RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE

Mašīnzinību, transporta un aeronautikas fakultāte Mehānikas un mašīnbūves institūts

Oļegs Jakovļevs

Doktora studiju programmas "Inženiertehnika, mehānika un mašīnbūve" doktorants

DINAMISKO PROCESU ANALĪZE KRIOSTATOS AR ELEKTROMAŠĪNU DZESĒŠANU

Promocijas darbs

Zinātniskais vadītājs profesors Dr. habil. sc. ing. JĀNIS VĪBA

RTU Izdevniecība Rīga 2019

ANOTĀCIJA

Mūsdienīgā gamma spektrometrija sniedz unikālās iespējas dažādu pētījumu veikšanai daudzās zināšanu jomās. Pašlaik tiek izmantoti dažādi gamma detektoru tipi, kuru vidū līdera pozīciju ieņem pusvadītāju detektori (PVD) no īpaši tīrā germānija (ĪTG). Šo detektoru pamatīpatnība ir nepieciešamība dzesēt germānija monokristālu līdz šķidrā slāpekļa temperatūrai. Līdz ar tirgū pieejamo elektromašīnu dzesētāju (EMD) rašanos, ĪTG gamma spektrometru izstrāde kļuva iespējama uz tādu dzesētāju pamata.

Šajā darbā pētāmā gamma spektrometra pamatu veido kriostats ar EMD. Darba pamatu nosaka dinamisko blakusprocesu analīze, ar nolūku izstrādāt komplekso kriostatu projektēšanas pieeju, kas ļauj samazināt elektromašīnu dzesētāju tipveida trūkumu ietekmi. Pētījuma objekts ir kriostata ar ĪTG detektoru un elektromašīnu dzesētāju dinamiskais siltuma un mehāniskais modeļi.

Ierobežotā EMD dzesēšanas jauda, kuras dēļ rodas paaugstinātās prasības pret siltuma pieplūdes uz kriostatu samazināšanos, prasa detalizēto kriostata ar EMD siltuma modeļa analīzi un siltuma pieplūdes uz kriostatu samazināšanās pamatceļu atklāšanu.

Mehāniskās svārstības, kuru avots ir EMD, izraisa gan paša ĪTG detektora, gan arī kriostata vāka vibrācijas. Elektriskās ķēdes parametru izmaiņas, kuras izraisīja mehāniskās vibrācijas, satricinājumi un, it sevišķi, skaņas svārstības, veicina traucējumu rašanos gamma spektrometriskas aparatūras darbībā, kas pasliktina ĪTG spektrometra izšķirtspēju.

Darbā tiek aplūkots matemātiskais kriostata ar ĪTG detektoru dzesēšanas dinamikas modelis un iegūto rezultātu salīdzināšana ar modeli, kas ir izveidots uz GEM pamata. Tika veikta verifikācija eksperimentālā veidā.

Tika veikta galveno kriostata svārstību sistēmu modālā analīze, kuras rezultāti ir eksperimentāli pārbaudīti.

Tika piedāvāta kompleksā kriostatu ar EMD projektēšanas pieeja, uz kuru pamata tika modificēti gamma spektrometru ražojamie paraugi.

АННОТАЦИЯ

Современная гамма-спектрометрия предоставляет уникальные возможности для проведения различных исследований во многих областях знаний. В настоящее время используются различные типы гамма-детекторов, среди которых лидирующее положение занимают полупроводниковые детекторы (ППД) из особо чистого германия (ОЧГ). Основной особенностью этих детекторов является необходимость охлаждения монокристалла германия до температуры жидкого азота. С появлением доступных на рынке электромашинных охладителей (ЭМО) возможной стала разработка ОЧГ гамма-спектрометров на базе таких охладителей.

Основу гамма-спектрометра, изучаемого в данной работе, составляет криостат с ЭМО. Основу работы определяет анализ сопутствующих динамических процессов с целью выработать комплексный подход проектирования криостатов, позволяющий снизить влияние типовых недостатков электромашинных охладителей. Объектом исследования являются динамические тепловая и механическая модели криостата с ОЧГ детектором и электромашинным охладителем.

Ограниченная мощность охлаждения ЭМО, из-за которой возникают повышенные требования к снижению теплопритока в криостат требует детального анализа тепловой модели криостата с ЭМО и выявления основных путей по уменьшению теплопритока в криостат.

Механические колебания, источником которых является ЭМО, вызывают вибрации как самого ОЧГ детектора, так и крышки криостата. Изменения параметров электрической цепи, вызванное механическими вибрациями, сотрясениями и, в частности, звуковыми колебаниями приводит к возникновению помех в работе радиоэлектронной аппаратуры, ухудшающее разрешение ОЧГ спектрометра.

В работе рассматривается математическая модель динамики охлаждения криостата с ОЧГ детектором и сравнение полученых результатов с созданной моделью на основе МКЭ. Проводится верификация экспериментальным путем.

Проведен модальный анализ основных колебательных систем криостата, результаты которого проверены экспериментально.

Предложен комплексный подход к проектированию криостатов с ЭМО на основе которого модифицированы образцы выпускаемой ЯФА.

ABSTRACT

Modern gamma spectrometry provides unique opportunities for various studies in many areas of knowledge. Currently, various types of gamma detectors are used, among which semiconductor detectors from high-purity germanium (HPGe) occupy a leading position. The main feature of these detectors is the need to cool the HPGe crystal up to the liquid nitrogen temperature. With the advent of commercially available electromashine coolers (EMC), the development of HPGe gamma spectrometers based on such coolers became possible.

The basis of the gamma spectrometer studied in this work is a cryostat with EMC. The basis of the work is determined by the analysis of related dynamic processes in order to develop an integrated approach to the design of cryostats, allowing to reduce the effect of typical shortcomings of electromechanical coolers. The object of the study are dynamic thermal and mechanical models of a cryostat with an HPGe detector and an electric electromechanical cooler.

The limited cooling capacity of EMC, due to which there are increased requirements for reducing the heat loss in the cryostat, requires a detailed analysis of the thermal model of the cryostat with EMC and identifying the main ways to reduce the heat loss in the cryostat.

Mechanical fluctuations, the source of which is EMC, cause vibrations of the HPGe detector itself and the cryostat cover. Changes in the electrical circuit parameters caused by mechanical vibrations, shocks, and, in particular, sound vibrations lead to interference in the operation of electronic equipment, which degrades the resolution of the HPGe gamma spectrometer.

The work considers a mathematical model of the cooling dynamics of a cryostat with an HPGe detector and a comparison of the obtained results with the created model based on the FEM. Verification is performed experimentally.

A modal analysis of the basic oscillatory systems of the cryostat was carried out, the results of which were verified experimentally.

An integrated approach to the design of cryostats with EMC on the basis of which the samples of produced scientific equipment are modified.

PATEICĪBAS VĀRDI

Darba autors izsaka sirsnīgu pateicību zinātniskajam vadītājam Dr. habil. sc. ing., profesoram Jānim Vībam par atbalstu visā doktorantūras laika periodā, kas veicināja darba autora zinātniskā potenciāla attīstību. Pateicība par piedalīšanos iegūto rezultātu apspriešanā un par palīdzību darba noformēšanā.

Dziļa pateicība tiek izteikta kompānijas *Baltic Scientific Instruments* prezidentam, Dr. sc. ing. Vladimiram Gostilo par atbalstu un palīdzību, kas vecināja darba autora personības un karjeras attīstību.

Sirsnīga pateicība kompānijas *Baltic Scientific Instruments* kolektīvam par piedalīšanos un palīdzību šī darba izpildīšanā.

Pateicība *RTU SSĀSD* un īpaši Dr. sc. ing., profesoram Igoram Tipānam par atbalstu visā doktorantūras laika periodā.

Pateicība RTU Zinātņu prorektora dienestam par atbalstu promocījas darba izstradē.

Pateicība *RTU* Zinātniskās skaitļošanas centram par zinātniskās programmatūras nodrošīnašanu pētniecībai.

TERMINI UN APZĪMĒJUMI

- **BSI** Baltic Scientific Instruments
- EMD elektromašīnu dzesētājs
- ITG īpaši tīrs germānijs
- ➢ KFA − kodolfizikas aparatūra
- REA radioelektronikas aparatūra
- ➢ AES − atomelektrostacija
- EDV elektrodinamiskā vibroiekārta
- > AFR amplitūdas-frekvenču raksturlīkne
- DSI daudzslāņainā izolācija
- LK lietderības koeficients
- DKA daudzkanālu analizators
- GEM galīgo elementu metode

SATURA RĀDĪTĀJS

ANOTĀCIJA	
АННОТАЦИЯ	
ABSTRACT	
PATEICĪBAS VĀRDI	
TERMINI UN APZĪMĒJUMI	6
SATURA RĀDĪTĀJS	7
TĒMAS AKTUALITĀTE	
DARBA MĒRĶIS UN GALVENIE UZDEVUMI	
PĒTIJUMA OBJEKTS	
PĒTIJUMA HIPOTEZES	
ZINĀTNISKĀ NOVITĀTE	
DARBA REZULTĀTU PRAKTISKĀ IZMANTOŠANA	
PUBLIKĀCIJAS	
DARBA STRUKTŪRA UN GALVENIE REZULTĀTI	
AIZSTĀVĒŠANAI IZVIRZĪTĀS TĒZES	
IEVADS	
1. ZINĀTNISKA APARATŪRA AR ĪTG DETEKTORIEM	
1.1. ĪTG gamma spektrometru paveidi ar vienotu struktūru	
1.2. Vispārīgā gamma spektrometra struktūra uz ĪTG detektoru pamata	
1.3. ĪTG detektoru dzesēšanas metodes	
1.4. Galvenas EMD priekšrocības un trūkumi	
1.5. Secinājumi	
2. DINAMISKIE PROCESI GAMMA SPEKTROMETRU KRIOSTATOS A	R EMD 21
2.1. Siltuma pieplūde gamma spektrometra kriostatā un tās samazināšanas n	netodes 21
2.1.1. Siltuma pieplūde materiālu siltumvadamības dēļ	
2.1.2. Siltuma pieplūde atliku gāzu molekulārās vadītspējas dēļ	
2.1.3. Siltuma pieplūde ar siltuma starojumu	
2.1.4. Kriostata ar ĪTG detektoru dzesēšanas dinamika	
2.2. EMD pārvadītās vibrācijas	
2.3. ĪTG detektoru parametriskā virkne	
2.4. Darba struktūra	
2.5. Secinājumi	
3. EMD VIBRĀCIJU NEGATĪVĀS IETEKMES SAMAZINĀŠANA	
3.1. Mikrofonefekta ietekme uz gamma spektrometra izšķirtspēju	
3.2. EMD darbība ar pazemināto jaudu	

3.3.	Dinamisks ĪTG detektora mezgla modelis	41
3.4.	Secinājumi	
4. KO KONST	MPLEKSĀ PIEEJA GAMMA SPEKTROMETRU KRIOSTATU AR EMD RUĒŠANAI	
4.1.	Secinājumi	
5. SIL	TUMA PROCESU MODELĒŠANA KRIOSTATOS AR EMD	
5.1.	EMD efektivitātes palielināšana	47
5.2.	EMD raksturojumu modelēšana ar termoelektrisko analoģiju palidzību	
5.3.	Kriostata ar EMD siltuma modelis	
5.4.	Kriostata ar EMD modelis ar siltumekrānu	
5.5.	Kriostata ar EMD matematiskais modelis	
5.6.	Gamma spektrometra kriostata dzesēšanas process	
5.7.	Temperatūras sadale uz siltumekrāna virsmas	
5.8.	Skaitliskie kriostata ar siltumekrānu aprēķini	61
5.9.	Kriostata dzesēšanas procesa aprēķini ar datorprogrammām	
5.10.	Eksperimentālie kriostata pētījumi ar siltumekrānu	71
5.11.	Secinājumi	75
6. RE2	ZONANŠU NOVĒRTĒJUMS KRIOSTATĀ AR EMD	76
6.1.	Kriostata mezglu modālā analīze Solidworks vidē	77
6.1.1.	Modālā analīze gredzenveida balstiem	
6.1.2.	Modālā analīze balstiem ar elastīgo plāksni	80
6.1.3.	Modālā analīze labirinta tipa balstiem	
6.2.	Detektora vāka modālā analīze	
6.3.	Siltumekrāna modālā analīze	
6.4.	ĪTG gamma spektrometra kriostata pase	
6.5.	Rezonanses aprēķina frekvenču eksperimentālā pārbaude	
6.5.1.	Eksperimentālās iekārtas apraksts	
6.5.2.	Detektora imitatora svārstību amplitūdas-frekvenču raksturlīknes dati	
6.6.	Eksperimentālais detektora vāka rezonanses frekvenču novērtējums	
6.6.1.	Zemākās rezonanses frekvences novērtējums ar triecienierosmi	
6.6.2.	Detektora vāka rezonanses ierosme ar akustisko metodi	100
6.7.	Secinājumi	101
7. RE	ZULTĀTU APROBĀCIJA	102
7.3.	Praktiskās rekomendācijas, kuras ļauj samazināt EMD tipveida trūkumu ietek	xmi. 102
7.3.1.	Siltuma pieplūdes uz kriostatu samazināšana	102
7.3.2.	EMD siltuma caurulītes korpusa dzesēšana	103
7.4.	Rekomendāciju ieviešana reālajās izstrādēs	103

7.4.1.	Portatīvā gamma spektrometra modernizēšana	
7.4.2.	Laboratorijas gamma spektrometra modernizēšana	
7.4.3.	Gamma spektrometra ar hibrīdo dzesēšanu modernizēšana	
7.5.	Secinājumi	
SECINA	JUMI	
AVOTU	U UN IZMANOTĀS LITERATŪRAS SARAKSTS	
PIELIK	UMI	
1. p	ielikums	116
2. p	ielikums	
3. p	ielikums	
4. p	ielikums	

TĒMAS AKTUALITĀTE

Tēmas aktualitāti nosaka pastāvīgi pieaugošā vajadzība pēc jaunām efektīgām identifikācijas iekārtām pasaulē, lai kontrolētu kodolobjektu un kodolatkritumu utilizēšanas vietu radiācijas līmeni, kā arī lai ar šīm iekārtām globāli monitorētu zemes, gaisa un ūdens vides teritorijas nolūkā novērst iespējamo piesārņošanu. Jaunās identifikācijas iekārtas ar elektromašīnu dzesētājiem (EMD) izmanto īpaši tīra germānija (ĪTG) gamma detektorus dzesēšanai līdz kriogēnām temperatūrām. Tas ļauj ar šķidro slāpekli dzesējamu gamma spektrometru vietā izveidot daudz ērtākus, drošākus un ekspluatācijā vienkāršākus gamma spektrometrus. Šis aspekts ir īpaši svarīgs produktivitātes ziņā saistībā ar pastāvīgi pieaugošo personāla skaitu, kas izmanto, uzrauga un ekspluatē līdzīgas iekārtas visā pasaulē.

DARBA MĒRĶIS UN GALVENIE UZDEVUMI

Darba mērķis ir izpētīt dinamiskos procesus kriostatos ar elektromašīnu dzesēšanu un uz iegūto materiālu bāzes modernizēt esošās iekārtas un izstrādāt principiāli jaunas gamma identifikācijas iekārtas. Saistībā ar darba mērķi tika atrisināti vairāki uzdevumi.

1. Analizēta, izpētīta un novērtēta zinātniskā aparatūra ar īpaši tīriem germānija (ĪTG) detektoriem.

2. Aplūkoti, analizēti siltuma procesi un mehāniskās vibrācijas dinamiskajos procesos gamma spektrometru kriostatos ar EMD.

3. Analizētas iespējas un izstrādātas rekomendācijas elektromašīnu dzesētāju vibrāciju negatīvās ietekmes samazināšanai.

4. Izstrādāts un aprakstīts tehniskais uzdevums blokshēmas formā kompleksai pieejai gamma spektrometru kriostatu ar elektromašīnu dzesētāju konstruēšanai.

5. Izstrādāta metodika, veikti modelēšanas aprēķini ar datorprogrammu *MathCAD* un *Solidworks Simulation*, kā arī veikti eksperimenti siltuma procesu modelēšanai kriostatos ar elektromašīnu dzesētāju.

6. Veikta modālā analīze ar datorprogrammu *Solidworks* un eksperimentāli pētījumi rezonanšu novērtējumam kriostatā ar elektromašīnu dzesētāju.

7. Modernizēti esošie un *Solidworks* vidē izstrādāti gamma spektrometru jauni kriostati ar elektromašīnu dzesētājiem.

PĒTIJUMA OBJEKTS

Pētījuma objekts ir kriostatu ar ĪTG detektoru un elektromašīnu dzesētāju (EMD) siltuma un mehāniskie modeļi, kuru kustību un procesus tajos apraksta ar mehānikas un siltumtehnikas diferenciālvienādojumu sistēmām, lietojot mūsdienīgas datorprogrammas.

PĒTIJUMA HIPOTEZES

- 1. Darbā tika izstrādāts kriostata ar elektromašīnu dzesētāju un siltumekrānu dinamiskais siltuma modelis, kas ir sastādīts ar termoelektrisko analoģiju hipotēzes palīdzību.
- Tika sastādīts siltumekrāna aprēķina modelis uz klasiskās matemātikas diferenciālvienādojumu sistēmas hipotēžu bāzes, aprēķināta temperatūras sadalīšanās uz detektora siltumekrāna.
- 3. Ar *Solidworks* programmas fundamentālo hipotēžu tīklojuma palīdzību tika veikta detektora balstu un detektora vāka modālā analīze.
- 4. Teorētiskās hipotēzes par simulācijas rezultātu ticamību ir verificētas ar eksperimentālo pārbaudi, izmantojot elektrodinamisko vibroiekārtu *VBЭ-1-004*.
- 5. Darbā tika izmantota īpaši tīra sertificēta germānija detektoru parametriskā virkne, ko lieto gamma spektrometros ar EMD.
- 6. *Solidworks* vidē tika veikts kriostata pārejas dzesēšanas procesa novērtējums un verificēts ar eksperimentāli iegūto reāla kriostata dzesēšanas laikā.

ZINĀTNISKĀ NOVITĀTE

Zinātnisko darba novitāti nosaka šādi rezultāti:

- 1. pamatojoties uz enerģētiskās bilances vienādojumu, ir sastādīts kriostata ar elektromašīnas dzesēšanu matemātiskais modelis;
- 2. modelis, ko apraksta nelineāra diferenciālvienādojumu sistēma, atrisināts, analizēts un optimizēts;
- iegūti rezultāti, kas apraksta temperatūras sadalījumu uz siltumekrāna virsmas; tas atļauj noteikt siltuma pieplūdes un vadīšanas ietekmi atkarībā no molekulārās atlieku gāzes kriostatā vadītspējas;
- 4. iegūti jauni rezultāti par efektīvo siltuma plūsmas samazināšanos uz detektora, izmantojot siltumekrānu (ne tikai augstā, bet arī vidējā vakuuma apvidū);
- 5. veikta gamma spektrometra kriostata modālā analīze, un iegūta pamatsistēmu frekvenču pase, ar kuru palīdzību par iespējamu kļūst mikrofonefekta avota noteikšana.

DARBA REZULTĀTU PRAKTISKĀ IZMANTOŠANA

Darba rezultātu praktiskā izmantošana iekļauj esošo gamma spektrometru analīzi, modernizāciju un jaunu gamma spektrometru izstrādi. Tā rezultātā modernizēti un izstrādāti jauni gamma spektrometri ar noteiktu lietojumu un veidu:

- 1. portatīvie gamma spektrometri lauku lietojumiem;
- 2. mācību un zinātniskajiem laboratorijas darbiem;
- 3. laboratorijas un industriālie gamma spektrometri ar hibrīda dzesēšanas tipu.

Izgatavotie gamma spektrometri tiek izmantoti Ķīņā, Vācijā, Japanā, Krievijā, Indijā, Taizemē, Singapurā, daži spektrometri – kosmosa tehnoloģijās *ESA* projektā.

PUBLIKĀCIJAS

Par darba tēmu ir sagatavotas 15 publikācijas, septiņas no tām ir publicētas zinātnisko rakstu bāzē *Scopus*, septiņas publikācijas publicētas starptautiskajos zinātniskajos žurnālos. Darbi prezentēti starptautiskajās konferencēs Latvijā, Krievijā, Čehijā, Francijā, Bulgārijā, Taizemē.

Publikācijas zinātniskajos žurnālos

- Kondratjev, V., Pchelintcev, A., Jakovlevs, O., Sokolov, A., Gostilo, V., Owens, A. Performance of a Miniature Mechanically Cooled HPGe Gamma-Spectrometer for Space Applications. Journal of Instrumentation, 2018, Vol. 13, January 2018, 1.–13. lpp. e-ISSN 1748-0221. Pieejams: doi:10.1088/1748-0221/13/01/T01002.
- Jakovlevs, O., Pchelintcev, A., Malgin, V., Sokolov, A., Gostilo, V. Development of Miniaturized HPGe Spectrometers for Unmanned Aerial Vehicles. Journal of Instrumentation, 2018, Vol. 13, Article number T06006. e-ISSN 1748-0221. Pieejams: doi:10.1088/1748-0221/13/06/T06006.
- 3. **Jakovļevs, O.**, Malgin, V., Gostilo, V. Разработка унифицированного спектрометрического модуля на основе ОЧГ-детекторов с электромашинным охлаждением. Nuclear and Radiation Safety, 2018, 03, 1.–1. lpp. ISSN 2073-6231.
- 4. Jakovļevs, O., Malgins, V., Vība, J. Modal Analysis of HPGe Detector Assembly in Gamma-ray Spectrometers. Vibroengineering PROCEDIA, 2017, Vol. 16, 61.–66. lpp. ISSN 2345-0533. Pieejams: doi:10.21595/vp.2017.19205.
- Kondratjev, V., Gostilo, V., Owens, A., Jakovlevs, O., Vība, J. Vibration Characteristics of Miniature Stirling Electric Coolers. Vibroengineering Procedia, 2016, Vol. 8, 409.– 413. lpp. ISSN 2345-0533.
- Tkaczyk, A., Malgins, V., Jakovlevs, O., Jeltsov, M., Primagi, P. Development and CFD Simulation of Cryostat Thermal Shielding for a Portable HPGe Gamma Spectrometer. Applied Thermal Engineering, 2019, Vol. 1 No. 1, 1.–17. lpp. ISSN 1359-4311.
- Pčelintcev, A., Lupilov, A., Nurgaleev, R., Jakovlevs, O., Sokolov, A., Gostilo, V., Owens, A. A Miniature Compact HPGe Gamma-Spectrometer for Space Applications. Journal of Instrumentation, 2017, Vol. 12, 1.–9.lpp. e-ISSN 1748-0221. Pieejams: doi:10.1088/issn.1748-0221.
- 8. **Jakovļevs, O.**, Malgins, V., Vība, J. Stirlinga cirkla rotoru elektrodzesētāju vibrāciju analīze. No: RTU. Pieņemts publicēšanai: 2017, 1.–8. lpp.

Raksti pilna teksta konferenču rakstu krājumā

- Jakovļevs, O., Malgins, V., Vība, J. Thermal Modeling of Cooldown Processes in Portable HPGe Spectrometers. No: Recent Trends in Engineering and Technology (RTET-17): 6th International Conference, Francija, Parīze, 25.–26. aprīlis, 2017. 92.–98. lpp. ISBN 978-81933894-2-3.
- Jakovļevs, O., Vība, J., Gostilo, V., Jefremova, N. Computer Design of Precise Spectrometric Equipment with Innovative Cooling Systems. No: 2nd Scientific Congress "Innovations in Engineering 2016": Scientific Proceedings, Bulgārija, Varna, 20.–

23. jūnijs, 2016. Scientific-Technical Union of Mechanical Engineering, 34.–36. lpp. ISSN 1310-3946.

- Jakovļevs, O., Vība, J., Gostilo, V., Jefremova, N. Simulation and Design of Radiation Shielding and Collimation Systems for the Precise Gamma-Spectrometric Equipment. No: Proceedings of International Conference on Innovative Technologies, Čehija, Prāga, 6.– 8. septembris, 2016. University of Rijeka, 2016, 23.–26.lpp. ISSN 1849-0662.
- Jakovļevs, O., Malgins, V., Vība, J. Исследования вибрационных характеристик блока детектора портативного спектрометра с электромашинным охлаждением. No: Scientific Proceedings of the Scientific-Technical Union of Mechanical Engineering, Bulgārija, Borovets, 12.–15. decembris, 2016. Scientific-Technical Union of Mechanical Engineering, 36.–39. lpp. e-ISSN 1310-3946.
- Jakovļevs, O., Vība, J., Gostilo, V. Разработка систем охлаждения полупроводниковых детекторов гамма-излучения на основе электромашинных охладителей. No: XXVII Международная Инновационно-ориентированная конференция молодых учёных и студентов МИКМУС-2015: труды конференции, Krievija, Maskava, 2.–4. decembris, 2015. ИМАШ РАН, 265.–268. lpp.
- Tkaczyk, A., Jeltsov, M., Malgins, V., Jakovļevs, O., Priimagi, P. Cooperative Development of a Handheld Spectrometer for Radiation Detection in the Context of the Estonia-Latvia "Hadede" Project. No: LU 77. Starptautiskā zinātniskā konference. Analītiskās un Fizikālās ķīmijas sekcija, Latvija, Rīga, 8. februāris, 2019. Rīga: Latvijas Universitāte, 1.–2. lpp.
- Jakovļevs, O., Malgins, V., Gostilo, V., Vība, J. Constructive and Technological Aspects of the Development of Cryostats for HPGe Detectors with Electric Cooling. No: European Planetary Science Congress 2017: EPSC Abstracts. Vol.11, Latvija, Riga, 17.– 22. septembris, 2017, 1.–2. lpp.

DARBA STRUKTŪRA UN GALVENIE REZULTĀTI

Darbā ir ievads, septiņas nodaļas, kurās iekļauts literatūras apskats, aprēķina un eksperimentālā daļa. Darba noslēgumā doti galvenie secinājumi un izmantoto literaturas avotu saraksts. Darba apjoms – 130 lpp., 87 attēli, 19 tabulu, 72 literatūras avoti, četri pielikumi.

AIZSTĀVĒŠANAI IZVIRZĪTĀS TĒZES

- 1. Gamma spektrometra kriostata ar elektromašīnas dzesēšanu matemātiskais modelis un to rezultāti par efektīvo siltuma plūsmas samazināšanos uz detektora, izmantojot siltumekrānu (ne tikai augstā, bet arī vidējā vakuuma apvidū).
- 2. Gamma spektrometra kriostata modālā analīze un pamatsistēmu frekvenču pase, ar kuru palīdzību ir iespējams noteikt mikrofonefekta avotu.
- 3. Praktiskais lietojums, kas iekļauj esošo gamma spektrometru analīzi, modernizāciju un jaunu gamma spektrometru izstrādi.

IEVADS

Mūsdienīgā gamma spektrometrija dod unikālās iespējas dažādu pētījumu veikšanai daudzās zināšanu jomās: atomenerģētikā, apkārtējās vides aizsardzībā, medicīnā un ģeoloģijā, tai skaitā, veicot mērījumus kosmosa izpētes jomā. Spektrometrijas pamatuzdevums ir noteikt enerģiju, intensitāti no dažādiem gamma avotiem, to identifikāciju un lokalizāciju.

Taču dabiskā un mākslīgā fonu esamība, gamma starojuma izkliedēšanas un absorbcijas procesi vidē, detektējošās aparatūras nepilnība būtiski sarežģī šī uzdevuma risinājumu. Tāpēc, lai droši atklātu gamma līnijas no dažādiem radionuklīdiem, gamma spektrometrijai ir nepieciešami aparāti, kuriem ir laba enerģētiskā izšķirtspēja, liela ātrdarbība, augsta efektivitāte saistībā ar reģistrāciju pēc pilnīgās absorbcijas maksimuma, labi ekspluatācijas parametri (tādi, kā ekspluatācijas vienkāršums, drošums, ilgmūžība u. c.), izturība pret ārējo faktoru iedarbību, zemā vērtība.

Pašlaik tiek izmantoti dažādi gamma detektoru tipi: pusvadītāju, scintilācijas, plastikāta, šķidruma, gāzu u.c. Tie būtiski atšķiras gan pēc savām spektrometriskām īpašībām, gan pēc ekspluatācijas raksturojumiem, pēc izgatavošanas tehnoloģijas un vērtības. Gamma spektrometru vidū līderpozīciju, neapšaubāmi, ieņem pusvadītāju detektori (turpmāk - PVD) no īpaši tīrā germānija (turpmāk - ĪTG). Šo detektoru galvenās īpašības ir nepieciešamība dzesēt germānija monokristālu līdz šķidrā slāpekļa temperatūrai.

Tāpēc jauno spektrometru tipu izstrāde ir aktuāla, neizmantojot šķidro slāpekli, kuriem ir laba enerģētiskā izšķirtspēja, pēc iespējas vienkāršo un ilgmūžīgo, kuriem ir augsts jūtīgums, labas ekspluatācijas īpašības, zemā pašizmaksa, un kuri saglabā savus parametrus plašā apkārtējās vides raksturojumu diapazonā.

Vadošās kompānijas *Mirion Technologies* [1] un *ORTEC* [2] zinātniskās aparatūras ražošanas jomā daudzu gadu laikā izgatavo augstas kvalitātes ĪTG gamma spektrometrus, tai skaitā arī ar elektromašīnu dzesēšanu (turpmāk - EMD), un ar līderu tiesībām šajā industrijā var uzdot tendenci pasaules tirgū. Latvijas kompānija *Baltic Scientific Instruments* (turpmāk - BSI) [3] jau 25 gadu laikā specializējas kodolfizikas iekārtu (turpmāk - KFI), tai skaitā arī ĪTG detektoru izstrādē un ražošanā, izmantojot šķidro slāpekli. Līdz ar tirgū pieejamo EMD rašanos, par vienu no kompānijas stratēģiskiem virzieniem kļuva ĪTG gamma spektrometru izstrāde uz tādu dzesētāju bāzes. *BSI* atrodas tikai ceļa sākumā saistībā ar EMD ieviešanu iekārtu sastāvā ar ĪTG detektoriem, un šī darba autoram bija liels gods būt par *BSI* vadošo inženierkonstruktoru zinātniskās aparatūras ar elektromašīnu dzesēšanu izstrādes jomā.

Šajā darbā izpētāmā gamma spektrometra pamatu sastāda kriostats ar EMD un to dinamisko procesu analīze, ar nolūku izstrādāt kriostatu konstruēšanas komplekso pieeju, kas ļauj samazināt tipisko EMD trūkumu ietekmi. Pētījuma objekts ir kriostata ar ĪTG detektoru un EMD dinamiskie siltuma un mehāniskais modeļi, kurā procesus apraksta ar diferenciālo vienādojumu sistēmām.

1. ZINĀTNISKA APARATŪRA AR ĪTG DETEKTORIEM

Uz ĪTG detektoru pamata tiek izlaists plašs aparatūras klasts, lai veiktu radionuklīdu precīzijas analīzi atomenerģētikā un apkārtējās vides aizsardzībā, medicīnā un ģeoloģijā, zinātniskajos pētījumos un dažādos citos uzdevumos. Lai nodrošinātu savus lieliskos raksturojumus, ĪTG detektoram ir jābūt dzesētam līdz temperatūrām 80-100K robežās [4].

Ilgus gadus par tādas aparatūras pamatkomponenti, kā dzesētājs, bija Djuāra trauks ar šķidro slāpekli. Atkarībā no ĪTG spektrometra veida, Djuāra trauka tilpums varētu variēties no vairākiem litriem līdz vairākiem desmitiem litru, bet atsevišķajos gadījumos arī tika komplektēts ar papildus traukiem šķidrā slāpekļa pārliešanai.

