

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 darba kopsavilkums

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

RTU Izdevniecība
Rīga 2019

Jakovļevs, O. Dinamisko procesu analīze kriostatos ar elektromašīnu dzesēšanu. Promocijas darba kopsavilkums. Rīga: RTU Izdevniecība, 2019. 31 lpp.

Iespiests saskaņā ar RTU Promocijas padomes “P-04” 2019. gada 12. jūnija lēmumu, protokols Nr. 10.

Promocijas darbs izstrādāts ar RTU Zinātņu prorektora dienesta un Mašīnzinību, transporta un aeronautikas fakultātes piešķirto doktorantūras pētniecības grantu finansiālu atbalstu.

ISBN 978-9934-22-333-4 (print)
978-9934-22-334-1 (pdf)

PROMOCIJAS DARBS IZVIRZĪTS INŽENIERZINĀTŅU DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ

Promocijas darbs inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2019. gada 19. septembrī plkst 16.00 Rīgas Tehniskās universitātes Mašīnzinību, transporta un aeronautikas fakultātē, Paula Valdena ielā 1, 101. auditorijā.

OFICIĀLIE RECENZENTI

Profesors *Dr. sc. ing.* Vitālijs Beresņevičs,
Rīgas Tehniskā universitāte, Latvija

Materiālu mehānikas institūta direktors *Dr. sc. ing.* Egils Plūme,
Latvijas Universitāte, Latvija

Vadošais pētnieks *Dr. habil. sc. ing.* Vitālijs Krupenins,
IMASH RAN, Krievija

APSTIPRINĀJUMS

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

Oļegs Jakovļevs (paraksts)

Datums:

Promocijas darbs ir uzrakstīts latviešu valodā, tajā ir ievads, septiņas nodaļas, secinājumi, literatūras saraksts, 87 attēli, 19 tabulu, četri pielikumi, kopā 130 lappušu. Literatūras sarakstā ir 72 nosaukumi.

SATURA RĀDĪTĀJS

TĒMAS AKTUALITĀTE	5
DARBA MĒRĶIS UN GALVENIE UZDEVUMI	5
PĒTIJUMA OBJEKTS	5
PĒTIJUMA HIPOTEZES	6
ZINĀTNISKĀ NOVITĀTE	6
DARBA REZULTĀTU PRAKTISKĀ IZMANTOŠANA.....	6
PUBLIKĀCIJAS.....	7
DARBA STRUKTŪRA UN GALVENIE REZULTĀTI.....	8
AIZSTĀVĒŠANAI IZVIRZĪTĀS TĒZES	8
1. PĒTIJUMA OBJEKTS	9
2. PĒTIJUMA UZDEVUMS	10
3. KOMPLEKSĀ PIEEJA GAMMA SPEKTROMETRU KRIOSTATU AR EMD KONSTRUĒŠANAI	14
4. SILTUMA PROCESU MODELĒŠANA KRIOSTATOS AR EMD.....	15
5. REZONANŠU NOVĒRTĒJUMS KRIOSTATĀ AR EMD	25
6. REZULTĀTU APROBĀCIJA	28
7. SECINĀJUMI.....	29
AVOTU UN IZMANOTĀS LITERATŪRAS SARAKSTS.....	31

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 analogiju hipotēzes palīdzību.
2. 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 *VB-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;
- 3) 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 Ķīnā, Vācijā, Japānā, 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

1. Kondratjev, V., Pchelintcev, A., **Jakovļevs, 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.
2. **Jakovļevs, 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.
5. Kondratjev, V., Gostilo, V., Owens, A., **Jakovļevs, O.**, Vība, J. Vibration Characteristics of Miniature Stirling Electric Coolers. *Vibroengineering Procedia*, 2016, Vol. 8, 409.–413. lpp. ISSN 2345-0533.
6. Tkaczyk, A., Malgins, V., **Jakovļevs, 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.
7. Pchelintcev, A., Lupilov, A., Nurgaleev, R., **Jakovļevs, 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

1. **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.
2. **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.
3. **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.
 4. **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.
 5. **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.
 6. 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.
 7. **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 literatūras avotu saraksts. Darba apjoms – 130 lpp., 87 attēli, 19 tabulu, 72 literatūras avoti, četri pielikumi.

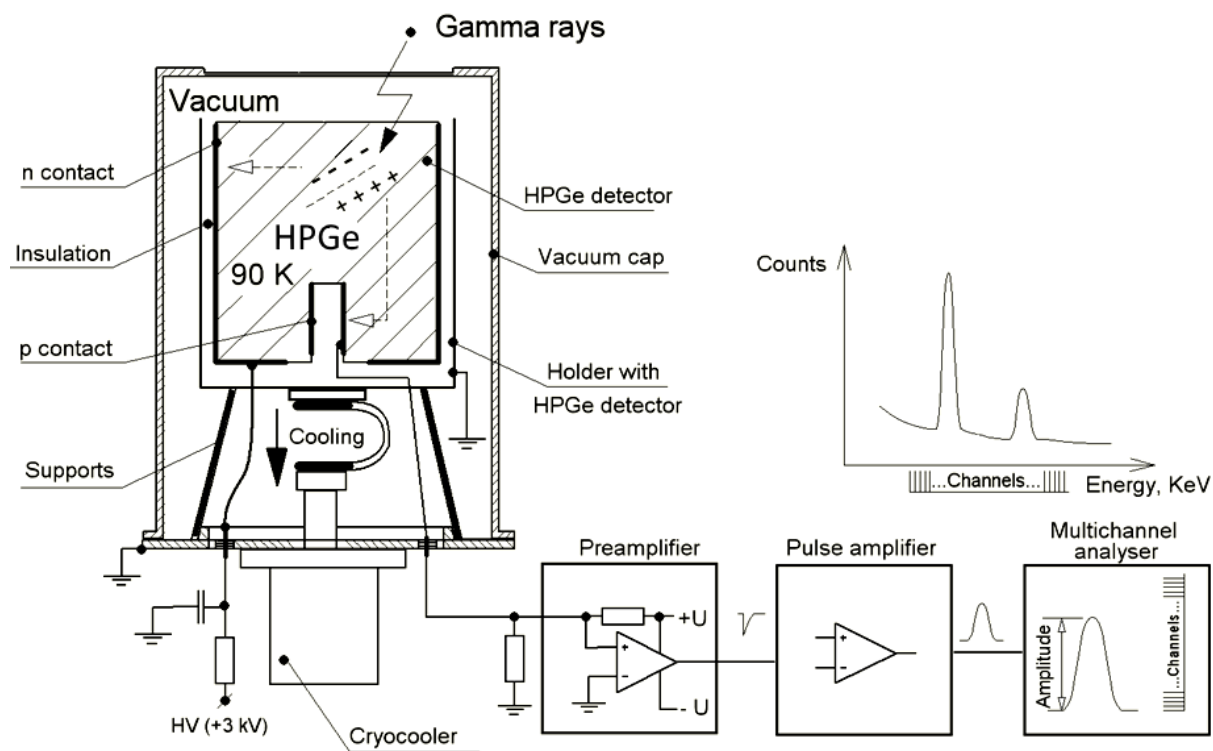
AIZSTĀVĒŠANAI IZVIRZĪTĀS TĒZES

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.

1. PĒTIJUMA OBJEKTS

Darba **pirmajā nodaļā** analizēta, izpētīta un novērtēta zinātniskā aparātūra ar īpaši tīriem germānija (ĪTG) detektoriem.

Aprakstītas mūsdienīgās gamma spektrometrijas unikālās iespējas dažādu pētījumu veikšanai daudzās jomās. Atzīmēts, ka gamma spektrometru vidū līderpozīciju, ieņem pusvadītāju detektori no īpaši tīrā germānija [1]. Šo detektoru galvenās īpašības ir nepieciešamība dzesēt germānija monokristālu līdz šķidrā slāpekļa temperatūrai, lai palielinātu tā jutību. ĪTG detektoru dzesešana līdz šķidrā slāpekļa temperatūrai, izmantojot ar Djuāra trauku, ir bīstama cilvēka dzīvībai. Viens no šīs problēmas risinājumiem ir ĪTG gamma spektrometru izstrāde, kā ĪTG detektora dzesētāju neizmantojot šķidro slāpekli. Mazgabarīta, drošu un diezgan jaudīgo elektromašīnu dzesētāju (EMD) parādīšanās tirgū [2], [3] atklāja izstrādes perspektīvu, lietojot tos plašam gamma spektrometriskās aparātūras (uz ĪTG detektoru pamata) klāstam (1.1. att.). EMD izmantošana dod priekšrocības, izveidojot ekspluatācijā ērtos portatīvos gamma spektrometrus. Tajā pašā laikā ĪTG spektrometru izstrāde uz EMD pamata rada kompleksus uzdevumus, ko nosaka ierobežota EMD dzesējošā jauda un vibrācijas, kas tiek pārraidītas no EMD. Neraugoties uz to, EMD priekšrocības, tādas kā gamma spektrometra gabarītu un svara samazināšana, ērtība un drošība lietošanā, iespēja uzstādīt ierīci cilvēkam bīstamajā vidē bez apkopes nepieciešamības un darbs jebkurā telpiskā stavoklī, ir neapstrīdama prioritāte, izstrādājot ĪTG gamma spektrometrus uz EMD pamata.



