



EIROPAS SAVIENĪBA IEGULDĪJUMS TAVĀ NĀKOTNĒ



EIROPAS REĢIONĀLĀS  
ATTĪSTĪBAS FONDS

Projekts (vienošanās Nr. 2010/0242/2DP/2.1.1.1.0/10/APIA/VIAA/036)

## **„Jauna tehnoloģija magnētiskā lauka un tā gradienta mērīšanai izmantojot nanostrukturētu atomārās gāzes vidi”**

Jauna tehnoloģija magnētiskā lauka mērīšanai ar nanoizmēra izšķirtspēju un prototipa  
iekārta

Aktivitāte 1.4.

### **„Prototipa iekārtas izveide”**

Aktivitātes periods: 01.04.2012.-31.12.2013.

**Apstiprinu:**

**Vjačeslavs Kaščejevs**  
(Projekta padomes priekšsēdētājs)

**Apstiprinu:**

**Ruvins Ferbers**  
(Zinātniskais vadītājs)

**Rīga, 2014.g. janvāris**

## Aktivitāte 1.4: Prototipa iekārtas izveide

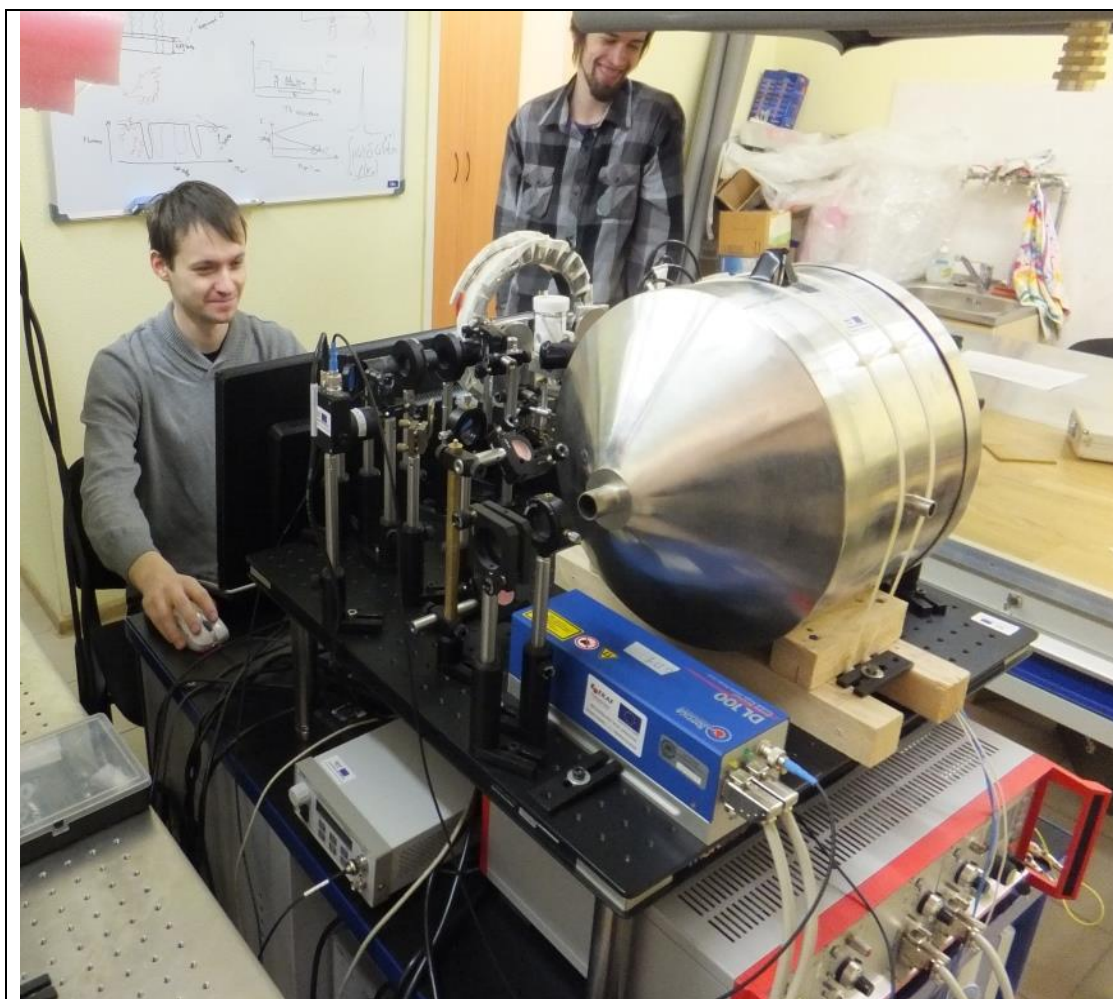
### Ievads

Pēc tam, kad tika iegūta pieredze magnetooptisko signālu mērīšanā un magnētiskā lauka un tā gradienta noteikšanā izmantojot laboratorijas iekārtu (1.1.aktivitāte) un magnētiskā lauka gradienta mērīšanas moduli (1.2.aktivitāte), tikai izstrādāta un izveidota prototipa iekārta magnētiskā lauka un tā gradienta mērīšanai.

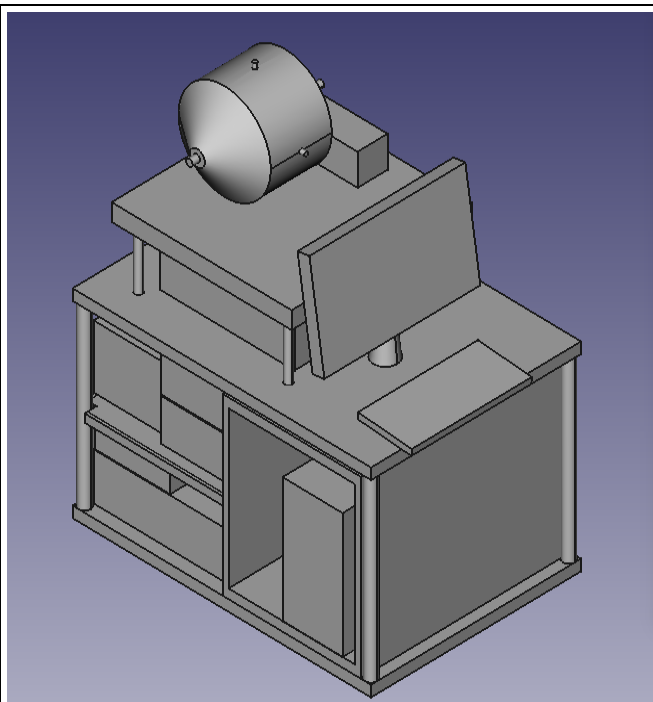
### Prototipa ratiņi

Prototips tika projektēts kā darba stacija, kas bija pārvietojama uz riteņiem, lai būtu iespējams mērīt magnētisko lauku dažādās vietās pēc nepieciešamības (sk. 1.attēlā). Šāds risinājums ļāva arī pārvietot prototipu pie dažādām lāzeru iekārtām, lai izmantotu dažādus lāzera starojuma avotus. Konkursa kārtībā tika iegādāta darba stacijas bāze, kas ir stabila tērauda konstrukcija ar darba virsmu no 10 mm bieza MDF ar četriem riteņiem, no kuriem divi ir grozāmi un nobremzējami. Dimensijas ir 1060 mm (garumā) x 700 mm (dziļumā) x 875 mm (augstumā). Apakšējā bāzes daļa sadalīta divās pusēs - vienā pusē izveidoti tērauda plaukti, otrajā - slēdzams skapītis.

