

RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE

Enerģētikas un elektrotehnikas fakultāte

Enerģētikas institūts

Baiba OSE-ZAĻĀ

Doktorantūras programmas “Enerģētikas un elektrotehnika

(Elektriskās mašīnas un aparāti)” studente

**CILINDRISKA MAGNĒTISKĀ SAJŪGA
KONSTRUKCIJAS OPTIMIZĀCIJA BALSTĪTA
UZ MAGNĒTISKĀ LAUKA APRĒĶINIEM**

Promocijas darba kopsavilkums

Zinātniskais vadītājs

Dr. habil. sc. ing.

V. PUGAČEVŠ

Zinātniskais konsultants

Dr. habil. sc. ing.

J. DIRBA

RTU Izdevniecība

Rīga 2015

**Ose-Zaļā B. Cilindriska magnētiskā sajūga
konstrukcijas optimizācija balstīta
uz magnētiskā lauka aprēķiniem.**
Promocijas darba kopsavilkums. — R.:
RTU Izdevniecība, 2015. — 26 p.

Iespiests saskaņā ar Promocijas padomes „RTU
P-14” (Elektrotehnika) 2015. gada 12. februāra
lēmumu Nr. 55.

ISBN 978-9934-10-681-1

**PROMOCIJAS DARBS
IETEIKTS DR. SC. ING. GRĀDA IEGŪŠANAI
RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ**

Dr. sc. ing. grāda iegūšanai ieteiktais promocijas darbs ir publiski prezentēts 2015. g. 13. maijā, Rīgas Tehniskā universitātē, Enerģētikas un elektrotehnikas fakultātē, Āzenes ielā 12/1 — 212. kab.

OFICIĀLIE RECENZENTI

Profesore, *Dr. sc. ing.* Anastasija Žiravecka
Enerģētikas un elektrotehnikas fakultāte, Rīgas Tehniskā universitāte, Latvija
Vadošais pētnieks, *Dr. sc. ing.* Ants Kallaste
Enerģētikas fakultāte, Tallinas Tehnoloģiju universitāte, Igaunija
Profesors, *Dr. sc. ing.* Anouar Belahcen
Elektrotehnikas skola, Ālto universitāte, Somija

CONFIRMATION

Apstiprinu, ka esmu izstrādājusi šo promocijas darbu, kas iesniegts izskatīšanai Rīgas Tehniskajā universitātē inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai. Promocijas darbs nav iesniegts nevienā citā universitātē zinātniskā grāda iegūšanai.

Baiba Ose-Zaļā
(Paraksts)

Datums: 2015. g. 12. februārī

Promocijas darbs ir uzrakstīts angļu valodā. Tas sastāv no ievada, 5 nodaļām, galvenajiem secinājumiem, 8 pielikumiem un literatūras saraksta, ieskaitot 72 attēlus un 15 tabulas. Darba kopapjoms ir 139 lapas. Literatūras sarakstā ir doti 190 informācijas avoti.

SATURS

Vispārējs darba raksturojums	5
Aktualitāte	5
Pētījuma objekts	5
Darba mērķis un uzdevumi	6
Pielietotās pētījuma metodes un līdzekļi	6
Darba zinātniskā novitāte	7
Darba zinātniskā un praktiskā aprobācija	7
Izgudrojumi	8
Autores publikācijas	9
Darba struktūra	10
Promocijas darbs īsumā	12
1. Cilindriskais magnētiskais sajūgs (CMS)	12
2. CMS konstrukcijas parametru ietekme uz tā maksimālo mehānisko momentu	15
3. Matemātisko modeļu sintēze	18
4. CMS optimizācija	19
5. Eksperimenti un tālākās pētījumu iespējas	20
Galvenie secinājumi	23
Kopsavilkumā izmantotās literatūras saraksts	25

VISPĀRĒJS DARBA RAKSTUROJUMS

Aktualitāte

Cilindriskie magnētiskie sajūgi (CMS) tiek plaši pielietoti daudz dažādās ražošanas un pētniecības jomās, kā fizikas, bioloģijas, ķīmijas, farmācijas, pārtikas apstrādes industrijā, gāzes un eļļas industrijā u. c. jomās [15, 16]. Šajās jomās substanču (šķidrums, gāzu un cietu daļiņu) pārvietošana un darbības ar tām notiek agresīvā vai sterilā vidē, savukārt CMS spēj nodrošināt hermētiskus apstākļus, jo magnētiskās-mehāniskās enerģijas vai momenta pārnese notiek bezkontakta veidā [19].

Kaut arī CMS tiek plaši pielietoti, tikai pēdējās divās dekādēs ražotāji sajūgu izgatavošanā izmanto enerģētiski augstvērtīgus pastāvīgos magnētus (PM), kas izgatavoti no tādiem retzemju elementu sakausējumiem kā neodīma-dzelzs-bora (NdFeB) un samārija-kobalta (SmCo), savukārt elektrisko mašīnu izgatavošanā retzemju sakausējumu PM sāka izmantot jau 20. gs. 80-os gados. Agrāk magnētiskajos sajūgos izmantoja PM, kas izgatavoti no alumīnija-niķeļa-kobalta sakausējumiem un ferītiem, kā bārija-ferīts vai stroncija-ferīts [1, 17, 20]. Tādējādi ir svarīgi izvērtēt, kāds PM materiāls būtu izmantojams CMS mūsdienās.

Vairums CMS izgatavotāju piedāvā sajūgus ar taisnstūrveida PM. Būtu jāizvērtē pāreja uz noapaļotiem jeb sektorveida PM.

Daudzi CMS izgatavotāji piedāvā sajūgus no iepriekš izstrādātiem sērijveida produktiem, kuri (kā intervijās atzīmēja izgatavotāji) ir bijuši optimizēti pirms relatīvi ilga laika. Tādējādi ir nepieciešams veikt CMS konstrukcijas optimizāciju, kā arī izstrādāt CMS optimizācijas metodoloģiju.

Visbiežāk reāli CMS prototipi tiek izgatavoti, lai pētītu sajūga raksturlielumus, bet tas ir dārgs un neefektīvs veids, ņemot vērā laika un izmantoto materiālu patēriņu. Tādējādi būtu nepieciešams radīt jaunus (vēl eksistējošus) matemātiskos modeļus.

Pētījuma objekts

Pētītais darba **objekts** ir cilindriskais magnētiskais sajūgs. Tiek pētīti abu veidu (aktīvais un reaktīvais) CMS. Pētījuma priekšmets ir CMS konstrukcijas parametri. Pētījumu veikšanai kopā ir izvēlēti seši parametri: pieci konstrukcijas parametri un viens PM materiālu raksturojošs parametrs, kas arī ietekmē sajūga konstrukcijas izmērus.

Darba mērķis un uzdevumi

Promocijas darba mērķis ir izstrādāt CMS optimizācijas metodoloģiju sajūga optimālās konstrukcijas parametru kombinācijas iegūšanai atbilstoši izvēlētajām parametru robežvērtībām un tā, lai sajūgs darbotos visefektīvāk. Ar sajūga darbības efektivitāti saprot vislielāko attiecības — maksimālā mehāniskā momenta pret tilpumu, vērtību.

Lai sasniegtu izvirzīto mērķi, nepieciešams veikt sekojošus darba uzdevumus:

1. Apskatīt pēdējos pētījumus par CMS konstrukciju un tās optimizāciju;
2. Izvēlēties galveno CMS raksturlielumu un to ietekmējošos konstrukcijas parametrus;
3. Izvēlēties CMS bāzes modeli, kurš tiks optimizēts, un neatkarīgo parametru robežvērtības;
4. Izstrādāt aprēķina metodoloģiju CMS, un izvēlēties lietojumprogrammatūru nepieciešamo raksturlielumu iegūšanai;
5. Definēt mērķfunkciju, sintezēt nepieciešamos matemātiskos modeļus/formulas, kas tiks pielietotas optimizācijas procesā;
6. Analizēt optimizācijas algoritmus, izvēlēties optimizācijas rīku, noteikt optimālo izvēlēto CMS konstrukcijas parametru kombināciju un izstrādāt CMS optimizācijas metodoloģiju;
7. Izgatavot CMS paraugus un veikt to eksperimentālās pārbaudes;
8. Salīdzināt eksperimentālo pārbaūžu rezultātus ar datiem, kas iegūti pēc izstrādātās CMS aprēķina metodoloģijas un pēc sintezētajiem matemātiskajiem modeļiem.

Pielietotās pētījumu metodes un līdzekļi

Izvirzītā mērķa sasniegšanai un izvirzīto uzdevumu realizēšanai tiek pielietotas sekojošas pētījumu metodes (un ar tām saistītie līdzekļi):

- Kvalitatīvās:
 - ✓ Intervijas;
 - ✓ Pamatojuma teorija (angļu val.: *Grounded theory*).
- Kvantitatīvās:
 - ✓ Aprēķina metodoloģijas izstrādē — *AutoCad* (rasēšanas lietojumprogrammatūra), *QuickField* (magnētisko lauku modelēšanas lietojumprogrammatūra, kas balstīta uz galīgo elementu analīzi/metodi) un *SIMCA* (daudzfaktoru datu analīzes un optimizācijas lietojumprogrammatūra);
 - ✓ Eksperimentu plāns;

- ✓ Matemātisko modeļu/formulu sintēzē — lietojumprogrammu un programmatūras komplekss (balstīts uz regresijas modeļiem).

