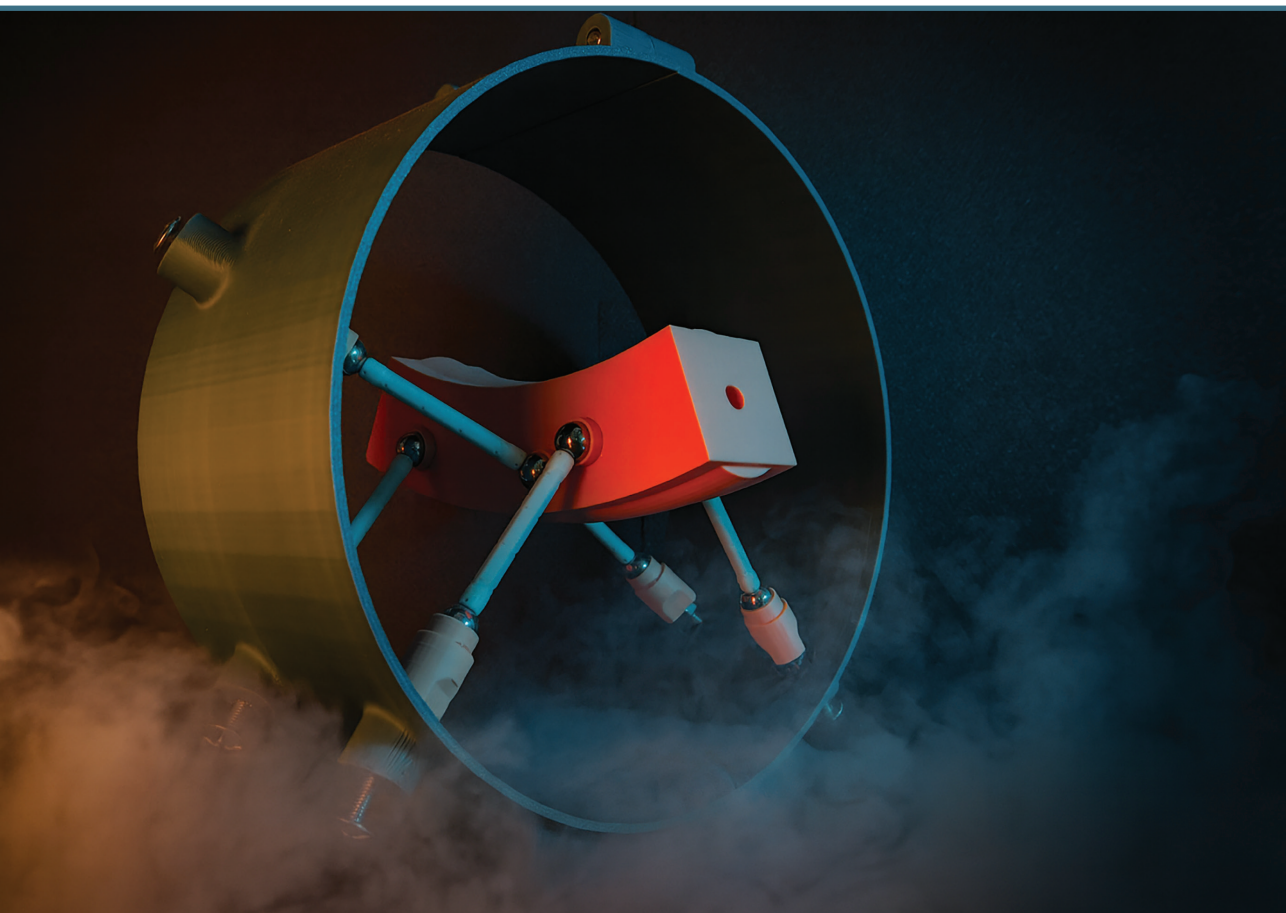


Luca Piacentini

**MEHĀNISKĀ PROJEKTĒŠANA UN OPTIMIZĀCIJA
KRIOGĒNO IERĪČU BALSTU SISTĒMAI MAINĪGU SLODŽU
APSTĀKĻOS: GADĪJUMA ANALĪZE PAR OGLEKĻA JONU
ROTĒJOŠU GANTRIJU MEDICĪNISKIEM PIELIETOJUMIEM**

Promocijas darba kopsavilkums



RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE

Dabaszinātņu un tehnoloģiju fakultāte
Daļiņu fizikas un paātrinātāju tehnoloģiju institūts

Luca Piacentini

Doktora studiju programmas “Daļiņu fizika un paātrinātāju tehnoloģijas” doktorants

MEHĀNISKĀ PROJEKTĒŠANA UN OPTIMIZĀCIJA KRIOĢĒNO IERĪČU BALSTU SISTĒMAI MAINĪGU SLODŽU APSTĀKĻOS:

GADĪJUMA ANALĪZE PAR OGLEKĻA JONU ROTĒJOŠU
GANTRIJU MEDICĪNISKIEM PIELIETOJUMIEM

Promocijas darba kopsavilkums

Zinātniskie vadītāji

Profesors *Dr. sc. ing.* TOMS TORIMS

Dr. sc. ing. LUCA DASSA

Profesors *Dr. sc. ing.* STEFANO UBERTI

RTU Izdevniecība
Rīga 2025

Piacentini L. Mehāniskā projektēšana un optimizācija kriogēno ierīču balstu sistēmai mainīgu slodžu apstākļos: gadījuma analīze par oglekļa jonu rotējošu gantrijs medicīniskiem pielietojumiem. Promocijas darba kopsavilkums. – Rīga: RTU Izdevniecība, 2025. – 49 lpp.

Publicēts saskaņā ar promocijas padomes “RTU-04” 2025. gada 4. jūlija lēmumu, protokols Nr. 04030-9.4/1.

PATEICĪBAS

Liels paldies maniem zinātniskajiem vadītājiem *Dr. Lukam Dasam*, profesoram *Tomam Torimam* un profesoram *Stefano Uberti*, kuri vadīja manu promocijas darba pētījumu, kas tika veikts *CERN* un Rīgas Tehniskajā universitātē! Esmu patiesi pateicīgs par viņu sniegtajam zināšanām un padomiem, kas man ir palīdzējuši augt ne tikai kā pētniekam, bet arī kā profesionālim un cilvēkam. Paldies arī *NIMMS* iniciatīvas vadītājam *CERN*, *Dr. Mauricio Vretenāram*, *IPPAT* locekļiem profesoram *Tomam Torimam*, asociētajam profesoram *Kārlim Dreimanim* un *Dr. Andrim Ratkus* par sniegto finansiālo atbalstu, kas ļāva man veikt pētījumu *CERN*. Sirsnīgs paldies arī *CERN EN-MME* grupai un Brešas Universitātei (*UNIBS*) par *Dr. Lukam Dasam* un profesoram *Stefano Umberti* doto iespēju vadīt manu promocijas darbu. Visbeidzot, paldies manai ģimenei un draugiem par viņu nelokāmo un neizsīkstošo atbalstu šajā četrus gadus ilgajā ceļojumā pāri visai Eiropai, neraugoties uz tūkstošiem kilometru, kas mūs bieži šķīra!

Vāka attēla autors *Luca Piacentini*.

<https://doi.org/10.7250/9789934372285>

ISBN 978-9934-37-228-5 (pdf)

PROMOCIJAS DARBS IZVIRZĪTS ZINĀTNES DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ

Promocijas darbs zinātnes doktora (*Ph. D.*) grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts
2025. gada 12. decembrī plkst. 11.00 *Zoom* tiešsaistē <https://rtucloud1.zoom.us/j/94276909347>.

OFICIĀLIE RECENZENTI

Dr. sc. ing. Olga Kononova,
Rīgas Tehniskā universitāte

Dr. sc. Alberto Degiovanni,
Rīgas Tehniskā universitāte

Dr. sc. Florent Cosandier,
Mikroinženierijas institūts, Šveice

Dr. sc. Eduardo Cano Pleite,
četru universitāšu alianse, Spānija

APSTIPRINĀJUMS

Apstiprinu, ka esmu izstrādājis šo promocijas dabu, kas izsniegts izskatīšanai Rīgas Tehniskajā universitātē zinātnes doktora (*Ph. D.*) grāda iegūšanai. Promocijas darbs zinātniskā grāda iegūšanai nav iesniegts nevienā citā universitātē.

Luca Piacentini (paraksts)

Datums:

Promocijas darbs ir uzrakstīts latviešu/angļu valodā, tajā ir ievads, 8 nodaļas, secinājumi, literatūras saraksts, 74 attēli, 39 tabulas, 4 pielikumi, kopā 169 lappuses, ieskaitot pielikumus. Literatūras sarakstā ir 114 nosaukumi.

Saturs

1. Promocijas darba struktūra	5
1.1. Promocijas darba vispārējais konteksts	5
1.2. Darba mērķi un uzdevumi	6
1.3. Darba tvērums	6
1.4. Aizstāvamās tēzes	6
1.5. Zinātniskā novitāte un praktiskā nozīme	7
1.6. Zinātniskā metodoloģija un izmantotie rīki	7
1.7. Publikāciju saraksts	8
1.8. Pētījuma rezultātu aprobācija	8
2. Literatūras analīze par kriegēno ierīču balstsistēmām	9
2.1. Literatūras analīzes metodoloģija	9
2.2. Diskusija	11
3. Pētniecības sistēma kriegēno ierīču balstsistēmu izstrādei	13
3.1. Promocijas darba konstrukcijas mērķi	13
3.2. Balstsistēmu optimizācijas pieeja	13
3.3. Balstsistēmu projektēšanas prasības	13
3.4. Slodžu gadījumi	14
3.5. Analītisko modeļu formulēšana	15
3.6. Salīdzinājuma analīzes kritēriji	15
3.7. Pētījumā izmantotie IT rīki	16
4. Galvenās analīzes un rezultāti	17
4.1. Balstiekārtas arhitektūras un piedāvātie materiāli	17
4.2. Koncentrētie parametru modeļiem	18
4.3. Koncentrēto parametru modeļu validācija	21
4.4. Optimizācija	26
4.5. Balstiekārtu projektēšana: rotējošā gantrijs gadījuma izpēte	28
4.6. Balstiekārtu salīdzinošā analīze rotējošā gantrijs gadījuma izpēte	34
Secinājumi	40

1. Promocijas darba struktūra

1.1. Promocijas darba vispārējais konteksts

Kriogēnās ierīces ir specializētas sistēmas, kas darbojas ārkārtīgi zemās temperatūrās, no 1,8 K līdz 125 K. Tās tiek izmantotas zinātniskajos pētījumos, rūpnieciskajā ražošanā un progresīvu tehnoloģiju lietojumā. Augstas enerģijas fizikas eksperimentos lielākā daļa daļiņu paātrinātāju komponentu ir kriogēnās ierīces. Citas lietošanas jomas ietver supravadītspējas ģeneratorus vēja turbīnām, satelītus, aerokosmisko tehniku un sabiedrisku lietojumu, piemēram, supravadītspējas magnētus noteiktu vēža ārstēšanas veidu nodrošināšanai.

Parasti visām kriogēnajām ierīcēm ir nepieciešama būtisku apakšsistēmu ieviešana;

- Dzesēšanas sistēma – uztur kriogēno temperatūru. Supravadītspējīgiem elementiem tās galvenais uzdevums ir uzturēt spoles materiālu supravadītspējīgā stāvoklī (parasti 1,9–5 K).
- Ārējais vakuuma trauks – izolē ierīci no apkārtējās vides, novēršot konvektīvo siltuma pārnei un ierobežojot piesārņojumu. Tas nodrošina arī zemu mitruma līmeni un minimālu piesārņojošo vielu klātbūtni ierīces iekšienē.
- Iekšējie balsti – notur ierīci pareizā pozīcijā un pretojas slodzēm darbības laikā.
- Termālais ekrāns – aptver kriogēno ierīci noteiktā attālumā, bloķējot tiešo starojumsiltuma pārnei ceļu no vakuuma trauka istabas temperatūrā uz auksto ierīci. Tas tiek aktīvi dzesēts līdz starptemperatūrai un bieži integrē termalizācijas posmus, kas sadala iekšējos balstus un darbojas kā siltuma slazdi, lai pārtvertu vadīto siltuma plūsmu.

Kriogēnās ierīces balstu sistēmas konstrukcijai ir jāizpilda četri galvenie uzdevumi;

- Nodrošināt ierīces funkcionalitāti, noturot to pareizā pozīcijā.
- Nodrošināt pietiekamu stingrību, lai samazinātu elastīgās deformācijas un precizitātes zudumu slodzes dēļ.
- Minimizēt siltuma plūsmu caur balstiem, tādējādi samazinot kriogēnās dzesēšanas sistēmas ekspluatācijas izmaksas.
- Nodrošināt kriogēnās ierīces izlīdzināšanu siltā stāvoklī pasīvās izlīdzināšanas fāzē un īpašos gadījumos arī nominālajās kriogēnajās temperatūrās, lai saglabātu augstāku pozīcijas precizitāti.

Zinātniskajos pētījumos un augsto tehnoloģiju lietojumos kriogēno ierīču veikspēja bieži ir tieši saistīta ar to pozicionēšanas precizitāti slodzes apstākļos. Literatūrā norādīts, ka lielākā daļa balstu konstrukciju ir paredzētas statiskām slodzēm, un pozicionēšanas kļūdas tiek labotas pasīvās izlīdzināšanas fāzē istabas temperatūrā pirms atdzišanas. Dinamiskās slodzes, piemēram, zemestrīces vai vibrācijas, reti tiek ņemtas vērā, un, ja tās tiek ņemtas vērā, tām parasti ir neliela ietekme uz balstu projektēšanu. Tomēr mainīgu slodžu gadījumā, kas izraisa nepārtrauktu aukstās masas pārvietošanos, pasīvā izlīdzināšana vairs nevar kompensēt pozīcijas kļūdas, tādēļ balstu stingrības un to izvietojuma izpēte ir ļoti svarīga.

Literatūras analīze atklāja šādus trūkumus: nav pietiekami dokumentētas zinātniskas informācijas par kriogēno ierīču balstu sistēmām, precīzu pozicionēšanu un mainīgām

slodzēm; reti sastopami formalizēti matemātiskie modeļi, kas analizē balstu iekšējās reakcijas kriogēnajās ierīcēs slodzes apstākļos; esošajiem modeļiem bieži trūkst vispārīgā, un tie balstās simetriskās balstu konfigurācijas pieņēmumā; nav atrasts neviens matemātiskais modelis, kas spētu prognozēt kriogēnās ierīces pārvietojumus slodzes apstākļos.

Gadījuma analīze par supravadietspējas C jonu rotējošu gantriju medicīniskiem lietojumiem pilnībā atbilst iepriekš minētajam zināšanu trūkumam un šajā darbā tiks izmantota kā piemērs modeļu izstrādei, ko iespējams izmantot arī citās jomās. Šajā darbā tiks pētītas tikai stieņu balstu sistēmas, jo tās ir visbiežāk izmantotās dokumentētajos statistisko slodžu gadījumos. Turklāt stieņu balstu sistēmas pārsvarā tiek pakļautas aksiālām slodzēm, samazinot nepieciešamību pēc lielākiem šķēsgriezumiem, kas būtu vajadzīgi, lai mazinātu spriegumus citu iekšējo spēku, piemēram, bīdes, dēļ.

1.2. Darba mērķi un uzdevumi

Šī darba mērķis ir izstrādāt jaunu metodi optimālai kriogēnās ierīces balstu sistēmas mehāniskajai projektēšanai mainīgu slodžu apstākļos.

Īpašais gadījums par supravadietspējas magnētiem uz rotējoša gantrija medicīniskiem lietojumiem kalpo kā gadījuma analīze, kur pirmo reizi tiks lietoti izstrādātie rīki ar mērķi sasniegt optimālu balstu sistēmas konstrukciju.

Lai sasniegtu šo mērķi, ir definēti vairāki uzdevumi.

1. Analizēt literatūru par esošajām kriogēno ierīču balstsistēmām, identificējot to raksturīgās iezīmes, izplatītas projektēšanas pieejas un izpētes virzienus, kas būtu tālākas izpētes vērti.
2. Piedāvāt dažādas balstsistēmu arhitektūras, lai nodrošinātu visaptverošu problēmas analīzi.
3. Definēt prasības un slodžu gadījumus balstsistēmai mainīgu slodžu apstākļos.
4. Izstrādāt vispārīgus matemātiskus modeļus balstsistēmu analīzei mainīgām slodzēm.
5. Noteikt atbilstošus kritērijus dažādu balstsistēmu risinājumu salīdzināšanai.
6. Izstrādāt un optimizēt katru balstsistēmu, izvēloties tās arhitektūru, materiālu un ģeometriju.
7. Novērtēt piedāvātos risinājumus atbilstoši iepriekš definētajiem kritērijiem.

1.3. Darba tvēruma

Promocijas darbā izstrādātie matemātiskie modeļi ir piemērojami balstiekārtām, kas sastāv no sešiem vai vairāk plāniem balstiem, ar jebkādu ģeometriju un izgatavotiem no jebkura materiāla, bet kuru galos ir lodveida vai universālie šarnīri, kas nepieļauj iekšējo spēku attīstību, izņemot aksiālo komponenti. Modeļi ir piemērojami balstiem, kuros iespējams termiskais gradients gar balsta garumu. Modeļu validācija veikta, salīdzinot prognozes ar rezultātiem no standarta galīgo elementu simulācijas programmatūras, nevis izmantojot eksperimentālus testēšanas kampaņu datus, jo pilna mēroga sistēmas izmaksas tiek lēstas ap diviem miljoniem Šveices franku, savukārt vienkāršota samazināta modeļa izmaksas ap 100,000 Šveices franku.

1.4. Aizstājamās tēzes

1. Ir iespējams formulēt matemātiskos modeļus, kas apraksta pozu (pozīciju un orientāciju) un iekšējās slodzes statistiski noteiktām (seši balsti) un statistiski nenoteiktām stieņu balstiekārtām (jebkurš balstu skaits, kas > 6) kriogēnajām iekārtām mainīgu ārējo slodžu apstākļos, un šie modeļi sniedz vienkāršu izpratni par sarežģītu sistēmu.

2. Matemātiskie modeļi nodrošina rezultātus, kas ir tikpat precīzi kā *FEA* (galīgo elementu analīze).
3. Modeļi ir skaitļošanas ziņā efektīvāki (lētāki) nekā *FEA*.
4. Izstrādātie rīki ir izmantojami optimāla supravadītāju magnētu balstiekārtas projektēšanai C jonu rotējošā gantrijs staru līnijai medicīniskam lietojumam.

1.5. Zinātniskā novitāte un praktiskā nozīme

Šī darba zinātniskā novitāte ir piedāvājumā par strukturētu un pilnīgu pieeju, lai izpētītu kriogēno ierīču atbalsta sistēmas, kas pakļautas mainīgām slodzēm gan virzienā, gan intensitātē ziņā, nodrošinot matemātiskos modeļus, kas ir vispārēji lietojami un var tikt lietoti daudzos veidos.

Hipotēzes ir šādas: formulējot matemātiskos modeļus gan statiski noteiktu, gan statiski nenoteiktu balstiekārtu analīzei, problēmas var tikt izpētītas visaptverošā veidā. Turklāt šādu modeļu izmantošana var samazināt plaši izmantotās *FEA* skaitļošanas izmaksas kriogēno iekārtu jomā. Šāds skaitļošanas izmaksu samazinājums var veicināt ar mašīnu palīdzību veiktas optimizācijas rutīnas, tādējādi uzlabojot balstiekārtu veiktspēju, kā arī ļaut veikt plaša mēroga jutīguma analīzes, novērtējot galveno parametru izmaiņu ietekmi uz sistēmas veiktspēju.

Minētās hipotēzes pierādīšana varētu būtiski ietekmēt hadronu terapijas tehnoloģiju, medicīniskās attēlveidošanas sistēmas un dažādas citas jomas, tostarp supravadoši vēja generatori, supravadošus radiofrekvenču dobumus, kriogēnās ierīces, piemēram, augstas enerģijas fizikas eksperimentālos aparātus un satelītu optiskās izlīdzināšanas sistēmas, veicinot sabiedrības attīstību.

1.6. Zinātniskā metodoloģija un izmantotie rīki

Literatūras apskatā kriogēno ierīču balstsistēmas tika analizētas, izmantojot padziļinātus meklējumus platformā *Google Scholar*. Tiek piedāvāta strukturēta pieeja balstsistēmu izpētei apstākļos ar lielām slodžu izmaiņām, īpašu uzmanību pievēršot supravadītāja magnētiem rotējošā iekārtā, vienlaikus nodrošinot vispārīgu lietojamību. Ietvarā, kas balstīts strukturālās mehānikas principos, tiek analizēti gan statiski noteikti, gan statiski nenoteikti risinājumi.

Lai mazinātu cilvēka subjektivitāti, salīdzinot dažādas sarežģītības pakāpes risinājumus (viens ar 16 brīvajiem parametriem, otrs ar sešiem), tiek izmantota ar *Wolfram Mathematica* izstrādāta automatizēta optimizācijas metode. Šī pieeja, kas balstīta matemātiskos modeļos, būtiski samazina aprēķinu izmaksas, salīdzinot ar *FEA*. Izvēlēti koncentrēto parametru modeļi (*LPM*), pateicoties to spējai aprakstīt sistēmas uzvedību ar minimālu būtisko parametru skaitu, tādējādi ievērojami uzlabojot optimizācijas efektivitāti.

LPM modelis statiski noteiktajam risinājumam ir pielāgots no esoša modeļa, kas izmantots paralēlajos mehānismos, savukārt modelis statiski nenoteiktajam risinājumam ir iegūts, izmantojot virtuālā darba principu. Abu risinājumu precizitāte ir salīdzināta (*benchmarking*) ar *Ansys® Workbench 2022 R2*, izmantojot *SolidWorks* veidotus 3D modeļus.