Lai plānotu darba stacijas tilpuma optimālāku izlietojumu, tika izveidots prototipa iekārtas trīsdimensiju modelis ar galvenajām iekārtas komponentēm, izmantojot atvērtā koda programmatūru *FreeCAD*. Izstrādātais modelis ir redzams 2. attēlā. Plaukti tika atvēlēti elektroniskajām iekārtām, vadības bloks tika ievietots skapītī. Lai savienotu vadības bloku ar grafisko lietotāju interfeisu, bija nepieciešamas izurbt caurumus darba stacijas bāzē. Optikas elementu novietošanai tikai izveidota papildus optiskā darba virsma. Optiskā darba virsma arī tika iegādāta konkursa kārtībā un tā veidota no 25 mm bieza alumīnija lamināta ar šūnveida kodolu. Tāda konstrukcija nodrošina pilnīgi nemagnētisku darba virsmu, kas turklāt ir izturīga, un kuras dimensijas ir stabilas attiecībā pret temperatūras izmaiņām. Uz alumīnija virsmas izveidoti M6 caurumi ar 25 mm režģi. Kopējie optiskās darba virsmas izmēri ir 600 mm x 600 mm. Uz optiskās darba virsmas novietots arī magnētiskais ekrāns un lāzers. Virsma tika uzstādīta tuvāk vienai darba stacijas pusei, lai atstātu vietu grafiskā lietotāja interfeisa ekrānam un klaviatūrai. Nokomplektētā prototipa iekārta ir redzama 1. – 5. attēlā. Iekārta redzama ar operatoru 1.attēlā, no aizmugures 3.attēlā, bet 4.attēlā ir nofotografēts grafiskais lietotāja interfeiss. Savukārt, 5.attēlā redzama optiskā darba virsma ar optisko sistēmu.



