



Kauno technologijos universitetas
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

Slėgio nuotėkio matuoklių kalibravimo metodikos tyrimas ir optimizavimas

Baigiamasis magistro projektas

Eimantas Paliulis

Projekto autorius

Dr. Asta Meškuotienė

Vadovė

Kaunas, 2023



Kauno technologijos universitetas
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

Slėgio nuotėkio matuoklių kalibravimo metodikos tyrimas ir optimizavimas

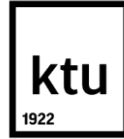
Baigiamasis magistro projektas
Mechanikos inžinerija (6211EX009)

Eimantas Paliulis
Projekto autorius

Dr. Asta Meškuotienė
Vadovė

Lekt. dr. Joris Vėžys
Recenzentas

Kaunas, 2023



Kauno technologijos universitetas

Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

Eimantas Paliulis

Slėgio nuotėkio matuoklių kalibravimo metodikos tyrimas ir optimizavimas

Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad:

1. baigiamąjį projektą parengiau savarankiškai ir sąžiningai, nepažeisdamas kitų asmenų autoriaus ar kitų teisių, laikydamasis Lietuvos Respublikos autorių teisių ir gretutinių teisių įstatymo nuostatų, Kauno technologijos universiteto (toliau – Universitetas) intelektinės nuosavybės valdymo ir perdavimo nuostatų bei Universiteto akademinės etikos kodekse nustatytų etikos reikalavimų;
2. baigiamajame projekte visi pateikti duomenys ir tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti teisėtai, nei viena šio projekto dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar elektroninių šaltinių, visos baigiamojo projekto tekste pateiktos citatos ir nuorodos yra nurodytos literatūros sąrašė;
3. įstatymų nenumatytų piniginių sumų už baigiamąjį projektą ar jo dalis niekam nesu mokėjęs;
4. suprantu, kad išaiškėjus nesąžiningumo ar kitų asmenų teisių pažeidimo faktui, man bus taikomos akademinės nuobaudos pagal Universitete galiojančią tvarką ir būsiu pašalintas iš Universiteto, o baigiamasis projektas gali būti pateiktas Akademinės etikos ir procedūrų kontrolieriaus tarnybai nagrinėjant galimą akademinės etikos pažeidimą.

Eimantas Paliulis

Patvirtinta elektroniniu būdu



Kaunas technologijos universitetas

Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

Baigiamojo magistro projekto užduotis

Išduota studentui (-ei) – Eimantui Paliuliui

1. Projekto tema

Slėgio nuotėkio matuoklių kalibravimo metodikos tyrimas ir optimizavimas

(Lietuvių kalba)

Study and Optimization of Pressure Leakage Meter Calibration Methodology

(Anglų kalba)

2. Projekto tikslas ir uždaviniai

Tikslas – atlikti ir ištirti skirtingų tikslumo klasių slėgio nuotėkio matuoklių (slėgio kalibratorių) sieties procesą manometrinio 0–70 kPa ir skirtuminio 0–2 kPa slėgių matavimo diapazonuose bei optimizuoti kalibravimo metodiką.

Uždaviniai:

1. atlikti slėgio nuotėkio aptikimo elektronikos pramonėje matavimo proceso analizę ir parinkti tinkamas priemones jam realizuoti;
2. atlikti pasirinkto kalibravimo metodo proceso paklaidų analizę ir pasiūlyti matematinį modelį slėgio nuotėkio matuokliams;
3. parinkti etalonines priemones matavimo schemai realizuoti (manometrinio 0–70 kPa ir skirtuminio 0–2 kPa slėgių diapazonuose 0,1–2,5 % tikslumo klasėms);
4. sukalibruoti *F620* ir *FCO750* tipų slėgio nuotėkio matuoklius ir nustatyti jų kalibravimo periodiškumą;
5. optimizuoti slėgio nuotėkio matuoklių kalibravimo metodiką ir pateikti rekomendacijas jos realizavimui.

3. Pagrindiniai reikalavimai ir sąlygos

Slėgio nuotėkio matuoklių kalibravimo metu išlaikyti etalono išplėstinės neapibrėžties ir MP leistinosios paklaidos santykį $< 0,33$ (0,5), užtikrinti standartines aplinkos sąlygas matavimų metu.

4. Papildomi reikalavimai projektui, ataskaitai ir jos priedams

Kalibravimo metodika optimizuojama remiantis šiais kriterijais: matavimo taškų ir matavimų viename taške skaičius, matematinis modelis, etaloninės priemonės, aplinkos sąlygos ir kalibravimo periodiškumas.

Projekto autorius	Eimantas Paliulis <i>(Vardas, Pavardė)</i>	<i>(Parašas)</i>	2023-02-14 <i>(Data)</i>
Projekto vadovė	Asta Meškuotienė <i>(Vardas, Pavardė)</i>	<i>(Parašas)</i>	2023-02-14 <i>(Data)</i>
Krypties studijų programų vadovas	Kęstutis Pilkauskas <i>(Vardas, Pavardė)</i>	<i>(Parašas)</i>	2023-02-14 <i>(Data)</i>

Patvirtinta elektroniniu būdu

Paliulis, Eimantas. Slėgio nuotėkio matuoklių kalibravimo metodikos tyrimas ir optimizavimas. Magistro baigiamasis projektas / vadovė Dr. Asta Meškuotienė; Kauno technologijos universitetas, Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas.

Studijų kryptis ir sritis (studijų krypties grupė): Inžinerijos mokslai, Mechanikos inžinerija.

Reikšminiai žodžiai: metrologija, kalibravimas, neapibrėžtis, slėgis, sandarumas, nuotėkis

Kaunas, 2023. 55 p.

Santrauka

Vienas iš metrologijos tikslų yra siekti paprastų, lengvai realizuojamų matavimo priemonės kalibravimo metodų, dėl to sumažinamos laiko sąnaudos, priemonės, žmogiškieji ištekliai. Skirtingo tikslumo matavimo priemonėms būtina atlikti individualią paklaidų analizę, taikyti skirtingus matematinius modelius matavimo neapibrėžties skaičiavimui, parinkti kalibravimo taškų skaičių ir kalibravimo periodiškumą, siekiant užtikrinti matavimų tvarumą.

Darbe analizuojama 0,1–2,5 % tiksl. kl. slėgio nuotėkio matuoklių, kurie plačiausiai naudojami automobilių elektronikos pramonėje sandarumo testavimui, susietumo seka, perduodant slėgio vieneto vertę nuo darbinių etalonų darbinėms matavimo priemonėms. Susietumas realizuojamas naudojant kalibravimo procedūrą. Nuotėkio matuoklių kalibravimo procedūra diapazone nuo 0 iki 2000 Pa manometrinio slėgio ir diapazone nuo 0 iki 700 mbar ($7 \cdot 10^4$ Pa) nėra reglamentuojama norminiais dokumentais, todėl jų kalibravimo metodikos tyrimas ir optimizavimas yra vertingas tiek mokslinė, tiek tiesioginio pritaikymo prasme.