Darba zinātniskā novitāte

Pielietotās pētījumu metodes un veiktie pētījumi ļāva sasniegt sekojošas zinātniskās novitātes:

1. Izvēlētie programmrīki (*AutoCad, QuickField*) ļāva izstrādāt aprēķina metodoloģiju interesējošo CMS fizikālo parametru (kā mehāniskā momenta un tā maksimuma vērtības, indukciju, to maksimuma vērtību jūgā) iegūšanai, balstītu uz sajūga magnētiskā lauka aprēķiniem (publikācijas, piem., [6–9]);
2. Piedāvātā pāreja no taisnstūrveida PM uz liektajiem palielina maksimālā mehāniskā momenta vērtību par vairāk kā 30 % (publikācija [6]);
3. Pāreja no diskveida magnētiskā sajūga uz cilindriskā magnētiskā sajūga ūdens patēriņa skaitītājos ļauj izvairīties no stipro magnētu ārējās iedarbības uz skaitītāja patērētā ūdens uzskaites mehānismu (Latvijas patents [10]);
4. Izstrādātajam jaunās konstrukcijas reaktīvajam magnētiskajam sajūgam ir paaugusi raksturlieluma — maksimālā mehāniskā momenta, vērtība, salīdzinot ar tādu pašu izmēru analogu (standarta konstrukcijas) reaktīvo sajūgu (Latvijas [12] un Eiropas [11] patenti un publikācija [8]);
5. Ir sintezēti jauni, iepriekš nebijuši, aktīvā CMS matemātiskie modeļi/formulas konkrētām izvēlēto parametru robežvērtībām, tādējādi ļaujot prognozēt vērtības tādiem fizikāliem parametriem kā maksimālajam mehāniskajam momentam, maksimālajam mehāniskajam momentam uz tilpuma vienību un maksimālajām indukcijām (publikācija [5]);
6. Ir veikta CMS konstrukcijas optimizācija (izvēlētajā rīkā *SIMCA*) pēc jaunajiem sintezētajiem matemātiskajiem modeļiem, tas ļāva izstrādāt CMS optimizācijas metodoloģiju. CMS optimuma konstrukcija (ar noapaļotiem PM) ir izgatavota un pārbaudīta, kur veiktie eksperimenti pierādīja gaidītos rezultātus.

Darba zinātniskā un praktiskā aprobācija

Veiktie pētījumi un dotās zinātniskās novitātes ir zinātniski aprobētas ar publikācijām (skat. *Autores publikācijas*), referātiem konferencēs un ar Latvijas un Eiropas patentiem (skat. *Izgudrojumi*), un praktiski aprobētas CMS izgatavošanā Latvijas uzņēmumā “Environment,

Bioenergetics and Biotechnology Competence Centre” (saīsināti saukts arī par „BTC”), kur izgatavotie sajūgi tiek ievietoti maisītājā un šie maisītāji tiek sūtīti uz Vāciju, kur tos izmanto laboratorijas aprīkojumā.

Pētījumu rezultāti ir atspoguļoti ar referātiem sekojošās starptautiskās konferencēs:

1. “The influence of Pole Pair Number and Magnets’ Width on Mechanical Torque of Magnetic Coupler with Rounded Permanent Magnets”. *52nd International Conference of Riga Technical University*. Latvija, Rīga, 2011. g. 14. oktobris;
2. “The Influence of PM’s Construction Parameters in Magnetic Coupler on Its Mechanical Torque”. *6th International Conference on Electrical and Control Technologies (ECT 2011)*. Lietuva, Kauņa, 2011. g. 4.–6. maijs;
3. “The influence of permanent magnets’ width and number on the mechanical torque of a magnetic coupler with rectangular permanent magnets”. *IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE 2011)*. Polija, Gdaņska, 2011. g. 27.–30. jūnijs;
4. “The Formula Synthesis of the Maximal Mechanical Torque on the Volume for a Cylindrical Magnetic coupler”. *53rd International Conference of Riga Technical University*. Latvija, Rīga, 2012. g. 12. oktobris;
5. “The Comparison of Active and Reactive Magnetic Couplers”. *8th International Conference on Electric Power Quality and Supply Reliability (PQ 2012)*. Igaunija, Tartu, 2012. g. 11.–13. jūnijs;
6. “Magnetic Coupler instead of Lever Actuated Friction Clutch for Wind Plant”. *Conference ELECTRONICS’2012*. Lietuva, Palanga, 2012. g. 18.–20. jūnijs;
7. “Start-Up Torques of Permanent Magnet Synchronous Generator With Non-Overlapping Concentrated Windings”. *9th International Conference on Electric Power Quality and Supply Reliability (PQ 2014)*. Igaunija, Rakvere, 2014. g. 11.–13. jūnijs.

Izgdrojumi

Dažiem no veikto pētījumu rezultātiem ir iegūti sekojoši patenti:

1. V. Pugacevs, **B. Ose-Zala**, J. Zicans, R. Merijs-Meri. Reactive magnetic coupler. EP2733835A2, 21.05.2013.
2. V. Pugačevs, **B. Ose-Zaļā**, J. Zicāns, R. Merijs-Meri. Reaktīvais magnētiskais sajūgs. LV 14857, 16.11.2012.
3. V. Pugačevs, J. Dirba, N. Levins, S. Orlova, **B. Ose**, L. Ribickis. Sinhronais ģenerators ar pastāvīgajiem magnētiem. LV 14271, 08.12.2010.

4. V. Pugačevs, A. Ivanovs, B. Tarancevs, **B. Ose**. Ūdens patēriņa skaitītājs. LV 14434, 17.08.2011.

Autores publikācijas

Pētījumi (veikti šajā promocijas darbā) ir prezentēti sekojošās publikācijās (iekavās ir dotas datubāzes un DOI numuri, ja tādi ir):

1. **Ose-Zala B.**, Pugachov V., Levin, N. Start-Up Torques of Permanent magnet Synchronous Generator With Non-Overlapping Concentrated Windings. *Proceedings of The 9th International Conference on Electric Power Quality and Supply Reliability (PQ 2014)*. Igaunija, Rakvere, 2014. g. 11.–13. jūnijs. Lpp.: 195–198. (**IEEE Xplore Digital Library**, **SCOPUS** doi: 10.1109/PQ.2014.6866809);
2. Dilevs G., **Ose-Zala B.**, Jakobsons E. Self-excitation of low-speed inductor generator. *Latvia Journal of Physics and Technical Sciences*. No. 4. Vol. 49. 2012. Latvija, Rīga. Lpp.: 21–28. (**SCOPUS** doi: 10.2478/v10047-012-0020-6);
3. Levins, N., Orlova, S., Pugachov, V., **Ose-Zala, B.**, Jakobsons, E. Methods to reduce the cogging torque in permanent magnet synchronous machines. *Journal of Electronics and Electrical Engineering*. No. 1. Vol. 19. 2013. Lietuva, Palanga. Lpp.: 23–26. (**SCOPUS** doi: 10.5755/j01.eee.19.1.3248);
4. **Ose-Zala B.**, Jakobsons E., Suskis P. The use of Magnetic Coupler instead of Lever Actuated Friction Clutch for Wind Plant. *Journal of Electronics and Electrical Engineering*. No. 10. Vol. 18. 2012. Lietuva, Palanga. Lpp.: 13–16. (**SCOPUS** doi: 10.5755/j01.eee.18.10.3053);
5. **Ose-Zala B.**, Pugachov V. The Comparison of Active and Reactive Magnetic Couplers. *Proceedings of The 8th International Conference on Electric Power Quality and Supply Reliability (PQ 2012)*. Estonia, Tartu, 2012. g. 11.–13. jūnijs. Lpp.: 25–28. (**IEEE Xplore Digital Library**, **SCOPUS** doi: 10.1109/PQ.2012.6256194);
6. **Ose-Zala B.**, Pugachov V., Onzevs O. The Formula Synthesis of the Maximal Mechanical Torque on the Volume for a Cylindrical Magnetic coupler. *Scientific Journal of Riga Technical University on Electrical, Control and Communication Engineering*. Iss. 1. Vol. 3. augusts, 2013. Lpp.: 37–43 (**Open Access** doi: 10.2478/ecce-2013-0013);
7. **Ose B.**, Pugachov V. The influence of Pole Pair Number and Magnets' Width on Mechanical Torque of Magnetic Coupler with Rounded Permanent Magnets. *Proceedings of The 52nd International Scientific Conference of Riga Technical*

University on Power and Electrical Engineering. Latvija, Rīga, 2011. g. 14. oktobris. Lpp.: 63–66.;

8. **Ose B.**, Pugachov V., Orlova S., Vanags J. The influence of permanent magnets' width and number on the mechanical torque of a magnetic coupler with rectangular permanent magnets. *Proceedings of IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE 2011)*. Polija, Gdańska, 2011. g. 27.–30. jūnijs. Lpp.: 761–765. (**IEEE Xplore Digital Library** doi: 10.1109/ISIE.2011. 5984253);
9. **Ose B.**, Pugachov V., Orlova S. The Influence of PM's Construction Parameters in Magnetic Coupler on Its Mechanical Torque. *Proceedings of The 6th International Conference on Electrical and Control Technologies (ECT 2011)*. Lietuva, Kauņa, 2011. g. 4.–6. maijs. Lpp.: 226–230.