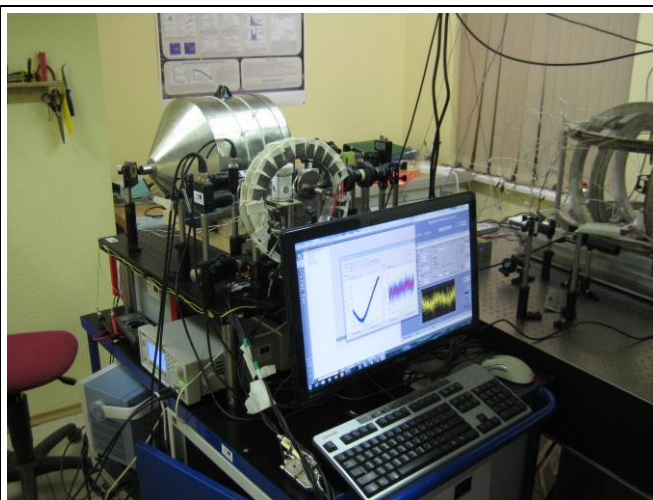
**1.attēls.** Prototips ar operatoru.



**2.attēls.** Prototipa komponentu izvietojums uz darba stacijas.



**3.attēls.** Prototipa iekārta laboratorijā.



**4.attēls.** Prototipa iekārtas grafiskais lietotāja interfeiss.



**5.attēls.** Prototipa iekārtas optiskā darba virsma ar nokomplektētām optiskajām komponentēm.

## Optiskā sistēma

Optiskā sistēma (shematiski attēlotā 6.attēlā) ir prototipa iekārtas svarīgākā sastāvdaļa, jo magnētiskā lauka un tā gradienta noteikšanai tiek izmantoti magnetooptiski efekti nanostrukturētā atomāras gāzes vidē. Līdz ar to, jānodrošina sekojošas galvenās komponentes:

- nanostrukturēts atomāras gāzes slānis;