Tyrimui pasirinkti *ATEQ F620* ir *Furness Controls FCO750* gamintojų nuotėkio matuokliai, kurių veikimo principas paremtas pjezoelektriniu efektu. Jų kalibravimo schemai realizuoti sukomplektuota slėgio nuotėkio matuoklių kalibravimo įranga, į kurios sudėtį įeina etaloniniai 0,05 % tiksl. kl. slėgio kalibratoriai *Druck DPI705E* ir *Additel ADT681-DP*. Nuotėkio matuokliams kalibruoti sudarytas matematinis modelis ir atliktas neapibrėžčių sandų kitimo tyrimas, įvertinant slėgio lygio skirtumą, skiriamąją gebą, histerizę, etalono sistemine paklaidą ir etalono neapibrėžtį, pataisos įvertinimą, rodmenų sklaidą bei dreifą. Nustatyta, kad 0,1–1,5 % tikslumo manometrinio slėgio išplėstinei neapibrėžčiai daugiausiai įtakos turi etalono neapibrėžties, pataisos įvertinimo ir padalos vertės sandai, o 0,1–2,5 % tiksl. kl. skirtuminio slėgio neapibrėžčiai – pataisos įvertinimo, rodmenų sklaidos ir histerizės standartinės neapibrėžtys, esant standartinėms aplinkos sąlygoms.

Remiantis *FCO750* ir *F620* tipų slėgio nuotėkio matuoklių kalibravimo rezultatais ir pritaikius regresinę analizę mažiausių kvadratų metodu, nustatyti jų kalibravimo periodiškumo intervalai, kurie atitinkamai lygūs: *FCO750* 1 % tikslumo srityje pradinis kalibravimo intervalas 2,5 metai, o periodinis pusės metų; *FCO750* 0,1 % tikslumo srityje pradinis kalibravimo intervalas 3 metai, o periodinis 1,5 metų; *F620* 1,5–2,5 % tikslumo srityje pradinis kalibravimo intervalas 2 metai, o periodinis 1 metai. Optimizuota slėgio nuotėkio matuoklių kalibravimo metodika ir pateiktos rekomendacijos jos realizavimui dėl metodo, pasirinkamų matavimo taškų ir skaičiaus, matematinio modelio, etaloninių priemonių ir darbo vietos metrologinių reikalavimų, kalibravimo periodiškumo, leidžia pasiekti mažiausią 0,1–2,5 % tiksl. kl. slėgio nuotėkio matuoklių manometrinio ir diferencinio slėgio kalibravimo neapibrėžtis, atitinkamai lygias $\pm 10,72$ Pa ir $\pm 0,60$ Pa, esant 95 % pasikliautinumo tikimybei intervaluose 0–70 kPa ir 0–2000 Pa.

Paliulis, Eimantas. Study and Optimization of Pressure Leakage Meter Calibration Methodology. Master's Final Project / supervisor Dr. Asta Meškuotienė; The Faculty of Mechanical Engineering and Design, Kaunas University of Technology.

Study field and area (study field group): Engineering Sciences, Mechanical Engineering.

Key words: metrology, calibration, uncertainty, pressure, tightness, leakage

Kaunas, 2023. 55 p.

Summary

One of the goals of metrology is to strive for simple, easy-to-implement methods of calibrating a measuring instrument, as a result of which time costs, tools, and human resources are reduced. For measuring instruments of different accuracy, it is necessary to perform individual error analysis, apply different mathematical models for calculating measurement uncertainty, select the number of calibration points and calibration periodicity in order to ensure the sustainability of measurements.

The project analyzes the connection sequence of 0.1-2.5% accuracy class pressure leakage meters, which are widely used in the automotive electronics industry for leak testing, transferring the pressure unit value from working standards to working measuring instruments. Traceability is realized using a calibration procedure. The calibration procedure of leakage meters in the range from 0 to 2000 Pa differential pressure and in the range from 0 to 700 mbar ($7 \cdot 10^4$ Pa) manometric pressure is not regulated by normative documents, so the study and optimization of their calibration methodology is valuable both in terms of scientific and direct application.

ATEQ F620 and Furness Controls FCO750 leakage meters, whose operating principle is based on the piezoelectric effect, were chosen for the study. To implement their calibration scheme, the calibration equipment of pressure leakage meters is completed, which includes reference 0.05% accuracy class pressure calibrators Druck DPI705E and Additel ADT681-DP. To calibrate the leakage meters, a mathematical model was created and a study of the influence of uncertainties was carried out, evaluating the difference in pressure level, resolution, hysteresis, reference systematic error and reference uncertainty, correction estimate influence, dispersion and drift of readings. The expanded leakage meter manometric pressure uncertainty of 0.1-1.5% accuracy was found to be most affected by reference, correction estimate and resolution uncertainties, while 0.1-2.5% accuracy class differential pressure expanded uncertainty is most affected by the standard uncertainties of the correction estimate, reading spread and hysteresis under standard ambient conditions.

Based on the calibration results of the FCO750 and F620 type pressure leakage meters, their calibration periodicity intervals were determined, which are respectively equal to: FCO750 in the 1% accuracy range, the initial calibration interval is 2.5 years, and the periodic interval is half a year; FCO750 within 0.1% accuracy range initial calibration interval 3 years and periodic 1.5 years; The F620 has an initial calibration interval of 2 years and a periodic calibration interval of 1 year in the 1.5-2.5% accuracy range. The optimized methodology for the calibration of 0.1-2.5% accuracy class pressure leakage meters allow to achieve the minimum uncertainties of ± 10.72 Pa and ± 0.60 Pa, respectively, at 95% confidence probability in the ranges 0-70 kPa and 0-2000 Pa.