Darba struktūra

Ievads

1. Cilindriskais magnētiskais sajūgs (CMS)
 - 1.1. Magnētisko sajūgu klasifikācija
 - 1.2. CMS konstrukcijas pamata parametri
 - 1.3. CMS izmantotie materiāli
 - 1.3.1. Pastāvīgie magnēti (PM)
 - 1.3.2. Jūgi
 - 1.3.3. Izolējošais ekrāns
 - 1.4. CMS galvenais raksturlielums
 - 1.5. Secinājumi
2. CMS konstrukcijas parametru ietekme uz tā maksimālo mehānisko momentu
 - 2.1. Aktīvais CMS
 - 2.1.1. Ietekmējošo konstrukcijas parametru izvēle
 - 2.1.2. CMS matemātiskais modelis programmatūrā *QuickField*
 - 2.1.3. PM formas izvēle
 - 2.1.4. Izvēlēto konstrukcijas parametru robežvērtību izvēle
 - 2.1.4.1. Polu pāru skaits p
 - 2.1.4.2. Magnētiskā pārklājuma koeficients β
 - 2.1.4.3. PM augstums h_{PM}
 - 2.1.4.4. Gaisa sprauga δ
 - 2.1.4.5. PM materiāli
 - 2.1.4.6. Aksiālais garums l
 - 2.2. Reaktīvais CMS
 - 2.3. Aktīvā un reaktīvā CMS salīdzinājums
 - 2.4. Secinājumi
3. Matemātisko modeļu sintēze
 - 3.1. Mērķfunkcijas un kontroles parametru definēšana
 - 3.2. Īss formulu sintēzes programmas apraksts

- 3.3. Sintezēto formulu izvēle
 - 3.3.1. Mērķfunkcija
 - 3.3.2. Kontroles parametri
 - 3.3.3. Formulu pārbaudīšana
- 3.4. Secinājumi
- 4. CMS optimizācija
 - 4.1. Elektrotehnikā biežāk lietotās optimizāciju metodes
 - 4.1.1. Gradienta metode
 - 4.1.2. Intervālu izslēgšanas metode
 - 4.1.3. Ņūtona metode
 - 4.1.4. Lagranža metode
 - 4.2. Citas populāras optimizāciju metodes
 - 4.2.1. Pauvela kvadrātiskā interpolācija
 - 4.2.2. DFP metode
 - 4.2.3. Fletčer-Rīvza virzieni
 - 4.2.4. Daudzkāršu metode nevienādības ierobežojumiem
 - 4.2.5. SQP
 - 4.3. Optimizācijas rīka izvēle
 - 4.4. CMS optimizācija
 - 4.5. Optimizācijas metodoloģija
 - 4.6. Secinājumi
- 5. Eksperimenti un tālākas pētījumu iespējas
 - 5.1. Pirmais eksperimentu kopums
 - 5.1.1. Mērķis, uzdevumi un metodes
 - 5.1.2. Eksperimentu soļi
 - 5.1.3. Eksperimentu secinājumi
 - 5.2. Otrais eksperimentu kopums
 - 5.2.1. Mērķis, uzdevumi un metodes
 - 5.2.2. Eksperimentu soļi
 - 5.2.3. Eksperimentu secinājumi
 - 5.3. Nākotnē potenciālie CMS uzlabojumi
 - 5.4. Secinājumi

Galvenie secinājumi

Pielikumi

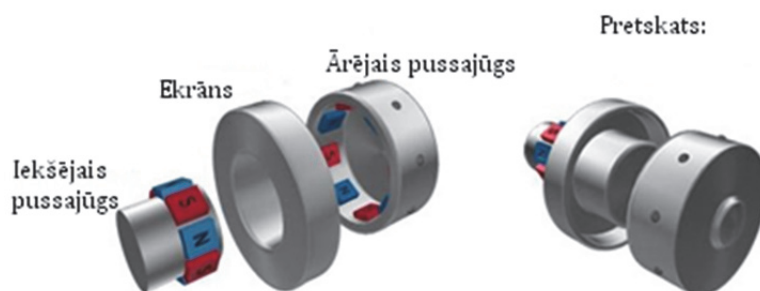
1. pielikums — Magnētisko sajūgu pielietošanas piemēri
2. pielikums — Reaktīvā, Edija strāvas un histerēzes magnētisko sajūgu piemēri
3. pielikums — Visbiežāk lietotās magnētiskās mērvienības un to attiecības
4. pielikums — Eksperiments “Demagnetizēšanās līkne”
5. pielikums — CMS magnētiskā lauka aprēķina piemērs
6. pielikums — M_{max}/V eliminācijas diagramma
7. pielikums — B_{max} eliminācijas diagramma
8. pielikums — Optimizācija un analīze lietojumprogrammatūrā *SIMCA*

Literatūras saraksts

PROMOCIJAS DARBS ĪSUMĀ

1. Cilindriskais magnētiskais sajūgs (CMS)

Definīcija. *Magnētiskais sajūgs* (MS) ir mašīna [13], kuru izmanto mehāniskā momenta pārnesei starp divām vai vairākām daļām bez tiešas saskares, izmantojot pastāvīgo magnētu (PM) mijiedarbības spēkus, kurus rada magnētu inducētais magnētiskais lauks. MS izgatavo ar izolējošu ekrānu starp pussajūgiem (1.1. att.).



1.1. att. Magnētiskais sajūgs

Visbiežāk magnētiskais sajūgs **darbojas šādi**: dzinējs caur vārpstu griež iekšējo pussajūgu un, pateicoties PM pievilkšanās un atgrūšanās spēkiem starp abiem pussajūgiem, arī ārējais pussajūgs sāk griezties. Šie mijiedarbības spēki darbojas vienādi abos virzienos: kad iekšējais pussajūgs tiek vadīts, ārējais pussajūgs seko un, kad ārējais pussajūgs tiek griezts, seko iekšējais pussajūgs.

Ir aprakstīta problemātiskā situācija ar *magnētiskā sajūga* un tā *pussajūgu* terminoloģiju.

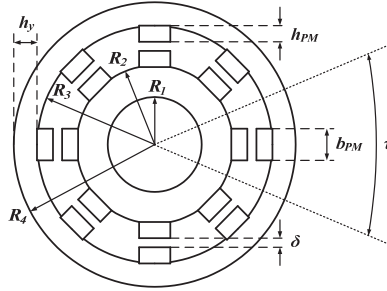
Pielietošana. Magnētiskais sajūgs tiek izmantots dažādos pumpjos (piem., centrifūgās, zobratsūkņos), kompresoros, šķidrumu (vai gāzveida/cietvielu substanču) maisītājos, mikseros, ventilatoros, pūtējos un autoklāvos (parasti reaktīvais MS). Daži pielietošanas piemēri ir doti promocijas darba 1. pielikumā.

Darbā ir dotas tādas klasifikācijas kā, piem., sinhrono un asinhrono sajūgu klasifikācija (1.2. att.) un MS klasifikācija pēc PM mijiedarbības virsmas veida.



1.2. att. Sinhrono un asinhrono sajūgu pamatgrupas.

Cilindriskā magnētiskā sajūga (CMS) konstrukcija ir izvēlēta pētīšanai promocijas darbā. CMS ar taisnstūrveida PM galvenie konstrukcijas parametri ir (1.3. att.): sajūga aksiālais garums l (mm), iekšējais rādiuss R_1 (mm), iekšējā pussajūga PM novietošanas rādiuss R_2 (mm), ārējā pussajūga PM novietošanas rādiuss R_3 (mm), ārējais rādiuss R_4 (mm), gaisa sprauga δ (mm), PM augstums h_{PM} (mm), PM platums — b_{PM} (mm), ārējā pussajūga jūga ausgtums h_y (mm). Papildus dotajiem rādiusiem R_3 un R_4 jūga ausgtums h_y tiek izmantots, jo tas mainās pēc sakarības (1.1) [18].



1.3. att. CMS galvenie konstrukcijas parametri šķērsgriezumā.

$$h_y = \frac{\pi R_3 \beta' B_r}{p 2 B_{steel}}, \quad (1.1)$$

kur h_y — jūga ausgtums ārējā pussajūgā [mm];

R_3 — ārējā pussajūga PM novietošanas rādiuss [mm];

β' — koeficients, kas parāda, kādu daļu no pola iedaļas τ pārklāj PM platums

$$b_{PM}: \beta' = (b_{PM} / \tau_{in} + b_{PM} / \tau_{out}) / 2;$$

B_r — PM paliekošā indukcija [T];

p — polu pāru skaits;

B_{steel} — kontrolētā indukcijas vērtība ārējā jūgā [T], izvēlēts $B_{steel} = 1,8$ T.