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

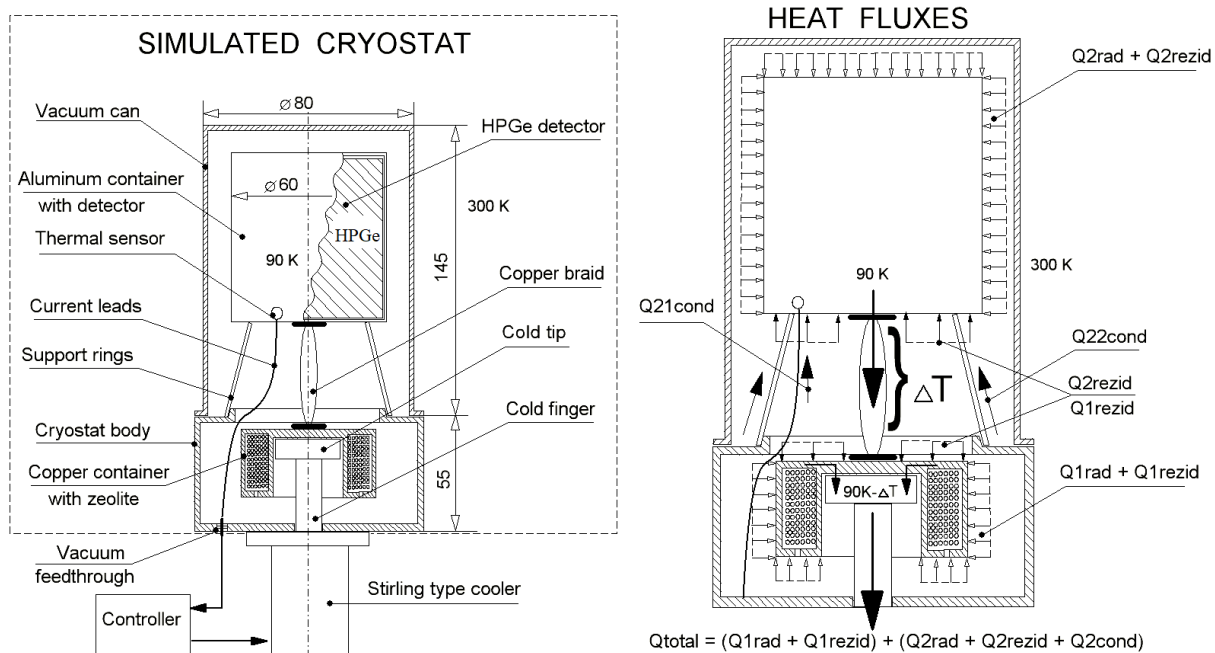
2. PĒTIJUMA UZDEVUMS

Darba **otrajā** un **trešajā nodaļā** aplūkoti un analizēti siltuma procesi un mehāniskās vibrācijas dinamiskajos procesos gamma spektrometru kriostatos ar EMD.

Viena no visasākajām problēmām kriostatos ar EMD ir to ierobežotā jauda, tāpēc kļūst aktuāls uzdevums saistībā ar siltuma pieplūdi no apkārtējās vides pie dzesējamā detektora (2.1.att.). Kriostata ar ĪTG detektoru siltuma pieplūdes struktūrā var būt izcelti trīs komponenti, kas attēloti 2.1. att. (2.1. tabula).

Otrajā un **trešajā** nodaļā aplūkoti tipveida konstrukcijas ar EMD kriostata fizikālie procesi. Galvenā uzmanība tiek pievērsta kriostata ar EMD darbībai raksturīgiem procesiem uz dinamisko gan siltuma, gan arī mehānisko modeļu pamata.

Atzīmēts, ka galvenie EMD vibrāciju avoti ir elektromagnētiskais kompresors un izplešanās caurulīte ar virzuli-izspiedēju [3], [4]. Parādīts, ka EMD darbība ar pazemināto jaudu samazina tā vibroaktivitāti vairāk par 40 % [5], [6]. Apskatītas kriostata ar ĪTG detektoru un EMD tipiskas konstrukcijas galvenās svārstību sistēmas, kuru mehāniskās svārstības izraisa mikrofonefektu [7], [8], kas ievērojami samazina gamma spektrometra enerģētisko izšķirtspēju. Parādīts plašs dažādas efektivitātes lietojamo detektoru diapazons, kas izvirza detektora tapņa balstu [9], [10] (2.4. att.) unificētā mezgla izstrādes papilduzdevumu. Pamatojoties uz EMD un lietojamo ĪTG detektoru analīzi, tiek piedāvāta parametriskā virkne (2.2. tabula). Analizētas iespējas un izstrādātas rekomendācijas elektromašīnu dzesētāju (EMD) vibrāciju negatīvās ietekmes samazināšanai (2.2. att.).



2.1. att. Siltuma pieplūdes komponenti kriostatā.

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

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

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_{2resid} – siltuma pieplūde pie detektora tapņa atliku gāzu vadītspējas dēļ;

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

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

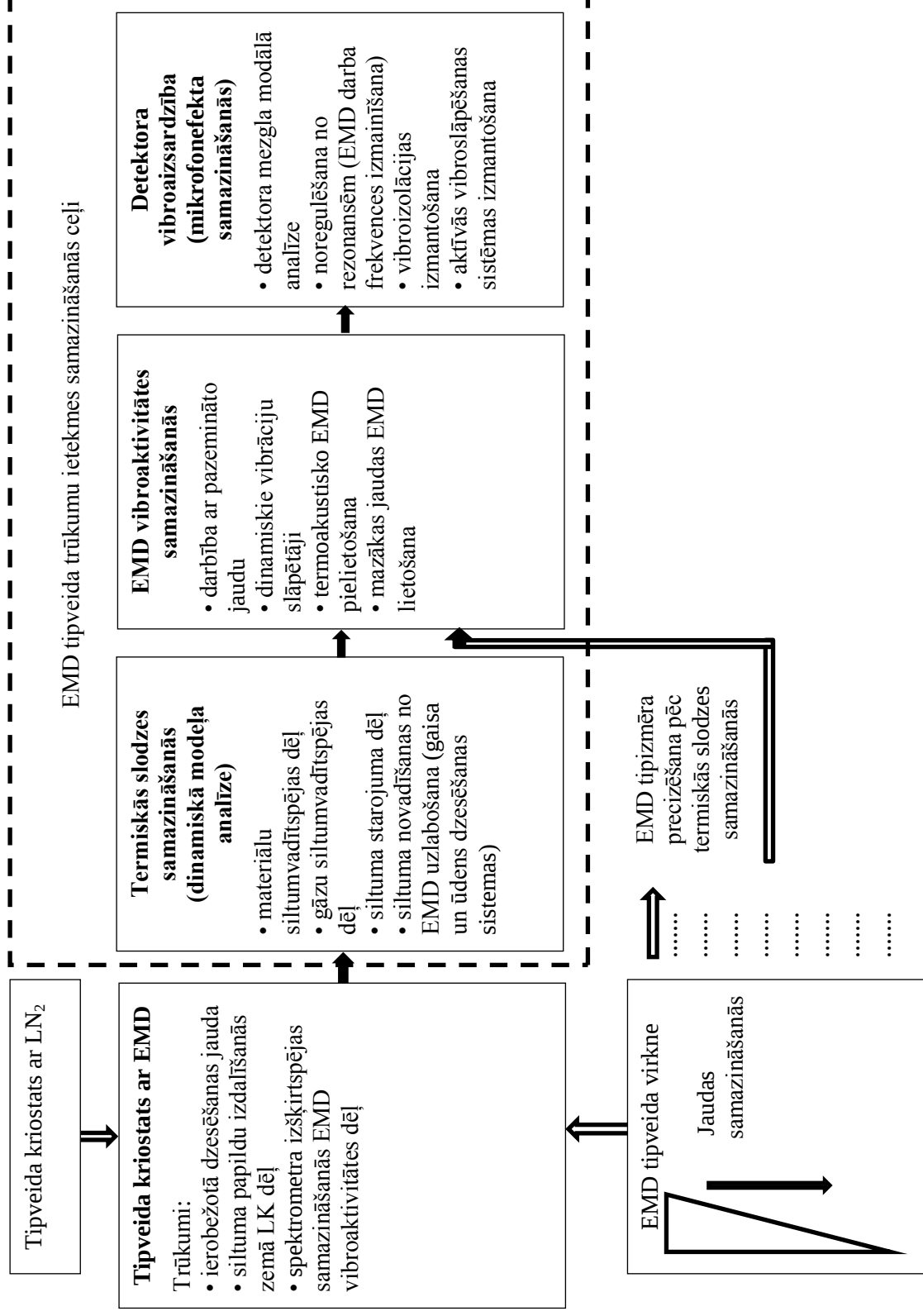
2.1. tabula

Siltuma pieplūdes komponenti

Nr.	Siltuma pieplūdes komponenti	Apzīmējums	Samazināšanas metodes
1	Materiālu siltumvadītspēja	Q_{22cond}	materiālu ar mazāku siltumvadītspēju lietošana; balstu konstruēšana ar pagarināto siltuma tiltiņu
2	Kriostata atliku gāzu siltumvadītspēja	Q_{1resid} ; Q_{2resid}	gāzu, kas ieplūst caur blīvējumiem, samazināšanās; atliku gāzu absorbcija ar geteriem
3	Siltuma starojums	Q_{1rad} ; Q_{2rad}	virsmas kvalitātes uzlabošana emisijas samazināšanās nolūkā; siltumekrānu lietošana