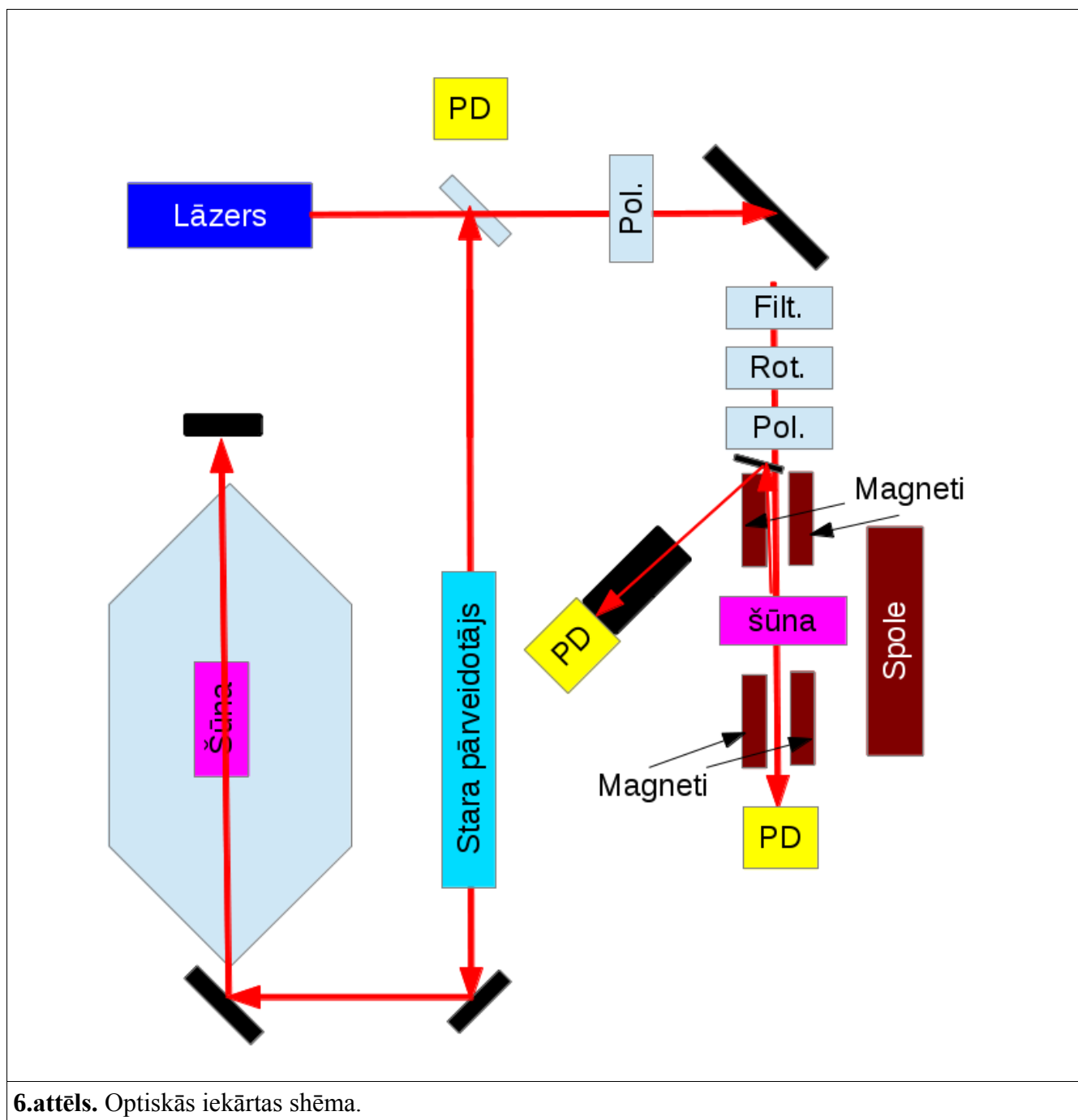
- stabils lāzera starojuma avots;
- lāzera starojuma formēšanas un polarizācijas optika;
- lāzera starojuma detektēšanas iekārtas.

Nanostrukturētu atomāras gāzes slāni nodrošina nanoizmēru šūna ar cēzija pildījumu, kas jau tika detalizēti aprakstīta iepriekšējo aktivitāšu (aktivitāte 1.2.) atskaitēs. Īsumā, šūna sastāv no diviem safīra kristāliem, kas ir savienoti ķīļveidīgi tā, lai attālums starp kristāliem mainītos no dažiem desmitiem nanometru līdz vairākiem tūkstošiem nanometru. Kristālu malas ir aizlīmētas, lai iekšā nodrošinātu vakuumu. Pie vakuuma kameras pielīmēta stikla caurulīte ar cēzija atomiem, kuri ieplūst starpkristālu telpā, kad caurulīte tiek sildīta.

Lāzeru starojuma avotam ir jānodrošina koherents starojums ar viļņu garumu, kas atbilst vienai no cēzija atrodamām enerģijas līmeņu pārējām. Prototips tika izstrādāts, izmantojot cēzija  $D_1$  pāreju  $F_g=4 \rightarrow F_e=3$ , bet, mainot lāzeru, varētu tikt izmantotas arī citas pārējas. Lāzera starojuma avots, kas izmantots prototipā, ir DFB (“distributed feedback”) tipa lāzers, kas nodrošina stabilu starojumu ar skenējamu viļņu garumu. Kaut arī lāzera temperatūra tiek stabilizēta, lāzera izstarotā starojuma viļņa garums var mainīties laikā. Līdz ar to, ir vajadzīga papildus stabilizēšana. To nodrošina piesātināšanas absorbcijas iekārta. Šī tehnika balstās uz faktu, ka pāreju enerģijas vērtības atomos nav atkarīgas no temperatūras vai citiem grūti kontrolējamiem parametriem, bet ir konstantas. Līdz ar to, tiek fiksēta spektroskopijas aina atsevišķā stikla šūnā ar cēzija atomu pildījumu, un lāzers tiek aktīvi stabilizēts uz vienu no spektra pīķiem. Stabilizēšanu veic *Digilok* iekārta, kas ir atsevišķa elektroniskā iekārta, kuras pamatā ir programmējama FPGA mikroshēma ar programmatūras interfeisu (detalizēti aprakstīts iepriekšējā atskaitē, aktivitāte 2.2.). Piesātināšanas absorbcijas šūna ir ievietota magnētiskā ekrānā, kas tiks aprakstīts tālāk.