Salīdzināšanas kritēriji koncentrējas uz iekārtas funkcionalitāti, tostarp precizitātes zudumiem darbības laikā, siltuma plūsmu caur balstiem, jutīgumu pret ražošanas pielaidēm un sākotnējās deformācijas izmaiņām, drošības koeficientiem transportēšanas un apstrādes laikā, kā arī vibrācijas frekvencēm. Datu analīze un vizualizācija veikta, izmantojot *Wolfram Mathematica* un *Excel*.

1.7. Publikāciju saraksts

Ar promocijas darba tēmu saistītās publikācijas

1. **Piacentini, L.**, Dassa, L., Perini, D., Ratkus, A., Torims, T., & Uberti, S. (2025). Lumped Parameter Model for Structural Analysis of Over-Constrained Multi-Legged Parallel Mechanism Supporting System Applied to Cryogenic Devices. **Machines**, 13 (2).DOI:10.3390/machines13020129.
2. **Piacentini, L.**, Dassa, L., Perini, D., Ratkus, A., Torims, T., & Uberti, S. (2024). Design of a 6-supports exactly constrained supporting system for superconducting magnets and its application to rotating gantries for cancer therapy. **Meccanica** 59, 2203–2226.DOI:10.1007/s11012-024-01896-x
3. **Piacentini, L.**, Dassa, L., Perini, D., Ratkus, A., Torims, T., & Uberti, S. (2023). Literature Review of Suspension Systems for Superconducting Elements. **Machines**, 11, 929.DOI:10.3390/machines11100929
4. Pullia, M.G., Felcini, E., Benedetto, E. et al. (2024). Gantries for carbon ions. **Health Technology**. 14, 973–983.DOI:10.1007/s12553-024-00870-7

Visu publikāciju saraksts pieejams: [ResearchGate](#).

1.8. Pētījuma rezultātu aprobācija

Zinātniskās konferences

1. **IPAC. 2025.** Taipei. Stenda referāts: Layout optimization and comparison of a Carbon-ion gantry based on different mechanical structures. (Kopsavilkums pieņemts).
2. **ICEC. 2024.** Geneva. Stenda referāts: Cold Mass Suspension System of a Rotating Gantry for Medical Applications.saite uz indico vietni.
3. **CBC. 2024.** Tallin. Mutiska prezentācija: Design of a Supporting System for Superconducting Magnets and its application to Rotating Gantries for Cancer Therapy.saite uz indico vietni.
4. **CBC. 2023.** Riga. Stenda referāts: Mechanical design of the suspension system of superconducting elements subject to variable loads.saite uz indico vietni.
5. **CBC. 2022.** Vilnius. Mutiska prezentācija: Advancements of integration and mechanical design of gantries for ion-therapy.saite uz indico vietni.

Semināru un projektu sēdes

1. **CERN NIMMS. 2024.** Geneva. Projekta sanāksme. C-ions gantry mechanical design and integration.<https://indico.cern.ch/event/1487497/>.
2. **CERN EN-MEE. 2024.** Geneva. Studentu seminārs. Desing of a suspension system for a cold mass on a rotating gantry for medical applications.
3. **CERN MAPF. 2024.** Geneva. Projekta sanāksme. Mechanical integration of C-ion gantry.<https://indico.cern.ch/event/1346853/>.
4. **CERN EN-MEE. 2023.** Geneva. Studentu seminārs. Study on the suspension system of superconducting magnets for hadron therapy rotating gantries.
5. **CERN MAPF. 2023.** Geneva. Projekta sanāksme. Mechanical integration of C-ion gantry.<https://indico.cern.ch/event/1217564/>.

2. Literatūras analīze par kriogēno ierīču balstsistēmām

Supravadītāju materiāliem ir nepieciešamas ārkārtīgi zemas temperatūras, kas parasti ir robežās no 1,8–4,5 K, un, samazinoties temperatūrai, siltuma izvadīšana kļūst arvien dārgāka. Jebkāda saikne starp supravadītāja auksto masu un istabas temperatūras vidi izraisa siltuma pieplūdi, taču dažas no šīm saitēm, piemēram, balstsistēma, ir svarīgas ierīces darbībai. Šiem balstiem jānodrošina mehāniska izturība pret dažādām darbības slodzēm, vienlaikus maksimāli samazinot siltuma pārnesei. Tāpēc to projektēšana ietver kompromisu starp strukturālo izturību un termālo efektivitāti. Lai risinātu šo izaicinājumu, inženieri atkārtoti ir izstrādājuši lietotas ģeometrijas un materiālu dizaina shēmas. Šajā nodaļā tiek sniegts pārskats un to risinājumu klasifikācija.

2.1. Literatūras analīzes metodoloģija

Zinātnisko rakstu meklēšanai tika izmantota atvērto datu jeb *Open Access* datubāze, kas ir savienota ar *Google Scholar* pārliuku [1] Laika posms ir ierobežots līdz jaunākajiem rezultātiem, kas pieejami 2023. gada februārī.

Meklēšana tika precizēta, izmantojot šādus operatorus:

- operators *word* tiek izmantots, lai meklējumā iekļautu konkrētu vārdu vai frāzi;
- operatorus apaļajām iekavām (), *AND* un *OR* izmanto saskaņā ar Būla algebras principiem;
- operators “~” paver iespējas pārlūkam meklēt vārda sinonīmus;
- operators “-” izslēdz konkrētu vārdu no rezultātiem;
- operators *intitle*: liek pārlūkam atrast rezultātus, kuros noteiktais vārds ir iekļauts nosaukumā.

Lai atlasītu rezultātus, kuru balstsistēma ir rūpīgi analizēta, tika izmantots atslēgvārds “*FEA*”, ņemot vērā galīgo elementu analīzes nozīmi mehāniskajos pētījumos. Atslēgvārds “*superconducting*” noteica meklēšanas jomu supravadītāja tehnoloģijās. Termins “*cold mass*” izcēla interesi par vispārīgām aukstās masas balstsistēmām. Atslēgvārds “*mechanical*” filtrēja mehānisko analīzi, nevis vispārīgus fizikālus pētījumus. Termins “*support*” noteica meklēšanas lauku supravadītāju elementu balstiem, savukārt “*suspension*” tika izmantots kā balstu sinonīmu meklēšanai. Lai izslēgtu bieži atkārtojošos rakstus par diviem zināmākajiem fizikas eksperimentiem un vienu no slavenākajiem paātrinātājiem pasaulē, tika izslēgti “*ATLAS*”, “*CMS*” un “*LHC*”. Tomēr publikācijas, kas īpaši attiecas uz *LHC* balstsistēmām, tika pievienoti manuālas. Meklēšanas procesā tika atrasti 194 rezultāti, kas tika pārskatīti, pievēršot uzmanību balstsistēmu attēliem, to aprakstiem un *FEA* rezultātiem. Ja kādā rakstā trūka satura, tika apskatīti saistītie publikāciju avoti, lai iegūtu papildu informāciju.

Šīs literatūras analīzes mērķis bija izcelt šādas balstsistēmas īpašības.

- Arhitektūra, t. i., balstu izvietojums attiecībā pret supravadītāja korpusu.
- Balsta detaļas ģeometrija.
- Materiāli, kas tika izmantoti balsta detaļās.
- Atbalstītā objekta raksturlielumi, piemēram, tā masa un garums.
- Atdzesēšanas efekti, t. i., arhitektūras kinētiskā uzvedība, kad supravadītāja korpus iziet cauri termiskam ciklam.

- Iespēja pielāgot un pielāgošanas sistēmas klasifikācija.

Svarīgākie rezultāti ir atspoguļoti un padziļināti analizēti promocijas darba pamattekstā. **2.1. tabulā** apkopotas balstsistēmas, nākamajā apakšnodaļā apspriesti galvenie novērojumi.

2.1. tabula

Kopsavilkuma tabula par pētīto supravadošo elementu piekares sistēmu

Ats.	Projekts	Elements	Supravadītājs	Masa kg	Arhitektūra	Materiāls	Statuss ^a
[2], [3]	<i>SSRF</i>	magnēts	NbTi vads	160	8 joslas	<i>CFRP</i>	op.
[4]–[7]	<i>ESS</i>	rezonators	Nb lapas	210	8 stieni + 1 stabi ***	Ti-6Al-4V	const.
[8]–[10]	<i>HL-LHC</i>	rezonators	Nb monolīts	250	2 lāpstīņas + 1 stabi	SS 316L	dev.
[11]–[13]	<i>SPL</i>	rezonators	Nb monolīts		2 <i>ICS</i> + 1 stabi		ND
[6] [14]–[16]	<i>ESS</i> (spoke)	rezonators	Nb lapas		22 stieni + 2 stabi	Ti-6Al-4V	const.
[17]	<i>VECC</i>	magnēts	Bi-2223 vads		4 joslas	G10	op.
[18]	<i>CAS</i>	magnēts	YBCO lentes		8 pilāri	G10	dev.
[19]	<i>MDS (UT)</i>	magnēts	NbTi vads	520	4 stabi + 4 stieni	G11	dev.
[20], [21]	<i>HIE-ISOLDE</i>	rāmis	Cu lapas Nb pārklājums	850	2 stieni + 2 plates		op.
[22]	<i>IHEP</i>	magnēts		1400	8 joslas	T300 (<i>CFRP</i>)	op.
[23], [24]	<i>TLS</i>	magnēts	NbTi vads		8 joslas	<i>UFGE</i>	op.
[25]	<i>MICE</i>	magnēts	NbTi vads	1600	8 joslas	<i>UFGE</i>	op.
[26], [27]	<i>FAIR</i>	rāmis	NbTi vads		8 stieni	Ti-6Al-4V + AISI 304	const.
[28], [29]	<i>Mu2e</i>	magnēts	NbTi vads		3 atsperes + 14 stieni	Inconel® 718	const.
[30], [31]	<i>RHIC</i>	magnēts	NbTi vads	3605	3 stabi	Ultem® 2100 or SEI-GFN3 Noryl®	op.
[32]	<i>CAS</i>	magnēts		4000	8 joslas		res.
[33]	<i>ATLAS CS</i>	magnēts	NbTi vads	4700	24 pilāri	<i>GFRE</i>	op.
[34], [35]	<i>SSC</i>	magnēts	NbTi vads	7700	5 stabi	G11CR	atcelts
[36], [37]	<i>LCLS-II</i>	HE caurules	Nb lapas	8600	3 stabi	G10	op.
[38], [39]	<i>ITER</i>	padevējs		10,000	2 stabi	SS 316LN	const.
[40]–[43]	<i>LHC</i>	magnēts	NbTi vads	25,000	**3 stabi **	<i>GFRE</i>	op.
[44]–[46]	<i>ATLAS BT</i>	magnēts	NbTi vads	45,000	8 stieni + 32 pilāri	Ti 5Al 2.5 Sn <i>GFRE</i>	op.
[47]–[49]	NeuroSpin	magnēts	NbTi vads	132,000	8 stieni	Ti-6Al-4V	comm.
[50]–[52]	<i>ATLAS ECT</i>	magnēts	NbTi vads	160,000	20 stieni	nerūsējošais tērauds	op.
[53]	<i>CMS CS</i>	magnēts	NbTi vads	225,000	30 stieni	Ti 5Al 2.5Sn	op.

Tabulas turpinājums

Ats.	Projekts	Elements	Supravadītājs	Masa kg	Arhitektūra	Materiāls	Statuss ^a
[54], [55]	ITER	magnēts	Nb3Sn un NbTi	$23 \cdot 10^6$	18 vairāklāpstiņu	nerūsējošais tērauds	const.
[56]	DEMO	magnēts	Nb3Sn, NbTi un RE-123		16 vairāklāpstiņu	nerūsējošais tērauds	dev.

Galvenās īpašības ir uzskaitītas un klasificētas, izmantojot zem tabulas norādīto nomenklatūru. Rezultāti sakārtoti pēc aukstās masas pieaugošā svara. a: Statuss 2023. gada sākumā. Izstrāde stadijā (*dev.*), būvniecībā (*const.*), nodošanā ekspluatācijā (*comm.*), ekspluatācijā (*op.*) un tikai pētniecībai (*res.*). ** Dati par kriodipoliem, nevis par SSS. *** Balsts šajā gadījumā ir attēlots kā jaudas sakarnis, kas var slidēt vertikāli, bet ir fiksēts radiālajā virzienā.

2.2. Diskusija

Pētījumi par aukstās masas balstsistēmām ir radījuši vairāk nekā 20 dažādus lietojumus, tostarp paātrinātājrzonatorus, šupojošos magnētus, magnētiskā blīvuma atdalītājus, solenoidus, kvadrupolus, dipolus, padevējus, detektoru magnētus un MRI sistēmas. Balstāmo masu diapazons ir no 160 kg līdz $23 \cdot 10^6$ kg, ass griezumi no 0,3 līdz 25 m (2.1. tabulā).

Ir identificēti trīs galvenie balstsistēmu arhitektūras tipi.

- Vairāku stabu jeb “*multi-post*” arhitektūra, kas tiek izmantota slaidām, smagām konstrukcijām, piemēram, ciklotrona kriomagnētiem (*LHC, RHIC, SSC*), lai minimizētu vertikālo novirzi ar pēc iespējas mazākām vakuuma trauka penetrācijām.
- Astoņu balstu arhitektūra, kas galvenokārt piemērota vieglākām vai apjomīgākām konstrukcijām.
- Rezonatora jeb “*cavity*” arhitektūra, kas atbalsta rezonatorus, izmantojot *FPC* caurules sienu kā balstu kopā ar papildu pastiprinājumiem.

Pastāv arī specializēti risinājumi augsta liekuma solenoidiem (piemēram, *Mu2e*), pankūkas formas atdalītājiem un detektoru magnētiem.

Ir veikta atdzesēšanas uzvedības klasifikācija – daļā sistēmu tiek ieviests papildu spriegums, lai pēc atdzesēšanas nodrošinātu precīzu pozicionēšanu; citās tiek pieņemta asimetriska kontrakcija, lai mazinātu spriegumu. Optimizēta pieeja, kas ir manāma *FAIR* projektā, ietver materiālu un ģeometrijas pielāgošanu, lai sasniegtu simetrisku kontrakciju bez papildu sprieguma.

Balstu materiāli tiek iedalīti metāla (titāns, nerūsējošais tērauds, niķeļa–hroma sakausējumi) un kompozītmateriālu (stikla un oglekļa šķiedras pastiprināti polimēri) kategorijās, līdzsvarojot mehānisko izturību un termālo efektivitāti. Pastāv sakarība starp materiālu veidu un balsta formu – metāla stieņi dominē, savukārt dubultjoslas arhitektūras biežāk izmanto kompozītmateriālus, izņēmums ir *G11* stieņi *UT* magnētiskās blīvuma atdalītājā.

Ir identificēti divi atkārtoti sastopami pielāgojamības risinājumi, kas balstīti kļūdu ķēdes korekcijā.

- *SVI* (angļu val. *Suspension-to-Vacuum Interface*) – pielāgošana starp aukstās masas balstiem un vakuuma trauku.
- *VGI* (angļu val. *Vacuum-to-Ground Interface*) – pielāgošana starp vakuuma trauku un stingru pamatni.

Literatūrā aprakstītie risinājumi galvenokārt koncentrējās uz nominālajiem apstākļiem, lai kompensētu pašsvaru un elektromagnētiskos spēkus. Nenominālie scenāriji, piemēram, transportēšana, seismiski notikumi un magnēta dzēstās kļūmes, tiek izpētīti tikai no mehāniskās izturības viedokļa, nevis no sistēmas stingrības ierobežojumu apsvēršanas. Aukstās masas novirze no vēlamās pozīcijas tiek koriģēta montāžas laikā, atstājot stingrību neierobežotu.

Mainīgu slodžu gadījumos, piemēram, rotējošu gantriņu gadījumā, pilnīga pasīvā izlīdzināšana visās pozīcijās nav iespējama. Regulēšana vienā leņķī var negatīvi ietekmēt citus, un dizaina kompromiss no “siltuma zudumi pret mehāniskā izturība” pāriet uz kompromisu, kur arī jāņem vērā stingrības ierobežojumi. Tas rada nepieciešamību pēc jaunu arhitektūru izpēti, kas piemērotas rotējošām iekārtām. Lai gan esošos risinājumus varētu pielāgot, ir nepieciešama padziļināta analīze.

SVI sistēmas, kurās izmantoti divpusēji stiprinājumi, piemēram, stieņu gali un lodveida gultņi, ir labāk piemērotas rotējošiem lietojumiem. *VGI* sistēmas, kas izmanto vienpusējus stiprinājumus (piemēram, lodveida paplāksnes), prasa turpmākus izpēti un izstrādes darbus. *SVI* regulācijas pievienošana pēc montāžas atbalstītām konstrukcijām sarežģī kriotata montāžu un samazina regulēšanas sistēmas veikspēju (stingrību).

Atkarībā no mezglu un ķermeņu skaita un veida, struktūras var klasificēt kā statistiski noteiktas vai statistiski nenoteiktas. Statiski noteiktas sistēmas ir vieglāk automatizēt, jo kustības mezglos nerada iekšējo spriegumu. Savukārt statistiski nenoteiktās, kas ir pārāk sasaistītas) sistēmas, ir sarežģītāk automatizēt. Visas sistēmas, kas atrastas literatūrā, izņemot to, kas ir izmantota *ISOLDE*, ir statistiski nenoteiktas. Pat *ISOLDE* gadījumā motorizētie balststieņi ļauj regulēt tikai četras brīvības pakāpes, kas nozīmē, ka pilnīga automatizācija nav panākta. Tas pierāda, ka attiecībā uz pilnībā sasaistītām un automatizētām balstsistēmām, literatūrā ir skaidrs zināšanu trūkums, ko šajā darbā ir plānots risināt.

Literatūras apskats atklāja, ka trūkst risinājumu kriogēno ierīču balstsistēmām mainīgu slodžu apstākļos, jo īpaši medicīnas lietojumos, piemēram, iekārtisais balstiem. Lai gan statiskām slodzēm (piemēram, supravadītāju magnētiem un *RF* rezonatoriem) pastāv atkārtoti dizaina risinājumi, dinamiskiem lietojumiem piemēri nav atrasti. Turklāt lielākā daļa pētījumu balstās *FEA* un tiem trūkst formalizētas matemātiskās modelēšanas.

Konceptuāla pārnesamības analīze atklāj, ka pašreizējās sistēmas nav paredzētas lietošanai mainīgu slodžu apstākļos, norādot jaunus pētniecības virzienus. Starp tiem astoņu balstu arhitektūra šķiet daudzsolos kandidāts pārprojektēšanai kā statistiski nenoteikta sistēma, kas piemērota mainīgām slodzēm, piemēram, medicīnas balstu sistēmās. Vienlaikus nav atrasts neviens dokumentēts pētījums par statistiski noteiktu balstsistēmu ar pilnu sešu *DOF* regulēšanu, kas iezīmē pilnīgu zināšanu trūkumu šajā jomā.

Šo nepilnību novēršana var dot būtisku ieguldījumu hadronu terapijas iekārtu attīstībā, kā arī citās jomās, piemēram, supravadītāju generatoros vēja turbīnām, *RF* rezonatoros, kriogēnās izlīdzināšanas sistēmās augstas enerģijas fizikas eksperimentos un satelītos.

3. Pētniecības sistēma kriegēno ierīču balstsistēmu izstrādei

Literatūras analīze liecina, ka īpaši izstrādāts risinājums kriegēno ierīču balstiem mainīgu slodžu apstākļos nav pieejams. Turklāt šī joma nav pilnīga, jo nav atrasti statistiski noteikti risinājumi un tā pilnībā palaujas uz galīgo elementu analīzi (*FEA*) bez vispārējas matemātiskās formalizācijas.

Šajā nodaļā tiek apspriesta darbā lietotā strukturētā pieeja. Lai risinātu jomas nepilnības, sākotnēji tiek apskatīta izvēlētā stratēģija, pēc tam tiek izklāstīta optimizācijas pieeja, kas palīdz samazināt cilvēka subjektivitātes ietekmi risinājumu izvēlē. Tiek aprakstītas arī projektēšanas prasības un slodžu gadījumi rotējošajās iekārtas balstiem, kam seko matemātisko modeļu formulēšana, lai izveidotu formālu analītisku pamatu. Risinājumu novērtēšana tie ieviesti salīdzināšanas rādītāji, un, visbeidzot, tiek uzskaitīti šajā pētījumā izmantotie rīki.

3.1. Promocijas darba konstrukcijas mērķi

Strukturālajā mehānikā struktūras tiek klasificētas kā statistiski noteiktas vai statistiski nenoteiktas. Parasti statistiski nenoteiktas struktūras ir stingrākas un izturīgākas. Tomēr izmaiņas, piemēram, pārvietojumi, ko izraisa termiskā kontrakcija, parasti rada papildu spriegumus struktūrā.

2. nodaļas literatūras analīzē [57] tika aprakstītas nepilnības kriegēnas ierīces balstsistēmas projektēšanā, jo pamatā tiek analizētas statistiski nenoteiktas vai pārāk sasaistītas balstu arhitektūras. Daži literatūrā atrastie gadījumi ir novērtēti kā nepārnēsami uz pielietojumiem, kuros slodzes ir ļoti mainīgas. Lai visaptveroši izpētītu kriegēnas ierīces balstsistēmu mainīgu slodžu apstākļos, šī darbīsa 4. nodaļā tiks apskatīti gan statistiski noteikti, gan statistiski nenoteikti risinājumi, kā arī iespējamās arhitektūras.