EMD-ĪTG detektora parametriskā virkne

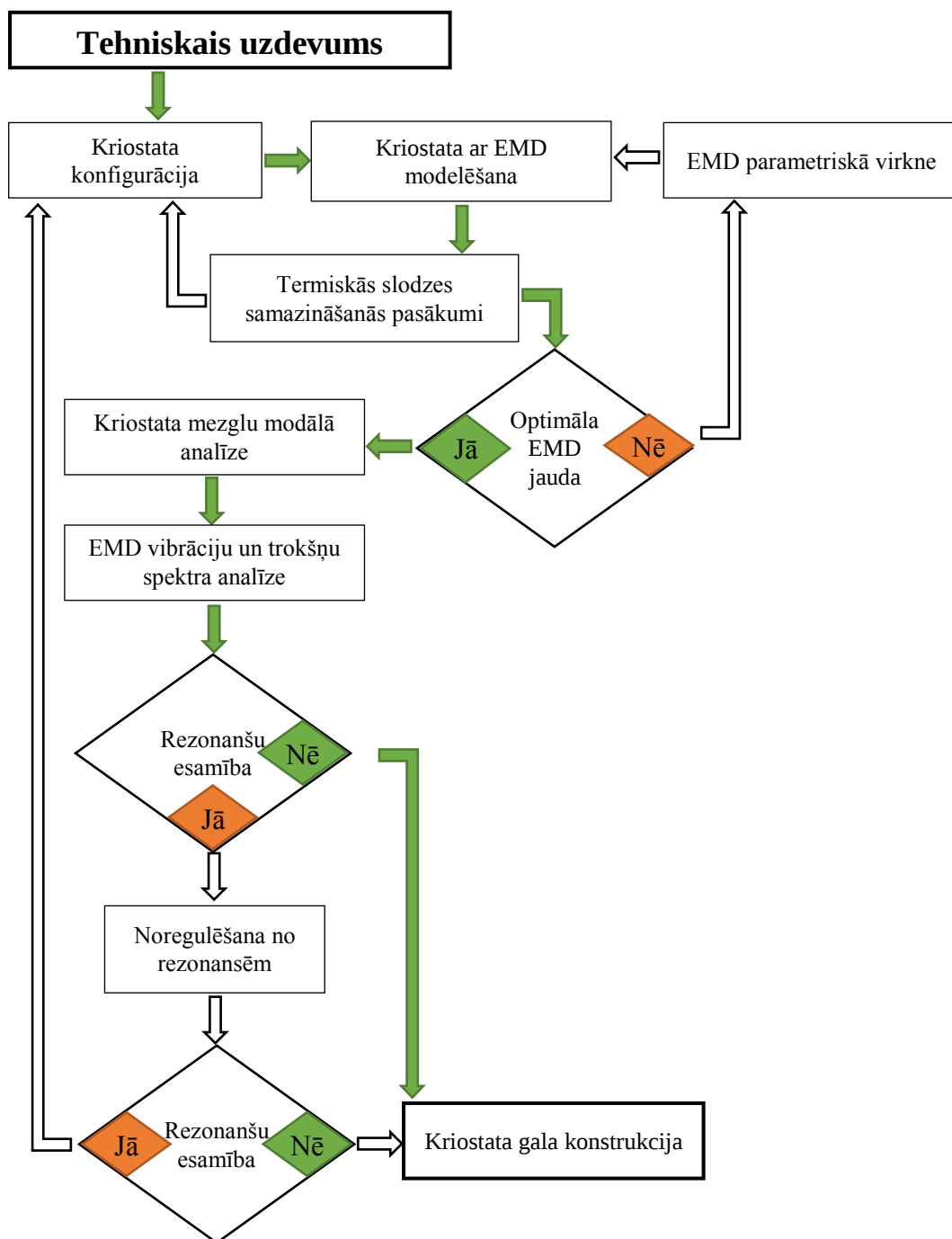
ĪTG detektoru parametri																							
Efektivitāte	10 %		15 %		20 %		30 %		40 %		50 %		60 %		80 %		100 %		125 %		160 %		
Ģeometrija, mm	Ø	H	Ø	H	Ø	H	Ø	H	Ø	H	Ø	H	Ø	H	Ø	H	Ø	H	Ø	H	Ø	H	
	52	31	52	43	54	50	59	55	63	61	70	55	71	70	78	72	83	80	88	88	92	90	
Tilpums, cm ³	65,8		91,3		114,5		150,3		190,1		21,6		277,0		343,9		432,6		535,0		598,0		
Masa, kg	0,35		0,49		0,61		0,80		1,01		1,13		1,47		1,83		2,30		2,85		3,18		
Integrālā termiskā masa, J/K	95		131		165		216		274		305		399		495		623		770		861		
Spektrometriskie moduļi ar EMD																							
EMD tips un jauda; kriostatā maksimāla siltuma pieplūde	Miniatūrveida EMD, 0,5–1,0 W@80K RICOR K508; THALES RM3				Mazas jaudas EMD, 1,0–2,0 W@80K RIKOR K570; AIM SF100 Kriostatā siltuma pieplūde ne vairāk par 0,5 W																		
					Vidējas jaudas EMD, 2,0–5,0 W@80K AIM SL400; THALES LSF9589 Kriostatā siltuma pieplūde ne vairāk par 1,5 W																		
					Lieljaudas EMD, 5,0–15,0 W@80K THALES LSF9340; LIHAN TC4187; LIHAN TC4189 Maksimālā kriostatā siltuma pieplūde ne vairāk par 4,0 W																		
					Spektrometriskie moduļi ar hibrīda dzesēšanu (LN ₂ + EMD)																		
					Lieljaudas EMD, 9,0–15,0 W@80K THALES LSF9340; LIHAN TC4189																		
EMD tips un jauda					Summārā siltuma pieplūde kriostatā un moduļa sašķidrīnātājā ne vairāk par 3,0 W																		



2.2. att. Elektromašīnu dzesēšanas tipveida trūkumu ietekmes samazināšanās ceļi.

3. KOMPLEKSĀ PIEEJA GAMMA SPEKTROMETRU KRIOSTATU AR EMD KONSTRUĒŠANAI

Ceturtajā nodaļā izstrādāts un aprakstīts tehniskais uzdevums bloku shēmas formā kompleksai pieejai gamma spektrometru kriostatu ar EMD konstruēšanai.



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

4. SILTUMA PROCESU MODELĒŠANA KRIOSTATOS AR EMD

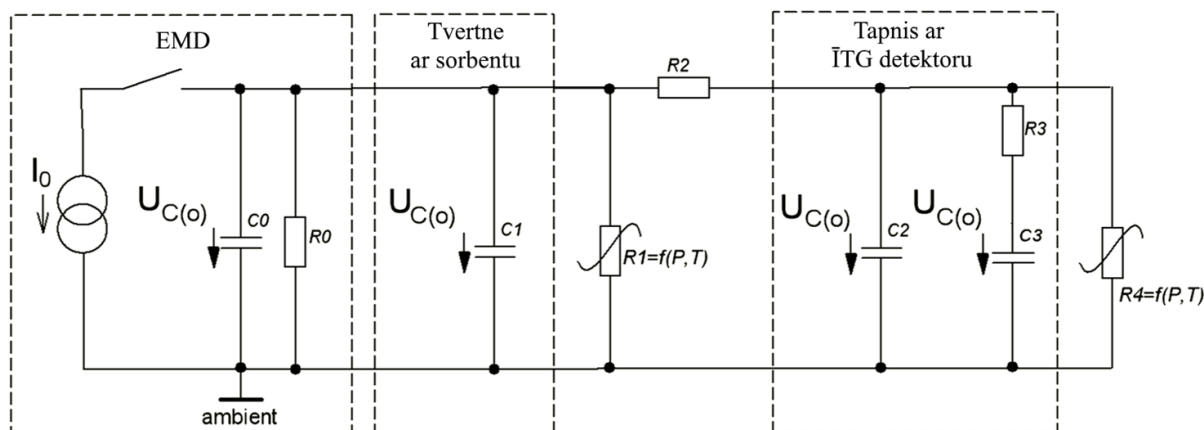
Piektajā nodaļā aplūkoti dinamiskie siltuma procesi kriostatos ar EMD. Izstrādāta metodika, veikti modelēšanas aprēķini ar datorprogrammu *MathCAD* un *Solidworks*, kā arī veikti eksperimenti siltuma procesu modelēšanai kriostatos ar EMD.

Izstrādāts kriostata ar EMD un siltumekrānu dinamiskais siltuma modelis, kas sastādīts ar termoelektrisko analogiju hipotēzes palīdzību (4.1. att.). Galvenās termoelektriskās analogijas ir minētas 4.1. tabulā. Modelis ļauj novērtēt galvenos siltuma procesus, kas ietekmē ĪTG detektora dzesēšanas ātrumu, kā arī var būt paredzēts daudz sarežģītāku modeļu kalibrēšanai un testēšanai, lai veiktu aprēķinus, izmantojot gala elementus.

4.1. tabula

Termoelektriskās analogijas

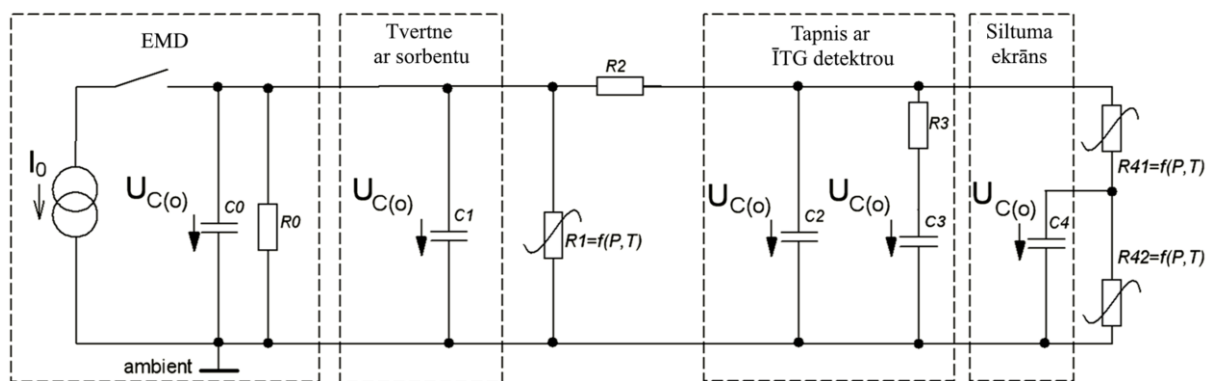
Siltuma parametri		Elektriskie parametri	
Siltuma plūsma	$P, (W)$	Strāva	$I, (A)$
Temperatūra	$\Theta, (K)$	Spriegums	$U, (V)$
Siltumpretestība	$R, (K/W)$	Pretestība	$R, (\Omega)$
Siltumietilpība	$C, (J/K)$	Kapacitāte	$C, (F)$



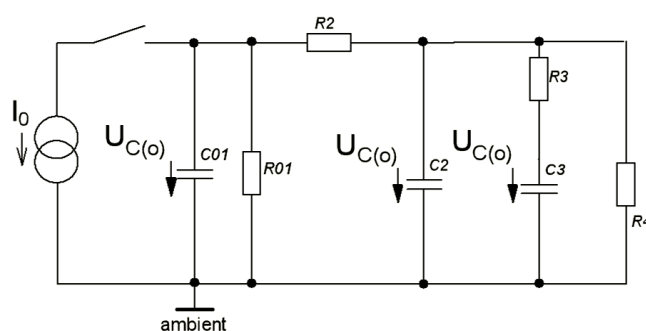
4.1. att. Ekvivalents termoelektriskais modelis kriostata ar EMD dzesēšanas procesa analīzei.