Lāzera starojumam ir vajadzīgas konkrētas īpašības, kuras tika izpētītas ar laboratorijas iekārtu (aktivitāte 1.1.) un magnētiskā lauka gradienta mērīšanas moduļi (aktivitāte 1.2.). Starp parametriem ir stara izmēri, stara intensitātes sadalījums, kopīgā stara intensitāte, un starta polarizācija. Lai nodrošinātu vajadzīgos parametrus, tiek izmantotas ahromātiskas prizmas, lēcas, stara pārveidotājs, filtri, un polarizatori.

Signālus reģistrē ar fotodiodēm, kas nepieciešamas, lai uzņemtu piesātināšanas absorbcijas signālus, reģistrējot lāzera stara intensitāti pēc šūnas (neabsorbētā lāzera stara daļa) un lāzera stara intensitāti, kas tiek atstarota no šūnas. Pateicoties interferencei starp stariem, kas atstarojas no šūnas sienām, atstarotā stara intensitāte sniedz informāciju par šūnas biezumu tajā vietā, kur lāzera stars šķērso šūnu.

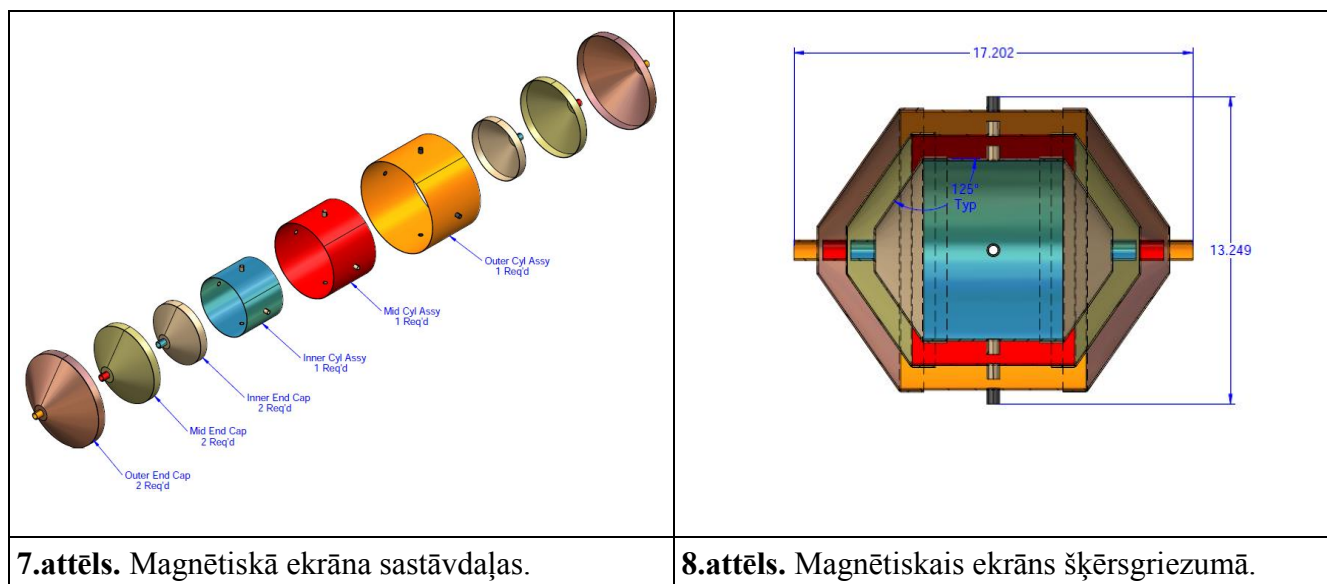


6.attēls. Optiskās iekārtas shēma.