PM materiāls arī ietekmē CMS konstrukcijas izmērus. Tā konstrukcijas aprēķinos tiek ņemta vērā PM magnētiskā caurlaidība μ_{PM} , tā iegūta no magnētu paliekošās indukcijas B_r un koercitīvā spēka H_c . Šīs vērtības ir pieejams katalogu datos. Šajā darbā PM relatīvā magnētiskā caurlaidība μ^* (1.2) ir izmantota [17, 18].

$$\mu^* = \frac{B_r}{H_c \mu_0} = \frac{B_r}{H_c 4\pi 10^{-7}}, \quad (1.2)$$

kur μ^* — PM relatīvā magnētiskā caurlaidība;

B_r — PM paliekošā indukcija [T];

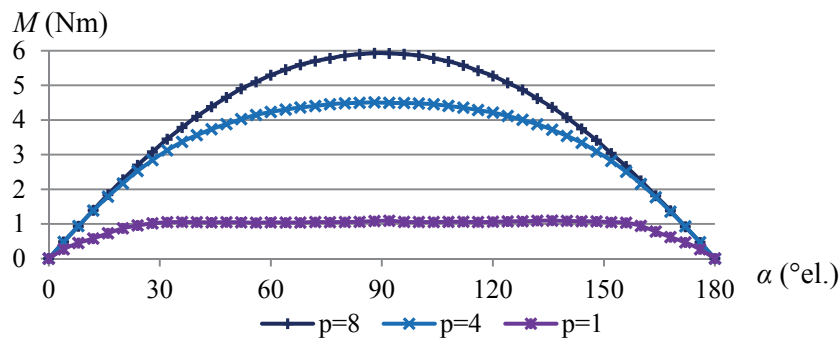
H_c — PM koercitīvais spēks [A/m];

μ_0 — gaisa magnētiskā caurlaidība un tā ir $\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$ [H/m].

Mūsdienās ir ļoti plaša CMS izgatavošanā izmantojamo materiālu izvēle, bet pētījumu robežu noteikšanai tiek izvēlēti sekojoši materiāli:

- PM: bārija ferīts ($\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$), stroncija ferīts ($\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$), samārija kobalta sakausējums ($\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$, marka 30H), neodīma dzelzs bora sakausējums (NdFeB , marka N38UH);
- Izolējošais ekrāns — austenīta nerūsējošais tērauds ar marku 1.4401 ($\mu^* = 1,004$, bet var pieņemt par gaisu ar $\mu^* = 1,000$);
- Sajūga jūgi — magnētiski mīksts tērauds ar marku S235JRG2 un materiāla numuru 1.0038.

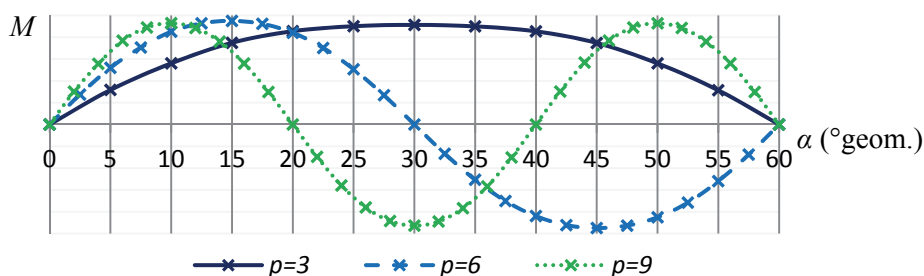
Atšķirīgiem materiāliem ir dažādas magnētiskās īpašības. Šīs īpašības ietekmē CMS mehānisko momentu, piem., mehāniskā momenta līknes sajūgam ar NdFeB PM ($l = 10 \text{ mm}$, $R_l = 10 \text{ mm}$, $R_6 = 40 \text{ mm}$, $\beta = 0,9$, $p = 1, 4$ un 8) (1.4. att.). Tā kā šīm līknēm var nebūt vienāda forma, par korektāku tiek uzskatīta CMS salīdzināšana pēc to mehānisko momentu līkņu maksimuma vērtības — maksimālā mehāniskā momenta M_{max} .



1.4. att. CMS mehāniskā momenta līknes (PM izgatavoti no NdFeB).

Pagrieziena leņķis α , pie kura mehāniskajam momentam ir vislielākā vērtība — M_{max} —, sajūgiem ar atšķirīgu polu pāru skaitu p ir aprēķināms pēc (1.3). Šī atšķirība ģeometriskajos grādos ir redzama 1.5. att. (momentu vērtības nav reālas, bet ir mērogotas).

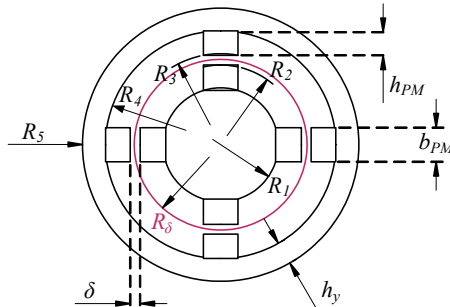
$$\alpha = \frac{90^\circ}{p} [\text{geom}] \quad (1.3)$$



1.5. att. CMS mehāniskā momenta līknes (Ba-ferīta PM).

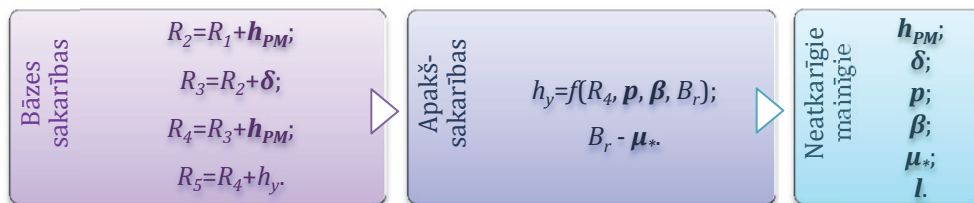
2. CMS konstrukcijas parametru ietekme uz tā maksimālo mehānisko momentu

Šajā nodaļā CMS bāzes modelis ir izvēlēts (2.1. att.), kura konstrukcija ir optimizēta. Bāzes modelim ir taisnstūrveida PM.



2.1. att. CMS bāzes modelis šķērsgriezumā.

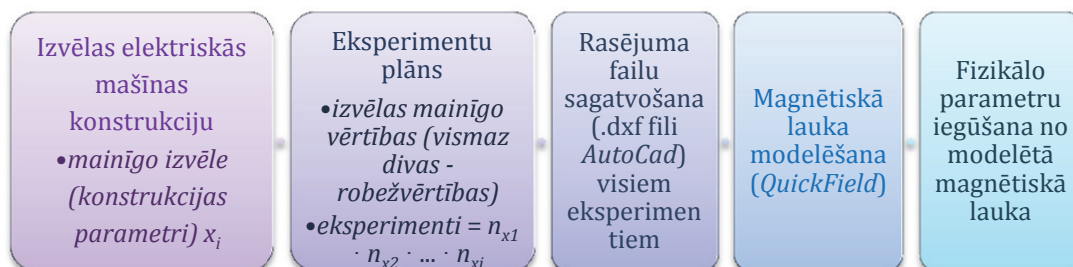
Optimizācijas procesā ir svarīgi neatkarīgie mainīgie un tie ir doti 2.2. att.



2.2. att. Neatkarīgie mainīgie no bāzes sakarībām.

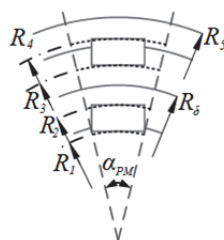
Lai modelētu CMS magnētisko lauku un aprēķinātu nepieciešamos fizikālos parametrus, ir izmantojamas dažādas elektromagnētisko lauku simulēšanas lietojumprogrammas, kā *AMPERES* (trīs dimensiju (3D)), *OERSTED* (divu dimensiju (2D)), *ANSYS Maxwell* (2D/3D), *QuickField* (2D) u. c. Tā kā CMS ir simetrisks magnētiskais lauks attiecībā pret tā aksiālo garumu, var tikt izmantota vienkāršāka (divu dimensiju) elektromagnētiskā lauka simulēšanas lietojumprogramma. Šajā darbā ir izmantota lietojumprogramma *QuickField (QF)* [14]. Šī lietojumprogrammas lauku modelēšana ir balstīta uz galīgo elementu analīzi.

Ir izstrādāta aprēķina metodoloģija CMS fizikālo parametru noteikšanai, kuras pilnā diagramma ir dota promocijas darbā, bet šeit (2.3. att.) ir parādīti tās galvenie soļi.



2.3. att. Izstrādātās aprēķina metodoloģijas galvenie soļi.

Ir pētīta PM pāreja no taisnstūrveida formas uz lietu/sektoveida formu (2.4. att.). Šī pāreja nodrošina M_{max} vērtības pieaugumu par aptuveni 35 %. Ar šo brīdi var izmantot magnētiskā pārklājuma koeficientu β ($\beta = \alpha_{PM}/\tau$), kur α_{PM} ir PM leņķiskais platums (ģeometriskajos grādos) un τ ir pola iedaļa (arī ģeometriskajos grādos).