Izstrādāts modelis (4.2. att.), kas ļauj novērtēt pamatprocesus, kas ietekmē ĪTG dzesēšanas ātrumu, izmantojot siltumekrānu.

Sastādīti diferenciālie vienādojumi, kas ļauj aprēķināt ne tikai kriostata komponentu stacionārās temperatūras, bet arī to dzesēšanas procesa dinamiku. Iegūts analītiskais risinājums ar lineāriem raksturojumiem, kad kriostatā gāzes spiediens ir 10^{-2} mbar un augstāk.



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



4.3. att. Linearizēts ekvivalentais kriostata ar EMD modelis.

Modelim (4.3. att.) sastādīta vienādojumu sistēma:

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

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

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

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

$$I_0 = I_{C01} + I_{R01} + I_{C2} + I_{R4} + I_{C3}, \quad (4.1.)$$

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_{R4} – siltuma plūsma starp detektora tapni un ārējo vāku, W.

Veicot pārveidojumus no vienādojumu sistēmas (4.1.), iegūti trešās kārtas lineārie diferenciālvienādojumi, kas apraksta katra kriostata komponenta dzesēšanas procesu. Piemēram, 4.2. vienādojums, kas apraksta ĪTG detektora tapņa dzesēšanas procesu.

$$a_3 \frac{d^3 U_{C2}}{dt^3} + a_2 \frac{d^2 U_{C2}}{dt^2} + a_1 \frac{dU_{C2}}{dt} + a_0 U_{C2} = I_0, \quad (4.2.)$$

kur

$$a_3 = C_{01} C_2 C_3 R_2 R_3; \quad (4.2.1.)$$

$$a_2 = C_{01} \left[R_2 (C_2 + C_3) + C_3 R_3 \frac{R_2 + R_4}{R_4} \right] + C_2 C_3 R_3 \frac{R_2}{R_{01}} + C_2 C_3 R_3; \quad (4.2.2.)$$

$$a_1 = C_{01} \frac{R_2 + R_4}{R_4} + C_2 \frac{R_2}{R_{01}} + C_3 \frac{(R_{01} + R_2)(R_3 + R_4) + R_3 R_4}{R_{01} R_4}; \quad (4.2.3.)$$

$$a_0 = \frac{R_{01} + R_2 + R_4}{R_{01} R_4}. \quad (4.2.4.)$$

Kriostata komponentu kārtēja temperatūra dzesēšanas procesā:

$$U_{Ci}(t) = U_{Ci}(0) - (U_{Cist} + A_{i,1} e^{p_1 t} + A_{i,2} e^{p_2 t} + A_{i,3} e^{p_3 t}), \quad (4.3.)$$

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;

$p_1; p_2; p_3$ – pārejas procesa raksturīgā vienādojuma saknes;

$$A_{i,1} = \frac{U_i''(0) - U_i'(0)(p_3 + p_2) + (U_i(0) - U_{Cist})p_2 p_3}{(p_3 - p_1)(p_2 - p_1)}; \quad (4.4.)$$

$$A_{i,2} = \frac{-U_i''(0) + U_i'(0)(p_3 + p_1) - (U_i(0) - U_{Cist})p_1 p_3}{(p_3 - p_{21})(p_2 - p_1)}; \quad (4.5.)$$

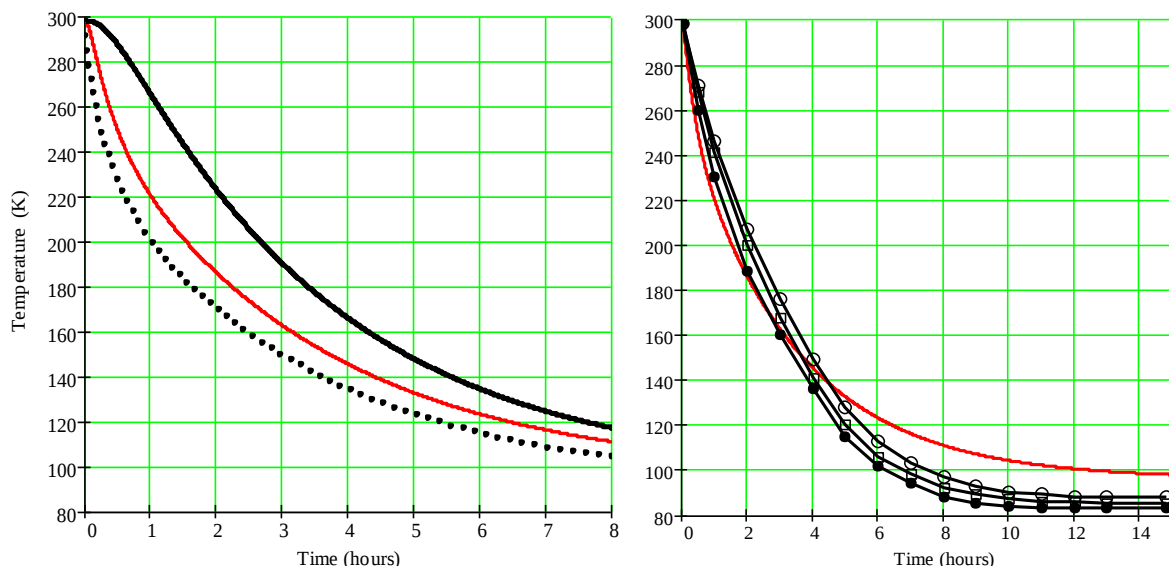
$$A_{i,3} = \frac{U_i''(0) - U_i'(0)(p_2 + p_1) + (U_i(0) - U_{Cist})p_1 p_2}{(p_3 - p_{21})(p_3 - p_1)}. \quad (4.6.)$$

Piedāvātais modelis tiks izmantots gamma spektrometra analīzei tā ĪTG detektora dzesēšanas procesa aprēķināšanai un verificēts ar eksperimentāli iegūto (4.4. att.). Aplūkojamais pārejas process tiek prezentēts kā triju eksponenciālo funkciju summa ar laika konstantēm (4.7.)–(4.9.).

$$\tau_1 = -\frac{1}{p_1} = 3,4 \text{ min}; \quad (4.7.)$$

$$\tau_2 = -\frac{1}{p_2} = 21,8 \text{ min}; \quad (4.8.)$$

$$\tau_3 = -\frac{1}{p_3} = 3,3 \text{ stundas}. \quad (4.9.)$$



4.4. 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).

Siltumekrāna (4.5. att.) efektivitātes novērtēšanai analizēta kriostata siltuma pieplūde. Vispārīgā gadījumā līdzsvara vienādojums ir:

$$Q_{23} + Q_{3\text{cond}} = Q_{31}, \quad (4.10.)$$

kur

$$Q_{23} = Q_{23\text{rad}} + Q_{23\text{resid}}, \quad Q_{31} = Q_{31\text{rad}} + Q_{31\text{resid}}, \quad (4.11.)$$

kur

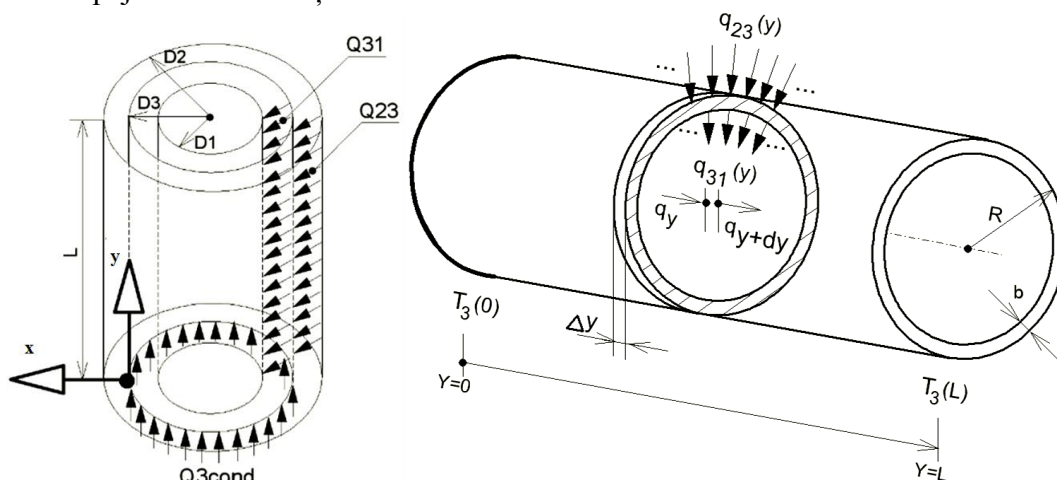
$Q_{3\text{cond}}$ – siltuma pieplūde uz siltumekrānu no ārējā vāka balstu siltumvadītspējas dēļ;

$Q_{23\text{rad}}$ – siltuma pieplūde uz siltumekrānu ārējā vāka siltuma starojuma dēļ;

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

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

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



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

Pamatojoties uz enerģētisko bilanci,

$$q_y + \Delta q_c = q_{y+\Delta y}, \quad (4.12.)$$

kur

$$\Delta q_c = \Delta q_{23\text{rad}} - \Delta q_{13\text{rad}} + \Delta q_{23\text{resid}} - \Delta q_{13\text{resid}}. \quad (4.13.)$$

