovil citlivost parametrů na dané objectives optimalizace. Například, když byl parametr *offset* nastaven na nulovou hodnotu, tak *cogging* moment a *THD* nebylo nijak dramaticky sníženo oproti původnímu stroji. Na druhou stranu, z optimalizace vyšel velmi zajímavý tvar magnetu, který svými rozměry měl opravdu malou plochu se zachováním požadované konstanty stroje. Všechny uvažované zásahy do optimalizace s ohledem na parametry jsou uvedeny v kapitolách 6.3.4 až 6.3.7.

Přehled všech provedených optimalizací včetně citlivostní analýzy (Mod1 – Mod12) shrnuje Tab. 6.31. Hodnoty je možné porovnat s původním strojem (Orig – první řádek tabulky). Konvergence k optimu účelové funkce OPT, zvolená optimalizační metoda MET a počet nastavených iterací úlohy ITER jsou porovnány ve sloupci OPT/MET/ITER. Výsledné hodnoty uvedené u jednotlivých modelů (Mod1 – Mod4) byly počítány pro různé případy účelové funkce. Například u Mod3 byl požadavek optimalizovat všechny objectives účelové funkce (*Cost*). S ohledem na Mod1 a Mod2, stroje byly úlohy řešeny pro různé váhy, kladené na objectives. S ohledem na Mod4, u tohoto stroje byly podmínky stejné, pouze byl pro optimalizaci použit genetický algoritmus. U výpočtů Mod5, Mod7, Mod9 byly postupně zachovány parametry jako *offset*, h_m a *Embrace* s ohledem na všechny objectives. U výpočtů Mod6, Mod8, Mod10 byly postupně zachovány parametry jako *offset*, h_m a *Embrace* kde byl ohled brán pouze na napěťovou konstantu stroje k_E a *cogging* moment. Snižování optimalizovaných parametrů pouze na dva, je provedeno v případech Mod11 a Mod12, kde byly vynechány parametry *Embrace* a *Offset*. Cílem kalkulací Mod5 – Mod12 bylo poukázat na to, jak je důležité správně definovat optimalizované parametry a také na to, jak počet parametrů a nastavení požadavků na argumenty účelové funkce, včetně váhových koeficientů, ovlivňuje průběh celé optimalizace. Za optimální řešení lze považovat řešení u Mod3 (komplexní optimalizace) a dále Mod7 (z citlivostní optimalizace). Podrobnější úvahy o tom, který parametr modelů (Mod5 – Mod12) má dominující vliv na získané výsledky (k_E , *THD*, *Pk2Pk* a *MagArea*) jsou uvedeny v kapitolách 6.3.4 až 6.3.7.

Tab. 6.31 byla rozšířena o další možné koncepce stroje (Seg5_1 a Seg5_2). Segmentace magnetů Seg5_1 (6.4.4) odpovídá nejlepšímu možnému způsobu segmentace magnetů, tedy pro 5 lineárních segmentů – zaoblené rohy jsou ztráty

119.49W. Výpočty ztrát v tomto případě byly provedeny na požadavek zadavatele a neuvažují stočení statorových plechů o jednu drážkovou rozteč. Segmentace magnetů Seg5_2 (6.4.4) odpovídá té samé segmentaci, jak v případě Seg5_1 s tím rozdílem, že byl nastaven Offset = 18.4mm. U modelu Seg5_2 byl offset nastaven proto, že velikost offsetu magnetu ovlivní nejen ztráty v magnetech 83.24W, ale i hodnotu napěťové konstanty $kE = 303,21\text{V/krpm}$, $THD = 8.26\%$, $Pk2Pk = 0.21\text{Nm}$.

Tab. 6.31: Porovnání provedených optimalizací pro AKM8_160mm

Model	Optimized parameters				Calculated objectives					OPT/MET/ITER	Chapter
	Embrace (p.u.)	h_m (mm)	Offset (mm)	R (mm)	kE (V/1000rpm)	THD (%)	Pk2Pk (Nm)	S_m (mm ²)	Cost(-)		
Orig	0.8833	7.00	18.40	0	271.00	6.22	0.28	219.60	-	Wmag=47.71W	
Mod1	0.7219	7.87	29.56	0.350	279.46	3.21	0.04	211.72	0.2142	YES/SOMA/10	6.3.3
Mod2	0.7188	6.58	23.68	1.241	277.05	3.31	0.04	175.94	0.1377	YES/SOMA/10	6.3.3
Mod3	0.7164	6.56	23.38	0.986	276.95	3.32	0.05	175.32	0.0620	YES/SOMA/15	6.3.3
Mod4	0.8910	5.58	17.70	0.981	292.25	7.68	0.04	166.85	0.0751	NO/GA/10	6.3.3
Mod5	0.6634	6.56	0	0.110	280.00	4.46	5.79	174.87	1.0078	NO/SOMA/10	6.3.4
Mod6	0.7029	5.17	0	0.821	280.00	4.41	1.39	140.74	1.0077	NO/SOMA/5	6.3.4
Mod7	0.7216	7.00	27.21	0.990	276.76	3.25	0.04	186.52	0.0496	YES/SOMA/5	6.3.5
Mod8	0.7129	7.00	18.29	1.270	282.97	3.52	0.09	190.96	0.1707	YES/SOMA/5	6.3.5
Mod9	0.8833	5.27	16.50	0.053	290.10	7.67	0.04	156.29	0.0750	YES/SOMA/5	6.3.6
Mod10	0.8833	6.08	17.51	0.975	297.27	8.06	0.04	185.92	1.1091	NO/SOMA/5	6.3.6
Mod11	0.8833	4.5	0	1.968	296.42	10.29	0.98	137.67	1.0631	NO/SOMA/5	6.3.7
Mod12	0.8833	4.5	0	1.913	296.42	10.29	1.10	137.58	1.0620	NO/SOMA/5	6.3.7
Seg5_1	0.8833	7.0	0	1.500	316.37	11.06	3.72	233.43	-	Wmag=119.49W	6.4.4
Seg5_2	0.8833	7.0	18.4	1.5	303.21	8.26	0.21	219.23	-	Wmag=83.24W	6.4.4
Seg5_3	0.7216	7.00	27.21	0.990	276.89	4.50	0.05	186.52	-	Wmag=59.34W	6.4.4

Vzhledem k segmentaci magnetů, byly zvoleny tři možnosti segmentace magnetů a to, lineární segmentace bez zaoblení hran magnetů, lineární segmentace magnetů se zaoblením hrany a nelineární segmentace magnetů se zaoblenou hranou. Při každé segmentaci byly propočítávány možnosti pro 1-5 segmentů na jeden magnet. V prvních dvou případech (lineární segmentace) jsou magnety rozděleny do segmentů, kde každý segment má stejnou výšku. Ve třetím případě (nelineární segmentace) jsou magnety segmentovány tak, že každý segment má stejnou plochu S_m . Výsledky podrobněji porovnává Tab. 6.26. Nejnižší ztráty v magnetech odpovídají případu, kdy je magnet lineárně rozdělen na 5 segmentů, kde krajní segmenty mají zaoblené hrany. Ztráty v tomto případě vycházejí 119.49W a odpovídají celkovým ztrátám ve všech použitých magnetech stroje během jedné otáčky stroje. V porovnání s původním strojem (NdFeB) byly ztráty podstatně nižší (Orig, 47.71W). Výpočty ztrát v nových magnetech byly provedeny pro offset = 0mm (počet segmentů 5), což tyto ztráty zvyšuje vzhledem ke konstantní vzduchové mezeře (Seg5_1, 119.49W). Výpočet ztrát u původního stroje byl proveden pro offset = 18.4mm, což představuje proměnnou vzduchovou mezeru

s $offset = 18.4$, SmCo materiálem a segmentací jsou ztráty sníženy na hodnotu 83.24W (Seg5_2). S podobnou myšlenkou bylo přistupováno i u optimálního návrhu stroje Mod7. Magnety (Mod7) byly rovněž segmentovány (Seg5_3) a vypočítány ztráty v magnetech (59.34W).

Optimální návrh stroje odpovídá rozměrům $Embrace = 0,7216$, $h_m = 7\text{mm}$, $offset = 27,21\text{mm}$ a $R = 0,990\text{mm}$. Pro optimální rozměry byly vypočítány hodnoty napěťové konstanty $k_E = 276,76\text{V}$ (THD=3,25%) a cogging momentu 0,04Nm. Po segmentaci v podélném směru jsou sníženy ztráty v magnetech na hodnotu 59.34W během jedné periody napájecího napětí. Hodnota cogging momentu se po segmentaci změnila na hodnotu 0.05Nm. Výpočet ztrát nebyl předmětem hlavní optimalizace na základě umělé inteligence, ale jako klasická parametrická optimalizace.

Závěr

Dizertační práce byla vytvořena s cílem aplikovat algoritmy umělé inteligence na optimalizace strojů s permanentními magnety na rotoru a vytvořit tak automatický návrh stroje. Byla představena řada optimalizačních algoritmů, které byly testovány na fiktivních úlohách se záměrem zjistit, zda se uvažovaný algoritmus hodí pro zvolený typ úlohy. Hlavním přínosem práce je použití optimalizačních metod, které spolupracují s různými programy navrhující elektrické stroje pomocí metod konečných prvků. Vzhledem k tomu, že se jedná o externí optimalizační program, je oblast použití široká. Metody byly použity přes příslušná rozhraní u nejznámějších programů jako ANSOFT/MAXWELL, SPEED Laboratory, apod. Vždy se jednalo o automatizovaný proces návrhu stroje s ohledem na elektromagnetické, mechanické a tepelné vlastnosti stroje.

Optimalizační algoritmy byly použity pro návrh stroje s PM s jmenovitými otáčkami do 6000 min^{-1} (kap 4.2). Pro tento typ stroje byl vyroben laboratorní vzorek za účelem ověřit, zda vyrobený stroj má lepší parametry než předložený originál. Optimalizace byla zaměřena na výměnu materiálu použitých magnetů, zachování provozních parametrů, jako napěťové a momentové konstanty, a dále na zlepšení celkové účinnosti stroje. Byla provedena parametrická analýza, kde bylo nalezeno optimum, a tím definovány výsledné parametry. Algoritmus měl nalézt podobné, popřípadě lepší řešení. Nově navržený stroj má o 1,3% lepší účinnost při zachování stejného výkonu stroje. Tímto krokem byla ověřena vhodnost optimalizačního algoritmu SOMA, protože byla potvrzena konvergence do přibližně stejných hodnot z parametrického návrhu. Při řešení podobných typů úloh se pak předpokládá, že algoritmus SOMA je efektivní a vhodný pro optimalizace. Algoritmus byl následně použit při multi-fyzikálním návrhu vysokorychlostního stroje, tj. mechanického, tepelného a elektromagnetického návrhu. Další možnosti využití algoritmu SOMA jsou provedeny na stroji 15kW s PM na rotoru v kapitole 6.

Za důležitý přínos dizertační práce je považován typ a tvar účelové funkce zvolené pro řešení optimalizace stroje. Zvolená účelová funkce je totiž pro optimalizaci důležitou částí. Jednak se jí určuje rychlost optimalizace a jednak určitým způsobem stanovuje efektivitu a citlivost daných optimalizačních parametrů.

Aplikovaná optimalizační metodika a získané výsledky byly prezentovány na řadě mezinárodních konferencí a v odborné literatuře. Optimální návrh elektrických strojů s PM a užitečnost optimalizačních algoritmů byly prakticky ověřeny na několika laboratorních vzorcích, a byly tedy splněny všechny definované cíle dizertační práce.

Použitá literatura

Konference

- [1] DUAN, Y.; HARLEY, R.G.; HABETLER, T.G.; , "A useful multi-objective optimization design method for PM motors considering nonlinear material properties," *Energy Conversion Congress and Exposition, 2009. ECCE 2009. IEEE*, vol., no., pp.187-193, 20-24 Sept. 2009 ISBN: 978-1-4244-2893-9.
- [2] DUAN, Y.; HARLEY, R.G.; HABETLER, T.G.; , "Comparison of Particle Swarm Optimization and Genetic Algorithm in the design of permanent magnet motors," *Power Electronics and Motion Control Conference, 2009. IPEMC '09. IEEE 6th International* , vol., no., pp.822-825, 17-20 May 2009 Print ISBN: 978-1-4244-3556-2.
- [3] YUNJUE, A.; CHANGZHI, S.; and col.; , "Optimization design of high efficiency permanent magnet spinning motor with hybrid algorithm of SO and Chaos," *Electrical Machines and Systems, 2007. ICEMS. International Conference on* , vol., no., pp.1778-1780, 8-11 Oct. 2007 ISBN 978-89-86510-07-2.
- [4] SHOUDAO, H.; JINPING, Z.; JIAN, G.; KEYUAN, H.; , "Optimization the Electromagnetic Torque Ripple of Permanent Magnet Synchronous Motor," *Electrical and Control Engineering (ICECE), 2010 International Conference on* , vol., no., pp.3969-3972, 25-27 June 2010 ISBN 978-1-4244-6880-5
- [5] DUAN, Y.; HARLEY, R.G.; HABETLER, T.G.; , "Method for multi-objective optimized designs of Surface Mount Permanent Magnet motors with concentrated or distributed stator windings," *Electric Machines and Drives Conference, 2009. IEMDC '09. IEEE International* , vol., no., pp.323-328, 3-6 May 2009 ISBN 978-1-4244-4251-5.
- [6] YUL-KYU SON; KYU-YUN HWANG; BYUNG-IL KWON; , "Maximum torque control for optimal design to reduce cogging torque in spoke type interior permanent magnet synchronous motor," *Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2010 IEEE* , vol., no., pp.3654-3658, 12-16 Sept. 2010 ISBN 978-1-4244-5286-6.
- [7] SEMIDEY, S. A.; YAO DUAN; MAYOR, J.R.; HARLEY, R.G.; , "Optimal electromagnetic-thermo-mechanical integrated design for surface mount permanent magnet machines considering load profiles," *Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2010 IEEE* , vol., no., pp.3646-3653, 12-16 Sept. 2010. ISBN 978-1-4244-5286-6.
- [8] YAMAZAKI, K.; ISHIGAMI, H.; , "Reduction of harmonic iron losses in interior permanent magnet motors by optimization of rotor structures," *Electrical Machines and Systems, 2008. ICEMS 2008. International Conference on* , vol., no., pp.2870-2875, 17-20 Oct. 2008 ISBN 978-1-4244-3826-6.
- [9] KIYOU MARS, A.; MOALLEM, M.; , "Optimal Shape Design of Interior Permanent-Magnet Synchronous Motor," *Electric Machines and Drives, 2005 IEEE International Conference on* , vol., no., pp.642-648, 15-15 May 2005. ISBN 0-7803-8987-5.
- [10] CROS, J.; VIAROUGE, P.; GELINAS, C.; , "Design of PM brushless motors using iron-resin composites for automotive applications," *Industry Applications Conference, 1998. Thirty-Third IAS Annual Meeting. The 1998 IEEE* , vol.1, no., pp.5-11 vol.1, 12-15 Oct 1998
- [11] PAN, W.; JIANJIAN Z.; SHAN F.; , "A new measure on adaptation complexity— fitness function classes, their integration and case study," *Control and Decision Conference, 2008. CCDC 2008. Chinese* , vol., no., pp.130-134, 2-4 July 2008, ISBN 978-1-4244-1733-9
- [12] ONWUBOLU, G.C.; BABU, B.V. *Studies in fuzziness and soft computing : New optimization techniques in engineering*. Vol.141. Germany : Springer - Verlag, 2004. Pp. 712. ISBN 3-540-20167-X, ISSN 1434-9922. Chap.7, chap16 and chap 25.
- [13] BINDER, A.; SCHNEIDER, T.; KLOHR, M.; , "Fixation of buried and surface mounted magnets in high-speed permanent magnet synchronous motors," *Industry Applications Conference, 2005. Fourtieth IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2005*, vol.4, no., pp. 2843- 2848 Vol. 4, 2-6 Oct. 2005. doi: 10.1109/IAS.2005.1518863. ISBN: 0-7803-9208-6.
- [14] WANG, T.; WANG, F.; BAI, H.; XING, J.; , "Optimization design of rotor structure for high speed permanent magnet machines," *Electrical Machines and Systems, 2007. ICEMS. International Conference on* , vol., no., pp.1438-1442, 8-11 Oct. 2007. ISBN: 978-89-86510-07-2.
- [15] GERADA, D.; BORG-BARTOLO, D.; MEBARKI, A.; MICALLEF, C.; BROWN, N.L.; GERADA, C.; , "Electrical machines for high speed applications with a wide constant-power region requirement," *Electrical Machines and Systems (ICEMS), 2011 International Conference on* , vol., no., pp.1-6, 20-23 Aug. 2011
- [16] KWANGDEOK KIM; YOUNHO JEONG; SEUNGHO LEE; YONG JAE KIM; YU-SUK JEONG; SANG-YONG JUNG; , "Torque harmonic characteristic of Permanent Magnet Synchronous Motor according to ratio numbers of slots and poles," *Electrical Machines and Systems (ICEMS), 2011 International Conference on* , vol., no., pp.1-4, 20-23 Aug. 2011
- [17] TANI, Y.; MORIMOTO, S.; SANADA, M.; , "Influence of number of poles, magnet arrangement, and current density on characteristics of inner and outer rotor PMSMs," *Power Electronics and Drive Systems (PEDS), 2011 IEEE Ninth International Conference on* , vol., no., pp.711-716, 5-8 Dec. 2011

Impaktované časopisy

- [18] OUYANG, W.; ZARKO, D.; LIPO, T.A.; , "Permanent Magnet Machine Design Practice and Optimization," *Industry Applications Conference, 2006. 41st IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2006 IEEE* , vol.4, no., pp.1905-1911, 8-12 Oct. 2006 ISSN 0197-2618.