### Magnētiskais ekrāns

Lai mērītu magnētisko lauku, ir nepieciešama stabila lāzera frekvence (viļņa garums). Tāda stabilā lāzera frekvence tiek nodrošināta, izmantojot atgriezenisko saiti ar piesātināšanas absorbcijas spektroskopijas iekārtu. Šāda shēma ir stabila, jo spektrālās līnijas, ko var mērīt ar piesātināšanas absorbcijas spektroskopijas iekārtu, nosaka atoma īpašības, kas nav atkarīgas no temperatūras, spiediena, vai citiem grūti kontrolējamiem parametriem. Tomēr tās ir atkarīgas no magnētiskā lauka, un tās principā var mainīt, atkarībā no tā, kur šis prototips tiek izmantots. Turklāt, prototipa darbības gaitā ar indukcijas spolēm tiek radīti mainīgi magnētiskie lauki, lai veiktu kalibrāciju. Līdz ar to, nepieciešams ekranēt piesātināšanas absorbcijas iekārtas šūnu (kas bija atsevišķa, parasta stikla šūna)

no ārējiem magnētiskajiem laukiem. Iepriekšējo aktivitāšu gaitā tika iegādāts un testēts magnētiskais ekrāns, kas sastāv no 3 slāņiem. Ekrāna slāņu sastāvdaļas ir attēlotas atsevišķi 7. attēlā, un magnētiskā ekrāna šķēsgriezums ir parādīts 8. attēlā. Ekrāns ir skaidri redzams fotografijās (1., 3., 4. un 5. attēlā) kā metālu cilindrs ar konusa veida galiem. Katrs slānis spēj samazināt magnētisko lauku apmēram 30 reizes. Līdz ar to, pat ja ārējais magnētiskais lauks ir 100 Gausi, spoļu iekšpusē lauks ir mazāks par 4 mG, kas ir pietiekoši mazs lauks, lai neietekmētu lāzera frekvences noteikšanu.



### Magnētiskā lauka un tā gradienta mērīšanas procedūra

Izmantojot laboratorijas iekārtu (aktivitāte 1.1) un magnētiskā lauka gradienta mērīšanas moduli (aktivitāte 1.2), tika izvērtētas dažādas magnētiskā lauka mērīšanas metodes. Sākotnējie rezultāti, kas iegūti ar laboratorijas iekārtu, deva iespēju mērīt magnētisko lauku izmantojot optiskās-radiofrekvences dubultās rezonanses. Šī metode ir ļoti ērta, jo tiek pievadīts radiofrekvences lauks, kura frekvence tiek mainīta. Kad frekvence atbilst magnētiskajam laukam, parādās rezonanses signāls. Radiofrekvences vērtība nosaka magnētiskā lauka vērtību, un nav vajadzīga iekārtas kalibrācija. Tomēr, veicot eksperimentus ar magnētiskā lauka gradienta mērīšanas moduli (aktivitāte 1.2), beigās tika secināts, ka nanoizmēru šūnā relaksācijas laiks ir pārāk īss, lai ļautu ērti izmantot optisko-radiofrekvences metodi. Līdz ar to, tika izstrādāta magnētiskā lauka mērīšanas metode, kas balstīta uz magnetooptiskām rezonansēm, un tas tika detalizēti izpētīts gan ar laboratorijas iekārtu (aktivitāte 1.1), gan ar magnētiskā lauka gradienta mērīšanas moduli (aktivitāte 1.2). Metodes galvenie soļi ir sekojoši:

1. Jāveic šūnas kalibrācija, tas ir, jāuzņem signāla atkarība no zināma magnētiskā lauka;
2. Jāreģistrē signāls, lēni mainot šūnas pozīciju ar pjezo galdiņa palīdzību;
3. Jāaprēķina magnētiskais lauks.

Šūnas kalibrācijas veikšanai ir nepieciešams skenēt kādu zināmu magnētisko lauku, vienlaikus reģistrējot signālu. Tādēļ tika izveidota papildus indukcijas spole un novietota uz optiskās darba virsmas netālu no nanoizmēru šūnas. Izmantojot bipolāro strāvas avotu, tika skenēta strāva, kas plūst caur spoli, un tika reģistrēts signāls. No strāvas vērtībām un no iepriekš pētītās magnetooptisko signālu formas var noteikt magnētiskā lauka vērtību katram skena punktam un saistīt katru reģistrētu signālu ar magnētisko lauku. Signāls šeit nozīmē lāzera starojumu, kas tiek reģistrēts pēc šūnas, jo netika absorbēts šūnā. No šiem datiem tiek rēķināta kalibrācijas līkne, kas saista katru signālu ar magnētiskā lauka vērtību. Tagad, mērot kādu signālu, var rēķināt nezināmu magnētisko lauka vērtības.