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

$$-\frac{dq_y}{dy} - \frac{dq_c}{dy} = 0, \quad (4.14.)$$

kur

$$\begin{aligned} dq_c = & \varepsilon_{23} \cdot \sigma \cdot dS_{y,3}(T_2^4 - T^4) - \varepsilon_{13} \cdot \sigma \cdot dS_{y,1}(T^4 - T_1^4) \\ & + \alpha_{23} \cdot B \cdot p \cdot dS_{y,3}(T_2 - T) - \alpha_{13} \cdot B \cdot p \cdot dS_{y,1}(T - T_1); \end{aligned} \quad (4.15.)$$

$$\frac{dS_{y,3}}{dy} = P_3 = \pi D_3; \quad (4.16.)$$

$$\frac{dS_{y,1}}{dy} = P_1 = \pi D_1. \quad (4.17.)$$

Atbilstoši Furjē likumam, diferenciālvienādojums (4.14.) ir šāds:

$$\frac{d}{dy} \left[k(y) A(y) \frac{dT}{dy} \right] - \frac{dq_c}{dy} = 0. \quad (4.18.)$$

Ja siltumekrāna šķēluma laukums ir nemainīgs visā garumā, vienādojums (4.18.) kļūst par otrās kārtas diferenciālvienādojumu ar nemainīgiem koeficientiem:

$$k \cdot A \frac{d^2 T}{dy^2} - \frac{dq_c}{dy} = 0, \quad (4.19.)$$

kur

$$A = b \cdot P_3 \left(1 - \frac{b}{D_3} \right) = b \cdot \pi \cdot D_3 \left(1 - \frac{b}{D_3} \right). \quad (4.20.)$$

Ievietojot 4.15. izteiksmē 4.19., iegūts siltumekrāna virsmas temperatūras izmaiņšanas diferenciālvienādojums (4.21.).

$$\begin{aligned} \frac{d^2 T}{dy^2} - \frac{\varepsilon_{23} \cdot \sigma}{k \cdot b \left(1 - \frac{b}{D_3} \right)} (T_2^4 - T^4) + \frac{\varepsilon_{13} \cdot \sigma}{k \cdot b \left(1 - \frac{b}{D_3} \right)} \cdot \frac{D_1}{D_3} (T^4 - T_1^4) \\ - \frac{\alpha_{23} \cdot B \cdot p}{k \cdot b \cdot \left(1 - \frac{b}{D_3} \right)} (T_2 - T) + \frac{\alpha_{13} \cdot B \cdot p}{k \cdot b \cdot \left(1 - \frac{b}{D_3} \right)} \cdot \frac{D_1}{D_3} (T - T_1) = 0, \end{aligned} \quad (4.21.)$$

kur

$$\varepsilon_{23} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_{sh2}} + \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right) \frac{D_3}{D_2}}; \quad (4.22.)$$

$$\varepsilon_{13} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \left(\frac{1}{\varepsilon_{sh1}} - 1 \right) \frac{D_1}{D_3}}. \quad (4.23.)$$

Iegūtā diferenciālvienādojuma risinājuma robežnosacījumi ir šādi:

$$T_{y=0} = T_0; \quad (4.24.)$$

$$\frac{dT_{y=L}}{dy} = 0. \quad (4.25.)$$

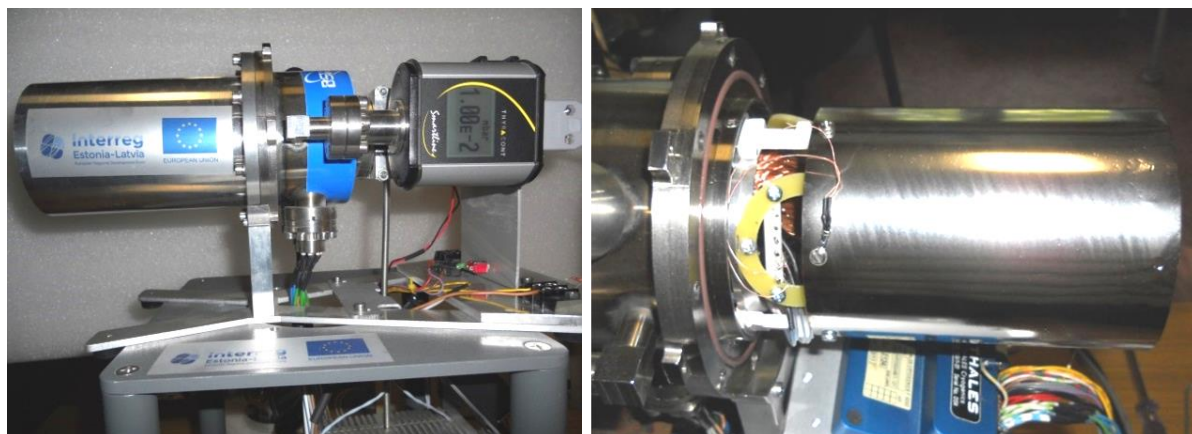
Stabilizējusies temperatūra noteikta no 4.23. vienādojuma ar nosacījumu:

$$\frac{d^2T}{dy^2} = 0 \quad \left(\text{jo } \frac{dq_c}{dy} = 0 \right). \quad (4.26.)$$

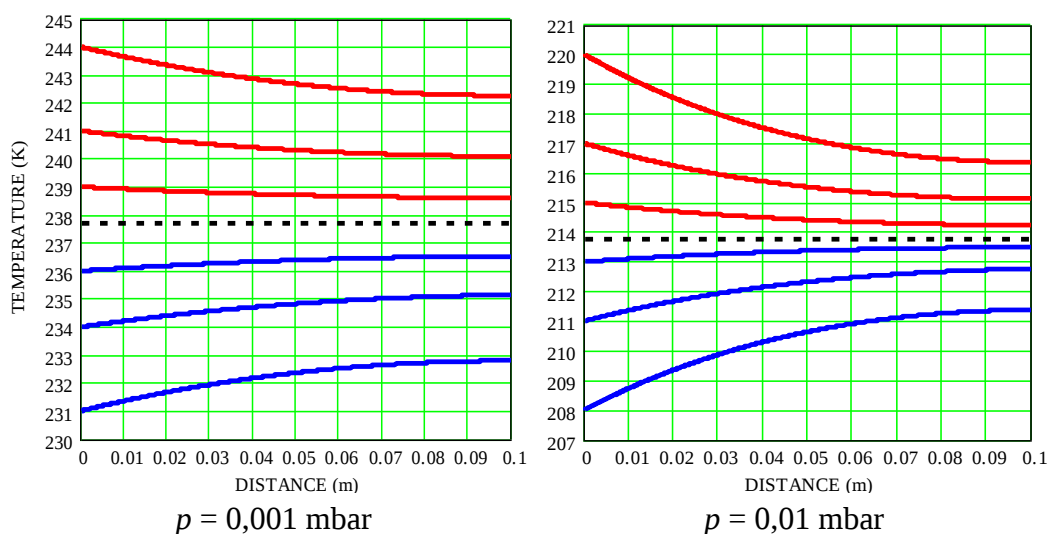
Tad diferenciālvienādojums (4.21.) pārvēršas par enerģētiskās bilances vienādojumu.

Eksperimentālajiem pētījumiem tika izstrādāts un izgatavots kriostats ar siltumekrānu, kas ir aprīkots ar temperatūras un spiediena devējiem (4.6. att.).

Tika sastādīts siltumekrāna aprēķina modelis uz klasiskās matemātikas diferenciālvienādojumu sistēmas hipotēžu bāzes, un aprēķināta temperatūras sadalīšanās uz detektora siltumekrāna (4.7. att.). Iegūti jauni rezultāti par efektīvo siltuma plūsmas samazināšanos uz detektora, izmantojot siltumekrānu (ne tikai augstā, bet arī vidējā vakuuma apvidū) (4.7.–4.12. att.).



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



4.7. att. Temperatūras sadalīšana uz nerūsējošā tērauda siltumekrāna (ar 0,5 mm biezumu) virsmas dažādām atlieku gāzu sākotnējām temperatūrām un spiedieniem.

Pamatojoties uz iegūtajiem vienādojumiem, kriostatam tika aprēķinātas siltuma pieplūdes komponentes balstu $Q_{3\text{cond}}$ siltumvadītspējas, siltuma starojuma $Q_{32\text{rad}}$ un $Q_{31\text{rad}}$ dēļ, kā arī atliku gāzu $Q_{32\text{resid}}$ un $Q_{31\text{resid}}$ molekulārās vadītspējas dēļ. 4.2. tabulā minētie dati ļauj novērtēt to attiecību un izstrādāt praktiskās rekomendācijas saistībā ar siltuma pieplūdes kriostatā samazināšanos. 4.3. tabulā minēti siltuma pieplūdes uz kriostatā dzesējamo detektoru lielumi (ja ir siltumekrāns, un ja tā nav). Aprēķini parāda siltuma pieplūdes samazināšanos 2–3 reizes, turklāt šī attiecība saglabājas, ja izmainās gāzu spiediens kriostatā plašās robežās.

Siltumekrāna temperatūras, kas ir aprēķinātas uz enerģētiskās bilances vienādojuma (4.26.) pamata, ir atzīmētas ar krustiņiem attēlā (4.11. att.).