Turinys

Paveikslų sąrašas	10
Santrumpų sąrašas	12
Įvadas.....	13
1. Teorinis darbo pagrindimas	14
1.1. Skirtuminio slėgio matuoklių panaudojimas nuotėkio aptikimo matavimuose	14
1.2. Dokumentai, reglamentuojantys nuotėkio skirtuminio slėgio metodu matavimus ir slėgio nuotėkio matuoklių charakteristikos.....	17
2. Slėgio nuotėkio matuoklių kalibravimo procesas	20
2.1. Slėgio keitiklių, kurio matavimo rezultatas elektrinis parametras, kalibravimas.....	20
2.2. Slėgio keitiklių, kurių matavimo rezultatas slėgis, kalibravimas	21
2.3. Paklaidos skirtuminio slėgio matavimuose	22
2.3.1. Matavimo neapibrėžties sandai	24
2.4. Etalonų parinkimas	26
2.5. Matavimo metodo realizavimo schema.....	32
3. Tyrimo rezultatai ir jų analizė	35
3.1. Kalibravimo rezultatai	35
3.1.1. <i>Furness Controls FCO750</i> kalibravimo rezultatai	35
3.1.2. <i>ATEQ F620</i> kalibravimo rezultatai.....	37
3.1.3. Sandų įtaka išplėstinei neapibrėžčiai.....	38
3.2. Kalibravimo periodiškumo nustatymas	41
4. Siūloma slėgio nuotėkio matuoklių kalibravimo metodika	45
4.1 Aplinkos sąlygos ir etaloninės matavimo priemonės	45
4.2 Kalibravimo modelis	46
4.3. Matavimo eiga, sieties schema ir rekomendacijos	49
Išvados	52
Literatūra	53
Priedai.....	56
1 priedas. Etalono pasirinkimo algoritmas	56
2 priedas. <i>Druck DPI705E</i> slėgio kalibratoriaus išorinės laboratorijos kalibravimo liudijimas	57
3 priedas. <i>Furness Controls FCO750</i> slėgio nuotėkio matuoklio gamintojo specifikacija.....	58
4 priedas. <i>ATEQ F620</i> slėgio nuotėkio matuoklio gamintojo specifikacija.....	59
5 priedas. <i>Additel ADT681-DP</i> išorinės laboratorijos kalibravimo liudijimas.....	60
6 priedas. <i>Furness FCO750</i> kalibravimo rezultatai.....	61
7 priedas. Normaliojo dėsnio lentelė [35]	62
8 priedas. <i>Furness FCO750</i> kalibravimo rezultatai.....	63
9 priedas. <i>ATEQ F620</i> kalibravimo rezultatai	64
10 priedas. Kalibravimo periodiškumo nustatymo algoritmas slėgio MP	65

Lentelių sąrašas

1 lentelė. Nuotėkio aptikimo metodai [5]	14
2 lentelė. Slėgio nuotėkio matuoklių kalibravimo įtakos koeficientų lentelė	25
3 lentelė. Etalono paklaida ties kalibruojamais manometrinio slėgio <i>Furness Controls FCO750</i> matuoklio taškais, matavimo diapazone 10–100 % PS	27
4 lentelė. Etalono paklaida ties kalibruojamais manometrinio slėgio <i>Furness Controls FCO750</i> matuoklio taškais, matavimo diapazone 10–100 % PS	28
5 lentelė. Etalono paklaida ties kalibruojamais manometrinio slėgio <i>Furness Controls FCO750</i> matuoklio taškais, matavimo diapazone 0–10 % PS	29
6 lentelė. Etalono paklaida ties kalibruojamais manometrinio slėgio <i>ATEQ F620</i> matuoklio taškais	29
7 lentelė. Etalono paklaida ties kalibruojamais skirtuminio slėgio <i>Furness Controls FCO750</i> matuoklio taškais, matavimo diapazone 10–100 % PS	30
8 lentelė. Etalono paklaida ties kalibruojamais skirtuminio slėgio <i>Furness Controls FCO750</i> matuoklio taškais matavimo diapazone 0–10 % PS	31
9 lentelė. Etalono paklaida ties kalibruojamais skirtuminio slėgio <i>ATEQ F620</i> matuoklio taškais .	32
10 lentelė. Sandų įtaka išplėstinei neapibrėžčiai	41
11 lentelė. Slėgio nuotėkio matuoklių palankiausio kalibravimo atvejo (CMC) standartinės neapibrėžties sandai, kur p – etalono neapibrėžtis kalibruojamame MP taške	47
12 lentelė. <i>Furness Controls FCO750</i> 10–100 % PS diapazone manometrinio slėgio kalibravimo rezultatai	61
13 lentelė. <i>Furness Controls FCO750</i> 0–10 % PS diapazone manometrinio slėgio kalibravimo rezultatai	61
14 lentelė. <i>Furness Controls FCO750</i> manometrinio slėgio 0–10 % PS diapazone kalibravimo rezultatai (2).....	63
15 lentelė. <i>Furness Controls FCO750</i> skirtuminio slėgio 10–100 % PS diapazone kalibravimo rezultatai	63
16 lentelė. <i>Furness Controls FCO750</i> skirtuminio slėgio 0–10 % PS diapazone kalibravimo rezultatai	63
17 lentelė. <i>ATEQ F620</i> manometrinio slėgio kalibravimo rezultatai	64
18 lentelė. <i>ATEQ F620</i> skirtuminio slėgio kalibravimo rezultatai	64

Paveikslų sąrašas

1 pav. Tipinio elektroninio valdymo bloko sudedamosios dalys, kuriam gali būti atliekamas sandarumo bandymas (kairėje) [6], pavyzdinė sandarumo testavimo stotelė (dešinėje)	14
2 pav. Skirtuminio slėgio matavimo principo schema [7]	15
3 pav. Tipinis slėgio grafikas sandarumo testo metu [8]	16
4 pav. Lyginamasis protėkis sujungtas su slėgio nuotėkio matuokliu	17
5 pav. Pjezoelektrinio keitiklio veikimo principas [23]	19
6 pav. Slėgio keitiklio kalibravimo schema, naudojant srovės kalibratorių	21
7 pav. <i>ATEQ F620</i> slėgio nuotėkio matuokliai	21
8 pav. Kalibravimo įrangos sujungimo schema slėgio nuotėkio matuokliams kalibruoti (a – manometriniams slėgiui kalibruoti, b – diferenciniams slėgiui kalibruoti)	22
9 pav. Skirtingų darbinių skysčių lygių schema, kur 1 – etalonas, o 2 – kalibruojamoji MP	23
10 pav. <i>Furness Controls FCO750</i> nuotėkio matuoklis	26
11 pav. <i>Druck DPI705E</i> slėgio kalibratorius	26
12 pav. Etaloninio slėgio kalibratoriaus kalibravimo rezultatai (1)	27
13 pav. Etaloninio slėgio kalibratoriaus kalibravimo rezultatai (2)	28
14 pav. Etaloninio slėgio kalibratoriaus kalibravimo rezultatai (3)	28
15 pav. <i>Additel ADT681-DP</i> skirtuminio slėgio matuoklis	30
16 pav. Etaloninio skirtuminio slėgio matuoklio kalibravimo rezultatai (1)	30
17 pav. Etaloninio skirtuminio slėgio matuoklio kalibravimo rezultatai (2)	31
18 pav. Etaloninio skirtuminio slėgio matuoklio kalibravimo rezultatai (3)	31
19 pav. Matavimo schema	33
20 pav. Nesandarių tarpų sistema, atskirta sklendėmis	33
21 pav. <i>Furness Controls FCO750</i> manometrinio slėgio 10–100 % PS diapazone kalibravimo rezultatai	35
22 pav. <i>Furness Controls FCO750</i> manometrinio slėgio 0–10 % PS diapazone kalibravimo rezultatai (1)	36
23 pav. <i>Furness Controls FCO750</i> manometrinio slėgio 0–10 % PS diapazone kalibravimo rezultatai (2)	36
24 pav. <i>Furness Controls FCO750</i> skirtuminio slėgio 10–100 % PS diapazone kalibravimo rezultatai	37
25 pav. <i>Furness Controls FCO750</i> skirtuminio slėgio 0–10 % PS diapazone kalibravimo rezultatai	37
26 pav. <i>ATEQ F620</i> manometrinio slėgio kalibravimo rezultatai	38
27 pav. <i>ATEQ F620</i> skirtuminio slėgio kalibravimo rezultatai	38
28 pav. <i>Furness Controls FCO750</i> manometrinio slėgio sandų įtaka išplėstinei neapibrėžčiai 10–100 % PS diapazone (1)	38
29 pav. <i>Furness Controls FCO750</i> manometrinio slėgio sandų įtaka išplėstinei neapibrėžčiai 10–100 % PS diapazone (2)	39
30 pav. <i>Furness Controls FCO750</i> DP slėgio sandų įtaka išplėstinei neapibrėžčiai 10–100 % PS diapazone	39
31 pav. <i>Furness Controls FCO750</i> manometrinio slėgio sandų įtaka išplėstinei neapibrėžčiai 0–10 % PS diapazone	39
32 pav. <i>Furness Controls FCO750</i> DP slėgio sandų įtaka išplėstinei neapibrėžčiai 0–10 % PS diapazone	40