- [19] WROBEL, R.; MELLOR, P.H.; , "Particle Swarm Optimisation for the Design of Brushless Permanent Magnet Machines," *Industry Applications Conference, 2006. 41st IAS Annual Meeting, Conference Record of the 2006 IEEE* , vol.4, no., pp.1891-1897, 8-12 Oct. 2006 ISSN 0197-2618.
- [20] LASKARIS, K. I.; KLADAS, A. G.; , "Permanent Magnet Shape Optimization Effects on Synchronous Motor Performance," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on* , vol.PP, no.99, pp.1, Now 2010. ISSN 0278-0046.
- [21] YAMAZAKI, K.; ISHIGAMI, H.; , "Rotor-Shape Optimization of Interior-Permanent-Magnet Motors to Reduce Harmonic Iron Losses," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on* , vol.57, no.1, pp.61-69, Jan. 2010. ISSN 0278-0046.
- [22] DONG-JOON SIM; DONG-HYEOK CHO; JANG-SUNG CHUN; HYUN-KYO JUNG; TAE-KYOUNG CHUNG; , "Efficiency optimization of interior permanent magnet synchronous motor using genetic algorithms," *Magnetics, IEEE Transactions on* , vol.33, no.2, pp.1880-1883, Mar 1997. ISSN 0018-9464.
- [23] BIANCHI, N.; BOLOGNANI, S.; FRARE, P.; , "Design criteria for high-efficiency SPM synchronous motors," *Energy Conversion, IEEE Transactions on* , vol.21, no.2, pp. 396- 404, June 2006 ISSN 0885-8969.
- [24] YAMAZAKI, K.; ABE, A.; , "Loss Investigation of Interior Permanent-Magnet Motors Considering Carrier Harmonics and Magnet Eddy Currents," *Industry Applications, IEEE Transactions on* , vol.45, no.2, pp.659-665, March-april 2009. ISSN 0093-9994.
- [25] MI, C.C.; , "Analytical design of permanent-magnet traction-drive motors," *Magnetics, IEEE Transactions on* , vol.42, no.7, pp. 1861- 1866, July 2006. ISSN 0018-9464.
- [26] FUJISHIMA, Y.; WAKAO, S.; KONDO, M.; TERAUCHI, N.; , "An optimal design of interior permanent magnet synchronous motor for the next generation commuter train," *Applied Superconductivity, IEEE Transactions on* , vol.14, no.2, pp. 1902- 1905, June 2004. ISSN 1051-8223.
- [27] KI-CHAN KIM; JU LEE; HEE JUN KIM; DAE-HYUN KOO; , "Multiobjective Optimal Design for Interior Permanent Magnet Synchronous Motor," *Magnetics, IEEE Transactions on* , vol.45, no.3, pp.1780-1783, March 2009. ISSN 0018-9464.
- [28] JOON-HO LEE; DONG-HUN KIM; IL-HAN PARK; , "Minimization of higher back-EMF harmonics in permanent magnet motor using shape design sensitivity with B-spline parameterization," *Magnetics, IEEE Transactions on* , vol.39, no.3, pp. 1269- 1272, May 2003. ISSN 0018-9464.
- [29] OMEKANDA, A.M.; , "Robust torque and torque-per-inertia optimization of a switched reluctance motor using the Taguchi methods," *Industry Applications, IEEE Transactions on* , vol.42, no.2, pp. 473- 478, March-April 2006. ISSN 0093-9994.
- [30] CAVALLARO, C.; DITOMMASO, A.O.; MICELI, R.; RACITI, A.; GALLUZZO, G.R., "Efficiency Enhancement of Permanent-Magnet Synchronous Motor Drives by Online Loss Minimization Approaches," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on* , vol.52, no.4, pp. 1153- 1160, Aug. 2005. ISSN 0278-0046
- [31] SALAMIM M.; HENDTLASS, T.; , "A fast evaluation strategy for evolutionary algorithms," *Applied Soft Computing*, Volume 2, Issue 3, January 2003, Pages 156-173, ISSN 1568-4946.
- [32] PONOMAREV, P.; LINDH, P.; PYRHONEN, J.; , "Effect of Slot and Pole Combination on the Leakage Inductance and the Performance of Tooth-Coil Permanent-Magnet Synchronous Machines," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on* , vol.PP, no.99, pp.1, 0
- [33] ZHU, Z. Q.; MOHD JAMIL, M. L.; WU, L. J.; , "Influence of Slot and Pole Number Combinations on Unbalanced Magnetic Force in PM Machines With Diametrically Asymmetric Windings," *Industry Applications, IEEE Transactions on* , vol.49, no.1, pp.19-30, Jan.-Feb. 2013
- [34] SHEN, J.X.; ZHU, Z.Q.; HOWE, D., "Sensorless flux-weakening control of permanent-magnet brushless machines using third harmonic back EMF," *Industry Applications, IEEE Transactions on* , vol.40, no.6, pp.1629,1636, Nov.-Dec. 2004

Knihy

- [35] ONWUBOLU, G.C.; BABU, B.V. *Studies in fuzziness and soft computing : New optimization techniques in engineering*. Vol.141. Germany : Springer - Verlag, 2004. Pp. 712. ISBN 3-540-20167-X, ISSN 1434-9922.
- [36] MOHAN, C.; DEEP, K. *Optimization Techniques*. UK : New Age Science, April 15, 2009. 628 s. ISBN 978-1-906574-21-5.
- [37] RAVINDRAN, A.; RAGSDELL, K.M.; REKLAITIS, G.V. *Engineering optimization : Methods and Application*. 2nd. Canada : John Wiley & Sons., 2006. 667 s. ISBN 978-0-471-55814-9.
- [38] ZELINKA, I. *Umělá inteligence v problémech globální optimalizace*. 1. Praha : BEN - technická literatura, 2002. 192 s. ISBN 80-7900-069-5.
- [39] ZELINKA, I., et al. *Evoluční výpočetní techniky : Principy a aplikace*. 1. Praha : BEN - technická literatura, 2009. 536 s. ISBN 978-80-7300-218-3.
- [40] FLOUDAS, Ch. A.; PARDALOS P. M. (EDS.). *Encyclopedia of optimization*. 2. ed. Berlin [u.a.]: Springer, 2008. ISBN 978-038-7747-590.
- [41] PYRHONEN, Juha, Tapani JOKINEN a Valeria HRABOVCOVÁ. *Design of rotating electrical machines*. Hoboken, NJ: Wiley, c2008, ix, 512 p. ISBN 978-047-0695-166.
- [42] GIERAS, Jacek Franciszek. *Permanent magnet motor technology: design and applications*. 3rd ed. Boca Raton: CRC Press, c2010, xiv, 612 s. Third Edition. ISBN 978-1-4200-6440-7.

Autorovy publikace

- [43] KURFÜRST, J.; SKALKA, M.; JANDA, M. DUROŇ, J.; ONDRŮŠEK, Č.; Magnet shape optimization of brushless machine by Self – Organizing Migrating Algorithm. In *POWERENG 2011 International conference*.
- [44] KURFÜRST, J.; HADAŠ, Z.; ONDRŮŠEK, Č. Optimization process of vibration power generator using optimization strategy SOMA. In *MENDEL 2010 International conference*. 1. Brno: 2010. s. 411-417. ISBN: 978-80-214-4120-0.
- [45] KURFÜRST, J.; DUROŇ, J.; ONDRŮŠEK, Č.; Optimization of the brushless permanent magnet machine. In *Low Voltage Electrical Machines 2010 International conference*. BUT Brno, FEEC: uvee fekt but, 2010. s. 57-58. ISBN: 978-80-214-4178-1.
- [46] HADAŠ, Z.; ONDRŮŠEK, Č.; KURFÜRST, J.; *Optimization of Vibration Power Generator Parameters Using Self- Organizing Migrating Algorithm*. In *Recent Advances in Mechatronics 2008- 2009*. 1. Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009. s. 245-250. ISBN: 978-3-642-05021-3.
- [47] KURFÜRST, J. *Optimization algorithm SOMA applied on the vibration generator*. 16th Conference STUDENT EEICT 2010. 4. VUT Brno, FEEC: NOV PRESS s. r. o., 2010. s. 127-131. ISBN: 978-80-214-4079-1.
- [48] KURFÜRST, J.; ONDRŮŠEK, Č.; HADAŠ, Z.; *Optimization of vibration microgenerator*. In *Low Voltage Electrical Machine*. 1. Brno: uvee fekt but, 2009. s. 59-62. ISBN: 978-80-214-3975-7.
- [49] HADAŠ, Z.; KURFÜRST, J.; ONDRŮŠEK, Č.; SINGULE, V. Artificial intelligence based optimization for vibration energy harvesting applications. *Microsystem Technologies*, 2012, roč. 18, č. 7- 8, s. 1003-1014. ISSN: 0946-7076.
- [50] KURFÜRST, J.; SKALKA, M.; ONDRŮŠEK, Č.; DUROŇ, J. Multi Objective Optimization of the Surface Mounted Permanent Magnet Machine in Order to Achieve the Desired Output Parameters. In *XI. International Conference Proceeding on Low Voltage Electrical Machines*. 1. Brno: UVEE, 2011. s. 1-4. ISBN: 978-80-214-4362-4.
- [51] MICHAILIDIS, P.; KURFÜRST, J.; ONDRŮŠEK, Č.; CHOCHOLÁČ, J. Preparation of the FEM Model in Order to the Synchronous Generator Optimization. In *XII. International Conference on Low Voltage Electrical Machines 2012*. Brno: 2012. s. 1-4. ISBN: 978-80-214-4602-1.
- [52] KURFÜRST, J.; SKALKA, M.; ONDRŮŠEK, Č. Simulation Results and Optimization Techniques of The High Speed Machine. In *XII. International Conference on Low Voltage Electrical Machines 2012*. 1. Brno: 2012. s. 1-4. ISBN: 978-80-214-4602-1.
- [53] KURFÜRST, J.; *Optimalizace vibračního mikrogenerátoru*. Brno, 2009. 67 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií.
- [54] KURFÜRST, J.; ONDRŮŠEK, Č.; DUROŇ, J. *Změna materiálu magnetů včetně parametrické optimalizace povrchu magnetu v závislosti na požadovaných výstupních parametrech stroje*. Výzkumná zpráva projektu MPO FR-TI1/082. Brno: 2012. s. 1-72.
- [55] KURFÜRST, J.; ONDRŮŠEK, Č.; DUROŇ, J. *Optimalizace základních rozměrů rotoru a statoru vzhledem k výstupním parametrům synchronního stroje s PM*. Výzkumná zpráva projektu MPO FR-TI1/082. Brno: 2011. s. 1-26.
- [56] KURFÜRST, J.; ONDRŮŠEK, Č.; DUROŇ, J. *Optimalizace magnetického obvodu a ztrát*. Výzkumná zpráva projektu MPO FR-TI1/082. Brno: 2011. s. 1-35.
- [57] KURFÜRST, J.; ONDRŮŠEK, Č.; DUROŇ, J. *Optimalizace tvaru magnetu pro dosažení minimálního harmonického činitele zkreslení*. Výzkumná zpráva projektu MPO FR-TI1/082. Brno: 2011. s. 1-15.

Funkční vzorky

- [58] KURFÜRST, J.; ONDRŮŠEK, Č.; DUROŇ, J.: OSM_6000; *Optimalizovaný synchronní stroj s PM na rotoru*. firma: Kollmorgen, s.r.o., Evropská 864, Modřice, 664 42. URL: <http://www.uvee.feec.vutbr.cz/> vzorky. (prototyp) <http://www.uvee.feec.vutbr.cz/fvzorky>

Ostatní

- [59] ANSYS INC. *User's guide - Maxwell 2D: Electronic design automation software*. Canonsbrug, 2010. Dostupné z: <http://www.ansys.com>.
- [60] TJE MILLER. *SPEED's Electric Machines: An outline of some of the theory in the SPEED software for electric machine design with problem and solutions*. University of Glasgow, 2002-2009.
- [61] ARNOLD, *ARNOLD magnetics technologies* [online]. 2013 [cit 2013-05-01]. Dostupné z: www.arnoldmagnetics.com/
- [62] HIGH TEMP METALS, INC. *INCONEL 718 technical data* [online]. 2013 [cit. 2012-02-10]. Dostupné z <http://www.hightempmetals.com/techdata/hitempInconel718data.php>.
- [63] AZOM, *AZo Journal of Materials, Stainless steel grade 304* [Online]. 2000-2013 [cit. 2012-02-10]. Dostupné z <http://www.azom.com/properties.aspx?ArticleID=9655>
- [64] ASM AEROSPACE SPECIFICATION METALS; INC.; Titanium Ti 6AL 4V - AMS 4911 [online]. 2012 [cit. 2012.02-20]. Dostupné z <http://www.aerospacemetals.com/titanium-ti-6al-4v-ams-4911.html>
- [65] TOTAL MAGNETIC SOLUTIONS, *Table of Properties for SmCo Magnets* [online]. 2000 [cit. 2013-03-10]. Dostupné z <http://www.magnetsales.com/SMCO/smcoprops.html>.

Seznam použitých symbolů a zkratk

SYMBOL	VÝZNAM	JEDNOTKA
$2p$	počet pólů	-
A	Lineární proudová hustota	Am^{-1}
B	Průměrná hodnota magnetické indukce	T
B_{bi}	Magnetická indukce ve jhu stroje	T
B_r	Remanentní magnetická indukce	T
$BetaM$, $Embrace$	Poměrné pólové krytí	-
B_g , B_{gap}	Magnetická indukce ve vzduchové mezeře	T
B_p , B_{tooth}	Magnetická indukce v zubu statoru	T
$Cog_{g_{max}}$	Maximální hodnota cogging určená programátorem, špička - špička	Nm
CB_r	Teplotní koeficient materiálu magnetu	%/K
CH_{c_j}	Teplotní koeficient materiálu magnetu	%/K
C_V	Koeficient pro výpočet potřebného objemu magnetů	-
DE	Diferenciální evoluce	
D_g	Průměr kruhu umístěného uprostřed vzduchové mezery	m
D_i	Vnitřní průměr statoru	m
D_o , $StatorOD$	Vnější průměr statoru	m
E	Modul pevnosti v tahu	N/m^2
E_0	Fázová hodnota indukovaného napětí	V
EM	Elektromagnetický návrh	
H_c	Koercitivní síla	A/m
H_{cb}	Koercitivní síla aplikovaná pro vytvoření magnetického indukce B.	A/m
H_{c_j}	Vlastní koercitivní síla magnetu	A/m
HS	High Speed	-
CHA	Chaotic algorithm	
I	Proud statoru	A
I_d	Proud v d-ose	
I_{MAX}	Maximální hodnota proudu	A
$IPMSM$	Synchronní stroj s permanentními magnety uvnitř rotoru	-
I_q	Proud v q-ose	
J	Proudová hustota	A/m^2
J_C	Vypočítaná proudová hustota	A/m^2
J_{MAX}	Maximální proudová hustota	A/m^2
M	Moment stroje	Nm
MC	Monte Carlo	
M_C	Počítaný moment na hřídeli stroje	Nm
MKP	Metoda konečných prvků	-
M_{MAX}	Maximální hodnota momentu na hřídeli	Nm
M_R	Požadovaný moment na hřídeli stroje	Nm
N	Počet závitů	-