4.2. tabula

Siltuma pieplūde kriostatā-prototipā, kad ir dažādi gāzes spiedieni

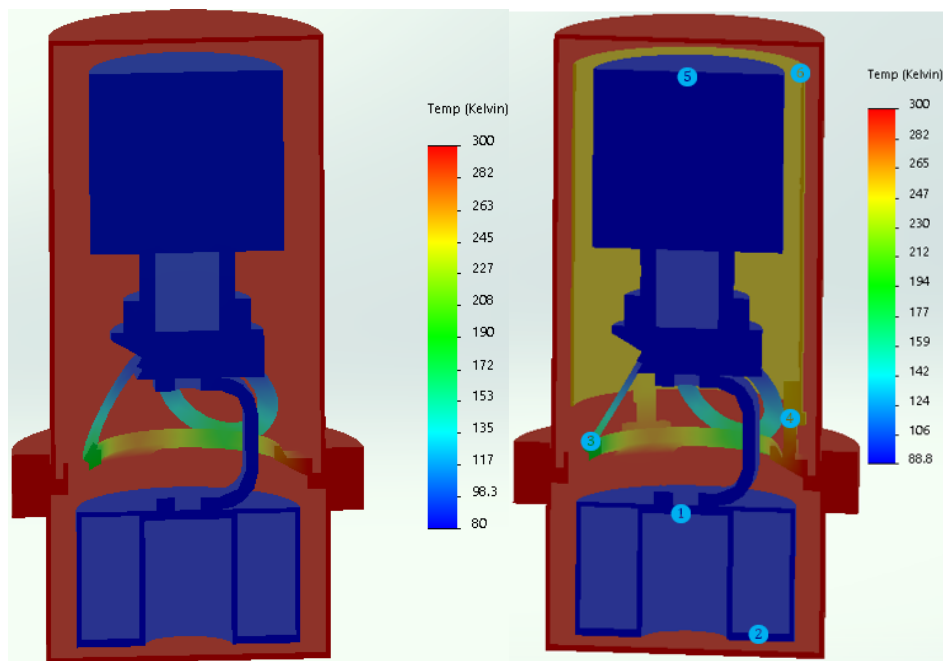
Spiediens, mbar	$T_{\text{siltumekrāns}}$ K	Siltuma pieplūde uz siltumekrānu no ārējā vāka				Siltuma pieplūde uz detektoru no siltumekrāna		
		$Q_{3\text{cond}}, \text{W}$	$Q_{32\text{rad}}, \text{W}$	$Q_{32\text{resid}}, \text{W}$	Q_{32_total}, W	$Q_{31\text{rad}}, \text{W}$	$Q_{31\text{resid}}, \text{W}$	Q_{31_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

4.3. tabula

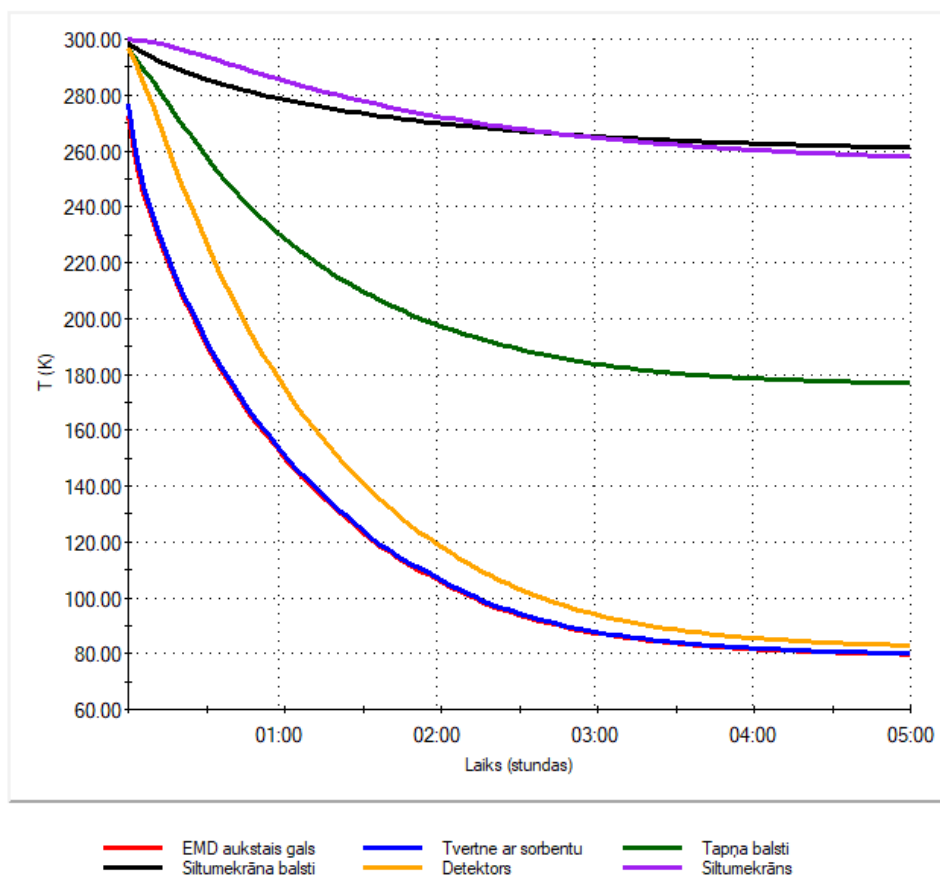
Siltumekrāna efektivitāte kriostatā, kad ir dažādi gāzes spiedieni

Spiediens, mbar	Siltuma pieplūde uz detektoru no siltumekrāna			Siltuma pieplūde uz siltumekrānu no ārējā vāka (bez siltumekrāna)			Ekrāna efektivitāte
	$Q_{31\text{rad}}, \text{W}$	$Q_{31\text{resid}}, \text{W}$	Q_{31_total}, W	$Q_{21\text{rad}}, \text{W}$	$Q_{21\text{resid}}, \text{W}$	Q_{21_total}, W	$Q_{21}/Q_{31}, \text{W}$
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

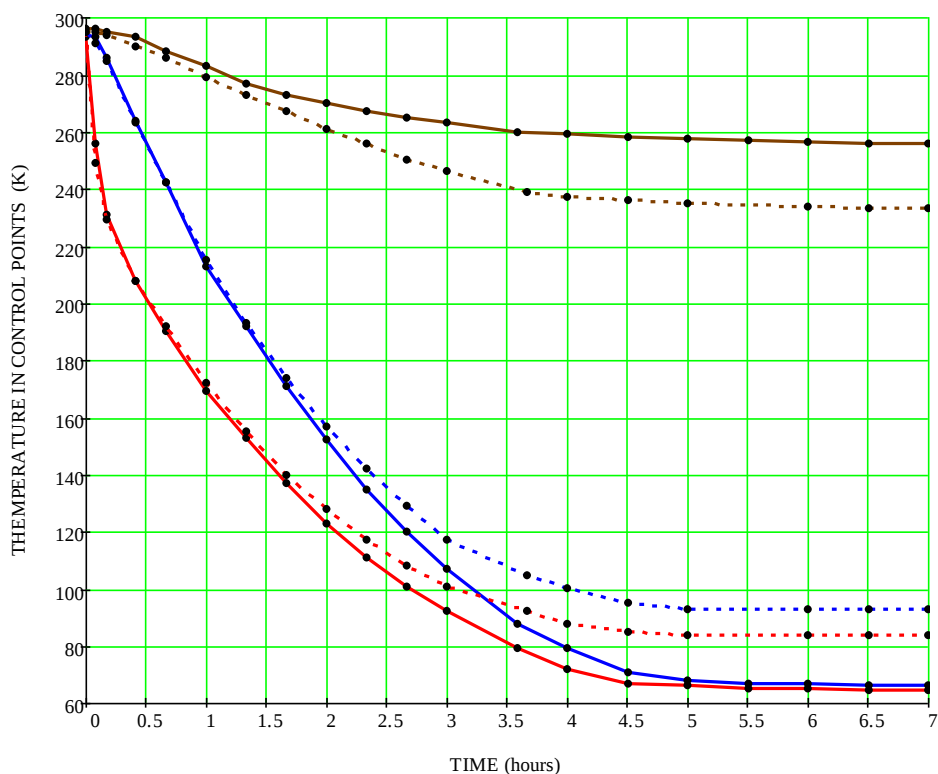
Solidworks vidē (4.8. att.) tika veikts kriostata dzesēšanas procesa novērtējums [11] (4.9. att.) un verificēts ar eksperimentāli iegūto (4.10. att.) reāla kriostata dzesēšanas laikā.



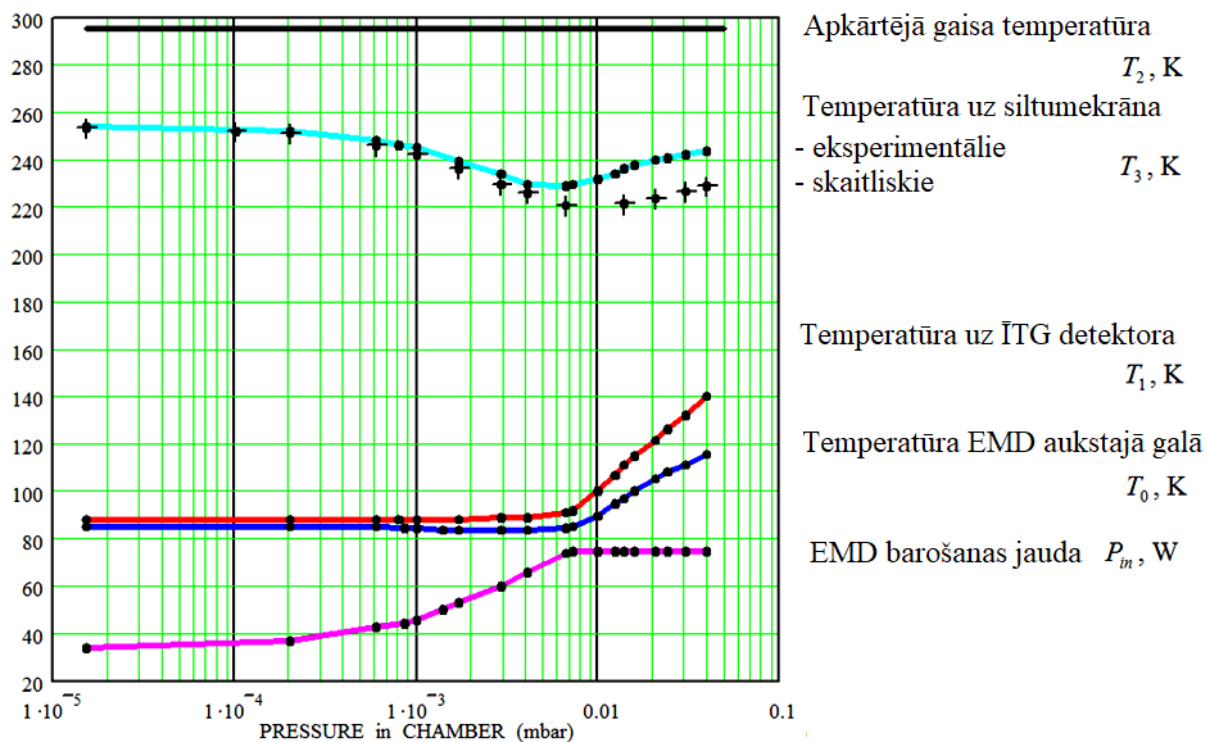
4.8. att. Temperatūru sadalīšana kriostatā (bez siltumekrāna (pa kreisi) un ar siltumekrānu (palabi)) dzesēšanas stāvoklī *Solidworks* vidē.