Gamma spektrometru izstrāde un konstruēšana uz ĪTG detektoru pamata tiek uzskatīta par vienu no sarežģītākajiem inženierzinātniskajiem uzdevumiem. To nosaka tas, ka tāda tipa spektrometru ražošana iekļauj sevī vakuuma tehnikas, kriogēnikas, mehānikas, termodinamikas un elektronikas, spektrometrijas, programmēšanas un automātikas uzdevumus. Pasaules praksē ir zināmas tikai dažas ĪTG gamma spektrometru izstrādes un ražošanas kompānijas. Par līderēm šajā jomā, kuras uzdod pamattendences, ir kompānijas *Mirion Technologies* [1] un *ORTEC* [2], kas bāzējas ASV. Tāpat arī ar ĪTG spektrometru izstrādi un ražošanu nodarbojas vienīgā Eiropā kompānija *Baltic Scientific Instruments* (Latvija) [3].

1.1. **ĪTG gamma spektrometru paveidi ar vienotu struktūru**

Kā ir parādīts 1.1. att., gamma spektrometrs uz ĪTG detektora pamata var izskatīties dažādi, taču tāda aparatūras tipa struktūra paliek aptuveni vienāda. Atkarībā no pielietošanas jomas un izvirzītiem uzdevumiem, gamma spektrometra perifērija var būt aprīkota ar dažāda veida mehāniskiem elementiem, tai skaitā integrēta industriālajā vai robotizētajā sistēmā, kas ir ĪTG spektrometra masas un gabarīta raksturojumu samazināšanās lietderības papildrādītājs.

Ar nolūku noteikt tendences un piemērojamos risinājumus, tika veikts apskats saistībā ar šajā jomā līderu ražojamo produkciju uz ĪTG detektoru pamata (1.2. att.). Pēc analīzes rezultātiem tika noskaidrotā EMD pielietošanas tendence gan laboratorijas tipa, gan arī portatīva tipa zinātniskās aparatūras sastāvā.

Kā ir parādīts 1.1. att. un 1.2. att., Djuāra trauks ar šķidro slāpekli sastāda lielāko ĪTG spektrometra daļu un apgrūtina ierīces automatizāciju sakarā ar to, ka viņu ir nepieciešams uzpildīt ar šķidro slāpekli. Tāda tipa ierīces prasa cilvēkresursus apkopē un nevar būt pielietojamas cilvēka dzīvei ekstremālajos apstākļos, tādos kā palielināts radioaktīvais fons, augstie vai zemie apkārtējās vides temperatūras diapazoni, grūti pieejamās vietas u. c. Pārejas aktualitāte no klasiskās dzesēšanas metodes, izmantojot šķidro slāpekli, pie ĪTG detektoru dzesēšanas ar EMD palīdzību ir ne tikai aparatūras modernizēšanas ceļš, izmantojot mūsdienīgās tehnoloģijas, bet arī paplašinot ĪTG spektrometru iespējas un raksturojumus. Tāda pāreja ir kompleksais inženieruzdevums, līdz ar tehnisko grūtību rašanos no vakuuma tehnikas un kriogēnikas jomām.



Industriālie spektrometri

1.1.att. ĪTG gamma spektrometru paveidi ar vienādu struktūru, ko ražo kompānija BSI [3].



1.2. att. Kompānijas Mirion Technologies (pa kreisi) и ORTEC (pa labi) ražojamie ĪTG spektrometri.

1.2. Vispārīgā gamma spektrometra struktūra uz ĪTG detektoru pamata

Gamma starojums ir viens no visvairāk iekļūstošiem starojumu veidiem. Gamma kvantu enerģija ir svarīgs parametrs, kurš nosaka iekļūšanas dziļumu un to mijiedarbības ar vidi raksturu. Gamma spektrometrs ir ierīce gamma starojuma enerģētiskā spektra (gamma kvantu) noteikšanai. Pamatojoties uz iegūto enerģētisko spektru, tiek noteikts to veidojošo radioizotopu kopums, to intensitāte un, atbilstoši, to pussairšanas periods.

Spektrometra darbības pamatā ir ĪTG detektora apjomā nokļūstošo gamma kvantu enerģijas princips saistībā ar pārveidošanos par elektriskiem impulsiem ar amplitūdu, kura ir proporcionāla to enerģijai. Jūtīguma palielināšanas nolūkā ĪTG detektors tiek dzesēts līdz zemam (80-100K) temperatūrām. Pēc ĪTG detektora izejā saņemto impulsu pastiprināšanas un apstrādāšanas notiek to reģistrācija ar daudzkanālu amplitūdas analizatoru (turpmak - DKA). Atkarībā no impulsa amplitūdas (t. i., iekļūstošā gamma kvanta enerģijas), to skaita aprēķins tiek veikts noteiktajā analizatora kanālā. Tādējādi notiek ne tikai radionuklīdu identificēšana un kvalitatīvā gamma starojuma sastāva noteikšana, bet arī tā komponenšu intensitātes noteikšana. Gamma spektrometra struktūrshēma ir minēta 1.3.att.

Gamma spektrometrs nodrošina augsti jūtīgo gamma starojuma spektru mērīšanu plašā enerģētiskajā diapazonā ar augstu izšķirtspēju.



1.3.att. Gamma spektrometra struktūra uz ĪTG detektoru pamata.

1.3. ĪTG detektoru dzesēšanas metodes

Daudzus gadus ĪTG detektoru dzesēšanas klasiskā metode bija dzesēšana ar šķidro slāpekli. Slāpekļa glabāšanai izmanto Djuāra traukus, kuriem ir salīdzinoši lieli gabarītizmēri, kuri saistīti ar daudzslāņainās izolācijas izmantošanu trauka vakuuma starpdobumā. Līdz ar to, uzdevumu virknē, kur ir jāizmanto ĪTG detektori, šķidrā slāpekļa pielietošana ir apgrūtināta, vai nu nav iespējama. Pie tādiem uzdevumiem ir attiecināmas atomelektrostaciju (turpmak – AES) cauruļu radioaktīvo atkritumu kontrole vai radioaktīvo aerosolu reģistrācija gaisā, ko fiksē radiācijas monitoringa stacijas u. tml. Izņemot tehniskos ierobežojumus saistībā ar Djuāra trauku izmantošanu, svarīga ir cilvēka dzīvibas drošība, jo ir bīstami lietot šķidro slāpekli. Viens no šīs problēmas risināšanas virzieniem ir ĪTG gamma spektrometru izstrāde, neizmantojot šķidro slāpekli kā ĪTG detektora dzesētāju.

Mazgabarīta un, tajā pašā laikā, drošo un diezgan jaudīgo elektromašīnu dzesētāju (EMD) parādīšanās tirgū atklāja izstrādes perspektīvu, pielietojot tos plašam gamma spektrometriskās aparatūras (uz ĪTG detektoru pamata) klastam. Gamma spektrometra uz ĪTG detektoru pamata, izmantojot šķidro slāpekli un EMD, salīdzinošā struktūra ir parādīta 1.4.att.



1.4.att. ĪTG detektoru dzesēšanas metodes.

EMD izmantošana dod priekšrocības, izveidojot ekspluatācijā ērtos portatīvos gamma spektrometrus, kuri ir paredzēti darbam zinātniski pētnieciskajās laboratorijās, radiācijas apstākļu monitoringam, mobilajās sistēmās u. tml. Tajā pašā laikā, tiem piemītošās vibrācijas un ierobežota dzesešanas jauda veicina nepieciešamību atrisināt jaunu uzdevumu virkni, kuri nav tik aktuāli, izveidojot ierīces ar klasisko ĪTG detektoru dzesēšanu izmantojot šķidro slāpekļi.

ĪTG spektrometru izstrāde uz EMD pamata ievieš savus kompleksos uzdevumus, kurus nosaka ierobežota EMD dzesējošā jauda un vibrācijas, kuras tiek pārraidītas no EMD kompresora caur nostiprināto pie tā kriostatu. Neraugoties uz to, EMD priekšrocības, tādas kā spektrometra gabarītu un svara samazināšana, lietotāja ērtība, drošība lietošanā, iespēja uzstādīt ierīci cilvēkam bīstamajā vidē bez vajadzības pēc apkopes un darbs jebkura telpiska stavoklī ir neapstrīdama prioritāte, izstrādājot ĪTG spektrometrus uz EMD pamata.

1.4. Galvenas EMD priekšrocības un trūkumi

Pašlaik tiek ražots plašs EMD klasts, kuri nodrošīna dzesēšanu līdz zemām temperatūrām [5], [6]. Tādus dzesētājus ražo dažādiem uzdevumu veidiem. Līdz ar kompakto un tajā pašā laikā jaudīgo EMD [7] (1.5.att.) parādīšanos, komponējums kļuva iespējams ar to ieviešanu ĪTG gamma spektrometra sastāvā. Pēdējos gados pasaules tirgū parādās pieejamie un salīdzinoši nedārgie EMD. Tāda dzesētāju tipa ražotājvalstu vidū līderes ir: ASV, Vācija, Francija, Izraēla un Ķīna.



1.5.att. Gamma spektrometros pielietojamie EMD Lihan TC4789; Sunpower CryoTel CT; Thales UP8197 [8]–[10].

Miniatūrveida un tajā pašā laikā jaudīgo EMD ražošana atklāja ĪTG spektrometru izstrādes perspektīvu uz to pamata. Taču bija vajadzīga tirgū pieejamo un ĪTG spektrometru izstrādei derīgo EMD analīze [11], [12]. Tas bija nosacīts ar to, ka sākotnēji daudzi EMD tika ražoti konkrētiem militāriem uzdevumiem un nespēja nodrošināt spektrometriskai aparatūrai izvirzītās prasības. Piemēram, miniatūrveida EMD tika izstrādāti siltumvizoru infrasarkano devēju dzesēšanai. Tāpat arī miniatūrveida EMD tika izmantoti nakts vīzijas sistēmām, ieroča tēmēšanas sistēmām, aviācijas aizsardzības sistēmām un citiem nolūkiem [13].

Analīzes rezultāti atklāja galvenos EMD trūkumus. Ierobežotā dzesēšanas jauda, zems letderības koeficients (turpmak – LK) kas parasti sastada 4-10%, un vibroaktivitāte tika atklāti kā galvenie un kritiskie trūkumi, kuri ierobežo EMD ieviešanu aparatūras ar ĪTG detektoriem sastāvā. Izņemot to, bez tā zems LK būtiski ir atkarīgs no apkārtējās vides temperatūras diapazona. Par piemēru 1.6.att. ir minētas dzesējošās jaudas atkarības no EMD siltuma caurulītes korpusa temperatūras.



1.6.att. Dzesējošās jaudas atkarības no siltuma caurulītes korpusa temperatūras *Lihan TC4189* (pa kreisi) un *Sunpower CryoTel MT* (pa labi) [8], [9].

1.5. Secinājumi

Darba Pirmajā nodaļā analizēta, izpētīta un novērtēta zinātniskā aparatūra ar īpaši tīriem germānija (ĪTG) detektoriem. Aprakstītas mūsdienīgās gamma spektrometrijas unikālās iespējas dažādu pētījumu veikšanai daudzās zināšanu jomās. Aprakstītas iespējas ĪTG gamma spektrometru izstrādē, izmantojot EMD kā ĪTG detektora dzesētāju. Aprakstītas to priekšrocības, tādas kā gamma spektrometra gabarītu un svara samazināšana, ērtība un drošība lietošanā, iespēja uzstādīt ierīci cilvēkam bīstamajā vidē bez vajadzības pēc apkopes un darbs jebkura telpiska stavoklī. Ar ko pamatota uzdevuma aktualitāte saistībā ar dinamisko procesu izpēti kriostatos ar EMD un tipisko trūkumu ietekmes samazināšanas metožu meklēšana.

2. DINAMISKIE PROCESI GAMMA SPEKTROMETRU KRIOSTATOS AR EMD

Dinamisko procesu analīzi kriostatos ar EMD var sadalīt divos pamatvirzienos:

- 1. Kriostata dzesēšanas dinamikas analīze;
- Kriostata EMD un mezglu vibroaktivitātes analīze, kas pasliktina spektrometra izšķirtspēju. Lai noteiktu līdzekļus saistībā ar cīņu pret tipveida trūkumiem, ir nepieciešama kriostata siltuma zudumu dinamiskā procesa analīze, kā arī ĪTG detektora turetaja mezgla rezonanses svārstību frekvenču novērtējums.

2.1. Siltuma pieplūde gamma spektrometra kriostatā un tās samazināšanas metodes

Viena no visasākajām problēmām kriostatos ar EMD ir to ierobežotā jauda, sakarā ar to, kļūst aktuāls uzdevums saistībā ar siltuma pieplūdi no apkārtējās vides pie dzesējamā detektora, kas nav tik aktuāli, veicot kriostatu projektēšanu, izmantojot Djuāra traukus ar šķidro slāpekli.

Kriostata ar ĪTG detektoru siltuma pieplūdes struktūrā var būt izcelti trīs komponenti kuri attēloti 2.1. att. (2.1.tabula).



2.1.att. Siltuma pieplūdes komponenti kriostatā.

Kopējo siltuma pieplūdi kriostatā (2.1. vienādojums) var izteikt šādas summas veidā:

$$Q_{total} = (Q_{1rad} + Q_{1resid}) + (Q_{2rad} + Q_{2resid} + Q_{2cond}),$$
(2.1.)

kur

 Q_{1resid} – siltuma pieplūde uz tvertni ar sorbentu atliku gāzu vadītspējas dēļ;

 Q_{1rad} – siltuma pieplūde uz tvertni ar sorbentu siltuma starojuma dēļ;

 $Q_{2\text{resid}}$ – siltuma pieplūde pie detektora tapņa atliku gāzu vadītspējas dēļ;

 $Q_{22\text{cond}}$ – siltuma pieplūde caur detektora tapņa balstiem;

 Q_{2rad} – siltuma pieplūde pie detektora tapņa siltuma starojuma dēļ.

2.1. tabula

Nr.	Siltuma pieplūdes komponenti	Apzīmējums	Samazināšanas metodes
1	Materiālu siltumvadītspēja	Q22cond	materiālu ar mazāku siltumvadītspēju lietošana; balstu konstruēšana ar pagarināto siltuma tiltiņu
2	Kriostata atliku gāzu siltumvadītspēja	$Q_{1 m resid}; \ Q_{2 m resid}$	gāzu, kas ieplūst caur blīvējumiem, samazināšanās; atliku gāzu absorbcija ar geteriem
3	Siltuma starojums	$egin{array}{c} Q_{1\mathrm{rad}};\ Q_{2\mathrm{rad}} \end{array}$	virsmas kvalitātes uzlabošana emisijas samazināšanās nolūkā; siltumekrānu lietošana

Siltuma pieplūdes komponenti

2.1.1. Siltuma pieplūde materiālu siltumvadamības dēļ

Siltuma zudumi ir proporcionāli temperatūru starpībai starp kriostata ārējo vāku un atdzesētām detaļām. Lielas temperatūras T_1 , T_2 (80-300K) starpības elementa galos dēļ, siltumvadītspējas koeficients k(T) ir mainīgs. Siltumvadītspēja caur elementu (2.2.) ar šķērsgriezumu S un garumu l var būt aprēķināta kā:

$$Q_{cond} = \frac{S}{I} \int_{T_1}^{T_2} k(T) dT,$$
 (2.2.)

kur

 Q_{cond} – siltuma pieplūde caur elementu, W; T_1, T_2 - temperatūras elementa galos, K; k(T) - siltumvadītspējas koeficients, W/mK; S - elementa šķērsgriezums, m²;

l – elementa garums, m.

Izņemot ĪTG detektora tapņa fiksācijas konstruēšanas mezglu ar minimālo siltuma pieplūdi, tiek pielietoti specializētie materiāli vakuuma un kriogēnai izmantošanai ar zemu siltumvadītspējas koeficientu. ĪTG detektoru rezultāti ar labirinta veida tapņa balstu testēšanu, izmantojot specializētos materiālus, ir pieejami zinātniskajā literatūrā [14].

2.1.2. Siltuma pieplūde atliku gāzu molekulārās vadītspējas dēļ

Parasti atliku gāzu spiediens kriostatā ir $10^{-4} - 10^{-2}$ mbar robežās un gāzes molekulu brīvā ceļa garums pārsniedz attālumu starp virsmām. Ir jāatzīmē, ka spiediens kriostatā augstāks par 10^{-2} netiek pieļauts, jo tas izraisa ĪTG detektora virsmas piesārņojumu ar gāzu molekulām. Šim spiedienu diapazonam gāzes molekulu brīvā ceļa garums λ ir lielāks par attālumu starp virsmām kriostatā [15]. Tādējādi, atbilstoši gāzu molekulāri kinētiskai teorijai (2.3.)-(2.5.), siltuma pieplūde atbilst molekulārai vadītspējai un atkarīga no gāzes atlikušā spiediena p, un nav atkarīga no attāluma.

$$Q_{resid} = \alpha B S_1 p (T_2 - T_1), \qquad (2.3.)$$

kur:

$$\alpha = 1/(\frac{1}{\alpha_1} + (\frac{1}{\alpha_2} - 1)\frac{S_1}{S_2}), \qquad (2.4.)$$

un

$$B = \frac{\gamma + 1}{\gamma - 1} \sqrt{\frac{R}{8\pi\mu T_2}},$$
 (2.5.)

kur

 Q_{resid} – siltuma pieplūde caur molekulāro vadītspēju, W;

α₁, α₂ – siltuma pieplūde piedalošos iekšējo un ārējo virsmu akomodācijas koeficienti;

S₁, S₂ – iekšējo un ārējo virsmu apgabali, kuri ir iedarbināti siltuma pieplūdei, m²;

 γ – atliku gāzes adiabātiskais indekss;

 μ – atliku gāzes molmasa, g/mol;

p – gāzes spiediens, Pa;

R – universālā gāzes konstante, vienāda ar 8,3145 J/molK.

2.1.3. Siltuma pieplūde ar siltuma starojumu

Atbilstoši Stefana-Bolcmaņa vienādojumam [16], objekta virsmas siltuma emisija ir proporcionāla tā temperatūrai ceturtajā pakāpē (2.6.). Reālajos kriostatos ar ĪTG detektoriem attālums starp kriostata vāku, siltumekrānu un detektora tapni ir diezgan mazs, salīdzinot ar garumu. Tādējādi, ir pieļaujams pirmajā tuvinājumā neievērot siltuma izkliedi gar tā malām un izmantot analītiskās formulas (2.6.); (2.7.) bezgalīgiem koaksiāliem cilindriem.

$$Q_{rad} = \varepsilon_{12}\sigma S_1 (T_2^4 - T_1^4), \qquad (2.6.)$$

kur,

$$\varepsilon_{12} = 1/(\frac{1}{\varepsilon_1} + (\frac{1}{\varepsilon_2} - 1)\frac{S_1}{S_2}),$$
 (2.7.)

kur

 Q_{rad} - siltuma pieplūde ar siltuma starojumu, W;

 $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ – emisijas koeficienti;

 $S_1, S_2-iek \check{s}\bar{e} jo$ un $\bar{a}r\bar{e} jo$ virsmu apgabali, kuri ir iekļauti siltuma pieplūdei, m²;

 T_1 , T_2 – iekšējo un ārējo virsmu temperatūras, K;

 σ – Stefana-Bolcmaņa konstante ir vienāda ar 5,67 · 10⁻⁸W/m²K⁴.

2.1.4. Kriostata ar ĪTG detektoru dzesēšanas dinamika

ĪTG detektora dzesēšana kriostatā ir dinamisks nelineārs process. Tas ir saistīts ar sarežģītu kriostata struktūru. Par piemēru (2.2.att.) tiek minēti eksperimentālie dati no zinātniskās literatūras [17].



2.2.att. Kriostata sastāvdaļu temperatūru sadalīšana [17].



2.3.att. Kriostata dzesēšanas mezglu eksperimentālā līkne [17].

Ir minēta (2.3.att.) kriostata sastāvdaļu temperatūru sadalīšana no laika. Parādīts temperatūru sadalījums (90,6-80K) nostabilizējies dzesēšanas režīmā (2.2.att.). Gamma spektrometru kriostatu ar ĪTG detektoriem konstruktīvo īpatnību dēļ, EMD netiek pieslēgts tieši pie dzesējamā detektora. Tāpēc, sastādot diferenciālos vienādojumus, kuri apraksta dzesēšanas procesu, ir jāņem vērā visu dzesēšanas procesā piedalošos kriostata daļu siltumietilpību un siltumvadītspēju.

2.2. EMD pārvadītās vibrācijas

Galvenie EMD vibrāciju avoti ir elektromagnētiskais kompresors (2.4.att.) un izplešanās caurulīte ar virzuli-izspiedēju (2.5.att.) [18], [19]. Gan EMD kompresora, gan arī izplešanās caurulītes nelineāro dinamisko raksturojumu cēloņa dēļ, to radīto vibrāciju spektrā, izņemot galveno darba frekvenci (parasti no 50 līdz 100 Hz), ir augstfrekvences harmoniku kopums. Par piemēru 2.6.att. ir parādīti vibrācijas spēku spektri EMD *RICOR K527* [20], [21].



2.4.att. EMD shēma (pa kreisi) un ārējais izskats (pa labi) [22].



2.5.att. EMD izplešanās caurulīte ar virzuli-izspiedēju shēma (pa kreisi) un ārējais izskats (pa labi) [18], [23].

EMD vibrācija galvenajā (darba) frekvencē tiek nomākta ar iestatīto dinamisko svārstību vibrācijas slāpētāju, bet daudz vājākās augstfrekvences harmonikas – ar vibroizolāciju un vibroslāpēšanu. Tomēr jebkādas harmonikas frekvences iekļūšana detektora bloka rezonanses svārstību diapazonā, var izraisīt detektora vibrāciju, kura veicina mikrofonefektu, kas ievērojami pasliktina gamma spektrometra enerģētisko izšķirtspēju.



2.6.att. Vibrācijas spēku spektri, kurus veido EMD *RICOR K527* kompresors (pa kreisi) un izplešanās caurulīte (pa labi) [24].

Ņemot vērā iepriekš minētos EMD tipveida trūkumus, ir jāveic spektrometriskajā aparatūrā pielietojamā ĪTG detektora tapņa turētaja mezgla rezonanses svārstību frekvenču novērtējums. Rezonanses frekvenču novērtējums ir nepieciešams, gan konstruējot vibroizolācijas sistēmas, gan arī noregulējot EMD darba frekvenci no vērtībām, kurās tās augstākās harmonikas nesakrīt ar detektora tapņa balstu rezonanses frekvencēm.

Turklāt plašs dažādas efektivitātes pielietojamo detektoru diapazons izvirza detektora tapņa balstu unificētā mezgla izstrādes papilduzdevumu, kas var būt pielietots detektoriem ar dažādiem masas un gabarīta raksturojumiem. Tāpēc pielietojamo ĪTG detektoru parametriskās virknes izveide ir aktuāla.

2.3. ĪTG detektoru parametriskā virkne

Dažādu lietišķo uzdevumu risinājums paredz plašas ĪTG detektoru virknes izmantošanu gamma spektrometriskajā aparatūrā, kuri ievērojami atšķiras pēc saviem masas un gabarīta raksturojumiem. Izmantojamā ĪTG detektora izmēri (vadoties pēc tā vajadzīgās efektivitātes), lielākoties, nosaka ne tikai kriostata vakuuma kameras gabarītus, bet arī siltuma pieplūdes lielumu. Pamatojoties uz EMD un pielietojamo ĪTG detektoru analīzi, tika piedāvāta parametriskā virkne (2.2.tabula). Minētajā tabulā ir sistematizēta dažādu EMD tipu izmantošana, atkarībā no detektora izmēra.

2.2. tabula

	Virkne
ו ד	parametrsika
	detektora
	FIND-II C

$ \begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$	Spektrometriskie moduji ar hibrida dzesesanu (LN ₂ + EMU) $r_{1,2,1,\dots,1,2,n}$	Spektrometriskie moduļi ar nibrīda dzesesanu ($LiN_2 + EiML$)	Spektrometriskie moduļi ar hibrīda dzesēšanu $(LN_2 + EMD)$	Maksimālā kriostata siltuma pieplūde ne vairāk par 4.	THALES LSF9340; LIHAN TC4187; LIHAN TC4187; LIHAN TC418	1,0-11,0 W @ 001X	5.0–15.0 W @ 80K	Lieljaudas EMD,	1,5 W	Kriostata siltuma pieplūde ne vairāk par	Krivetota ciltuma nianliida na vairal nar	AIM SL400; THALES LSF9589	ūde 2,0–5,0 W @ 80K	imāla siltuma Vidējas jaudas EMD,	In iauda: Kriostata siltuma nienlüde ne vairāk nar 05 W	1,0–2,0 W @ 80K	Mazas jaudas EMD,	THALES RM3	0,5–1,0 W @ 80K RICOR K 508-	Miniatūrveida EMD, 0 5-1 0 W@80K	Spektrometriskie moduļi ar EMD	skā masa, J/K 95 131 165 216 274 305 399 495 623 7	, kg 0,35 0,49 0,61 0,80 1,01 1,13 1,47 1,83 2,30 2,	s, cm^3 (65.8 91,3 114,5 150,3 190,1 21,6 277,0 343,9 432,6 53	1^{44} , 11111 52 31 52 43 54 50 59 55 63 61 70 55 71 70 78 72 83 80 88		vitāte 10 % 15 % 20 % 30 % 40 % 50 % 60 % 80 % 100 % 12	ĪTG detektoru parametri
ieplūde 0,5–1,0 <i>RICOF</i> <i>THALI</i> <i>RICOF</i> <i>RICOF</i> <i>RICOF</i> <i>RICOF</i> <i>RICOF</i> <i>Altor</i> <i>Altor</i> <i>Altor</i> <i>Altor</i> <i>Altor</i> <i>Altor</i> <i>Altor</i> <i>Altor</i> <i>Altor</i> <i>Altor</i> <i>Altor</i> <i>Altor</i> <i>Altor</i> <i>Altor</i> <i>Altor</i> <i>Altor</i> <i>Altor</i> <i>Altor</i> <i>Altor</i> <i>Altor</i> <i>Altor</i> <i>Altor</i> <i>Altor</i> <i>Altor</i> <i>Altor</i> <i>Altor</i> <i>Altor</i> <i>Altor</i> <i>Altor</i> <i>Altor</i> <i>Altor</i> <i>Altor</i> <i>Altor</i> <i>Altor</i> <i>Altor</i> <i>Altor</i> <i>Altor</i> <i>Altor</i> <i>Altor</i> <i>Altor</i> <i>Altor</i> <i>Altor</i> <i>Altor</i> <i>Altor</i> <i>Altor</i> <i>Altor</i> <i>Altor</i> <i>Altor</i> <i>Altor</i> <i>Altor</i> <i>Altor</i> <i>Altor</i> <i>Altor</i> <i>Altor</i> <i>Altor</i> <i>Altor</i> <i>Altor</i> <i>Altor</i> <i>Altor</i> <i>Altor</i> <i>Altor</i> <i>Altor</i> <i>Altor</i> <i>Altor</i> <i>Altor</i> <i>Altor</i> <i>Altor</i> <i>Altor</i> <i>Altor</i> <i>Altor</i> <i>Altor</i> <i>Altor</i> <i>Altor</i> <i>Altor</i> <i>Altor</i> <i>Altor</i> <i>Altor</i> <i>Altor</i> <i>Altor</i> <i>Altor</i> <i>Altor</i> <i>Altor</i> <i>Altor</i> <i>Altor</i> <i>Altor</i> <i>Altor</i> <i>Altor</i> <i>Altor</i> <i>Altor</i> <i>Altor</i> <i>Altor</i> <i>Altor</i> <i>Altor</i> <i>Altor</i> <i>Altor</i> <i>Altor</i> <i>Altor</i> <i>Altor</i> <i>Altor</i> <i>Altor</i> <i>Altor</i> <i>Altor</i> <i>Altor</i> <i>Altor</i> <i>Altor</i> <i>Altor</i> <i>Altor</i> <i>Altor</i> <i>Altor</i> <i>Altor</i> <i>Altor</i> <i>Altor</i> <i>Altor</i> <i>Altor</i> <i>Altor</i> <i>Altor</i> <i>Altor</i> <i>Altor</i> <i>Altor</i> <i>Altor</i> <i>Altor</i> <i>Altor</i> <i>Altor</i> <i>Altor</i> <i>Altor</i> <i>Altor</i> <i>Altor</i> <i>Altor</i> <i>Altor</i> <i>Altor</i> <i>Altor</i> <i>Altor</i> <i>Altor</i> <i>Altor</i> <i>Altor</i> <i>Altor</i> <i>Altor</i> <i>Altor</i> <i>Altor</i> <i>Altor</i> <i>Altor</i> <i>Altor</i> <i>Altor</i> <i>Altor</i> <i>Altor</i> <i>Altor</i> <i>Altor</i> <i>Altor</i> <i>Altor</i> <i>Altor</i> <i>Altor</i> <i>Altor</i> <i>Altor</i> <i>Altor</i> <i>Altor</i> <i>Altor</i> <i>Altor</i> <i>Altor</i> <i>Altor</i> <i>Altor</i> <i>Altor</i> <i>Altor</i> <i>Altor</i> <i>Altor</i> <i>Altor</i> <i>Altor</i> <i>Altor</i> <i>Altor</i> <i>Altor</i> <i>Altor</i> <i>Altor</i> <i>Altor</i> <i>Altor</i> <i>Altor</i> <i>Altor</i> <i>Altor</i> <i>Altor</i> <i>Altor</i> <i>Altor</i> <i>Altor</i> <i>Altor</i> <i>Altor</i> <i>Altor</i> <i>Altor</i> <i>Altor</i> <i>Altor</i> <i>Altor</i> <i>Altor</i> <i>Altor</i> <i>Altor</i> <i>Altor</i> <i>Altor</i> <i>Altor</i> <i>Altor</i> <i>Altor</i> <i>Altor</i> <i>Altor</i> <i>Altor</i> <i>Altor</i> <i>Altor</i> <i>Altor</i> <i>Altor</i> <i>Altor</i> <i>Altor</i> <i>Altor</i> <i>Altor</i> <i>Altor</i> <i>Altor</i> <i>Altor</i> <i>Altor</i> <i>Altor</i> <i>Altor</i> <i>Altor</i> <i>Altor</i> <i>Altor</i> <i>Altor</i> <i>Altor</i> <i>Altor</i> <i>Al</i>				 									plūde	ssimāla siltuma	s un jauda: Kriostata				$\begin{array}{c c} 0.5-1.0 \\ RICOP \end{array}$	0.5-1.0	Miniatūrv	Miniatūrv	niskā masa, J/K 95 Miniatūrv	sa, kg 0,35 niskā masa, J/K 95 Miniatūrv	ms, cm ³ 65,8 sa, kg 0,35 niskā masa, J/K 95 Miniatūrv	tulga, mut 52 31 ms, cm ³ 65,8 sa, kg 0,35 siskā masa, J/K 95	trija, mm <u>Ø H</u> 52 31 ms, cm ³ 65,8 sa, kg 0,35 niskā masa, J/K 95 Miniatūrv	tivitāte 10 % trija, mm 2 H .trija, mm 52 31 ms, cm ³ 65,8 sa, kg 0,35 niskā masa, J/K 95

2.4. Darba struktūra

Kā parādīts 1.2. nodaļā, ĪTG detektoru dzesēšana līdz kriogēnām temperatūrām ar EMD, Djuāru ar šķidro slāpekli vietā, ļauj izveidot drošo, mazgabarīta, lietošanā vieglāku un ērtāku spektrometrisko aparatūru. Taču EMD uzstādīšana tipveida konstrukcijas kriostatā, kas ir paredzēta dzesēšanai ar šķidro slāpekli, neņemot vērā tā funkcionēšanas īpatnības, neļauj gūt pilnīgi gaidāmās priekšrocības.