Optimalizace stroje s permanentními magnety na rotoru pomocí umělé inteligence

<i>NFL</i>	No Free lunch teorém	-
<i>NSH</i>	Počet drátů vodiče	-
<i>Offset</i>	Velikost zaoblení magnetu	m
<i>Pk2Pk</i>	Hodnota průběhu momentu špička - špička	Nm
<i>PM</i>	Permanentní magnety	-
<i>P_N</i>	Výkon stroje	W
<i>PSO</i>	Particle swarm optimization	-
<i>PWM</i>	Pulzně šířková modulace	-
<i>Q</i>	Počet drážek statoru	-
<i>RMO</i>	Vnější průměr magnetu	m
<i>RotorOD</i>	Vnější průměr rotoru	m
<i>RotorOR</i>	Vnější poloměr rotoru	m
<i>R, MagCorRad</i>	Rádus zaoblení magnetu v obou rozích zasahujících do vzduchové mezery	mm
<i>R_S</i>	Odpor vinutí statoru	Ω
<i>PMSM</i>	Synchronní stroj s permanentními magnety na rotoru	-
<i>SO</i>	Otevření drážky	m
<i>S_{mv} MagArea</i>	Plocha magnetu	m ²
<i>S_w</i>	Plocha vinutí	m ²
<i>THD_B</i>	Činitel harmonického zkreslení magnetické indukce ve vzduchové mezeře	-
<i>THD_I</i>	Činitel harmonického zkreslení proudu	%
<i>THD_U</i>	Činitel harmonického zkreslení indukovaného napětí	%
<i>T_{mag}</i>	Teplota magnetů	°C
<i>T_{magMAX}</i>	Maximální teplota magnetu	°C
<i>T_{wdg}</i>	Teplota vinutí	°C
<i>T_{wdgMAX}</i>	Maximální teplota vinutí	°C
<i>U_f</i>	Fázová hodnota svorkového napětí	V
<i>U_{MAX}</i>	Maximální hodnota sdruženého napětí	V
<i>U_s</i>	Jmenovité sdružené napětí	V
<i>U_{sC}</i>	Počítaná hodnota jmenovitého sdruženého napětí	V
<i>V_{bi}</i>	Objem statorového jha	m ³
<i>VG</i>	Vibrační generátor	-
<i>V_m</i>	Objem magnetů	m ³
<i>V_R</i>	Objem rotoru	m ³
<i>V_t</i>	Objem zubu statoru	m ³
<i>L</i>	Indukčnost	H
<i>L_d</i>	Indukčnost stroje v d-ose	H
<i>L_q</i>	Indukčnost stroje v q-ose	H
<i>X_d</i>	Reaktance stroje v d-ose	Ω
<i>X_q</i>	Reaktance stroje v q-ose	Ω
<i>b_p</i>	Pólové krytí	m
<i>c_i</i>	Váhový koeficient, který definuje priority účelové funkce, kde i=1, 2, 3, 4, ..., n	-
<i>cosj</i>	Účinnost stroje	-
<i>d_{Cu}</i>	Průměr drátu	m ²

Optimalizace stroje s permanentními magnety na rotoru pomocí umělé inteligence

e_1	Maximální hodnota 1. harmonické indukovaného napětí	V
f	Napájecí frekvence	Hz
$f(x)$	Funkční hodnota funkce f v bodě x	-
g	gravitační zrychlení $g = 9,81\text{m/s}^2$	m/s^2
h_{bi}	Výška statorového jha	m
h_{ml}	Výška magnetu	m
$h_m, \text{MagThick}$	Výška kruhového magnetu	m
h_{ml}	Výška obdelníkového magnetu	m
h_s	Výška bandáže rotoru	m
h_t, SD	Výška zubu statoru	m
k_{ad}	Armature reaction factor in d-axis	-
k_E	Napěťová konstanta vztážená na počet otáček 1000rpm (krpm) při jmenovité teplotě	V/krpm
k_{Ereq}	Požadovaná hodnota napěťové konstanty	V/krpm
k_f	form factor	-
k_{fd}	Form factor of the armature reaction in d-axis	-
k_T, k_M	Momentová konstanta stroje vztážená na efektivní hodnotu jmenovitého proudu	Nm/A
k_{Treq}, k_{Mreq}	Požadovaná hodnota momentové konstanty	Nm/A
k_{ocf}	Koeficient přetížitelnosti (over-load capacity factor)	-
k_{ov}	Činitel vinutí, kterým se zvyšuje efektivní délka vinutí s $y_q > 1$	-
k_w	Činitel vinutí	-
l	Délka aktivní části stroje	m
l_g	Délka vzduchové mezery	m
l_{stk}	Délka svazku	m
l_t	Redukovaná délka zubu	m
m	Počet fází	-
n	Rychlost otáčení rotoru	min^{-1}
p	počet pólových dvojic	-
p_c	Kontaktní mechanické napětí mezi magnetem a povrchem rotoru	N/mm^2
$p_{c,mag}$	Kontaktní mechanické napětí mezi magnetem a bandáží	N/mm^2
$p_{c,prestres}$	Kontaktní mechanické napětí mezi magnetem a rotorem vzniklé pomocí předpětí	N/mm^2
p_{ab}	Kontaktní mechanické napětí bandáže vlivem otáčení	N/mm^2
p_{am}	Kontaktní mechanické napětí magnetu vlivem otáčení	N/mm^2
q	Počet drážek na pól a fázi	-
s_r	Split ration 0.3 - 0.7	-
u_d	d-složka statorového fázového napětí U_f	V
u_q	q-složka statorového fázového napětí U_f	V
w_t	Šířka zubu	m
w_p, TWS	Šířka zubu statoru	m
y_q	Cívkový krok	-
β	Úhel mezi fázorem proudu I a q-složkou I_q	$^\circ$
ζ	Coefficient of utilization 0.3-0.7	-
δ	Zatěžovací úhel	$^\circ\text{ele}$
ω	Úhlová rychlost otáčení	rad/s

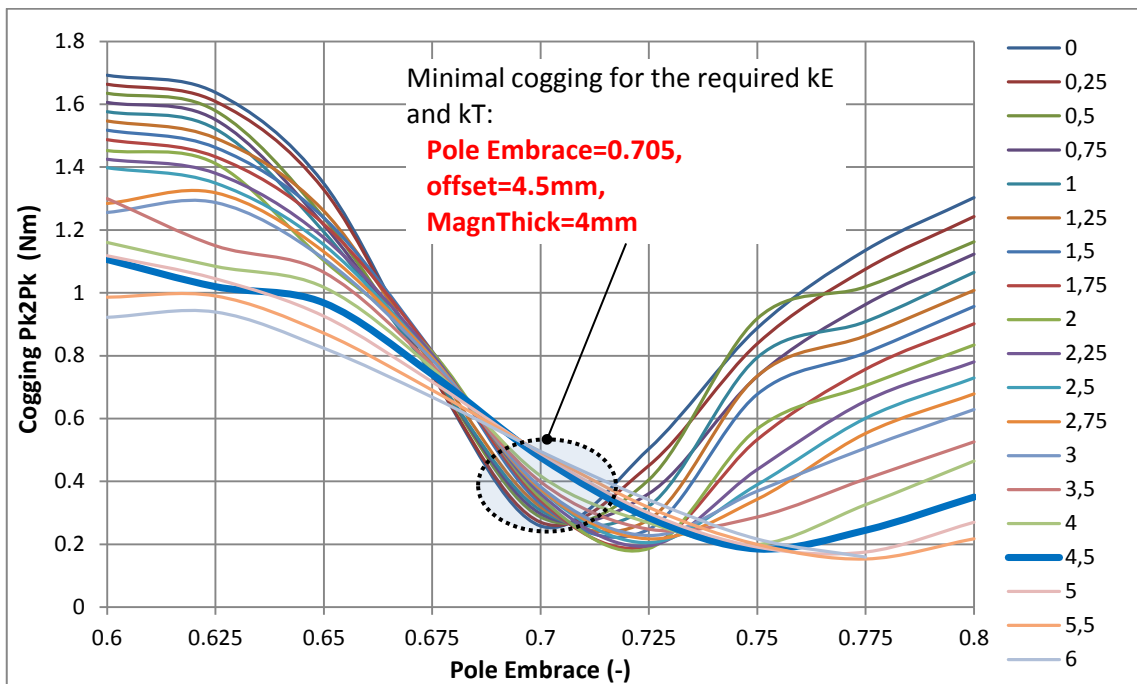
ω_s	Synchronní úhlová rychlost otáčení	rad/s
ΔD	Předpětí bandáže v jednotkách délky prodloužení bandáže	μm
ΔP_{Bandaz}	Ztráty v bandáži	W
ΔP_{Cu}	Ztráty ve vinutí	W
ΔP_{iron}	Ztráty v železe	W
ΔP_{Mag}	Ztráty v magnetech (hysterezní a vířivými proudy)	W
ΔP_{Tooth}	Ztráty v zubu statoru	W
$\Delta P_{Windage}$	ztráty třením o vzduch	W
ΔP	Celkové ztráty stroje	W
ε	Poměr mezi fázovou hodnotou indukovaného a svorkového napětí statoru	-
φ	Fázový posun mezi proudem statoru a napětím statoru	$^\circ$
ϕ	Průměrná hodnota magnetického toku	Wb
ϕ_d	Průměrná hodnota magnetického toku v d-ose	Wb
ϕ_q	Průměrná hodnota magnetického toku v q-ose	Wb
ϕ_1	Průměrná hodnota magnetického toku fáze 1	Wb
ϕ_2	Průměrná hodnota magnetického toku fáze 2	Wb
ϕ_3	Průměrná hodnota magnetického toku fáze 3	Wb
η	Účinnost stroje	%
σ_p	Součin intenzity magnetického pole a magnetické indukce	VA/m ³
τ_p	Pólová rozteč	m
τ_s	Drážková rozteč	m
μ_0	Permeabilita vakua $4\pi 10^{-7}$	H/m
μ_r	Recoil permeability	-
δ_s	Bezpečnostní faktor mechanického návrhu bandáže rotoru	-
δ_m	Bezpečnostní faktor mechanického návrhu magnetu	-
σ_t	Celkové mechanické napětí bandáže	N/mm ²
$\sigma_{t,mag}$	Celkové mechanické napětí magnetu	
$\sigma_{t,MAX}$	Maximální mechanické napětí	N/mm ²
$\sigma_{t,prestress}$	Mechanické napětí vzniklé předpětím bandáže	N/mm ²
$\sigma_{t,\omega}$	Mechanické napětí vzniklé odstředivou silou	N/mm ²
ψ_d	Spřažený magnetický v d-ose	Wb
ψ_q	Spřažený magnetický v q-ose	Wb
ψ_m	Spřažený magnetický tok od magnetů	Wb
ψ_s	Spřažený magnetický tok statoru	Wb

Příloha A – Optimalizační metody – rozšíření

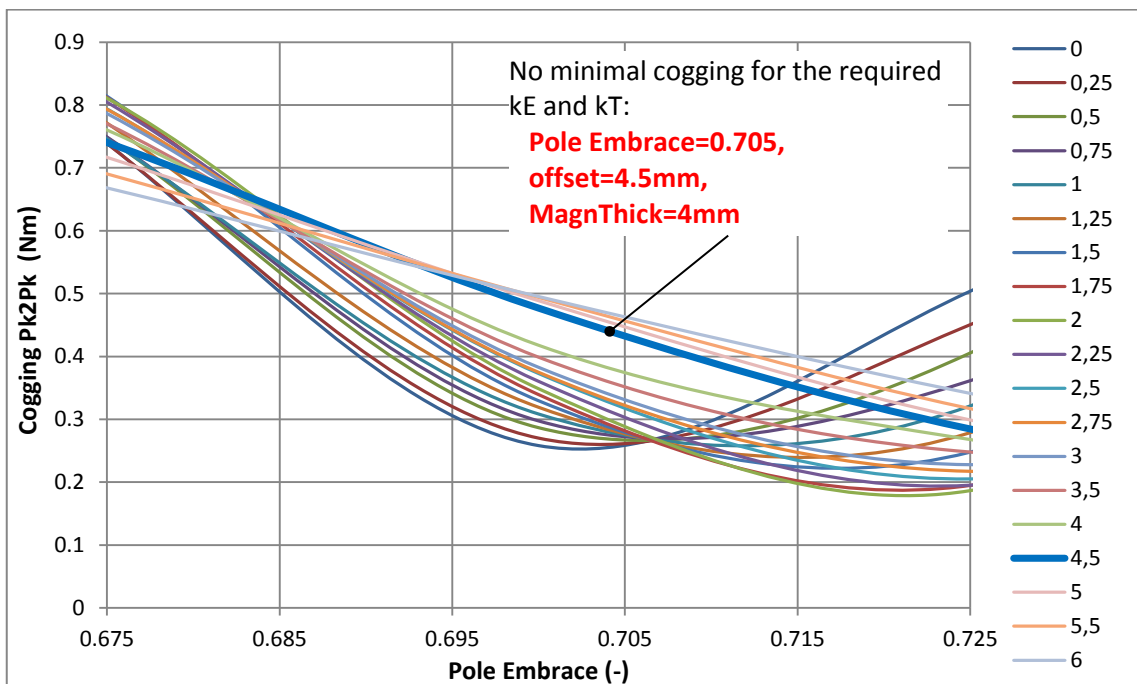
App. A. 1: Vypočítané hodnoty penalizačních funkcí z kapitoly 3.3

error	Curve 1 [-]	Curve 2 [-]	Curve 3 [-]	Curve 4 [-]	Curve 5 [-]	Curve 6 [-]	Curve 7 [-]	Curve 8 [-]
0,00	0,01	0,10	0,00	0,00	0,00	0,08	0,01	0,00
0,05	0,01	0,20	0,00	0,10	0,00	0,10	0,00	0,00
0,10	0,02	0,40	0,02	0,30	0,00	0,15	0,02	0,01
0,15	0,08	0,60	0,08	0,66	0,01	0,20	0,05	0,03
0,20	0,14	0,80	0,14	0,80	0,01	0,28	0,07	0,07
0,25	0,20	0,90	0,20	0,86	0,03	0,34	0,11	0,11
0,30	0,26	0,95	0,26	0,90	0,03	0,41	0,18	0,18
0,35	0,32	0,98	0,32	0,94	0,05	0,46	0,30	0,30
0,40	0,38	0,98	0,38	0,96	0,06	0,55	0,45	0,45
0,45	0,44	0,98	0,44	0,98	0,07	0,60	0,60	0,60
0,50	0,50	0,98	0,50	0,98	0,10	0,71	0,71	0,71
0,55	0,56	0,98	0,56	0,99	0,14	0,79	0,79	0,79
0,60	0,62	0,98	0,62	1,00	0,18	0,85	0,85	0,85
0,65	0,68	0,98	0,68	1,00	0,21	0,90	0,90	0,90
0,70	0,74	0,98	0,74	1,00	0,25	0,94	0,94	0,94
0,75	0,80	0,98	0,80	1,00	0,29	0,95	0,96	0,96
0,80	0,86	0,99	0,86	1,00	0,35	0,96	0,98	0,98
0,85	0,92	0,99	0,92	1,00	0,45	0,97	1,02	0,99
0,90	0,96	0,99	0,98	1,00	0,60	0,98	0,98	1,00
0,95	0,97	0,99	1,00	1,00	0,80	0,99	0,96	1,00
1,00	1,00	0,99	1,00	1,00	1,00	0,99	1,00	1,00