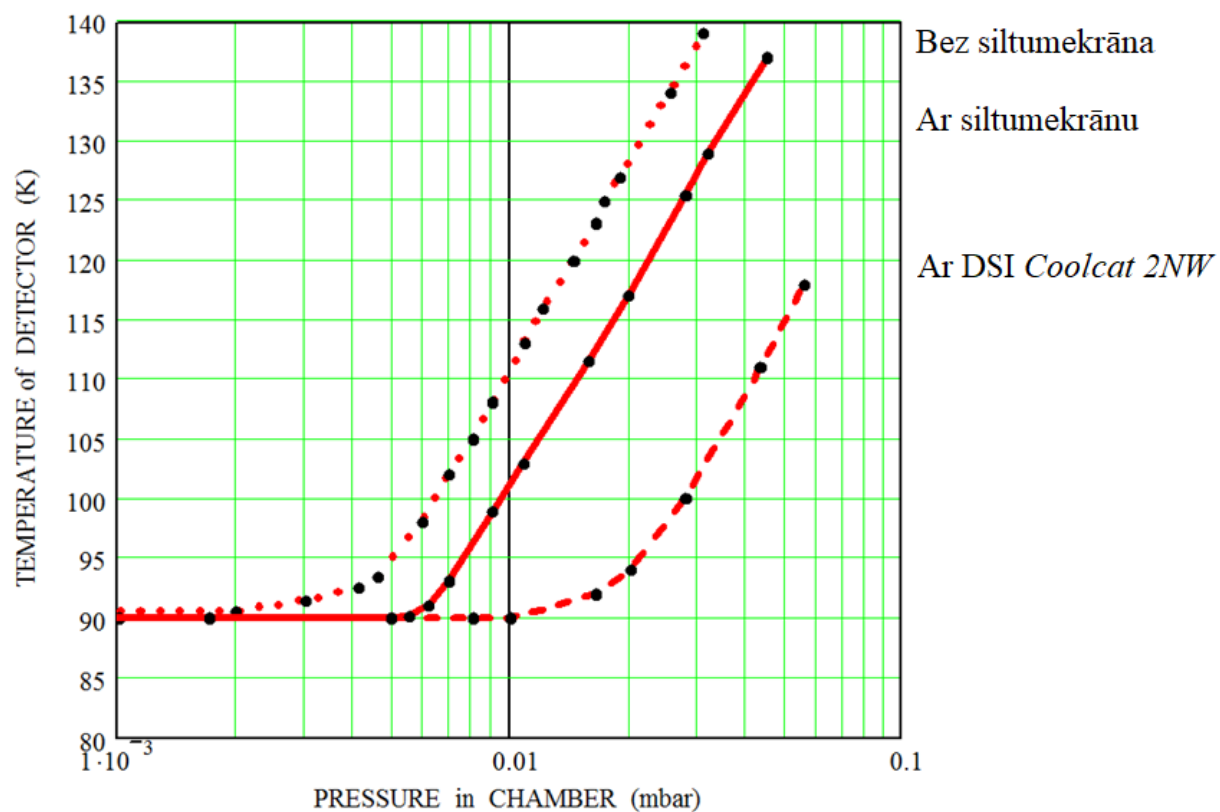
4.9. att. Kriostata sastāvdaļu dzesēšanas līknes.



4.10. 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.



4.11. att. Temperatūras un EMD ieejas jaudas izmaiņš dažādiem spiedieniem kriostata vakuuma kamerā.



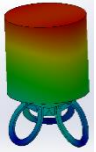
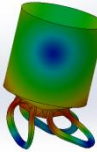
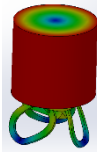
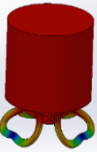
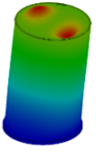
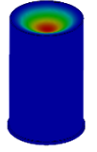
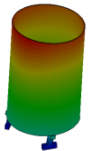
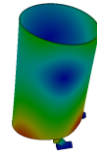
4.12. att. Detektora tapņa temperatūras izmaiņš dažādiem spiedieniem kriostata vakuuma kamerā bez siltumekrāna; ar siltumekrānu; ar daudzslāņaino izolāciju.

5. REZONANŠU NOVĒRTĒJUMS KRIOSTATĀ AR EMD

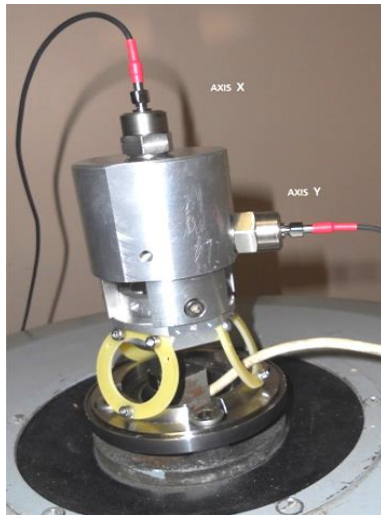
Sestajā darba nodaļā ar *Solidworks* programmas fundamentālo hipotēžu tīklojuma palīdzību tika veikta detektora balstu un detektora vāka modālā analīze. Sastādīta ĪTG gamma spektrometra kriostata svārstību pamatsistēmu pase mikrofonefekta avota diagnosticēšanai (5.1. tabula). Sekojot gamma spektrometra pasei, var noteikt mikrofonefekta avotu, pamatojoties uz priekšspastiprinātāja izejas signāla frekvenču spektra analīzi.

5.1. tabula

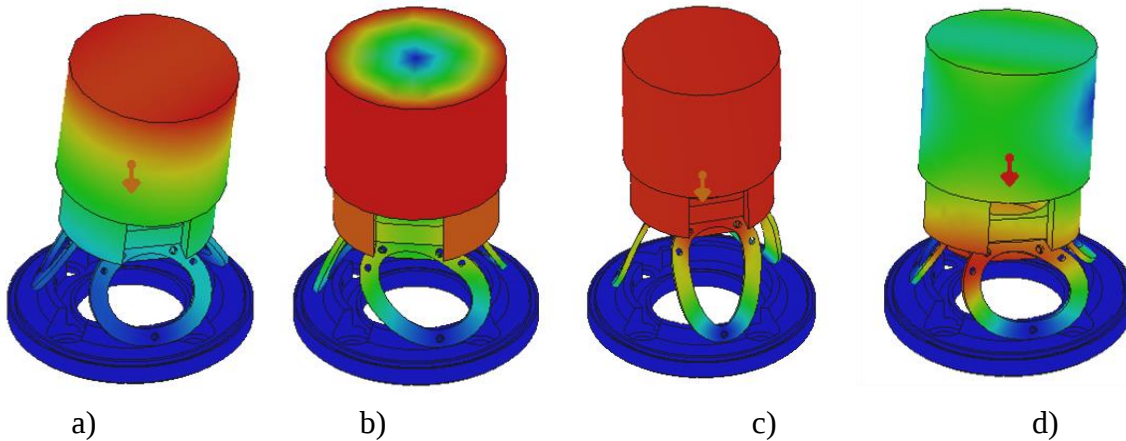
ĪTG gamma spektrometra kriostata pase

		Lieces moda	Lieces moda	Vērpes moda	Asu moda
Gredzenveida balsti	Moda				
	Frekvence	50 Hz	236 Hz	162 Hz	155 Hz
Detektora vāks	Moda				
	Frekvence	2379 Hz			1076 Hz
Siltumekrāns (1 mm)	Moda				
	Frekvence	161 Hz	643 Hz	264 Hz	735 Hz

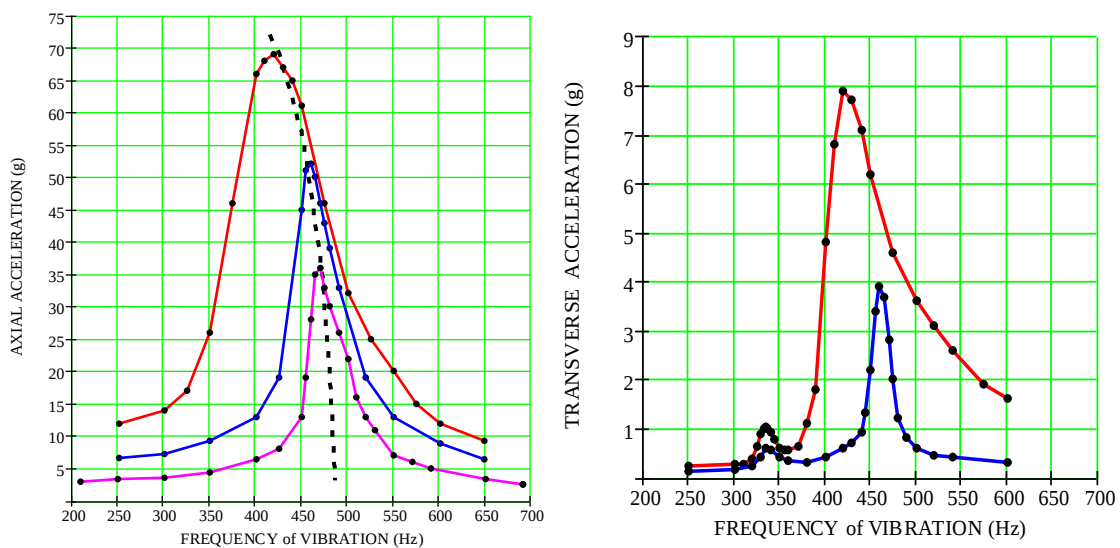
Teorētiskās hipotēzes par simulācijas rezultātu ticamību ir verificētas ar eksperimentālo pārbaudi, izmantojot elektrodinamisko vibroiekārtu *VB3-1-004* (5.1. att.). Iegūtas detektora tapņa balstu svārstību amplitūdas-frekvenču raksturlīknes (5.3. att.). Frekvenču diapazona novērtēšanai, kurā ir jāīsteno meklēšana, tika veikta iepriekšējā datorsimulēšana (5.2. att.). 5.3. attēlā parādīti detektora imitatora vibropaātrinājumu mērījumu rezultāti aksiālajā (vertikālajā) un transversālajā (horizontālajā) virzienā, ko ierosina vibrogalda iekārta *VB3-1-004*.