2.4. att. Pāreja no taisnstūrveida uz liektajiem PM.

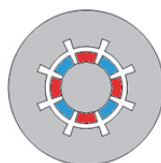
Tā kā šī darba pētījumi ir veikti arī ar mērķi, lai rezultātus varētu praktiski izmantot Latvijas uzņēmumā “BTC”, tad mainīgo parametru robežvērtību izvēle ir balstīta uz CMS praktiskajām izgatavošanas iespējām „BTC”. Tiek pieņemts, ka rādiuss R_l ir $R_l = 10$ mm. Izvēlētās robežvērtības ir dotas 2.1. tabulā.

2.1. tabula

Izvēlētās mainīgo robežvērtības

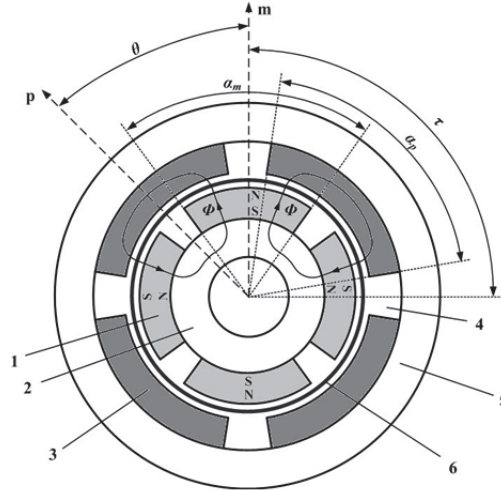
Mainīgais	Minimālā vērtība	Maksimālā vērtība
l (mm)	10	75
p	1	9
β	0,7	0,9
h_{PM} (mm)	4	8
δ (mm)	2	3
μ^*	1,061	1,344

Šajā nodaļā ir pētīts arī reaktīvais CMS. Kad CMS PM ir novietoti tikai uz viena pussajūga un uz otrā pussajūga magnētu nav, bet tam ir tādi zobveida izciļņi, kurus varētu veidot magnēti, no tāda paša feromagnētiska materiāla kā jūgs, tad to sauc par reaktīvo CMS (2.5. att.). Šāds konstrukcijas risinājums ir nepieciešams gadījumos, kad apkārtējā vide PM būtu pārāk agresīva: temperatūra par augstu, izraisot magnētiem izteiktu to kvalitatīvo īpašību zudumu — atgrūšanās un pievilšanās spēkus, vai citi ietekmējošie faktori, kas var novest pie magnētu demagnetizēšanās u. tml.



2.5. att. Reaktīvā CMS šķērsgriezums.

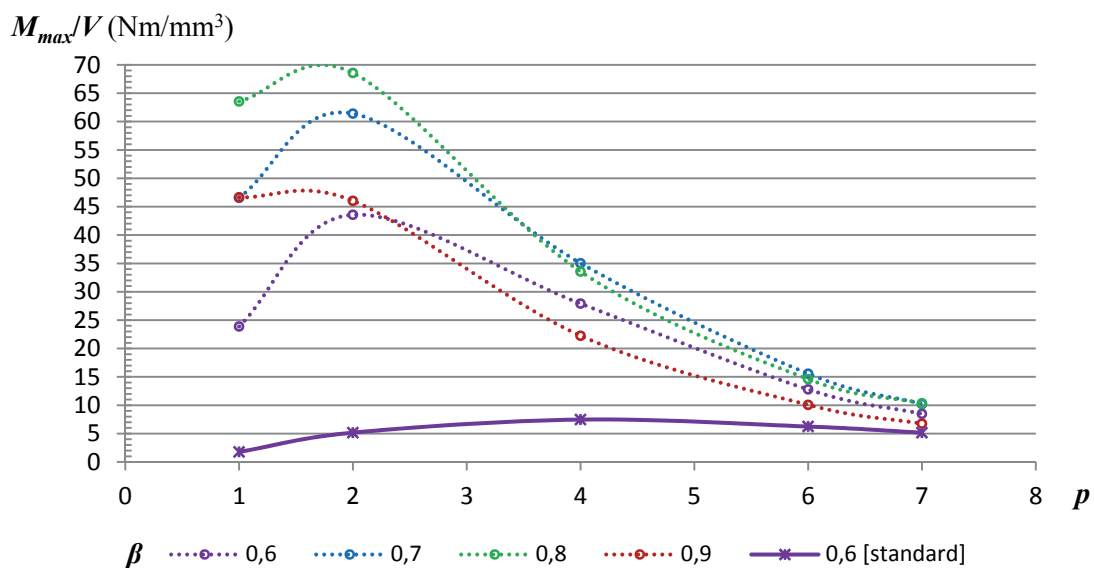
Reaktīvos sajūgos izmanto tikai gadījumos, kad nepieciešamas pārnest momentu īpaši agresīvās vidēs, to galvenā trūkuma dēļ — to mazā maksimālā mehāniskā momenta M_{max} vērtība, salīdzinot ar tādu pašu izmēru aktīvo CMS. Lai risinātu šo problēmu, tiek piedāvāts jaunas konstrukcijas reaktīvais CMS (2.6. att.) [11, 12], un šī konstrukcija ir pētīta [8].



2.6. att. Jaunās (patentētās) konstrukcijas reaktīvais CMS.

1 — PM, 2 — jūgs, 3 — sektoru formas poli (feromagnētiska materiāla), 4 — gaisa sprauga (nemagnētiska materiāla), 5 — ķermenis (nemagnētisks & viegls materiāls), 6 — fiksēts izolējošais ekrāns.

Jaunā un standarta konstrukcijas reaktīvo sajūgu objektīvai salīdzināšanai ir izvēlēts raksturlielums M_{max}/V — maksimālais mehāniskais moments uz tilpuma vienību, jo jaunās konstrukcijas sajūgam ir viegls nemagnētisks jūgs, ko tilpuma aprēķinā var neņemt vērā. PM ir izgatavoti no NdFeB sakausējuma. Jaunās konstrukcijas reaktīvajam sajūgam ir palielināts M_{max}/V par aptuveni 9 reizēm, salīdzinot ar analogu konstrukciju (ar ārējo jūgu) reaktīvajiem sajūgiem (2.7. att.).



2.7. att. $M_{max} = f(p, \beta)$ jaunās konstrukcijas reaktīvajam CMS.

3. Matemātisko modeļu sintēze

Daudzfaktoru datu analīzē ir izmantojamas daudzas metodes [2, 3], bet CMS datu analīzei un matemātisko modeļu (formulu veidā) radīšanai kā vispiemērotākā metode ir izvēlēti regresijas modeļi.

Regresijas analīzē atkarīgais mainīgais y_l ir kvantitatīvs lielums, bet neatkarīgie mainīgie x_1, \dots, x_n var būt abējādi lielumi — kvantitatīvie un kvalitatīvie. Sakarība starp mainīgajiem veido šādu formu:

$$y_l = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (3.1)$$

Formulu sintēzē tiek izmantots gatavs rīks. Šo programmu kompleksu ir uzrakstījis un izveidojis *Dr. sc. ing.* O. Onževs. Par šo programmu kompleksu un tur izmantoto metodoloģiju sīkāk var lasīt viņa promocijas darbā [4].

Optimizācijā tiek izmantoti iegūtie mērķfunkcijas un kontroles parametru modeļi/sintezētās formulas. Mērķfunkcijai ir jābūt veidotai no fizikāla raksturlieluma un kāda konstrukcijas vai ekonomiska parametra objektīvam novērtējumam, kā visos optimizācijas uzdevumos. Tādējādi maksimālais mehāniskais moments M_{max} ir objektīvs fizikāls raksturlielums. Optimizācija tiek veikta pēc konstrukcijas parametru un magnētu materiāla parametra, netieši norādot uz ekonomisku aspektu — jo mazāk materiāla ir izmantots, jo lētāks ir izgatavojamais sajūgs ar interesējošo raksturlielumu. Līdz ar to, ja maksimālais mehāniskais moments M_{max} var būt vienāds vairākiem CMS ar atšķirīgām konstrukcijas parametru kombinācijām, tad maksimālais mehāniskais moments uz tilpuma vienību M_{max}/V ir izvēlēts kā ticams raksturlielums.