3.2. Balstsistēmu optimizācijas pieeja

Optimizācijas pieejas izvēle ir atkarīga no konstrukcijas būtības, kā arī vēlamajām arhitektūras īpašībām. Statiski nenoteiktas sistēmas bieži izmanto simetriskus balstu izkārtojumus, kas vienkāršo brīvo parametru skaitu un līdz ar to arī optimizācijas procesu. Savukārt precīzi sasaistītām sistēmām var būt vairāk parametru, padarot optimizāciju sarežģītāku. Lai izvairītos no cilvēka subjektivitātes sistēmu salīdzināšanā ar atšķirīgu sarežģītības līmeni, šajā darbā tiks lietota datorā balstīta optimizācijas pieeja.

Optimizācija mehānikā parasti balstās divās metodēs: galīgo elementu analīzi (*FEA*), kas tiek izmantota sarežģītām konstrukcijām, un analītiskiem modeļiem, kas tiek izmantoti vienkāršākām ģeometrijām. *FEA* ietver sarežģītu ģeometriju sadalīšanu elementos un līdzsvara vienādojumu atrisināšanu, kur aprēķinu precizitāte ir atkarīga no režģa izmēra. Analītiskie modeļi ir ātrāki, jo tie iesaista mazāk ķermeņu, padarot tos īpaši piemērotus optimizācijai. Šajā darbā tiks pētīta optimizācija, izmantojot analītiskos modeļus.

3.3. Balstsistēmu projektēšanas prasības

Izvēloties balstītu datorizētu optimizāciju uz analītiskiem modeļiem, ir svarīgi analizēt minimālos parametrus, kas jāiekļauj šādos modeļos. Galvenās prasības balstsistēmas projektēšanai ir sarindotas un aprakstītas 3.1. tabulā, izmantojot balstus kā pētījuma

piemēru.

Projektēšanas prasībām ir piešķirts prioritātes līmenis, kas norāda, cik svarīga ir katras prasības izpilde. Ar katru prasību saistītie prioritātes līmeņi apkopoti **3.1. tabulā**.

3.1. tabula

Pamata prasības supravadošo elementu balstiekārtas projektēšanai uz rotējošās arkas

Kategorija	Prasība	Apraksts	Prioritāte
Funkcionalitāte	Precizitāte	Aukstās masas poza (pozīcija un orientācija), mērīta tās ģeometriskajā centrā, nedrīkst pārsniegt $\pm 0,6 \text{ mm } (3\sigma)$ vai $\pm 0,6 \text{ mrad } (3\sigma)$ visos sešos <i>DOF</i> (brīvības pakāpēm) pie jebkura arkas lenķa	augsta
	Izlīdzināšana	Balstiekārtai jāspēj korigēt aukstās masas ģeometriskā centra pozicionēšanas kļūdas līdz $\pm 20 \text{ mm}$ un $\pm 20 \text{ mrad}$ jebkurā virzienā	augsta
	Termiskā izolācija	Balstošajiem elementiem jāizolē aukstā masa no ārējās vides vadītajiem siltuma zudumiem, tos minimizējot	augsta
Mehāniskā integritāte	Mehāniskā izturība	Sistēmai jāiztur slodzes, kas rodas produkta dažādās fāzēs	augsta
	Vibrācijas	Balstiekārtas dabiskajām svārstību frekvencēm nevajadzētu sakrist ar paredzētiem ārējiem uzbudinājumiem	normāla
	Vides noturība	Komponentiem jādarbojas kriogēnās temperatūrās ($4,5 \text{ K}$) un radiācijas vidē	augsta
Ģeometrija	Kompaktums	Balstiekārtas platums nedrīkst pārsniegt $1,8 \text{ m}$	vēlams
	Vieglums	Kriostata masa nedrīkst pārsniegt $1,5 \text{ t}$	vēlams
Ražošana	Realizējamība	Jāizmanto standarta ražošanas tehnoloģijas un pēc iespējas komerciāli pieejamas detaļas	vēlams

3.4. Slodžu gadījumi

Balstsistēmai jānodrošina funkcionalitāte un strukturālā integritāte šādiem slodžu veidiem: nominālajām slodzēm gantrija darbības laikā, transportēšanas vai apstrādes slodzēm izgatavošanas un montāžas fāzēs, seismiskām slodzēm un avārijas slodzēm. Slodžu apraksts sniegts **3.2. tabulā**.

Šajā promocijas darbā nominālās slodzes tiek izmantotas sistēmas izmērus attiecībā pret nogurumu. Piemēram, līdzīgās lietojuma situācijās 10 gadu periodā ir reģistrēti apmēram 300000 balsta rotācijas cikli. Pieņemot, ka sistēmas kalpošanas laiks ir aptuveni 30 gadi, tiek prognozēts, ka balstsistēmas komponenti būs pakļauti aptuveni vienam miljonom ciklu. Pārējie slodžu gadījumi tiek izmantoti, lai pārbaudītu sistēmas izmēru izvēles atbilstību.

Sagaidāmie slodzes scenāriji aukstās masas balstsistēmai supravadītāja rotējošā portālā

Scenārijs	Apraksts
Nominālais	Ārējā mainīgā slodze, iepriekšējā pievilkšana un spriegumi, kas rodas atdzišanas laikā.
Transportēšana un apstrāde	Balstsistēma tiek pakļauta papildu paātrinājumiem katru reizi, kad kriostats tiek pārvietots starp vietām vai ar pacelšanas iekārtām.
Seismiskais	Balstsistēma tiek pakļauta papildu paātrinājumiem zemestrīces gadījumā.
Avārijas	Balstsistēma tiek pakļauta avārijas slodzēm supravadītāja izdzišanas (angļu val. <i>quench</i>) gadījumā.

3.5. Analītisko modeļu formulēšana

Kā minēts sadaļā par optimizācijas pieeju, galīgo elementu analīzes (*FEA*) izmantošana ir mazāk izdevīga, jo tā palielina aprēķinu izmaksas. Tāpēc priekšroka tiek dota analītisku risinājumu izstrādei. Turklāt šajā darbā izstrādātie matemātiskie modeļi var palīdzēt aizpildīt matemātiskās formalizāciju trūkumu šajā jomā. Šajā darbā formulētajiem analītiskajiem modeļiem ir jāietver visi nepieciešamie robežnosacījumi un slodzes, lai precīzi attēlotu reālos apstākļus un ļautu optimizēt balstsistēmas arhitektūru.

Kā ievades parametrus īpašos modeļos ir jāiekļauj:

- visu balstu telpiskais izvietojums;
- viena balsta elementa ģeometrija;
- balstu materiāls;
- darba temperatūra.

Minimālās izejas vērtības no modeļa ir balstu sprieguma stāvoklis, lai nodrošinātu mehānisko izturību, un kriogēnās ierīces pozīcija (e_x, e_y, e_z) un orientācija ($\theta_x, \theta_y, \theta_z$), lai nodrošinātu precizitātes prasību izpildi.

Lai analizētu dažādus slodzes gadījumus, modeļos jāiekļauj:

- vispārīgas slodzes ietekme, kas sastāv no spēkiem un spēka momentiem $\mathbf{F}_s = (F_x, F_y, F_z, M_x, M_y, M_z)$ kas darbojas uz kriogēno ierīci;
- kriogēnā ierīces atdzišanas vai uzsildīšanas fāzes ietekme;
- iepriekšējās deformācijas ietekme;
- izolācijas vakuuma ietekme.

Lai salīdzinātu abas arhitektūras, ir jāņem vērā gan vakuuma trauka stingrības, gan balstu stingrības ietekme. Tikai optimizācijas fāzei paredzētajos modeļos formulējums tiek vienkāršots, ņemot vērā tikai balstsistēmas kopējo ģeometriju un neņemot vērā vakuuma trauka ietekmi.

3.6. Salīdzinājuma analīzes kritēriji

Izvēlēta projektēšanas metodoloģija paredz, ka projektēšanas kandidāti tiek savstarpēji salīdzināti pēc vairākiem kritērijiem, kas ir balstīti galvenajās izceltajās prasībās. Tiek nodrošināta atbilstība strukturālās integritātes prasībām, izvēloties balstiem vienādu drošības koeficientu attiecībā uz nominālajām slodzēm.

Kvantitatīvie salīdzinājuma parametri attiecas uz:

- atbilstību funkcionalitātes prasībām, kas tiek vērtēta pēc maksimālās novirzes no kriogēnās ierīces nominālās pozīcijas. Novirze tiek salīdzināta visām sešām brīvības pakāpēm (*DOF*);
- atbilstība funkcionalitātes prasībām, kas novērtēta, pamatojoties uz siltuma plūsmu, kas tiek izvadīta caur balstiem no termiskā vairoga uz auksto masu, kas ir aptuveni 4,7 K;
- atbilstību strukturālās integritātes prasībām, kas tiek vērtēta pēc drošības koeficienta transportēšanas un apstrādes slodžu gadījumos;
- sistēmas jutīgumu pret izmaiņām ražošanas pielaidēs un sākotnējā deformācijā;
- sistēmas dabiskajām frekvencēm.

Citi kvalitatīvi faktori, kas ir saistīti ar izgatavošanas vienkāršību, izlīdzināšanas iespējām un iespējamu sistēmas automatizāciju.

3.7. Pētījumā izmantotie IT rīki

Pētījumā tika izmantoti šādi rīki:

- *Google scholar* literatūras analīzei;
- *Wolfram Mathematica*, analītisko modeļu risināšanai, aprēķiniem, optimizācijai, jutīguma analīzei, 3D attēlu un grafiku izveidei;
- *Solidworks* 3D modelēšanai;
- *Ansys® Workbench, 2022 R2 FEA* aprēķiniem validācijai un vibrāciju analīzei;
- *Microsoft Excel* salīdzināšanas tabulām.

4. Galvenās analīzes un rezultāti

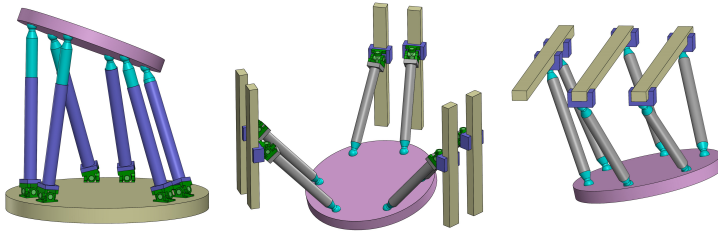
Šajā nodaļā sniegts pārskats par galvenajām analīzēm, kas aprakstītas pilnā promocijas darba teksta 4.–9. nodaļā, izceļot būtiskākos rezultātus.

4.1. Balstiekārtas arhitektūras un piedāvātie materiāli

Promocijas darbā salīdzinātas divas balstiekārtas konfigurācijas: statiski noteikta sistēma (“6S”) un statiski nenoteikta sistēma (“8S”). Šīs arhitektūras aptver visu iespējamo strukturālo risinājumu spektru.

“6S” arhitektūra ir iedvesmota no seškāju (angļu val. *hexapod*) kinemātiskā risinājuma, kas plaši izmantots robotikā (4.1. attēlā), un tās lietojums kriogēnajām ierīcēm nav atrasts literatūrā, tādēļ tā ir vērtā padziļinātai izpētei. Šajā konstrukcijā tiek izmantoti seši balsti, kas konfigurēti kā 6-PSU vai 6-PSS pilnībā paralēls mehānisms [58] (4.1. attēlā intuitīvai izpratnei par atšķirībām). Prizmatiskās (P) šarnīrsaites sistēmas silto galu daļā nodrošina vienas dimensijas kustību, ļaujot kontrolēt visas sešas *DOF* (brīvības pakāpēm). Sfēriskās (S) vai universālās (U) šarnīrsaites aukstajā galā nodrošina tikai aksiālu noslodzi, tādējādi samazinot iekšējos spēkus un ļaujot izmantot mazāku balstu šķēsgriezumu, lai samazinātu siltuma plūsmu.

Pamata izlīdzināšanas sistēma paredz manuālu regulēšanu silto galu daļā bez vakuuma, taču arhitektūra pieļauj arī automatizācijas ieviešanu nākotnē, kas būtu īpaši interesanta aktīvai izlīdzināšanai aukstajā stāvoklī.

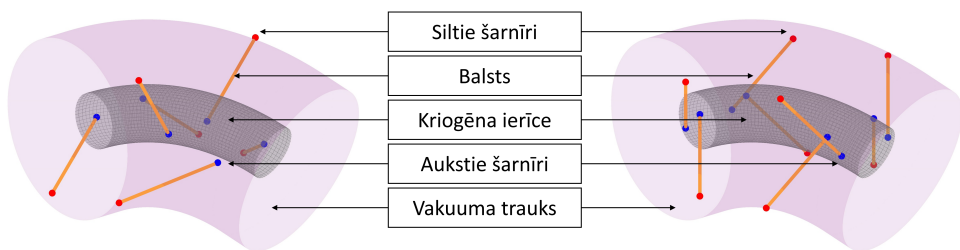


4.1. attēls. Biežāk sastopamās seškāju (angļu val. *hexapod*) arhitektūras robotikā. No kreisās: 6-UPS, 6-PUS, 6-PSS paralēlie mehānismi.

“8S” arhitektūra izmanto astoņu balstu konfigurāciju, kas tiek plaši lietota supravadošo elementu balstīšanai [2], [22], [23], [25], [26], [32], [47]. Šie balsti, kuru abos galos izmantotas sfēriskās vai universālās šarnīrsaites (4.2. attēlā), nodrošina tikai aksiālu iekšējo spēku pārnesei stiepos, kas samazina siltuma plūsmu.

“8S” arhitektūra ir laba kandidāte, pateicoties tās pašlīdzinošajai uzvedībai, kas panākta, simetriski izvietojot visus astoņus balstus. Lai auksto masu pareizi pozicionētu siltajā stāvoklī, katram siltajam savienojumam nepieciešama 3D pasīva izlīdzināšana, ko nodrošina ārēja pagaidu balstoša sistēma.

Citu balstiekārtas kandidātu izslēgšana, kā arī piemēroto geometriju un materiālu identificēšana balstiem ir plaši apskatīta promocijas darba pilnā teksta 4. nodaļā. Tiek apsvērti cauruļveida un dubultjoslas ovālās (“*race track*”) formas balsti. Apskatītie materiāli ir GFRE (stikla šķiedras pastiprināts epoksīds), austenītiska nerūsējošā tērauda sakausējums (SS 304L), titāna sakausējums (Ti-6Al-4V), CFRP (oglekļa šķiedras pastiprināts polimērs) un INVAR.



4.2. attēls. Vienkāršota 6S (kreisajā pusē) un 8S (labajā pusē) arhitektūras shēma ar kriogēno ierīci (pelēka), tās balstiem (oranži), aukstajiem un siltajiem šarnīriem (zili un sarkani), kā arī vakuuma kameru (rozā).

4.2. Koncentrētie parametru modeļiem

Pilnā promocijas darba 5. nodaļā prezentētie koncentrēto parametru modeļi (*LPM*), izstrādāti gan statistiski noteiktām sistēmām, gan statistiski nenoteiktām sistēmām, ietver būtiskos robežnosacījumus un slodzes, vienlaikus saglabājot līdzsvaru starp precizitāti un vienkāršību. Šie modeļi ļauj novērtēt kriogēnās ierīces pozu ($e_x, e_y, e_z, \theta_x, \theta_y, \theta_z$) un aksiālās iekšējās slodzes balstos.

Tiek identificēti un klasificēti galvenie mehānisko kļūdu avoti, kas ietekmē pozicionējumu, iedalot tos sistēmātiskos un nejaušos (4.1. tabulā). Sistēmātiskās kļūdas tālāk tiek iedalītas simetriskās un asimetriskās.

4.1. tabula

Mehānisko kļūdu avotu saraksts un klasifikācija, kas veicina aukstās masas pozas kļūdu darbības laikā

Daba	Raksturs	Apraksts
Sistēmātiska	Simetriska	Balsta elementu deformācija
		Galvenās struktūras deformācija
		Mehānisko savienojumu spraugas (<i>backlash</i>)
	Asimetriska	Vakuuma kameras deformācija aukstās masas svara dēļ
		Vakuuma kameras deformācija paša svara sadalījuma dēļ
		Vakuuma kameras deformācija diferenciālā spiediena dēļ
		Nobīdes atdzišanas procesa rezultātā

Nejaušās kļūdas, t. i., ražošanas pielaides, izlīdzināšanas un mērījumu precizitātes, tiek analizētas jutīguma pētījumā (4.6.1. apakšnodaļa), lai salīdzinātu piedāvātos risinājumus. Prasības, kas norādītas 3.1. tabulā, attiecas tikai uz sistēmātisko kļūdu budžetu.

4.2.1. Statiski noteikts koncentrēto parametru modelis 6S

Matemātiskais formālisms statistiski noteikta *LPM* gadījumā tiek veidots, modificējot apgrieztās pozīcijas kinemātiku (*IPK*) un tiešās pozīcijas kinemātiku (*DPK*) – divus matemātiskos rīkus no robotikas, īpaši paralēlajiem mehānismiem [58]. Šajā apakšnodaļā ir parādītas modifikācijas, kas veiktas *IPK* un *DPK* sešasu slīdplatforma (angļu val. *hexaglide*) [59] gadījumā, lai ņemtu vērā efektus, kas netika apsvērti sākotnējā modelī

(piemēram, atdzišana un vakuuma tvertnes deformācija).

Aukstās masas pozīcijas izmaiņas, ko rada balstu deformācija un termiskā saraušanās, tiek ieviestas *IPK* un *DPK* (parādītas promocijas darba pielikumos), modificējot balstu garumus L_i :

$$L_i = (L_{0_i} + \delta_s) \left(1 + \frac{F_{q_i}}{AE} \right) \quad (4.1)$$

kur L_{0_i} ir nespriegtais garums siltā stāvoklī, δ_s ir garuma samazinājums atdzišanas dēļ, E ir materiāla Junga modulis, un A ir balsta šķērsriezuma laukums. $\mathbf{F}_q$ ir spēku vektors uz piedziņas locītavām, kas aprēķināts no spēku līdzsvara ar ārējiem spēkiem $\mathbf{F}_s = \mathbf{J}^T \mathbf{F}_q$ ($\mathbf{J}$ ir ģeometriskā Jakobiana matrica [60]).

Vakuuma tvertnes deformācijas ieguldījums tiek ņemts vērā, modificējot *DPK*, aizstājot silto locītavas mērķpozīciju ${}^0\mathbf{H}_i$ *DPK* ar deformētu locītavu konfigurāciju ${}^2\mathbf{H}_i$, kas aprēķināta kā:

$${}^2\mathbf{H}_i = {}^2\mathbf{H}_{0_i} + \Delta_i + q_i \mathbf{h}_i \quad \text{ar} \quad \Delta_i = \Delta_{CM_i} + \Delta_{OW_i} + \Delta_{V_i} \quad (4.2)$$

kur indeksus “CM”, “OW” un “V” izmanto, lai atšķirtu nobīdes ieguldījumus, ko rada, attiecīgi, aukstās masas svars, pašas vakuuma tvertnes svars un diferenciālais spiediens. Tiek izmantota daļēji analītiska metode, kombinējot *FEA* mērījumus, lai noteiktu vakuuma tvertnes elastības tenzoros $\mathbf{D}_{CM}$ un $\mathbf{D}_{OW}$. Šī metode dod iespēju pārbaudīt vakuuma tvertnes ieguldījumu pozas kļūdā vispārējās ārējās slodzes gadījumā, veicot tikai sešas sākotnējās *FEA* (vienu analīzi katram balstam). Pastāvīgais spiediena ieguldījums Δ_{V_i} tiek tieši noteikts no *FEA*. Praktiskā procedūra, kā iegūt $\mathbf{D}_{CM}$ un $\mathbf{D}_{OW}$, ir skaidri aprakstīta promocijas darba 5. nodaļā un publicētajā rakstā [61].

Locītavu brīvķaitas ieguldījums tiek pievienots arī *DPK*, modificējot locītavu reālo pozīciju (${}^{2,1}\mathbf{M}_{r_i}$ vai ${}^2\mathbf{H}_{r_i}$):

$${}^{2,1}\mathbf{M}_{r_i} = \begin{cases} {}^{2,1}\mathbf{M}_{\text{nom}_i} - \frac{b_c}{2} \mathbf{w}_i & \text{if } F_{q_i} > 0 \\ {}^{2,1}\mathbf{M}_{\text{nom}_i} + \frac{b_c}{2} \mathbf{w}_i & \text{if } F_{q_i} < 0 \end{cases} \quad (4.3)$$

$${}^2\mathbf{H}_{r_i} = \begin{cases} {}^2\mathbf{H}_{\text{nom}_i} + \frac{b_h}{2} \mathbf{w}_i & \text{if } F_{q_i} > 0 \\ {}^2\mathbf{H}_{\text{nom}_i} - \frac{b_h}{2} \mathbf{w}_i & \text{if } F_{q_i} < 0 \end{cases} \quad (4.4)$$

kur ${}^{2,1}\mathbf{M}_{\text{nom}_i}$ un ${}^2\mathbf{H}_{\text{nom}_i}$ ir nominālās locītavas, b_c un b_h ir brīvķaitas (radiālā iekšējā sprauga) vērtības, attiecīgi, aukstajām un siltajām locītavām; $\mathbf{w}_i$ nosaka nominālā balsta elementa virzienu.