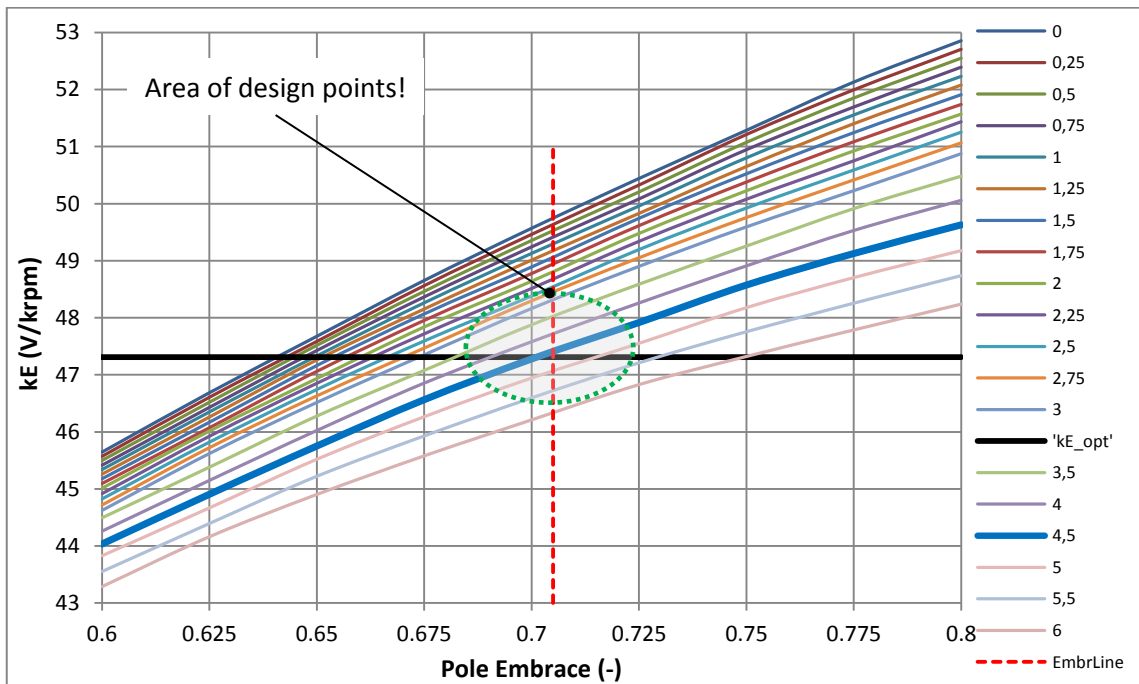
Příloha B – Ověření OM - rozšíření



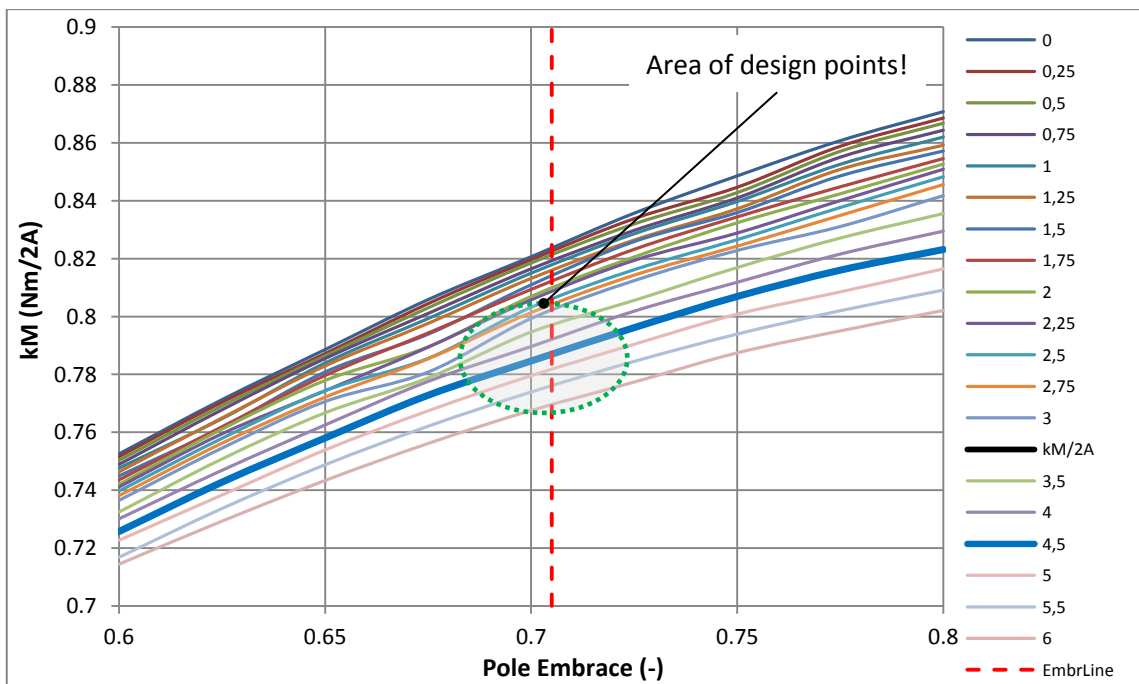
App. B. 1: Průběh cogging Pk2Pk pro různé nastavení *offset* a pólovém krytí stroje, $h_m=4\text{mm}$



App. B. 2: Detail cogging Pk2Pk pro různé specifické *offset* a pólovém krytí stroje, $h_m=4\text{mm}$



App. B. 3: Průběh k_E všech změn offset definice oblasti optima, $h_m=4\text{mm}$



App. B. 4: Průběh k_M a všech změn offset definice oblasti optima, $h_m=4\text{mm}$

Příloha C – Optimalizace vysokorychlostního stroje s PM - rozšíření

App. C. 1: Parametric analysis, carbon fiber thickness variation

h_s mm	RotorOD mm	$P_{c,prestress(r)}$ N/mm2	$P_{\omega,m}$ N/mm2	$P_{\omega,b}$ N/mm2	P_c N/mm2	$\sigma_{t,prestress}$ N/mm2	$\sigma_{t,\omega}$ N/mm2	σ_t N/mm2	δ_s -
0.1	55.070	3.895	84.264	0.324	-80.693	508.343	41.979	550.322	1.999
0.2	55.105	7.766	84.264	0.651	-77.149	508.664	41.979	550.643	1.998
1.6	55.578	59.482	84.264	5.485	-30.267	513.028	41.979	555.008	1.982
1.7	55.611	63.008	84.264	5.849	-27.105	513.331	41.979	555.310	1.981
1.8	55.643	66.513	84.264	6.215	-23.966	513.632	41.979	555.611	1.980
2.4	55.836	87.112	84.264	8.465	-5.618	515.413	41.979	557.392	1.973
2.5	55.868	90.475	84.264	8.849	-2.639	515.706	41.979	557.685	1.972
2.6	55.900	93.818	84.264	9.235	0.318	515.997	41.979	557.976	1.971
2.7	55.931	97.141	84.264	9.624	3.253	516.287	41.979	558.266	1.970
2.8	55.962	100.445	84.264	10.015	6.166	516.576	41.979	558.555	1.969
2.9	55.993	103.730	84.264	10.409	9.057	516.863	41.979	558.842	1.968
3.0	56.025	106.996	84.264	10.805	11.927	517.149	41.979	559.129	1.967
3.1	56.055	110.244	84.264	11.204	14.775	517.434	41.979	559.414	1.966
3.2	56.086	113.472	84.264	11.605	17.603	517.718	41.979	559.697	1.965
3.3	56.117	116.683	84.264	12.009	20.410	518.001	41.979	559.980	1.964

App. C. 2: Parametric analysis, speed variation of other materials

speed krpm	Inconel			Steinless			Titan		
	residual pressure N/m2	total stress N/m2	Safety -	residual pressure N/m2	total stress N/mm2	Safety	residual pressure N/m2	total stress N/mm2	Safety
0,0	85,91	541,56	2,16	83,44	525,98	0,39	56,43	355,68	2,67
5,5	85,80	541,97	2,16	83,32	526,38	0,39	56,31	355,90	2,67
11,0	85,45	543,21	2,16	82,97	527,56	0,39	55,96	356,53	2,66
16,5	84,86	545,27	2,15	82,39	529,54	0,39	55,37	357,59	2,66
22,0	84,04	548,15	2,14	81,57	532,31	0,39	54,56	359,08	2,65
27,5	82,99	551,86	2,12	80,52	535,88	0,38	53,51	360,99	2,63
33,0	81,71	556,40	2,11	79,24	540,23	0,38	52,22	363,33	2,61
38,5	80,19	561,76	2,09	77,72	545,38	0,38	50,70	366,09	2,60
44,0	78,44	567,96	2,06	75,97	551,33	0,37	48,95	369,28	2,57
49,5	76,46	574,98	2,04	73,98	558,08	0,37	46,97	372,89	2,55
55,0	74,24	582,84	2,01	71,77	565,62	0,36	44,75	376,94	2,52
60,5	71,79	591,52	1,98	69,31	573,97	0,36	42,30	381,41	2,49
66,0	69,10	601,05	1,95	66,63	583,12	0,35	39,61	386,32	2,46
71,5	66,18	611,41	1,92	63,71	593,07	0,35	36,69	391,65	2,43
77,0	63,03	622,61	1,88	60,56	603,83	0,34	33,54	397,42	2,39
82,5	59,64	634,65	1,85	57,17	615,39	0,33	30,16	403,62	2,35
88,0	56,02	647,53	1,81	53,55	627,77	0,33	26,54	410,26	2,32
93,5	52,17	661,26	1,77	49,70	640,96	0,32	22,68	417,33	2,28
99,0	48,08	675,84	1,73	45,61	654,96	0,31	18,60	424,84	2,24
104,5	43,76	691,26	1,70	41,29	669,78	0,31	14,28	432,78	2,20
110,0	39,21	707,53	1,66	36,74	685,42	0,30	9,72	441,17	2,15
115,5	34,42	724,66	1,62	31,95	701,88	0,29	4,94	450,00	2,11
121,0	29,40	742,64	1,58	26,93	719,16	0,29	-0,08	459,26	2,07
126,5	24,15	761,48	1,54	21,68	737,26	0,28	-5,34	468,98	2,03
132,0	18,66	781,18	1,50	16,19	756,19	0,27	-10,82	479,13	1,98

App. C. 3: EM a T analýza, doplňující vypočítané hodnoty η , J a proudu

split ratio = 0.33							
LM = 6mm				LM = 3mm			
	J	η	I		J	η	I
Mach type	A/mm2	%	A	Mach type	A/mm2	%	A
LM6.M1.1	10.4529	96.009	18.2645	LM3.M1.1	10.2205	96.1631	20.3234
LM6.M1.2	9.1047	95.8709	18.5073	LM3.M1.2	8.6167	95.9348	20.412
LM6.M1.3	8.0128	95.9868	18.5848	LM3.M1.3	7.8077	95.6862	20.6975
LM6.M1.4	7.2398	95.2308	18.6707	LM3.M1.4	7.1913	95.3572	20.7845
LM6.M1.5	6.7246	94.8597	18.7555	LM3.M1.5	6.8266	95.0737	21.0735
LM6.M1.6	6.3286	94.4442	18.8459	LM3.M1.6	6.4724	94.6751	21.1719
LM6.M1.7	6.0604	94.0563	19.1278	LM3.M1.7	6.2271	94.2933	21.2643
LM6.M1.8	5.8513	93.6313	19.4222	LM3.M1.8	6.1263	93.9925	22.0253

split ratio = 0.43							
LM = 6mm				LM = 3mm			
	J	η	I		J	η	I
Mach type	A/mm2	%	A	Mach type	A/mm2	%	A
LM6.M2.1	18.5811	95.5	18.2301	LM3.M2.1	13.4318	96.0563	19.0218
LM6.M2.2	13.6521	95.5225	18.4952	LM3.M2.2	11.2303	95.9523	19.0979
LM6.M2.3	10.8037	95.2494	18.5975	LM3.M2.3	9.9306	95.7583	19.2651
LM6.M2.4	9.4447	94.9469	18.6781	LM3.M2.4	9.0198	95.4894	19.3366
LM6.M2.5	8.3091	94.4995	18.7866	LM3.M2.5	8.3795	95.1822	19.4188
LM6.M2.6	7.6239	94.0678	18.8851	LM3.M2.6	7.9032	94.8441	19.4996
LM6.M2.7	7.1489	93.6567	19.0768	LM3.M2.7	7.5149	94.4526	19.5852
LM6.M2.8	6.6766	93.0487	19.2101	LM3.M2.8	7.1601	93.9374	19.7059

split ratio = 0.43							
LM = 6mm				LM = 3mm			
	J	η	I		J	η	I
Mach type	A/mm2	%	A	Mach type	A/mm2	%	A
LM6.M3.1	34.7079	94.351	22.5574	LM3.M3.1	19.1365	95.5236	20.2695
LM6.M3.2	22.3917	94.9267	22.6687	LM3.M3.2	15.0073	95.5849	20.5438
LM6.M3.3	16.6881	94.9546	22.8913	LM3.M3.3	12.4081	95.4226	20.6431
LM6.M3.4	13.5331	94.7331	23.0024	LM3.M3.4	10.8953	95.1654	20.7254
LM6.M3.5	11.645	94.405	23.1215	LM3.M3.5	9.8568	94.8447	20.826
LM6.M3.6	10.336	93.9971	23.2491	LM3.M3.6	9.1401	94.5004	20.9106
LM6.M3.7	9.4655	93.5695	23.3736	LM3.M3.7	8.5386	94.0726	21.0193
LM6.M3.8	8.7182	93.0225	23.5344	LM3.M3.8	8.1101	93.6476	21.3501

App. C. 4: Analýza EM a T, ztráty ve stroji – doplňující informace

Loss data for thermal model, split ratio 0.3, MagThick 6mm						solved data	
Open circuit		rate temperature				calc. Temp.	
ΔP_{iron}	ΔP_{Tooth}	ΔP_{Cu}	ΔP_{Mag}	ΔP_{Bandaz}	$\Delta P_{\text{Windage}}$	T_{mag}	T_{wdg}
159.48	81.50	63.49	0.00	0.16	9.07	159.74	123.55
174.15	89.10	56.37	0.00	0.16	9.07	160.05	124.24
198.18	101.95	50.09	0.00	0.17	9.07	161.18	126.38
224.69	116.18	45.68	0.00	0.17	9.07	162.95	129.42
249.61	129.80	42.77	0.00	0.17	9.07	164.31	132.76
277.74	145.11	40.57	0.00	0.17	9.07	167.35	136.88
303.67	159.22	39.54	0.00	0.18	9.07	169.96	141.25
327.29	172.27	38.86	0.01	0.18	9.07	172.60	145.68

Loss data for thermal model, split ratio 0.3, MagThick 3mm						solved data	
Open circuit		rate temperature				calc. Temp.	
ΔP_{iron}	ΔP_{Tooth}	ΔP_{Cu}	ΔP_{Mag}	ΔP_{Bandaz}	$\Delta P_{\text{Windage}}$	T_{mag}	T_{wdg}
141.03	74.57	69.06	0.01	0.15	8.07	157.84	123.31
162.36	86.29	58.89	0.01	0.15	8.07	158.52	124.62
185.44	98.44	54.42	0.01	0.16	8.07	159.98	127.27
208.47	111.61	50.52	0.01	0.16	8.07	161.85	130.44
231.35	124.32	48.78	0.01	0.16	8.07	164.09	134.14
257.88	139.23	46.60	0.01	0.16	8.07	166.76	138.57
279.49	151.27	45.13	0.01	0.16	8.07	169.12	142.49
300.00	162.78	46.12	0.02	0.18	8.07	172.23	147.58

Loss data for thermal model, split ratio 0.43, MagThick 6mm						solved data	
Open circuit		rate temperature				calc. Temp.	
ΔP_{iron}	ΔP_{Tooth}	ΔP_{Cu}	ΔP_{Mag}	ΔP_{Bandaz}	$\Delta P_{\text{Windage}}$	T_{mag}	T_{wdg}
153.64	65.44	91.63	0.00	0.65	23.09	199.55	132.57
184.37	80.86	68.85	0.00	0.67	23.09	197.80	129.86
211.96	93.39	55.29	0.00	0.68	23.09	197.11	128.81
237.57	106.04	48.77	0.00	0.69	23.09	196.17	128.25
271.14	122.26	43.38	0.00	0.70	23.09	198.61	131.53
301.71	137.76	40.15	0.01	0.70	23.09	200.00	133.88
329.15	151.42	38.15	0.01	0.72	23.09	201.45	136.28
361.12	167.92	35.99	0.01	0.73	23.09	203.27	139.35

Loss data for thermal model, split ratio 0.43, MagThick 3mm						solved data	
Open circuit		rate temperature				calc. Temp.	
ΔP_{iron}	ΔP_{Tooth}	ΔP_{Cu}	ΔP_{Mag}	ΔP_{Bandaz}	$\Delta P_{\text{Windage}}$	T_{mag}	T_{wdg}
125.70	55.21	88.01	0.01	1.11	23.09	200.30	128.67
146.72	65.46	74.36	0.01	1.12	23.09	199.44	127.33
168.34	76.15	66.66	0.01	1.14	23.09	199.52	127.69
190.75	87.48	61.01	0.01	1.15	23.09	200.09	128.72
213.82	98.81	57.12	0.01	1.16	23.09	200.48	129.45
237.82	110.88	54.25	0.01	1.17	23.09	202.23	132.34
261.68	123.29	51.93	0.01	1.18	23.09	203.63	134.67
281.69	133.97	49.91	0.01	1.20	23.09	204.98	136.93

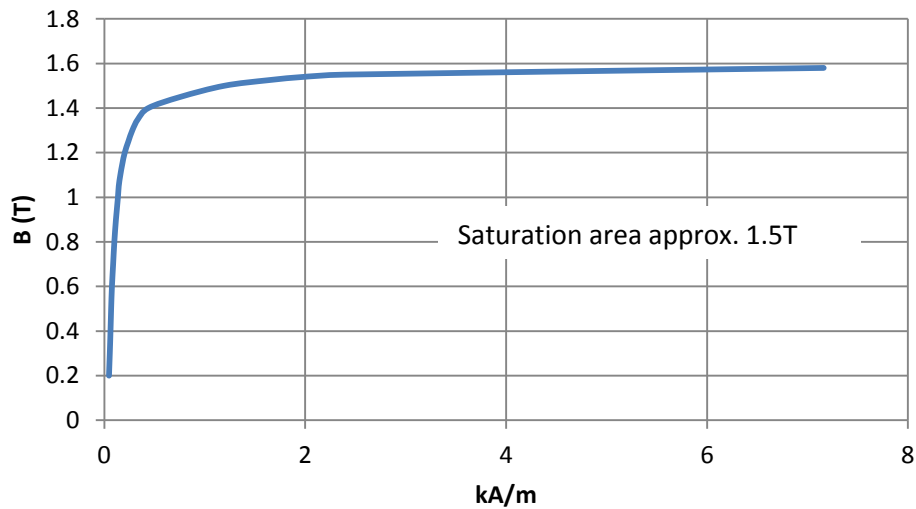
Loss data for thermal model, split ratio 0.5, MagThick 6mm						solved data	
--	--	--	--	--	--	-------------	--