Mērķfunkcija ir definēta kā (3.2), bet kontroles parametri — kā (3.3) tikai sajūgs ar PM no retzemju sakausējumiem un aksiālais garums nav iekļauts, jo tam nav izteiktas ietekmes uz maksimālās indukcijas vērtību sajūga šķērsgriezumā.

$$M_{max}/V = f(\mu^*; l; h_{PM}; \beta; \delta; p) \quad (3.2)$$

$$B_{max} = f(h_{PM}; \beta; \delta; p) \quad (3.3)$$

Aksiālais garums l ir jau ievērots sajūga tilpuma V aprēķinā un garums l tieši korelē ar aprēķināto maksimālā momenta M_{max} vērtību, tādējādi aksiālais garums l netiek tieši iekļauts funkcijas M_{max}/V formulu sintēzē, jo tas ir iekļauts jau abos lielumos M_{max} un V tiešā proporcijā ($M_{max}(l)/V(l) \rightarrow M_{max}/V \neq f(l)$). Kā iepriekšējie pētījumi parādīja, formulām ir laba korelācija ar eksperimentu datiem, ja atbilstošo PM materiālu formulas tiek sintezētas atsevišķi, līdz ar to mērķfunkcijas gala izteiksme ir (3.4).

$$M_{max}/V = f(h_{PM}; \beta; \delta; p) \quad (3.4)$$

Sintezējot formulu, tiek iegūtas vairākas elementāro funkciju kombinācijas. Formulas tiek izvēlētas no eliminācijas diagrammām, ņemot vērā vai nu lūzuma punktu vai korelācijas vērtību.

Analizējot eksperimentu rezultātus, formulu sintēze ir izvēlēta pa polu pāru skaita p konkrētu sadalījumu. Piem., M_{max}/V formula (3.5) ir sajūgam ar SmCo magnētiem un polu pāru skaitam $p = 7-9$ (korelācija ir $\rho = 95,37\%$), un $B_{max\ in}$ formula (3.6) ir sajūgam ar retzemju sakausējumu PM polu pāru skaitam $p = 2, 3$ (korelācija ir $\rho = 80,40\%$).

$$M_{max}/V = -50,0 + 102,2 \frac{h_{PM}}{\delta} - 10,46p - 20,17h_{PM} + 362,3\beta - 19,93 \frac{h_{PM}^2}{\delta^2} + 0,880h_{PM}^2 - 212,1\beta^2 + 1,66 \frac{h_{PM}^3}{\delta^3} \quad (3.5)$$

$$B_{max\ in} = 2,532 + 0,0913p - 5,11\beta + 0,125h_{PM} - 0,033h_{PM} \cdot p + 0,036 \frac{h_{PM}}{\delta} + 4,121\beta^2 \quad (3.6)$$

Sintezētās formulas ir pārbaudītas ar parametru starpvērtībām (vērtības, kas ir starp iestatītajām eksperimenta punktos), un rezultāti parāda, ka veiktais PM materiālu un polu pāru skaita sadalījums ir bijis atbilstošs. Relatīvās kļūdas ir sekojošas: galvenajam raksturlielumam M_{max}/V ir $\varepsilon_{M/V} < 5\%$ un kontroles parametriem B_{max} ir $\varepsilon_B < 10\%$. Tādējādi ir iegūti ticami matemātiskie modeļi (formulu veidā).

4. CMS optimizācija

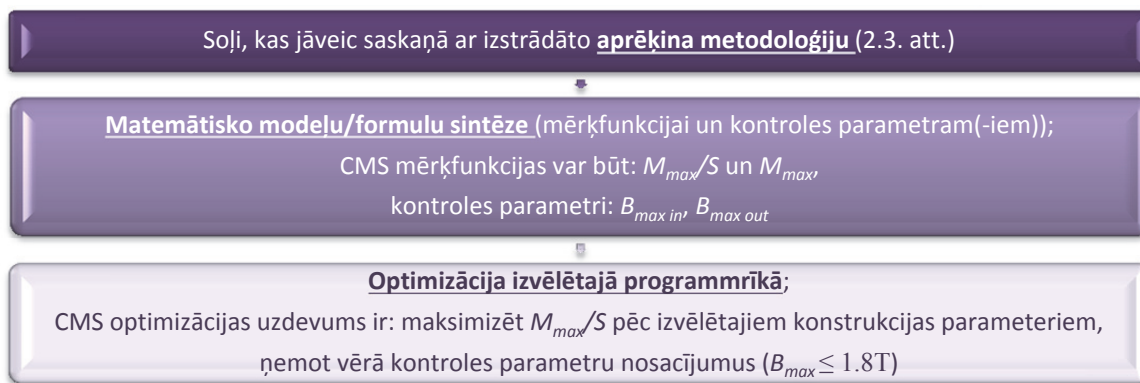
CMS optimizācija ir diskrets optimizācijas uzdevums ar ierobežojumiem. Kaut ir apskatīti daudzi optimizācijas algoritmi (piem., gradienta metode, intervālu izslēgšanas metode, Pauvela kvadrātiskā interpolācija), ir nolemts izmantot jau eksistējošu optimizācijas rīku. Ir piedāvātas daudzas daudzfaktoru datu analīzes un optimizācijas programmatūras, bet apskatītas ir dažas no tām, un ir izvēlēts viens optimizācijas rīks *SIMCA*.

Pielietojot *SIMCA* ir atrasts aktīvā CMS optimums. Protams, optimums ir gadījumā, kad PM ir izgatavoti no retzemju sakausējuma nevis no vienkārša ferīta. Ja magnētu materiālu tipus apskata atsevišķi, var iegūt sekojošus optimizācijas rezultātus:

- Retzemju sakausējumu gadījumā $M_{max}/V = 172,27$ (Nm/m³) un $M_{max} = 36,97$ (Nm):
 - ✓ Relatīvā magnētiskā caurlaidība $\mu^* = 1,061$ (NdFeB);
 - ✓ Aksiālais garums $l = 75$ mm;
 - ✓ Polu pāru skaits $p = 5$;
 - ✓ Magnētiskā pārklājuma koeficients $\beta = 0,80$;
 - ✓ PM augstums $h_{PM} = 8$ mm;
 - ✓ Gaisa sprauga $\delta = 2$ mm;

- ✓ Vienkāršu ferītu gadījumā $M_{max}/V = 14,64$ (Nm/m³) and $M_{max} = 3,09$ (Nm):
- ✓ Relatīvā magnētiskā caurlaidība $\mu^* = 1,344$ (Sr-ferrite);
- ✓ Aksiālais garums $l = 75$ mm;
- ✓ Polu pāru skaits $p = 4$;
- ✓ Magnētiskā pārklājuma koeficients $\beta = 0,80$;
- ✓ PM augstums $h_{PM} = 8$ mm;
- ✓ Gaisa sprauga $\delta = 2$ mm.

Veiktā optimizācija ļāva izstrādāt CMS optimizācijas metodoloģiju, kuras galvenie soļi ir doti 4.1. att.

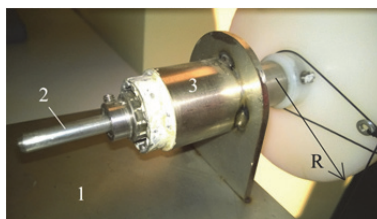


4.1. att. Izstrādātās optimizācijas metodoloģijas galvenie soļi.

5. Eksperimenti un tālākās pētījumu iespējas

Šajā nodaļā ir dota informācija par veiktajiem eksperimentu kopumiem un, pēc autores domām, tālākām pētījumu iespējām CMS konstrukciju optimizācijā.

Pirmais eksperimentu kopums ir veikts, lai iegūtu CMS mehāniskā momenta līkni CMS un to salīdzinātu ar līkni, kas aprēķināta nomodelētā magnētiskā lauka programmā *QuickField (QF)*. Speciālas konstrukcijas objekts ar iebūvētu CMS ir izgatavots mehāniskā momenta līknes eksperimentālai noteikšanai (5.1. att.). Objekts ir piemontēts pamatnei 1, ļaujot to pārvietot un piestiprināt nepieciešamajam stendam. CMS 3 iekšējais un ārējais pussajūgs ir izgatavoti ar taisnstūrveida PM. Iekšējais pussajūgs tiek pagriezts par noteiktu leņķi ap rotācijas asi 2.

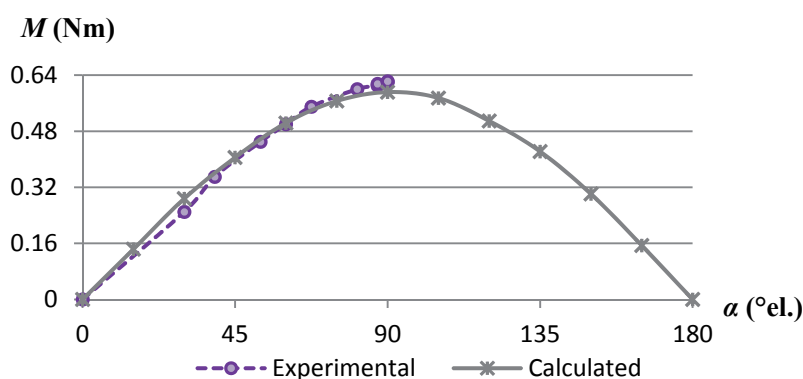


5.1. att. Izgatavotais objekts ar CMS eksperimenta veikšanai.