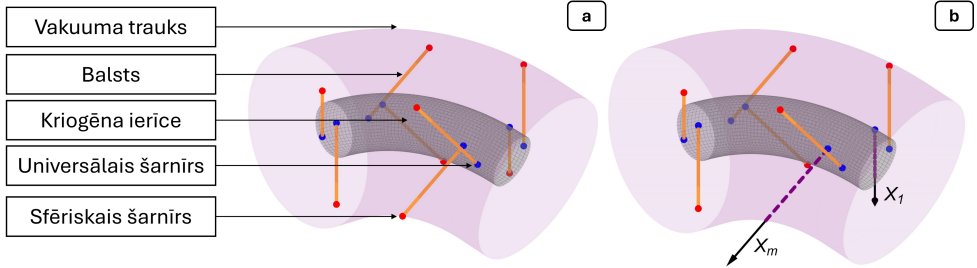
4.2.2. Statiski nenoteikts vispārīgs koncentrēto parametru modelis

Statiski nenoteiktām kriogēno ierīču balstiekārtām *DPK* lietošana nav iespējama, jo tā balstās ģeometriskā risinājumā. Savukārt risinājumam 6S izstrādātais *LPM* ietver balstu deformāciju vai saraušanās korekcijas, šīs korekcijas starp balstiem paliek savstarpēji neatkarīgas. Statiski noteiktā gadījumā visi ķermeņi uzvedas kā saīsinātas versijas, kas pārvietojas tikai kā cieti ķermeņi.

Savukārt statiski nenoteiktas sistēmas *LPM* gadījumā katra balsta spriegums un deformācija ir atkarīga no visu pārējo balstu stāvokļa. Tāpēc tiek izstrādāts vispārīgs modelis, kas balstīts enerģētiskā virtuālā darba principā [62], [63] un ir lietojams jebkurai konfigurācijai ar vairāk nekā sešiem savienojošajiem stieņiem ($n > 6$). Pilns matemātiskais atvasinājums ir apskatīts promocijas darba pilnajā versijā un publicēts darbā [64].

Virtuālā darba principa lietojums pārmērīgi ierobežotām (angļu val. *over-constrained*)

struktūrām prasa atrast saderīgu statistiski noteiktu struktūru, kurā pietiekams skaits ierobežojumu tiek aizstāts ar tādu pašu skaitu mainīgo. Tiek ieviesti kopumā $n - 6$ mainīgie X_m , lai novērstu $n - 6$ papildus ierobežojumus izveidojot saderīgu struktūru, kas redzama 4.3. attēlā.



4.3. attēls. **a)** Kriogēnā ierīce (pelēka), ko notur astoņi balsti (oranži), kas pievienoti tai ar universālajām šarnīrsaitēm (zilas) un pie vakuuma kameras (rozā) ar sfēriskajām šarnīrsaitēm (sarkanas). **b)** Saderīga statistiski noteikta struktūra ar pārslogojuma mainīgajiem $X_1, \dots, X_m$. Violeto krāsu attēloti balsti, kuros ierobežojumi ir aizstāti ar ierobežojumu mainīgajiem.

Virtuālā darba princips prasa atrast iekšējās spēkus $n - 5$ saderīgās struktūras gadījumos, kā tas skaidrots turpmākajā sarakstā.

- Viena saderīga struktūra, kurā tiek lietotas tikai ārējās slodzes, lai aprēķinātu $\mathbf{N}_0$: vektoru, kas satur iekšējās slodzes katrā balstā.
- $n-6$ saderīgas struktūras, kurās ierobežojumu mainīgie X_m tiek piemēroti pa vienam kā vienības slodzes, lai aprēķinātu $\mathbf{N}_{X_m}$: vektoru, kas satur iekšējās slodzes katrā balstā.

Jāizveido $n - 6$ vienādojumu sistēma, lai aprēķinātu visus $n - 6$ ierobežojumu mainīgos X_m , katram vienādojumam esot (4.5.) vienādojuma formā.

$$\sum_{i=1}^n \int_0^{L_i} N_{X_{mi}} \left(\frac{N_{0i} + \sum_{p=1}^{n-6} X_p N_{X_{pi}}}{E_i A_i} + \frac{\delta_i}{L_i} - \frac{\delta_{P_i}}{L_i} \right) ds = \mathcal{W}_{\text{ext}_{X_m}} \quad (4.5)$$

Šeit δ un δ_P , attiecīgi, ietver ieguldījumus no termiskās diferenciālās saraušanās/paplašināšanās un iepriekšējās pievilkšanas (*preload*) garuma korekcijas izteiksmē. Turklāt katru balstu raksturo unikāls garums L_i , šķērsriezuma laukums A_i un materiāla Junga modulis E_i .

Termiskā diferenciālā saraušanās/paplašināšanās, aksiālās slodzes pārslogojuma maiņīgo dēļ $N_{X_{mi}}$, ārējās slodzes N_{0i} un ārējo reakciju paveiktā darba ieguldījums $\mathcal{W}_{\text{ext}_{X_m}}$ (kas atkarīgs no siltā šarnīra nobīdes Δ_i , piemēram, vakuuma kameras deformācijas rezultātā) tiek formāli definēti promocijas darba 5. nodaļā.

Kad visi X_m ir aprēķināti, virtuālā darba princips tiek atkārtoti lietots, lai noteiktu kriogēnās ierīces pozu (pozīciju un orientāciju) $\mathbf{e} = (e_x, e_y, e_z, \theta_x, \theta_y, \theta_z)$, atrisinot sešus neatkarīgus vienādojumus (4.6.) vienādojuma formā. Katram vienādojumam nepieciešams aprēķināt iekšējās slodzes $\mathbf{N}_j$ katrā balstā, kad saderīgajai struktūrai tiek lietota vienības spēka vai griezes slodze.

$$\sum_{i=1}^n \int_0^{L_i} N_{ji} \left(\frac{N_{0i} + \sum_{p=1}^{n-6} X_p N_{X_{pi}}}{E_i A_i} + \frac{\delta_i}{L_i} - \frac{\delta_{P_i}}{L_i} \right) ds = \mathbf{d} \cdot \mathbf{N}_j + e_j = \mathcal{W}_{\text{ext}_j} \quad (4.6)$$

Šeit iekšējās slodzes $\mathbf{N}_j$ un nobīdes $\mathbf{d}$ ir formāli definētas pilnā promocijas darba versijā.

4.3. Koncentrēto parametru modeļu validācija

4.2. nodaļa izstrādātie modeļi ir validēti, salīdzinot to rezultātus ar termo mehāniskajām simulācijām, kas iegūtas, izmantojot plaši lietotu *FEA* programmatūru (*Ansys® Workbench, 2022 R2*). Abu šajā darbā izstrādāto modeļu validācija ir veikta atsevišķi, un tā ir aprakstīta promocijas darba 6. nodaļā.

LPM validācija vispirms tiek veikta vispārējai statistiski nenoteiktas sistēmas balstu konfigurācijai, izmantojot astoņu un 11 balstu ģeometrijas.

6S *LPM* validācija tiek veikta rotējošā gantrijs gadījuma izpētē. Sākotnējais etalons novērtē gravitācijas, sākotnējās noslodzes, temperatūras un spiediena ietekmi uz magnēta pozu rotējošā gantrijs rotācijas laikā, kam seko otrais etalons, kas validē modeļa pieeju brīvīgaitas ietekmes aprēķinam.

8S *LPM* validācija rotējošā gantrijs gadījuma izpētes gadījumā tiek veikta ar tādu pašu metodoloģiju kā 6S gadījumā.

4.3.1. Vispārējā validācijas metodoloģija

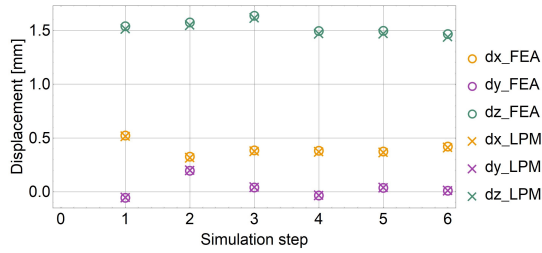
Tika veiktas vairākas lineāras stacionāras termo mehāniskās *FEA* simulācijas. Galvenie simulācijas parametri ir sniegti turpmākajos punktos, savukārt konkrētie pieņēmumi katram gadījumam apskatīti tikai pilnajā promocijas darba versijā.

- **Ģeometrija.** Vispārīgā statistiski nenoteiktas sistēmas modeļa simulācijās tiek izmantota, attiecīgi, vispārīga asimetriska astoņu un 11 balstu konfigurācija. 6S un 8S rotējošā gantrijs risinājumu validācijā tiek izmantota optimizētā ģeometrija no vēlinā posma procedūrām (**4.4. nodaļa**), kas ir saistīta ar pirmo auksto masu rotējošā gantrijs pārnesei līnijā. Katrs balsts pie vakuuma tvertnes ir piestiprināts ar lodveida locītavu, bet pie aukstās masas – ar universālo locītavu. Validācijai netiek piemērota termalizācija, lai sadalītu balstus.
- **Materiāls.** Balsta elementu tērauda materiāla īpašības definētas, izmantojot no temperatūras atkarīgo lineārās izplešanās koeficientu un siltumvadītspēju nerūsējošajam tēraudam 304 [65].
- **Mijiedarbība.** Balstu un vakuuma kameras vai aukstās masas savienojumi tiek modelēti kā sfēriskie šarnīri un bukses (vispārīgs *Ansys* šarnīra modelis, definēts ar stinguma parametriem). Universālais šarnīris tiek modelēts ar buksēm, definējot brīvo grādu stingrību, kas nosaka bloķējamās brīvības pakāpes mezglos.
- **Slodzes.** Pirmajā solī tiek simulēta aukstās masas uzvedība atdzišanas laikā, pazeminot tās temperatūru no 22 °C līdz –268 °C, nepiemērojot papildu slodzes. Iepriekšējā pievilkšana (“*pre-load*”) un vakuuma spiediens tiek piemēroti nākamajos soļos. Ārējā slodze tiek ieviesta vēlāk vai nu reprezentējot magnēta svaru ar gantrijs saistītajās pārbaudēs, vai vispārēju slodzi *LPM* validācijā **4.3.2. apakšnodaļa**.

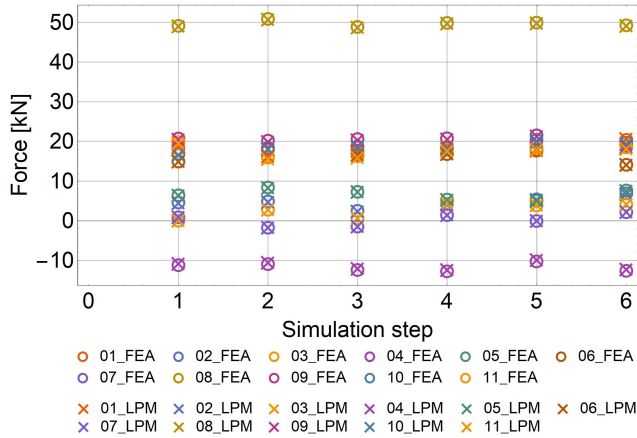
4.3.2. Vispārīga pārslogotas koncentrēto parametru modeļa validācija

Šī etalontestēšanas ģeometrija 11 balstu konfigurācijai ir ģenerēta nejauši, lai pierādītu, ka izstrādāto matemātisko modeli var pielāgot arī asimetriskām konfigurācijām. Astoņu balstu konfigurācija ir tā pati kā 11 balstu gadījumā, tikai ar trim noņemtiem balstiem.

Atbilstība ar *LPM* redzama **4.4. attēlā**. Detalizētas tabulas ar visu pozu komponentu vērtībām atrodamas pilnajā teksta versijā. Lai gan dažos atsevišķos gadījumos parādās lieli kļūdu lielumi, visu kļūdu mediāna ir tikai aptuveni 0.6 % un 1.4 %, attiecīgi, astoņu



4.4. attēls. Pozas (pārvietojuma un rotācijas) salīdzinājums starp auksto masu *LPM* (krusts) un *FEA* (aplis). Pilns attēls abiem – 8 un 11 balstu gadījumiem – pieejams pilnajā tekstā.



4.5. attēls. Slodzes salīdzinājums uz katra balsta starp *LPM* (krusts) un *FEA* (aplis). Pilns attēls abiem – 8 un 11 balstu gadījumiem – pieejams pilnajā tekstā.

un 11 balstu gadījumu izpētē, kas pozas ziņā apstiprina ļoti labu izstrādātā modeļa atbilstību *FEA* rezultātiem. Precizitāte nedaudz samazinās modelim ar 11 balstiem, taču tā joprojām ir pietiekama, lai izmantotu optimizācijas procesos, dažādu materiālu un izmēru risinājumu salīdzināšanai, kā arī jutīguma analizē.

Iekšējo aksiālo slodžu vērtības uz katra balsta katrā *FEA* simulētajā slodzes gadījumā ir parādītas tabulās promocijas darba 6. nodaļā. Mediānās relatīvās kļūdas ir aptuveni 1.1 % un 1.4 %, attiecīgi, astoņu un vienpadsmit balstu gadījumu izpētē. Tas kvantitatīvi apstiprina ļoti labu modeļa atbilstību *FEA* rezultātiem. Lai gan precizitāte nedaudz samazinās, pieaugot stieņu skaitam, modeli joprojām var uzskatīt par uzticamu.

Validācija parāda modeļa spēju pareizi novērtēt tāds būtiskus lielumus kā slodzes un objektu pozīcijas vispārīgā gadījumā. Tā apstiprina modeļa efektivitāti šo lielum prognozēšanā pat ļoti asimetrisku balstu konfigurāciju gadījumā.

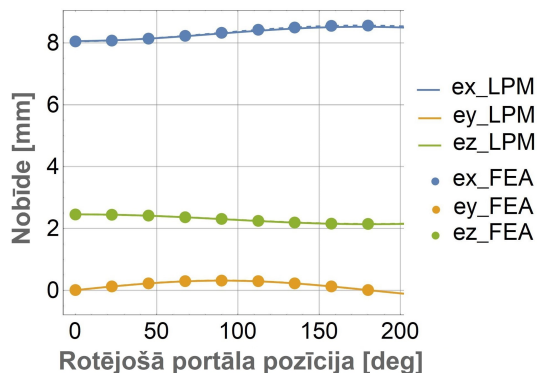
Pilnā promocijas darba tekstā ir sniegta informācija par skaitļošanas veikspēju un sistēmas detaļām, lai nodrošinātu rezultātu atkārtojamību. Gan *LPM*, gan *FEA* simulācijas tika veiktas uz vienas un tās pašas iekārtas, izmantojot attiecīgi *Wolfram Mathematica* un *Ansys*. *LPM* nodrošina 20 reizes lielāku ātrdarbību nekā plaši lietotā *FEA* programmatūra.

Kamēr viena *FEA* simulācija aizņem 25 sekundes, kas izolētos gadījumos var likt *LPM* izmantot lieki, tā efektivitāte ievērojami uzlabo optimizācijas algoritmu darbu.

Piemēram, analizējot 100 000 konfigurācijas 11 balstu sistēmai, ar *LPM* tas aizņemtu 1,4 dienas, salīdzinot ar 29 dienām, ja izmantotu *FEA*. Turklāt matemātiskais modelis kalpo kā vērtīgs rīks *FEA* rezultātu pārbaudei, kas ir ļoti jutīga pret simulācijas iestatījumiem un robežnosacījumiem.

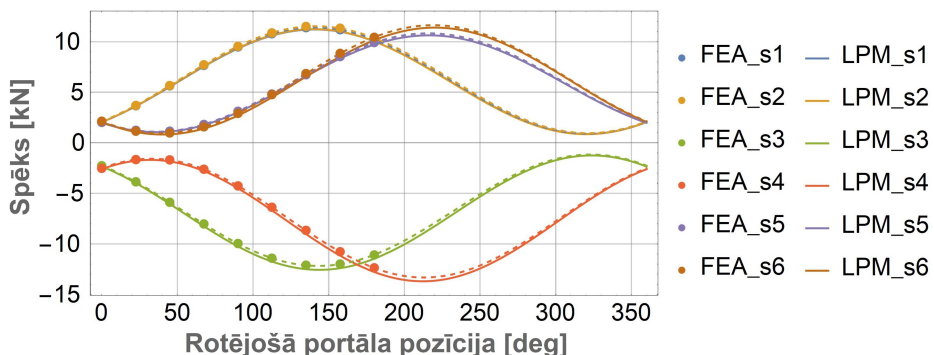
4.3.3. Koncentrēto parametru modeļa 6S validācija rotējošā gantriņa gadījuma izpētē

6S *LPM* modeļa validācijas rezultāti rotējošā gantriņa gadījuma izpētē redzami 4.6. attēlā, kur attēlots pozas salīdzinājums, un 4.7. attēlā, kur attēlotas aksiālās slodzes balstos. Tika konstatēta ļoti laba korelācija starp *LPM* un *FEA* rezultātiem. Tabulas ar attēlos redzajiem skaitliskajiem datiem ir pieejamas pilnajā promocijas darbā.



4.6. attēls. Pozas ($e_x, e_y, e_z, \theta_x, \theta_y, \theta_z$) izmaiņas rotējošā gantriņa rotācijas laikā, aprēķinātas ar *LPM* (nepārtrauktas līnijas) un ar *FEA* simulācijām (punkti un punktotas līnijas). Rotācijas rezultāti parādīti pilnajā disertācijas versijā.

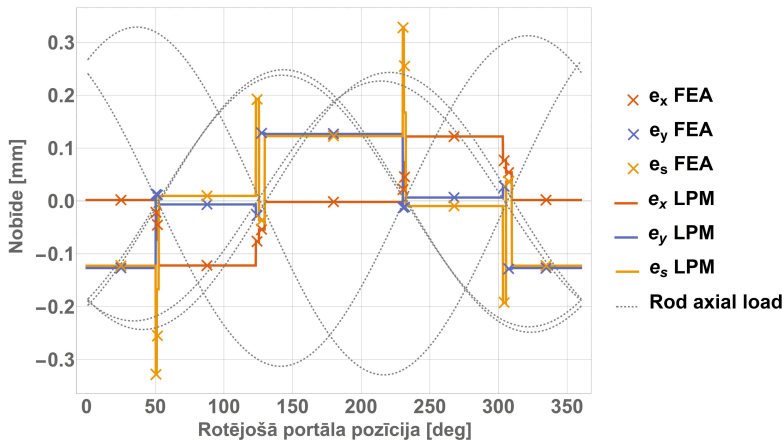
Kopumā absolūtās novirzes ir vismaz par vienu kārtu mazākas nekā lietojumam nepieciešamā precizitāte. Tādējādi modelis ir pilnībā piemērots salīdzinošiem pētījumiem, optimizācijas un jutīguma analizēm. Izlīdzināšanas kampaņām bez papildu eksperimentālās testēšanas modeļi tiek uzskatīti par vismaz tikpat precīziem kā *FEA*, lai noteiktu sākotnējās vērtības izlīdzināšanai.



4.7. attēls. Iekšējās slodzes visos sešos 6S risinājuma balstos: *LPM* rezultāti (nepārtrauktas līnijas), *FEA* rezultāti (punkti), *FEA* pielāgotās līknes (punktotas līnijas).

Papildu strukturālās mehānikas *FEA* simulācijas ir veiktas, lai validētu 6S *LPM* izstrādāto spraugas (“backlash”) efektu. Sprauga sfēriskajos šarnīros tika modelēta, ieviešot trīs gareniskas atsperes (pa vienai katram translatīvajam *DOF*) starp stieņa gala gultni un stieņa gala korpusu.

FEA simulāciju rezultāti, kas paredzēti spraugas uzvedības validēšanai, redzami 4.8. attēlā. Nelielas neatbilstības starp *LPM* un *FEA* tika konstatētas ap 50° un 230° , kas ir punkti, kuros reakcijas spēks vienā no balstiem kļūst gandrīz nulle (plašāk apskatīts pilnajā promocijas darbā). Tādēļ tieši šajā intervālā nelineārās atsperes izstiepjas mazāk par spraugas vērtību, izraisot mazāk uzticamus rezultātus no *FEA* puses. Noslēgumā var secināt, ka *DPK* korekcijas, kas ieviestas *LPM*, efektīvi ļauj novērtēt aukstās masas pozu rotējošā gantriņa rotācijas laikā arī gadījumā, ja šarnīros ir spraugas.



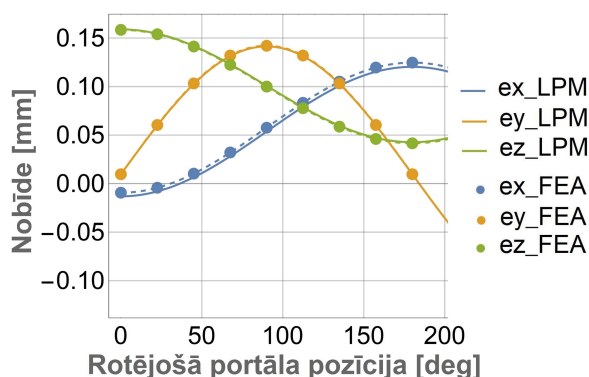
4.8. attēls. Pozīcijas un orientācijas kļūdas spraugas (backlash) dēļ. Nepārtrauktās līnijas attēlo rezultātus, kas aprēķināti ar *LPM*, punkti – strukturālās *FEA* simulācijās iegūtās vērtības. Rotācijas rezultāti parādīti pilnajā disertācijas versijā.

4.3.4. 8S koncentrēto parametru modeļa validācija rotējošā gantriņa gadījuma izpētē

Ierobežotām balstiekārtām izstrādātais *LPM* ir pielāgots rotējošā gantriņa gadījuma izpētei. Šis salīdzinājuma pētījums seko tai pašai metodoloģijai, kas izmantota 4.3.3. apakšnodaļā. Izmantotie materiāli, lietotās slodzes un modeļa robežnosacījumi ir detalizēti aprakstīti pilnajā promocijas darbā.