Lai mērītu magnētiskā lauka gradientu, ir jāmēra magnētiskais lauks vismaz divās vietās ar

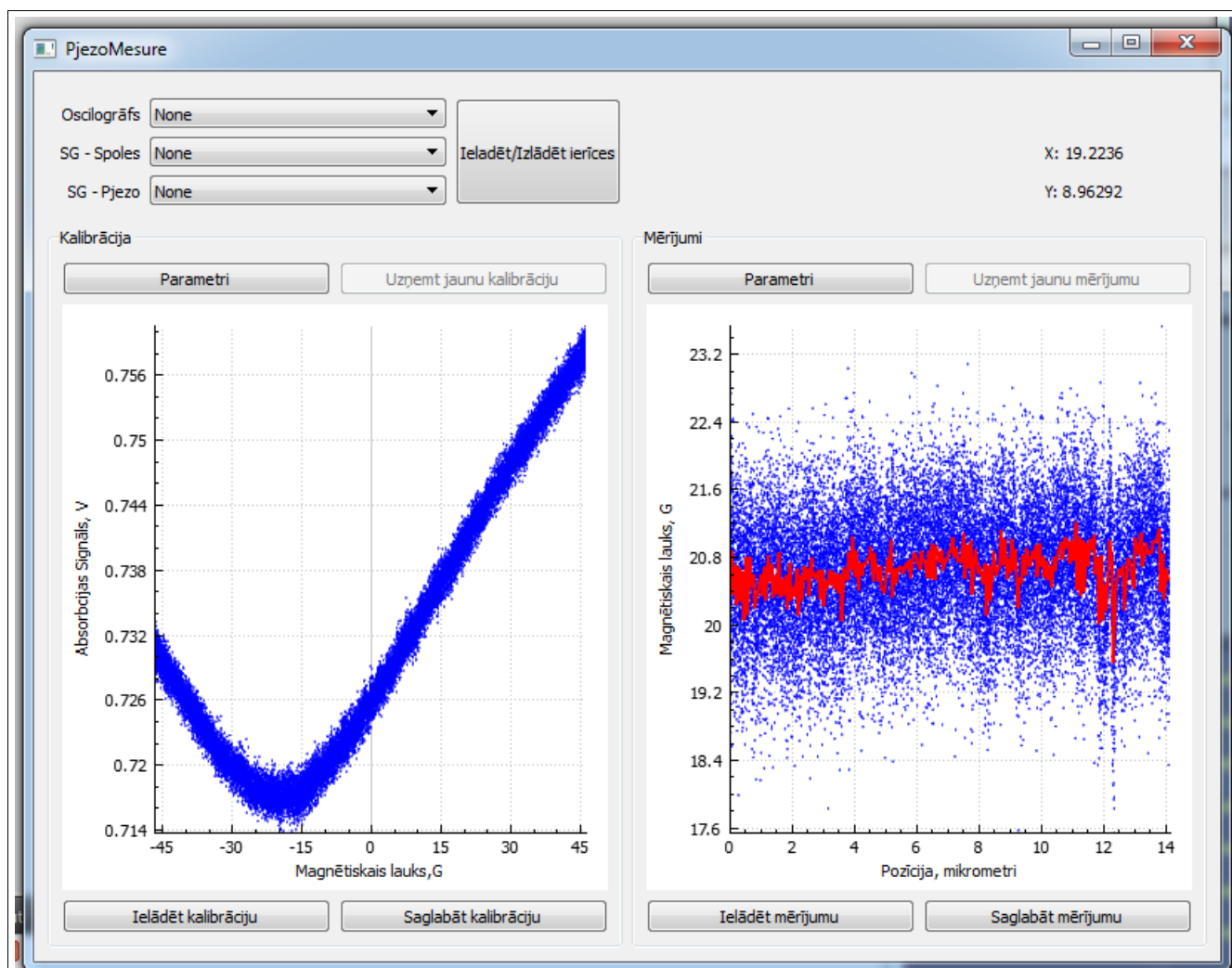
zināmu attālumu. Tas tiek realizēts ar pjezo skena palīdzību. Nanoizmēru šūna ir novietota uz nanopozicionēšanas galdiņa (MAX 341/M no "Thorlabs, Inc."). Šī galdiņa pozīciju var mainīt, mainot elektrisko spriegumu uz pjezo kristāla. Spriegumu regulē pjezo kontrolieris, kas ir vadāms ar datoru. Dators veic skenu, kura gaitā nanoizmēru šūnas pozīcija lēni mainās ik pa 15 mikrometriem. Kamēr skens tiek veikts, tiek reģistrēti arī signāli.