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

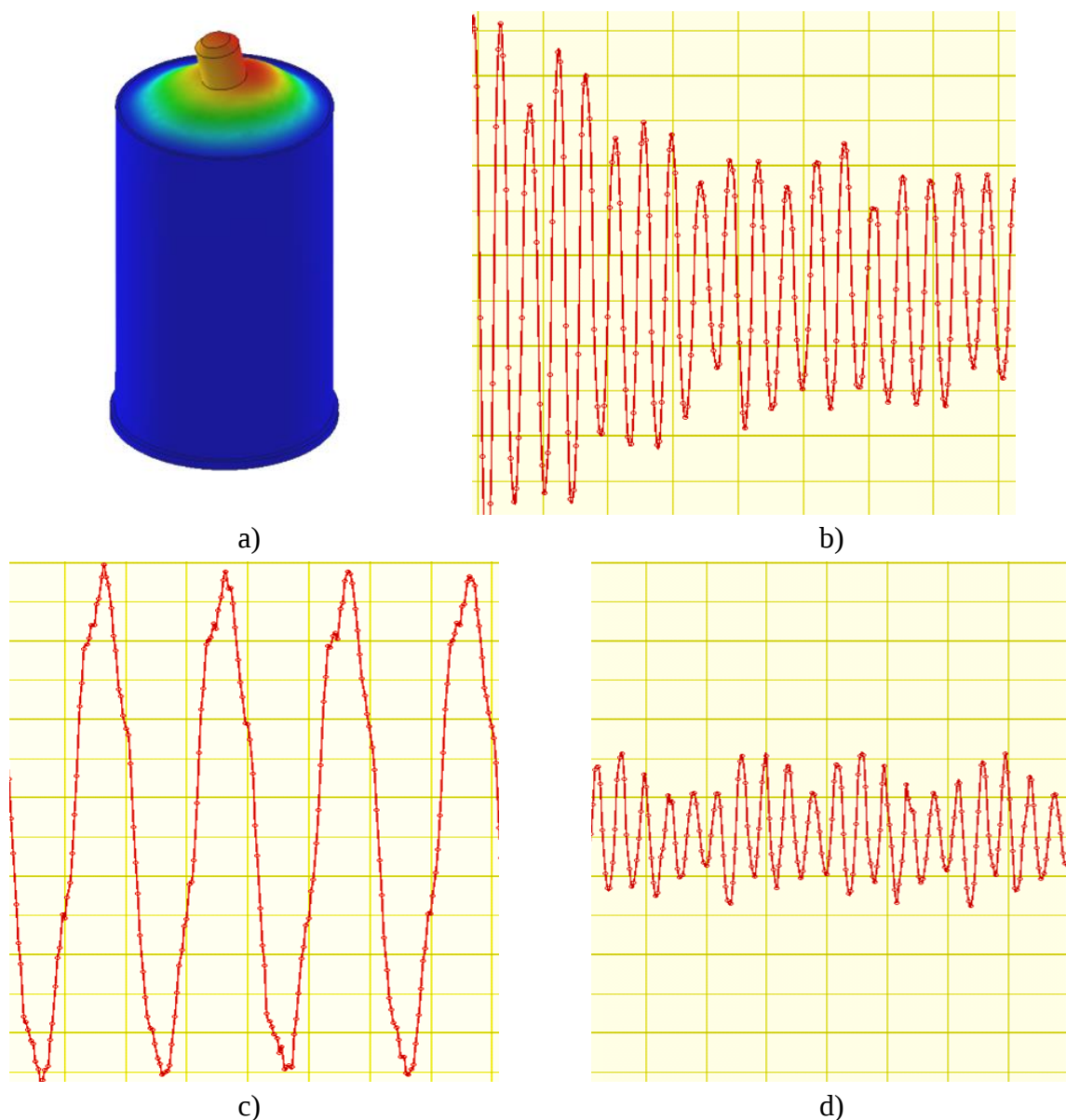


5.2. att. Detektora imitatora mezgla zemākās modas: a) un d) lieces; b) vērpes; c) aksiālā.



5.3. 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.

Detektora vāka svārstību zemākās modas frekvences eksperimentālai novērtēšanai uz *Monolith* gamma spektrometra ieejas loga tika uzstādīts akcelerometrs *ZETLab BC110* (5.4. att(a)) ar jutību 100 mV/g. Kad EMD bija izslēgts, ar pārbaudes āmuriņu tika ierosinātas brīvās vāka ar uzstādīto akcelerometru svārstības (5.4. att.).



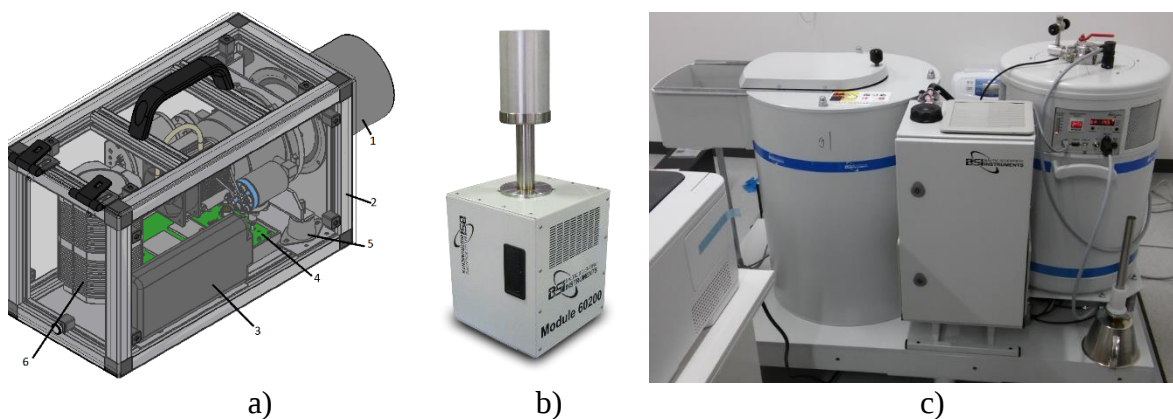
5.4. att. a) vāka modelis ar akcelerometru un vibropaātrinājumiem aksiālajā virzienā; b) brīvās rimstošās svārstības pēc triecienierosmes; frekvence – 465 Hz; c) uzspiestās svārstības uz EMD korpusa; darba frekvence – 100 Hz; d) uzspiestās svārstības uz vāka ieejas loga. Skala pēc y ass: 0,05 g/ied.,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

Eksperiments apstiprināja ne tikai datormodeļa un tā modālās analīzes rezultāta pareizību, bet arī detektora vāka rezonanses svārstību praktisko ierosmi. Vibrogrammas ir iegūtas ar uzstādīto akcelerometru uz detektora vāku. Bez akcelerometra svārstību modas atrodas augstāk par aplūkojamo frekvences diapazonu. Lai izslēgtu ietekmi uz akcelerometra masas rezonanses frekvenci, svārstību ierosme veikta ar akustisko metodi. Detektora vāka ar nostiprināto akcelerometru uz tā ieejas loga virsmas zemākās modas aprēķins ar *Solidworks* ir tuvs analītiski aprēķinātai vērtībai.

6. REZULTĀTU APROBĀCIJA

Rezultātu aprobācija un praktiskie lietojumi aprakstīti **septītajā nodaļā**. Modernizēti esošie un *Solidworks* vidē izstrādātie gamma spektrometru jauni kriostati ar EMD (6.1. att.).

Praktiskos rezultātus, kas tika iegūti darba izpildes laikā, izmantoti kompānijā “Baltic Scientific Instruments”, izstrādājot un ražojot 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” kompanijas ražošanas procesā.



6.1. att. a) portatīvs gamma spektrometrs *HandSPEC*; b) laboratorijas gamma spektrometrs *Monolith*; c) gamma spektrometrs *Nicole* ar hibrīda dzesēšanu.

7. 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 analogiju 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 *VB9-1-004*. Datorsimulēšanas rezultāti parādīja, 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] G. F. Knoll, Radiation Detection and Measurement, 3rd ed. New York, 2000.
- [2] S. T. Werrett, G. D. Peskett, G. Davey, T. W. Bradshaw, and J. Delderfield, "DEVELOPMENT OF A SMALL STIRLING CYCLE COOLER FOR SPACEFLIGHT APPLICATIONS," in Advances in Cryogenic Engineering, 1986.
- [3] 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.
- [4] A. Veprik, S. Riabzev, N. Avishay, D. Oster, and A. Tuitto, "Linear cryogenic coolers for HOT infrared detectors," p. 83531V–83531V–11, 2012.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] O. Jakovļevs, V. Malgin, and J. Vība, "Modal analysis of HPGe detector assembly in gamma-ray spectrometers," vol. 1, pp. 61–66, 2017.
- [11] M. Wolf et al., "Temperature Distribution Study of Composite Germanium Detector," pp. 2–5.