Pozas un aksiālo iekšējo slodžu rezultāti dažādām rotējošā gantriņa pozīcijām redzami 4.9. attēlā un 4.10. attēlā, kur punkti attēlo *FEA* rezultātus. Absolūtās novirzes starp abiem modeļiem ir ievērojami mazākas nekā parasti pieļaujamais precizitātes diapazons šāda veida iekārtām (3.1. tabulā).

Vidējā spēka atšķirība sliktākajā gadījumā ir 0,73 kN starp *LPM* un *FEA*, kas veido aptuveni 0.83 % no *FEA* rezultātos iegūtās vidējās spēka vērtības 87 kN. Spēka amplitūdas atšķirības sliktākajā gadījumā ir 24,6 N jeb relatīvi 0.77 %. Šie rādītāji apstiprina *LPM* modeļa labu precizitāti spēku prognozēšanā ierobežotai arhitektūrai salīdzinājumā ar standarta simulācijas metodēm. Ņemot vērā pierādīto precizitāti gan ierīces pozas, gan balstu slodžu novērtēšanā, izstrādātos modeļus var uzskatīt par piemērojamiem ierobežotās sistēmas gadījuma izpētei.

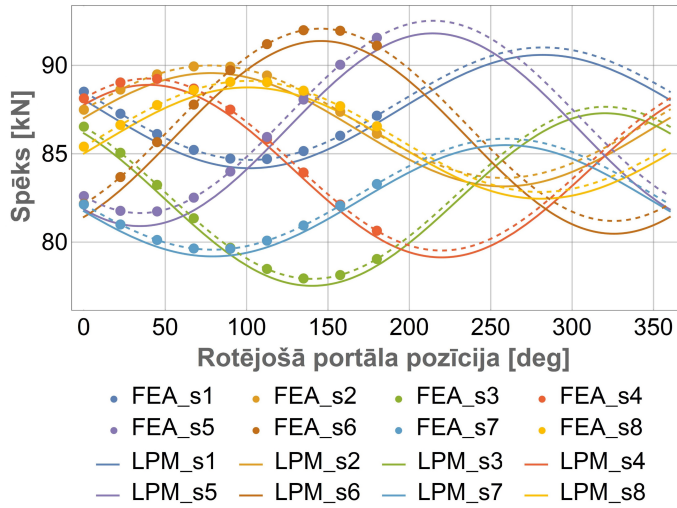


4.9. attēls. Aukstās masas pozas (nobīdes un rotācijas) salīdzinājums starp *LPM* (nepārtrauktas līnijas) un *FEA* (punkti). Rotācijas rezultāti parādīti pilnajā disertācijas versijā.

4.3.5. Secinājumi par validāciju

Noslēgumā jāatzīmē, ka statistiski noteikta sistēmas un statistiski nenoteikta sistēmas balstu sistēmu modeļi ir validēti, salīdzinot tos ar *Ansys* 2022 rezultātiem. Rezultāti rāda, ka izstrādātie modeļi ir labā atbilstībā ar *FEA* rezultātiem. Svarīgs sasniegums validācijas procesā ir bijusi vispārējās *LPM* formulācijas validācija – modeļa, ko var izmantot balstu sistēmām ar daudziem balsta stieņiem (≥ 6), kas izkārtoti konfigurācijā, kas ne vienmēr ir simetriska, un katra stieņa izmēri un materiāls var būt atšķirīgi. Šajos pētījumos tika novērtēta *FEA* un izstrādātās *LPM* atbilstība attiecīgi 99.4 % un 98.6 % (aprēķināta, balstoties astoņu un 11 balstu konfigurāciju simulācijās). Izstrādātais kods, kura pamatā ir *LPM*, skaitļošanas laikā bija aptuveni 20 reizes ātrāks par *FEA*, kā parādīts promocijas darba 6.2. nodaļā. Turklāt izstrādātās *LPM* izmantošana, kam nepieciešams ievērojami mazāk parametru simulācijas iestatīšanai nekā *FEA*, ļauj iegūt dziļāku ieskatu sarežģītas sistēmas mehāniskajā reakcijā, sniedzot projektētājiem un analītiķiem skaidrāku priekšstatu par rezultātu un būtiskāko ievades lielumu savstarpējām attiecībām. Savukārt *FEA*, kas balstās lielā skaitā opciju un ievades parametru, prasa plašus pētījumus, lai kartētu attiecības starp būtiskākajiem ievades un izvades lielumiem, un ir ļoti atkarīga no lietotāja pieredzes un daudzo opciju pareiziem iestatījumiem. Visi iepriekš minētie rezultāti padara izstrādāto modeli interesantu arī citiem kriogēniem lietojumiem, kas atšķiras no šajā darbā pētītās medicīniskās lietošanas, piemēram, radiofrekvences supravadošajiem dobumiem, optiskajām pozicionēšanas sistēmām aukstumā, satelītiem, supravadošiem ģeneratoriem vai motoriem.

Modeļi saskan ar *FEA* rezultātiem ar precizitāti 97 % un 98.5 %, attiecīgi, 6S un 8S rotējošā gantrijs risinājumiem. Kopumā pat gadījumos, kad relatīvā atbilstība ir augstāka par vidējo vērtību, absolūtā atbilstība ir vismaz par vienu kārtu mazāka nekā lietojumam nepieciešamā precizitāte. Līdz ar to izstrādātie modeļi ir pilnībā piemēroti materiālu, izmēru u. c. lielumu salīdzinošai analīzei. Ņemot vērā skaitļošanas priekšrocības, ko šie kodi sniedz, 1.5 %–3 % neatbilstība kļūst vēl mazāk nozīmīga, ja modeļus izmanto optimizācijas procedūrās vai jutīguma analīzēs, kur nepieciešams pārbaudīt lielu konfigurāciju skaitu, kā tas tiks darīts šī darba turpmākajās nodaļās.



4.10. attēls. Spēka salīdzinājums katrā balstā starp *LPM* (nepārtrauktas līnijas) un *FEA* (punkti).

4.4. Optimizācija

Katras balsta pozīcijas izvēle, kā arī tā ģeometrijas (stienis vai dubultjoslas veids) un materiāla izvēle būtiski ietekmē svarīgus parametrus un ir jāoptimizē, lai:

- maksimizētu sistēmas stingrību visā rotācijas diapazonā, ne tikai vienā darba pozīcijā;
- nodrošinātu vienmērīgu slodžu sadalījumu starp balstiem, kas ļautu izmantot mazākus šķēsgriezumus un samazinātu siltuma zudumus;
- nodrošinātu pilnīgu spraugas kompensāciju ar minimālu iepriekšējo pievilkšanu, tādējādi samazinot gan slodzes, gan siltuma zudumus balstos;
- samazinātu papildu slodzes atdzišanas laikā statistiski nenoteiktajā risinājumā.

Katrs balsts piedāvātajās sistēmās (4.2. attēlā) tiek definēts ar pieciem parametriem: trīs parametri aukstā šarnīra pozīcijai $\mathbf{M}_i = (M_{xi}, M_{yi}, M_{zi})$ un divi leņķi α_1, α_2 , kas nosaka tā aksiālo virzienu. Rezultātā tiek iegūti 30 un 40 mainīgie, attiecīgi, abām sistēmām. Izmantojot simetriju un ņemot vērā ierobežotas sistēmas pašizlīdzinošo raksturu, parametru skaits tiek samazināts līdz 16 (noteiktajai) un sešiem (nenoteiktajai) sistēmai.

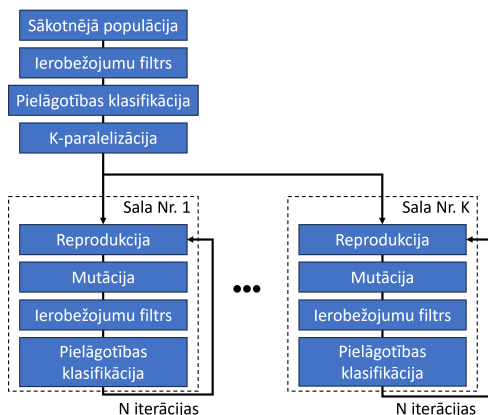
Ņemot vērā lielo mainīgo un ierobežojumu skaitu – piemēram, tos, kas nodrošina kriostata izgatavojamību – tiek izmantots *GA* (ģenētiskais algoritms) [66], kura īstenošana ir apskatīta promocijas darba 7. nodaļā. *GA* ir bioloģiski iedvesmoti un balstās četros galvenajos soļos: inicializācija, novērtēšana, atlase un ģenētiskā rekombinācija. *GA* mēdz ātri konverģēt uz lokāliem optimumiem. Lai veicinātu risinājumu telpas izpēti un izvairītos no pāragras konverģences, šajā darbā izmantots “salas modeļa” *GA* [67] – paralēla pieeja, kas uzlabo daudzveidību. Pielāgotības funkcija ietver tikai to *LPM* daļu, kas saistīta ar aukstās masas nobīdi balstu deformācijas rezultātā. Kriostata korpusa ģeometrija nav iekļauta optimizācijā, jo tās stingrību var palielināt, būtiski neietekmējot siltuma slodzi un kopējo iekārtas svaru.

$$f = \frac{1}{\sqrt{\mathbf{P}_e \cdot \mathbf{P}_e}} \quad \text{ar} \quad \mathbf{P}_e = (\tilde{e}_1, \dots, \tilde{e}_6), \quad (4.7)$$

kur $\tilde{e}_i$ ir maksimālā kļūda slodzes cikla laikā (rotējošā gantrijs rotācijas laikā). Lielāka f vērtība raksturo individu, kas kopumā rada mazāku pozas kļūdu, salīdzinot ar citiem. Neapstrādātajai pielāgotības vērtībai tiek piemērotas soda funkcijas, lai ņemtu vērā iepriekšējās pievilkšanas sistēmas efektivitāti (p_1) un lai minimizētu slodzes balstos (p_2). Piemērojot minētās soda funkcijas (detalizēti izskaidrotas promocijas darba 7. nodaļā) (4.7.) vienādojuma, tiek iegūta galīgā pielāgotības funkcija:

$$\tilde{f} = f p_1 p_2. \quad (4.8)$$

Izstrādātā optimizācijas rutīna kopumā redzama 4.11. attēlā.



4.11. attēls. Ģenētiskā algoritma plūsmas shēma, kas izmantota šajā promocijas darbā.

Soļi ir apkopoti šādi.

1. Sākotnējā populācija ar n indivīdiem tiek ģenerēta nejauši.
2. Populācijai tiek piemēroti ierobežojumi, lai atlasītu derīgos indivīdus.
3. Tiek novērtēta sākotnējās populācijas indivīdu pielāgotība un tie tiek klasificēti atbilstoši.
4. Pirmie k indivīdi no sākotnējās populācijas kļūst par pirmās paaudzes eliti un tiek sadalīti k salās.
5. Salas populācija vairojas mitozes ceļā, kopējot elites balstu konfigurāciju.
6. Salas populācijai tiek piemērotas nejaušas mutācijas.
7. Salas populācijai tiek atkārtoti piemēroti ierobežojumi, lai atlasītu derīgos indivīdus.
8. Tiek novērtēta salas populācijas indivīdu pielāgotība, un tie tiek klasificēti atbilstoši.

Algoritmam tiek piemēroti arī papildu nosacījumi.

- 5.–8. solis katrai salai tiek izpildīts paralēli.
- Vispiemērotākais salas indivīds tiek iekļauts nākamajā šīs pašas salas iterācijā, lai saglabātu tās veikspēju.
- Starp salām nav ieprogrammētas mijiedarbības, un netiek ģenerētas jaunas salas. Abi pasākumi ieviesti, lai izvairītos no ģenētiskās daudzveidības zuduma.

- Katras iterācijas beigās tiek salīdzinātas visu salu pielāgotības vērtības, lai pielāgotu mutācijas stratēģiju. Salās ar zemāku maksimālo pielāgotību tiek veikta intensīvāka mutācija, un tā tiek piemērota lielākam skaitam indivīdu, veicinot risinājumu telpas izpēti. Savukārt salas ar augstāku maksimālo pielāgotību tiek izmantotas ekspluatācijai un tajās mutācijas tiek ierobežotas.

4.5. Balstiekārtu projektēšana: rotējošā gantriņa gadījuma izpēte

Šajā apakšnodalā piedāvātas galīgās projektēšanas izvēles abām balstiekārtu sistēmām (6S un 8S). Sākotnēji tiek izcelti piedāvātās balstu izvietojuma optimizācijas stratēģijas ieguvumi, kas konsekventi lietoti abiem risinājumiem, lai gan rezultāti tiek parādīti tikai 6S gadījumā, sekojot rutīnai 4.4. nodaļa. Tālāk *LPM* modeļi tiek izmantoti dažādu materiālu un balstu šķēsgriezumu salīdzināšanai ar mērķi minimizēt siltuma zudumus, vienlaikus nodrošinot pietiekamu stingrību, lai izpildītu precizitātes prasības. Tiek apskatīti arī papildu projektēšanas aspekti, tostarp iepriekšējās pievilkšanas mehānisma izmantošana spraugas novēršanai un izlīdzināšanas sistēmas konstrukcija.

4.5.1. 6S optimizācijas rezultāti

Tika veikti divi salīdzinoši novērtējumi, lai demonstrētu optimizācijas rutīnas efektivitāti un spraugas kompensācijas sistēmas priekšrocības. Pirmais salīdzina risinājumu S1 (sākotnējā, neoptimizētā sistēma) ar risinājumu S2 (optimizētā sistēma). Otrais salīdzina risinājumu S3 (optimizētā sistēma ar spraugu) ar risinājumu S4 (optimizētā sistēma ar iepriekšējo pievilkšanu).

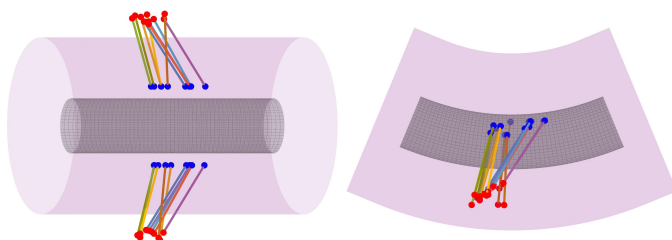
Pozas precizitāte uzlabojās vidēji par 16 % starp S1 un S2 ar nozīmīgāko uzlabojumu θ_x komponentē, kas uzlabojās par 83 %. Tas ir īpaši svarīgi, jo S1 sākotnējā vērtība 0,6 mrad jau bija tuvu prasību robežai (3.1. tabulā). Būtisks uzlabojums vērojams arī e_y komponentē, kas samazinājās par 45 %, no 0,27 mm līdz 0,15 mm. Lai arī e_x kļūda pieauga par 87 %, tas tiek uzskatīts par pieņemamu, jo staru sistēmas veiktspēja ir mazāk jutīga pret kļūdām gareniskajā virzienā, un šī atšķirība ir sākotnējā vakuuma kameras dizaina kompromisu rezultāts. Visu pozas komponentu grafiki risinājumiem S1 un S2 pieejami promocijas darba pielikumos.

4.2. tabula

Absolūtās kļūdas un uzlabojuma procenti katrai *DOF* komponentei sākotnējā un optimizētajā balstu konfigurācijā

<i>DOF</i>	Sākotnējais (S1)	Optimizētais (S2)	Uzlabojums	
e_x	0,18	0,34 mm	mm	−87 %
e_y	0,27	0,15 mm	mm	45 %
e_z	0,20	0,19 mm	mm	3 %
θ_x	0,60	0,10 mrad	mrad	83 %
θ_y	0,10	0,05 mrad	mrad	55 %
θ_z	0,07	0,07 mrad	mrad	−1 %
$\mathbf{f}$	(3,1; 1,6; 2,0; 2,0)	(4,3; 5,2; 4,8; 2,7)		
$\tilde{\mathbf{f}}$	($\approx 0, \approx 0, \approx 0, \approx 0$)	(4,3; 5,2; 4,8; 1,2)		
$\mathbf{F}_{q,max}$	35,5	19,8 kN	kN	44 %
objekta diametrs	24	18 mm	mm	
drošības koeficients	12	12,2		
siltuma zudumi pie 4,7 K	1	0,55 W	W	44 %
kompresora ievades jauda	4,8	2,6 kW	kW	44 %

Pateicoties soda funkciju ieviešanai pielāgotības funkcijā $\tilde{\mathbf{f}}$, uzlabojās arī siltumizolā-



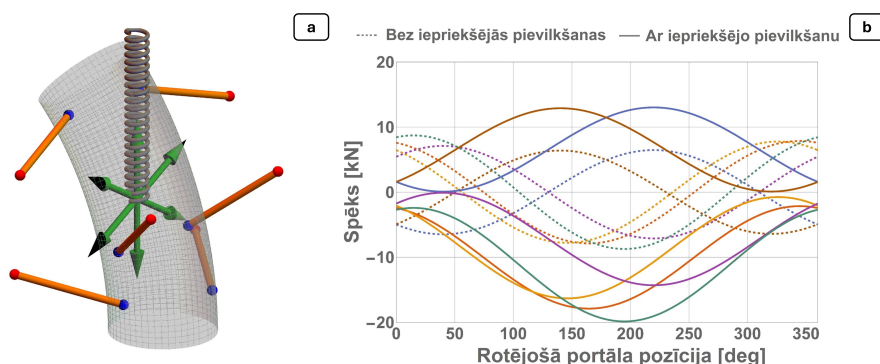
4.12. attēls. Sākotnēji asimetrisko balstu pozīcija pēc 10 ģenētiskā algoritma iterācijām. Attēloti tikai tie balsti, kas sākotnēji netika ierobežoti ar simetriju.

cijas īpašības. Optimizācijas tiešas sekas ir nepieciešamais iepriekšējās pievilkšanas spēka samazinājums, kas samazina reakcijas spēku katrā balstā par 44 %, attiecīgi, samazinot nepieciešamo šķersgriezumu, lai saglabātu to pašu drošības koeficientu. Tādējādi ir panākts proporcionāls 44 % siltuma zuduma samazinājums uz auksto masu. Lai atdalītu šo siltuma daudzumu pie 4,7 K, izmantojot kriodzesētājus (piemēram, *SHI RDK-415D2 4K* modeli), nepieciešamā jauda ir aptuveni 2,6 kW, kas nozīmē apmēram 2,2 kW ietaupījumu.

Šajā darbā piedāvātā optimizācijas rutīna pierādās noderīga arī, lai izdarītu secinājumus par pamata projektēšanas izvēlēm. Pēc algoritma palaišanas 10 reizes novērots, ka rezultāti konverģē uz divu sākotnēji asimetrisku balstu simetrisku izvietojumu, kā redzams [4.12. attēlā](#).

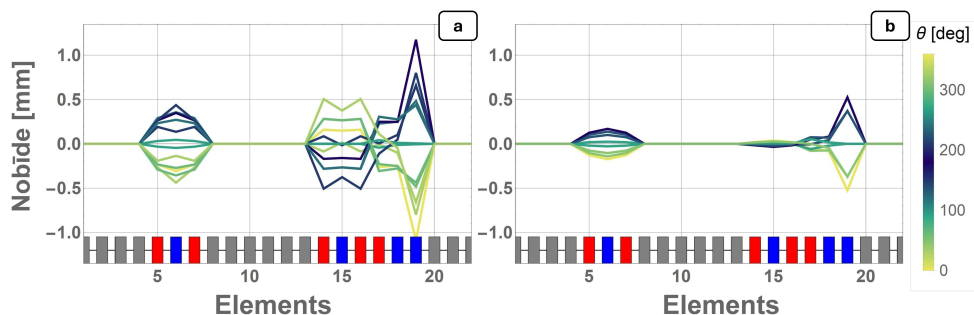
4.5.2. 6S spraugas un iepriekšējās pievilkšanas sistēma

Šajā apakšnodalā salīdzināts risinājums S3, kurā šarnīros tiek pieļauta sprauga, ar risinājumu S4, kurā tā tiek kompensēta, izmantojot iepriekšējo pievilkšanu un lielākas slodzes. Iepriekšējā pievilkšana maina aksiālās reakcijas tā, ka katrs balsts visu rotējošā gantri rotācijas ciklu paliek vai nu pastāvīgā stiepē, vai spiedē, nodrošinot, ka šarnīri saglabā nemainīgu pozīciju ([4.13. attēlā](#)). Tas samazina magnētu izlīdzināšanas kļūdu un tādējādi uzlabo staru veiktspēju ([4.14. attēlā](#)).



4.13. attēls. (a) Iepriekšējās pievilkšanas konceptuālā shēma, kurā tā attēlota kā atspere un gravitācijas slodze zaļā krāsā rotējošā gantri rotācijas laikā. (b) Iepriekšējās pievilkšanas ietekme uz stieņu iekšējām slodzēm atkarībā no rotējošā gantri pozīcijas.

[4.14. attēlā](#) grafiki attēlo *DOF*, kurā novērots vislielākais uzlabojums (visi pārējie grafiki pieejami promocijas darba pilnajā versijā). Rezultātu kopsavilkums sniegts [4.3. ta-](#)



4.14. attēls. (a) pozīcijas kļūdas e_x rezultāti risinājumā S3. (b) pozīcijas kļūdas e_x rezultāti risinājumā S4. Rotācijas rezultāti parādīti promocijas darba pilnajā versijā.

bulā. Piecās DOF komponentēs kļūdas samazinājums bija 46–71 %, kamēr θ_x precizitāte uzlabojās tikai nedaudz. Iepriekšējā pievilksana palielina balstu slodzi, kā rezultātā siltuma zudumi vadītspējas dēļ uz auksto masu dubultojas – no aptuveni 0,25 W līdz 0,55 W pie 4,7 K, kopsummā visiem sešiem balstiem. Neskatoties uz 120 % siltuma zudumu pieaugumu, iepriekšējās pievilksanas sistēma un optimizētā ģeometrija uztur pozas novirzes rotācijas laikā pieļaujamās robežās, pierādot tās efektivitāti.