Darbā tiek piedāvāta kompleksā pieeja ĪTG spektrometru kriostatu konstruēšanai, kas ņem vērā 2.1. un 1.1. nodaļu atzīmētos tipveida EMD trūkumus, un ļauj samazināt to ietekmi uz spektrometriskās aparatūras ekspluatācijas raksturojumiem, turklāt saglabājot tiem raksturīgās labas īpašības.

Tieša integrēšana EMD tipveida konstrukcijas ar slāpekli dzesējamā kriostatā, neņemot vērā tā īpatnības, neļauj iegūt analoģisko rezultātu. Tas ir saistīts ar to, ka tiek ieviesti jauni fizikālie EMD darbībai raksturīgie procesi, kuri agrāk netika pilnīgi ņemti vērā. Tādi tipveida konstrukcijas ar EMD dzesējamā kriostāta fizikālie procesi ir:

- Ierobežota dzesēšanas jauda, kuras dēļ rodas palielinātās prasības pret siltuma pieplūdes uz kriostatu samazināšanos;
- Ievērojama siltuma daudzuma izdalīšanās EMD siltuma caurulites karstajā galā, tādēļ notiek tā iesildīšana, kas samazina bez tā mazo LK. Vēl jo vairāk rodas siltuma novadīšanas problēma, ko izdala EMD no spektrometriskās aparatūras;
- 3. EMD vibroaktivitāte, kas veicina mikrofonefekta rašanos, tādēļ pasliktinās spektrometra raksturojumi, it sevišķi, tā izšķirtspēja.

Taču spektrometriskās aparatūras ar EMD priekšrocības ir detalizēti aprakstītas 1.4. nodaļā, galvenā no tām ir neapšaubāma ērtība lietotāja ekspluatācijā, kas savukārt nodrošina pastāvīgi pieaugušo pieprasījumu pasaules tirgū. Tas nosaka pētījumu aktualitāti, kuri ir virzīti uz negatīvo spektrometriskai aparatūrai ar EMD raksturīgo faktoru samazināšanu (2.7.att.).





Galvenā uzmanība tiek pievērsta kriostata ar EMD darbībai raksturīgiem procesiem uz dinamisko gan siltuma, gan arī vibrācijas modeļu pamata. Par pirmdatiem saistībā ar kriostatu konstruēšanu, ir jāuzskata kriostatu standarta konstrukcijas, kuras izmanto dzesēšanu ar šķidro slāpekli un kuras ir plaši aprakstītas vispārpieejamajā literatūrā [25], un komerciālo EMD tipiskā virkne, kuri ir pieejami mūsdienu tirgū. EMD sākotnējai izvēlei ir jāvadās pēc 2.3. nodaļā piedāvātās klasifikācijas, kas ļauj novērtēt vajadzīgo dzesējamo jaudu, vadoties pēc konstruējamā spektrometra ĪTG detektora efektivitātes, kura tiek uzdota tehniskajā uzdevumā.

Piektajā darba nodaļā, kura ir veltīta siltuma procesu analīzei, ir piedāvāts dinamiskais kriostata ar EMD siltuma modelis. Sastādot dinamisko modeli, tika izmantota termoelektrisko analoģiju metode [26], [27]. Uz piedāvātā modeļa pamata tika sastādīta diferenciālo vienādojumu sistēma, kura apraksta kriostata ar EMD dzesēšanas procesu. Sastādītā dinamiskā modeļa analīze ļāva noteikt ĪTG detektora dzesēšanas uzlabošanas ceļus, ja EMD jauda ir ierobežota. Siltuma pieplūde kriostatā notiek ar trim komponentiem: ar konstrukcijas materiālu siltumvadītspēju, ar atliku gāzu molekulāro vadītspēju un siltuma starojumu. Tāpat arī tika veikts siltuma pieplūdes sastādošo komponentu lieluma novērtējums reālā kriostata konstrukcijā, un ir noteikti parametru apgabali, kurās dominē katrs no tiem. Noteikti konstruktīvie pasākumi saistībā ar katras no iepriekš norādīto siltuma pieplūdes komponenšu samazināšanos.

Trešajā un Sestajā nodaļās ir aprakstīti pasākumi, kuri ir virzīti uz EMD vibroaktivitātes samazināšanos. EMD tiek izmantots ĪTG detektora temperatūras stabilizācijas režīmā. Tāpēc pēc termiskās slodzes samazināšanās kriostatā būs arī pazemināta EMD ieejas jauda, kura ir vajadzīga uzdotās ĪTG detektora temperatūras uzturēšanai. Atbilstoši EMD kompresoru ģenerējamais vibrāciju līmenis. Gadījumā, ja samazināta siltuma pieplūde kriostatā, rodas iespēja pielietot mazjaudīgo EMD. Parasti, mazāk jaudīgiem EMD ir mazāka vibroaktivitāte. Tika veikti EMD mazgabarīta virknes vibroaktivitātes eksperimentālie pētījumi pēc trim savstarpēji perpendikulārām asīm. Pamatojoties uz iegūtiem rezultātiem, ir piedāvātas tehnoloģiskās pieejas, kuras ļauj novērtēt konkrēto EMD eksemplāru vibroaktivitāti ražošanas sagatavošanas posmā [28].

Kā minēts 1.1. nodaļā, EMD ģenerējamais vibrāciju spektrs sastāv no pamatfrekvences, kura sakrīt ar EMD kompresora darba frekvenci, un tās harmonikām. Pamatfrekvences spektrālās komponentes amplitūda ir dominējoša un var būt ievērojami nomākta ar iestatīto dinamisko vibrāciju slāpētāju [24].

Uz EMD vibroaktivitātes samazināšanos virzīto pasākumu attīstībai Sestajā nodaļā ir aplūkoti konstruktīvie risinājumi, kuri ir virzīti uz ĪTG detektora vibroaizsardzības uzlabošanu. Trešajā nodaļā ir aprakstīts EMD ģenerējamo vibrāciju negatīvās ietekmes uz spektrometriskās aparatūras izšķirtspēju mehānisms, kas izpaužas caur mikrofonefektu.

Darba mērķis: pamatojoties uz dinamisko procesu analīzi, izstrādāt ĪTG detektoru gamma spektrometru kriostatu konstruēšanas komplekso pieeju, kas ļauj samazināt tipisko elektromašīnu dzesētāju trūkumu ietekmi.

2.5. Secinājumi

Darba Otrajā nodaļā aplūkoti, analizēti siltuma procesi un mehāniskās vibrācijas dinamiskajos procesos gamma spektrometru kriostatos ar elektromašīnu dzesētāju (EMD). Aplūkoti tipveida konstrukcijas ar EMD dzesējamā kriostāta fizikālie procesi. Galvenā uzmanība pievērsta kriostata ar EMD darbībai raksturīgiem procesiem uz dinamisko gan siltuma, gan arī mehāniska modeļu pamata. Izmantota īpaši tīra sertificēta germānija detektoru parametriskā virkne, ko pielieto gamma spektrometros ar elektromašīnu dzesētājos kas izvirza detektora tapņa turētaja unificētā mezgla izstrādes papilduzdevumu. Aprakstītie tipiskie trūkumi saistībā ar EMD pielietošanu kriostatos ar ĪTG detektoriem, parāda dinamisko procesu padziļinātās analīzes aktualitāti un vajadzību tādos kriostatos, ar nolūku izstrādāt komplekso kostruēšanas pieeju, kas ļauj samazināt EMD tipisko trūkumu ietekmi.

3. EMD VIBRĀCIJU NEGATĪVĀS IETEKMES SAMAZINĀŠANA

Mehāniskās svārstības, kuru avots ir EMD, izraisa gan ĪTG detektora tapņa, gan arī kriostata konstrukcijas vibrācijas. Attāluma periodiskā izmainīšana maina strukturālās kapacitātes starp ĪTG detektoru un komponentiem ap to. Savukārt, kapacitāšu izmaiņas detektešanas bloka ķēdēs izraisa elektriskos traucējumus [29].

3.1. Mikrofonefekta ietekme uz gamma spektrometra izšķirtspēju

Kad gamma kvants iekļūst ĪTG detektorā, tad priekšpastiprinātāja izejā veidojas strāvas impulss (3.1.att.). Strāvas impulsa amplitūda ir proporcionāla kvanta enerģijai [4].



3.1.att. Parazītiskās kapacitātes kriostatā ar ĪTG detektoru.

Signāls no ĪTG detektora tiek padots uz priekšpastiprinātāju un turpmāk uz signāla pastiprināšanas un apstrādes traktu (skat. 1.2. nodaļu). Termisko trokšņu (3.2.att.) samazināšanai priekšpastiprinātāja ieejas kaskādē tiek izvietota uz ĪTG detektora turetaja ar nolūku dzēst līdz kriogēnām temperatūrām.



3.2. att. Trokšņa ietekme uz spektrometra izšķirtspēju pastiprināšanas kanālā.

Elektriskās ķēdes vai elektroniskās ierīces parametru izmaiņas, kuras izraisa mehāniskās vibrācijas, satricinājumiem un, it sevišķi, skaņas svārstības, veicina elektrisko traucējumu rašanos spektrometriskas aparatūras darbā [30]. Tādu parādību dēvē par mikrofonefektu [31], kas pasliktina ĪTG spektrometra raksturojumus.

Vibrācijas pamatavots ir EMD, kas ir uzstādīts uz kriostata pamata. Vakuuma vāka un EMD stiprinājumi pie kriostata pamata ir stingri, jo tiem ir jānodrošina nepieciešams vakuuma blīvējums. Gamma spektrometru izmantojamo EMD darba frekvence ir diapazonā no 50 Hz līdz 100 Hz, bet tipiskais svārstību Furjē spektrs ass virzienā ir parādīts 3.11.att.(pa labi).

Iegūtais tipiskais gamma spektrs, izmantojot ĪTG spektrometru, ir parādīts 3.4.att. Trokšņa esamība (3.3.att.) samazina enerģētisko spektrometra izšķirtspēju, jo modulē ĪTG detektora lietderīgā signāla amplitūdu. Trokšņa avotus var sadalīt divās kategorijās:

- 1. Termiskie elektriskie trokšņi no ieejas lauktranzistora, atgriezeniskās saites rezistora, noplūdes strāvām pie zemējuma kontūriem;
- 2. Periodiskie trokšņi, kurus izraisīja ārējie avoti, tādi kā mikrofonefekts, kas ir saistīts ar vibrācijām.



3.3.att. Strāvas impulsi priekšpastiprinātāja izejā (pa kreisi) un elektriskie trokšņi priekšpastiprinātaja izejā (pa labi).


3.4.att. Gamma spektrs.

Mikrofonefekts (mehānisko svārstību pārveidošana par elektriskiem signāliem) pasliktina galīgo gamma spektrometra izšķirtspēju [32], [33], [42], [34]–[41]. Parasti, lai samazinātu mikrofonefekta ietekmi, tiek izmantotas elektroniskās metodes. Piemēram, joslas filtru pielietošana priekšpastiprinātāja ieejas ķēdēs kopā ar visīsākā veidošanās laika izvēli vai ieejas ķēžu pielietošana ar diviem veidošanās laikiem [42]. Dažādos gadījumos tiek pielietoti ciparu filtri nākamajos spektrometriskā signāla apstrādes blokos [41]. Ir jāatzīmē, ka pašlaik iepriekšminētās elektroniskās metodes nenodrošina pietiekamu mikrofonefekta nomākšanu. Lai turpmāk samazinātu mikrofonefektu, izmanto praktiskai realizācijai daudz sarežģītākās aktīvās vibrāciju nomākšanas metodes [34], [35], [39].

EMD nelineāro dinamisko raksturojumu dēļ, tā ģenerējamo svārstību spektrs sastāv no ierosmes frekvences un tās harmonikām [19], [43]. Mūsdienīgiem EMD izmantojamie elektroniskie kontrolleri ļauj mainīt darba frekvenci noteiktajās robežās. Tas ļauj izvairīties no EMD vibrācijas frekvenču sakrišanas un dabiskiem detektora montāžas režīmiem, ar nolūku samazināt tā vibrācijas. Noregulēšanas no rezonanses frekvencēm būtība ir izmainīt EMD darba režīmus un atbilstoši ierosinošā vibrospēka frekvenci. Tāpēc ĪTG detektora tapņa balstu modālā analīze kļūst svarīga pasākumu vidū, kuri ir virzīti uz mikrofona efekta samazināšanu.

3.2. EMD darbība ar pazemināto jaudu

Mūsdienīgajā zinātniskajā literatūrā parādīts, ka EMD darbība ar pazemināto jaudu samazina tā vibroaktivitāti [44], [45]. Vadošajās laboratorijās, lai novērtētu EMD vibroaktivitāti, tika izmantots trīskomponentu dinamometrs ar iespēju mērīt vibrācijas pēc trim asīm [44], [46]. Par piemēru tiek minēta eksperimentālā iekārta ar fiksēto EMD ar modeļa *9255 Kistler 3* komponentu kvarca dinamometru un modeļa *5017 Kistler* pastiprinātāju (3.5.att.). Dinamometrs tika piestiprināts pie tērauda seismiskās masas 2275 kg, kura bija uzstādīta uz trim modeļa *SLM-24A* pneimatiskiem balstiem *Newport*, lai izolētu EMD no apkārtējās vides vibrācijām.



3.5.att. EMD, kas ir uzstādīts uz Kistler Model 9255 dinamometra [46].



3.6.att. Eksportējamais pulsējošās caurules (pa kreisi) un kompressora (pa labi) spēks, atkarībā no ieejas sprieguma 16-26V diapazonā, kad darba frekvence ir 47 Hz [46].

Eksportējamā EMD vibrācija tika izmērīta nominālajās temperatūrās ieejas spriegumam un darba frekvencei diapazonā no 16 līdz 26 V un no 42 līdz 52 Hz, atbilstoši. Ir parādīti (3.6.att.) eksportētie spēki, kad ierosmes frekvence ir 47 Hz, dažādiem kompresora ieejas spriegumiem. Spēks abos virzienos palielinājās līdz ar kompresora ieejas sprieguma paaugstināšanos. Kā parāda eksperimentālie dati, EMD darba jaudas pazemināšana ļauj samazināt vibroaktivitāti vairāk par 40% [46].

Parādītas (3.7. att. un 3.8. att.) laika diagrammas, kuras parāda vibrācijas un to spektru, ko pārraida EMD kompresora (X1, G1,1) un izspiedēja (X2, G2,2) asīs paātrinātās dzesēšanas režīmā, t. i., kad ir palielinātā jauda.



3.7.att. Vibrācijas eksporta laika vēstures paātrinātās dzesēšanas režīmā [48].



3.8.att. Vibrācijas eksporta spektrs paātrinātās dzesēšanas režīmā [48].

Salīdzināšanas nolūkā ir attēlotas (3.9.att. un 3.10.att.) laika diagrammas, kuras parāda vibrācijas un to spektru, gar kompresora (X1, G1,1) un izspiedēja (X2, G2,2) asīm, atbilstoši, temperatūras kontroles režīmā.



3.9.att. Vibrācijas eksporta laika vēstures temperatūras kontroles režīmā [48].



3.10.att. Vibrācijas eksporta spektrs temperatūras kontroles režīmā [48].

Kā ir redzams no iepriekšminētiem rezultātiem, EMD jaudas paaugstināšana veicina vibrāciju spēku palielināšanos, par to liecina vibrāciju laika un vibrāciju eksporta spektra vēsturu salīdzināšana no zinātniskās literatūras [48].

3.3. Dinamisks ITG detektora mezgla modelis

Kriostata ar ĪTG detektoru un EMD tipiskā konstrukcija ir parādīta 3.11.att. Var izcelt sekojošas svārstību sistēmas, kuru mehāniskās svārstības izraisa mikrofonefektu. Pirmā sistēma sastāv no masīva ĪTG monokristāla, kas ir ievietots alumīnija tapnī un uzstādīts uz kriostata stingrā pamata ar balstiem. Otrā sistēma ir veidota ar plānsienu kriostata vakuuma vāku, kura ir uzstādīta uz stingrā pamata. Parazītiskās kapacitātes starp svārstību sistēmām ir viens no mikrofonefekta rašanās cēloņiem. Dzesēšanai ĪTG detektora tapnis tiek savienots ar EMD auksto galu, izmantojot mīksto termisko tiltiņu [47], [48]. Tādējādi, galvenais vibrācijas izplatīšanas avots ir EMD korpuss, kas ir uzstādīts uz kriostata stingrā pamata. Jāpievērš uzmanība, ka vakuuma vāka un EMD nostiprinājumi kriostata pamatam ir diezgan stingri, jo tiem ir jānodrošina nepieciešamais vakuuma blīvējums. Pielietojamo EMD darba frekvence atrodas diapazonā no 50 Hz līdz 100 Hz, un tipiskais tā pašsvārstību Furjē spektrs ass virzienā ir parādīts (3.11.att. (pa labi)) Sakrītot EMD pamatfrekvencei vai tās harmonikām ar kriostata mezglu pašfrekvencēm, notiek to rezonanses pastiprināšana, kas samazina gamma spektrometra izšķirtspēju mikrofonefekta dēļ.



3.11.att. ĪTG detektora mezgla tipiskā konstrukcija (pa kreisi); EMD pašsvārstību Furjē spektrs ass virzienā (pa labi).

Atzīmēsim, ka lielāko ietekmi uz kopējo gamma spektrometra izšķirtspēju rod vibrācija 200-600Hz frekvenču diapazonā. Parasti, ievērojamo vibrācijas samazināšanu ierosināšanas frekvencē nodrošina iestatīts vibrāciju slāpētājs [43], [49]. Vibrācijas komponenšu (ar mazāku kā 200 Hz frekvenci) ietekme nav liela īsā impulsu veidošanās laika dēļ signālu spektrometriskai apstrādei. Augstfrekvences vibrācijas komponentiem ir daudz zemāka amplitūda un efektīvi tiek nomākti, izmantojot vibroslāpējošos materiālus.

Pašlaik visizplatitakie ir ĪTG detektora tapņa balsti kas izgatavoti gredzenu veida, tristurveida plākšņu un termiskā labirinta veidā (3.12.att.). Trijstūrveida formas elastīgās plāksnes pielietošana ir visvienkāršākā ĪTG detektora tapņa nostiprināšanas metode kriostatā [50], [51]. Visaktīvāk ĪTG detektora kriostatā tiek izmantots labirinta tipa balsti [14]. Tāpat arī tiek minēti balstu pielietošanas rezultāti, izmantojot trīs elastīgos gredzenus [52]. Ir attēloti (3.12.att.) visi iepriekšminētie ĪTG detektora tapņu balstu tipi un to modeļi.



3.12.att. Detektora tapņa mezgla modelis ar visizplatītāko tipu balstiem.

ĪTG detektora svārstības kriostatā var būt aplūkotas uz dinamiskā modeļa pamata cietķermeņa veidā ar sešām brīvības pakāpēm. Tā kā reālajos gamma spektrometros ĪTG detektora svārstību amplitūdas ir mazas un nepārsniedz simtiem milimetra daļas, tad var neievērot balstu elastīgo raksturlīkņu nelinearitātes ietekmi. Pieņemot balstu elastīgās raksturlīknes visās koordinātēs par lineārām, iegūstam kustības vienādojumu (3.1.) veidā [55]:

$$A\ddot{q} + B\dot{q} + Cq = Q(t), \qquad (3.1.)$$

kur,

- q pārvietojumu kolonvektors pa visām koordinātēm;
- A inerces spēku koeficientu matrica;
- **B** disipācijas spēku koeficientu matrica;
- C stingruma koeficientu matrica;
- $\mathbf{Q}(t) \bar{a}r\bar{e}jo sp\bar{e}ku$ kolonvektors.

Tapņa balstu sarežģītās formas dēļ, kuras ir demonstrētas, kopējā gadījumā ir grūti aprēķināt matricas no vienādojuma (3.1.). Praksē ir daudz ērtāk izmantot specializētās datorprogrammas, pamatojoties uz galīgo elementu metodes (turpmāk – GEM), kurās matricas (3.1.) tiek automātiski veidotas, piemēram, *Solidworks* [53].

3.4. Secinājumi

Darba Trešajā nodaļā parādīts, ka EMD darbība ar pazemināto jaudu samazina tā vibroaktivitāti vairāk par 40%. Apskatītas kriostata ar ĪTG detektoru un EMD tipiskas konstrukcijas galvenas svārstību sistēmas, kuru mehāniskās svārstības izraisa mikrofonefektu kas ievērojami samazina gamma spektrometra enerģētisko izšķirtspēju. Analizētas iespējas un izstrādātas rekomendācijas elektromašīnu dzesētāju (EMD) vibrāciju negatīvas ietekmes samazināšanai.

4. KOMPLEKSĀ PIEEJA GAMMA SPEKTROMETRU KRIOSTATU AR EMD KONSTRUĒŠANAI

Iepriekšējās darba nodaļās aplūkotie trūkumi saistībā ar EMD pielietošanu kriostatos ar ĪTG detektoriem, kā arī dinamisko termiskā un vibrācijas procesu kriostatā analīze ļauj piedāvāt komplekso pieeju izmantošanai, konstruējot ĪTG spektrometra kriostatu ar EMD pielietošanu.

Kā ir parādīts 4.1.att., ĪTG gamma spektrometra kriostatu ar EMD konstruēšanas kompleksā pieeja sākās ar tehniskā uzdevuma analīzi. Tiek uzdotas pamatprasības pret konstruējamo aparatūru un tās raksturojumi. Vadoties pēc detektora efektivitātes, tiek noteikti ĪTG monokristāla masas un gabarīta raksturojumi.

Turpmāk tiek veikta vakuuma kriostata modelēšana ar iepriekšēji izvēlēto EMD. Tiek aplūkoti tehniskās konstruēšanas risinājumi saistībā ar siltuma pieplūdes minimizēšanu uz kriostatu. Siltuma pieplūdes samazināšanās pasākumi ļauj izvēlēties vmazjaudīgo EMD, kas, savukārt, nodrošinās galīgās ierīces masas un gabarīta raksturojumu samazināšanu. Kā arī ļaus samazināt patērējamo jaudu, kas ir visvairāk kritiskāk laukuzdevuma aparatūrai (portatīvie un mobilie spektrometri).

Pēc kriostata ar noteikto EMD iepriekšējās modelēšanas un vakuuma kriostata pavadošās ģeometrijas tiek veikta kriostata mezglu modālā analīze. ĪTG detektora tapņa balstu un detektora vāka rezonanses frekvences tiek salīdzinātas ar EMD darba frekvenci un harmonikām. Gadījumā, ja sakrīt jebkāda frekvence, tad tiek pieņemts lēmums par EMD darba frekvences izmainīšanu vai, ja tas nav pietiekams, detektora tapņa balstu parametru izmainīšanu, ar nolūku noregulēt no rezonanses.



4.1.att. Kompleksās pieejas gamma spektrometru kriostatu ar EMD konstruēšanai struktūra.

4.1. Secinājumi

Ceturtajā nodaļā izstrādāts un aprakstīts tehniskais uzdevums bloku shēmas formā kompleksai pieejai gamma spektrometru kriostatu ar elektromašīnu dzesētāju konstruēšanai. Uz iegūto dinamisko termiskās un vibrācijas modeļu pētījuma rezultātiem formulētas nepieciešamās operācijas, konstruējot ĪTG spektrometra kriostatu, pielietojot EMD. Darba ietvaros tika piedāvātas praktiskās rekomendācijas, kuras ļauj samazināt EMD raksturīgo tipisko trūkumu ietekmi.

5. SILTUMA PROCESU MODELĒŠANA KRIOSTATOS AR EMD

Otrajā nodaļā aprakstītās EMD izmantošanas īpatnības kriostatos, kuras ir saistītas ar siltuma procesiem, var sadalīt divos tipos:

- 1. Ievērojama siltuma daudzuma izdalīšanās EMD siltuma caurulites karstajā galā. Tādēļ notiek tā iesildīšana, kas samazina jau tāpat zemo LK. Papildus rodas siltuma novadīšanas problēma, kuru izdala EMD spektrometriskājā aparatūrā.
- 2. EMD dzesēšanas ierobežotā jauda, kuras dēļ rodas paaugstinātās prasības pret termiskās slodzes samazināšanos EMD siltuma caurulites aukstajā galā, t.i., siltuma pieplūdes uz kriostatu samazināšanos.

Pirmā problēma prasa daudz efektīvāku siltummaiņu izveidošanu priekš EMD, ar nolūku paaugstināt LK. Otrā – detalizēto kriostata ar EMD siltuma modeļa analīzi un galveno ceļu atklāšanu saistībā ar siltuma pieplūdes uz kriostatu samazināšanos.

5.1. EMD efektivitātes palielināšana

Kā izriet no EMD raksturojumiem, siltuma caurulītes aukstā gala dzesēšanas lietderīgās jaudas lielums, zināmā mērā, ir atkarīgs no tās karstā gala temperatūras, t.i., no novadāmās jaudas (skat. 1.4. nodaļu). Parasti, gamma spektrometru kriostatos izmantojamie EMD nodrošina dzesējošo jaudu 4-10 W diapazonā, 80K temperatūrā. Turklāt, ņemot vērā zemo LK, izkliedes jauda karstajā galā sasniedz 100-300 W. Kad ir nepietiekama siltuma novadīšana, tad samazinās EMD efektivitāte. Tāpēc, konstruējot kriostatus ar EMD, konstruktoru darba ietvaros, tika sperti papildus pasākumi saistībā gan ar gaisa, gan arī ūdens dzēšanas sistēmu uzlabošanu spektrometriskajās iekārtās, ko ražo kompānija *BSI* (5.1.att.).



5.1.att. Uzlabotās EMD dzesēšanas konstrukcijas: gaisa dzesēšana ar siltuma caurulīšu radiatoriem (pa kreisi); ūdens dzesēšanas sistēma ar termoelektrisko moduli (pa labi).

5.2. EMD raksturojumu modelēšana ar termoelektrisko analoģiju palidzību

Lai novērtētu kriostata dzesēšanas dinamiku un sastādītu diferenciālos vienādojumus, izmantota termoelektrisko analoģiju metode, kas ļauj sastādīt analīzei ērto ekvivalento elektrisko shēmu. Galvenās termoelektriskās analoģijas ir minētas 5.1. tabulā.

5.1.tabula

Siltuma para	Elektriskie parametri		
Siltuma plūsma	Strāva	<i>I</i> , (A)	
Temperatūra	Θ, (K)	Spriegums	<i>U</i> , (V)
Siltumpretestība	<i>R</i> , (K/W)	Pretestība	$R,(\Omega)$
Siltumietilpība	<i>C</i> , (J/K)	Kapacitāte	<i>C</i> , (F)

Termoelektriskās analoģijas

Vadoties pēc galvenajām termoelektriskām analoģijām, tika piedāvāts ekvivalentais elektriskais divpols, kas modelē EMD siltuma raksturojumus (5.2.att.). Elektriskais divpols sastāv no strāvas I_0 avota un pasīviem elementiem R_0 , C_0 , kuri modelē siltuma (dzesēšanas) plūsmu, ko rada EMD, kā arī tā ekvivalento siltumietilpību un iekšējo siltumpretestību. Lielumi I_0 , R_0 un C_0 tiek aprēķināti no EMD siltuma raksturojumiem, kuri ir minēti tehniskajā dokumentācijā konkrētiem darba režīmiem. Dažu EMD termoelektrisko modeļu parametru aprēķins ir sīkāk parādīts pielikumā (1. pielikums).



5.2.att. EMD siltuma raksturojumu modelēšanas ekvivalentā shēma.

5.2. tabula

Parametrs	Lihan TC 4189	Sunpower CryoTel MT	Thales LPT 9510
Jauda, W	240	80	85
Dzesējošā jauda, W	16W@80K	5W@80K	2,4W@80K
Zemākā temperatūra, K	45	40	50
Modeļa parametri:			
I_0, \mathbf{W}	102,6	40,7	12,6
R_0 , K/W	2,5	6,2	19,2
$C_0, \mathrm{J/K}$	94,9	58,1	18,7

Dažu EMD termoelektrisko modelu parametri



5.3. att. EMD siltuma raksturojumu modelēšana, pamatojoties uz parametriem (5.2. tabula).

Salīdzināti (5.3. att.) pasē uzrādītie raksturojumu dati, kuri ir apzīmēti ar punktiem, un raksturojumi, kuri ir aprēķināti uz piedāvātā modeļa pamata. Minētais piemērs parāda, ka piedāvātā siltuma shēma ar pietiekamu precizitāti modelē reālo EMD raksturojumus plašā temperatūru diapazonā, un to var izmantot kriostata siltuma modeļu sastādīšanai.

5.3. Kriostata ar EMD siltuma modelis

Pamatojoties uz termoelektriskām analoģijām, ir sastādīts kriostata ar EMD siltuma modelis (5.5.att.). Neapšaubāmi, modelis ir vienkāršots, jo ņem vērā tikai galvenos komponentu fizikālos raksturojumus, tādus kā siltumietilpība un siltumpretestība. Taču tas ļauj novērtēt galvenos siltuma procesus, kuri ietekmē detektora dzesēšanas ātrumu, kā arī var būt paredzēts daudz sarežģītāku modeļu kalibrēšanai un testēšanai, lai veiktu aprēķinus, izmantojot gala elementus. Modeļu elementu atbilstība kriostata konstrukcijas sastāvdaļu raksturojumiem ir parādīta 5.3. tabulā.

Atbilstoši ekvivalentai shēmai, ĪTG detektora dzesēšana atbilst kondensatora C_3 kapacitātes lādiņam strāvas avotam I_0 . Dzesēšanas process var būt prezentēts kā pārejas process ekvivalentā elektriskajā shēmā pēc strāvas avota pieslēgšanas I_0 . Modelī ir izcelti galvenie kriostata komponenti (5.4.att.): tvertne ar sorbentu uz EMD aukstā gala, detektora tapnis un detektors, atsevišķi. Tāda sadalīšana ir būtiska, jo detektora dzesēšana notiek caur kontaktu ar tapni, kuram ir diezgan liela siltumpretestība R_4 , kas padara dzesēšanas procesu daudz ilgāku.



5.5.att. Ekvivalentais termoelektriskais modelis kriostata ar EMD dzesēšanas procesa analīzei.

5.3.tabula

Modeļa elementu atbilstība kriostata siltuma raksturojumiem

Elements	Modelējamie siltuma raksturojumi
I ₀ , C ₀ , R ₀	EMD termoelektriskā modeļa siltuma parametri
C_1	Tvertnes ar sorbentu siltumietilpība
D.	Siltumpretestība starp sorbenta tvertni un detektora vāku gāzes molekulārās vadītspējas
$\mathbf{\Lambda}_{I}$	un siltuma starojuma dēļ
R_2	Elastīgā siltumvada siltumpretestība
C_2	Detektora tapņa siltumietilpība
R_3	Izolējošas starplikas ekvivalentā siltumpretestība starp tapni un ĪTG detektoru
C_3	ĪTG detektora siltumietilpība
D.	Siltumpretestība starp detektora tapni un detektora vāku gāzes molekulārās vadītspējas
K 4	un siltuma starojuma dēļ

5.4. Kriostata ar EMD modelis ar siltumekrānu

Fiziskais siltumekrānu darbības pamats un to praktiskās izmantošanas rezultāti siltuma pieplūdes samazināšanai siltuma starojuma dēļ ir aprakstīti zinātniskajā literatūrā [21]. Termoelektrisko analoģiju izmantošana ļauj sastādīt ekvivalento elektrisko shēmu, kura ir ērta, lai analizētu ĪTG dzesēšanas dinamiku kriostatā (5.6. att.). Parādītais modelis (5.7. att.) ir vienkāršots, taču ļauj novērtēt pamatprocesus, kuri ietekmē ĪTG dzesēšanas ātrumu, izmantojot siltumekrānu. Salīdzinot ar 5.5.att. parādīto ekvivalento termoelektrisko modeli, tekoša modelī ir papildus ieviests elements C_4 , kas atbilst siltumekrāna siltumietilpībai, bet siltumpretestība R_4 ir sadalīta, atbilstoši, divās, t. i., R_{41} un R_{42} .