33 pav. <i>ATEQ F620</i> manometrinio slėgio sandų įtaka išplėstinei neapibrėžčiai	40
34 pav. <i>ATEQ F620</i> DP slėgio sandų įtaka išplėstinei neapibrėžčiai	40
35 pav. <i>Furness Controls FCO750</i> kontrolinė diagrama (1 % manometrinio ir DP slėgio tikslumo sritis)	42
36 pav. <i>Furness Controls FCO750</i> kontrolinė diagrama (0,1 % manometrinio ir DP slėgio tikslumo sritis)	43
37 pav. <i>ATEQ F620</i> kontrolinė diagrama (1,5–2,5 % manometrinio ir DP slėgio tikslumo sritis)..	43
38 pav. Slėgio nuotėkio matuoklių CMC struktūra	48
39 pav. Kalibravimo taškų skaičiaus pasirinkimo algoritmas.....	48
40 pav. Slėgio nuotėkio matuoklių sistės schema [39].....	50
41 pav. Adatinis vožtuvas (kairėje), srauto matuoklis <i>ATEQ CDF60</i> (dešinėje)	51

Santrumpų sąrašas

- CMC – kalibravimo ir matavimo galimybės (angl. *Calibration and Measurement Capability*)
- DP – skirtuminis slėgis (angl. *Differential Pressure*)
- EURAMET – Europos nacionalinių metrologijos institutų organizacija (angl. *European Association of National Metrology Institutes*)
- PS – pilna skalė (matavimo riba)
- ILAC – tarptautinė laboratorijų akreditacijos kooperacija (angl. *International Laboratory Accreditation Cooperation*)
- SNM – slėgio nuotėkio matuoklis
- MLP – maksimali leistina paklaida
- MP – matavimo priemonė
- OIML – tarptautinė teisinės metrologijos organizacija (angl. *International Organization of Legal Metrology*)
- WELMEC – Europos teisinės metrologijos bendradarbiavimo platforma (angl. *European Cooperation in Legal Metrology*)

Įvadas

Absoliučiai tikslūs matavimo prietaisai neegzistuoja, t. y. matavimo metu gaunami nuokrypiai nuo nominalios matuojamo dydžio vertės. Šiuos nuokrypius ir įtaką galutiniam rezultatui nagrinėja metrologija. Metrologijos pagrindas yra matavimas – veiksmas, kuriuo siekiama rasti fizikinio dydžio vertę. Matuojami dydžiai labai retai būna pastovūs ir kinta matavimo proceso metu. Visa tai sąlygoja papildomas matavimo paklaidas. Todėl, norint atlikti reikalaujamo tikslumo matavimus, reikia parinkti tinkamą matavimo metodą, nustatyti paklaidų šaltinius ir įvertinti matavimo neapibrėžtį [1].

Metrologija šiais laikais yra glaudžiai susijusi su visuomenės tvarumu ir darna, nes vienas iš jos tikslų yra ne tik užtikrinti matavimo priemonių tikslumines charakteristikas, bet ir siekti kuo paprastesnių ir lengvai realizuojamų matavimo metodų. Taip pat optimizuoti, efektyvinti matavimus, dėl to sumažinamos laiko sąnaudos, priemonės, žmogiškieji išteklių [2]. Renkantis etalonus matavimo priemonių kalibravimui, svarbu išsiaiškinti visas galimas charakteristikas, jų leistinas paklaidų ribas, o skaičiuojant neapibrėžtis – kokie neapibrėžties sandai, priklausantys nuo aplinkos sąlygų, naudojamų etalonų ir t.t., vertinti viename ar kitame matavimo priemonės ar etalono hierarchijos lygyje. Remiantis surinkta informacija būtina vieno tikslumo prietaisams taikyti paprastesnį matematinį modelį matavimo neapibrėžties skaičiavimui, kito atvirkščiai, sudėtingesnį, siekiant užtikrinti matavimų tvarumą [3].

Slėgio matavimai nuo vakuumo iki labai didelių slėgių yra masiškiausia metrologijos sritis bei taikoma daugelyje žmogaus veiklos sričių: pramonėje, žemės ūkyje, transporte. Slėgio matavimai, priklausomai nuo paskirties ir reikšmingumo, priskiriami tiek industrinės, tiek teisinės metrologijos sritims, o jų vienovė užtikrinama per kalibravimą, kuris demonstruoja matavimų sietį su aukščiausio tikslumo lygmens slėgio vieneto etalonais [4].

Darbo tikslas – atlikti ir ištirti skirtingų tikslumo klasių slėgio nuotėkio matuoklių (slėgio kalibratorių) sieties procesą manometriniu 0–70 kPa ir skirtuminio 0–2 kPa slėgių matavimo diapazonuose bei optimizuoti kalibravimo metodiką.