Pēc tam datorā ir uzkrāts datu klāsts ar daudziem signāliem un pozīcijām, kurās tie iegūti. No kalibrācijas tiek rēķināts datu klāsts ar magnētiskā lauka vērtībām un pozīcijām. Pēc tam tiek veikta datu aproksimācija. Iegūtā aproksimētā līkne ir vairāk stabila pret trokšņiem nekā individuāls punkts. No aproksimācijas rezultātā iegūtās līknes slīpuma var uzreiz aprēķināt gradientu.

## **Programmatūra**

Projekta realizācijas gaitā tika izstrādāta programmatūra gan magnetoptisko signālu apstrādei (aktivitāte 2.1), gan datorizētai eksperimenta vadībai (aktivitāte 2.2). Eksperimenta vadības programma, kas izstrādāta 2.2. aktivitātes ietvaros, bija ļoti vispusīga, lai ar to varētu vadīt eksperimentus gan ar laboratorijas iekārtu, gan ar magnētiskā lauka moduli. Daudzveidība ne vienmēr dod optimālos rezultātus konkrētam pielietojumam, tādēļ tika secināts, ka datorizētas eksperimenta vadības programmu pakete, kas izveidota aktivitātē 2.2., bija jāpārveido, lai optimizētu programmu prototipa vajadzībām. Jaunās programmatūras versijas grafiskais lietotāja interfeiss ir redzams 9. attēlā.

Grafiskā lietotāja interfeisa galvenajam lodziņam ir iespēja izvēlēties elektroniskās iekārtas (oscilogrāfs, signālu ģenerators spolēm, signālu ģenerators pjezo kontrolierim) augšējā daļā pa kreisi. Poga ļauj ielādēt ierīču konfigurācijas. Kreisā grafika ir saistīta ar magnētiskā lauka kalibrācijas metodi. Tiek attēlots fotodiodes mērītais signāls atkarībā no magnētiskā lauka. Programma izmanto iegūto līkni, lai veidotu kalibrācijas funkciju, ar kuras palīdzību kāda izmērītā signāla vērtība vēlāk var tikt saistīta ar konkrētu magnētiskā lauka vērtību. Labajā pusē ir grafika, kas parāda pjezo skenu rezultātu. Uz y ass tiek zīmēta magnētiskā lauka vērtība, bet uz x ass - nanoizmēru šūnas pozīcija. No šiem datiem tiek rēķināts magnētiskā lauka gradients. Zem kalibrācijas grafikas ir pogas, kas ļauj saglabāt veikto kalibrāciju, kā arī ielādēt iepriekš veikto kalibrāciju. Līdzīgi, zem pjezo skena grafikas ir pogas, kas ļauj gan saglabāt esošos rezultātus, gan ielādēt iepriekšējos rezultātus no diska.



**9.attēls.** Jaunās programmatūras versijas grafiskais lietotāja interfeiss.

## Kopsavilkums

ERAF projekta “Jauna tehnoloģija magnētiskā lauka un tā gradienta mērīšanai izmantojot nanostrukturētu atomārās gāzes vidi” (Nr. 2DP/2.1.1.1.0/10/APIA/VIAA/036) ietvaros tika izstrādāts un izveidots prototips, kurā ietvertas jaunas tehnoloģijas magnētiskā lauka un tā gradienta mērīšanai. Prototips ir kompleksa sistēma, kas izmanto vairākas tehnoloģijas, kuras bija iespējams veiksmīgi integrēt projekta gaitā. Prototipa darbība tika pārbaudīta un aprobēta atsevišķā aktivitātē (sk. atskaiti par 3. aktivitāti), un tika secināts, ka prototipa iekārta ir spējīga mērīt magnētiskos laukus un to gradientus ar vajadzīgo precizitāti un jūtīgumu.