5.6.att. Kriostata ar EMD un siltumekrānu konstrukcija.

- 1 EMD korpuss;
- 2 Tvertne ar sorbentu;
- 3 Elastīgs siltumvads;
- $4 \overline{I}TG$ detektora tapnis;

- $5 \overline{I}TG$ detektors;
- 6 Detektora ārējais vāks;
- 7 Siltumekrāns.

5.7.att. Ekvivalentais termoelektriskais modelis kriostata ar EMD un siltumekrānu dzesēšanas procesa analīzei.

5.5. Kriostata ar EMD matematiskais modelis

Pamatojoties uz minētajiem ekvivalentiem termoelektriskiem modeļiem, ir sastādīti diferenciālie vienādojumi, kuri ļauj aprēķināt ne tikai kriostata komponentu stacionārās temperatūras, bet arī to dzesēšanas procesa dinamiku.

Iepriekš, Otrajā nodaļā ir minētas sakarības (2.1.) - (2.7.), kuras ļauj atsevišķi novērtēt triju siltuma pieplūdes komponentu lielumus kriostata vakuuma kamerā. Kopumā, šo komponentu atkarība no temperatūras ir nelineāra, kas veicina atbilstošās pretestības R_1 un R_4 nelinearitāti ekvivalentajos termoelektriskajos modeļos, kuri ir parādīti 5.5. att. un 5.7. att.

Svarīga ir kriostata dzesēšanas analīze vakuuma degradācijas apstākļos. Tieši konstruktoru risinājumu meklēšanai, kuri nodrošina siltuma pieplūdes samazināšanu šajos apstākļos, ir liela praktiskā nozīme, izmantojot EMD.

Tika veikts skaitliskais novērtējums siltuma plūsmām kriostatā (2. pielikums). Parādīts, ka, gadījumā kad kriostatā spiediens ir 10^{-2} mbar un augstāk, par dominējošām ir siltuma plūsmas atliku gāzu molekulārās vadītspējas dēļ. Šajā gadījumā siltuma plūsmas kopējā atkarība no temperatūru starpība ir tuva lineārai (1. pielikums). Tas ļauj sastādītajos termoelektriskajos modeļos uzskatīt pretestības R_1 un R_4 raksturojumus par lineāriem (5.8.att.) un gūt atbilstošo diferenciālo vienādojumu analītisko risinājumu. Diferenciālie vienādojumi ir sastādīti, izmantojot no elektrisko ķēžu teorijas vispārzināmās sakarības starp spriegumiem un strāvām, kas uzlādē kondensatorus caur atbilstošo pretestību [54].

Atzīmēsim, ka parādītajās shēmās (5.5. att. un 5.7. att.) tvertne ar sorbentu ir nostiprināta tieši uz EMD aukstā gala, tāpēc elementi (5.3. tabula) R_0 , R_1 un C_0 , C_1 ir paralēli pieslēgti un var būt apvienoti (5.1.) un (5.2.).

$$C_{01} = C_0 + C_1 \,, \tag{5.1.}$$

$$R_{01} = R_0 R_1 / (R_0 + R_1). (5.2.)$$

5.8.att. Linearizēts ekvivalentais kriostata ar EMD modelis.

Modelim (5.8. att.) sastādīta vienādojumu sistēma kur iegūsim četrus pirmās kārtas diferenciālvienādojumus. Astoņi vienādojumi un astoņi nezināmie.

$$\frac{dU_{C01}}{dt} = \frac{I_0}{C_{01}}; \quad \frac{U_{C01}}{R_{01}} = I_{R01};$$

$$\frac{dU_{C2}}{dt} = \frac{I_{C2}}{C_2}; \quad \frac{U_{C2}}{R_2} = I_{R2};$$

$$\frac{dU_{C3}}{dt} = \frac{I_{C3}}{C_3}; \quad U_{C2} = U_{C3} + I_{C3}R_3;$$

$$U_{C01} = U_{C2} + I_{R2}R_2 = U_{C2} + (I_{C2} + I_{R4} + I_{C3})R_2;$$

$$I_0 = I_{C01} + I_{R01} + I_{C2} + I_{R4} + I_{C3}, \quad (5.3.)$$

kur

 U_{C01} – EMD temperatūra, K;

 I_{C01} – EMD siltuma plūsma, W;

 I_{R01} – EMD un tvertnes ar sorbentu siltuma plūsma, W;

 U_{C2} – detektora tapņa temperatūra, K;

 I_{C2} – detektora tapņa siltuma plūsma, W;

 I_{C3} – ĪTG detektora siltuma plūsma, W;

 U_{C3} – ĪTG detektora temperatūra, K;

 $I_{\rm R4}-{\rm siltuma}$ plūsma starp detektora tapni un ārējo vāku, W.

Šie nezināmie lielumi apraksta kriostata komponentu kārtējās temperatūras $U_{Ci}(t)$ un siltuma plūsmu lielumus $I_{Ci}(t)$; $I_{Ri}(t)$ caur tiem.

Veicot pārveidojumus no vienādojumu sistēmas (5.3.), var iegūt trešās kartas lineārus diferenciālvienādojumus, kuri apraksta katra kriostata komponenta dzesēšanas procesu, t. i., atbilstošā kondensatora lādiņu. Piemēram, (5.4.) vienādojums, kas apraksta ĪTG detektora tapņa dzesēšanas procesu.

$$a_3 \frac{\mathrm{d}^3 U_{\mathrm{C2}}}{\mathrm{d}t^3} + a_2 \frac{\mathrm{d}^2 U_{\mathrm{C2}}}{\mathrm{d}t^2} + a_1 \frac{\mathrm{d}U_{\mathrm{C2}}}{\mathrm{d}t} + a_0 U_{\mathrm{C2}} = I_0, \tag{5.4.}$$

kur

$$a_3 = C_{01}C_2C_3R_2R_3; (5.4.1.)$$

$$a_{2} = C_{01} \left[R_{2}(C_{2} + C_{3}) + C_{3}R_{3}\frac{R_{2} + R_{4}}{R_{4}} \right] + C_{2}C_{3}R_{3}\frac{R_{2}}{R_{01}} + C_{2}C_{3}R_{3}; (5.4.2.)$$

$$a_1 = C_{01} \frac{R_2 + R_4}{R_4} + C_2 \frac{R_2}{R_{01}} + C_3 \frac{(R_{01} + R_2)(R_3 + R_4) + R_3 R_4}{R_{01} R_4};$$
(5.4.3.)

$$a_0 = \frac{R_{01} + R_2 + R_4}{R_{01} R_4}.$$
 (5.4.4.)

Vienādojuma (5.4.) risinājumu meklējam atsevišķajā un vispārīgajā veidā, t. i.,

$$U_{C2}(t) = U_{C2st} + U_{C2vis}(t).$$
(5.5.)

Ja $I_0 = \text{const}$, tad stabilizācijas režīmā konkrētais risinājums arī ir pastāvīgs, t. i.,

$$\frac{d^{3}U_{C2}}{dt^{3}} = \frac{d^{2}U_{C2}}{dt^{2}} = \frac{dU_{C2}}{dt} = 0.$$
(5.6.)

No (5.4.) izriet,

$$U_{C2st} = \frac{I_0}{a_0} = I_0 \cdot \frac{R_{01} \cdot R_4}{R_{01} + R_2 + R_4},$$
(5.7.)

kur,

 U_{C2st} – stabilizējusies temperatūra uz ĪTG detektora pēc dzesēšanas.

Vienādojumam (5.4.) atradām vispārīgo risinājumu (5.8.).

$$U_{C2}(t) = A \cdot e^{p \cdot t}, \qquad (5.8.)$$

no kurienes,

$$\frac{\mathrm{d}U_{\mathrm{C2}}}{\mathrm{d}t} = \mathbf{A} \cdot \mathbf{p} \cdot \mathbf{e}^{\mathbf{p} \cdot \mathbf{t}}; \tag{5.9.}$$

$$\frac{\mathrm{d}^2 \mathrm{U}_{\mathrm{C2}}}{\mathrm{d}t^2} = \mathrm{A} \cdot \mathrm{p}^2 \cdot \mathrm{e}^{\mathrm{p} \cdot \mathrm{t}}; \tag{5.10.}$$

$$\frac{\mathrm{d}^{3}\mathrm{U}_{\mathrm{C2}}}{\mathrm{d}\mathrm{t}^{3}} = \mathrm{A} \cdot \mathrm{p}^{3} \cdot \mathrm{e}^{\mathrm{p}\cdot\mathrm{t}}$$
(5.11.)

Ievietojot vienādojumu (5.8.) vienādojumā (5.4.), iegūsim raksturīgo vienādojumu. Sakarā ar to, ka sistēmas parametri (5.4.1.) – (5.4.4.) ir pozitīvie skaitļi, raksturīgam vienādojumam ir trīs negatīvās saknes.

Vadoties pēc modeļa fiziskās būtības, kriostata komponentu kārtējo temperatūru dzesēšanas procesā var reprezentēt sekojošā veidā:

$$U_{Ci}(t) = U_{Ci}(0) - [U_{Cist} + A_{i,1} \cdot e^{p_1 \cdot t} + A_{i,2} \cdot e^{p_2 \cdot t} + A_{i,3} \cdot e^{p_3 \cdot t}], \quad (5.12.)$$

kur,

U_{Ci}(0) – sākuma temperatūra i-tā komponentā pirms dzesēšanas;

U_{Cist} - stabilizējusies temperatūra i-tā komponentā pēc dzesēšanas;

...

A_{i,j} - i-tā komponenta dzesēšanas pārejas procesa koeficienti;

p1; p2; p3 – pārejas procesa raksturīgā vienādojuma saknes;

$$A_{i,1} = \frac{U_i^{(0)} - U_i^{(0)} \cdot (p_3 + p_2) + (U_i^{(0)} - U_{Cist}) \cdot p_2 \cdot p_3}{(p_3 - p_1) \cdot (p_2 - p_1)};$$
(5.13.)

$$A_{i,2} = \frac{-U_{i}^{''}(0) + U_{i}^{'}(0) \cdot (p_{3} + p_{1}) - (U_{i}(0) - U_{Cist}) \cdot p_{1} \cdot p_{3}}{(p_{3} - p_{21}) \cdot (p_{2} - p_{1})};$$
(5.14.)

$$A_{i,3} = \frac{U_{i}^{''}(0) - U_{i}^{'}(0) \cdot (p_{2} + p_{1}) + (U_{i}(0) - U_{Cist}) \cdot p_{1} \cdot p_{2}}{(p_{3} - p_{21}) \cdot (p_{3} - p_{1})} .$$
(5.15.)

Pārejas procesa raksturīgā vienādojuma sastādīšana un koeficientu noteikšana A_{i,j}, vadoties pēc sākotnējiem nosacījumiem, ir standarta procedūra no elektrisko ķēžu teorijas [54].

Izteiksmes stabilizējušām temperatūrām ar kriostata pamatkomponentiem un sākumvērtības pārejas procesa koeficientu A_{i,j} aprēķināšanai ir doti 5.4. tabulā un 5.5. tabulā.

5.4.tabula

	Vriestete komponente	Diagniadu tamparatūra	Sākumvērtības			
	Kilostata komponents	r lespiedu temperatura	$U_i(0)$	$U_{i}^{\prime}(0)$	$U_i^{''}(0)$	
1.	Tvertne ar sorbentu	$U_0 - I_0 \frac{R_{01}(R_2 + R_4)}{R_{01} + R_2 + R_4}$	0	$-\frac{I_0}{C_{01}}$	$I_0 \frac{R_{01} + R_2}{R_{01} R_2 C_{01}^2}$	
2.	Detektora tapnis	$U_0 - I_0 \frac{R_{01}R_4}{R_{01} + R_2 + R_4}$	0	0	$-\frac{I_0}{R_2C_{01}C_2}$	
3.	Detektors	$U_0 - I_0 \frac{R_{01}R_4}{R_{01} + R_2 + R_4}$	0	0	0	

Dati kriostata ar EMD dzesēšanas procesa aprēķināšanai

5.5.tabula

Dati kriostata ar EMD u	ın siltumekrānu	dzesēšanas	procesa	aprēķināšanai

i	Kriostata komponanta	Diespiedu temperatūra	Sākumvērtības					
1	Knostata komponents	r iespiedu temperatura	$U_i(0)$	$U_{i}^{'}(0)$	$U_{i}^{''}(0)$	$U_{i}^{'''}(0)$		
1.	Tvertne ar sorbentu	$U_0 - I_0 \frac{R_{01}(R_2 + R_{41} + R_{42})}{R_{01} + R_2 + R_{41} + R_{42}}$	0	$-\frac{I_0}{C_{01}}$	$I_0 \frac{R_{01} + R_2}{R_{01} R_2 C_{01}^2}$	-		
2.	Detektora tapnis	$U_0 - I_0 \frac{R_{01}(R_{41} + R_{42})}{R_{01} + R_2 + R_{41} + R_{42}}$	0	0	$-\frac{I_0}{R_2C_{01}C_2}$	-		
3.	Detektors	$U_0 - I_0 \frac{R_{01}(R_{41} + R_{42})}{R_{01} + R_2 + R_{41} + R_{42}}$	0	0	0	-		
4.	Siltumekrāns	$U_0 - I_0 \frac{R_{01}R_{42}}{R_{01} + R_2 + R_{41} + R_{42}}$	0	0	0	0		

5.6. Gamma spektrometra kriostata dzesēšanas process

Piedāvātais modelis tika izmantots portatīvā gamma spektrometra *HandSPEC* [55] ĪTG detektora dzesēšanas procesa aprēķināšanai. Modeļa parametri tika noteikti, vadoties pēc ierīces konstrukcijas. Testējamā ierīcē tika izmantots EMD, kurš nodrošina dzesēšanas jaudu 1W@80K. Ekvivalentie parametri R₀, C₀ bija aprēķināti un pamatoti uz slodzes raksturlīknēm, kuras ir eksperimentāli iegūtas. Lielumi C₁, C₂, un C₃ ir vienādi ar vismasīvāko mezglu – vara tvertnes ar sorbentu, ĪTG detektora alumīnija tapņa un paša ĪTG detektora – siltumietilpību. Vara, alumīnija un germānija īpatnējā siltumietilpība ir atkarīga no temperatūras, tāpēc aprēķinos tiek izmantotas vidējās vērtības 90-300K diapazonam. R₁ µ R vērtības tika izvēlētas, vadoties pēc kopējiem zudumiem kriostatā, kuri sasniedz 1.1 W, 90K temperatūrā. Gamma spektrometra *HandSPEC* kriostata ekvivalentās shēmas elementu vērtības ir minētas 5.6. tabulā.

5.6.tabula

Komponents	Komponenta masa	Ekvivalentie parametri
EMD	-	$R_0 = 33,3 \text{ K/W}; C_0 = 15 \text{ J/K}$
Tvertne ar sorbentu (Cu)	0,16 kg	$R_1 = 950 \text{ K/W}; C_1 = 51,2 \text{ J/K}$
Siltumvads(Cu)	0,03 kg	$R_2 = 6,2 \text{ K/W}$
Detektora tapnis (Al)	0,12 kg	$R_3 = 238 \text{ K/W}; C_2 = 84 \text{ J/K}$
ĪTG detektors	0,53 kg	$R_4 = 20 \text{ K/W}; C_3 = 167,4 \text{ J/K}$

Ekvivalentā siltuma modeļa parametri

Atbilstoši (5.8.) – (5.15.) tika aprēķināts pārejas dzesēšanas process. Kriostata komponentu dzesēšanas līknes ir parādītas 5.9.att.

Rezultāti ļauj novērtēt kriostata pamatkomponentu dzesēšanas ātrumu. Aplūkojamais pārejas process tiek reprezentēts kā triju eksponenciālo funkciju summa ar laika konstantēm (5.16.) - (5.18.).

$$\tau_1 = -\frac{1}{p_1} = 3,4 \text{ min};$$
 (5.16.)

$$\tau_2 = -\frac{1}{p_2} = 21,8 \text{ min};$$
 (5.17.)

$$\tau_3 = -\frac{1}{p_3} = 3,3$$
 stundas, (5.18.)

to nosaka ar modeļa raksturvienādojuma saknēm un ļauj novērtēt dzesēšanas līkņu ilgumu un formu.

5.9.att. Detektora (melnā līkne) detektora tapņa (sarkanā līkne) un tvertnes ar sorbentu (punktētā līkne) dzesēšanas aprēķina līknes (pa kreisi); eksperimentālo datu (melnās līknes) un aprēķina (sarkanā līnija) salīdzinājums (pa labi).

ĪTG detektora tapņa dzesēšanas līknes, kuras ir eksperimentāli iegūtas viena mēneša laikā, ir parādītas 5.9.att.(pa labi). Tiek izsekota vakuuma degradācija kriostatā, kura izraisa dzesēšanas procesa pagarināšanu. Aprēķinātās līknes un eksperimentāli ieguto salīdzinājums apstiprina, ka piedāvātais modelis adekvāti atspoguļo reālo dzesēšanas procesu un ļauj izskatīt tā pamatīpatnības.

Jāatzīmē, ka pieaugošā atšķirība starp aprēķināto un eksperimentālo līknēm mazāk kā 140K temperatūrās ir saistīta ar atliku gāzu aktīvās adsorbcijas sākumu vakuuma kamerā ar sorbentu. Adsorbcija pazemina spiedienu kamerā un samazina siltuma pieplūdi. Palielinās dzesēšanas ātrums, bet beigu temperatūra samazinās, kad ir vienāda dzesēšanas jauda.

Neapšaubāmi, mūsdienīgo datorprogrammu izmantošana siltuma aprēķiniem nodrošinās daudz precīzāku temperatūru sadalījumu aprēķinu dzesēšanas procesā. Taču analītisks risinājums var būt izmantots daudz sarežģīto modeļu testēšanai.

5.7. Temperatūras sadale uz siltumekrāna virsmas

Viens no siltuma pieplūdes samazināšanās kriostatos paņēmieniem ir siltumekrānu pielietošana. To darba fiziskais pamats un to praktiskās lietošanas rezultāti ir plaši aprakstīti zinātniskajā literatūrā [17]. Taču to efektivitāti analizē tikai augsta vakuuma apstākļos, kad kriostatā dominē siltumpieplūde siltuma starojuma dēļ. Tajā pašā laikā portatīvo, lauka pielietošanai paredzēto spektrometru praktisko ekspluatāciju raksturo ilgstošie glabāšanas un transportēšanas termiņi izslēgtajā stāvoklī, kas laika gaitā veicina vakuuma degradāciju un apgrūtina kriostata dzesēšanu. Ar noluku pagarināt ierīces darbmūžu un nodrošināt tās drošu dzesēšanu garantijas termiņa beigās, kļūst aktuāla analīze saistībā ar gāzu spiediena kriostatā ietekmi uz siltumekrāna efektivitāti.

5.10. att. Portatīvais gamma spektrometrs *HandSPEC* un siltuma plūsmas kriostatā ar siltumekrānu.

Parādīta (5.10. att.) portatīvā gamma spektrometra ar siltumekrānu kriostata struktūra un galveno siltuma plūsmu tajā. Siltumekrāna efektivitātes novērtēšanai ir jānosaka tā stacionārā temperatūra. To savukārt, nosaka siltuma plūsmu līdzsvars, kuras plūst uz siltumekrānu no ārējā detektora vāka puses un aizplūst uz detektora tapni, ko dzesē EMD. Vispārīgā gadījumā līdzsvara vienādojumam ir izskats:

kur

(5.19.)

(5.20.)

kur

 Q_{3cond} – siltuma pieplūde uz siltumekrānu no ārējā detektora vāka balstu siltumvadītspējas dēļ;

 $Q_{23} + Q_{3cond} = Q_{31},$

 $Q_{23} = Q_{23rad} + Q_{23resid}, Q_{31} = Q_{31rad} + Q_{31resid},$

 Q_{23rad} – siltuma pieplūde uz siltumekrānu ārējā detektora vāka siltuma starojuma dēļ;

 $Q_{23resid}$ – siltuma pieplūde uz siltumekrānu no ārējā detektora vāka molekulārās atliku gāzu siltumvadītspējas kriostatā dēļ;

 Q_{31rad} – siltuma pieplūde uz ĪTG detektoru siltumekrāna starojuma dēļ;

 $Q_{31resid}$ – siltuma pieplūde uz ĪTG detektoru no siltumekrāna molekulārās atliku gāzu siltumvadītspējas kriostatā dēļ.

Siltuma pieplūde uz siltumekrānu, siltuma starojuma un molekulārās atliku gāzu vadītspējas dēļ, ir vienmērīgi sadalīta siltumekrāna laukumā (5.11.att.). Gadījumā, ja nav balstu ($Q_{3cond} = 0$), siltumekrāns tiek dēvēts par "peldošo", un tā stabilizējusies temperatūra tiek noteikta, vadoties pēc līdzsvara vienādojuma (5.19.), kurā tā sastāvā ietilpstošie siltuma pieplūdes komponentes tiek viegli aprēķinātas pēc 2.1. nodaļā minētām formulām. Balstu esamība reālajos kriostatos nodrošina siltuma pieplūdi Q_{3cond} , kas izraisa temperatūras nevienmērīgumu uz ekrāna virsmas gar tā garumu.

Aplūkosim siltumekrāna modeli cilindra veidā ar ārējo radiusu R, sienas biezumu b un garumu L (5.11.att.(pa labi)). Enerģijas bilance tiek piemērota mazā garuma Δy elementam, turklāt temperatūra gar tā aploci tiek uzskatīta par nemainīgu.

5.11. att. Siltumekrāna aprēķina modelis kriostatā (pa kreisi); enerģijas līdzsvars bezgalīgi mazam elementam (pa labi).

Apaļā siltumekrāna (ar D3 diametru) ārējās elementa virsmas laukums ir vienāds ar:

$$\Delta S_{y,3} = \Delta y P_3 = \Delta y \pi D_3, \qquad (5.21.)$$

Pamatojoties uz enerģētisko bilanci, kas ir pielietota elementam, iegūstam:

$$\mathbf{q}_{\mathbf{y}} + \Delta \mathbf{q}_{\mathbf{c}} = \mathbf{q}_{\mathbf{y} + \Delta \mathbf{y}},\tag{5.22.}$$

kur,

$$\Delta q_{c} = \Delta q_{23rad} - \Delta q_{13rad} + \Delta q_{23resid} - \Delta q_{13resid}.$$
(5.23.)

Sadalot vienādojumu ar Δy , un izpildot robežpāreju, ja $\Delta y \rightarrow 0$

$$\lim_{\Delta y \to 0} \left[\frac{q_y - q_{y + \Delta y}}{\Delta y} \right] - \lim_{\Delta y \to 0} \left[\frac{\Delta q_c}{\Delta y} \right] = 0,$$
(5.24.)

iegūsim:

$$-\frac{dq_y}{dy} - \frac{dq_c}{dy} = 0, \tag{5.25.}$$

kur,

$$dq_{c} = \varepsilon_{23}\sigma dS_{y,3}(T_{2}^{4} - T^{4}) - \varepsilon_{13}\sigma dS_{y,1}(T^{4} - T_{1}^{4}) + \alpha_{23}BpdS_{y,3}(T_{2} - T) - \alpha_{13}BpdS_{y,1}(T - T_{1}), \qquad (5.26.)$$

$$\frac{dS_{y,3}}{dy} = P_3 = \pi D_3; \tag{5.27.}$$

$$\frac{dS_{y,1}}{dy} = P_1 = \pi D_1 \,. \tag{5.28.}$$

Atzīmēsim, ka siltuma pieplūdes starp bezgalīgiem koaksiāliem cilindriem vienādojumā ietilpst iekšējā cilindra diametrs. Tāpēc (5.26.), aprakstot siltuma pieplūdi no kriostata ārējā detektora vāka uz siltumekrānu, izmanto diametru D_3 , bet, aprakstot siltuma pieplūdi no siltumekrāna uz detektoru, atbilstoši – D_1 . Noteiktais 2.1. nodaļā koeficients B ir vienāds ar (2.5.). Atbilstoši Furjē likumam:

$$q_y = -k(y) A(y) \frac{dT}{dy},$$
 (5.29.)

kur

A (y) – šķērsgriezuma laukums, kas ir perpendikulārs y asij.

Šajā gadījumā diferenciālvienādojumam (5.25.) ir sekojošs veids:

$$\frac{d}{dy}\left[k(y)A(y)\frac{dT}{dy}\right] - \frac{dq_c}{dy} = 0.$$
(5.30.)

Aplūkojamā gadījumā siltumekrāna šķēluma laukums ir nemainīgs visā garumā. Siltumvadītspējas koeficients k(y) arī ir nemainīgs, jo siltumekrāns ir izgatavots no viendabīga materiāla. Vēl jo vairāk, tā kā ir mazi izmēri, prognozējams ir, ka temperatūru starpība starp siltumekrāna sākumu un beigām būs neliela un var ignorēt to ietekmi uz siltumvadītspējas koeficienta izmainīšanu. Šajā gadījumā vienādojums (5.30.) kļūst par otrās kārtas diferenciālvienādojumu ar nemainīgiem koeficientiem:

$$kA\frac{d^2T}{dy^2} - \frac{dq_c}{dy} = 0, \qquad (5.31.)$$

kur,

$$A = bP_3(1 - \frac{b}{D_3}) = b\pi D_3(1 - \frac{b}{D_3}).$$
 (5.32.)

Ievietojot (5.26.) izteiksmē (5.31.), iegūsim siltumekrāna virsmas temperatūras izmainīšanas diferenciālvienādojumu (5.33.).

$$\frac{d^{2}T}{dy^{2}} - \frac{\varepsilon_{23}\sigma}{kb(1-\frac{b}{D_{3}})} (T_{2}^{4} - T^{4}) + \frac{\varepsilon_{13}\sigma}{kb(1-\frac{b}{D_{3}})} \frac{D_{1}}{D_{3}} (T^{4} - T_{1}^{4}) - \frac{\alpha_{23}Bp}{kb(1-\frac{b}{D_{3}})} (T_{2} - T) + \frac{\alpha_{13}Bp}{kb(1-\frac{b}{D_{3}})} \frac{D_{1}}{D_{3}} (T - T_{1}) = 0.$$
(5.33.)

Gadījumā, kad kriostatā ir augsts vakuums, tad var ignorēt siltuma pieplūdi molekulārās atliku gāzu vadītspējas dēļ, un diferenciālvienādojums (5.33.) kļūs vienkāršāks:

$$\frac{d^{2}T}{dy^{2}} - \frac{\varepsilon_{23}\sigma}{kb(1-\frac{b}{D_{3}})} (T_{2}^{4} - T^{4}) + \frac{\varepsilon_{13}\sigma}{kb(1-\frac{b}{D_{3}})} \frac{D_{1}}{D_{3}} (T^{4} - T_{1}^{4}) = 0,$$
(5.34.)

kur

$$\varepsilon_{23} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_{sh2}} + (\frac{1}{\varepsilon_2} - 1) \cdot \frac{D_3}{D_2}};$$
(5.35.)

$$\varepsilon_{13} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + (\frac{1}{\varepsilon_{sh1}} - 1) \cdot \frac{D_1}{D_3}}.$$
 (5.36.)

Iegūtā diferenciālvienādojuma risinājuma robežnosacījumiem ir sekojošs veids:

$$T_{y=0} = T_0;$$
 (5.37.)

$$\frac{\mathrm{dT}_{\mathbf{y}=\mathbf{L}}}{\mathrm{dy}} = \mathbf{0}.$$
(5.38.)

Otrā robežnosacījuma fiziskā jēga – siltuma pieplūdes pārtraukšana siltumekrāna galā. "Peldošam" siltumekrānam (ja nav balstu $Q_{3cond} = 0$), tā temperatūra ir vienāda visā garumā, jo siltuma pieplūde siltuma starojuma un molekulārās atliku gāzu vadītspējas dēļ ir vienmērīgi sadalīta. Stabilizējusies temperatūra var būt noteikta no (5.33.), ar nosacījumu:

$$\frac{d^2T}{dy^2} = 0 \text{ (jo } \frac{dq_c}{dy} = 0\text{).}$$
(5.39.)

Šajā gadījumā diferenciālvienādojums (5.33.) pārvēršas par enerģētiskās bilances vienādojumu.

5.8. Skaitliskie kriostata ar siltumekrānu aprēķini

Turpmākiem eksperimentālajiem pētījumiem tika izstrādāts un izgatavots kriostats ar siltumekrānu, kurš ir aprīkots ar temperatūras un spiediena devējiem (5.12. att.).

5.12. att. Kriostata kopskats pētījumiem (pa kreisi) un siltumekrāns montētā veidā (pa labi).

Siltumekrānam ir cilindriskā forma ar garumu L = 100 mm, ārējais diametrs $D_3 = 72$ mm, un ir izpildīts no nerūsējošā tērauda ar 0,5 mm biezumu. Siltumekrāns tiek uzstādīts ar PTFE balstiem ar siltuma pretestību 800 K/W. Ārējam detektora vākam ir iekšējais diametrs $D_2 = 80$ mm, bet detektora imitatoram ir ārējais diametrs $D_1 = 50$ mm. Tika pieņemts uzskatīt, ka stacionārās detektora imitatora un ārējā alumīnija detektora vāka temperatūras ir nemainīgas un vienādas ar T1 = 90K un T2 = 295K.

Jāatzīmē, ka siltuma starojuma un akomodācijas koeficientu skaitliskās vērtības, kuras ir minētas rokasgrāmatās [57], [58], ievērojami atšķiras. Autori izskaidro šo atšķirību reāli izmantojamo materiālu virsmas raupjumā pēc to apstrādes, ar piemaisījumu esamību u. tml. Šī nenoteiktība samazina aprēķinu precizitātes svarīgumu, salīdzinot ar atrastajām tendencēm. Kopumā emisijas spēja samazinās ar temperatūru, bet palielinās ar oksidēšanos, piejaukumiem un netīrumiem. Vismazākā emisijas koeficienta sasniegšanai tiek rekomendēts izmantot pulētās virsmas. Aprēķiniem pieņemtie koeficienti ir minēti 5.7. tabulā.

Atliku gāzes vakuuma kamerā veidojas pieplūdes caur blīvējumiem un izdalīšanos no iekšējām virsmām dēļ. Tāpēc var uzskatīt, ka atliku gāzes sastāva ziņā ir tuvas gaisam. Tad adiabātiskais indekss ir vienāds ar $\gamma = 1,41$ un vidējā molmasa $\mu = 29 \ g/mol$.