Darbo uždaviniai:

1. atlikti slėgio nuotėkio aptikimo elektronikos pramonėje matavimo proceso analizę ir parinkti tinkamas priemones jam realizuoti;
2. atlikti pasirinkto kalibravimo metodo proceso paklaidų analizę ir pasiūlyti matematinį modelį slėgio nuotėkio matuokliams;
3. parinkti etalones priemones matavimo schemai realizuoti (manometriniu 0–70 kPa ir skirtuminio 0–2 kPa slėgių diapazonuose 0,1–2,5 % tikslumo klasėms);
4. sukalibruoti *F620* ir *FCO750* tipų slėgio nuotėkio matuoklius ir nustatyti jų kalibravimo periodiškumą;
5. optimizuoti slėgio nuotėkio matuoklių kalibravimo metodiką ir pateikti rekomendacijas jos realizavimui.

1. Teorinis darbo pagrindimas

1.1. Skirtuminio slėgio matuoklių panaudojimas nuotėkio aptikimo matavimuose

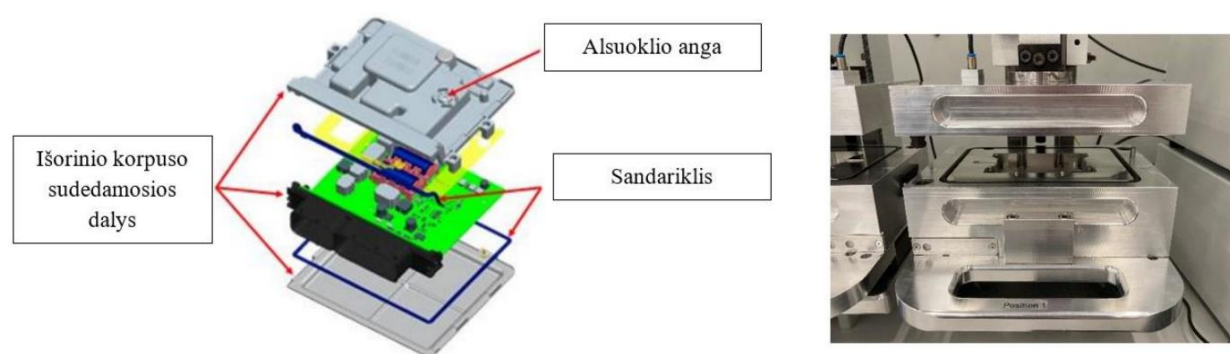
Sandarumo bandymas yra procesas, pritaikytas serijinei gamybai. Šio proceso metu produktas yra testuojamas su tikslu patikrinti, ar jis atitinka keliamus sandarumo reikalavimus. Produkto nuotėkis arba sandarumo pažeidimai atsiranda dėl medžiagos poringumo, netinkamų sandariklių, suvirinimo siūlių defektų, mechaninių pažeidimų gamybos proceso metu ir kt. [5]. Priklausomai nuo nuotėkio atsiradimo priežasties, nuo spėjamo nuotėkio dydžio ir nuo iškeltų uždavinių gali būti taikomi įvairūs nuotėkio paieškos metodai, pateikti 1 lentelėje.

1 lentelė. Nuotėkio aptikimo metodai [5]

Metodas	Mažiausias aptinkamas nuotėkis, cm^3/s^*
Panardinimo	10^{-3}
Dažymo	10^{-4}
Slėgio skirtumo	10^{-5}
Ultragarsinis	10^{-2}
Jonizuotųjų dujų	10^{-7}
Radioizotropinis	10^{-10}
Spektrometrinis	10^{-10}

*1 $\text{cm}^3/\text{s} = 60 \text{ ml}/\text{min}$

Elektronikos pramonėje (1 pav.) daugiausiai paplitę du produktų sandarumo tikrinimo būdai – skirtuminio slėgio ir pėdsekinių dujų (arba dažymo) metodai. Skirtuminio slėgio metodu manometriniu slėgis sukliamas bandomoje detalėje ir matuokliu stebimas slėgio pokytis [Pa] arba protėkis [ml/min], o pėdsekinių dujų metodu detalė pripildoma specialių dujų ir, dujų jutikliu, fiksuojamas nuotėkis.



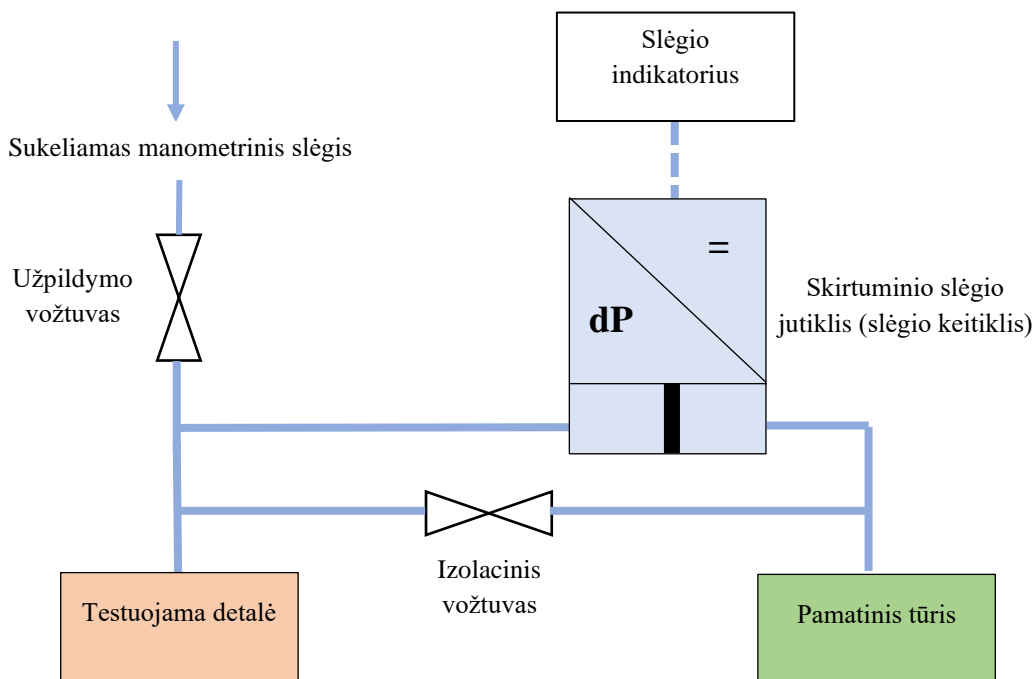
1 pav. Tipinio elektroninio valdymo bloko sudedamosios dalys, kuriam gali būti atliekamas sandarumo bandymas (kairėje) [6], pavyzdinė sandarumo testavimo stotelė (dešinėje)

Slėgio skirtumas dažniausiai matuojamas slėgio nuotėkio matuokliais [7, 8], kurio principinė veikimo schema pateikta 2 paveiksle. Verta paminėti, kad pamatinis tūris slėgio nuotėkio matuokliuose skirtas užtikrinti simetriją tarp testuojamos detalės ir atskaitos grandinės. Paprasčiausias ir ekonomiškiausias diferencinio slėgio matavimas atliekamas tik su vienu pjezoelektriniu slėgio keitikliu. Didžiausias tokio sandarumo matavimo metodo minusas yra tas, kad matuojant neaptinkama konkreti nuotėkio vieta [7].