CMS ir NdFeB magnēti, polu pāru skaits ir $p = 6$. Pārējie konstrukcijas parametri ir doti promocijas darbā, aprakstot sajūgu BR-5 (2.1.3. apakšnodaļā). Klasiskā eksperimenta metode ir dinamometra darbības princips: zinot rādiusu un pielikto svaru (vai spēku), var aprēķināt momentu. Izvēlētajam pagrieziena leņķim α_i ir zināma masa m_i , kas jāpieliek, lai balansētu gaisa spraugā starp abiem pussajūgiem veidojošos momentu, un rādiuss R ir zināms ($R = 56$ mm). Momenta vērtības M_i ir aprēķinātas pēc (5.1.) konkrētajam pagrieziena leņķim α_i .

$$M_i = R \cdot F_i = 0,056 \cdot gm_i \text{ (Nm)} \quad (5.1)$$

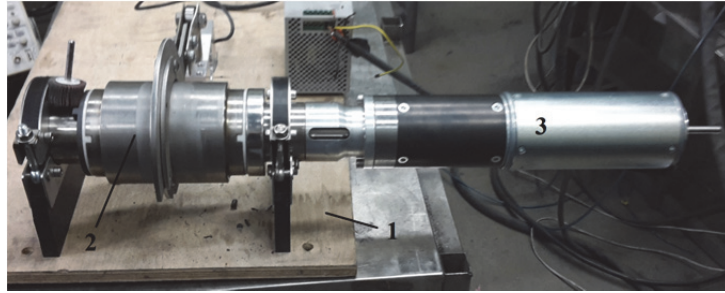
Šim pašam sajūgam BR-5 ir sagatavots rasējuma fails un ir aprēķināts momenta programmā *QF*. Iegūtie rezultāti ir salīdzināti (5.2. att.). Tā kā optimizācijas uzdevumā ir nepieciešams izmantot mehāniskā momenta maksimuma vērtību, maksimālā mehāniskā momenta vērtības ir salīdzinātas atsevišķi: $M_{max \text{ exp}} = 0,623$ Nm un $M_{max \text{ QF}} = 0,591$ Nm. Atšķirība ir $\Delta M_{max} = 0,032$ Nm vai 5,4 % (par pamatu ņemot $M_{max} = 0,591$ Nm). Šie rezultāti apstiprina, ka lietojumprogrammatūra *QuickField* ir izmantojama maksimālā mehāniskā momenta vērtību aprēķināšanai (ir pielietojama izstrādātā aprēķina metodoloģija) un rezultāti ir pielietojami tālāk CMS konstrukcijas optimizācijā.



5.2. att. CMS BR-5 mehāniskais moments.

Otrais eksperimentu kopums ir veikts, lai iegūtu CMS mehāniskā momenta līkni un momenta maksimuma vērtību salīdzinātu ar to, kas aprēķināta, izmantojot sintezēto formulu (radīto matemātisko modeli). Speciālas konstrukcijas objekts ar iebūvētu CMS ir izgatavots mehāniskā momenta līknes eksperimentālai noteikšanai (5.3. att.). Objekts ir piemontēts pamatnei 1, ir pārvietojams un piestiprināms jebkuram nepieciešamajam stendam. CMS 2 iekšējais un ārējais pussajūgs ir izgatavoti ar liektiem PM. Lai noturētu iekšējo pussajūgu vienā pozīcijā ir nepieciešams papildus svars, kas nodrošināts ar detaļu 3.

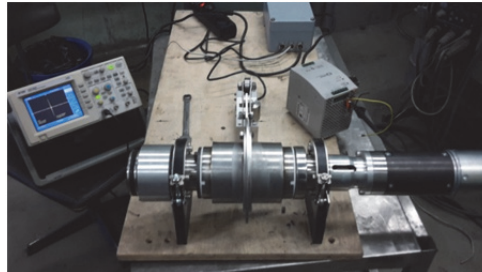
CMS ir liekti (sektora veida) NdFeB magnēti ar polu pāru skaitu $p = 5$, augstumu $h_{PM} = 9,5$ mm un magnētiskā pārklājuma koeficientu $\beta = 0,95$. Aksiālais garums ir $l = 76,2$ mm un gaisa sprauga ir $\delta = 4,3$ mm. Ir šādi rādiusu izmēri: $R_l = 17,75$ mm un $R_5 = 50,85$ mm (2.1. att.).



5.3. att. Eksperimentam izgatavotais objekts.

Klasiskā eksperimenta metode — momenta vērtības ir iegūtas pie noteiktiem leņķiem līdzīgi dinamometra darbības principam: zinot spēka plecu un pielikto spēku, moments tiek parādīts oscilogrāfā. Oscilogrāfā iegūst $M = f(\alpha)$ līkni, izmantojot pagrieziena leņķa α_i (pārņests uz oscilogrāfu, pielietojot sprieguma sensoru) un spiediena spēka F_i vērtības, moments M_i noteikts pēc (5.2). Kad ārējais pussajūgs mēģina rotēt, spiediena spēks F tiek radīts un novadīts pa spēka plecu $l' = 200$ mm (= 0,20 m), un spēks ir mērīts ar sensoru (sensors spiediena spēka noteikšanai). Mehāniskā momenta eksperimentālai noteikšanai izgatavotais stands ir dots 5.4. att. Ir nepieciešama tikai maksimālā mehāniskā momenta M_{max} vērtība un tā ir $M_{max} = 76,13$ Nm.

$$M_i = l' \cdot F_i \text{ (Nm)} \quad (5.2)$$



5.4. att. Eksperimenta stands.

Šajā gadījumā, lai prognozētu maksimālā mehāniskā momenta vērtību, ir nepieciešams sintezēt atsevišķu formulu (5.3). Matemātiskais modelis šai CMS konstrukcijai ir vienkāršāks, jo ir zināms konkrēts magnētu materiāls (NdFeB, μ^* — const), magnētiskā pārklājuma koeficients ($\beta = 0,95$, tāpat const) un gaisa spraugas platums ($\delta = 4,3$ mm).

Šī formula ir patiesa šādām mainīgo robežām: $l = 70\text{--}80$ mm, $h_{PM} = 8\text{--}10$ mm un $p = 4\text{--}6$. Robežas ir mazas, bet ar nolūku atsevišķi sintezētajai formulai būtu jābūt precīzai.

$$M_{max} = l \cdot (0,3 + 0,09 h_{PM} - 0,007 h_{PM} \cdot p + 0,0023 h_{PM}^2) \quad (5.3)$$

Ievietojot formulā (5.3) mainīgo vērtības — $p = 5$, $h_{PM} = 9,5$ (mm) un $l = 76,2$ (mm), aprēķinātā maksimālā mehāniskā momenta vērtība ir $M_{max} = 78,492$ Nm.

Ja par pamatu ņem vērtību, kas iegūta klasiska eksperimenta veidā, tad aprēķinātajam M_{max} pēc (5.3) absolūtā kļūda ir $\Delta M_{max} = 2,36$ Nm un relatīvā kļūda ir $\Delta M_{max} = 3,1$ %. No šejienes var secināt, ka izstrādātie matemātiskie modeļi/formulas, kas balstīti uz daudzfaktoru datu analīzi, ir ļoti labs rīks M_{max} vērtību prognozēšanā un formulas var tikt pielietotas tālāk optimizācijas problēmu risināšanā.

Galvenie secinājumi

Jaunāko pētījumu par cilindriskiem magnētiskiem sajūgiem (CMS) analīze pierādīja, ka šajā darbā veiktais pētījums par CMS konstrukcijas ietekmējošajiem parametriem un CMS optimizācija, balstīta uz magnētiskā lauka aprēķiniem, līdz šim nav veikti šādā veidā.

Kā CMS galvenais raksturlielums maksimālais mehāniskais moments M_{max} ir izvēlēts, jo mehāniskā momenta M līknes dažādu konstrukciju sajūgiem var atšķirties gan pēc amplitūdas, gan perioda. Lai izvairītos no kļūdām, kādas rodas neatbilstošu lielumu salīdzināšanā, ir izvēlēta viena raksturojoša līknes vērtība (M_{max}). CMS ir vairāki konstrukcijas parametri, bet tikai 5 (polu pāru skaits p , magnētiskā pārklājuma koeficients β , PM augstums h_{PM} , gaisa sprauga δ un aksiālais garums l) no tiem ir izvēlēti optimizācijas uzdevumam. Sestais parametrs ir relatīvā magnētiskā caurlaidība μ^* , kas atspoguļo materiālu, no kāda izgatavoti PM. Šis parametrs arī netieši ietekmē CMS konstrukciju un tā galveno raksturlielumu M_{max} . Šiem parametriem ir pētīta robežvērtību ietekme uz momentu un ir pamatoti izvēlētas parametru robežu vērtības.

Kā bāzes modelis ir izvēlēts CMS ar taisnstūrveida PM. Piedāvātā pāreja no taisnstūrveida magnētiem uz liektajiem (jeb sektora veida) sniedz M_{max} vērtības pieaugumu par vairāk kā 30 %. Tālāka CMS optimizācija ir veikta sajūgam ar liektiem PM. Tā kā izvēlēta raksturlieluma M_{max} vērtības dažādas konstrukcijas sajūgiem var būt vienādas vai ļoti līdzīgas, ir izvēlēts papildināts raksturlielums: maksimālais mehāniskais moments uz tilpuma vienību M_{max}/V .