Vinama	A notra dos motodo	Emisijas	Akomodācijas	
v irsina	Apstrades metode	koeficienti	koeficienti	
Detektora vāka iekšējā	Mehāniski apstrādāts	0.2	0.0	
virsma	alumīnijs	0,2	0,9	
Ciltum alm≣n a	Elektropulētais nerūsējošais	0.1	0,9	
Situmekrans	tērauds	0,1		
Detektora tapņa virsma	Oksidētais alumīnijs	0,3	1,0	

Aprēķiniem pieņemtie emisijas un akomodācijas koeficienti

Šīm skaitliskām vērtībām nelineārais diferenciālvienādojums (5.33.) tika risināts ar skaitlisko integrēšanu *MathCAD* vidē. Temperatūras sadalījumi gar y asi, kas ir aprēķināti ar vienādojuma (5.33.) skaitlisko integrēšanu dažādām sākuma temperatūrām un atliku gāzu spiedieniem, ir parādīti 5.13.att.

5.13.att. Temperatūras sadalīšana uz nerūsējošā tērauda siltumekrāna (ar 0.5 mm biezumu) virsmas dažādām atlieku gāzu sākotnējām temperatūrām un spiedieniem.

Attēlā (5.13. att.) "peldošā" siltumekrāna ($Q_{3cond} = 0$) temperatūras ir parādītas ar melnām punktētām līnijām. Ja atliku gāzu spiediens kriostata iekšienē ir vienāds ar p = 0,001 mbar, tad $T_3 = 237,7K$; ja p = 0,01mbar, tad $T_3 = 213,8K$.

Reālajos apstākļos vērtību T_0 nosaka siltuma pieplūdes caur siltumekrāna balstiem lielums. Sarkanās krāsas līknes (5.13. att.) demonstrē temperatūras sadali siltumekrāna garumā pozitīvai siltuma pieplūdei. Tajā laikā, kad līknes, kuras ir atzīmētas ar zilo krāsu, atbilst negatīvās siltuma pieplūdes, t. i., ekrāna dzesēšanas sadalīšanai.

Tātad, gadijumā ja $Q_{3cond} \ge 0$, tad:

$$T_{y=0} \ge T_3, \frac{dT_{y=0}}{dy} \le 0,$$
 (5.40.)

un gadijumā ja $Q_{3cond} \leq 0$, tad:

$$T_{y=0} \le T_3, \frac{dT_{y=0}}{dy} \ge 0.$$
 (5.41.)

Līdz ar siltuma pieplūdes caur balstiem, pieaug temperatūras nevienmērīgums siltumekrāna garumā. Diferenciālvienādojuma (5.33.) risinājumu analīze ļauj izvēlēties lokšņu materiāla biezumu un to marku siltumekrāna izgatavošanai, kas nodrošinās pieļaujamo temperatūras nevienmērīgumu garumā. Siltumekrānu pētījuma darbu autori atzīmē, ka temperatūras starpība 5-10 K ir pieņemama [17], [59]. Temperatūras starpība siltumekrāna galos dažādiem gadījumiem ir aprēķināta un minēta. 5.8. tabulā. Siltuma pieplūde caur balstiem ir pieņemta vienāda ar $Q_{3cond} = 0,1$ W.

5.8.tabula

Siltumekrāna parametri:	Alumīnijs		Nerūsējošais tērauds		
Biezums, mm	2,0	1,0	0,5	0,5	0,1
Ārējais diametrs, mm	76,0	76,0	76,0	76,0	76,0
Iekšējais diametrs, mm	72,0	74,0	75,0	75,0	75,8
Temperatūru starpība, K	0,059	0,115	0,226	2,02	5,11

Temperatūras aprēķina starpība siltumekrāna galos

Siltumekrāna mazā garuma dēļ temperatūru starpība tā galos nav liela. Tāpēc izgatavošanas tehnoloģijas vienkāršošanai var izmantot lokšņu nerūsējošo tēraudu ar 0,5 mm biezumu, kaut gan tā siltumvadītspēja ir daudz zemāka nekā alumīnijam vai varam, ko parasti pielieto šajos nolūkos.

Pamatojoties uz iepriekš iegūtiem vienādojumiem, kriostatam tika aprēķinātas siltuma pieplūdes komponentes balstu Q_{3cond} siltumvadītspējas, siltuma starojuma Q_{32rad} un Q_{31rad} dēļ, kā arī atliku gāzu $Q_{32resid}$ un $Q_{31resid}$ molekulārās vadītspējas dēļ. 5.9. tabulā minētie dati ļauj novērtēt to attiecību un izstrādāt praktiskās rekomendācijas saistībā ar siltuma pieplūdi kriostatā samazināšanos. 5.10. tabulā ir minēti siltuma pieplūdes uz kriostatā dzesējamo detektoru lielumi (ja ir siltumekrāns un ja tā nav). Lai novērtētu siltumekrāna lietošanas efektivitāti, ir aprēķināta siltuma pieplūdes uz dzesējamo detektoru attiecība abos gadījumos (Q_{21}/Q_{31}). Aprēķini parāda siltuma pieplūdes samazināšanos 2-3 reizes, turklāt šī attiecība saglabājas, ja izmainās gāzu spiediens kriostatā plašās robežās.

5.14. att. Temperatūras sadalīšana nerūsējošā tērauda siltumekrānam ar 0,5 mm biezumu.

5.9. tabula

a:		Siltuma pieplūde uz siltumekrānu no ārējā				Siltuma piepūde uz detektoru no			
Spiediens,	$T_{\rm siltumekrans}$,			vāka			siltumekrāna	a	
mbar	K	Q_{3cond} ,	Q_{32rad} ,	$Q_{32 resid}$,	O 22 (11) W	Q_{31rad} ,	$O_{21} \cdots W$	Q_{31-}	
		W	W	W	Q32_total, **	W	Q31resid, W	_total,W	
0,0001	252,32	0,053	0,332	0,009	0,394	0,367	0,027	0,394	
0,001	242,36	0,066	0,389	0,114	0,569	0,312	0,257	0,569	
0,01	215,94	0,099	0,509	1,707	2,315	0,194	2,121	2,315	
0,02	211,09	0,105	0,527	3,623	4,255	0,177	4,078	4,255	

Siltuma pieplūde kriostatā-prototipā, kad ir dažādi gāzes spiedieni

5.10. tabula

Siltumekrāna efektivitāte kriostatā, kad ir dažādi gāzes spiedieni

	Siltuma pieplūde uz detektoru			Siltuma p	Ekrāna		
Spiediens,	no siltumekrāna		no siltumekrāna ārējā vāka (bez siltumekrāna)			umekrāna)	efektivitāte
mbar	Q _{31rad} , W	Q _{31resid} , W	Q _{31_total} , W	Q_{21rad} , W	$\frac{1}{1}$ Irad, W Q_{21} Constant, W Q_{21} Co		$Q_{21}/Q_{31}, W$
0,0001	0,367	0,027	0,394	1,146	0,035	1,181	2,99
0,001	0,312	0,257	0,569	1,146	0,348	1,494	2,63
0,01	0,194	2,121	2,315	1,146	3,481	4,627	2,00
0,02	0,177	4,078	4,255	1,146	6,961	8,107	1,91

5.9. Kriostata dzesēšanas procesa aprēķini ar datorprogrammām

Rezultāti, kuri ir iegūti iepriekšējās nodaļās ar vienkāršoto modeli, ļauj novērtēt siltuma pamatplūsmas starp ĪTG detektora ārējo detektora vāku, siltumekrānu un detektora tapni. Sastādot diferenciālos vienādojumus, kuri apraksta dzesēšanas procesu, tika ņemtas vērā tikai dzesēšanas procesā piedalošos kriostata pamatdaļu siltumietilpība un siltumvadītspēja. Taču ģeometriskās formas ietekmi uz temperatūru sadalīšanu nebija iespējams ņemt vērā iepriekš.

Mūsdienīgās datorprogrammas, kuras pielieto siltuma procesu simulēšanai, ļauj novērtēt kriostata komponentu temperatūru sadalīšanu gan pārejas procesa gadījumā, gan arī stabilizējušās dzesēšanas režīmā [61]. Daudz sarežģītāks modelis, kurš atbilst reālā kriostata konstrukcijai, tika modelēts ar gala elementu metodi, neatkarīgi, gan *Solidworks Simulation* [53] vidē, gan arī *Star-CCM*+ vidē [56].

Dzesēšanas procesa novērtēšanas un temperatūras sadalīšanas uz kriostata pamatmezglu virsmām nolūkā tika izveidots trīsdimensiju modelis (5.15. att.). Par pamatu tika paņemti tehniskie kriostata-prototipa rasējumi. Ārējais izskats un kriostata pilnā modeļa šķērsgriezums ir parādīts 5.15. att. Tāpat arī kā reālā konstrukcija, kriostata fiziskais modelis sastāv no mezgliem, kuri ir izpildīti no dažādiem materiāliem – alumīnija, nerūsējošā tērauda, vara, PTFE.

5.15. att. Kriostata ar siltumekrānu aprēķina modelis[56].

Skaitliskai atrisināšanai kriostata modelis tiek sadalīts nelielu apjomu vai tīklu gala skaitā. Pa soļiem, ar nolūku pārbaudīt modeļa adekvātumu, tika uzdoti fiziskie modeļa parametri:

- 1. Apkārtējās vides temperatūra 300K;
- 2. EMD siltuma caurulites aukstā gala temperatūra 80K;
- 3. Kriostata ārējo virsmu konvencija 10 W/m²K;
- 4. Detektora imitatora virsmu emisijas koeficients -0,3;
- 5. Detektora ārēja vāka iekšējo virsmu emisijas koeficients 0,2;
- 6. Detektora tapņa virsmu emisijas koeficients -0.3;
- 7. Detektora tapņa balstu virsmu emisijas koeficients 0,92;
- 8. Vakuuma kameras iekšējo virsmu emisijas koeficients 0,1;
- 9. Siltumekrāna virsmu emisijas koeficients 0,1;
- 10. Tvetnes ar sorbentu un elastīga tiltiņa virsmu emisijas koeficients 0,5.

Siltuma starojuma modelis "virsma-virsma" tiek izmantots, lai analizētu siltumapmaiņas starp patvaļīgās sarežģītības virsmām, kuras veido slēgto telpu gamma spektrometra kriostata iekšienē. Ir parādīta (5.16. att.) temperatūru sadalīšana kriostata dzesēšanas stabilizējies stāvoklī, kas ir iegūts ar simulēšanu *Solidworks* vidē.

5.16. att. Temperatūru sadalīšana kriostatā (bez siltumekrāna (pa kreisi) un ar siltumekrānu (pa labi)) stabilizējušās dzesēšanas stāvoklī *Solidworks* vidē.

Gamma spektrometra kriostata korpuss atrodas apkārtējai videi tuvā temperatūrā. Efektīva siltuma pieplūdes samazināšanas metode siltuma starojumam deļ ir siltumekrānu izmantošana. Ieviešot siltumekrānu un papildus balstus modelī, lai to fiksētu, tika veikta analoģiskā dzesēšanas procesa simulācija ar siltuma starojuma papildus parametru ieviešanu starp kriostata virsmām. Simulēšanas rezultāti demonstrē vispārīgo temperatūras lauku, kas tiek novērots modelēšanas laikā.

Izmantojot analoģiskos datus *HADEDE* [57] projekta programmas ietvaros, kuru atbalsta starpreģionālās sadarbības komiteja *ESTLAT* tika izveidots modelis *Star-CCM*+ vidē. Temperatūras sadalīšana kriostatā gan bez siltumekrāna, gan arī ar to ir parādīta (5.17. att.). Siltumekrāna temperatūras, kuras ir aprēķinātas ar dažādām metodēm, ir tuvas viena otrai, kā arī ar eksperimentāliem datiem, kuri ir minēti iepriekš. Pastāvošā aprēķināšanas rezultātu neliela atšķirība ir dažādu aprēķinu modeļu izmantošanas sekas.

5.17. att. Temperatūru sadalīšana kriostatā (bez siltumekrāna (pa kreisi) un ar siltumekrānu (pa labi)) stabilizējušās dzesēšanas stāvoklī *Star-CCM*+ vidē.

5.18. att. Lokālā stacionārā temperatūras sadalīšana uz siltumekrāna virsmas, kas tiek aprēķināta pēc *Star-CCM*+ modeļa (pa kreisi) un diferenciālā vienādojuma *MathCAD* vidē (pa labi) p = 0,0002 mbar.

Ir parādīta (5.18. att.) temperatūras sadalīšana uz siltumekrāna virsmas, kas ir aprēķināta gan *Star-CCM*+ vidē (pa kreisi), gan arī ar skaitlisko diferenciālā vienādojuma atrisināšanu (5.33.) *MathCad* vidē.

Jāatzīme, ka temperatūras krišana stacionārajā stāvoklī siltumekrāna garumā abos gadījumos ir vienāda ar 1,1 K. Neliela temperatūru starpība starp siltumekrāna sākuma un galu var būt paskaidrota ar nelielu siltuma pieplūdi caur balstiem.

ĪTG gamma spektrometra kriostata dzesēšanas ātrums un tā izejas laiks darba režīmā ir viens no pasē norādītiem tāda tipa aparatūras galveniem parametriem. Tāpēc, no praktiskā redzespunkta, ĪTG detektora kriostata dzesēšanas dinamikas novērtēšana paliek par vienu no aktuālākajiem uzdevumiem.

Ar Solidwoks palidzību tika veikts kriostata pārejas dzesēšanas procesa novērtējums, kas ļauj novērtēt kriostata sastāvdaļu temperatūru sadalīšanu no laika. Par kriostata dzesēšanas datiem tika paņemta *Thales LSF 9589* EMD nelineārās atkarības līkne [10]. Pārejas procesa simulēšanas laiks 13000 sekundēs ar 10 sekunžu soli ļāva novērtēt kriostata un tā sastāvdaļu dzesēšanas dinamiku. Par piemēru (5.19. att.) tika minēti temperatūru sadalījumi dzesēšanas procesā laika posmā 60; 300; 600; 1800; 2400 un 3600 sekundēs. Iegūtie temperatūru sadalījumi no laika ļauj saprast kriostata dzesēšanas mezglu secīgumu.

5.19. att. Kriostata pamatdaļu temperatūras sadalīšana laika intervalā 60; 300; 600; 1800; 2400; 3600 sekundes.

Kriostata galveno mezglu dzesēšanas dinamikas novērtēšanai tika izvēlēti kontroles punkti (5.20. att.). Par termostatēšanas apvidu 79-81K diapazonā ir izvēlēts detektora augšējās virsmas centrs (5.20. att. (5. punkts)).

Ir parādīta kriostata sastāvdaļu temperatūru sadalīšanas atkarība. Parādīta temperatūru starpība dzesēšanas režīmā 18000 sekunžu laikā ar 180 sekunžu soli (5.21. att.). Aprēķinātais dzesēšanas process ir analoģisks eksperimentāli iegūtam kriostata (5.12. att.) dzesēšanas laikā (5.22. att.).

5.20. att. Kontroles punktu sadalīšana kriostata modelī.

5.22. att. Kriostata ar siltumekrānu dzesēšanas līknes (nepārtrauktās līnijas: $p < 10^{-5}$ mbar; punktētā līnija: $p = 4 \cdot 10^{-3}$ mbar); sarkanās līknes – temperatūra EMD siltuma caurulītes aukstajā galā; zilā līkne – temperatūra uz ĪTG detektora tapņa; brūnā līkne – temperatūra uz siltumekrāna.

5.10.Eksperimentālie kriostata pētījumi ar siltumekrānu

Siltumekrāna eksperimentāliem pētījumiem tika izstrādāts un izgatavots kriostats (5.23. att. un 5.24. att.). Atšķirībā no gamma spektrometru tipveida kriostata ar EMD, eksperimentāliem pētījumiem sagatavotais kriostats bija papildus aprīkots ar trim temperatūras devējiem *PT100* un *Pirani Thyracont VSP64DL* devēju spiediena mērīšanai. Devēji *PT100* ļauj kontrolēt EMD siltuma caurulites aukstā gala, detektora tapņa un siltumekrāna temperatūru. Pārveidotājs *Pirani VSP64DL* ir paredzēts spiediena mērīšanai no atmosfēras līdz 10⁻⁴ mbar. EMD *Thales LSF 9589*, kuru izmanto kriostatā, nodrošina dzesēšanas jaudu 2,7 W@80 K, kad ieejas jauda nav lielāka par 80W. Tāpat arī kā reālo gamma spektrometru kriostatos tika realizēts detektora tapņa temperatūras stabilizācijas režīms 90K +/- 1K.

5.23. att. Iekšējie kriostata mezgli ar siltumekrānu.

- 1 Vakuuma kamera;
- 2 Spiediena devējs;
- 3 Detektora imitators;
- 4 Detektora tapņa balsti;
- 5 Siltumekrāna balsti;
- 6 Kontaktplates;

- 7 Siltumekrāns;
- 8 Temperatūras devējs PT100;
- 9 Sūknēšanas vārsts;
- 10 Getera korpuss;
- 11 Elektriskie savienotaji.

5.24. att. Iekārtas kopskats kriostata ar siltumekrānu pētīšanai.

Palielinoties spiedienam kriostata vakuuma kamerā, tika izmērītas temperatūras kontrolpunktos, rezultāti ir parādīti attēlā (5.25. att.). Lēnu spiediena pieaugumu vakuuma kamerā nodrošināja dabiskā pieplūde caur elastomēra blīvējumiem. Kopējais pieplūdes ātrums nepārsniedza 2×10^{-4} mbar/stundā. Tā kā siltumekrāna termiska masa nepārsniedz 40 J/K, bet tā temperatūras izmaiņas starp virknes mērījumiem nepārsniedz 2-3K, izmērītās temperatūras var uzskatīt par nostabilizējies temperatūrām. Siltumekrāna temperatūras, kuras ir aprēķinātas uz enerģētiskās bilances vienādojuma (5.39.) pamata, ir atzīmētas ar krustiņiem 5.25. attēlā. Aprēķina nolūkos tika izmantota detektora tapņa eksperimentāli izmērītā temperatūra T_1 . Siltumekrāna aprēķina temperatūra un tā tendence ir tuvi eksperimentāli izmērītiem. Šo faktu apstiprina iepriekš aprakstītā fiziskā modeļa, kā arī uz tā pamata izdarīto secinājumu taisnīgums. Zināmu atšķirību, ja $p > 10^{-2}$ mbar, izskaidro iekļūšana pārejas apvidū, kurā vienlaikus darbojas gan molekulārais, gan arī konvektīvais siltumapmaiņas režīmi.

Kā tika minēts iepriekš, analoģiski EMD darbībai reālajos gamma spektrometros, šajā kriostatā tika realizēts detektora tapņa stabilizācijas režīms 90K +/-1K. Iegūtie rezultāti parāda, ka EMD nodrošina detektora tapņa temperatūras stabilizāciju, tajā pašā laikā, kad spiediens sastāda mazāk nekā $6,2x10^{-3}$ mbar. Tajā pašā laikā siltumekrāna temperatūra samazinās no 254K līdz 228K, bet EMD ieejas jauda palielinājās no 34W līdz 77W. Siltumekrāna stabilizējušās temperatūras samazināšanu, kuru nodrošina enerģētiskā bilance, var izskaidrot ar siltuma pieplūdes palielināšanos molekulārās atlieku gāzu vadītspējas dēļ. Ja turpmāk palielinās spiediens kriostata vakuuma kamerā, tad trūkst EMD dzesējošās jaudas, lai stabilizētu detektora tapņa temperatūra. Siltumekrāna temperatūra palielinās, jo paaugstinās detektora tapņa temperatūra. Siltuma pieplūdes palielināšanu, līdz ar atlieku gāzu spiediena pieaugumu kriostatā, skaidri apstiprina siltuma saites temperatūru starpības $T_1 - T_0$ palielināšana. Siltuma saitei starp EMD un detektora tapņa ir pastāvīga pretestība. Tāpēc temperatūras krišana tajā ir proporcionāla siltuma plūsmai.


5.25. att. Temperatūras izmainīšana kontrolpunktos un EMD ieejas jaudas izmainīšana dažādiem spiedieniem kriostata vakuuma kamerā.



5.26. att. Detektora tapņa temperatūras izmainīšana dažādiem spiedieniem kriostata vakuuma kamerā bez siltumekrāna; ar siltumekrānu; ar daudzslāņaino izolāciju.

Tāda paša mērījumu sērija tika veikta kriostatam, kurā siltumekrāna vietā tika izmantota daudzslāņainā izolācija (DSI) *Coolcal 2 NW*, kas sastāv no 10 divpusējās alumīnija poliestera folijas slāņiem. Rezultāti ir parādīti 5.26. attēlā. Atbilstoši iegūtiem rezultātiem, EMD temperatūras stabilizācija tiek pārtraukta, kad spiediens kriostatā bez siltumekrāna ir $2,1x10^{-3}$ mbar un turpinās līdz spiedienam $6,2x10^{-3}$, ja uzstādīt to. Izmantojot daudzslāņaino izolāciju, temperatūras stabilizācijas diapazons palielinās līdz $1,2x10^{-2}$ mbar. Acīmredzams, ka šis detektora tapņa (ar ierobežoto dzesēšanas jaudu) temperatūras stabilizācijas diapazona paplašinājums apstiprina siltumekrāna efektivitātes saglabāšanu, kad notiek vakuuma degradācija. Eksperimentu rezultātā iegūtie dati atbilst secinājumiem, kuri balstās uz 5.9. un 5.10. tabulās dotiem aprēķina datiem.



5.27. att. Prototipa kopskats (pa kreisi) ar daudzslāņaino izolāciju (pa labi).

Atzīmēsim, ka, no fizikālā redzespunkta, katrs DSI slānis spēlē siltumekrāna lomu [17], [64]. Tas izskaidro tā augsto efektivitāti. Taču sevišķi liels izmantojamās DSI virsmas laukums palielina gāzes molekulu izdalīšanos, kas apgrūtina vajadzīgā vakuuma uzturēšanu un samazina tās izmantošanas pievilcību lauku nolūkiem paredzēto portatīvo gamma spektrometru mazgabarīta kriostatos.

5.11.Secinājumi

Piektajā darba nodaļā izstrādāta metodika, veikti modelēšanas aprēķini ar datorprogrammu *MathCAD* un ar *Solidworks Simulation*, kā arī veikti eksperimenti siltuma procesu modelēšanai kriostatos ar elektromašīnu dzesētāju (EMD). Izstrādāts kriostata ar elektromašīnu dzesētāju un siltumekrānu dinamiskais siltuma modelis, kas ir sastādīts ar termoelektrisko analoģiju hipotēzes palīdzību. Modelis, ko apraksta nelineāra diferenciālvienādojumu sistēma, atrisināts, analizēts un optimizēts. Iegūti rezultāti, kas apraksta temperatūras sadalījumu uz siltumekrāna virsmas. Tas atļauj noteikt siltuma pieplūdes un vadīšanas ietekmi, atkarībā no molekulārās atlieku gāzes kriostatā vadītspējas. Iegūti jauni rezultāti par efektīvo siltuma plūsmas samazināšanos uz detektora, izmantojot siltumekrānu (ne tikai augstā, bet arī vidējā vakuuma apvidū). Aprēķini parāda siltuma pieplūdes samazināšanos 2-3 reizes, turklāt šī attiecība saglabājas, ja izmainās gāzu spiediens kriostatā plašās robežās. *Solidworks* vidē tika veikts kriostata pārejas dzesēšanas procesa novērtējums un verificēts ar eksperimentāli iegūto reāla kriostata dzesēšanas laikā.

6. REZONANŠU NOVĒRTĒJUMS KRIOSTATĀ AR EMD

Kā tika parādīts Trešajā nodaļā, būtisko ietekmi uz gamma spektrometru enerģētisko izšķirtspēju rada EMD piemītošās vibrācijas. 6.1. tabulā ir minētas EMD darba frekvences, kuras tiek izmantotas kriostatos, gamma spektrometros.

6.1. tabula

Nr.	Ražotājs, valsts	EMD marka	Darba frekvence
1.	<i>Ricor</i> , Izraēla	K508	50-75Hz
2.	AIM, Vācija	SF100; SF400	30-70Hz
3.	<i>Lihan</i> , Ķīna	TC4189	70-75Hz
4.	Thales, Francija	LPT9510	40Hz
5.	Cobham, ASV	LC1066	40-80Hz
6.	Sunpower, ASV	CryoTel® GT	60Hz
7.	<i>Ricor</i> , Izraēla	K570	75Hz
8.	Thales, Francija	LSF9589	50Hz
9.	Thales, Francija	LSF9340	50Hz
10.	<i>Lihan</i> , Ķīna	TC4187	100Hz

Gamma spektrometru piemērojamo EMD darba frekvences

Nelineāru dinamisku raksturojumu deļ, ģenerējamās vibrācijas EMD spektrs, izņemot darba frekvenci, iekļauj sevī tās harmonikas. Vibrācijas efektīvā nomākšana darba frekvencē tiek nodrošināta ar iestatīto dinamisko vibroslāpētāju, kas ir iekļauts EMD sastāvā kā opcija. Harmonikas ar frekvencēm lielākām par 1 kHz ir mazas amplitūdas, un to iedarbība ir samazināta ar konstrukcijas slāpēšanu. Vislielāko ietekmi uz gamma spektrometra enerģētisko izšķirtspēju, apstrādājot signālu, rada elektriskie traucējumi, kuri atrodas 200-800 Hz frekvenču diapazonā. Tos var izraisīt mikrofonefekts parazītisko kapacitāšu starp tādām kriostata sastāvdaļām, kā ārējo detektora vāku, siltumekrānu un tapni ar ĪTG detektoru dēļ. Gadījumā, ja sakrīt viena no šo kriostata daļu rezonanses frekvencēm ar kādu EMD vibrācijas spektra harmoniku, notiek tās rezonanses pastiprināšana, kas palielina negatīvo mikrofonefekta ietekmi.

6.1. Kriostata mezglu modālā analīze Solidworks vidē

ĪTG kriostata daļu frekvenču raksturlīkņu datorsimulēšanai tika izmantots *Solidworks*. Ar šo programmu tika novērtētas kriostata konstrukcijas rezonanses frekvences, kā arī rezonanses modu formas. Modālā analīze atrod analizējamā objekta pašfrekvences un svārstību formas, kad nav slāpēšanas. Nobīžu aprēķinu rezultāti, kuri ir izcelti ar krāsu gammu vizualizācijās, var būt izmantoti tikai ar nolūku salīdzināt relatīvās nobīdes starp dažādām analizējamās struktūras daļām un tikai vienas modas robežās.

Pirms pāriet pie ĪTG detektora tapņa balstu analīzes, ir jāatzīmē, ka germānija monokristālam ir cilindriskā forma. Lai fiksētu ĪTG detektoru, tapnis arī tiek izgatavots cilindriskās formas veidā. Tāpēc ir acīmredzams, ka detektora mezglam ir aksiālsimetriskā struktūra, kuru *Solidworks* modelē citādi. Atkārtojošās modas ar vibrācijas plakni, kas ir pagriezta 90° leņķī, raksturo aksiālsimetrisko struktūru modālos rezultātus. Šie režīmi tiek dēvēti par saistītām modām. Lai novērtētu formas identiskumu, var izmantot modālo formu animācijas. Aksiālsimetrisko formu modālās analīzes pārbaude ir detalizēti demonstrēta un aprakstīta [69], [70]. Vienīgais cēlonis, kura dēļ diviem saistītiem režīmiem nav vienādās frekvences, ir skaitliskā kļūda. Forma arī ir identiska, bet rotējas ap simetrijas asi. Teorētiski, atkārtojošās modu formām ir jābūt pagrieztām 90° leņķī.

Pirms modālās analīzes sākuma tika veikta tipisko ĪTG detektora tapņa fiksācijas kriostatā metožu analīze. Elastīgās trijstūrveida formas plātnes izmantošana ir viena no visvienkāršākajām ĪTG detektora balstu veidiem kriostatā [52], [53]. Tāds balstu veids ir vienkāršs montēšanā un, parasti, tiek izgatavots no lokšņu materiāla. Visaktīvāk ĪTG detektora kriostatā tiek izmantoti labirinta tipa balsti, kas ir demonstrēti zinātniskajā literatūrā [16], [71]– [73]. Tāda veida balsti ir daudz stabilāki pret nogurumslodzi, kas ir viens no svarīgākajiem parametriem no gamma spektrometru transportēšanas redzespunkta. Tāpat arī tiek izmantota tapņa fiksācijas metode, pielietojot trīs elastīgos gredzenus, kuri ir izvietoti 120 grādu leņķī attiecībā pret viens otra [54]. Tāda fiksācijas metode ļauj palielināt ĪTG detektora balstu siltuma pretestību un nodrošināt detektora tapņa slāpējošās īpašības.

Solidworks vidē tika izveidoti triju iepriekš aprakstīto balstu tipu modeļi, kuriem ir aprēķinātas sākotnējās modas, kurām ir pielikta 0,49 kg masa (detektora imitators). 6.2. tabulā ir minēti materiāli un to modālai analīzei izmantotie parametri.

6.2. tabula

Materiāls	Elastības modulis (MPa)	Blīvums (kg/m ³)	Puasona koeficients
Tecasint2011	3700	1380	0,34
AW2024	73000	2800	0,33
PCTFE	1400	2120	0,44
G-Etronax EP FR4	22000	1900	0,125
CESTILENE HD 1000	750	930	0,4

Materiālu raksturojumi

6.1.1. Modālā analīze gredzenveida balstiem

Balstu tipam ar trim elastīgiem gredzeniem (6.1. att.) rezonanses frekvences un svārstību modas ir parādītas 6.2. att. un 6.3. att..



6.1.att. Elastīgā gredzena forma.

List Modes		_		×		
Study name:RingsFreq						
Mode No.	Frequency(Rad/sec)	Frequency(Hertz)	Peri	od(Secon	ids)	
1	313.13	49.836	0.	020066		
2	313.19	49.846	0.	020062		
3	977.08	155.51	0.	0064306		
4	1021.4	162.56	0.	0061516		
5	1480.8	235.68	0.	004243		
6	1480.9	235.7	0.	0042427		

6.2.att. Rezonanses frekvences balstiem ar trim elastīgiem gredzeniem.



6.3.att. Rezonanses modas balstiem ar trim elastīgiem gredzeniem (1 un 2; 3; 4; 5 un 6)

Kā ir redzams no simulācijas rezultātiem (6.2. att. un 6.3. att.), pirmā un otrā pašfrekvences praktiski sakrīt vērtības ziņā. Kā tika minēts iepriekš, tās raksturo vienu un to pašu aksiālsimetriskās struktūras modu. Nelielu starpību frekvences skaitliskajā vērtībā nosaka balstu izvietojums un diskretizācijas kļūda.Izlieces svārstību formas frekvence ir atkarīga no tapņa ar detektoru masas un tā balstu izlieces stingrumu. Ierosinoties aksiālā virzienā, izlieces svārstību amplitūda tiek ierosināta ar konstrukcijas asimetriju, tas ir, ar ass nobīdi, kura iziet cauri tapņa ar detektoru smaguma centram attiecībā pret EMD vibrācijas spēka pielikšanas asi. Svārstību ass forma (treša moda) tiek ierosināta ar EMD vibrāciju, kas tika pielikta tieši šajā virzienā. Frekvenci nosaka tapņa ar detektoru masu un tā balstu ass stingrumu. Vērpes svārstību forma (ceturta moda) tiek ierosināta, deļ nelieliem leņķiskiem balstu pārvietojumiem, iespējamās asimetrijas dēļ, t. i., atšķirības balstu elastīgā elementa stingruma dēļ. Frekvenci nosaka, galvenokārt, tapņa ar detektoru inerces moments un tā balstu vērpes stingrums. Piektā un sestā rezonanses modas iekļauj sevī gan izlieces, gan arī vērpes detektora tapņa balstu svārstības formas.