Diferencinio slėgio matuokliai sandarumo testavimui plačiai paplitę automobilių pramonėje (angl. *Automotive*), kurioje reikalaujama aukšta gaminių kokybė, nes nesandarūs produktai automobiliuose gali sukelti pavojų žmogui ir visuomenei. Jautrūs gaminiai, pavyzdžiui, elektroniniai valdymo blokai, kurie turi ertmių, gali kaupti dulkes, drėgmę ar kitas daleles, kurios gali pažeisti elektroninius komponentus ir sukelti trumpą jungimą valdymo bloke. Kad to būtų išvengta, paprastai EOL stotyse (angl. *End Of Line* – galutinės patikros) atliekama sandarumo kokybės kontrolė nuotėkio matuokliais. Testuojamos detalės sukeltas slėgis gali siekti iki 700 mbar (70 kPa), priklausomai nuo gaminio, kad nebūtų pažeistas bloko korpusas. Matuojamas slėgio nuotėkis iki 2000 Pa, tačiau paprastai užtenka kelių dešimčių paskalių (< 50 Pa), kad būtų nuspręsta, ar detalė yra pakankamai sandari. Žinoma, sandarumo tolerancijos parenkamos pagal konkretų produktą ir kliento specifinius reikalavimus [9].

Kadangi SNM daugiausiai naudojami automatizuotose gamybos linijose, jie turi būti periodiškai kalibruojami, kad būtų užtikrinta matavimų sietis su pamatiniais etalonais, įvertinta slėgio matavimo neapibrėžtis bei atlikti MSA (angl. *Measurement System Analysis*) – matavimo sistemos analizę, kuri yra vienas iš pagrindinio automobilių elektronikos pramonėje keliamo IATF 16949 standarto reikalavimų [10].

Taip pat sandarumo testavimo rezultatas dažniausiai yra „sandarus“ arba „nesandarus“, *pass* arba *fail*, *OK* arba *NOK*, todėl, jei slėgio nuotėkio matuoklio neapibrėžtis ir sisteminė paklaida yra neįvertinta, išauga tikimybė brokuoti geras (sandarias) detales, ir atvirkščiai, nebrotuoti netinkamų naudoti detalių, dėl to klientui būtų teikiamas nekokybiškas produktas, padidėtų gamybos kaštai ir kitos išlaidos.

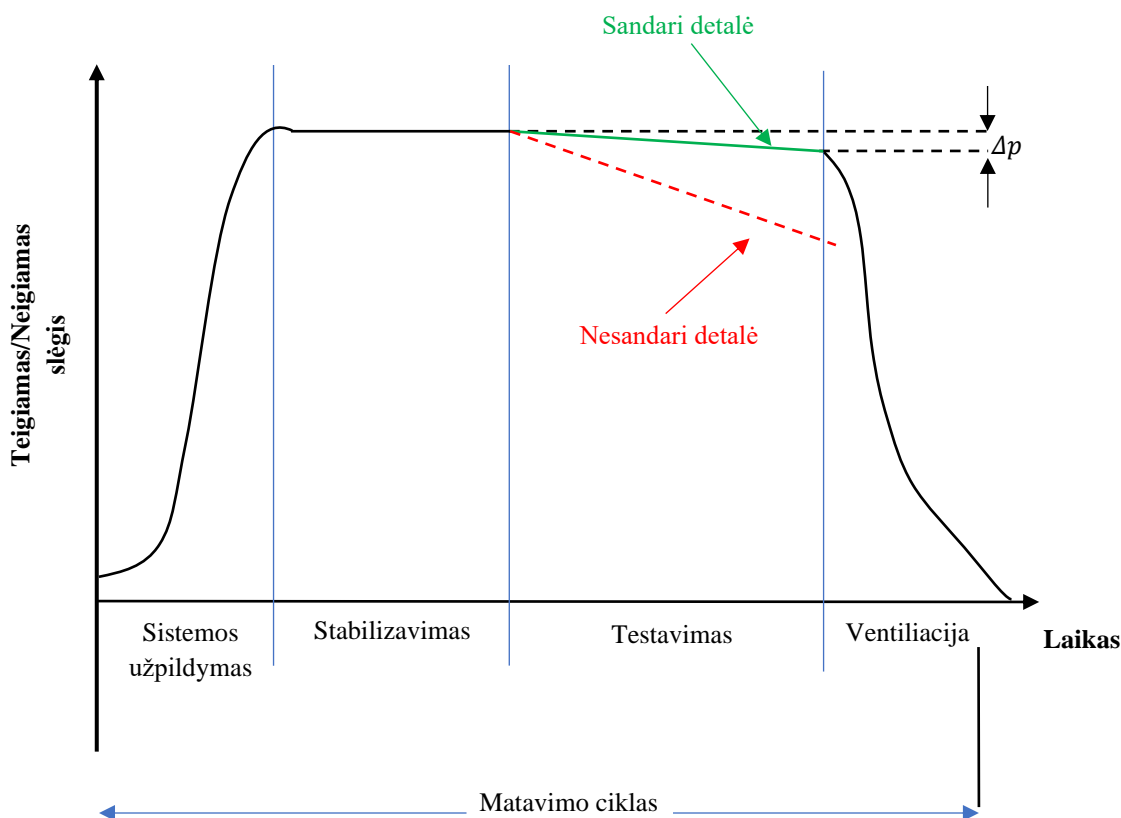


2 pav. Skirtuminio slėgio matavimo principo schema [7]

Diferencinio slėgio matuokliais realizuojama skirtuminio slėgio matavimo principo schema pateikta 3 paveiksle. Tokia schema leidžia gauti optimalų matavimo tikslumą kuo trumpesniu matavimo ciklu, kuris susideda iš keturių parametų:

- 1) sistemos užpildymo,
- 2) stabilizavimo,
- 3) matavimo (sandarumo testavimo),
- 4) ventiliacijos.

Sistemos užpildymo laikas turi trukti tik tiek, kiek reikia, norint pasiekti norimą bandymo slėgį testuojamoje detalėje. Jei prisipildymo slėgis viršija matavimo slėgį, būtina užtikrinti, kad bandymo metu detalėje neatsiras mechaninių pažeidimų. Tuo tarpu stabilizavimo laikas užtikrina matavimo pakartojamumą (angl. *repeatability*). Tinkamas parinktas matavimo laikas priklauso nuo testuojamos detalės tūrio ir leistino skirtuminio slėgio arba slėgio nuotėkio srauto (protėkio). Ventiliacijos laikas svarbus tik tada, kai detalės bus pakartotinai testuojamos.