Optimalizace stroje s permanentními magnety na rotoru pomocí umělé inteligence

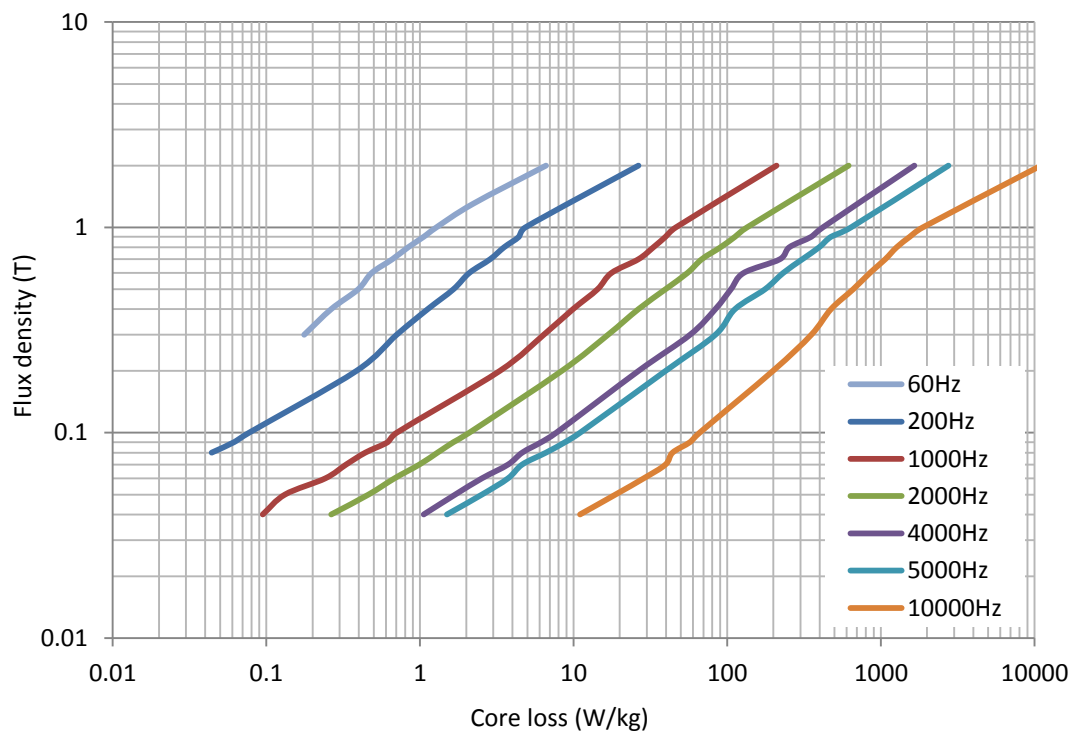
Open circuit		rate temperature				calc. Temp.	
ΔP_{iron}	ΔP_{Tooth}	ΔP_{Cu}	ΔP_{Mag}	ΔP_{Bandaz}	$\Delta P_{\text{Windage}}$	T_{mag}	T_{wdg}
144.12	49.75	162.15	0.00	1.48	39.93	246.35	156.31
173.16	62.21	106.03	0.00	1.50	39.93	237.19	143.04
199.30	73.67	80.40	0.00	1.52	39.93	233.67	137.74
228.45	86.39	65.91	0.00	1.54	39.93	232.47	135.85
257.98	99.91	57.26	0.00	1.56	39.93	232.33	135.67
289.72	113.98	51.31	0.00	1.57	39.93	232.76	136.45
320.82	128.26	47.39	0.00	1.59	39.93	233.59	137.81
351.09	142.77	44.08	0.00	1.61	39.93	234.55	139.38

Loss data for thermal model, split ratio 0.5, MagThick 3mm						solved data	
Open circuit		rate temperature				calc. Temp.	
ΔP_{iron}	ΔP_{Tooth}	ΔP_{Cu}	ΔP_{Mag}	ΔP_{Bandaz}	$\Delta P_{\text{Windage}}$	T_{mag}	T_{wdg}
132.39	51.33	107.85	0.02	1.65	34.47	229.58	137.99
154.74	61.67	86.33	0.02	1.69	34.47	226.94	133.90
179.94	73.42	72.16	0.02	1.71	34.47	225.83	132.16
204.30	84.86	63.90	0.02	1.72	34.47	225.70	132.00
229.95	97.23	58.30	0.02	1.74	34.47	226.28	132.76
255.13	109.17	54.45	0.02	1.75	34.47	226.83	133.95
281.86	122.58	51.27	0.02	1.77	34.47	227.86	135.61
309.80	136.65	49.60	0.02	1.83	34.47	229.35	137.85

BH of Anon 7 with 3.5%Si, 0.178mm thickness, lamination



a) Materiál plechá Hs – bP křivky. Oblast nasycení je přibližně 1.5T, tloušťka laminace je 0.178mm.



b) Ztrátové číslo plechů při 60Hz a 1T je 1,15 W/kg. V porovnání s 10kHz, 1Hz je ztrátové číslo 2000W/kg.

App. C. 5: Materiál rotorových a statorových plechů HS.

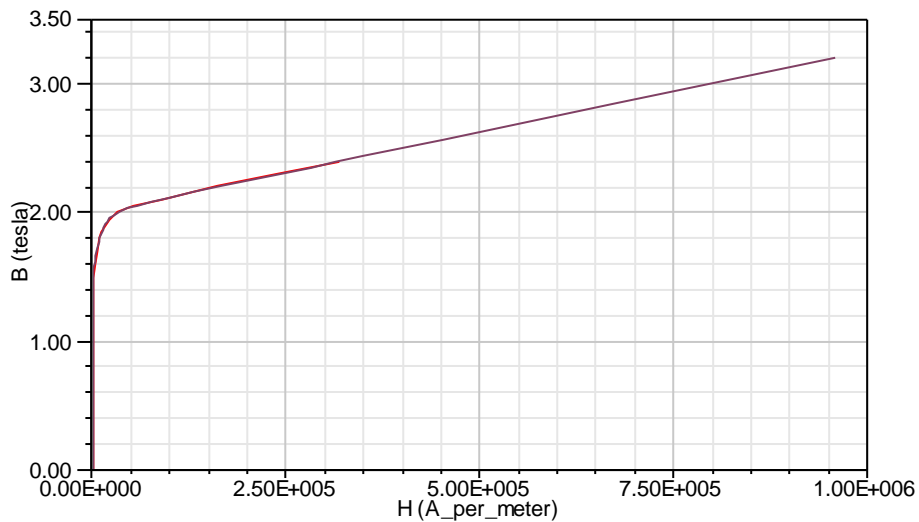
App. C. 6: Zbylé vypočítané parametry optimalizace pomocí GA

Iteration GA	Temperature		Mechanical analysis					CostValues	Note
	T_{mag} (°C)	T_{wdg} (°C)	$\sigma_{t,mag}$ (N/mm ²)	σ_t (N/mm ²)	$p_{c,mag}$ (N/mm ²)	δ_m (-)	δ_s (-)		
1	199.35	172.45	43.70	586.16	10.05	0.19958	1.99944	2.35978	
2	199.63	170.30	44.37	585.99	10.25	0.20002	2.00005	2.35887	
3	228.04	181.12	52.55	586.01	12.44	0.20001	1.99997	2.33521	
4	223.08	172.67	52.55	586.00	12.44	0.19999	2.00001	2.32117	
5	222.97	172.49	52.55	585.85	12.44	0.20003	2.00050	2.31833	
6	198.92	171.86	43.49	585.23	9.78	0.20000	2.00262	2.22053	
7	198.06	170.90	43.71	585.98	10.08	0.20020	2.00007	2.20451	
8	207.00	186.01	43.51	586.25	9.78	0.20007	1.99913	2.20018	
9	206.37	185.34	43.50	585.99	9.78	0.20003	2.00004	2.14598	
10	199.93	174.53	43.73	585.44	10.03	0.20001	2.00191	2.12734	
11	198.41	171.89	43.75	585.63	10.09	0.20121	2.00125	2.09115	
12	199.48	173.72	43.54	585.98	9.80	0.19999	2.00006	2.08978	
13	198.34	171.76	43.59	586.15	9.83	0.19992	1.99948	2.08417	
14	198.02	171.72	43.73	585.96	10.02	0.19982	2.00012	2.07540	
15	194.98	166.00	43.54	585.96	9.80	0.19987	2.00013	2.07468	
16	196.42	162.38	45.37	585.99	10.50	0.19968	2.00005	2.07447	Optimum

App. C. 7: Zbylé vypočítané parametry optimalizace pomocí SOMA-ATO

Iteration SOMA	Temperature		Mechanical analysis					CostValues	Note
	T_{mag} (°C)	T_{wdg} (°C)	$\sigma_{t,mag}$ (N/mm ²)	σ_t (N/mm ²)	$p_{c,mag}$ (N/mm ²)	δ_m (-)	δ_s (-)		
1	306.37	215.56	33.92	638.98	6.29	0.199965	1.834187	4.6064	
2	216.21	146.05	55.99	586.00	13.39	0.200044	2.000016	1.9377	
3	192.23	170.11	30.54	585.50	6.34	0.202140	2.001703	1.8927	
4	214.57	157.31	52.28	604.34	11.12	0.194139	1.939312	1.8661	
5	188.08	151.29	44.26	586.02	9.88	0.200009	1.999936	1.7430	
6	188.08	151.29	44.26	586.02	9.88	0.200009	1.999936	1.7430	
7	188.08	151.29	44.26	586.02	9.88	0.200009	1.999936	1.7430	
8	178.79	145.31	30.97	586.02	6.38	0.199856	1.999947	1.7278	
9	186.54	147.25	44.53	585.99	9.93	0.200109	2.000024	1.7143	
10	187.61	150.43	44.04	579.71	6.69	0.133947	2.021701	1.7065	
11	177.77	142.77	28.56	566.54	5.59	0.200002	2.068710	1.6216	
12	172.34	137.36	28.82	562.36	5.83	0.199891	2.084071	1.5226	Optimum

Příloha D – Rozšíření optimalizace PMSM



App. D. 1: BH Curves Steel M15 014 29 gauge – 0.35mm thickness

App. D. 2: BP Curves: Steel M15 014 29 gauge – 0.35mm thickness

50Hz		100Hz		200Hz		300Hz		500Hz		1000Hz		2500Hz	
B(T)	P(W/kg)	B(T)	P(W/kg)	B(T)	P(W/kg)	B(T)	P(W/kg)	B(T)	P(W/kg)	B(T)	P(W/kg)	B(T)	P(W/kg)
0.0	0.0000	0.0	0.0000	0.0	0.0000	0.0	0.0000	0.0	0.0000	0.0	0.0000	0.0	0.0000
0.1	0.0085	0.1	0.0203	0.1	0.0536	0.1	0.1001	0.1	0.2323	0.1	0.7921	0.1	4.4368
0.2	0.0367	0.2	0.0865	0.2	0.2255	0.2	0.4169	0.2	0.9568	0.2	3.2238	0.2	17.8856
0.3	0.0866	0.3	0.2027	0.3	0.5233	0.3	0.9618	0.3	2.1926	0.3	7.3330	0.3	40.4415
0.4	0.1593	0.4	0.3711	0.4	0.9518	0.4	1.7422	0.4	3.9518	0.4	13.1442	0.4	72.1655
0.5	0.2560	0.5	0.5938	0.5	1.5152	0.5	2.7641	0.5	6.2445	0.5	20.6776	0.5	113.1080
0.6	0.3774	0.6	0.8727	0.6	2.2170	0.6	4.0330	0.6	9.0799	0.6	29.9514	0.6	163.3146
0.7	0.5244	0.7	1.2094	0.7	3.0607	0.7	5.5541	0.7	12.4667	0.7	40.9828	0.7	222.8285
0.8	0.6980	0.8	1.6056	0.8	4.0497	0.8	7.3324	0.8	16.4131	0.8	53.7889	0.8	291.6922
0.9	0.8989	0.9	2.0631	0.9	5.1874	0.9	9.3730	0.9	20.9278	0.9	68.3864	0.9	369.9475
1.0	1.1280	1.0	2.5835	1.0	6.4771	1.0	11.6809	1.0	26.0191	1.0	84.7323	1.0	457.6366
1.1	1.3861	1.1	3.1685	1.1	7.9223	1.1	14.2614	1.1	31.6955	1.1	103.0235	1.1	554.8024
1.2	1.6741	1.2	3.8199	1.2	9.5264	1.2	17.1195	1.2	37.9657	1.2	123.0974	1.2	661.4882
1.3	1.9929	1.3	4.5394	1.3	11.2930	1.3	20.2607	1.3	44.8387	1.3	145.0319	1.3	777.7384
1.4	2.3434	1.4	5.3289	1.4	13.2256	1.4	23.6903	1.4	52.3235	1.4	168.8451	1.4	903.5984
1.5	2.7266	1.5	6.1901	1.5	15.3281	1.5	27.4140	1.5	60.4293	1.5	194.5550	1.5	1039.1147
1.6	3.1433	1.6	7.1251	1.6	17.6043	1.6	31.4374	1.6	69.1658	1.6	222.1823	1.6	1184.3350
1.7	3.5946	1.7	8.1358	1.7	20.0580	1.7	35.7666	1.7	78.5429	1.7	251.7452	1.7	1339.3088
1.8	4.0815	1.8	9.2242	1.8	22.6934	1.8	40.4074	1.8	88.5704	1.8	283.2642	1.8	1504.0858
1.9	4.6050	1.9	10.3924	1.9	25.5144	1.9	45.3662	1.9	99.2588	1.9	316.7600	1.9	1678.7182
2.0	5.1611	2.0	11.6424	2.0	28.5255	2.0	50.6493	2.0	110.6188	2.0	352.2541	2.0	1863.2593
2.1	5.7661	2.1	12.9766	2.1	31.7311	2.1	56.2633	2.1	122.6614	2.1	389.7685	2.1	2057.7640
2.2	6.4059	2.2	14.3972	2.2	35.1355	2.2	62.2151	2.2	135.3978	2.2	429.3256	2.2	2262.2889
2.3	7.0869	2.3	15.9064	2.3	38.7436	2.3	68.5115	2.3	148.8397	2.3	470.9488	2.3	2476.8922

App. D. 3: Tabulka parametrů magnetu ATMAX33H

Br	Hcb	Hcj	μ_0	μ_r	CBr	CHcj
T	kA/m	kA/m	H/m	-	%/K	%/K
1.128	-880.03321	-2555.00	1.2566E-06	1.0200	-0.095%	-0.500%

App. D. 4: Vlastnosti magnetů SmCo a NdFeB, [65]

a) Tabulka parametrů magnetu SCYXG-30H NinGangNom

Br	Hcb	Hcj	m0	mr	CBr	CHcj
T	kA/m	kA/m	H/m	-	%/K	%/K
1.09	-812.16708	-1989.44	1.2566E-06	1.0680	-0.035%	-0.200%

b) porovnání vlastností magnetů SmCo a NdFeB

Description	SmCo 1-5 Alloys	SmCo 5-17 Alloys	NdFeB
Modulus of elasticity	23 x 10 ⁶ psi	17 x 10 ⁶ psi	22 x 10 ⁶ psi
Ultimate tensile strength	6 x 10 ⁷ psi	5 x 10 ⁷ psi	12 x 10 ⁷ psi
Density	8200 kg/m ³	8400 kg/m ³	7400 kg/m ³
Coefficient to thermal expansion:			
Perpendicular to orientation	13 x 10 ⁻⁶ /°C	11 x 10 ⁻⁶ /°C	-4.8 x 10 ⁻⁶ /°C
Parallel to orientation	6 x 10 ⁻⁶ /°C	8 x 10 ⁻⁶ /°C	3.4 x 10 ⁻⁶ /°C
Electrical resistivity	5μΩcm	86μΩcm	160μΩcm
Bulk conductivity	20 x 10 ⁶ S/m	1.12 x 10 ⁶ S/m	0.65 x 10 ⁶ S/m
Magnetic Properties:			
Curie temperature	750°C	825°C	310°C
Reversible temperature coefficient of residual induction	-0.043%/°C	-0.03%/°C	-0.09%/°C
Max. service temperature	250°C	300°C	150°C