Analoģiski ĪTG detektora imitatora simulēšanas rezultātiem, ar trim elastīgiem gredzeniem, imitatora ar trijstūrveida formas elastīgās plāksni modālā analīze (6.1.2. nodaļa) parāda izlieces, vērpes un ass rezonanses modu esamību (6.5. att. un 6.6. att.). Kā tika minēts iepriekš, atkārtojošās modas raksturo aksiālsimetrisko struktūru modālās analīzes rezultātus. Tiek novērota modu nobīde to augstfrekvences diapazonā. Izlieces pirmā un otrā modas atrodas aptuveni tajā pašā diapazonā, kā balstiem ar trim gredzeniem. Ass treša moda atrodas tajā pašā diapazonā kā balsti ar trim elastīgiem gredzeniem. Taču vērpes ceturta modas skaitliskās vērtības ievērojami atšķiras.

Analoģiski ĪTG detektora uz trijstūrveida formas elastīgās plāksnes simulēšanas imitatora rezultātiem, modālās analīzes skaitliskās vērtības ar labirinta tipa balstiem (6.1.3. nodaļa) parāda modu nobīdi uz to augstfrekvenču diapazonu (6.8. att. un 6.9. att.). Turklāt zemākās izlieces modas arī tiek nobīdītas uz daudz augstfrekvenču diapazonu, un tieši izlieces moda tiek nobīdīta no 40-50 Hz līdz 102 Hz, vērpes moda no 155 Hz līdz 414 Hz.

6.1.2. Modālā analīze balstiem ar elastīgo plāksni

Balstiem ar trijstūrveida formas elastīgo plāksni (6.4. att.) apakšējās modas svārstību modas ir parādītas 6.5. att. un 6.6. att..



6.4.att. Elastīgās plāksnes forma.

List Modes — 🗆 🗙						
Study name:TriangleFreq						
Mode No.	Frequency(Rad/sec)	Frequency(Hertz)	Perio	d(Second:	s)	
1	255.27	40.627	0.0	24614		
2	256.65	40.846	0.0	24482		
3	962.91	153.25	0.0	065252		
4	2588.4	411.95	0.0	024275		
5	7988.2	1271.4	0.00	078655		
6	7994.5	1272.4	0.00	078594		

6.5.att. Trijstūrveida formas elastīgās plāksnes rezonanses frekvences.



6.6.att. Trijstūrveida formas elastīgās plāksnes rezonanses modas (1 un 2; 3; 4; 5 un 6).

6.1.3. Modālā analīze labirinta tipa balstiem

Labirinta balstu veids ir visizplatītākais [16], [71]–[73]. Labirinta tipa balstiem (6.7. att.) mezgla ar ĪTG detektoru svārstību apakšējās modas ir parādītas 6.8. att. un 6.9. att.



6.7.att. Labirinta balstu forma.

List Modes			_		×	
Study name:LabyrinthFreq						
Mode No.	Frequency(Rad/sec)	Frequency(Hertz)	Peri	od(Secor	nds)	
1	642.3	102.22	0.	0097824		
2	643.46	102.41	0.	0097648		
3	2603.3	414.33	0.	0024136		
4	2764.7	440.02	0.	0022726		
5	7400.9	1177.9	0.	00084897	7	
6	7440.1	1184.1	0.	0008445		

6.8.att. Labirinta tipa balstu rezonanses frekvences.



6.9.att. Labirinta tipa balstu rezonanses modas (1 un 2; 3; 4; 5 un 6).

6.2. Detektora vāka modālā analīze

Kriostata alumīnija detektora vāka (6.11. att.) diametrs ir 83 mm, augstums – 153 mm, sienas biezums – 1.5 mm un ieejas loga biezums – 0,6 mm. Tika izpildīta modelēšana *Solidworks* vidē un tika noteiktas apakšējo modu frekvences. Trīs zemākās modas ir parādītas (6.11. att.). Pastāv divas ass modas (1049 Hz un 2273 Hz) un izlieces moda (4110 Hz). Aprēķināto modu frekvences ir augstākas par aplūkojamo frekvenču diapazonu (200-800 Hz) un, galvenokārt, ir atkarīgas no ieejas loga biezuma, kas ir daudz plānāks, nekā vāka sienas.

List Modes - 🗆 🗙						×
Study name:Frequency 1						
	Mode No.	Frequency(Rad/sec)	Frequency(Hertz)	Perio	d(Second	s)
	1	6588.1	1048.5	0.0	0095372	
	2	14280	2272.7	0.1	00044	
	3	14524	2311.6	0.0	004326	
	4	24147	3843.1	0.0	0026021	
	5	25740	4096.7	0.0	002441	
	6	25821	4109.5	0.0	0024334	

6.10. att. Vāka rezonanses frekvences.



6.11. att. Vāka modas: ass - 1049 Hz; 2273 Hz un izlieces moda - 4110 Hz.

Kriostata vāka zemākās modas ir saistītas ar ieejas loga membrānas svārstībām. Taču pat, ja ieejas loga biezums ir 0,6 mm, to frekvences pārsniedz 1 kHz un atrodas ārpus aplūkojamā diapazona.

Detektora vāka modālās analīzes rezultāti parāda vāka ieejas loga biezuma ietekmi uz tā rezonanses modu formām. Ja ir vienāds vāka sānu sienu un tā ieejas loga biezums, tad tiek novērotas pirmās vāka izlieces modas augstāk par 2 kHz diapazonā. Tievinot ieejas logu līdz 0,6 mm un saglabājot to pašu sienu biezumu 1,5 mm, notiek rezonanšu modu nobīde uz zemāko diapazonu, kā arī šo formu izmainīšana (ass svārstību forma).

6.3. Siltumekrāna modālā analīze

Kā tika atklāts iepriekš (Piektajā nodaļā), siltumekrāna pielietošana gamma spektrometra ĪTG kriostatā samazina siltuma pieplūdi siltuma starojuma dēļ. Taču tāda siltumekrāna ieviešana spektrometra vakuuma kameras dobumā starp detektoru un tā vāku piešķir papildus svārstību sistēmu, kas ir potenciālais mikrofona efekta avots. Tāpēc par aktuālu kļūst siltumekrāna uz tā balstiem modālā analīze, ar nolūku identificēt mikrofonefekta un noregulēšanas no rezonansēm avotu.

6.3. tabulā ir minētas pirmās modas un to rezonanses frekvences dažādu biezumu siltumekrāniem. Siltumekrānu biezumi ir ņemti, vadoties pēc lokšņu materiāla tehnoloģiskām īpatnībām. Modālā analīze atklāja siltumekrāna svārstību pamatformas, tādas kā izlieces, vērpes, ass formas un ekrāna apvalka modas.

Ir parādītas (6.12. att.) līknes, kuras attēlo siltumekrāna rezonanses frekvenču atkarību no tā biezuma.



6.12. att. Rezonanses frekvenču grafiks atkarībā no siltumekrāna biezuma.

6.3.tabula

Siltumekrāna rezonanses modas atkarībā no biezuma

Apvalka moda	859Hz	905Hz	916Hz	896Hz	915Hz	986Hz	1167Hz
Ass moda	1104Hz	1024Hz	870Hz	796Hz	735Hz	661Hz	576Hz
Deformāciju moda	297Hz	310Hz	413Hz	497Hz	584Hz	717Hz	930Hz
Vērpes moda	373Hz	348Hz	303Hz	282Hz	264Hz	240Hz	209Hz
Lieces otrā moda	833Hz	796Hz	703Hz	670Hz	643Hz	595Hz	527Hz
Lieces pirmā moda	236Hz	219Hz	186Hz	172Hz	161Hz	148Hz	131Hz
Masa (g)	80,1	100,2	161	201,8	242,8	304,8	409,2
Biezums (mm)	0,4	0,5	0,8	1	1,2	1,5	2
Nr.	1	2	3	4	5	9	7



6.13. att. EMD vibrācijas un siltumekrāna rezonanses frekvenču spektra salīdzināšana atkarībā no tā biezuma.

Par piemēru attēlā (6.13. att.) tiek minēta siltumekrāna rezonanses frekvenču salīdzināšana ar *Lihan TC4187* EMD darba frekvenci (100 Hz) un tā pirmajām harmonikām. Iegūtie rezultāti var būt izmantoti sekojošo praktisko uzdevumu risināšanai:

- Materiāla biezuma izvēle siltumekrāna izgatavošanai, ar kuru EMD darba frekvence un tā pirmās harmonikas nesakrīt ar siltumekrāna rezonanses frekvencēm. Piemēram, kriostatā ar EMD Lihan TC4187 izmantojamā siltumekrāna biezumam ir jābūt 1,2 mm;
- 2. EMD darba frekvences izvēle vai tās koriģējums, ar nolūku noregulēt no jau izgatavotā siltumekrāna rezonanses diapazoniem.

6.4. **ĪTG gamma spektrometra kriostata pase**

ĪTG gamma spektrometra kriostata svārstību pamatsistēmu modālā analīze dod iespēju sastādīt spektrometra pasi mikrofonefekta avota diagnosticēšanai, ja tas ir priekšpastiprinātāja izejas signālā. 6.4. tabula iekļauj triju kriostata svārstību pamatsistēmu rezonanses frekvences: tapnis uz balstiem, detektora vāks un siltumaekrāns. Sekojot gamma spektrometra pasei, par iespējamu kļūst mikrofonefekta avota noteikšana, pamatojoties uz priekšpastiprinātāja izejas signāla frekvenču spektra analīzi.

Ir jāatzīmē, ka ne visām rezonanses frekvencēm ir vienādi bīstamais raksturs. Tā, piemēram, rezonanses var neizpausties pēc detektora tapņa un siltumekrāna izlieces modām, jo rimst svārstības diezgan liela iekšējās materiālu slāpēšanas dēļ. Vērpes modas ierosināšana ir maziespējama, tā kā nav acīmredzamā vērpes ierosināšanas avota.

6.4. tabula

		Lieces moda	Lieces moda	Vērpes moda	Asu moda
edzenveida balsti	Moda				
Gı	Frekvence	50Hz	236Hz	162Hz	155Hz
tektora vāks	Moda				
De	Frekvence	2379Hz			1076Hz
lltumekrāns (1 mm)	Moda				
S	Frekvence	161Hz	643Hz	264Hz	735Hz

ĪTG gamma spektrometra kriostata pase

6.5. Rezonanses aprēķina frekvenču eksperimentālā pārbaude

Lai novērtētu kriostata ar EMD sastāvdaļu rezonanses īpatnības, tika eksperimentāli iegūtas detektora mezgla svārstību amplitūdas-frekvenču raksturlīknes, un tika veikts kriostata ārējā vāka rezonanses īpašību novērtējums.

6.5.1. Eksperimentālās iekārtas apraksts

Izmantojot iekārtas komplektu vibrāciju izmēģinājumiem, tika samontēta eksperimentālā iekārta (6.14. att.).



6.14. att. Eksperimentālās iekārtas kopskats.

Eksperimentam izmantojamā iekārta iekļāva sevī:

- 1. Elektrodinamiskā vibroiekārta *YBЭ-1-004*;
- 2. Ģenerators 15 US-10000-002;
- 3. Vienkanāla pastiprinātājs ПУНЖ 1-002;
- 4. Divi vienkanāla pastiprinātāji M72A1;
- 5. Akselerometru komplekts vibrācijas izmēģinājumiem.

Sīkāk aparatūras raksturojumi un mērījumu dati ir parādīti pielikumā (3. pielikums).



6.15. att. Akselerometru izvietojums, kuri mēra detektora imitatora vibropaātrinājumus uz gredzenveida balstiem no *Composite G-Etronax* (pa kreisi) un *CESTILENE HD 1000* (pa labi) materialiem.

Lai novērtētu ĪTG imitatora detektora mezgla rezonanses frekvences, tika montēts makets uz standarta balstiem ar trim gredzeniem, kuri ir izpildīti no diviem dažādiem materiāliem *Composite G-Etronax* un *CESTILENE HD 1000*. ĪTG detektora vietā, lai veiktu vibrācijas pētījumus, tika izmantots tā masas un gabarīta imitators. Detektora imitators, kas ir uzstādīts ar balstu gredzeniem uz atloka, ir stingri nostiprināts uz vibrogalda (6.15. att.). Detektora imitatora masa sastāda 490 gramu, kas atbilst ĪTG detektora masai ar 15% efektivitāti. Atbilstoši pases datiem, akselerometru jutības transversālā virzienā sastāda mazāk kā 0,6% no to aksiālās jutības. Tādējādi, izmainoties akselerometra orientācijai, ir iespējama vibropaātrinājumu mērīšana dažādos virzienos. Ar tapskrūvēm M5 akselerometri tika nostiprināti divās savstarpēji perpendikulārām asīm, ar nolūku izmērīt vibropaātrinājumus aksiālajā (X ass) un transversālajā (Y ass) virzienā. Konstrukcija ir aksiālsimetriska un vibropaātrinājuma mērīšana trešajā asī Z nav nepieciešama rezonanses frekvenču novērtēšanai. Papildus akselerometrs *ABC036-02* bija stingri nostiprināts tieši uz vibrogalda virsmas, bet tā signāls tika izmantots kā atgriezeniskā saite, lai uzturētu nemainīgu vibrogaldam uzdoto paātrinājumu.

Standartos aprakstītā rezonanses frekvenču noteikšanas procedūra paredz iedarbību uz harmoniskās vibrācijas objektu ar pazeminātiem paātrinājumiem, ne vairāk par 1 ÷ 5g frekvenču diapazonā $(0,2 \div 1,5)f_{rez}$, kur f_{rez} – aprēķina rezonanses frekvence [58]. Rezonanses frekvenču meklēšanu veic ar objekta vibropaātrinājuma (svārstību amplitūdas) mērīšanu, pakāpeniski izmainot frekvenci un uzturot nemainīgu iedarbojošās vibropaātrinājumu. Šī metode tiek izmantota praksē un nodrošina pietiekamu mērījumu precizitāti ar nosacījumu, ka izmēģināmā izstrādājuma masa vairāk kā 10 reizes pārsniedz akselerometra masu. Šajā gadījumā katra akselerometra masa ir vienāda ar 22 gramiem, un tā ietekme uz visa mezgla rezonanses frekvences mainīšanu nav liela.

Frekvenču diapazona novērtēšanai, kurā ir jāīsteno meklēšana, tika veikta iepriekšējā datorsimulēšana *Solidworks* vidē (6.16. att.). Materiālu *Composite G-Etronax* un *CESTILENE HD 1000* parametri, kuri ir nepieciešami aprēķiniem, ir minēti 6.2. tabulā. Aprēķinu rezultāti ir parādīti attēlā 6.5. tabulā.



6.16. att. Detektora imitatora mezgla zemākās modas: lieces a); d); vērpes b); aksiāla c)

6.5. tabula

Detektora imitatora mezgla pašsvarstību frekvences un zemākās modas

Gredzenveida balstu materials	Pirma moda	Otra moda	Treša moda	Ceturta moda
Greuzenvelua baistu materiais	Lieces	Vērpes	Aksiāla	Lieces
Composite G-Etronax	120 Hz	406 Hz	454 Hz	679 Hz
CESTILENE HD 1000	37 Hz	105 Hz	116 Hz	155 Hz

Rezonanses frekvenču meklēšanai ir noteikts diapazons no 100 līdz 700 Hz, izmantojot *Composite G-Etronax*, un no 30 līdz 600 Hz, izmantojot *CESTILENE HD 1000*.

6.5.2. Detektora imitatora svārstību amplitūdas-frekvenču raksturlīknes dati

Zemāk (6.17. att.) ir parādīti detektora imitatora ar *Composite G-Etronax* balstiem vibropaātrinājumu mērījumu rezultāti aksiālajā (vertikālajā) un transversālajā (horizontālajā) virzienā, kuri tiek ierosināti no vibrogalda iekārtas *VBЭ-1-004*. Vibrogalda harmonisko svārstību frekvence mainījās ar 10 Hz soli diapazonā no 100 līdz 700 Hz, kad ir pastāvīgie vibropaātrinājumi 9g, 4g un 2g. Atzīmēsim, ka vibrogalda svārstības notiek tikai aksiālajā (vertikālajā) virzienā, tāpēc šajā virzienā ierosināmās detektora imitatora svārstības ievērojamī pārsniedz tā svārstību amplitūdu transversālajā (horizontālajā) virzienā. Izlieces svārstības rodas gan tapņa balstu, gan arī paša detektora imitatora raksturojumu nesimetrijas dēļ. Tas ir nelielu spēku momentu rašanās cēlonis transversālā virzienā no iedarbojošās aksiālās vibrācijas.



6.17. att. Detektora imitatora vibropaātrinājuma atkarība aksiālā (vertikālā) (pa kreisi) un transversālā (horizontālā) (pa labi) virzienā no frekvences, ja ir nemainīga pamatnes vibropaātrinājuma amplitūda: 9g – sarkanā līnija; 4g – zilā līnija; 2g – rozā līnija.

Rezonanses svārstības frekvenču diapazonā 420-460 Hz atbilst aksiālai balstu rezonansei. Šī secinājuma labā liecina rezonanses frekvenču sakrišana vertikālām un transversālām svārstībām. Transversālās svārstības ar samērā nelielu vibropaātrinājuma amplitūdu tiek ierosinātas sistēmas nesimetrijas dēļ, pateicoties rezonanses vertikālajām svārstībām.



6.18. att. Detektora imitatora aksiālo (vertikālo) svārstību vibropaātrinājuma oscilogramma ar 550 Hz frekvenci, 20g amplitūdu (oscilogrāfa C1-65A un labā pastiprinātāja M72A1 rādījumi), ja vibrogalda vibropaātrinājums ir 9g – kreisā pastiprinātāja M72A1 rādījumi.

Ar oscilogrāfu *C1-65A* tika veikta detektora imitatora svārstību formas kontrole, kura bija tuva harmoniskai (6.18. att.). Šajā gadījumā izmērītais detektora imitatora vibropaātrinājums ļauj novērtēt tā svārstību amplitūdu a, kas ir saistīta ar frekvenci f un vibropaātrinājumu A ar attiecību (6.1.).

$$a = \frac{A}{4\pi^2 f^2}.\tag{6.1.}$$

kur,

a - svarstību amplitūda, mm;

f – frekvence, Hz;

 $A - vibropaātrinājums, m / s^2$.

Piemēram, ja ir vibrogalda vibrācija ar 420 Hz frekvenci un vibropaātrinājuma amplitūdu 88,3 m/s^2 (9g), tad detektora imitatora izmērītais rezonanses vibropaātrinājums sastāda 676,9 m/s^2 (69g), turklāt svārstību amplitūda sastādīs tikai 0,097 mm. Pēc formulas (6.1.) aprēķinātās detektora imitatora aksiālo rezonanses svārstību amplitūdas ir minētas 6.6. tabulā.

6.6. tabula

	Vibrācijas parametri, kad ir rezonanse			
Ierosme (vibrogalds)	2g	4g	9g	
Izmērītais imitatora aksiālais	36g,	52g,	69g,	
vibropaātrinājums	kad ir 470 Hz	kad ir 460 Hz	kad ir 420 Hz	
Aprēķina amplitūda	0,041 mm	0,061 mm	0,097 mm	

Detektora imitatora rezonanses svārstību amplitūdas aksiālajā virzienā

Attēlā (6.19. att. (pa kreisi)) skaidri tiek novērota detektora imitatora aksiālās rezonanses frekvences samazināšana, kad pieaug ierosmes amplitūda. Tas liecina par balstu elastīgās raksturlīknes nelinearitāti, kura ir izpildīta triju balstgredzenu veidā no 2 mm bieza materiāla *Composite G-Etronax*. Vibropaātrinājuma frekvenču atkarību saime aksiālā (vertikālā) virzienā, ja ir dažāds ierosmes lielums, ir parādīta 6.19. att. (pa kreisi). Līkne, kura parāda rezonanses frekvences atkarību no vibropaātrinājuma lieluma attēlota ar melno svītrlīniju. Iegūtā atkarība raksturo balstu nelinearitāti kā "mīkstā" tipa nelinearitāti (ekvivalentais balstu stingrums samazinās līdz ar svārstību amplitūdas pieaugumu).

Transversālo svārstību amplitūdas palielināšanās 320-340 Hz frekvenču diapazonā (6.17.att. (pa labi)) atbilst rezonansei pēc svārstību izlieces formas. Šī secinājuma labā liecina to rezonanses raksturs, ja ir vertikālo svārstību vibropaatrinājuma monotoni krītošā amplitūda. Šī secinājuma apstiprināšanai ir salīdzināti vibropaātrinājumi (6.20. att.) gan aksiālā, gan arī transversālā virzienos. Vibropaātrinājumi aksiālā virzienā ir atzīmēti ar svītrlīnijām, bet transversālajā virzienā – ar nepārtrauktām līnijām.



6.19. att. Detektora imitatora (pa labi) vibropaātrinātāja (pa kreisi) frekvenču atkarību saime aksiālajā (vertikālajā) virzienā, kad ir ierosme: 9g – sarkanā līnija; 4g – zilā līnija; 2g – rozā līnija.



6.20. att. Salīdzinājums pēc vibropaātrinājuma atkarību frekvences aksiālajā (vertikālajā) un transversālajā (horizontālajā) virzienos, kad ir pamatnes vibropapātrinājuma nemainīgā amplitūda: 9g – sarkanā līnija; 4g – zilā līnija.

Signāla forma, kura ir parādīta attēlā (6.21. att.), liecina par šīs rezonanses nelineāro raksturu ar frekvenci, kura ir vienāda ar pusi no izlieces svārstību aprēķina modas 679 Hz frekvencē (6.5. tabula).

Izlieces svārstību rezonanses neesamība eksperimentā aprēķina frekvenču 120 Hz un 679 Hz tuvumā tiek izskaidrota ar nepietiekamu ierosināšanas lielumu. Šajos diapazonos detektora imitatora aksiālās svārstības ir mazas, bet tieši tās, detektora imitatora raksturlīkņu mazas nesimetrijas dēļ, ir izlieces svārstību ierosmes cēlonis.



6.21. att. Detektora (ar 340 Hz frekvenci) imitatora transversālo svārstību vibropaātrinājuma oscilogramma.

Attēlā (6.22. att.) ir parādīti detektora imitatora ar *CESTILENE HD 1000* balstiem vibropaātrinājumu mērījumu rezultāti aksiālajā (vertikālajā) un transversālajā (horizontālajā) virzienos. Vibrogalda vertikālo svārstību frekvence mainījās ar 10 Hz soli diapazonā no 60 līdz 600 Hz, kad ir pastāvīgie vibropaātrinājumi 9g, 4g un 2g. Balstgredzenu izgatavošanai izmantojamam materiālam *CESTILENE HD 1000* ir mazāka elastības moduļa vērtība, kopumā balsti ir maigāki un aksiālās rezonanses frekvence atrodas apvidū ar daudz zemākām frekvencēm. Rezonanses svārstības 80-120 Hz frekvenču diapazonā atbilst aksiālai detektora mezgla rezonansei. Tāpat arī kā iepriekšējā gadījumā izlieces svārstības ar nelielu amplitūdu rodas sistēmas nesimetrijas dēļ, pateicoties rezonanses vertikālām svārstībām.

Veicot rezonanses eksperimentālos pētījumus svārstību sistēmās ar zemu labumu, ir jāņem vērā, ka frekvence, kurā vibrācijas amplitūda ir maksimāla, būs zemāka nekā frekvence, kurā vibropaātrinājums ir maksimālais, ko izmēra ar akselerometru. Tas ir saistīts ar to, ka svārstību amplitūda ir proporcionāla vibropaātrinājumam, kas ir dalīts ar frekvences kvadrātu (6.1.). Attēlā (6.24. att.) ir salīdzinātas detektora imitatora vibropaātrinājuma atkarības un tā svārstību amplitūdas no frekvences aksiālās rezonanses tuvumā. Ja vibropaātrinājuma vērtība ir maksimāla 100 Hz frekvencē, tad maksimālās svārstību amplitūdu vērtības tiek nobīdītas uz apvidu ar daudz zemākām frekvencēm.



6.22. att. Detektora imitatora vibropaātrinājuma atkarība aksiālajā (vertikālajā) virzienā (pa kreisi) un transversālajā (horizontālajā) virzienā (pa labi) no frekvences, ja pamatnes vibropaātrinājuma amplitūda ir nemainīga: 9g – sarkanā līnija; 4g – zilā līnija; 2g – rozā līnija.

Posms, kas ir atzīmēts 6.22. att. (pa labi) ar sarkano svītrlīniju, atbilst svārstībām, kurām ir nelineārā forma, kura ļoti atšķiras no harmoniskās. Šajā gadījumā vibropaātrinājuma vērtības, kuras nolasa no pastiprinātāja *M72A1* indikatora, nav korektas.



6.23. att. Detektora balstu labuma novērtējums aksiālajā (vertikālajā) virzienā, izmantojot *Composite G-Etronax* (pa kreisi) un *CESTILENE HD 1000* (pa labi) balstgredzenus, kad pamatnes vibropaātrinājuma amplitūda ir 2g.

Ir parādītas (6.23. att.) detektora imitatora vibropaātrinājuma atkarības no frekvences aksiālās rezonanses tuvumā, izmantojot dažādu materiālu balstgredzenus. Svārstību sistēmas labumu nosaka pēc formulas (6.2.).

$$Q = \frac{f_{res}}{f_1 - f_2},$$
 (6.2.)

kur,

Q – svārstību sistēmas labums;

fres – frekvence, kurā parametrs (vibropaātrinājums) sasniedz maksimumvērtību;

 f_1 ; f_2 – frekvences, kurās parametra (vibropaātrinājuma) vērtības samazinās līdz $1/\sqrt{2}$ līmenim no maksimālā;

Vadoties pēc attēlā (6.23. att.) parādītām atkarībām, iegūstam sekojošo detektora imitatora balstu labumu novērtējumu (6.3.) un (6.4.).

$$Q_1 = \frac{470}{490 - 460} = 15,7,\tag{6.3.}$$

$$Q_2 = \frac{100}{130-75} = 1,8,\tag{6.4.}$$

kur

 Q_1 – balstu labums materiālam *Composite G-Etronax* ar biezumu 2 mm;

Q₂ – balstu labums materiālam CESTILENE HD 1000 ar biezumu 2 mm.



6.24. att. Detektora imitatora ar *CESTILENE HD 1000* balstgredzeniem vibropaātrinājuma aksiālajā (vertikālajā) virzienā (pa kreisi) un tā svārstību amplitūdas (pa labi) atkarība no frekvences, kad pamatnes vibropaātrinājuma amplitūda ir nemainīga: 9g – sarkanā līnija; 4g – zilā līnija; 2g – rozā līnija.

6.6. Eksperimentālais detektora vāka rezonanses frekvenču novērtējums

Detektora ārējā vāka modālās analīzes rezultāti, kuri ir demonstrēti 1.1. nodaļā, parāda, ka zemākā moda ar 1049 Hz frekvenci ir saistīta ar plānā ieejas loga pašsvārstībām. Vāka gala daļai (ieejas logs) ir 0,6 mm biezs un svārstās transversālajā virzienā, kurā tā stingrums ir minimāls. Vāka sānu sienām ir 1,5 mm biezums un to pašsvārstības ir apvalka svārstības, un atrodas daudz augstākajā frekvenču diapazonā.



6.25. att. Detektora vāka svārstību zemākā moda a); tās modelis atsevišķās membrānas svārstību veidā b); un zemākā moda, ņemot vērā nostiprināto akselerometru c).

Standarta akselerometra uz vāka ieejas loga svārstību reģistrācijas izmantošana ir apgrūtināta, jo tam ir samērā liels svars. Izmērītās rezonanses frekvence būs ievērojami nobīdīta uz zemāko frekvenču pusi.

Zemākai svārstību modai dinamiskais modelis tiek vienkāršots līdz apaļās membrānas, kura ir iespīlēta malā (6.25. att.(b)). Novērtēt akselerometra svara ietekmi uz rezonanses frekvenci var ar zināmām attiecībām no materiālu pretestības teorijas [59]. Pirmā apaļās membrānas pašfrekvence tiek noteikta kā:

$$f_{res} = \frac{\alpha \delta_1}{\pi r_1^2} \sqrt{\frac{E_1}{3(1-\mu_1^2)\rho_1}} = 1006,3 \ Hz, \tag{6.5.}$$

kur,

 α – koeficients, kas ir vienāds ar 2,56, membrānas malas iespīlēšanas gadījumam;

 E_1 – elastības modulis, alumīnijam $E_1 = 7,1 \cdot 10^{10} N/m^2$;

 ρ_1 – materiāla blīvums, alumīnijam $\rho_1 = 2710 \ kg/m^3$;

 μ_1 – Puasona koeficients, alumīnijam μ_1 = 0,33;

 $r_1 = 39mm$, ieejas loga rādiuss;

 $\delta_1 = 0,6mm$, ieejas loga biezums;

 $m_{aks} = 0,022 \ kg$, izmantojamā akselerometra masa.

Iespīlētās apaļās membrānas elastīgai raksturlīknei F(x) ir sekojošs izskats:



DISPLACEMENT, mm

6.26. att. Malās iespīlētās membrānas elastīgā raksturlīkne.

Mazām svārstībām izteiksme (6.6.) var būt linearizēta:

$$F_1(x) = \frac{\pi E_1}{r_1^2} \frac{16\delta^3}{3(1-\mu^2)} x = k_1 x.$$
(6.7.)

Šajā gadījumā membrānas pašfrekvence, ņemot vērā nostiprinātā akselerometra svaru, var būt novērtēta pēc formulas (6.8.).

$$f_{res}' = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_1}{m_{aks}}} = \frac{2\delta}{\pi r_1} \sqrt{\frac{\pi \delta E_1}{3(1-\mu_1^2)m_{aks}}} = 467,2 \ Hz \ . \tag{6.8.}$$

Detektora vāka ar nostiprināto akselerometru uz tā ieejas loga virsmas zemākās modas aprēķins (6.25. att.(c)) ar *Solidworks*, dod frekvenci 465 Hz, kura ir tuva pēc izteiksmes (6.8.) aprēķinātai vērtībai.

6.6.1. Zemākās rezonanses frekvences novērtējums ar triecienierosmi

Detektora vāka svārstību zemākās modas frekvences eksperimentālai novērtēšanai uz *Monolith* gamma spektrometra ieejas loga tika uzstādīts akselerometrs *ZETLab BC110* ar jutību 100mV/g (6.27. att.). Signāls no akselerometra tika padots uz ciparu analizatoru *ZET 110* un turpmāk tika apstrādāts ar *ZETLab* programmatūru. Kad EMD bija izslēgts, ar pārbaudes āmuriņu tika ierosinātas brīvās vāka ar uzstādīto akselerometru svārstības. Vibrogramma ir parādīta 6.28. att. (b). Rimstošās svārstības atbilst zemākai aksiālai modai, un tām ir 465 Hz frekvence, kura ir tuva aprēķina vērtībai. Svārstību periodu (un frekvenci) nosaka ar iezīmju (punktu) aprēķināšanu, kas ir atzīmētas uz vibrogrammām ar 0,2 ms intervālu.



6.27. att. Gamma spektrometrs *Monolith* un vibrāciju mērīšanas komplekts: akselerometrs *ZETLab BC110*; ciparu analizators *ZET 110* un dators ar *ZETLab* programmatūru.