4.3. tabula

Absolūtās kļūdas un uzlabojuma procenti katrai DOF komponentē risinājumu S3 un S4 salīdzinājumā

DOF	Ar spraugu (S3)	Ar iepriekšējo pievilksanu (S4)	Uzlabojums	
e_x	1,18	0,52 mm	55 %	
e_y	0,67	0,33 mm	52 %	
e_z	0,93	0,39 mm	59 %	
θ_x	0,50	0,54 mrad	–8 %	
θ_y	0,57	0,16 mrad	71 %	
θ_z	0,31	0,17 mrad	46 %	
$F_{q,max}$	8,7	19,8 kN	–130 %	
objekta diametrs	12	18 mm		
drošības koeficients	12	12,2		
siltuma zudumi pie 4,7 K	0,25	0,55 W	–120 %	
kompresora ievades jauda	1,2	2,6 kW	–120 %	

4.5.3. 6S materiāla un ģeometrisku parametru izvēle

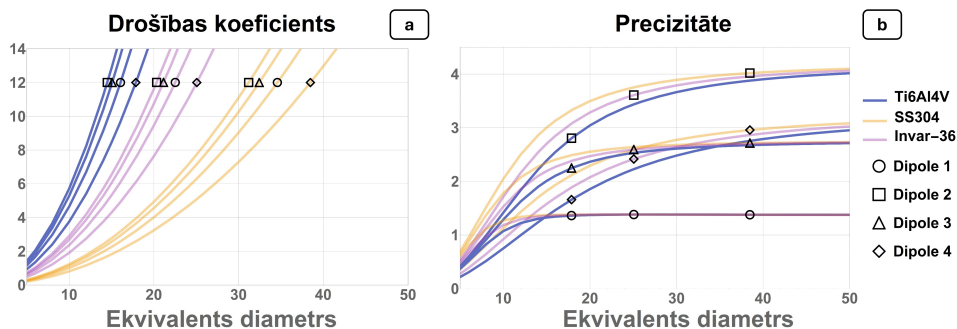
Nākamajā projektēšanas posmā tiek izvēlēts atskaites materiāls un balstu ģeometriskie parametri, pamatojoties uz trīs izvērtējuma kritērijiem: konstrukcijas integritāte (4.15. attēlā) – balstīta uz drošības koeficientu pie nominālām statiskām slodzēm; darbības precizitāte (4.15. attēlā) – galvenais funkcionalitātes kritērijs, balstīts (4.7.) vienādojuma, papildināts ar vakuuma kameras deformācijas ieguldījumu; vadītspējas siltuma zudumi (4.16. attēlā) – aprēķināti, izmantojot siltumvadītspējas integrāļus [65], [68], pieņemot termalizāciju balsta viduspunktā.

Balstu izmēri un materiālu izvēle tiek veikta, nodrošinot minimālo drošības koeficientu 12, lai ņemtu vērā augstu ciklu noguruma ietekmi. Novērtējuma kritēriji atkarībā no ekvivalentā diametra redzami 4.15. attēlā un 4.16. attēlā. Katrs materiāls 4.15. attēlā ir attēlots ar atšķirīgu līkni, kas atspoguļo dažādas slodzes kriostata moduļos pārvades līnijas

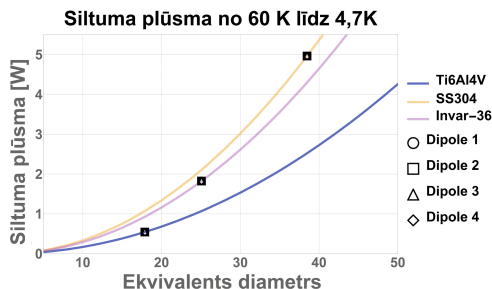
Salīdzināto materiālu īpašību kopsavilkums 6S un 8S risinājumiem

	Ti6Al4V	SS304L	Invar 36	CFRP	GFRE	
Plūsmas robeža	950	205	483	2000	300	MPa
Junga modulis	114	195	148	130	30	GPa

garumā. Pozas kvalitātes kritērija vērtības svārstās no 2 (titāns) līdz 2,8 (nerūsējošais tērauds), norādot, ka nerūsējošais tērauds būtu labākais no precizitātes viedokļa. Tomēr titāna balsti ievērojami samazina siltuma pārneši no 60 līdz 4,7 K pie jebkura diametra (4.16. attēlā). Tādējādi par atskaites materiālu tiek izvēlēts Ti6Al4V, kas nodrošina vislabāko līdzsvaru starp visiem izvērtējuma kritērijiem.



4.15. attēls. Drošības koeficienta (a) un pozas precizitātes (b) atkarība no izmēriem un materiāla statistiski noteiktajam risinājumam.

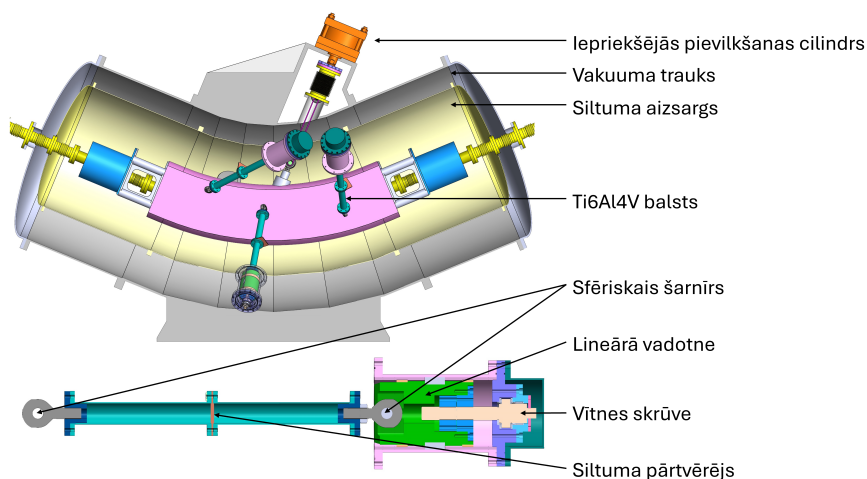


4.16. attēls. Siltuma zudumu pie 4,7 K atkarība no izmēriem un materiāla statistiski noteiktajam risinājumam.

4.5.4. 6S mehāniskā konstrukcija

Šajā apakšnodaļā aprakstīta izvēlēta balstu izvietojuma, izmēru un geometrijas tehniskā integrācija kriostatā, ar mērķi novērtēt konstrukcijas realizējamību un izgatavojamību. Seši cauruļveida Ti6Al4V balsti balsta auksto masu (4.17. attēlā). Katra balsta vidusdaļā novietots materiāls ar augstu siltumvadītspēju, lai pārtvertu vadītspējas siltuma plūsmu starpposma temperatūrā. Sfēriskie šarnīri abos galos novērš ierobežotu, savukārt prizmatiskais šarnīrs (lineārais slīd vadis) silto galu pusē, ko darbina ar skrūvveida mehānismu,

ļauj neatkarīgi kustēties visiem sešiem silto galu šarnīriem. Šī piedziņa nodrošina pilnu aukstās masas pozīcijas kontroli visās sešās brīvības pakāpēs.



4.17. attēls. 3D modelis, kas attēlo paralēlās balstiekārtas galvenos komponentus.

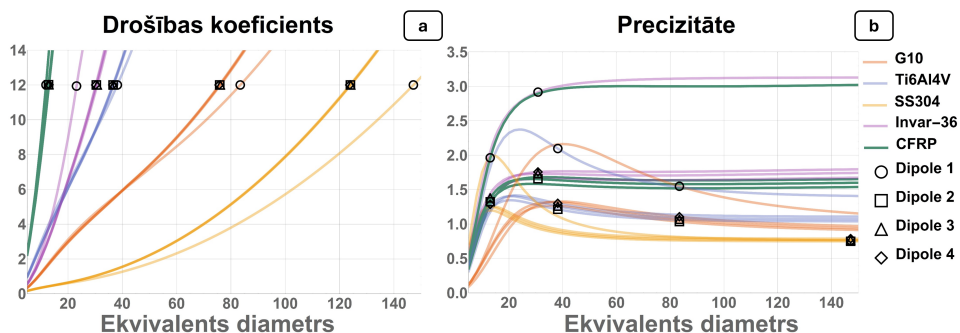
Izlīdzināšanas (angļu val. *alignment*) diapazons ir definēts, balstoties iespējamā aukstās masas neizlīdzinājumā novērtējumā, kas var rasties montāžas un izgatavošanas pielaidēs, izmantojot Montekarlo simulācijas. No šīs analīzes tika noteikts maksimālais nepieciešamais silto galu šarnīru pārvietošanās apjoms neizlīdzinājumu korekcijai. Tika izstrādāts skrūvpāru mehānisms, kas nodrošina vajadzīgo lineāro kustību. Lai šīs skrūves darbinātu manuāli, nepieciešami griezes momentu pastiprinoši atslēgas mehānismi (pārtraides attiecība 1: 5 līdz 1: 25). Tas uzlabo izlīdzināšanas precizitāti, sasniedzot aptuveni 0,05 mm un 0,05 mrad pie 3σ . Pneimatiskās iepriekšējās pievilkšanas sistēmas integrācija, kas darbināma ar standarta spiediena gaisa padeves līnijām, ir būtiska, lai novērstu precizitātes zudumus šarnīru spraugu dēļ, kā tas apskatīts 4.5.2. apakšnodaļā.

4.5.5. 8S materiāla un ģeometrisko parametru izvēle

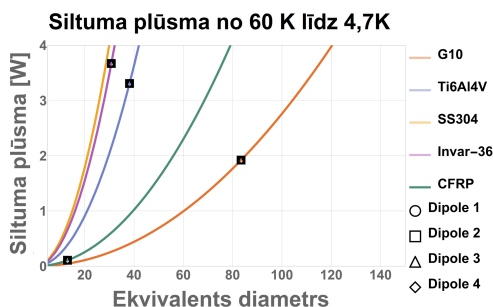
8S arhitektūras balstu izvietojums ir optimizēts, izmantojot to pašu algoritmu, kas aprakstīts 4.4. nodaļā sadaļā 6S sistēmai. Vienīgā atšķirība ir izmantotais *LPM*, ar kuru tiek aprēķināta magnēta poza. Būtiska pieņēmumu atšķirība ir tā, ka spraugas tiek kompensētas, uzliekot pietiekamu iepriekšējo pievilkšanu visiem balstiem vienlaikus silto galu pusē, nevis izmantojot pneimatisko sistēmu.

Pēc balstu izvietošanas optimizācijas tika izvēlēts atskaites materiāls un izmēri, izmantojot tos pašus trīs izvērtējuma kritērijus kā 6S risinājumā: drošības koeficients statiskās slodzēs, darbības precizitāte un siltuma zudumi vadītspējas ceļā caur balstiem. Rezultāti redzami 4.18. attēlā un 4.19. attēlā. Atšķirībā no 6S balstiekārtas, kur slodze nav atkarīga no materiāla elastības moduļa, 8S arhitektūrā slodze ir atkarīga gan no balsta stingrības, gan no termiskās kontrakcijas atšķirību efektiem. Magnēta dipols viskritiskākajā pozīcijā ir atkarīgs no izvēlētā materiāla atšķirībā no 6S risinājuma.

Ņemot vērā rezultātus, visas risinājuma variācijas izpilda minimālo prasību pēc drošības koeficienta (12). Sistēmas stingrības novērtējuma kritērija vērtības svārstās no 0,77 līdz 2,02, attiecīgi *SS304* un *Invar-36* gadījumā. Risinājumi ar *SS304* un *GFRE* tiek uzskatīti par kritiskiem, jo tiem ir zemāka pozas precizitāte, savukārt pārējie risinājumi



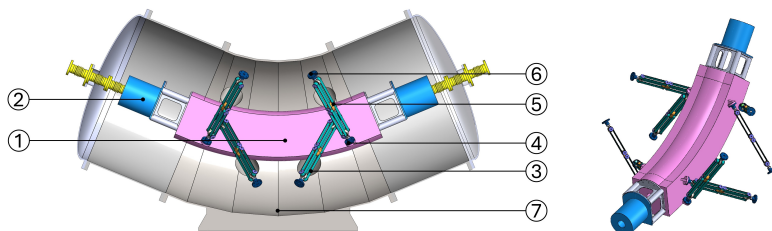
4.18. attēls. Drošības koeficienta (a) un pozas precizitātes (b) atkarība no izmēriem un materiāla statistiski nenoteiktajam risinājumam.



4.19. attēls. Siltuma zudumu pie 4,7 K atkarība no izmēriem un materiāla statistiski nenoteiktajam risinājumam.

joprojām tiek uzskatīti par piemērojamiem kandidātiem. Risinājums ar *CFRP* ievērojami pārspēj citus – tas nodrošina 17 reizes mazāku siltuma plūsmu pie 4,7 K nekā nākamais labākais risinājums, tāpēc tas ir izvēlēts kā atskaites materiāls 8S balstiekārtas projektēšanā.

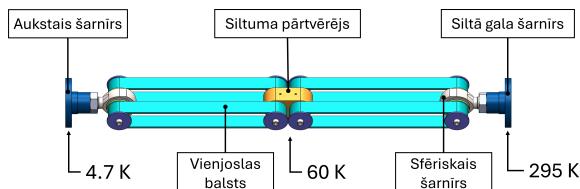
4.5.6. 8S mehāniskā konstrukcija



4.20. attēls. 3D modelis, kas attēlo balstiekārtas arhitektūru. (1) supravadītājdipols (2) supravadītājkvadrupols (3) balsts (4) aukstais šarnīrs (5) termalizācija (6) siltais šarnīrs ar 3D izlīdzināšanas sistēmu (7) vakuuma kamera.

Balstiekārta, kas redzama 4.20. attēlā, izmanto dubultjoslas dizainu balsta elementiem (4.21. attēlā). Joslas ģeometrija ļauj izmantot vienvirziena šķiedru slāņojumu, maksimāli

palielinot izturību, vienlaikus samazinot bīdes sprieguma koncentrāciju un delaminācijas riskus. Skaidra dubultjoslas dizaina priekšrocība, salīdzinot ar kompozītmateriāla stieņiem, izpaužas termalizācijas vietā, kur ideālā gadījumā balsts būtu jāsadala divos segmentos. Stieņu gadījumā tas nozīmētu mehāniskus vai līmētus savienojumus – abi risinājumi ir uzņēmīgi pret bojājumiem atkārtotu termociklu laikā. Dubultjoslas ģeometrija, kā redzams 4.21. attēlā, šo problēmu atrisina, ļaujot kompozītmateriālam brīvi sarauties.



4.21. attēls. Piedāvātā ierobežotas balstiekārtas apakšmontāža: aukstais šarnīrs pie 4,7 K, (2) vienas joslas formas balsts, termalizācija, stieņa gals, siltais šarnīrs pie 295 K.

Šeit tiek piedāvāta iespējama izlīdzināšanas stratēģija 8S risinājumam.

1. Tiek pieņemts, ka aukstās masas pozīcija istabas temperatūrā ir nominālā; ar *LPM* tiek aprēķināta novirze ekspluatācijas temperatūrā.
2. Mērķpozīcija aukstajai masai istabas temperatūrā tiek nobīdīta atbilstoši novirzēm, kas aprēķinātas 1. solī.
3. Aukstā masa tiek novietota vakuuma kamerā aprēķinātajā mērķpozīcijā (no 2. soļa), cik vien iespējams precīzi atbilstoši ārējā izlīdzināšanas statīva pozicionēšanas noteiktībai.
4. Visi astoņi balsti tiek savienoti ar silto galu 3D izlīdzināšanas sistēmu.
5. Tiek pielikta minimālā iepriekšējā pievilkšana, lai kompensētu spraugas, un tiek monitorētas iekšējās slodzes.
6. Ārējais izlīdzināšanas statīvs tiek noņemts.
7. Tiek piemērota pilna iepriekšējā pievilkšana.

Šīs procedūras potenciālais ierobežojums ir nepieciešamība izlīdzināt auksto masu, izmantojot ārējo izlīdzināšanas statīvu – darbību, kuru ievērojami vieglāk veikt uz grīdas, nevis tieši uz iekārtas. Vispirms katra kriostata atskaites sistēma ir jānoorientē attiecībā pret iekārtas atskaites sistēmu, lai ņemtu vērā rotējošā gantrijs izgatavošanas pielaides. Pēc tam kriostats tiek nolaists uz grīdas un aukstā masa tiek izlīdzināta, izmantojot ārējo izlīdzināšanas statīvu, kuram pašam jābūt aprīkotam ar izlīdzināšanas iespējām. Visbeidzot, pilnībā samontētais kriostats ar precīzi izvietotu auksto masu tiek uzstādīts uz iekārtas.

4.6. Balstiekārtu salīdzinošā analīze rotējošā gantrijs gadījuma izpētē

Šajā apakšnodaļā salīdzinātas optimizētās statistiski noteiktās (6S) un statistiski nenoteiktās (8S) balstiekārtas sistēmas. Salīdzinājums balstīts šādos novērtējuma kritērijos:

- o precizitāte – maksimālā pozas kļūda staru pārnese līnijā visiem aukstajiem elementiem, izvērtēta katrai *DOF* komponentei;
- o nominālā konstrukcijas integritāte – drošības koeficients pie nominālām statistiskām slodzēm;

- vadītspējas siltuma zudumi – no siltuma aizsega uz auksto masu caur balstiem;
- jutīgums – pozas standartnovirze aukstajai ierīcei ģeometrijas un materiāla īpašību variāciju rezultātā;
- konstrukcijas integritāte transportēšanas apstākļos – drošības koeficients pie transportēšanas un apkalpes slodzēm (pieņemot statistiskās slodzes);
- dinamiskā uzvedība – abu risinājumu pašsvārstību frekvenču salīdzinājums.

Precizitātes, nominālās konstrukcijas integritātes un siltuma zudumu rādītāji ir apkopoti **4.5. tabulā**, savukārt pārējie salīdzinājumi aplūkoti turpmākajās apakšnodaļās.

4.5. tabula

Pirmo trīs novērtējuma kritēriju salīdzinājums risinājumiem 6S un 8S

		6S	8S	% uzlabojums
Materiāls		Ti6Al4V	CFRP	
Ģeometrija		caurule	dubultjosla	
Ekvivalents diametrs	mm	18,0	13,2	
e_x	mm	0,36	0,37	–4 %
e_y	mm	0,32	0,24	23 %
e_s	mm	0,45	0,36	20 %
θ_x	mrاد	0,16	0,04	73 %
θ_y	mrاد	0,36	0,12	65 %
θ_s	mrاد	0,56	0,22	60 %
Maksimālā slodze	kN	19,9	22,3	
Drošības koeficients (nominālās statistiskās slodzes)		15,5	12,5	
Siltuma zudumi pie 4,5 K	W	2,16	0,44	80 %
Kompresora ievades jauda	kW	10,2	2,08	80 %

Abas optimizētās sistēmas izpilda stingrības prasības (**3.1. tabulā**). Risinājums 8S kopumā ir stingrāks, uzrādot 20–73 % uzlabojumu lielākajā daļā *DOF*, salīdzinot ar 6S, izņemot e_x , kur tas ir par 4 % mazāk stingrs. Abas konstrukcijas ir mehāniski pietiekami izturīgas ar vidējo drošības koeficientu 15,5 risinājumam 6S un 12,5 risinājumam 8S. Turklāt *CFRP* izmantošana 8S konstrukcijā ievērojami samazina siltuma zudumus, samazinot nepieciešamo enerģiju siltuma atdalīšanai pie 4,5 K līdz pat 80 %.

4.6.1. Jutīguma analīze

Ir veikta abu balstiekārtu konfigurāciju jutīguma analīze attiecībā uz ievades parametru izmaiņām. Daži ievades parametri ir fundamentāli, savukārt citi (piemēram, balsta konstrukcija) ir no tiem atvasināti. Pamatparametru saraksts un to variāciju diapazoni sniegti **4.6. tabulā**.

Nejaušas šo parametru izmaiņas var izraisīt:

- balsta elementu deformāciju;
- vakuuma kameras deformāciju, ko izraisa balstu radītās slodzes;
- vakuuma kameras deformāciju, ko izraisa iepriekšējās pievilkšanas sistēma;
- novirzes atdzišanas procesa laikā;
- pielaižu summēšanos montāžas ķēdē no galvenās konstrukcijas līdz aukstajai masai.

Salīdzinājumā ar pilno kļūdu avotu sarakstu **4.1. tabulā**, šajā analīzē netiek ņemti vērā vairāki efekti.

4.6. tabula

Pamatparametru saraksts un to variāciju diapazoni, kas ņemti vērā jutīguma analizē.

Pamatparametrs	6S	8S	vērtība (3σ)
Balsta ekvivalents diametrs	JĀ	JĀ	0,1 mm
Balsta garums	JĀ	JĀ	0,1 mm
Materiāla elastības modulis	JĀ	JĀ	5 %
Pozīciju mērījumu nenoteiktība	JĀ	JĀ	0,15 mm
Pozicionēšanas sistēmas jutība	JĀ	NE	0,05 mm
Iepriekšējā pievilkšana	JĀ	JĀ	5 %

4.7. tabula

Jutīguma analīzes rezultāti 6S un 8S balstiekārtu sistēmām. Iekšējo aksiālo slodžu standartnovirze 1σ katram balstam

	St. 1	St. 2	St. 3	St. 4	St. 5	St. 6	St. 7	St. 8
Slodzes std. 1σ (6S)	97,08	89,55	120,85	134,62	93,55	90,60		N
Slodzes std. 1σ (8S)	86,64	86,96	87,16	86,83	93,90	93,57	93,71	94,10 N

- o Šarnīru spraugas, par kurām pieņemts, ka tās tiek kompensētas ar pneimatisko iepriekšējās pievilkšanas sistēmu (4.5.2. apakšnodaļa).
- o Galvenās struktūras deformācijas, jo tās neietekmē salīdzinājumu starp dažādām aukstās masas balstīšanas sistēmām.
- o Vakuuma kameras deformācijas, ko izraisa diferenciālais spiediens un pašsvars, jo tās tiek uzskatītas par otrās kārtas efektiem.