Ir izstrādāta aprēķina metodoloģija tādu interesējošo parametru kā galvenā raksturlieluma M_{max} un kontroles parametru — maksimuma indukciju vērtības iekšējā un ārējā pussajūga jūgos, $B_{max\ in}$ un $B_{max\ out}$, iegūšanai. Izstrādātā metodoloģija ietver rasējumu programmatūras *AutoCad* un magnētisko lauku modelēšanas programmatūras *QuicField (QF)* pielietošanu.

Ir pētīts arī reaktīvais CMS, kuram ir izstrādāta jauna, patentēta konstrukcija ar uzlabotiem rādītājiem — M_{max} 2 reizes un M_{max}/V aptuveni 9 reizes, salīdzinot ar analogiem (standarta konstrukcijas reaktīvajiem CMS ar jūgu ārējā pussajūgā) reaktīvajiem CMS.

Reaktīvajam CMS optimums ir nosakāms, izmantojot tikai izstrādāto aprēķina metodoloģiju, neizmantojot tālākas matemātiskas procedūras kā formulu sintēzi.

Izvēlētajās robežās definētajai mērķfunkcijai ir radīti pilnīgi jauni CMS konstrukcijas modeļi/formulas, no kurām ir izvēlētas visatbilstošākās. Modeļu pārbaudes pierāda to augsto precizitāti: mazāk par 5 % lielumam M_{max}/V un mazāk par 10 % parametriem B_{max} .

Ir analizēti optimizācijas algoritmi un izvēlēts optimizācijas programmrīks *SIMCA*. Optimizācijas process pierāda, ka M_{max}/S (maksimālais mehāniskais moments uz šķērsriezuma laukuma vienību) būtu daudz korektāks mērķfunkcijas lielums nekā ir M_{max}/V . Pirmais optimizācijas uzdevuma solis ir M_{max}/V maksimizācija pēc izvēlētajiem mainīgajiem (konstrukcijas parametriem), un, tā kā tika atrasti vairāki optimuma punkti, bija jāveic optimizācijas otrais solis (apakšuzdevums) — M_{max} maksimizēšana pēc viena, palikušā mainīgā (aksiālā garuma). Ir noteikts optimums un tas (ar $M_{max}/V = 172,27 \text{ Nm/m}^3$ un $M_{max} = 36,97 \text{ Nm}$) ir sekojošs: $\mu^* = 1,061$, $p = 5$, $\beta = 0,8$, $l = 75 \text{ mm}$, $h_{PM} = 8 \text{ mm}$ un $\delta = 2 \text{ mm}$.

Ja optimizētā CMS uzdevuma modeli samazina līdz sajūgiem ar PM, kas izgatavoti no vienkārša ferīta, optimuma punkts ar $M_{max}/V = 14,67 \text{ (Nm/m}^3)$ un $M_{max} = 3,09 \text{ (Nm)}$ ir sekojošs: $\mu^* = 1,344$, $p = 4$, $\beta = 0,8$, $l = 75 \text{ mm}$, $h_{PM} = 8 \text{ mm}$ un $\delta = 2 \text{ mm}$.

Veiktie pētījumi un aktīvā CMS optimizācija ļāva izstrādāt jaunu CMS optimizācijas metodoloģiju.

Pirmais eksperimentu kopums ir CMS (ar taisnstūrveida PM) momenta noteikšana. Pirmais eksperiments ir veikts ar metodi, kas balstās uz dinamometra darbības principu, un šī paša sajūga moments ir aprēķināts, modelējot tā magnētisko lauku programmatūrā *QF*. Rezultāti ir salīdzināti un pierāda, ka lietojumprogrammatūra var tikt izmantota mehāniskā momenta (un citu interesējošo parametru) noteikšanai, nepārsniedzot 6 % kļūdu. Līdz ar to izstrādātā aprēķina metodoloģija M_{max} un B_{max} noteikšanai ir korekta.

Otrais eksperimentu kopums ir CMS (ar liektiem PM) maksimālā momenta noteikšana. Pirmajā eksperimentā iegūtā maksimālā mehāniskā momenta vērtība ir salīdzināta ar vērtību, kas aprēķināta pēc sintezētā modeļa/formulas. Rezultāti pierāda, ka sintezēto matemātisko modeļu pielietošana M_{max} vērtības prognozēšanā ir efektīga, nesasniedzot 5 % relatīvo kļūdu.

Ir piedāvāta jauna optimizācijas metodoloģija CMS konstrukcijas parametru optimālās kombinācijas noteikšanai un tā ir sekojoša: sāk ar nepieciešamo fizikālo parametru, kas atkarībā no izvēlētajiem konstrukcijas parametriem, aprēķinu, modelējot magnētisko lauku; nākamais solis ir matemātisko modeļu/formulu sintēze (balstīta uz magnētiskā lauka aprēķinu rezultātiem), kas ļauj prognozēt tādas izvēlētos raksturlielumus kā M_{max} un M_{max}/S ; pēdējais solis ietver optimizācijas programmrīka izvēli un sajūga optimizāciju.

KOPSAVILKUMĀ IZMANTOTĀS LITERATŪRAS SARAKSTS

- [1] Committee on Materials Science and Engineering. Materials Science and Engineering for the 1990s: Maintaining Competitiveness in the Age of Materials. — Washington: National Academies Press, 1989. — 322 p.
- [2] Govaert, G. Data Analysis. — Oxford: Wiley ISTE, 2010. — 343 p.
- [3] Hair, J. F., Black, W. C., Babin, B. J., Anderson, R. E. Multivariate Data Analysis. 7th Edition. — New Jersey: Pearson Prentice Hall, 2009. — 816 p.
- [4] Onževs, O. Mehānisku svārstību sistēmu optimizācijas un identifikācijas aprēķinu automatizācija. Disertācija. — Rīga: RTU, 1997. — 164 lpp.
- [5] Ose, B., Pugachov, V. The influence of pole pair number and magnets' width on mechanical torque of magnetic coupler with rounded permanent magnets. *Scientific Journal of Riga Technical University, Power and Electrical Engineering*, 2011. — Volume 29, Issue 4. P.: 63.–66.
- [6] Ose, B., Pugachov, V., Orlova, S. The influence of PM's construction parameters in magnetic coupler on its mechanical torque. *Proceedings of the 6th International Conference on ECT: Electrical and Control Technologies*, 4–6 May, 2011. — Kaunas, Lithuania. P.: 226–230.
- [7] Ose, B., Pugachov, V., Orlova, S., Vanags, J. The influence of permanent magnets' width and number on the mechanical torque of a magnetic coupler with rectangular permanent magnets. *Proceedings of the IEEE ISIE: International Symposium on Industrial Electronics*, 27–30 June, 2011. — Gdansk, Poland. P.: 761.–765.
- [8] Ose-Zala, B., Pugachov, V. The Comparison of Active and Reactive Magnetic Couplers. *IEEE Proceedings of the 8th International Conference on PQ: Electric Power Quality and Supply Reliability*, 11–13 June, 2012. — Tartu, Estonia. P.: 25.–28.
- [9] Ose-Zala, B., Pugachov, V., Levin, N. Start-Up Torques of Permanent magnet Synchronous Generator With Non-Overlapping Concentrated Windings. *IEEE Proceedings of the 9th International Conference on PQ: Electric Power Quality and Supply Reliability*, 11–13 June, 2014. — Rakvere, Estonia. P.: 195.–198.
- [10] Pugačevs, V., Ivanovs, A., Tarancevs, B., Ose, B. Ūdens patēriņa skaitītājs: LV14434. — 17.08.2011.
- [11] Pugacevs, V., Ose-Zala, B., Zicans, J., Merijs Meri, R. Reactive magnetic coupler: EP2733835A2. The European Patent Office (France) — 21.05.2013.

- [12] Pugačevs, V., Ose-Zaļā, B., Zicāns, J., Merijs Meri, R. Reaktīvais magnētiskais sajūgs: LV14857. Latvia — 16.11.2012.
- [13] Ramalingam, K. K. Handbook of Mechanical Engineering Terms. — Delhi: New Age International, 2009. — 366 p.
- [14] Software *QuickField* for electromagnetic, thermal and stress analysis, homepage: <http://www.quickfield.com> (04.06.2014.)
- [15] Башта, Т. М., Руднев. С. С., Некрасов. Б. Б. Гидравлика, гидромашины и гидроприводы. — Москва: Машиностроение, 1982. — 424 с.
- [16] Бут, Д. А. Бесконтактные электрические машины. — Москва: Высшая школа, 1990. — 416 с.
- [17] Ганзбург, Л. Б., Федотов, А. И. Проектирование электромагнитных и магнитных механизмов: справочник. — Ленинград: Машиностроение, 1980. — 364 с.
- [18] Гольдберг, О. Д., Свириденко, И. С. Проектирование электрических машин. — Москва: Высшая школа, 2006. — 430 с.
- [19] Добротворский, В. В., Красильников, А. Я., Сухоростов, Л. Н. Герметичное оборудование с магнитными муфтами. *Химическое и нефтяное машиностроение*, 1994. — № 6. С.: 39.
- [20] Преображенский, А. А. Теория магнетизма, магнитные материалы и элементы. — Москва: Высшая школа, 1972. — 633 с.