Pēc gamma spektrometra ieslēgšanas tika izmērīta vibrācija uz EMD korpusa: vibropaātrinājuma amplitūda sastādīja 0,4g (6.28. att. (c)). Ierosmes pamatfrekvence ir 100 Hz, un augstāko harmoniku amplitūdas ir mazas. Otrādi, vibrācijā, kura ir izmērīta uz vāka ieejas loga, vislielākā amplitūda ir piektajai EMD darba frekvences harmonikai (500 Hz), 6.28. att.(d), bet 100 Hz pamatharmonikas amplitūda ir maza. Šis piemērs demonstrē EMD piektās harmonikas rezonanses pastiprinājumu, kuram ir frekvence, kas ir tuva vāka ar akselerometru zemākai aksiālai modai.

Ir jāatzīmē, ka šīs vibrogrammas ir iegūtas ar uzstādīto akselerometru uz detektora vāku. Vāka bez akselerometra svārstību modas atrodas augstāk par aplūkojamo frekvences diapazonu.



6.28. att. a) vāka modelis ar akselerometru un vibropaātrinājumiem aksiālajā virzienā: b) brīvās rimstošās svārstības pēc triecienierosmes; frekvence – 465 Hz; c) uzspiestās svārstības uz EMD korpusa; darba frekvence – 100 Hz; d) uzspiestās svārstības uz vāka ieejas loga. Skala pēc y ass: 0,05 g/ied., pēc x ass: 5 ms/ied.

Šis eksperiments apstiprināja ne tikai datormodeļa un tā modālās analīzes rezultāta pareizību, bet arī detektora vāka rezonanses svārstību praktisko ierosmi, kad to frekvences sakrīt ar vienu no EMD darba frekvences harmonikām.

6.6.2. Detektora vāka rezonanses ierosme ar akustisko metodi



6.29. att. Eksperimenta shēma mikrofonefekta no detektora vāka rezonanses svārstībām novērtējumam.

Ir parādīta (6.29. att.) shēma un iekārtas, kuras tiek izmantotas novērtēšanas eksperimentā saistībā ar mikrofonefektu no detektora vāka rezonanses svārstībām. Lai izslēgtu ietekmi uz akselerometra masas rezonanses frekvenci, svārstību ierosme tiks veikta ar akustisko metodi. Šajā nolūkā virs detektora (uz vibroizolējošās konstrukcijas) vāka ieejas loga tiek uzstādīts jaudīgs skaļrunis, kas ir pieslēgts sinusoidālo svārstību ģeneratoram, kuru frekvence izmainās plašās robežās. Parazītiskā signāla rašanās mikrofonefekta dēļ, no vāka rezonanses tiks reģistrēta izejas trokšņa signālā pēc priekšpastiprinātāja (ja nav gamma starojuma avota).

6.7. Secinājumi

Sestajā darba nodaļā ar *Solidworks* programmas fundamentālo hipotēžu tīklojuma palīdzību tika veikta gamma spketrometra kriostata svārstību pamatsistēmu modālā analīze. Teorētiskās hipotēzes par simulācijas rezultātu ticamību ir verificētas ar eksperimentālo pārbaudi, izmantojot elektrodinamisko vibroiekārtu *VBЭ-1-004*. Datorsimulēšanas rezultāti paradīja, ka modālā analīze var būt izmantota izstrādājamo gamma spektrometru frekvenču raksturlīkņu novērtēšanai, kā arī rezonanses modu noteikšanai. Ar modālās analīzes palīdzību satadīta gamma spektrometra kriostata svārstību pamatsistēmu pase kas ar kuru par iespējamu kļūst mikrofonefekta avota noteikšana, pamatojoties uz priekšpastiprinātāja izejas signāla frekvenču spektra analīzi.

7. REZULTĀTU APROBĀCIJA

Darba pētījuma pamatrezultāti tika demonstrēti starptautiskās konferencēs Latvijā, Krievijā, Čehijā, Bulgārijā, Francijā un Taizemē.

Par promocijas darba tēmu tika publicēti 15 raksti, kuros tika atspoguļoti teorētiskie principi un darba rezultāti.

Praktiskie rezultāti, kuri tika iegūti darba izpildes laikā, izmantoti kompānijā *Baltic Scientific Instruments*, izstrādājot un ražojot spektrometrus dažāda veida pielietojumiem.

7.3. Praktiskās rekomendācijas, kuras ļauj samazināt EMD tipveida trūkumu ietekmi

Praktiskās rekomendācijas, kuras izriet no piedāvātās kompleksās pieejas kriostatu, gamma spektrometru ar EMD projektēšanai un kuras ļauj samazināt EMD piemītošo tipveida trūkumu ietekmi, iekļauj sevī:

- Konstruktīvo pasākumu pieņemšana saistībā ar siltuma pieplūdes uz kriostatu samazināšanu (skat. 2.1. nodaļu);
- EMD palielinātās siltuma izdalīšanas siltuma caurulites apvidū dzesēšanas nodrošināšana (skat. 5.1. nodaļu);
- Konstruktīvo pasākumu pieņemšana saistībā ar EMD vibroaktivitātes samazināšanos, un ĪTG detektora tapņa balstu parametru izvēle, kuri nodrošina rezonanses svārstību neesamības noregulēšanu EMD darba frekvencē vai tās harmonikās (skat. 3. un 6. nodaļas).

7.3.1. Siltuma pieplūdes uz kriostatu samazināšana

Siltuma pieplūdes uz kriostatu samazināšana var būt veikta, izmantojot materiālus ar zemāku siltumvadītspēju, un, kuri ir derīgi pielietošanai vakuuma vidē, kad ir kriogēnās darba temperatūras un paaugstinātās temperatūras servisa darbu laikā. Tādi materiāli ir labi zināmi vakuuma kriogēnikā, piemēram, materiāls *Tecasint 2011* [60]. Izņemot specializēto materiālu pielietošanu, ir jāņem vērā balstu ar pagarināto siltuma ceļu konstruēšanu [61], [62].

Viens no siltuma pieplūdes uz kriostatu samazināšanās veidiem ir gāzu pieplūdes samazināšana caur blīvējumiem ĪTG gamma spektrometra kriostata vakuumkamerā. To veic ar nolūku samazināt vadītspēju caur atlieku gāzēm kriostatā. Lai sasniegtu vismazāko peiplūdi, tiek izslēgti līmētie un lodētie savienojumi, kuri var būt par lielas pieplūdes avotu, kad ir mehāniskās slodzes vai kriostata termociklēšana. Visi izjaucamie savienojumi, pēc iespējas, tiek nomainīti no ielīmētiem un ielodētiem pret izjaucamiem sertificētiem elastomēra blīvējumiem *O-ring* [63] vai *Conflat* [64], *Helicoflex* [65] klases metāla blīvējumiem. Ja ir nepieciešams veikt daudz termociklu, un iekārtas ir grūti pieejamas servisa darbiem, kā arī vislabākajiem gāzes pieplūdes rādītājiem tiek piemēroti iemetinātie elektriskie savienotaji [66]. Metinātām šuvēm, izgatavojot kriostata vakuumkameras, ir jābūt izpildītām, stingri ievērojot šuvju kvalitātes tehnoloģijas un pārbaudes prasības [15], [67].

Ar ekstrūzijas, liešanas un kalšanas metodēm iegūto sagatavju materiālu izmantošana veicina gāzu pieplūdi uz kriostata kameru palielināšanos, jo, veicot mehānisko apstrādi, tiek atklāta to porainā mikrostruktūra [68], [69]. Lai ilgstoši uzturētu augstu vakuumu, izmanto sorbcijas sūkņus un dažāda tipa geterus [70]–[72].

Efektīva siltuma pieplūdes samazināšanas metode, deļ siltuma starojumam, ir siltumekrānu izmantošana. Svarīgs faktors ir kriostata vakuumkameras iekšējo virsmu kvalitātes uzlabošana, lai samazinātu emisijas koeficientus [15], [67]. Šajā nolūkā tiek izmantoti tādi virsmas apstrādes veidi kā elektroķīmiskā pulēšana, mehāniskā pulēšana, kuras nodrošina raupjuma samazināšanu.

7.3.2. EMD siltuma caurulītes korpusa dzesēšana

Atbilstoši tehniskiem raksturojumiem, EMD efektivitāti, lielākoties, nosaka ar siltuma novadīšanas no siltuma izdalīšanas zonām uz to korpusa. Tas rod papildus inženieruzdevumu, projektējot zinātnisko aparatūru, kuras mērķis ir EMD gaisa vai šķidruma dzesēšanas sistēmas izvēle. Uzdevumos, kur vissvarīgākais ir ilgstoša EMD darbība ar maksimālo jaudu, piemēram, spektrometriskās sistēmas ar iespēju sašķidrināt slāpekļa tvaikus, ir jāizmanto šķidruma dzesēšanas sistemas.

7.4. Rekomendāciju ieviešana reālajās izstrādēs

Par apstiprinājumu saistībā ar darba ietvaros iegūto ĪTG gamma spektrometru (izmantojot EMD) izstrādes rekomendāciju ieviešanu tiek minēts akts par pabeigtā zinātniski pētnieciskā darba ieviešanu *Baltic Scientific Instruments* kompanijas ražošanas procesā (4. pielikums).

7.4.1. Portatīvā gamma spektrometra modernizēšana

Projekta *HADEDE ESTLAT* [57] ietvaros tika izstrādāts portatīvā gamma spektrometra prototips radiācijas monitorēšanai lauku apstākļos (7.1.att.). Projekta pamatmērķis ir *HandSPEC* gamma spektrometra (13 kg) svara samazināšana, kuru ražo kompanijā *BSI*.



7.1.att. Portatīvais gamma spektrometrs HandSPEC (pa kreisi) un prototips (pa labi).

Pēc iepriekšējās siltuma pieplūdes komponentu analīzes (skat. 2. pielikums) tika piedāvāts konstruktīvo pasākumu komplekss saistībā ar tā samazināšanu, kas ir dots tabulā (7.1.tabula) Veiktie kriostata ar siltumekrānu aprēķini (5.8. nodaļa) parādīja iespēju samazināt siltuma pieplūdi līdz 2 reizēm. Tas ļauj izmantot gamma spektrometrā mazāk jaudīgo un daudz vieglāko EMD. Samazinot siltuma pieplūdi kriostatā, ir vajadzīga mazāka EMD dzesējamā jauda un, atbilstoši, mazāka barošanas jauda, kas ļauj lietot daudz vieglākus mazākās kapacitātes akumulatorus. Kriostata svara kopējā samazināšana sastāda 2,5 kg.

Eksperimentālās pārbaudes nolūkā tika izstrādāts un izgatavots kriostats-prototips (7.2.att.). Tika iegūts eksperimentālais siltumekrāna lietošanas efektivitātes apstiprinājums pat vakuuma degradācijas apstākļos, kas ir zinātniskais promocijas darba jauninājums kopumā.



7.2.att. Kriostata-prototipa (pa kreisi) un tā iekšienē ar siltuekranu (pa labi) kopskats.

Atbilstoši kompleksai pieejai, kura ir piedāvāta darbā, izstrādājot jaunu *HandSPEC* gamma spektrometra konstrukciju (prototipu), tika realizēts elastīgs kriostata korpusā stiprinājums ar silikona vibroizolējošiem balstiem. Pielietoto balstu raksturojumi samazina mezgla pašfrekvenci līdz 30 Hz, kas ļauj samazināt kriostata vibrācijas amplitūdu ar daudz augstāko EMD darba frekvenci un tās harmonikām. Portatīvā gamma spektrometra *HandSPEC* pilnveidotās konstrukcijas kopskats ir parādīts 7.3.att.

7.1.tabula

Portatīvā gamma	ı spektrometra	modernizēšanas	rezultāti
-----------------	----------------	----------------	-----------

Doromotri	HandSDEC	Prototing	Samazinajuma
r at attrett 1	Farament HunaSFEC Floton		ceļi
			Siltumekrāns;
Kopējā termiskā plūsma kriostatā /	$5.7 \text{ W} / 1 \times 10^{-2}$	$1.85 \text{ W} / 1 \text{ x} 10^{-4}$	Jaunie
tipiskais spiediens (pēc sešiem	s, w rixio	n,05 w / IXIO	vakuuma
mēnešiem glabašanā).	mbai	moar	blivejumi;
			Geters
EMD	AIM SL400	Thales LSF9589	
Dzesešanas jauda:	4W@80K,	2,4W@80K,	
Barošanas jauda	100W	80W	
Svars	3,1 kg	1,6 kg	
Enerģijas patēriņš no	17 20 W	12 20 W	
akkumulatoriem pēc dzesēšanas	17 - 30 W	12 - 20 w	
Akumulatoru svars	1,7 kg	0,7 kg	
Kriostata svars	4,8 kg	2,3 kg	



7.3.att. Portatīvā spektrometra *HandSPEC* ar jaunu kriostatu kopskats.

- 1 Vakuuma kamera;
- 2 Konstrukcijas ramis;
- 3 Akkumulatori;
- 4 DKA;

- 5 Vibroizolatori;
- 6 EMD kompressors.

7.4.2. Laboratorijas gamma spektrometra modernizēšana

Gamma spektrometriem, kuri darbojas laboratorijas iekārtu sastāvā, masas un gabarīta raksturojumu minimizēšanai nav tik svarīgās nozīmes kā portatīviem gamma spektrometriem. EMD izmantošana ar nedaudz lieku jaudu ļauj nodrošināt drošu ĪTG detektoru dzesēšanu, kuriem ir liela efektivitāte un, atbilstoši lieli izmēri ar termisko masu. Taču, kā bija parādīts Trešajā nodaļā, daudz jaudīgāko EMD pielietošana veicina vibroaktivitātes palielināšanos, kura pasliktina gamma spektrometru raksturlīknes.

Laboratorijas gamma spektrometra *Monolith* modernizēšanas pasākumu ietvaros (7.4.att.), ko ražo *BSI*, tika veikta kriostata mezgla ar ĪTG detektoru modālā analīze. Tika atklātas ĪTG detektora tapņa balstu, detektora vāka un siltumekrāna rezonanses frekvences. Datorsimulēšanu papildināja eksperiments ar elektrodinamisko iekārtu vibrāciju pārbaudēm, kuras ir attēlotas Sestajā nodaļā.



7.4.att. Laboratorijas gamma spektrometrs *Monolith* (pa kreisi) un gaisa dzesēšanas radiatori ar siltuma caurulitem (pa labi).

Pēc modālās analīzes rezultātiem ir noteikts frekvenču kopums, kurās ir iespējama rezonanses svārstību ierosme. Modālās analīzes veikšanas laikā atrastais frekvenču kopums ir svarīgs, īstenojot galīgo gamma spektrometra iestatīšanu, jo ļauj diagnosticēt mikrofonefekta avotu (ja tas rodas) un izvēlēties atbilstošās tā novēršanas metodes. Piemēram, svārstību sistēmai, kuru veido kriostata alumīnija detektora vāks, ir augsts frekvenču diapazons, un tā tiek noregulēta no rezonanses svārstībām ar nelielu EMD kontrollera darba frekvences izmainīšanu. Otrādi, svārstību sistēmai, kuru veido ĪTG detektors uz tapņa elastīgiem balstiem, ir zems frekvenču diapazons. Šajā gadījumā var novērst rezonanses svārstības, tikai izmainot balstu stingrumu.

Atbilstoši praktiskām rekomendācijām, tika izstrādāts EMD siltuma caurulites gaisa dzesēšanas mezgls ar palielināto efektivitāti (7.4.att. (pa labi)). Šī mezgla ieviešana sērijveida ražošanā 2017. gadā nodrošināja drošu izmantojamo EMD dzesēšanu un ievērojami palielināja reālo resursu.

7.4.3. Gamma spektrometra ar hibrīdo dzesēšanu modernizēšana

Radiācijas apstākļu monitorēšanai vietās, kuras ir attālinātas no šķidrā slāpekļa rūpnieciskiem avotiem, grūti pieejamajos rajonos, kur ir iespējamas elektropadeves pārtrauces, plaši izmanto gamma spektrometrus ar ĪTG detektora hibrīda dzesēšanu. Šajā spektrometrā ĪTG detektors tieši tiek dzesēts Djuāra traukā ar šķidro slāpekli. Turklāt slāpekļa izveidojušais pāris netiek izlaists atmosfērā, kā parasti, bet tiek kondensēts uz dzesējamā EMD virsmas līdz slāpekļa kondensēšanas temperatūrai (apmēram 77,3K atkarībā no spiediena Djuārā) un turpmāk piepilda tvertni ar šķidro slāpekli. Tādējādi, ir realizēta slēgtā sistēma, kurā šķidrā slāpekļa izlietojums ir ļoti mazs, un nav vajadzīgs tā papildinājums ilgstošā laika periodā (darbība bez papilduzpildes – gads un ilgāk).

Gamma spektrometros ar ĪTG detektora hibrīda dzesēšanu tiek izmantoti daudz jaudīgāki EMD, kuri izdala samērā nelielajā siltuma caurules posmā līdz vairākiem simtiem Vatiem siltumenerģijas. To ir jānovada no gamma spektrometra un jāizkliedē apkārtējā telpā. Efektīvai siltuma novadīšanai, atbilstoši 7.3. punktā norādītām rekomendācijām, spektrometra *Nicole* konstrukcijā (7.5.att.(a)) tika ieviesta un izstrādāta šķidrās dzesēšanas sistēma. Sistēma sastāv no siltumnoņēmējiem, kuri ir uzstādīti uz EMD (7.5.att.(b)), un dzesētaja ar Peltjē elementiem, kuri nodrošina šķidrā siltumnesēja dzesēšanu.



7.5.att. Gamma spektrometrs Nicole (a) ar šķidro dzesēšanas sistēmu (b).

7.5. Secinājumi

Darba Septitajā nodaļā aprakstīti modernizēti esošie un *Solidworks* vidē izstrādāti gamma spektrometru jauni kriostāti ar elektromašīnu dzesētājiem (EMD). Praktiskie rezultāti, kuri tika iegūti darba izpildes laikā, tika izmantoti kompānijā *Baltic Scientific Instruments*, izstrādājot un ražojot jaunus spektrometrus dažāda veida pielietojumiem. Par apstiprinājumu saistībā ar darba ietvaros iegūto ĪTG gamma spektrometru izstrādes rekomendāciju ieviešanu tiek minēts akts par pabeigtā zinātniski pētnieciskā darba ieviešanu *Baltic Scientific Instruments* kompanijas ražošanas procesā.
SECINĀJUMI

Darba **pirmajā nodaļā** analizēta, izpētīta un novērtēta zinātniskā aparatūra ar īpaši tīriem germānija (ĪTG) detektoriem. Aprakstītas mūsdienīgas gamma spektrometrijas unikālās iespējas dažādu pētījumu veikšanai daudzās zināšanu jomās. Aprakstītas iespējas ĪTG gamma spektrometru izstrādē, izmantojot EMD kā ĪTG detektora dzesētāju. Aprakstītas to priekšrocības, tādas kā gamma spektrometra gabarītu un svara samazināšana, ērtība un drošība lietošanā, iespēja uzstādīt ierīci cilvēkam bīstamā vidē bez apkopes nepieciešamības un darbs jebkura telpiskā stavoklī. Ar to pamatota uzdevuma aktualitāte saistībā ar dinamisko procesu izpēti kriostatos ar EMD un tipisko trūkumu ietekmes samazināšanas metožu meklēšana.

Darba **otrajā** un **trešajā nodaļā** aplūkoti un analizēti siltuma procesi un mehāniskās vibrācijas dinamiskajos procesos gamma spektrometru kriostatos ar EMD. Aplūkoti tipveida konstrukcijas ar EMD dzesējamā kriostāta fizikālie procesi. Galvenā uzmanība pievērsta kriostata ar EMD darbībai raksturīgiem procesiem uz dinamisko gan siltuma, gan arī mehāniskā modeļa pamata. Parādīts, ka EMD darbība ar pazemināto jaudu samazina tā vibroaktivitāti vairāk par 40 %. Apskatītas kriostata ar ĪTG detektoru un EMD tipiskas konstrukcijas galvenas svārstību sistēmas, kuru mehāniskās svārstības izraisa mikrofonefektu, kas ievērojami samazina gamma spektrometra enerģētisko izšķirtspēju. Izmantota īpaši tīra sertificēta germānija detektoru parametriskā virkne, ko lieto gamma spektrometros ar elektromašīnu dzesētājos, kas izvirza detektora tapņa turētāja unificētā mezgla izstrādes papilduzdevumu. Analizētas iespējas un izstrādātas rekomendācijas EMD vibrāciju negatīvās ietekmes samazināšanai.

Ceturtajā nodaļā izstrādāts un aprakstīts tehniskais uzdevums blokshēmas formā kompleksai pieejai gamma spektrometru kriostatu ar EMD konstruēšanai. Uz iegūto dinamisko termiskās un vibrācijas modeļu pētījuma rezultātiem formulētas nepieciešamās operācijas, konstruējot ĪTG spektrometra kriostatu, lietojot EMD. Darbā piedāvātas praktiskās rekomendācijas, kas ļauj samazināt EMD raksturīgo tipisko trūkumu ietekmi.

Piektajā nodaļā izstrādāta metodika, veikti modelēšanas aprēķini ar datorprogrammu *MathCAD* un *Solidworks*, kā arī veikti eksperimenti siltuma procesu modelēšanai kriostatos ar EMD. Izstrādāts kriostata ar EMD un siltumekrānu dinamiskais siltuma modelis, kas ir sastādīts ar termoelektrisko analoģiju hipotēzes palīdzību. Modelis, ko apraksta nelineāra diferenciālvienādojumu sistēma, atrisināts, analizēts un optimizēts. Iegūti rezultāti, kas apraksta temperatūras sadalījumu uz siltumekrāna virsmas. Tas ļauj noteikt siltuma pieplūdes un vadīšanas ietekmi atkarībā no molekulārās atlieku gāzes kriostatā vadītspējas. Iegūti jauni rezultāti par efektīvu siltuma plūsmas samazināšanos uz detektora, izmantojot siltumekrānu (ne tikai augstā, bet arī vidējā vakuuma apvidū). Aprēķini parāda siltuma pieplūdes samazināšanos 2–3 reizes, turklāt šī attiecība saglabājas, ja izmainās gāzu spiediens kriostatā plašās robežās. *Solidworks* vidē veikts kriostata pārejas dzesēšanas procesa novērtējums un verificēts ar eksperimentāli iegūto reāla kriostata dzesēšanas laikā.

Sestajā darba nodaļā ar *Solidworks* programmas fundamentālo hipotēžu tīklojuma palīdzību veikta gamma spketrometra kriostata svārstību pamatsistēmu modālā analīze. Teorētiskās hipotēzes par simulācijas rezultātu ticamību ir verificētas ar eksperimentālo

pārbaudi, izmantojot elektrodinamisko vibroiekārtu *VBЭ-1-004*. Datorsimulēšanas rezultāti paradīja, ka modālo analīzi var izmantot izstrādājamo gamma spektrometru frekvenču raksturlīkņu novērtēšanai, kā arī rezonanses modu noteikšanai. Ar modālās analīzes palīdzību sastādīta gamma spektrometra kriostata svārstību pamatsistēmu pase, kas ļauj noteikt mikrofonefekta avotu, pamatojoties uz priekšpastiprinātāja izejas signāla frekvenču spektra analīzi.

Darba **septītajā nodaļā** aprakstīti modernizēti esošie un *Solidworks* vidē izstrādātie gamma spektrometru jauni kriostāti ar EMD. Praktiskie rezultāti, kas iegūti darba izpildes laikā, tika izmantoti kompānijā "Baltic Scientific Instruments", izstrādājot un ražojot jaunus spektrometrus dažāda veida lietojumiem. Par apstiprinājumu saistībā ar darbā iegūto ĪTG gamma spektrometru izstrādes rekomendāciju ieviešanu tiek minēts akts par pabeigta zinātniskās pētniecības darba rezultātu ieviešanu "Baltic Scientific Instruments" kompānijas ražošanas procesā.

AVOTU UN IZMANOTĀS LITERATŪRAS SARAKSTS

- [1] "Mirion Technologies," 2019. [Online]. Available: https://www.mirion.com/about. [Accessed: 15-Feb-2019].
- [2] "ORTEK," 2019. [Online]. Available: https://www.ortec-online.com/aboutus/company-profile. [Accessed: 15-Feb-2019].
- [3] "Baltic Scientific Instruments." [Online]. Available: www.bsi.lv. [Accessed: 14-Jan-2019].
- [4] G. F. Knoll, *Radiation Detection and Measurement*, 3rd ed. New York, 2000.
- [5] R. Radebaugh, "Cryocoolers: The state of the art and recent developments," J. Phys. Condens. Matter, 2009.
- [6] "Cryogenic Engineering Group, Cryocoolers for space applications," 2019. [Online]. Available: http://www2.eng.ox.ac.uk/cryogenics/research/cryocoolers-for-spaceapplications. [Accessed: 16-Feb-2019].
- [7] E. Pettyjohn, "Cryocoolers for Microsatellite Military Applications," pp. 709–714.
- [8] "Sunpower, Inc.," 2005. [Online]. Available: www.sunpowerinc.com. [Accessed: 14-Jan-2019].
- [9] "Lihan Technologies Co., Ltd." [Online]. Available: www.lihantech.com. [Accessed: 14-Jan-2019].
- [10] "Thales Cryogenics." [Online]. Available: http://www.thales-cryogenics.com. [Accessed: 07-Sep-2018].
- [11] А. Д. Соколов, А. Б. Пчелинцев, and В.В.Гостило, "Анализ характеристик электроохладителей для ОЧГ-детекторов гамма-излучения," *Ядерна та радіаційна безпека*, vol. 4, no. 68, pp. 45–50, 2015.
- [12] H. J. M. Ter Brake and G. F. M. Wiegerinck, "Low-power cryocooler survey," *Cryogenics (Guildf).*, 2002.
- [13] RICOR Cryogenic & Vacuum Systems, "Robust, battle-proven products for military & defense applications," 2019.
- [14] I. Kojouharov, "Electrical cooling of HPGe detectors," *TUD-Darmstadt*, 2017. [Online]. Available: https://indico.in2p3.fr/event/14457/contributions/18522/attachments/44290/54889/3.El ectrical cooling of HPGe detectors.pdf. [Accessed: 16-Feb-2019].
- [15] V. Parma, "Cryostat Design," Cern Doc. Serv., vol. CERN, Gene, p. 47.
- [16] "Stefan-Boltzmann law," ENCYCLOPÆDIA BRITANNICA. 2019.
- [17] R. Smith, "Camera Thermal Design," 2012.
- [18] A. Veprik, S. Riabzev, N. Avishay, D. Oster, and A. Tuitto, "Linear cryogenic coolers for HOT infrared detectors," pp. 83531V-83531V-11, 2012.
- [19] A. Veprik, S. Zehtzer, N. Pundak, and S. Riabzev, "Compact Linear Split Stirling Cryogenic Cooler for High Temperature Infrared Imagers," *Cryocoolers*, vol. 16, pp. 121–132, 2011.
- [20] "RICOR Cryogenic & Vacuum Systems," 1967. [Online]. Available: https://www.ricor.com/. [Accessed: 17-Jan-2019].
- [21] RICOR Cryogenic & Vacuum Systems, "PRODUCT CATALOG. INNOVATIVE COOLER TECHNOLOGIES," p. 40, 2018.
- [22] Y. Zhang, H. Li, X. Wang, W. Dai, Z. Yang, and E. Luo, "Advances in a high efficiency commercial pulse tube cooler," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 278, no. 1, 2017.
- [23] A. Veprik, S. Riabzel, C. Kirkconnell, and J. Freeman, "Low Cost Split Stirling Cryogenic Cooler for Aerospace Applications," in *International Cryocooler Conference*, *Inc., Boulder, CO*, 2012, p. 10.

- [24] A. Veprik, S. Zehtzer, and N. Pundak, "Split Stirling linear cryogenic cooler for a new generation of high temperature infrared imagers," SPIE Proc., vol. 7660, p. 76602K, 2010.
- [25] S. H. Byun, "Hyper-Pure Germanium Detector," *Radioisot. Radiat. Methodol.*, no. practically Li, pp. 1–20, 2016.
- [26] F. Cerro, A. Campo, and F. Alhama, "The Teaching of Unsteady Heat Conduction Using the Thermoelectric analogy and the Code Pspice. Nonlineal Models," *Int. Conf. Educ. an Res. "progress thorough Partnersh.*, no. 1942, pp. 79–87, 2004.
- [27] O. Yakovlev, V. Malgin, and Y. Viba, "Thermal Modeling of Cooldown Processes In Portable HPGe Spectrometers," in *Recent Trends in Engineering and Technology* (*RTET-17*), 2017, vol. 6th Intern, pp. 92–98.
- [28] V. Kondratjev, V. Gostilo, A. Owens, O. Jakovlevs, and J. Viba, "Vibration characteristics of miniature stirling electric coolers," *Vibroengineering Procedia*, vol. 8, pp. 409–413, 2016.
- [29] D. L. Johnson, G. T. Smedley, and G. R. Mon, "Cryocooler Electromagnetic Compatibility," in Cryocoolers 8, Plenum Publishers, New York, 1995, 1995, pp. 209– 220.
- [30] J. B. Mccabe, "Characterization of Mechanically Cooled High Purity Germanium (HPGe) Detectors at Elevated Temperatures," 2015.
- [31] G. Gilmore and J. D. Hemingway, *Practical gamma-ray spectrometry*, 2nd Editio. Chichester: John Wiley & Sons, 2008.
- [32] N. Hasebe *et al.*, "The development of HP-Ge Gamma-Ray Spectrometer cooled by stirling refrigerator on Japanese lunar polar orbiter SELENE," *Proc. Fourth Int. Conf. Explor. Util. Moon*, 2000.
- [33] M. N. Kobayashi *et al.*, "High-purity germanium gamma-ray spectrometer with stirling cycle cryocooler," *Adv. Sp. Res.*, 2002.
- [34] A. Hassan, A. Torres-Perez, S. Kaczmarczyk, and P. Picton, "Active vibration control for a free piston stirling engine generator using a voice coil actuator," *MM Sci. J.*, 2015.
- [35] T. Namba, Y. Inoue, S. Moriyama, and M. Minowa, "An X-ray detector using PIN photodiodes for the axion helioscope," *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers, Detect. Assoc. Equip.*, 2002.
- [36] M. Kobayashi *et al.*, "Germanium detector with Stirling cryocooler for lunar gamma-ray spectroscopy," *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers, Detect. Assoc. Equip.*, 2005.
- [37] P. Barton, M. Amman, R. Martin, and K. Vetter, "Ultra-low noise mechanically cooled germanium detector," *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers, Detect. Assoc. Equip.*, 2016.
- [38] W. Johnson, R. Long, M. Nelson, and D. Mascareñas, "Embedded active vibration cancellation of a piston-driven cryocooler for nuclear spectroscopy applications," in *Conference Proceedings of the Society for Experimental Mechanics Series*, 2012.
- [39] A. Hassan, A. Torres-Perez, S. Kaczmarczyk, and P. Picton, "Vibration control of a Stirling engine with an electromagnetic active tuned mass damper," *Control Eng. Pract.*, 2016.
- [40] R. M. Keyser, R. D. Bingham, and T. R. Twomey, "Improved performance in germanium detector gamma-spectrometers based on digital signal processing," J. Radioanal. Nucl. Chem., 2008.
- [41] M. K. Schultz, R. M. Keyser, R. C. Trammell, and D. L. Upp, "Improvement of spectral resolution in the presence of periodic noise and microphonics for hyper-pure germanium detector gamma-ray spectrometry using a new digital filter," in *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 2007.