Kvantitatīvie jutīguma analīzes rezultāti 6S un 8S balstiekārtu gadījumā atkarībā no ievades parametru izmaiņām (4.6. tabulā) ir sniegti 4.7. tabulā un 4.8. tabulā. Kopumā statistiski noteiktā sistēma (6S) šķiet jutīgāka pret ievades parametru izmaiņām. Aksiālās iekšējās slodzes balstos ir gandrīz vienlīdzīgi ietekmētas: 6S gadījumā vidējā standartnovirze ir 104 N (1σ), bet 8S gadījumā – 90 N (1σ).

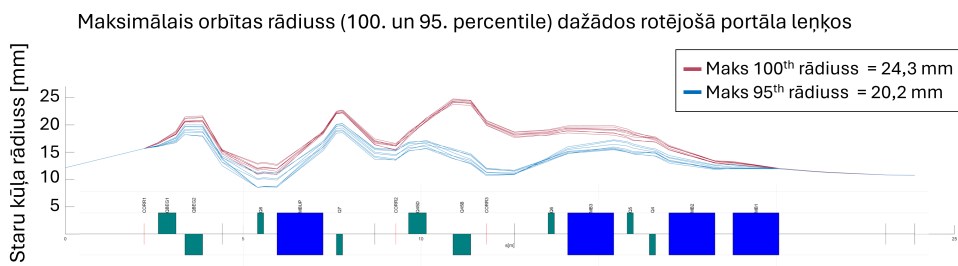
Šajā darbā piedāvāto projektēšanas izvēļu ietekme uz staru kūli, kas tiek transportēts caur rotējošā gantrijs staru līniju, ir novērtēta sadarbībā ar Itālijas nacionālā onkoloģiskās hadronterapijas centra (CNAO) ekspertiem. Papildus balstu un kriostata deformācijām, kas tika aprēķinātas ar izstrādātajiem LPM modeļiem, un nejaušajām kļūdām, kas novērtētas iepriekš aprakstītajā jutīguma analizē, autors iekļāva arī rotējošā gantrijs galvenās konstrukcijas deformāciju. Šie rezultāti tika izmantoti, lai optimizētu staru līnijas elementu izvietošanu un maksimāli palielinātu korekcijas efektivitāti.

Veiktspējas rādītāji staru līnijai ietver staru kūļa apvalka rādīšus dažādās rotējošā

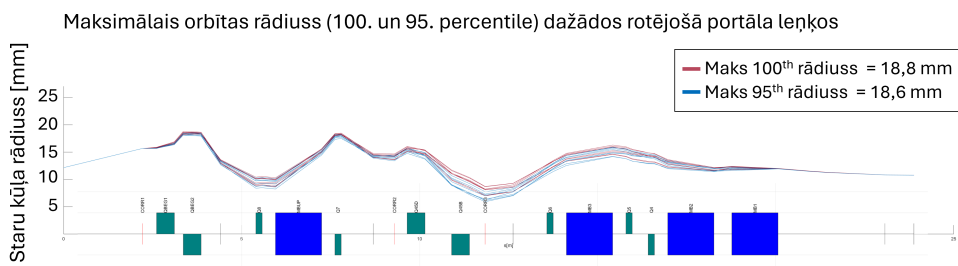
4.8. tabula

Jutīguma analīzes rezultāti 6S un 8S balstiekārtu sistēmām. Aukstās masas pozīcijas un rotācijas standartnovirze 1σ

DOF	e_x	e_y	e_z		θ_x	θ_y	θ_z	
Pozas std. 1σ (6S)	0,28	0,06	0,13	mm	0,37	0,51	0,15	mrاد
Pozas std. 1σ (8S)	0,02	0,02	0,02	mm	0,02	0,02	0,02	mrاد



4.22. attēls. Staru kūļa apvalks pārvades līnijā, balstīts 6S balstiekārtas arhitektūru. Rezultāti sniegti ar *CNAO* atbalstā.



4.23. attēls. Staru kūļa apvalks pārvades līnijā, balstīts uz 8S balstiekārtas arhitektūru. Rezultāti sniegti ar *CNAO* atbalstu.

gantrijs pozīcijās un to korekcijas impulsu (angļu val. *correction kicks*) procentu, kas pārsniedz *CNAO* izmantoto korektoru aparātūras ierobežojumus. Pilnā metodoloģija aprakstīta [69]. Staru apvalka rezultāti redzami 4.22. attēlā un 4.23. attēlā, balstoties tūkstošiem *MADX* simulācijās, pieņemot iepriekš aprakstītās nejaušo kļūdu sadales. Maksimālais apvalks, ņemot vērā gan pilnu datu kopu (100. percentili), gan 95. percentili, liecina, ka 8S risinājums nodrošina mazāku staru kūļa apvalku dotajos jutīguma pieņēmumos: 24,3 mm risinājumam 6S un 18,8 mm risinājumam 8S. Abi risinājumi saglabājas zem apvalka prasības 26,7 mm, kas noteikta pēc supravadītājdipola labā lauka apgabala [70] (ņemot 2/3 no magnēta urbumu rādiusa).

To korekcijas impulsu procentuālais daudzums, kas pārsniedz pašreizējās aparātūras iespējas, atspoguļo iespējamību, ka staru nevarēs izlabot un var rasties staru zudumi. Šis rādītājs ir 2,5 % 6S risinājumam un nulle 8S risinājumam, norādot, ka bez korektoru tehnoloģijas uzlabošanas vai papildu pasākumiem izlīdzināšanā un nodošanā ekspluatācijā, risinājums 6S var izraisīt staru zudumus, savukārt 8S nodrošina lielāku stabilitāti pie pašreizējiem izlīdzināšanas pieņēmumiem.

4.6.2. Transportēšanas un apkalpošanas slodžu analīze

Šajā apakšnodalā tiek novērtēta 6S un 8S balstiekārtu veikspēja transportēšanas un apkalpošanas slodžu apstākļos, kad papildu paātrinājumi gar x , y un z asīm var pārsniegt tos, kas rodas nominālas darbības laikā. Novērtējuma kritērijs ir minimālais drošības koeficients visos balstos dažādu slodzes gadījumu laikā. Transportēšanas scenārijos iekļauta pārvietošana pa autoceļiem, dzelzceļu, kuģošana un celtniecības celtna izmantošana. Balstoties literatūras avotos [71], [72], ir izvēlētas konservatīvas paātrinājumu vērtības: 4,5 G (sāniski), 5,6 G (gareniski) un 9,5 G (vertikāli), katra iedarbojas abos virzienos – veidojot

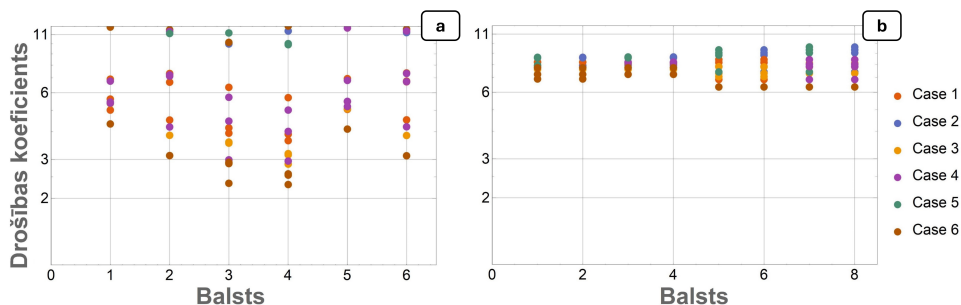
sešus slodzes gadījumus, kas apkopoto 4.9. tabulā.

4.9. tabula

Transportēšanas un apkalpošanas slodžu gadījumi. G ir Zemes gravitācijas standarta vērtība

Slodzes	<i>LPM</i> virz.	Gad. 1	Gad. 2	Gad. 3	Gad. 4	Gad. 5	Gad. 6
Sāniski	<i>x</i>	4,5	0	0	−4,5	0	0
Gareniski	<i>y</i>	0	5,6	0	0	−5,6	0
Vertikāli	<i>z</i>	−1	−1	8,5	−1	−1	−10,5
							G

Rezultāti ir parādīti 4.24. attēlā. Kritiskākais ir slodzes gadījums 6, kurā minimālie drošības koeficienti ir aptuveni 2,3 6S risinājumam un 6,3 8S risinājumam. Tādējādi 8S risinājums nodrošina aptuveni 2,7 reizes lielāku drošības rezervi. Tā augstā simetrija nodrošina vienmērīgu slodzes sadalījumu starp balstiem, un *CFRP* izmantošana sniedz labāku mehānisko izturību salīdzinājumā ar titānu. Abas sistēmas tiek uzskatītas par drošām transportēšanai, jo zemāki drošības koeficienti ir pieļaujami, ja nav augsta cikla noguruma riska. Tomēr 6S risinājumam transportēšanas laikā būtu lietderīgi izmantot pagaidu papildbalstus, kas ir ierasta prakse kriostatu loģistikā.



4.24. attēls. Drošības koeficientu rezultāti katram balstam 6S (a) un 8S (b) balstiekārtā dažādos transportēšanas un apkalpošanas slodžu gadījumos.

4.6.3. Sistēmu pašsvārstību frekvenču analīze

6S un 8S risinājumu pašsvārstību frekvences tika salīdzinātas pirmajam dipolam rotējošā gantrijs staru līnijā, izmantojot *FEA*. Simulācijas process ietver stacionāru termālo analīzi temperatūras sadalījuma iegūšanai, kam seko statistiskā strukturālā analīze, lai noteiktu sprieguma stāvokli pēc atdzišanas, un visbeidzot – modālā analīze, ar kuras palīdzību tiek aprēķinātas pašsvārstību frekvences un līdzdalības koeficienti γ_i (pēc *AN-SYS* terminoloģijas). Dipola masas attiecība pret kopējo masu (vai inerci – rotāciju gadījumā) tiek izmantota, lai nodrošinātu, ka tiek ietverti visi būtiskie aukstās masas svārstību režīmi.

Risinājumam 8S kopumā ir augstākas pašsvārstību frekvences, lai gan atšķirība nav ievērojama. Tas arī demonstrē dinamiskās uzvedības lielāku atsaistītību: 1.–5. režīms atbilst dipola cietā ķermeņa kustībai, jo to $M_{eff,i}/M_{TOT}$ vērtības pārsniedz dipola un kopējās masas attiecību, bez būtiskas sakarības ar citām *DOF*. Šie sākotnējie rezultāti liecina, ka abiem risinājumiem ir līdzīgas dinamiskās īpašības, taču, lai izslēgtu zemas

frekvences režīmus pirms testēšanas un prototipēšanas, var būt nepieciešama turpmāka optimizācija.

4.6.4. Salīdzinošās analīzes secinājumi

Optimizētās 6S un 8S balstiekārtu sistēmas ir salīdzinātas pēc precizitātes slodzes apstākļos rotējošā gantrijs kustības laikā, siltuma plūsmas caur balstiem, jutīguma pret ievades parametru izmaiņām, transportēšanas un apkalpošanas veikspējas, kā arī pašsvārstību frekvencēm. Izņemot pašsvārstību frekvences, kas ir līdzīgas abiem risinājumiem, 8S kopumā pārspēj 6S risinājumu.

Pateicoties *CFRP* izmantošanai 8S risinājumā, vadītspējas siltuma plūsma pie 4,7 K ievērojami samazinās no 2,16 W (6S) uz 0,44 W (8S), kas samazina nepieciešamo dzesēšanas jaudu no 10,2 kW uz 2,08 kW. Precizitātes ziņā 8S nodrošina labāku veikspēju ar kļūdu samazinājumu no 20 % līdz 73 %, pateicoties mazākai elastīgai deformācijai rotācijas laikā.

Tika veikta jutīguma analīze, lai novērtētu, kā nenoteiktības ievades parametros (piemēram, materiāla īpašības un montāžas pielāgšanas) ietekmē sistēmas veikspēju. Kā novērtējuma kritērijs tika izmantotas standartnovirzes visās sešās *DOF*, un rezultāti liecina, ka 8S risinājums ir apmēram 10 reizes mazāk jutīgs nekā 6S. Šī uzlabotā noturība izriet no mazākām atdzišanas radītām nobīdēm 8S risinājumā, kas ierobežo istabas temperatūras nenoteiktību ietekmes izplatību.

Tomēr 6S risinājumam ir potenciāls priekšrocībām automatizācijā – tā statiski noteiktā arhitektūra ļauj automātiski pozicionēt silto prizmatisko šarnīru, kas jau patlaban ir iespējams izmantot esošajā dizainā. Aktīvā kontrole varētu kompensēt elastīgās deformācijas gan kriostatā, gan pašā portāla struktūrā, tādējādi samazinot jutību pret nenoteiktībām un ļaujot atvieglot stingrības prasības un sniegtot iespēju būtiskiem svāra samazinājumiem portālā.

Transportēšanas un apkalpošanas slodžu apstākļos 8S risinājums arī uzrāda labākus rezultātus. Pateicoties tā simetrijai, balsti tiek vienmērīgāk noslogoti, nodrošinot augstāku drošības rezervi. Ekstrēmos slodzes gadījumos (paātrinājumi: 5,6 G gareniski, 4,5 G sāniski un 10,5 G vertikāli), minimālais drošības koeficients ir 2,3 6S risinājumam un 6,3 8S risinājumam.

Secinot – ja medicīniskajam rotējošajam gantrijs nav paredzēta automatizācija, 8S risinājums tiek uzskatīts par pārāku. Tomēr, ja tiek ieviesta aktīvā pozicionēšana, 6S risinājums var kļūt īpaši izdevīgs, ļaujot ne tikai kompensēt kriostata deformācijas, bet arī portāla novirzes un pavērot ceļu uz vieglāku un efektīvāku iekārtu dizainu.

Secinājumi

Promocijas darbs dod ieguldījumu mašīnbūves inženierijas jomā, piedāvājot jaunu modeli, ko var izmantot kriogēno ierīču stieņu balstu sistēmu projektēšanai un optimizācijai vispārīgu mainīgu slodžu apstākļos. Veicot plašu literatūras analīzi un izmantojot oriģinālu strukturētu matemātisko modelēšanu, darbs identificē un risina būtisku trūkumu balstu sistēmu projektēšanā vispārīgu mainīgu slodžu gadījumos. Tiek piedāvātas divas alternatīvas balstu arhitektūras: viena statistiski noteikta sistēma (6S), otra statistiski nenoteikta sistēma (8S). Tās ir matemātiski modelētas, validētas un optimizētas. Iegūtās atziņas ne tikai attīsta balstu sistēmu projektēšanas līmeni, bet arī nodrošina rīkus, ko iespējams vispārināt plašākam kriogēno lietojumu klāstam, piemēram, nākotnē izstrādājamām patērētāju kriogēnajām komponentēm, supravadītspējas radiofrekvenču dobumiem, optiskās izlīdzināšanas sistēmām augstas enerģijas fizikas eksperimentos, supravadītspējas generatoriem vēja turbīnām un balstu sistēmām kosmosa industrijā.

Svarīgākie rezultāti

1. Jaunie matemātiskie koncentrēto parametru modeļi (*LPM*) ir pielāgojami plašam stieņu balstu konfigurāciju klāstam (seši vai vairāk stieņi) un ļauj ātri novērtēt sistēmas veiktspēju, piemēram, kriogēnās ierīces pozīciju un slodzes sadalījumu balstos.
2. *LPM* spēj aprakstīt balstu sistēmas, kas izvietotas ne vienmēr simetriskās konfigurācijās, un modelēt sistēmas, kur balstiem var būt atšķirīgi izmēri un materiāli.
3. *LPM* uzrāda lielisku atbilstību *FEA* rezultātiem, sasniedzot precizitāti 98.6 % un 99.4 % vispārīgo astoņu un 11 balstu modeļu gadījumā. Precizitāte 97–98.5 % ir sasniegta 6S un 8S risinājumiem, kas izstrādāti rotējoša gantrijs gadījuma izpētei.
4. Piedāvātie *LPM* 20 reizes pārsniedz *FEA* aprēķinu ātrumu, kā tika izmērīts, darbinot *LPM* un *FEA* uz viena un tā paša aparātūras nodrošinājuma.
5. Optimizācija, izmantojot paralēlo ģenētisko algoritmu, konkrētajā rotējoša gantrijs gadījumā deva būtiskus uzlabojumus, salīdzinot ar manuāli optimizētiem risinājumiem, īpaši pozīcijas precizitātes robustuma un termālās efektivitātes ziņā. Datorizēti optimizētais risinājums uzrādīja vidēji par 16 % un līdz pat 83 % labāku precizitāti rotējoša gantrijs rotācijas laikā. Turklāt tas prasīja tikai pusi no sākotnējās priekšnoslodzes, kas bija nepieciešama, lai novērstu brīvgaite sākotnēji projektētajā balstu sistēmā. Tas nozīmē apmēram 44 % iekšējo reakciju samazinājumu balstos un līdz ar to arī siltuma plūsmas samazinājumu optimizētajā 6S konfigurācijā. Siltuma plūsmas samazinājums ļauj samazināt kompresoru nepieciešamo jaudu no 19,2 kW līdz 10,4 kW iekārtas dzesēšanas sistēmā.

Šis darbs dod ieguldījumu kriogēno ierīču inženierijas jomā, nodrošinot validētu plašu modeļēšanas ietvaru. Salīdzinot ar klasisko *FEA* analīzi, šim modelim ir vairākas priekšrocības.

1. Modeļa vienkāršība – pateicoties ierobežotam būtisko parametru skaitam *LPM*, modelis ir izmantojams plašākai projektētāju un inženieru kopienai, nodrošinot precīzus rezultātus gandrīz neatkarīgi no lietotāja pieredzes līmeņa, kas citādi ir ļoti nozīmīgs precīzu *FEA* analīžu veikšanai.
2. Modeļa izteiksmīgums – tā vienkāršības dēļ izstrādātais *LPM* sniedz skaidras tiešas atziņas par fundamentālajām attiecībām, kas nosaka sistēmas darbību. Tas ļauj

projektētājiem un inženieriem ātrāk un skaidrāk saprast būtisko parametru ietekmi uz kritiskajām izvades vērtībām, uzlabojot iespējas izvēlēties optimālas balstu konfigurācijas pirms resursietilpīgas *FEA* analīzes veikšanas.

Izstrādāto modeli var izmantot ātrai un elastīgai simetrisku un asimetrisku stieņu balstu struktūru novērtēšanai kriogēnās vidēs ar nemainīgām un mainīgām slodzēm.

Iespējamie novērtējumi.

1. Lielmēroga jutīguma pētījumus, variējot būtiskākos konstrukcijas parametru dzinēj-spēkus un novērtējot to izmaiņu ietekmi uz mehāniskās sistēmas veiktspēju, kā arī paātrinātāju tehnoloģiju gadījumā uz paātrinātāja kūļa parametriem.
2. Materiālu un ģeometrijas optimizācijas stratēģijas, kas līdzsvaro strukturālo veiktspēju ar termālās slodzes ierobežojumiem un ko var viegli pielāgot citu mērķa lielumu optimizācijai, ieviešot jaunas mērķfunkcijas piedāvātajā optimizācijas algoritmā.
3. Balstu izvietojuma optimizāciju, ņemot vērā reālistiskos ierobežojumus, ko nosaka mehāniskās sistēmas integrācija.

Izstrādātās modeļēšanas, optimizācijas un salīdzināšanas stratēģijas sniedzas tālāk par konkrēto supravadītspējas magnētu gadījumu hadronterapijai. Tās atspoguļo vispārīgāku projektēšanas filozofiju, kas balstās skaitļošanas ziņā efektīvos modeļēšanas rīkos, kas ļauj dziļi izpētīt sarežģītas un ļoti ierobežotas inženierijas problēmas.

Piedāvātais un validētais LPM ietvars veicina atkāpšanos no tradicionālajām pieejām, kas balstās tikai pieredzē un mēģinājumu–kļūdu metodēs ar galīgo elementu analīzi, pārejot uz digitāli asistētām konstrukcijām. Īpaši nozīmīga ir iespēja novērtēt tūkstošiem konfigurāciju īsā laikā, kas nepieciešams tradicionālai *FEA*, kas ļauj agrīnās fāzēs izpētīt projektēšanas telpas, ko iepriekš bija praktiski neiespējami pilnībā analizēt. Šī spēja ir īpaši nozīmīga jomās, kur mehāniskā veiktspēja ir jādīdzsvaro ar termālajiem, vibrācijas un integrācijas ierobežojumiem, piemēram, paātrinātāju tehnoloģijās, kosmosa sistēmās, supravadītspējas generatoros vai motoros un augstas enerģijas fizikas eksperimentos.

Visbeidzot, darbs demonstrē ieguvumus, ko dod cieša ciešas modeļa, optimizācijas un validācijas sasaiste, kas ir darba plūsma, kas atbilst pašreizējām digitālā dvīņa attīstības tendencēm. Ieviešot veiktspējas novērtējumu un jutīguma analīzi tieši projektēšanas ciklā, šeit izstrādātās metodes nodrošina pamatu elastīgākām un iteratīvām konstrukcijām.