App. D. 5: Konvergence jedinců ke stejnému řešení, úloha č. 1 – algoritmus SOMA

Embrace (p.u.)	Optimized parameters			Calculated objectives				CostValues (-)	Group
	MagThick (mm)	Offset (mm)	MagCorRad (mm)	kE (V/1000rpm)	THD (%)	Pk2Pk (Nm)	S _m (mm ²)		
0,72	7,78	28,82	0,42	279,64	3,22	0,04	209,40	0,2233	1
0,72	7,81	28,83	0,51	279,77	3,22	0,04	210,26	0,2416	1
0,72	7,72	28,72	0,52	279,41	3,22	0,04	207,43	0,2412	1
0,72	7,90	29,27	0,38	279,83	3,22	0,04	212,63	0,2391	2
0,72	7,98	29,58	0,34	279,97	3,21	0,04	214,94	0,2173	2
0,65	7,51	0,95	0,75	280,58	4,83	7,81	198,95	5,0419	3
0,71	5,39	22,83	0,37	267,61	3,44	0,10	139,66	1,1009	4
0,71	7,68	27,71	0,43	280,03	3,23	0,05	206,98	0,2479	4
0,72	7,88	29,56	0,35	279,46	3,22	0,04	211,73	0,2142	4

App. D. 6: Konvergence jedinců ke stejnému řešení, úloha č. 2 – algoritmus SOMA

Optimized parameters				Calculated objectives				CostValues (-)	Group
Embrace (p.u.)	MagThick (mm)	Offset (mm)	MagCorRad (mm)	kE (V/1000rpm)	THD (%)	Pk2Pk (Nm)	S_m (mm ²)		
0,71	6,59	23,70	1,24	277,09	3,31	0,05	176,21	0,1400	1
0,72	6,67	24,76	1,31	276,82	3,28	0,05	178,16	0,1620	1
0,71	6,62	24,30	1,26	276,81	3,29	0,06	176,84	0,1854	1
0,71	6,68	23,70	1,29	277,68	3,31	0,05	178,89	0,1496	1
0,72	6,63	24,76	1,24	276,54	3,29	0,05	176,96	0,1465	1
0,71	6,71	24,01	1,27	277,63	3,30	0,05	179,65	0,1457	1
0,72	6,62	26,06	1,20	275,44	3,27	0,07	175,91	0,2229	1
0,71	6,58	23,68	1,24	277,05	3,31	0,04	175,94	0,1377	1
0,71	6,69	23,70	1,24	277,75	3,31	0,05	179,23	0,1439	1
0,71	6,06	23,07	0,98	273,64	3,35	0,08	160,11	0,3173	2

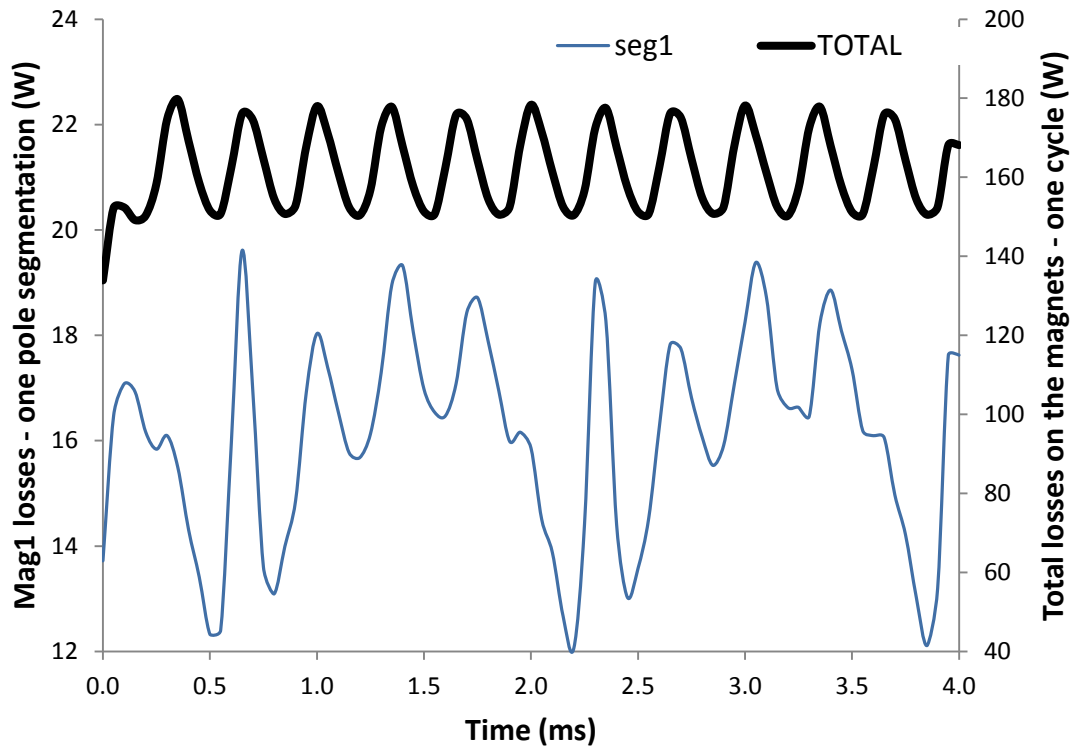
App. D. 7: Konvergence jedinců ke stejnému řešení, úloha č. 4 – algoritmus GA

Optimized parameters				Calculated objectives				CostValues (-)	Group
Embrace (p.u.)	MagThick (mm)	Offset (mm)	MagCorRad (mm)	kE (V/1000rpm)	THD (%)	Pk2Pk (Nm)	S_m (mm ²)		
0,89	5,58	17,70	0,98	292,25	7,68	0,04	166,85	0,0737	1
0,89	6,65	17,36	1,72	301,95	8,38	0,07	207,41	0,1900	1
0,89	5,01	17,36	0,62	285,66	7,14	0,14	145,69	0,2448	1
0,89	5,58	17,70	1,34	292,17	7,65	0,16	166,70	0,4676	1
0,88	5,08	16,77	1,72	286,98	7,26	0,66	148,19	0,9675	1
0,89	6,30	17,36	1,77	299,25	8,20	0,21	194,14	0,9941	1
0,89	6,30	17,36	1,77	299,27	8,21	0,18	194,16	1,0075	1
0,89	6,65	18,57	1,72	300,70	8,12	0,18	206,19	1,0084	1
0,89	6,65	17,27	1,72	302,04	8,40	0,07	207,49	1,0096	1
0,89	6,65	18,73	1,17	300,66	8,13	0,16	206,30	1,0199	1
0,80	5,02	17,36	1,77	279,45	5,50	3,71	139,52	1,0618	1
0,89	6,65	5,68	0,45	311,50	10,49	2,78	217,52	0,3268	2
0,89	7,19	4,27	1,77	314,75	10,63	2,21	238,44	0,3367	2
0,88	6,40	19,44	0,32	297,89	7,81	0,15	195,92	0,4871	3
0,89	7,88	18,73	1,17	308,06	8,50	0,32	253,02	1,0195	3
0,89	6,40	19,44	0,32	298,07	7,86	0,31	196,28	1,0319	3
0,88	7,29	19,44	0,32	304,10	8,18	0,31	229,36	1,0524	3
0,89	7,19	17,36	1,77	305,45	8,56	0,11	227,77	1,0691	3
0,88	7,12	19,35	0,32	303,13	8,14	0,27	223,01	1,1212	3
0,71	6,64	16,40	1,20	281,06	3,55	0,59	179,69	0,5093	4
0,71	6,41	16,40	0,15	279,86	3,56	0,20	172,84	0,5646	4
0,72	6,09	17,53	1,72	278,45	3,54	0,23	163,98	0,6079	4
0,71	5,94	16,40	0,15	276,59	3,55	0,24	158,54	0,6654	4
0,71	5,79	16,40	1,05	275,29	3,54	0,54	154,00	0,9256	4
0,72	5,94	16,40	0,44	278,33	3,65	0,94	160,06	1,2564	4
0,88	6,65	17,13	1,35	301,98	8,37	0,15	207,20	0,7170	5
0,88	5,21	19,44	0,32	285,36	6,74	0,34	150,85	0,9368	5
0,88	6,31	19,44	0,32	297,12	7,75	0,16	192,44	0,9483	5
0,88	5,94	16,40	0,15	296,81	8,13	0,21	180,72	1,2122	5
0,73	7,70	28,48	1,22	281,36	3,20	0,50	209,32	0,70	6
0,72	6,45	26,63	0,26	273,03	3,33	0,12	169,50	0,77	6
0,89	6,18	11,82	0,16	303,88	9,40	1,29	195,16	0,1874	7
0,65	5,80	19,07	1,56	262,52	5,59	5,15	144,47	0,4526	8
0,72	7,66	4,16	0,95	294,85	4,77	3,15	219,11	0,4630	9
0,71	7,99	16,40	0,15	287,85	3,63	0,21	221,16	0,5782	10
0,77	6,40	19,44	0,32	286,85	4,82	3,35	180,59	1,1237	10
0,89	6,65	19,11	1,72	300,13	7,99	0,22	205,63	0,6934	11
0,65	6,65	16,77	1,72	269,36	5,26	5,84	169,12	0,9549	12

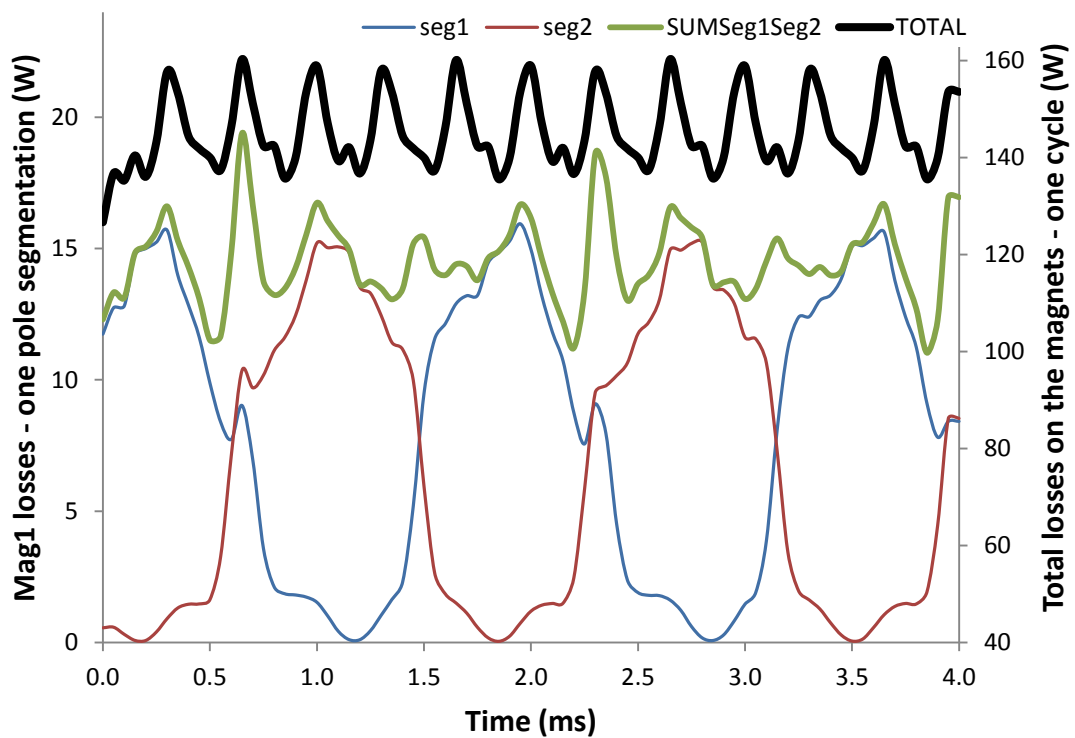
Lineární segmentace bez zaoblení hrany magnetu

App. D. 8: Vliv segm. na Iron losses a vlastní ztráty v magnetech bez zaoblené hrany

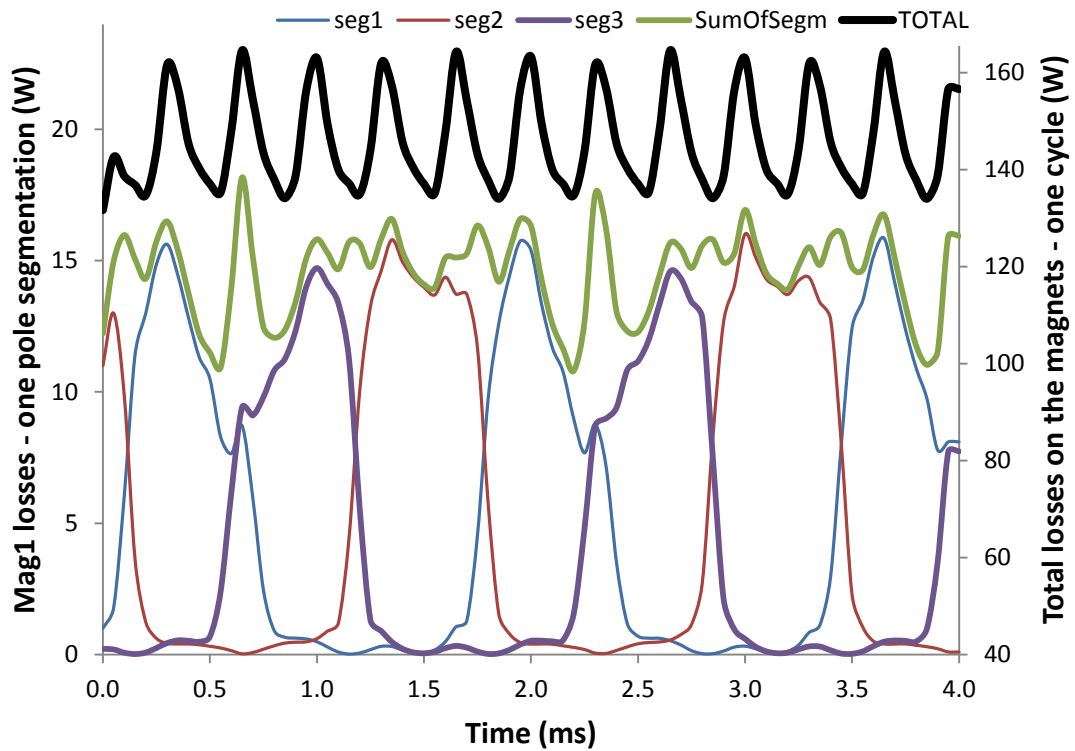
		JEDEN SEGMENT							Core Losses (W)	Open Circuit Losses (W)
METHOD	Part	Magnet Losses (W)					TOTAL			
		Mag1	Mag2	Mag3	Mag4	Mag5				
RMS	Seg1	16.12	16.03	16.14	16.31	16.31	161.81	377.39	539.20	
MAX	Seg1	19.61	19.60	19.60	19.67	19.60				
		DVA SEGMENTY							Core Losses (W)	Open Circuit Losses (W)
METHOD	Part	Magnet Losses (W)					TOTAL			
		Mag1	Mag2	Mag3	Mag4	Mag5				
AVG	Seg1	7.20	7.20	6.33	6.77	7.93	145.20	377.47	522.67	
	Seg2	7.33	7.33	8.19	7.72	6.59				
MAX	Seg1	15.94	15.81	15.94	15.94	15.94				
	Seg2	15.24	15.28	15.28	15.23	15.23				
		TŘI SEGMENTY							Core Losses (W)	Open Circuit Losses (W)
METHOD	Part	Magnet Losses (W)					TOTAL			
		Mag1	Mag2	Mag3	Mag4	Mag5				
AVG	Seg1	4.86	4.86	3.97	3.80	4.69	145.77	377.57	523.34	
	Seg2	4.60	4.60	5.23	6.39	6.20				
	Seg3	4.02	4.99	5.36	4.46	3.77				
MAX	Seg1	15.85	15.85	15.74	15.82	15.82				
	Seg2	16.01	16.01	15.79	16.00	15.79				
	Seg3	14.72	14.58	14.72	14.48	14.72				
		ČTYŘI SEGMENTY							Core Losses (W)	Open Circuit Losses (W)
METHOD	Part	Magnet Losses (W)					TOTAL			
		Mag1	Mag2	Mag3	Mag4	Mag5				
AVG	Seg1	3.66	3.49	2.66	2.52	2.87	128.15	377.55	505.69	
	Seg2	3.61	2.83	2.81	3.45	4.15				
	Seg3	2.81	2.85	3.78	4.11	3.31				
	Seg4	2.73	3.63	3.56	2.72	2.51				
MAX	Seg1	13.66	13.30	13.66	13.66	13.22				
	Seg2	12.06	12.18	12.18	12.06	12.11				
	Seg3	12.26	12.25	12.26	12.26	12.26				
	Seg4	13.24	13.32	13.32	13.31	13.31				