- [42] N. Hasebe *et al.*, "Gamma-ray spectrometer (GRS) for lunar polar orbiter SELENE," *Earth, Planets Sp.*, 2008.
- [43] R. G. Ross, D. L. Johnson, and R. S. Sugimura, "CHARACTERIZATION OF MINIATURE STIRLING-CYCLE CRYOCOOLERS FOR SPACE APPLICATION," in Cryocoolers 8, .
- [44] D. L. Johnson, I. M. Mckinley, J. I. Rodriguez, H. Tseng, and B. A. Carroll, "Characterization Testing of the Thales LPT9310 Pulse Tube Cooler," pp. 116–124, 2014.
- [45] D. L. Johnson, J. I. Rodriguez, B. A. Carroll, J. G. Bustamante, and C. S. Kirkconnell, "Integrated Testing of the Thales LPT9510 Pulse Tube Cooler and the Iris LCCE Electronics," 2013.
- [46] A. Veprik, V. Systems, and E. H. Ihud, "Aural non-detectability of portable HOT infrared imagers," p. 10, 2013.
- [47] S. J. Nieczkoski and E. A. Myers, "Highly-Conductive Graphite Thermal Straps Used in Conjunction with Vibration Isolation Mounts for Cryocoolers," pp. 556–563, 2014.
- [48] D. L. Johnson and R. G. Ross, "Cryocooler Coldfinger Heat l nterceptor," 1994.
- [49] A. Veprik, S. Zechtzer, N. Pundak, S. Riabzev, C. Kirkconnell, and J. Freeman, "Low vibration microminiature split stirling cryogenic cooler for infrared aerospace applications," in *AIP Conference Proceedings*, 2012, vol. 1434, no. 57, pp. 1473–1480.
- [50] N. Tartoni *et al.*, "Monolithic Multi-Element HPGe Detector Equipped With CMOS Preampli fi ers : Construction and Characterization of a Demonstrator," vol. 62, no. 1, pp. 387–394, 2015.
- [51] Christopher Cox, "A Multi-Contact, Low Capacitance HPGe Detector for High Rate Gamma Spectroscopy," Hayward, 2014.
- [52] O. Jakovļevs, V. Malgin, and J. Vība, "Modal analysis of HPGe detector assembly in gamma-ray spectrometers," vol. 1, pp. 61–66, 2017.
- [53] D. Systemes, "SolidWorks 2016," Simulation, 2016.
- [54] A.Galiņš, "Elektrozinību teorētiskie pamati. Elektrisko ķēžu aprēķini," Jelgava, 2008.
- [55] Baltic Scinetific Instruments, "HandSPEC Hand Held HPGe Spectrometer." [Online]. Available: http://bsi.lv/en/products/hpge-detectors-spectrometers/handspec-hand-heldhpge-spectrometer/. [Accessed: 04-May-2019].
- [56] "Simcenter STAR-CCM+," 2019. [Online]. Available: https://mdx.plm.automation.siemens.com/star-ccm-plus. [Accessed: 25-Jan-2019].
- [57] HADEDE, "Hand-held spectrometer design," *EstLat*. [Online]. Available: https://estlat.eu/en/estlat-results/hadede.html. [Accessed: 04-May-2019].
- [58] Р.Я. Лабковская, *МЕТОДЫ И УСТРОЙСТВА ИСПЫТАНИЙ ЭВС ЧАСТЬ 1*. Санкт-Петербург, 2015.
- [59] Бошняк Л.Л., Измерения при теплотехнических исследованиях. 1974.
- [60] Ensinger, "Tecasint 2011," 2009. [Online]. Available: http://www.ensingeronline.com/fileadmin/picturespdf/General_informations/Technical_Informations/TECASINT-

datasheets/English/TECASINT-2011-english.pdf. [Accessed: 15-Jan-2019].

- [61] I. Kojouharov, J. Gerl, M. Steinen, A. Sanchez-Lorente, J. Pochodzalla, and J. Kojouharova, "Optimization of electrically cooled complex HPGe detector," *Proc. UKSim-AMSS 6th Eur. Model. Symp. EMS 2012*, no. 4500109716, pp. 461–465, 2012.
- [62] J. Hakenm, M. Laubenstein, M. Lindner, and W. Maneschg, "GIOVE A New Detector Setup for High Sensitivity Germanium Spectroscopy At Shallow Depth," pp. 1–17.
- [63] "Anyseals O-rings product list." [Online]. Available: http://www.anyseals.org/en/products/productlist/?categoryId=1&subCategoryId=16. [Accessed: 27-Jan-2019].

- [64] "Kurt J. Lesker CF Flanges Technical Notes." [Online]. Available: https://www.lesker.com/newweb/flanges/flanges_technicalnotes_conflat_1.cfm. [Accessed: 27-Jan-2019].
- [65] "Technetics Group HELICOFLEX® Seal." [Online]. Available: https://technetics.com/products/sealing-solutions/metal-seals/helicoflex/. [Accessed: 27-Jan-2019].
- [66] "Solid Sealing Technology product catalog." [Online]. Available: http://www.solidsealing.com/parts/category.cfm?pcid=6&dist=0. [Accessed: 27-Jan-2019].
- [67] C. Hauviller, "Design rules for vacuum chambers," *Environment*, pp. 31–42, 2006.
- [68] S. Sgobba, "Materials for high vacuum technology: an overview An historical introduction," pp. 117–143.
- [69] Henry E. Frankel, "EFFECT OF VACUUM ON MATERIALS," in *EUROPEAN SPACE RESEARCH ORGANISATION Technical Note*, Noordwijk, 1969, p. 51.
- [70] "Saes Group CAPACITORR NEG PUMPS." [Online]. Available: https://www.saesgetters.com/products-functions/products/vacuum-pumps/capacitorrneg-pumps. [Accessed: 30-Jan-2019].
- [71] I. Kojouharov, "DEGAS the HPGe array spectrometer for NUSTAR," in *Workshop* "*Detectors for FAI R*," 2016, p. 25.
- [72] K. Michael Yocum, James F. Colares, and Harry S. Miley, "IMPROVEMENT IN GE DETECTOR COOLING," pp. 667–676, 2009.

PIELIKUMI

Ekvivalentā EMD siltuma modeļa noteikšana

EMD siltuma raksturlīknes, kuras ir dotas pasēs, ir slodzes un dzesēšanas raksturlīknes. Slodzes raksturlīkne attēlo EMD dzesējošās jaudas atkarību no tā siltuma caurulītes aukstā gala temperatūras. Otrā raksturlīkne parāda dzesēšanas procesu, atkarībā no laika. Dažu EMD raksturlīkņu piemēri ir doti zemāk (1.1. att. – 1.3. att.).



1.1. att. EMD *Sunpower CryoTel MT* ārējais izskats a); un tā raksturlīknes: slodzes b) un dzesēšanas c) [8].



1.2. att. EMD Lihan TC4189 ārējais izskats (pa kreisi) un slodzes raksturlīkne (pa labi) [9].





1.3. att. EMD Thales LPT 9510 ārējais izskats a) un slodzes raksturlīkne b) [10].

1.1. tabula

Siltuma para	Elektriskie parametri		
Siltuma plūsma	P,(W)	Strāva	<i>I</i> , (A)
Temperatūra Θ, (K)		Spriegums	<i>U</i> , (V)
Siltumpretestība	<i>R</i> , (K/W)	Pretestība	$R,(\Omega)$
Siltumietilpība	<i>C</i> , (J/K)	Kapacitāte	<i>C</i> , (F)

Termoelektriskās analoģijas

Vadoties pēc 1.1. tabulā minētām galvenajām termoelektriskām analoģijām, tika piedāvāts ekvivalentais elektriskais divpols, kas modelē EMD siltuma raksturlīknes (1.4. att.(a)). Elektriskais divpols sastāv no strāvas avota I₀ un pasīviem elementiem R₀, C₀, kuri modelē siltuma (dzesēšanas) plūsmu, ko rada EMD, kā arī to ekvivalento siltumietilpību un iekšējo siltuma pretestību. Lielumi I₀, R₀ un C₀ tiek aprēķināti no EMD siltuma raksturlīknēm, kuras ir dotas tehniskajā dokumentācijā konkrētiem EMD darba režīmiem.

Divpola izejas spriegums U_{out} ir ekvivalents EMD siltuma caurulītes aukstā gala temperatūrai un atbilst dzesējošai jaudai, kura tiek nodota ĪTG detektora I_c dzesēšanai, kad EMD korpusa temperatūra ir U₀, un tas var būt izteikts kā:

$$U_{out} = U_0 - R_0 (I_0 - I_c).$$
(1.1.)

Piemēram, EMD *CryoTel MT*, kura raksturlīknes ir parādītas (1.1. att.), ja ieejas jauda ir 80W un korpusa temperatūra U₀ = 296K (23°C), nodrošina maksimālo dzesēšanas jaudu I_{c1} = 5W siltuma caurulītes aukstā gala temperatūrā U_{out1} = 75K un I_{c2} = 15,5W, kad temperatūra paaugstinās līdz U_{out2} = 140K.



1.4. att. EMD ekvivalentā shēma a) un siltuma raksturlīkņu modelēšana b); c).

Vadoties pēc šiem pasē norādītajiem datiem, tiek noteikti konkrētie lielumi R₀ un I₀.

$$R_0 = (U_{out2} - U_{out1}) / (I_{c2} - I_{c1}) = 6.2 \text{ K/W};$$
(1.2.)

$$I_0 = I_{c1} + (U_0 - U_{out1})/R_0 = 40,7 \text{ W};$$
 (1.3.)

$$C_0 = \tau/R_0 = 58,1 \text{ J/K.}$$
 (1.4.)

Atzīmēsim, ka, fizikālajā aspektā, parametrs I₀ šajā vienkāršotā EMD modelī atbilst siltuma jaudai Karno ciklā.

Parametrs C_0 , kas atbilst EMD siltuma caurulītes aukstā gala ekvivalentai siltumietilpībai, tiek aprēķināts ar dzesēšanas raksturlīknes laika konstanti, kad nav slodzes. Atbilstoši (1.4.att.(c)), dzesēšanas procesa laika konstante, t. i., laika, kurā procesa amplitūda samazinās n reizes, ir vienāda ar $\tau = 6$ min. 1.4.att.(c) punkti atbilst pasē norādītai dzesēšanas raksturlīknei (1.1.att.(c)), līnija – eksponenciālai funkcijai ar aprēķina parametriem:

$$U_{out}(t) = U_0 - I_0 R_0 [1 - exp(-t/R_0 C_0)].$$
(1.5.)

1.2.tabula

Parametrs	Lihan TC4189	Sunpower CryoTel MT	Thales LPT9510	
Jauda, W	240	80	85	
Dzesējošā jauda, W	16W@80K	5W@80K	1,4W@80K	
Zemākā temperatūra, K	45	40	50	
Modeļa parametri:				
I_0, \mathbf{W}	102,6	40,7	12,6	
R_0 , K/W	2,5	6,2	19,2	
<i>C</i> ₀ , J/K	94,9	58,1	18,7	

Dažu EMD termoelektrisko modeļu parametri



1.5.att. EMD siltuma raksturlīkņu modelēšana uz 1.2. tabulā minēto parametru pamata. Pasē norādītie lielumi ir apzīmēti ar punktiem.

Analoģiski tika aprēķināti ekvivalentie siltuma modeļa parametri trijiem dažādu tipu EMD, kuru raksturlīknes ir parādītas 1.1.att. – 1.3.att. Iegūtie dati ir minēti 1.2. tabulā. 1.5. att. ir salīdzināti pasē norādīto raksturlīkņu dati, kuri ir apzīmēti ar punktiem, un raksturlīknes, kuras ir aprēķinātas uz piedāvātā modeļa pamata. Minētais piemērs demonstrē, ka piedāvātā ekvivalentā siltuma shēma ar pietiekamu precizitāti modelē reālās EMD raksturlīknes plašā temperatūru diapazonā.

Skaitliskais siltuma plūsmu portatīvā *HandSPEC* gamma spektrometra kriostatā novērtējums

Pamatojoties uz minētajām siltuma pieplūdes komponentu vakuumkamerā aprēķina formulām, tika veikts portatīvā gamma spektrometra siltuma plūsmu portatīvā *HandSPEC* gamma spektrometra (2.1. att.) kriostatā novērtējums.



2.1.att. Konstruktīvā shēma (pa kreisi) un siltuma plūsmas kriostatā (pa labi).

Siltuma pieplude caur balstiem

Detektora tapņa balstu modelēšanai tika izmantotas sešas stikltekstolīta plāksnes ar 9mm² šķērsgriezumu un 50 mm garumu. Stikltekstolīta siltumvadītspējas koeficients 80 – 300K temperatūru diapazonā tiek aprakstīts ar sekojošo funkciju:

$$k(T) = 0.65 - 0.0016(300 - T).$$
(2.1.)

Balstgredzenu siltuma pieplūde, kura ir saistīta ar siltumvadītspēju, ir vienāda ar:

$$Q22_{cond} = 0,109W (T1=90K).$$
 (2.2.)

Siltuma pieplūde caur elektriskiem izvadiem

ĪTG detektora kriostata elektriskajam savienojumam un papildus sensoriem tiek izmantoti manganīna vadi ar 0,07 mm² šķērsgriezumu un 0,1 m garumu. Manganīna siltumvadītspējas koeficients 80 – 300 K temperatūru diapazonā tiek aprakstīts ar sekojošo funkciju:

$$k(T) = 22 - 0.04(300 - T), \qquad (2.3.)$$

$$Q21_{cond} = 0,029W (T1 = 90K).$$
 (2.4.)

Siltuma pieplūde ĪTG detektoram ar siltuma starojumu

Ārējāis kriostata detektora vāks un ĪTG detektora tapnis ir izgatavoti no alumīnija, ar mehāniskas apstrādes palidzību. Vāka iekšejas virsmas starojuma koeficients, kad temperatūra $T_2 = 300$ K, ir pieņemts kā $\varepsilon_2 = 0.2$, bet tapņa virsmai, kad ir kriogēnā temperatūra, $\varepsilon_1 = 0.1$. Iekšējo un ārējo virsmu laukumi, kuri ir iedarbinātas siltuma pieplūdē caur siltuma starojumu, ir vienādi ar $S_1 = 0.020$ m² un $S_2 = 0.029$ m². Tātad, siltuma pieplūde uz detektora tapni no vāka ar siltuma starojumu ir vienāda ar:

$$Q2_{rad} = 8,89 \cdot 10^{-11} (300^4 - T4_1) \text{ W},$$

$$Q2_{rad} = 0,714 \text{ W} (T1 = 90 \text{ K}).$$
(2.5.)

Siltuma pieplūde no tvertnes ar sorbentu ar siltuma starojumu

HandSPEC gamma spektrometra kriostata korpuss ir izgatavots no alumīnija, savukārt, sorbenta tvertne ir izgatavota no vara. Kriostata iekšējās virsmas starojuma koeficients, kad temperatūra $T_2 = 300$ K, ir pieņemts kā $\varepsilon_2 = 0.2$, bet vara tvertnes virsmai, kad ir kriogēnā temperatūra, $\varepsilon_1 = 0.08$. Iekšējo un ārējo virsmu laukumi, kuri ir iedarbināti siltuma pieplūdē caur siltuma starojumu, ir vienādi ar $S_1 = 0.007$ m² un $S_2 = 0.016$ m². No šejienes, siltuma pieplūde no tvertnes ar sorbentu ar siltuma starojumu ir vienāda ar:

$$Q1_{rad} = 2,79 \cdot 10^{-11} (300^4 - T4_1) \text{ W},$$

$$Q1_{rad} = 0,224 \text{ W} (T1 = 90 \text{ K}).$$
(2.6.)

Siltuma pieplūde no vāka atlieku gāzes dēļ

Nosacīti ir pieņemts, ka atlieku gāzes sastāvs ir tuvs gaisa sastāvam. Aplūkojamajam gadījumam adiabātas rādītājs ir vienāds ar $\gamma = 1.41$ un vidējā molmasa – $\mu = 29$ g/mol. Temperatūras sadales koeficients ir pieņemts kā $\alpha_1 = \alpha_2 = 0.7$. Iekšējo un ārējo virsmu laukumi, kuri ir iedarbināti siltuma pieplūdē atlieku gāzes dēļ, ir vienādi ar S₁ = 0.023m² un S₂ = 0.042m². Tātad, siltuma pieplūde no vāka uz detektoru atlieku gāzes dēļ tiek noteikta kā:

$$Q2_{resid} = 1,59p'(300 - T_1) W,$$
 (2.7.)

kur

p' – atlieku gāzes spiediens mbar (1 mbar = 100 Pa)

$$Q2_{resid} = 0.033 \text{W} (\text{T}_1 = 90 \text{K un } p' = 1 \cdot 10^{-4} \text{ mbar});$$
 (2.8.)

$$Q2_{resid} = 3,3W (T_1 = 90K \text{ un } p' = 1 \cdot 10^{-2} \text{ mbar}).$$
 (2.9.)

Siltuma pieplūde no tvertnes ar sorbentu atlieku gāzes dēļ

Iekšējo un ārējo virsmu laukumi, kuri ir iedarbināti siltuma pieplūdē atlieku gāzes dēļ, ir vienādi ar $S_1 = 0,009m^2$ un $S_2 = 0,016m^2$. Tātad, siltuma pieplūde no tvertnes uz detektoru atlieku gāzes dēļ tiek noteikta kā:

$$Q1_{resid} = 0.62p'(300 - T_1) W,$$
 (2.10.)

kur,

p' – atlieku gāzes spiediens mbar (1 mbar = 100 Pa).

$$Q1_{resid} = 0,013 \text{ W}(T_1 = 90 \text{K un } p' = 1 \cdot 10^{-4} \text{ mbar});$$
 (2.11.)

$$Q1_{resid} = 1,3 \text{ W}(T_1 = 90 \text{K un } p' = 1 \cdot 10^{-2} \text{ mbar}).$$
 (2.12.)

Siltuma pieplūdes apzīmēto komponenšu aprēķinu rezultāti ir atspoguļoti 2.1. tabulā

2.1. tabulā

Apraksts	Siltuma pieplūde, (T1=90K).		
	Spiediens $1 \cdot 10^{-4}$ mbar	Spiediens $1 \cdot 10^{-2}$ mbar	
Siltumvadītspējas:			
balstgredzenu:	0,109 W	0,109 W	
elektrisko izvadu:	0,029 W	0,029 W	
kopā:	0,138 W	0,138 W	
Siltuma starojums:			
tapnis ar detektoru:	0,714 W	0,714 W	
tvertne ar sorbentu:	0,224 W	0,224 W	
kopā:	0,938 W	0,938 W	
Atlieku gāzes molekulārā vadītspēja:			
tapnis ar detektoru:	0,033 W	3,3 W	
tvertne ar sorbentu:	0,013 W	1,3 W	
kopā:	0,046 W	4,6 W	
Kopā:	1,122 W	5,68 W	

Siltuma pieplūde HandSPEC gamma spektrometrā

Zemāk ir attēlotas aprēķinātās siltuma pieplūdes atkarības, kad ir dažādas dzesēšanas temperatūras.



summārie zudumi (melnā līnija), kad ir dažādas dzesēšanas temperatūras.

Pētījumu rezultātā ir iegūts, ka augstā vakuumā (spiediens mazāks kā 10⁻⁴ mbar) *HandSPEC* gamma spektrometra kriostatā, siltuma pieplūde notiek, galvenokārt, deļ siltuma starojumam. Savukārt, vakuuma līmeņa degradācijas gadījumā (palielinoties spiedienam līdz 10⁻² mbar un lielāk), siltuma pieplūde notiek, galvenokārt, deļ molekulārai atlieku gāzes vadītspējai.



Eksperimentālā iekārta detektora tapņa balstu rezonanšu novērtēšanai

3.1.att. Eksperimentālā iekārta ar izmantojamo komponentu apzīmējumiem.

Vadoties pēc esošām vibrāciju pārbaužu iekārtām, tika samontēta eksperimentālā iekārta, kura ir parādīta 3.1. att. un tās sastāvs ir:

Elektrodinamiskā vibroiekārta VBЭ-1-004

Maksimālā vibrogalda svārstību amplitūda – 6 mm (divkāršais vēziens 12 mm);

Frekvenču diapazons – 10 Hz - 5500 Hz;

Nominālais ierosinātājspēks ne mazāks kā 1250 N;

Jaudas pastiprinātāja izejas jauda, ne mazāka kā 1000 W;

Vibropaātrinājums (ne mazāk kā 50 g) 54-5000 Hz diapazonā, slodze ne vairāk par 1 kg; Reducētā kustīgās sistēmas masa ne vairāk par 1.5 kg.

Vadošais ģenerators 15 US-10000-002

Ģeneratora frekvenču diapazons – 8-12000 Hz;

Ieejas jutība -10mV/g;

Izejas signāla amplitūda – 0-8 V;

Vadības kanālu skaits – 2.

Vienkanāla pastiprinātājs ПУНЖ 1-002

ar akselerometru *ABC 036-02*, kurus izmanto, lai iegūtu atgriezeniskās saites signālu vadošajam ģeneratoram *15 US-10000-002* no *VBЭ-1-004* iekārtas vibrogalda – 1 gab.

Vienkanāla pastiprinātājs *M72A1* – 2 gab.

Vācu kompanijas *MMF* pastiprinātājs *M72A1* ir paredzēts darbībai gan ar lādiņa, gan arī ar *IEPE (Integrated Electronics Piezo Electric)* standarta akselerometriem. Pastiprinātāja jutības iekārta nodrošina pastāvīgu attiecību starp izmērāmo vibrācijas lielumu un izejas spriegumu. Pieslēdzot akselerometrus *KS76C* ar iekšējo elektronisko pasi *TEDS (transducer with an electronic data sheet*), jutība tiek automātiski ievadīta.

Pastiprināšanas koeficients tiek izvēlēts no virknes: 0/20/40/60 dB, t. i., 1/10/100/1000.

Maksimālā izejas signāla amplitūda ± 10 V (± 10 VPP – Volts peak to peak).

Pastiprinātājs īsteno vienkārtējo un divkārtējo integrēšanu vibroātruma un vibropārvietojuma mērīšanai. Izmērot vibroātrumu, frekvenču josla ir ierobežota ar 3 - 1000 Hz diapazonu, bet, izmērot vibropārvietojumu – līdz 200 Hz.

Akselerometri vibrāciju pārbaudēm

KS76C 100 ar izeju IEPE (Integrated Electronics Piezo Electric) – 2 gab; KD37 ar lādiņa izeju – 1 gab.

Akselerometri *KS76C, KD37* kopā ar pastiprinātājiem *M72A1* ļauj veikt vibropaātrinājuma mērījumu ar $\pm 0,5\%$ precizitāti no izmērāmā lieluma. Tie ir pārbaudīti 31.01.2017., garantijas termiņš – 2 gadi (sertifikāti tiek pievienoti katram akselerometram).

3.1. tabula

Nn	Ting	Sērijas	Paātrinājumu	Ju	ıtība	Pārbaudes
111.	rips	Nr.	diapazons	aksiālā	transversālā	datums
1	KS76C	16061	1/ 60g	99,433	0.6%	31.01.2017
1.	100	10001	+/- 00g	mV/g	0,070	
2	KS76C	16064	+/- 60g	99,041	0.3%	31.01.2017
۷.	2. 100	10004		mV/g	0,370	
3. <i>KD37</i>	KD37	16023	+5000a/ 1000a	60,735		01 02 2017
	10025	+3000g/ -1000g	pC/g	_	01.02.2017	

Mērakselerometru dati

Pirms mērījumu veikšanas tika pārbaudīts akselerometru rādījumu identiskums. Dažādās vibrogalda svārstību frekvencēs ar 30g vibropaātrinājuma amplitūdu tika salīdzināti visu vienlaikus uz vibrogalda nostiprināto akselerometru rādījumi. Rezultāti ir doti 3.2. tabulā.

3.2. tabula

Tips	Sērijas Nr.	75 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	800 Hz	1500 Hz
KS76C	16061	30 g	30 g	30 g	29 g	29 g	30 g
KS76C	16064	30 g	30 g	30 g	29 g	29 g	30 g
KD37	16023	29 g	30 g	29 g	30 g	29 g	31 g
ABC036	-	29 g	29 g	30 g	30 g	28 g	28 g

Akselerometru rādījumu salīdzinājums



3.2. att. Akselerometru *KS76C, KD37* rādījumu identiskuma pārbaude kopā ar pastiprinātājiem *M72A1* un akselerometru *ABC036-02* kopā ar pastiprinātāju *ПУНЖ 1-002*.

Attēlā (3.2. att.) ir parādīts akselerometru rādījumu identiskuma pārbaudes piemērs, ja ir vibrogalda svārstības ar 800 Hz frekvenci un vibropaātrinājuma amplitūdu 29g. Labajam pastiprinātājam ir pieslēgts akselerometrs *KS76C*, ar uzstādīto pastiprināšanas koeficientu vienadu ar 1 un kopējā jutība ir 100 mV/g. Kreisajam pastiprinātājam ir pieslēgts akselerometrs *KD37*, ar uzstādīto pastiprināšanas koeficientu vienadu ar 10 un kopējā jutība arī ir 100 mV/g. Signāls no akselerometra *ABC036-02* kopā ar salāgošanas pastiprinātāju *ПVH I-002* tiek attēlots oscilogrāfā *C1-65A*. Oscilogrāfa iestatījumi – 2V/ied un 0.5 ms/ied.

3.3. tabula

Ierice	Jutības nostādīšana	Skalas sektors	Pastiprinājuma	Normētā jutība	
			koeficients	mV/ g	mV s2/m
	nav vajadzīga, (automātiski)	_	1	100 mV/	10 mV
K\$76C				g	s2/m
K570C			10	1 B/ g	100 mV
					s2/m
KD37	6074 M72A (norādīta pasē)		0,1	1 mV/g	0,1 mV
					s2/m
			1	10 mV/g	1 mV
					s2/m
			10	100 mV/	10 mV
			10	g	s2/m
ABC 036- 02	"155" ПУНЖ 1-002	1 - 11	0,001	10 mV/g	1 mV
					s2/m
			0,01	100 mV/	10 mV
				g	s2/m

Normētās jutības nostādīšana

Detektora tapņa balstu rezonanses frekvenču novērtēšanai tika samontēts detektora imitators uz standarta triju gredzenu balstiem, kuri ir izpildīti no diviem dažādiem materiāliem *Composite G-Etronax* un *CESTILENE HD 1000*. Eksperimentiem tika izmantots masas un gabarīta imitators ar 490 gramu svaru, kas atbilst ĪTG detektoram ar 15% efektivitāti.



3.3. att. Akselerometru izvietojums, kuri izmēra imitatora vibropaātrinājumus X un Y asīs uz trim balstgredzeniem no *Composite G-Etronax* (pa kreisi) un *CESTILENE HD 1000* (pa labi), kas ir nostiprināti uz *VBЭ-1-004* iekārtas vibrogalda.

Akselerometru jutība transversālajā virzienā sastāda mazāk kā 0,6% no aksiālās jutības, kas ļauj izmērīt vibropaātrinājumus dažādos virzienos, mainot akselerometra orientāciju. Akselerometri bija nostiprināti divās savstarpēji perpendikulārajās asīs, lai veiktu vibropaātrinājumu mērīšanu aksiālajā (X ass) un transversālajā (Y ass) virzienos (3.3. att.). Tā kā konstrukcija ir aksiālsimetriskā, vibropaātrunājuma mērīšana pēc trešās Z ass nav nepieciešama. Tā kā katra akselerometra masa ir vienāda ar 22 gramiem un sastāda mazāk kā 10% no imitatora masas, to ietekme uz visa mezgla rezonanses frekvences izmainīšanu nav liela. Uz vibrogalda virsmas nostiprinātā akselerometra *ABC036-02* signāls tika izmantots kā atgriezeniskā saite, lai uzturētu pastāvīgu vibrogalda paātrinājumu uzdotajā frekvenču diapazonā.

Eksperimentālai rezonanšu meklēšanai vibrācijas frekvence izmainījās ar 10 Hz soli diapazonā no 50 līdz 700 Hz. Turklāt tika uzturēts pastāvīgs vibrogalda svārstību paātrinājums vertikālajā X asī. Ar oscilogrāfa *C1-65A* pieslēgšanu pastiprinātāju *M72A1* izejām tiek kontrolētas imitatora svārstību formas gan vertikālajā, gan arī horizontālajā virzienos.

Zemāk attēlos (3.4. att. - 3.6. att.) ir parādīti vibropaātrinājumu mērīšanas un svārstību formas kontroles piemēri eksperimentu laikā.



3.4. att. Detektora imitatora ar 100 Hz frekvenci aksiālo (labā pastiprinātāja M72A1 rādījumi – 15g) un izlieces (kreisā pastiprinātāja M72A1 rādījumi – 4,3g) svārstību vibropaātrinājumu mērīšana, ja vibrogalda amplitūda ir 4g.



3.5. att. Detektora imitatora ar 500 Hz frekvenci aksiālo (kreisā pastiprinātāja M72A1 rādījumi – 32g) un izlieces (labā pastiprinātāja M72A1 rādījumi – 5,2g) svārstību vibropaātrinājumu mērīšanas piemērs, ja vibrogalda amplitūda ir 9g (oscilogrāfa C1-65A rādījumi).



3.6. att. Detektora imitatora ar 80 Hz frekvenci aksiālo (labā pastiprinātāja M72A1 rādījumi – 24g) un izlieces (kreisā pastiprinātāja M72A1 rādījumi – 5,6g) svārstību vibropaātrinājumu mērīšanas piemērs, ja vibrogalda amplitūda ir 9g (oscilogrāfa C1-65A rādījumi).

Pamatojoties uz eksperimentu veikšanas laikā iegūtiem mērīšanas datiem, tika noteiktas imitatora vibropaātrinājumu un vibrācijas amplitūdu frekvenču atkarības gan vertikālajā, gan arī horizontālajā virzienos. Konstruējot atkarību grafikus, izmantota *MathCAD* programmatūra.



"Composite G-Etronax - 2 mm"

3.7.att. Eksperimentu iegūto mērīšanas datu atkarību piemers MathCAD vidē.

kur,

a0 – nemainīgs pamatnes vibropaātrinājums (variējamais parametrs – 2g; 4g; 9g);

al – aksiālais detektora imitatora paātrinājums;

f – galda vibrāciju frekvence.

Vibrācijas frekvence mainījās diapazonā no 200 līdz 700 Hz.



Ramulu street 3 Riga, LV-1005, LATVIA Tel. (+371)6738-3947 Fax:(+371)6738-2620 office@bsi.lv www.bsi.lv

AKTS par pabeigtā zinātniski pētnieciskā darba ieviešanu ražošanas procesā

Kompānijas *Baltic Scientific Instruments* komisijas locekļi: Kompānijas prezidents, Dr.sc.ing. V. Gostilo; Tehniskais direktors, Dr.sc.ing. A. Sokolovs, sastādīja šo aktu par to, ka laika periodā no 2016. gada līdz 2019. gadam kompānijas *Baltic Scientific Instruments* zinātniskajā ražošanas līnijā ir ieviesti Konstruktoru tehnoloģiskā biroja vadītāja, tehnisko zinātņu maģistra **Oļega Jakovļeva** zinātniski pētnieciskā darba rezultāti par tēmu:

Dinamisko procesu analīze kriostatos ar elektromašīnu dzesēšanu

Šim aktam paredzētie materiāli ir aplūkoti *Baltic Scientific Instruments* operatīvās ražošanas sanāksmes un pētniecisko darbu sanāksmes sēdē (25.03.2019. protokols Nr.12-19)



Head Management: Dr. Gostilo Vladimir Dr. Sokolov Alexander Mr. Moshak Vladimir Bank details: NORDEA Bank Finland Plc Latvian branch Bank code: NDEALV2X IBAN account: LV13NDEA0000080226011 Commercial registration number: 40003176361 VAT Registration No. LV40003176361 Place of registration: Riga, Latvia