Promocijas darba rezultāti būtiski veicinājuši vienu no *Horizon2020* Eiropas projekta smago jonu terapijas pētniecības integrācija plus (*HITRIplus*) atskaites punktiem (M7.2), piedāvājot šajā darbā izstrādāto balstu sistēmu kā bāzi oglekļa jonu rotējošā gantrijs mehāniskajai projektēšanai un integrācijai. Promocijas darbs izmantots, lai analizētu piedāvāto mehānisko risinājumu ietekmi uz kūļa optikas izvietojuma optimizāciju, mērķējot uz nejausu kļūdu korekciju, kas aprēķinātas jutīguma analīzēs, kas parādītas promocijas darbā.

Svarīgākie rezultāti par rotējošā gantrijs gadījuma izpēti.

1. 8S risinājums rotējošā gantrijs gadījumā, kur izmantoti *CFRP* balsti, pārspēj Ti6Al4V 6S risinājumu tādos rādītājos kā precizitātes saglabāšana slodzes apstākļos mašīnas rotācijas laikā, siltuma plūsma caur balstiem, jutība pret ievades parametru variācijām un veiktspēja transportēšanas/apstrādes fāzēs (ja automatizācija netiek ņemta vērā). Vienlaikus 6S risinājumam ir potenciālas priekšrocības automatizētās sistēmās, pateicoties tā vienkāršākajai arhitektūrai, regulējamībai un mazākam sprieguma stāvoklim kriogēnajā ierīcē.

2. Risinājumi 6S un 8S ir pierādīti kā atbilstoši kūļa prasībām, izmantojot kūļa trajektorijas izsekošanu, nodrošinot deformāciju un ražošanas pielaižu radīto kļūdu korekcijas efektivitāti bez būtiskiem kūļa zudumiem.

Lai gan šajā darbā ir prezentēts validēts modelis, ir jāatzīst dažas **ierobežojumu** kategorijas.

1. Izstrādātie *LPM* ir piemērojami specifiskai balstu arhitektūru klasei, kurā tiek izmantoti tikai stieņi, kas savienoti ar lodveida vai universālajām locītavām. Tomēr, kā uzsvērts literatūras apskatā, šī arhitektūra ir viena no visbiežāk izmantotajām. Tas ierobežo modeļu izmantošanu konfigurācijās, kur balsti ir savienoti ar locītavu tipiem, kas ievieš būtiskus rotācijas ierobežojumus.
2. Modelēšanas pieeja pieņem berzes neesamību. Tomēr to var novērst, ieviešot pilnīgāku modeli.
3. Modeļu validācija pārsvarā veikta, salīdzinot ar *FEA* rezultātiem. Lai arī atbilstība ir augsta, jāparedz arī eksperimentāla validācija ar prototipēšanas un testēšanas kampaņu. Reālie robežnosacījumi, montāžas pielāides un materiālu nepilnības var ietekmēt veikspēju atšķirīgi no pašreizējiem pieņēmumiem.

Šie ierobežojumi definē piedāvātās metodoloģijas pašreizējās robežas un motivē **turpmākos attīstības virzienus**, kas varētu ietvert:

1. Piedāvāto *LPM* paplašināšanu uz balstu sistēmām, kas izmanto citus balstu tipus (ne tikai stieņus ar universālajām un lodveida locītavām), iekļaujot lieces un vērpes ieguldījumu sistēmas reakcijā. Šāds paplašinājums ļautu simulēt arī berzes ietekmi, to modelējot kā papildu lieces vai vērpes stingrību.
2. Sistēmas dabisko frekvenču aprēķina integrēšanu, ļaujot optimizācijas laikā ar ģenētisko algoritmu ieviest mērķfunkcijas sistēmas frekvences reakcijas precīzetai regulēšanai.
3. Sprieguma stāvokļa izpēti kriogēnajā ierīcē, ko rada statistiski nenoteikta sistēma.
4. Validācijas procesa pabeigšanu ar prototipēšanas un testēšanas kampaņu, lai gan *LPM* jau ir pierādīti kā tikpat uzticami kā *FEA*.

Tādējādi šī promocijas darba nozīmīgākais sasniegums ir jaunā matemātiskā modeļa izstrāde stieņu balstu sistēmām, kas lietotas kriogēnajām ierīcēm. Tas apvieno vienkāršību attiecībā uz nepieciešamo parametru skaitu ar zemu skaitļošanas izmaksu un augstu precizitāti, salīdzinot ar klasisko *FEA*. Šīs priekšrocības padara to pieejamu plašākai sabiedrībai, ne tikai pieredzējušiem galīgo elementu analīzes lietotājiem, un sniedz noderīgas atziņas par iespējamiem balstu sistēmu optimizācijas virzieniem.

Darbā lietotie saīsinājumi

ATLAS	toroidālais <i>LHC</i> aparāts (<i>LHC</i> kolaborācija)
BT	stobra toroīds
CAS	Kīnas Zinātņu akadēmija
CFRP	oglekļa šķiedras pastiprināts polimērs
CMS	kompaktais miona solenoids (<i>LHC</i> eksperiments)
CNAO	Itālijas Nacionālais onkoloģiskās hadronterapijas centrs
CS	centrālais solenoids
DEMO	demonstrācijas kodolenerģijas reaktors
DOF	brīvības pakāpēm
DPK	tiešā pozīcijas kinemātika
ECT	gala daļas toroīds
ESS	Eiropas spallācijas avots
FAIR	antiprotonu un jonu pētniecības iekārta
FEA	galīgo elementu analīze
FPC	pamatstrāvas savienotājs
GA	ģenētiskais algoritms
GFRE	stikla šķiedras pastiprināts epoksīds
HIE-ISOLDE	augstas intensitātes un enerģijas <i>ISOLDE</i>
HITRIplus	smago jonu terapijas pētniecības integrācija plus
HL-LHC	<i>LHC</i> ar augstu spožumu
ICS	atbalsts starp rezonatoriem
IHEP	Kīnas Zinātņu akadēmijas Augstas enerģijas fizikas institūts
IPK	apgrieztā pozīcijas kinemātika
ISOLDE	izotopu separācijas iekārta tiešsaistē
ITER	starptautiskais termonukleārais eksperimentālais reaktors
LCLS-II	lineārais koherento gaismas avots II
LHC	lielais hadronu paātrinātājs
LPM	koncentrēto parametru modelis
MDS	magnētiskās blīvuma šķīrotājs
MICE	mionu jonizācijas dzesēšanas eksperiments
MRI	magnētiskās rezonanses attēlveidošana
Mu2e	mionu uz elektronu pārejas pārveide
RHIC	relativistisko smago jonu paātrinātājs
SPL	supravadītāju protonu lineārais paātrinātājs
SSC	supravadītāju superpaātrinātājs
SSRF	šanhajas sinkrotrona radiācijas iekārta
SSS	īsā taisnā sekcija

<i>TLS</i>	Taivānas gaismas avots
<i>UFGE</i>	vienvirziena stikla šķiedras epoksīds
<i>UT</i>	Tventes Universitāte
<i>VECC</i>	mainīgas enerģijas ciklotrona centrs

Literatūra

- [1] Alberto Martín-Martín et al. “Google Scholar, Web of Science, and Scopus: A systematic comparison of citations in 252 subject categories”. In: *Journal of informetrics* 12.4 (2018), pp. 1160–1177.
- [2] Yiyong Liu et al. “Design of cold mass supports for a superconducting undulator prototype at SINAP”. In: *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* 25.3 (2014), pp. 1–4.
- [3] Li Wang et al. “Development of a Test Cryostat for a Superconducting Undulator Prototype at the SSRF”. In: *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* 31.5 (2021), pp. 1–5.
- [4] G. Olivier et al. “Ess cryomodules for elliptical cavities”. In: *Proceedings of the 16th International Conference on RF Superconductivity*. 2013.
- [5] Christine Darve et al. “The ESS elliptical cavity cryomodules”. In: *AIP Conference Proceedings*. Vol. 1573. 1. American Institute of Physics. 2014, pp. 639–646.
- [6] *European Spallation Source*. European Spallation Source. URL: <https://europeanspallationsource.se/article/2023/03/15/ess-installs-first-two-cryomodules-linac> (visited on 04/19/2023).
- [7] Laura Monaco et al. “Fabrication and treatment of the ESS medium beta prototype cavities”. In: *Proc. IPAC’17* (2017).
- [8] Federico Carra et al. “Assessment of thermal loads in the CERN SPS crab cavities cryomodule1”. In: *Journal of Physics: Conference Series*. Vol. 874. 1. IOP Publishing. 2017, p. 012005.
- [9] Thomas Jones et al. “Development of a Novel Supporting System for High Luminosity LHC SRF Crab Cavities”. In: *18th Int. Conf. on RF Superconductivity (SRF’17), Lanzhou, China, July 17–21, 2017*. JACOW, Geneva, Switzerland. 2018, pp. 304–308.
- [10] Shrikant Pattalwar et al. “Key Design Features of Crab-Cavity Cryomodule for HiLumi LHC”. In: (2014).
- [11] P. Azevedo. *SPL Short Cryomodule Design*. URL: https://indico.cern.ch/event/216370/contributions/441396/attachments/345704/482100/SPL_SC_Design_PAzevedo_SPLmeeting_7_12_2012.pdf (visited on 04/19/2023).
- [12] V. Parma et al. *Status of the Superconducting Proton Linac (SPL) cryo-module*. Tech. rep. 2014.
- [13] S. Atieh et al. *Mechanical design and fabrication studies for SPL superconducting RF cavities*. Tech. rep. 2011.
- [14] Sebastien Bousson et al. “The ESS spoke cavity cryomodules”. In: *AIP Conference Proceedings*. Vol. 1573. 1. American Institute of Physics. 2014, pp. 665–672.
- [15] P. Duthil et al. “Design and Prototyping of the Spoke Cryomodule for ESS”. In: *HB2016, WEAM4Y01* (2016).
- [16] Denis Reynet et al. “Design of the ESS Spoke cryomodule”. In: *MOP089, SRF* (2013).

- [17] U. Bhunia et al. “Development and performance evaluation of a conduction-cooled warm bore HTS steering magnet”. In: *Physica C: Superconductivity and its Applications* 604 (2023), p. 1354191.
- [18] Jun-Sheng Zhang et al. “Magnetic and thermal design of HTS quadrupole magnet for newly developed superconducting proton cyclotron beam line”. In: *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism* 32 (2019), pp. 529–538.
- [19] J. J. Kosse et al. “Mechanical design of a superconducting demonstrator for magnetic density separation”. In: *Superconductor science and technology* 34.11 (2021), p. 115019.
- [20] N. Delruelle et al. “The high Beta cryo-modules and the associated cryogenic system for the HIE-ISOLDE upgrade at CERN”. In: *AIP Conference Proceedings*. Vol. 1573. 1. American Institute of Physics. 2014, pp. 811–818.
- [21] Y. Kadi, M. A. Fraser, and A. Papageorgiou-Koufidou. *HIE-ISOLDE: technical design report for the energy upgrade*. Ed. by Y. Kadi. CERN Yellow Reports: Monographs. Geneva: CERN, 2018. DOI: [10.23731/CYRM-2018-001](https://doi.org/10.23731/CYRM-2018-001). URL: <http://cds.cern.ch/record/2635892>.
- [22] Miao-Fu Xu et al. “Design, assembly, and pre-commissioning of cryostat for 3W1 superconducting wiggler magnet”. In: *Nuclear Science and Techniques* 31 (2020), pp. 1–15.
- [23] H. H. Chen et al. “Design of mechanical structure and cryostat for IASW superconducting wiggler at NSRRC”. In: *2007 IEEE Particle Accelerator Conference (PAC)*. IEEE. 2007, pp. 374–376.
- [24] C-S. Hwang et al. “Superconducting wiggler with semi-cold beam duct at Taiwan light source”. In: *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 556.2 (2006), pp. 607–615.
- [25] Li Wang et al. “Design and analysis of a self-centered cold mass support for the MICE coupling magnet”. In: *IEEE transactions on applied superconductivity* 21.3 (2011), pp. 2259–2262.
- [26] Egbert Fischer et al. “Superconducting quadrupole module system for the sis100 synchrotron”. In: *Proc. RUPAC*. 2012, pp. 143–145.
- [27] J. P. Meier et al. “Cryo-technical design aspects of the superconducting SIS100 quadrupole doublet modules”. In: *AIP Conference Proceedings*. Vol. 1573. 1. American Institute of Physics. 2014, pp. 1519–1526.
- [28] G. Ambrosio et al. “Challenges and design of the transport solenoid for the Mu2e experiment at Fermilab”. In: *IEEE transactions on applied superconductivity* 24.3 (2013), pp. 1–5.
- [29] Mauricio Lopes et al. “Mu2e transport solenoid cold-mass alignment issues”. In: *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* 27.4 (2017), pp. 1–5.
- [30] J. H. Sondericker and L. J. Wolf. “Alternative concepts for structurally supporting the cold mass of a superconducting accelerator magnet”. In: *Supercollider 3*. Springer, 1991, pp. 175–189.
- [31] P. Wanderer et al. “Construction and testing of arc dipoles and quadrupoles for the Relativistic Heavy Ion Collider (RHIC) at BNL”. In: *Proceedings Particle Accelerator Conference*. Vol. 2. IEEE. 1995, pp. 1293–1297.

- [32] Lankai Li et al. “Theoretical model of a cold mass strap suspension system for superconducting magnets”. In: *IEEE transactions on applied superconductivity* 21.6 (2011), pp. 3640–3645.
- [33] Akira Yamamoto et al. “The ATLAS central solenoid”. In: *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 584.1 (2008), pp. 53–74.
- [34] T. H. Nicol, R. C. Niemann, and J. D. Gonczy. “SSC magnet cryostat suspension system design”. In: *Advances in Cryogenic Engineering*. Springer, 1988, pp. 227–234.
- [35] Arnaud Devred et al. *Quench characteristics of full-length SSC R&D dipole magnets*. Springer, 1990.
- [36] Thomas Peterson et al. “LCLS-II 1.3 GHz cryomodule design-modified tesla-style cryomodule for CW operation”. In: *Proc. 17th Int. Conf. RF Superconductivity (SRF’15)*. 2015, pp. 1417–1421.
- [37] John N. Galayda et al. “The LCLS-II: A high power upgrade to the LCLS”. In: *9th IPAC* (2018), p. 18.
- [38] Kun Lu et al. “Evolution of the design of cold mass support for the ITER magnet feeder system”. In: *Plasma Science and Technology* 15.2 (2013), p. 196.
- [39] Yinfeng Zhu et al. “Conceptual design and analysis of cold mass support of the CS3U feeder for the ITER”. In: *Plasma Science and Technology* 15.6 (2013), p. 599.
- [40] Fabien Seyvet et al. “Improvement of the geometrical stability of the LHC cryo-dipoles when blocking the central support post”. In: *Proceedings of the 2005 Particle Accelerator Conference*. IEEE. 2005, pp. 2675–2677.
- [41] M. Mathieu et al. “Supporting systems from 293 K to 1.9 K for the Large Hadron Collider (LHC) cryo-magnets”. In: *Advances in cryogenic engineering* (1998), pp. 427–434.
- [42] Jishnu Dwivedi et al. *The alignment jacks of the LHC cryomagnets*. Tech. rep. 2004.
- [43] M. Castoldi et al. *Thermal performance of the supporting system for the Large Hadron Collider (LHC) superconducting magnets*. Tech. rep. 1999.
- [44] A. Dudarev et al. “First full-size ATLAS barrel toroid coil successfully tested up to 22 kA at 4 T”. In: *IEEE transactions on applied superconductivity* 15.2 (2005), pp. 1271–1274.
- [45] C. Mayri et al. “Suspension system of the barrel toroid cold mass”. In: *IEEE transactions on applied superconductivity* 16.2 (2006), pp. 525–528.
- [46] J. P. Badiou et al. *ATLAS barrel toroid: Technical Design Report*. Technical design report. ATLAS. Electronic version not available. Geneva: CERN, 1997. DOI: [10.17181/CERN.RF2A.CP5T](https://doi.org/10.17181/CERN.RF2A.CP5T). URL: <http://cds.cern.ch/record/331065>.
- [47] F. Nunio et al. “Mechanical design of the Iseult 11.7 T whole body MRI magnet”. In: *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* 20.3 (2010), pp. 760–763.
- [48] P. Vedrine et al. “Latest progress on the Iseult/INUMAC whole body 11.7 T MRI magnet”. In: *IEEE transactions on applied superconductivity* 22.3 (2011), pp. 4400804–4400804.

- [49] Nicolas Boulant and Lionel Quettier. “Commissioning of the Iseult CEA 11.7 T whole-body MRI: current status, gradient–magnet interaction tests and first imaging experience”. In: *Magnetic Resonance Materials in Physics, Biology and Medicine* (2023), pp. 1–15.
- [50] D. Elwyn Baynham et al. “Engineering design optimisation of the superconducting end cap toroid magnets for the ATLAS experiment at LHC”. In: *IEEE transactions on applied superconductivity* 9.2 (1999), pp. 856–859.
- [51] D. E. Baynham et al. “ATLAS end cap toroid final integration, test and installation”. In: *IEEE transactions on applied superconductivity* 18.2 (2008), pp. 391–394.
- [52] *ATLAS end-cap toroids: Technical Design Report*. Technical design report. ATLAS. Electronic version not available. Geneva: CERN, 1997. DOI: [10.17181/CERN.P03D.WQLV](https://cds.cern.ch/record/331066). URL: <http://cds.cern.ch/record/331066>.
- [53] B. Levesy et al. “Design and test of the titanium alloy tie rods for the CMS coil suspension system”. In: *IEEE transactions on applied superconductivity* 12.1 (2002), pp. 403–406.
- [54] N. Mitchell et al. “The ITER magnets: Design and construction status”. In: *IEEE transactions on applied superconductivity* 22.3 (2011), pp. 4200809–4200809.
- [55] Min Liao et al. “Prototype engineering test platform of ITER magnet gravity support”. In: *Plasma Science and Technology* 15.2 (2013), p. 192.
- [56] V. Corato et al. “The DEMO magnet system–Status and future challenges”. In: *Fusion engineering and design* 174 (2022), p. 112971.
- [57] Luca Piacentini et al. “Literature Review of Suspension Systems for Superconducting Elements”. In: *Machines* 11.10 (2023). ISSN: 2075-1702. DOI: [10.3390/machines11100929](https://www.mdpi.com/2075-1702/11/10/929). URL: <https://www.mdpi.com/2075-1702/11/10/929>.
- [58] Xin-Jun Liu and Jinsong Wang. “Parallel kinematics”. In: *Springer Tracts in Mechanical Engineering* (2014).
- [59] Matteo-Claudio Palpacelli et al. “Functional Design of a 6-DOF Platform for Micro-Positioning”. In: *Robotics* 9.4 (2020), p. 99.
- [60] Giovanni Legnani et al. “A new isotropic and decoupled 6-DoF parallel manipulator”. In: *Mechanism and Machine Theory* 58 (2012), pp. 64–81.
- [61] Luca Piacentini et al. “Design of a 6-supports exactly constrained supporting system for superconducting magnets and its application to rotating gantries for cancer therapy”. In: *Meccanica* (2024), pp. 1–24.
- [62] Colin Caprani. *Virtual Work 3rd Year Structural Engineering*. 2010. URL: <https://www.colincaprani.com/files/notes/SAIII/Virtual%20Work%201011.pdf> (visited on 10/23/2024).
- [63] Sanjay Govindjee. *Engineering mechanics of deformable solids: a presentation with exercises*. Oxford University Press, USA, 2012.
- [64] Luca Piacentini et al. “Lumped Parameter Model for Structural Analysis of Over-Constrained Multi-Legged Parallel Mechanism Supporting System Applied to Cryogenic Devices.” In: *Machines* 13.2 (2025).
- [65] National Institute of Standards and Technologies. *Properties of solid materials from cryogenic to room-temperatures*. URL: <https://trc.nist.gov/cryogenics/materials/materialproperties.htm> (visited on 04/19/2023).

- [66] Stephanie Forrest. “Genetic algorithms”. In: *ACM computing surveys (CSUR)* 28.1 (1996), pp. 77–80.
- [67] Darrell Whitley, Soraya Rana, and Robert B Heckendorn. “The island model genetic algorithm: On separability, population size and convergence”. In: *Journal of computing and information technology* 7.1 (1999), pp. 33–47.
- [68] Patxi Duthil. “Material properties at low temperature”. In: *arXiv preprint arXiv:1501.07100* (2015).
- [69] Simone Savazzi et al. “Optimization of a carbon-ion gantry layout based on simulated mechanical errors”. Under submission.
- [70] M. G. Pullia et al. “Gantries for carbon ions”. In: *Health and Technology* (2024), pp. 1–11.
- [71] *Transport Information Service*. German Insurance Association. URL: https://www.tis-gdv.de/tis_e/verpack/verpackungshandbuch/03verpackungshandbuch_0131-htm/ (visited on 01/10/2025).
- [72] Péter Böröcz. “Vibration and acceleration levels of multimodal container shipping physical environment”. In: *Packaging Technology and Science* 32.6 (2019), pp. 269–277.



Luca Piacentini dzimis 1996. gadā Brešā, Itālijā. Brešas Universitātē ieguvis bakalaura grādu mehānikas un rūpnieciskajā inženierzinātnē (2018) un maģistra grādu mehānikas inženierzinātnē (2021). Kopš 2021. gada ir Rīgas Tehniskās universitātes zinātniskais asistents. Savus pētījumus pārsvarā veicis ārzemēs, CERN. Patlaban strādā uzņēmumā "T. I. S. Service S. p. A", ieņemot projektu inženiera amatu. Zinātniskās intereses ietver mehānisko konstrukciju projektēšanu un sistēmu optimizāciju sociālajās lietojumprogrammās.