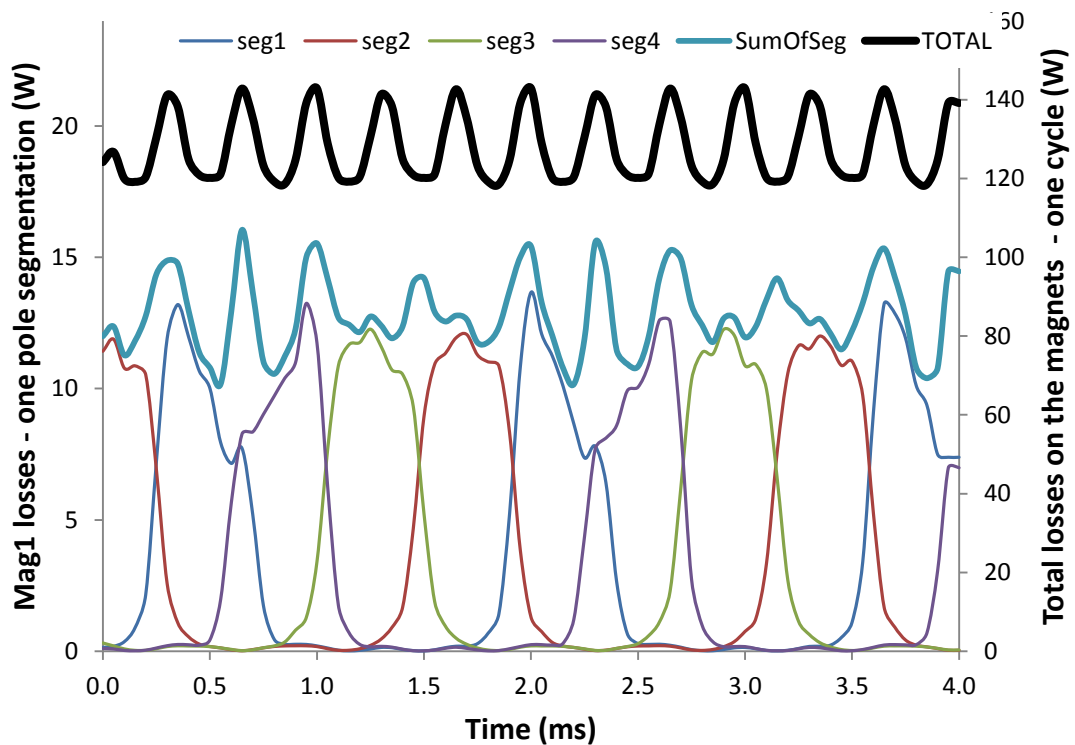
a) jeden segment magnetu



b) dva segmenty magnetu



c) tři segmenty magnetu



d) čtyři segmenty magnetu

App. D. 9: Průběh ztrát během otáčení se zaoblenou hranou lin. segmentace

Optimalizace stroje s permanentními magnety na rotoru pomocí umělé inteligence

Lineární segmentace se zaoblením hrany magnetu

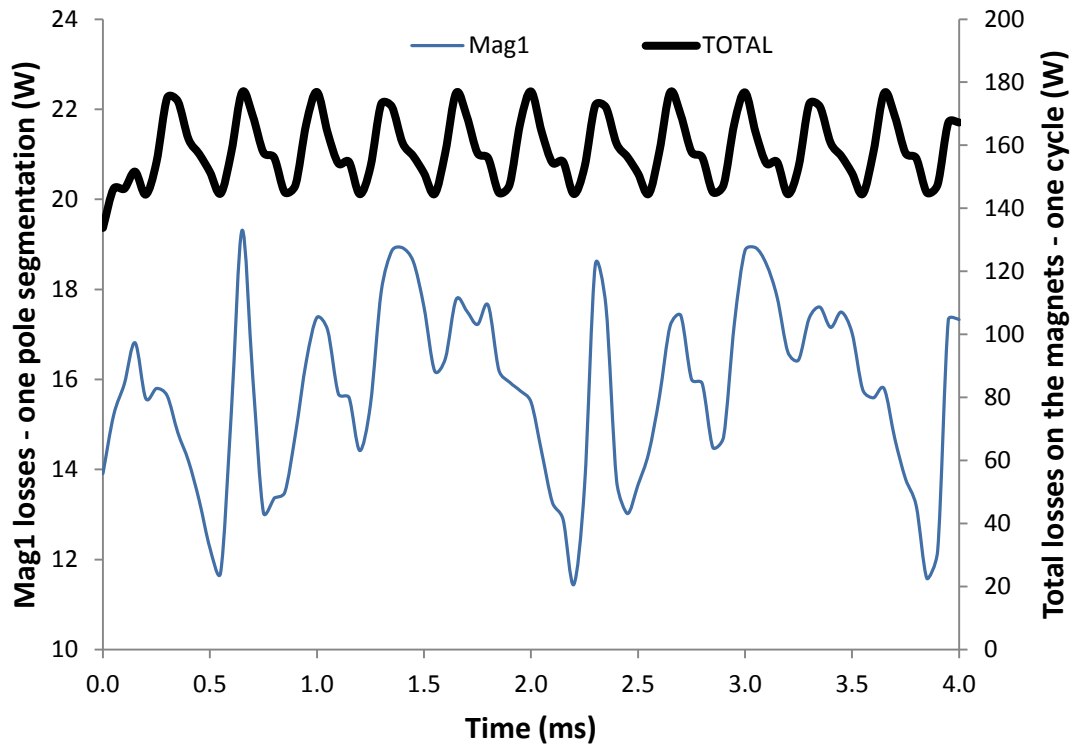
App. D. 10: Vliv segm. na Iron losses a vlastní ztráty v magnetech se zaoblenou hranou

JEDEN SEGMENT									
METHOD	Part	Magnet Losses (W)					TOTAL	Core Losses (W)	Open Circuit Losses (W)
		Mag1	Mag2	Mag3	Mag4	Mag5			
AVG	Seg1	15.76	15.67	15.78	16.01	15.99	158.44	375.64	534.07
MAX	Seg1	19.31	19.22	19.23	19.25	19.18			

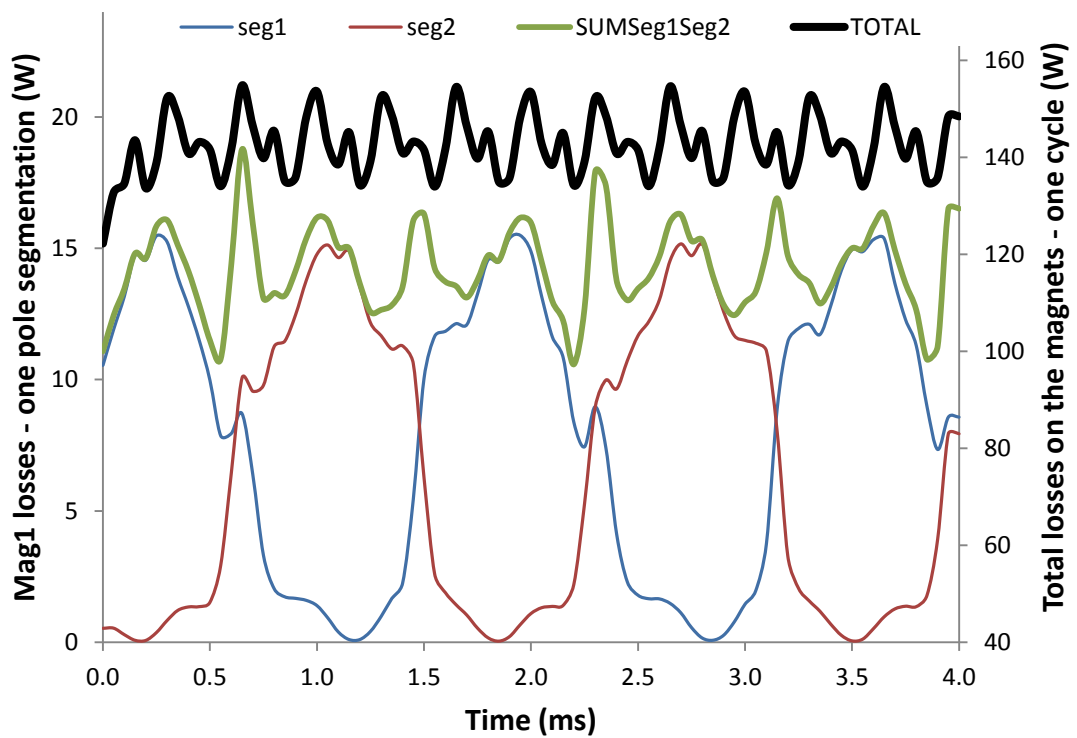
DVA SEGMENTY									
METHOD	Part	Magnet Losses (W)					TOTAL	Core Losses (W)	Open Circuit Losses (W)
		Mag1	Mag2	Mag3	Mag4	Mag5			
AVG	Seg1	7.06	7.06	6.19	6.66	7.80	141.25	375.59	516.84
	Seg2	7.19	7.19	7.39	7.59	6.49			
MAX	Seg1	15.49	15.60	15.60	15.49	15.51			
	Seg2	15.17	15.17	15.13	15.08	15.13			

TŘI SEGMENTY									
METHOD	Part	Magnet Losses (W)					TOTAL	Core Losses (W)	Open Circuit Losses (W)
		Mag1	Mag2	Mag3	Mag4	Mag5			
AVG	Seg1	4.86	4.86	3.97	3.80	4.69	145.77	377.57	523.34
	Seg2	4.60	4.60	5.23	6.39	6.20			
	Seg3	4.02	4.99	5.36	4.46	3.77			
MAX	Seg1	15.85	15.85	15.74	15.82	15.82			
	Seg2	16.01	16.01	15.79	16.00	15.79			
	Seg3	14.72	14.58	14.72	14.48	14.72			

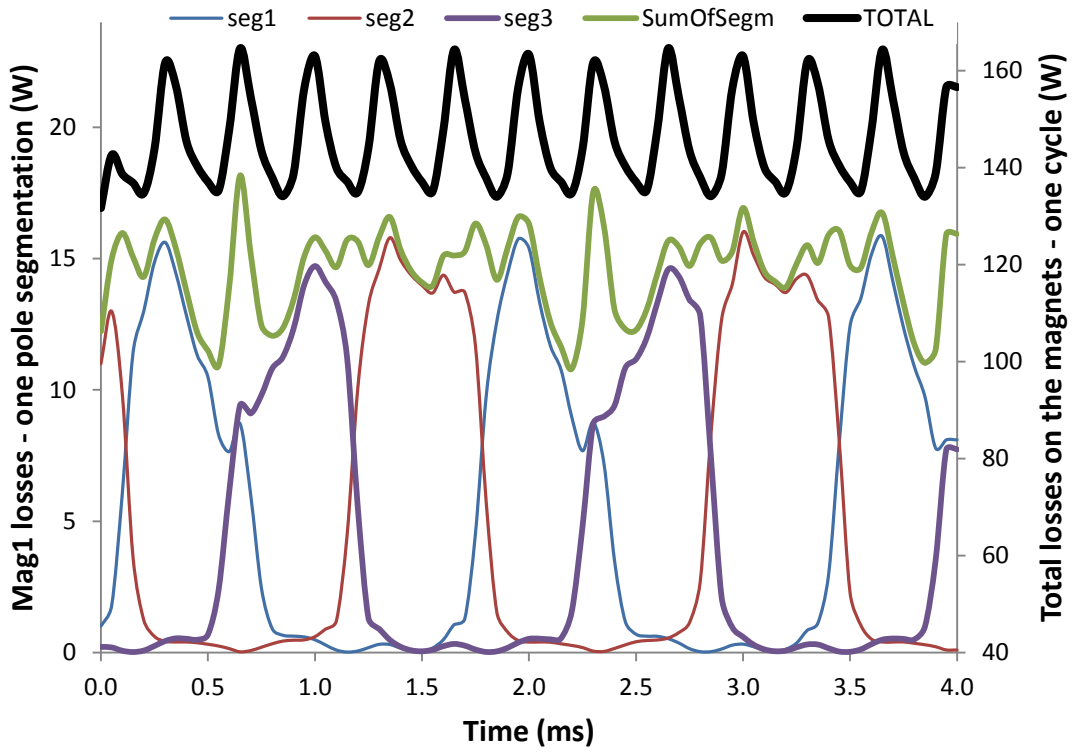
ČTYŘI SEGM.									
METHOD	Part	Magnet Losses (W)					TOTAL	Core Losses (W)	Open Circuit Losses (W)
		Mag1	Mag2	Mag3	Mag4	Mag5			
AVG	Seg1	3.55	3.36	2.55	2.42	2.76	126.38	376.13	502.52
	Seg2	3.64	2.85	2.83	3.47	4.18			
	Seg3	2.83	2.87	3.80	4.15	3.33			
	Seg4	2.62	3.50	3.44	2.62	2.41			
MAX	Seg1	13.08	12.74	13.06	13.06	12.72			
	Seg2	12.66	12.69	12.69	12.58	12.64			
	Seg3	13.05	13.05	13.03	13.01	12.96			
	Seg4	12.66	12.80	12.80	12.80	12.79			



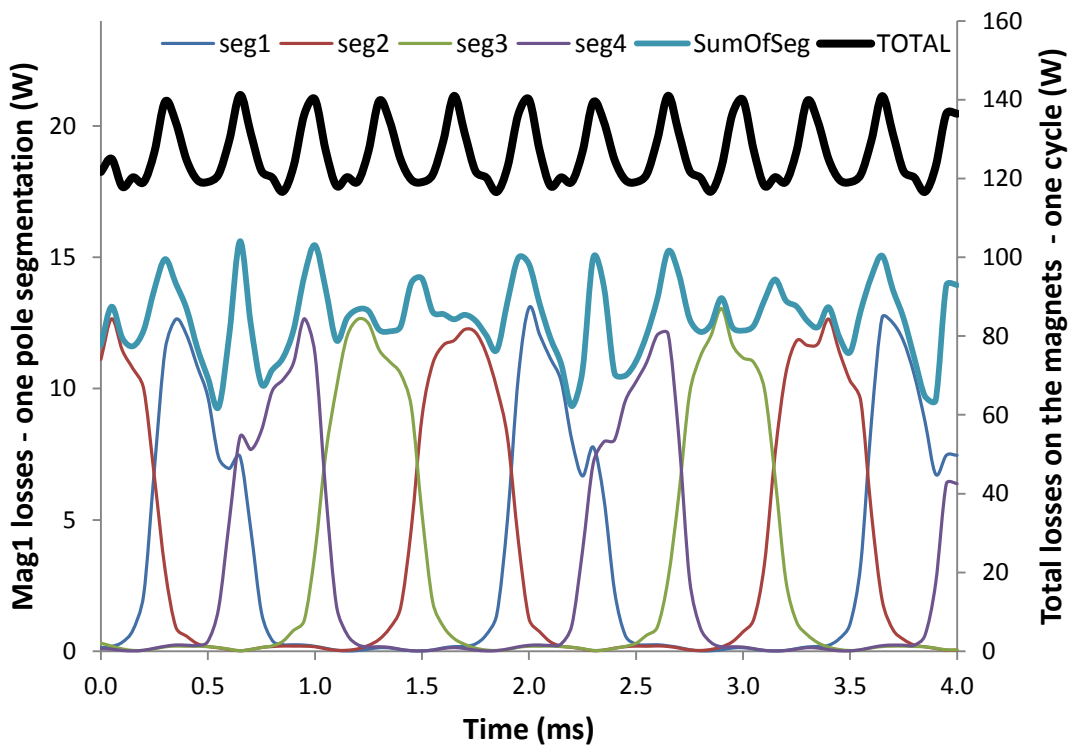
a) jeden segment magnetu



b) dva segmenty magnetu



c) tři segmenty magnetu



d) čtyři segmenty magnetu

App. D. 11: Průběh ztrát během otáčení se zaoblenou hranou lin. segmentace

Optimalizace stroje s permanentními magnety na rotoru pomocí umělé inteligence

Nelineární segmentace se zaoblením magnetu

Výpočet pro čtyři segmenty pólu – všechny uvažované délky segmentu

App. D. 12: Vliv nelin. segm. na Iron losses a vlastní ztráty v magnetech, 4 segm.

a) STEP1

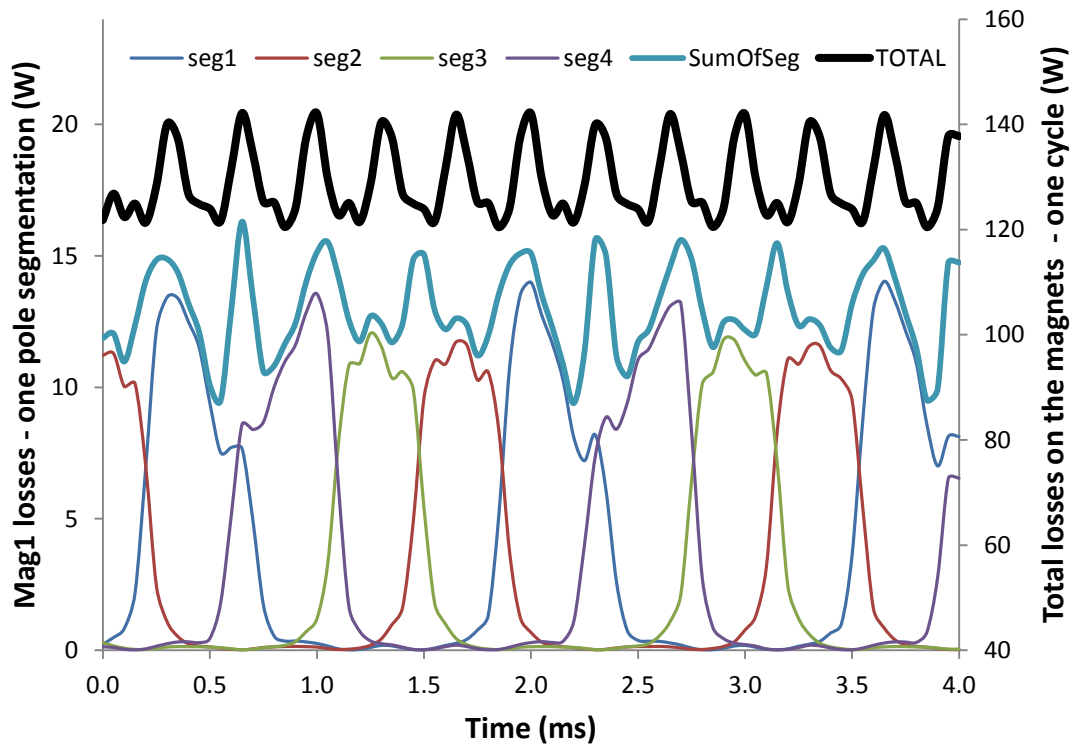
Method	Part	Magnet Losses (W)					TOTAL	Core Losses (W)	Open Circuit Losses (W)
		Mag1	Mag2	Mag3	Mag4	Mag5			
AVG	Seg1	4.22	3.86	3.02	2.88	3.43	129.05	375.97	505.02
	Seg2	3.13	2.49	2.48	3.13	3.65			
	Seg3	2.49	2.50	3.29	3.66	3.00			
	Seg4	3.08	4.00	4.10	3.25	2.87			
MAX	Seg1	14.03	14.03	13.98	14.03	14.03	129.05	375.97	505.02
	Seg2	11.72	11.76	11.76	11.72	11.72			
	Seg3	12.05	11.83	12.05	12.05	12.05			
	Seg4	13.56	13.57	13.57	13.57	13.57			

b) STEP2

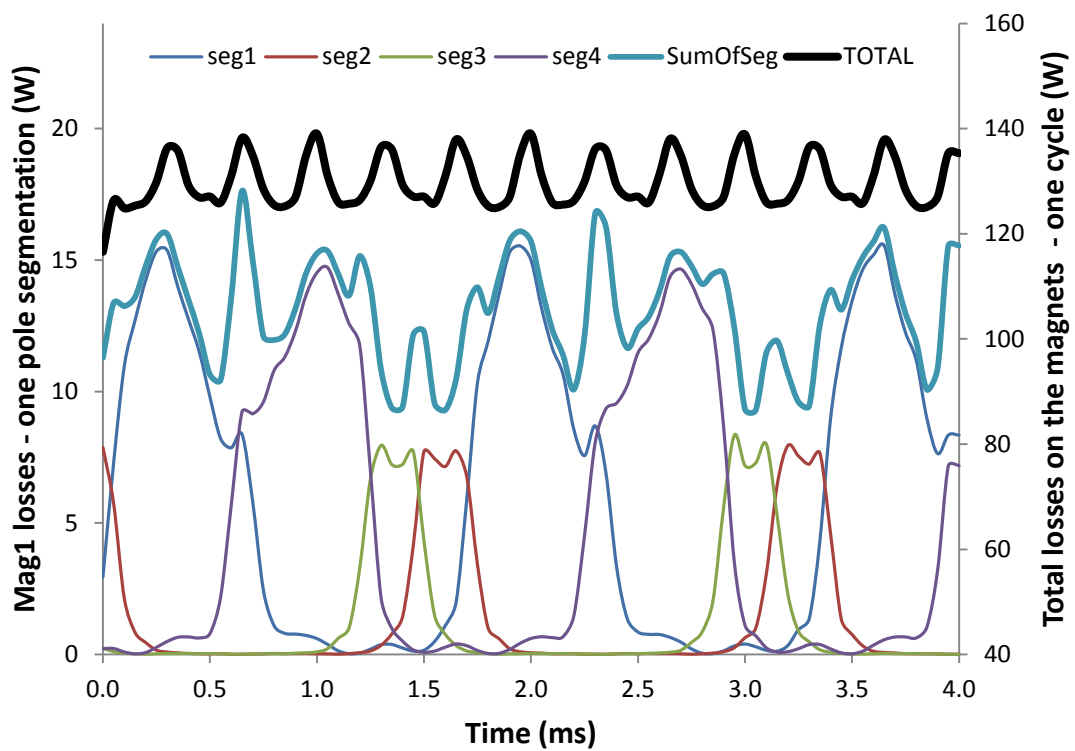
Method	Part	Magnet Losses (W)					TOTAL	Core Losses (W)	Open Circuit Losses (W)
		Mag1	Mag2	Mag3	Mag4	Mag5			
AVG	Seg1	6.06	5.23	4.36	4.22	5.28	129.93	376.03	505.96
	Seg2	1.44	1.23	1.24	1.69	1.82			
	Seg3	1.24	1.23	1.55	1.83	1.61			
	Seg4	4.40	5.36	5.96	5.05	4.17			
MAX	Seg1	15.55	15.56	15.53	15.54	15.54	129.93	376.03	505.96
	Seg2	7.94	8.22	8.22	8.05	8.21			
	Seg3	8.34	8.34	8.33	8.32	7.94			
	Seg4	14.71	14.66	14.71	14.57	14.71			

c) STEP3

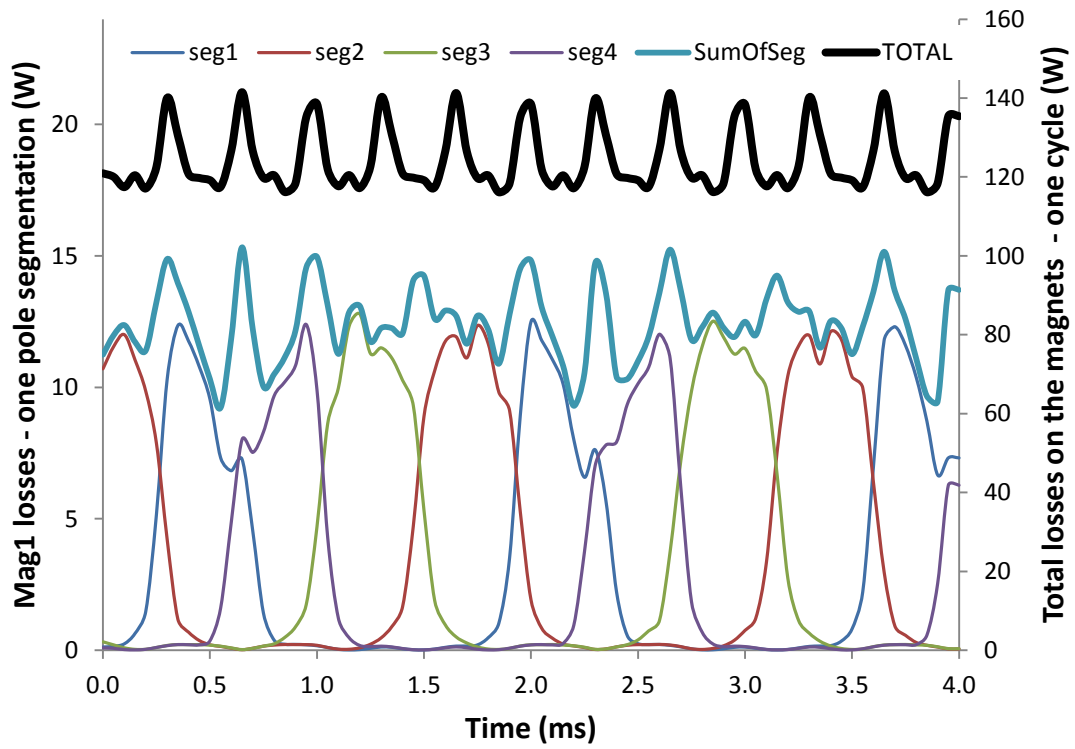
Method	Part	Magnet Losses (W)					TOTAL	Core Losses (W)	Open Circuit Losses (W)
		Mag1	Mag2	Mag3	Mag4	Mag5			
AVG	Seg1	3.35	3.20	2.41	2.28	2.56	124.43	375.97	500.40
	Seg2	3.72	2.92	2.89	3.53	4.26			
	Seg3	2.89	2.94	3.87	4.21	3.39			
	Seg4	2.48	3.34	3.24	2.44	2.28			
MAX	Seg1	12.49	12.44	12.48	12.48	12.35	124.43	375.97	500.40
	Seg2	12.35	12.12	12.35	12.35	12.35			
	Seg3	12.79	12.51	12.80	12.80	12.79			
	Seg4	12.39	12.39	12.39	12.17	12.39			



a) STEP1



b) STEP2



c) STEP3

App. D. 13: Průběh ztrát během otáčení –versus celkové ztráty v magnetech, 4 segm.

Optimalizace stroje s permanentními magnety na rotoru pomocí umělé inteligence

Výpočet pro pět segmentů pólu – zbylé uvažované délky segmentu

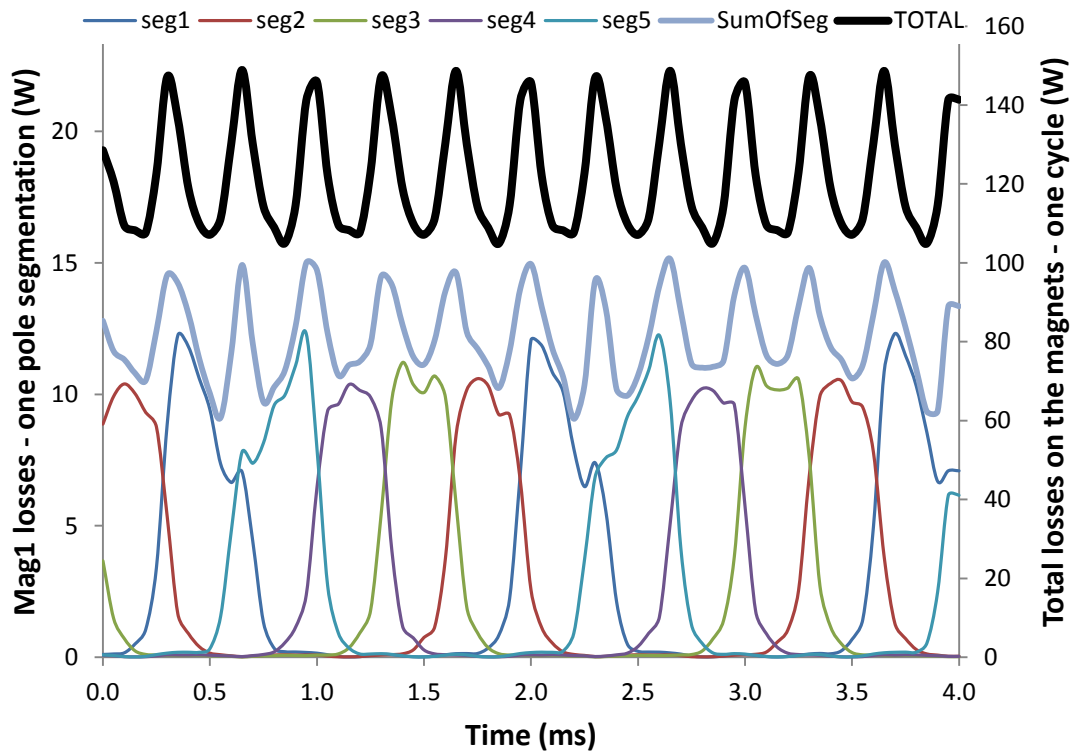
App. D. 14: Vliv nelin. segm. na Iron losses a vlastní ztráty v magnetech, 5 segm.

a) STEP1

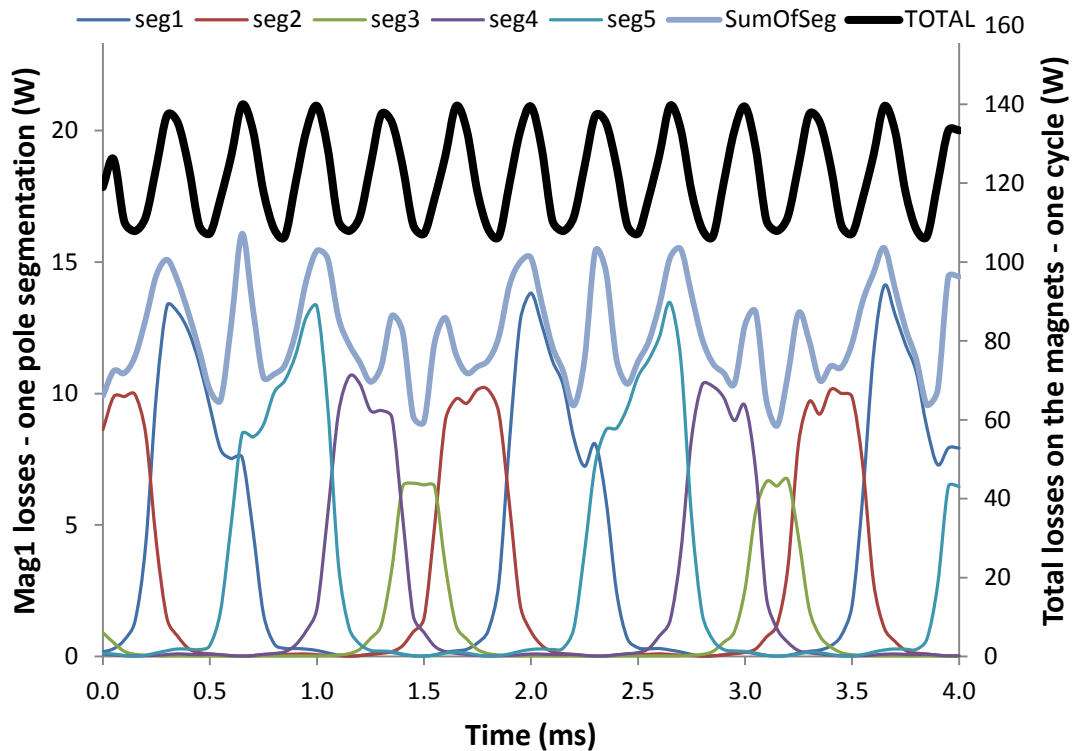
Method	Part	Magnet Losses (W)					TOTAL	Core Losses (W)	Open Circuit Losses (W)
		Mag1	Mag2	Mag3	Mag4	Mag5			
AVG	Seg1	3.16	3.07	2.28	2.16	2.37	122.03	376.42	498.44
	Seg2	2.70	1.95	1.89	2.06	2.83			
	Seg3	2.08	2.00	2.13	3.00	2.88			
	Seg4	1.89	1.98	2.82	2.75	1.99			
	Seg5	2.35	3.20	3.06	2.27	2.15			
MAX	Seg1	12.31	12.32	12.32	12.29	12.29			
	Seg2	10.59	10.52	10.59	10.59	10.59			
	Seg3	11.21	11.02	11.21	11.21	11.22			
	Seg4	10.37	10.37	10.37	10.37	10.37			
	Seg5	12.30	12.30	12.30	12.17	12.30			

b) STEP2

Method	Part	Magnet Losses (W)					TOTAL	Core Losses (W)	Open Circuit Losses (W)
		Mag1	Mag2	Mag3	Mag4	Mag5			
AVG	Seg1	3.95	3.67	2.83	2.70	3.16	121.77	376.42	498.18
	Seg2	2.54	1.91	1.89	2.24	2.80			
	Seg3	0.95	0.93	0.97	1.40	1.37			
	Seg4	1.89	1.92	2.66	2.78	2.12			
	Seg5	2.90	3.80	3.83	2.99	2.69			
MAX	Seg1	14.09	14.09	13.81	14.10	14.10			
	Seg2	10.15	10.15	10.15	10.15	10.15			
	Seg3	6.72	6.79	6.79	6.75	6.75			
	Seg4	10.64	10.52	10.64	10.64	10.64			
	Seg5	13.46	13.62	13.61	13.61	13.61			



a) STEP1



b) STEP2

App. D. 15: Průběh ztrát během otáčení – versus celkové ztráty v magnetech 5segm.