3 pav. Tipinis slėgio grafikas sandarumo testo metu [8]

Racionalu, kad nuotėkio matavimo įrangos vidinės dalys ir sujungimai turi būti sandarūs. Siekiant tai patikrinti, atliekamas „nulio nuotėkio bandymas“, kurio metu patikrinamas pačios matavimo sistemos sandarumas be testuojamo produkto (pvz., patikrinti, ar sujungimai, adapteriai, sklendės ir vožtuvai yra sandarūs). Vienas iš patogiausių būdų tai atlikti – naudoti lyginamąjį protėkį (žr. 4 pav.).

Atliekant detalės sandarumo testą, joje sukeliamas manometrinis slėgis ir matuojamas slėgio pokytis lyginant su pamatiniu tūriu. Sukeltas slėgis gali būti tiek teigiamas (didesnis negu atmosferos slėgis), tiek neigiamas (mažesnis už atmosferos slėgį). Tiksliausias diferencinio slėgio sandarumo bandymas apimtų ir teigiamą, ir neigiamą slėgius, tačiau dėl ilgos matavimo ciklo trukmės tai paprastai gamyboje neatliekama.



4 pav. Lyginamasis protėkis sujungtas su slėgio nuotėkio matuokliu

1.2. Dokumentai, reglamentuojantys nuotėkio skirtuminio slėgio metodu matavimus ir slėgio nuotėkio matuoklių charakteristikos

Standartai [9, 11–15], keliantys reikalavimus nuotėkio matavimams skirtuminio slėgio metodu, yra šie:

- LST EN 1779+A1:2004,
- LST EN 13184:2002/A1:2004,
- ISO 20486:2017,
- LST EN 13160-1:2016, LST EN 13160-2:2016, LST EN 13160-4:2016.

Pagal šiuos dokumentus galima nustatyti pagrindinius kriterijus, kuriuos turi atitikti skirtuminio slėgio matuokliai, reikalingi slėgio nuotėkiui aptikti.

Parenkant nuotėkio matavimo metodą ir matavimo priemones, reikia atsižvelgti į keletą veiksnių [9, 11, 15]:

- leidžiamos slėgio nuotėkio ribos. Kai kurios nuotėkio matavimo priemonės gali būti per mažai jautrios reikalingam nuotėkiui matuoti arba gali neapimti viso intervalo ir, atvirkščiai, kai kurios didelio jautrumo matavimo priemonės gali būti neekonomiškos arba netinkamos dideliame nuotėkiui nustatyti;
- nuotėkio rūšis ir vieta;
- testuojamo objekto konstrukcija (tūris, sienelės storis);
- bandymo dujų suderinamumas – dujos turi būti suderinamos su testuojamo objekto medžiagomis. Pavyzdžiui, halogeninės dujos netinka bandymams su nikelio lydiniais ir nerūdijančiu plieniu; amoniakas nesuderinamas su variu ar vario lydiniais [11]. Todėl dažniausiu atveju slėgio skirtumui nustatyti elektronikos pramonėje naudojamas oras arba azotas.

Paprastai slėgio skirtumas nuotėkio matavimuose yra ne didesnis už 0,1 MPa [11]. Minimalus aptinkamas slėgio greitis priklauso nuo objekto, testavimo laiko ir įrenginio. Skirtuminiame slėgiui matuoti minimalus nuotėkio greitis (10^{-5} – 10^{-3}) Pa m³/s [12].

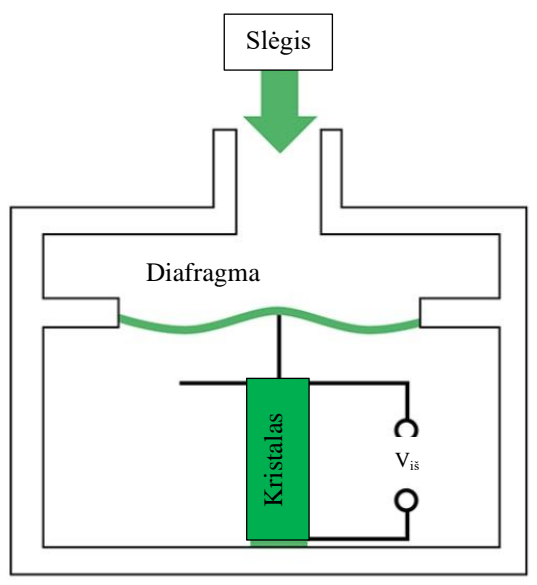
Kiti standartai apibūdina saugumo, aplinkosaugos ir kitus su MP eksploatavimu susijusius reikalavimus visoms sandarumo matavimo technologijoms [13–15].

Šiuolaikiniai SNM turi slėgio sudarymo įrenginį (integruotą slėgio pompą), slėgio vienetų konvertavimo funkcijas (diferencinio slėgio arba nuotėkio srauto matavimams), rankinį valdymą, išorinio lyginamojo protėkio įjungimą, sąsają su nuotoliniu kompiuteriu (matavimų programavimui ir automatizavimui), programinę įrangą, kuri įgalina atlikti perdavimo charakteristikos korekciją, yra kompaktiški ir juos lengva transportuoti. Darbinė prietaisų aplinka – azotas arba oras. Plačiausiai paplitę slėgio nuotėkio matuoklių gamintojai [16–21] automobilių elektronikos pramonėje yra:

- **CTS** – *Sentinel BlackBelt Pro* (0,05 % tiksl. kl.); *Sentinel Blackbelt*, *Sentinel I28* ir *Sentinel LPC 528* (0,05 % tiksl. kl.); *Sentinel MH* (0,006 % tiksl. kl.); *Sentinel 3520* (0,25 % tiksl. kl.). Šios MP geba matuoti įvairiuose skirtuminio ir manometrinio slėgių diapazonuose nuo keleto paskalių iki megapaskalių eilės. *CTS* gamintojų prietaisai pasižymi aukštomis tikslumo klasėmis, automatinio kalibravimo (aplinkos sąlygų dreifo nulio nustatymo) funkcijomis, itin žema slėgio nuotėkio padalos verte (iki 0,01 Pa), tačiau didele kaina.
- **USON** – *628* (1 % tiksl. kl.); *Vector* (0,05 % tiksl. kl.); *Optima VT* (0,25 % tiksl. kl.); *Qualitek MR* (0,1 % tiksl. kl.). Pastarieji matuokliai geba aptikti iki 2000–5000 Pa nuotėkio, sukelia iki 1–1,5 % tikslumo 15 bar testuojamo slėgio. *USON* gamintojo prietaisai pasižymi geru kainos ir kokybės santykiu bei universalumu (daug pritaikomų papildomų jutiklių įvairiems sandarumo testavimo metodams).
- **ATEQ** – *F28*, *F28+* (1–1,5 % tiksl. kl., 0–5000 Pa); *F6* (1 % tiksl. kl., 0–500 Pa); *F610*, *F620*, *F670* (0,5–1,5 % tiksl. kl., 0–5000 Pa); *F5200* (2–2,5 % tiksl. kl., 0–5000 Pa skirtuminio slėgio). Manometrinio slėgio tikslumas pastariesiems modeliams 1,5 % 75 mbar – 20 bar diapazone. *ATEQ* gamintojų slėgio nuotėkio matuokliai išsiskiria aukšto tikslumo skirtuminio slėgio matavimu, integruotu oro filtru-sausintuvu, kad būtų užtikrintas sukeliama (manometrinio) slėgio švarumas bei vidinio derinimo funkcija.
- **PROEMTEC** – *Pro dP*, *PRO DD*, *PRO SL*, *PRO HL* (1–2,5 % tiksl. kl., 0–200 mbar slėgio nuotėkio ir 1,5–2,5 % tiksl. kl. manometrinio slėgio 0–20 bar matavimo ribose). *PROEMTEC* gamintojo matuokliai pasižymi vidutiniu tikslumu, paprasta vartotojo sąsaja ir maža kaina.
- **Furness Controls** – *FCO794*; *FCO790*; *FCO754*; *FCO 750*; *FCO 730*. Šie *Furness* nuotėkio matuokliai yra tų pačių tikslumo klasių (0,1 – 1 %), geba matuoti skirtuminį slėgį 200–20000 Pa diapazonuose, sukelia 0,1–1 % tikslumo slėgį nuo 5 mbar iki 30 bar, priklausomai nuo pasirinkto modelio. Šie gamintojo prietaisų tipai išsiskiria galimų atlikti vienu metu testavimų skaičiumi, padalos verčių įvairove ir kitomis techninėmis ir fizinėmis charakteristikomis, tokios kaip kompaktiškumas, jungčių skaičius ir kt. *Furness* pasižymi įvairia ir individualia kliento poreikiams prietaisų adaptacija bei MP derinimo funkcijomis.
- **Hematech** – *70pro* ir *75eco* geba aptikti nuotėkį 0–3000 Pa diapazone 1–10 % tikslumu, taip pat sukelia slėgį 0,1–10 bar pasirinktinai; *71rel* pasižymi tokiu pat tikslumu, tačiau daug mažesniais skirtuminio slėgio nuotėkio matavimo diapazonais ir didesne padalos verte (10 Pa). *Hematech* gamintojo matuokliai populiarūs dėl itin trumpų matavimo ciklų, tikslumo ir kainos santykio.

Slėgio kalibratorius – matuoklis, susidedantis iš slėgio keitiklio ir mikroprocesoriaus, kuris keitiklio signalus pakeičia į skaitmeninę indikaciją. Kalibratorius vienu metu gali atlikti matuojamojo parametro įvertinimą, suliginimą ir išėjimo signalo matavimą. Pjezoelektrinis slėgio keitiklis yra pagrindinė slėgio nuotėkio matuoklio (arba slėgio kalibratoriaus) sudedamoji dalis, nes jis itin jautrus dinaminiam slėgiui (slėgio pokyčiui) ir geba pastarąjį paversti į elektrinį signalą (pjezoelektrinis

efektas). Pjezoelektriniai keitikliai yra tvirti, tikslūs, nebrangūs ir naudojami įvairiose pramonės srityse [22]. Principinė keitiklio schema pateikta 5 paveiksle.



5 pav. Pjezoelektrinio keitiklio veikimo principas [23]

Veikimo principas paremtas tuo, kad kai diafragma yra veikiamą išorine apkrova (šiuo atveju slėgiu), pjezokristalo paviršiuje susikuria proporcingas elektrinis laukas. Prie kristalo prijungus jungiamuosius laidus, galima išmatuoti įtampa V_{is} . Sugeneruota pjezoelektrinio kristalo įtampa yra proporcinga slėgio pokyčiui.

Išvados

Parodyta sandarumo testavimo, slėgio nuotėkio matavimų reikšmė automobilių elektronikos pramonėje. Pasirinktas skirtuminio slėgio matavimo metodas užtikrina pastarojoje pramonėje reikalingą aptikti nuotėkį 0–2000 Pa ribose, išmatuojant reikiamą nuotėkio greitį ir slėgį. Tai pakankamai jautrus ir ekonomiškąs metodas, kuris tinka ir dideliems nuotėkio rodikliams aptikti.

Atlikta standartų, nustatančių pagrindinius kriterijus skirtuminio slėgio metodui ir, rinkoje esančių gamintojų nuotėkio matuoklių pasiūlos, analizė.

Nuotėkio matavimo diapazone nuo 0 iki 2000 Pa ir manometrinių slėgio diapazone nuo 0 iki 700 mbar ($7 \cdot 10^4$ Pa) tyrimui pasirinkti *ATEQ* ir *Furness Controls* gamintojų nuotėkio matuokliai, kurių veikimo principas paremtas pjezoelektriniu efektu.

Eksperimentiniams tyrimams bus naudojami:

- *Furness Controls FCO750* (10 pav.) slėgio nuotėkio matuoklis, kurio matavimo ribos (0– $2 \cdot 10^4$) Pa manometrinių ir (0–2000) Pa skirtuminio slėgio. Gamintojo deklaruojamas tikslumas išskirtas į dvi sritis: (0–2000) Pa ribose yra 0,1 % PS, o (2000– $2 \cdot 10^4$) Pa – 1 % rodmens. Pastarosios tiksluminės charakteristikos deklaruojamos tiek manometriniams, tiek skirtuminiams slėgiui.
- *ATEQ F620* (8 pav.) slėgio nuotėkio matuokliu, kurio matavimo ribos (0– $7 \cdot 10^4$) Pa manometrinių ir (0–500) Pa skirtuminio slėgio. Prietaiso tikslumo klasė skirtuminiams slėgiui – 2,5 %, o manometriniams – 1,5 %.

2. Slėgio nuotėkio matuoklių kalibravimo procesas

Bendrosios gairės metrologinių charakteristikų, paklaidų, neapibrėžčių įvertinimui išdėstytos atitinkamuose WELMEC, OIML, EURAMET vadovuose [24, 25], tačiau praktikoje įgyvendinant šias nuostatas atskiroms priemonių grupėms susiduriama su įvairiomis problemomis, t.y. matavimo metodo realizavimo, aplinkos sąlygų ir etaloninių priemonių parinkimo, paklaidų ir neapibrėžčių skaičiavimo, matavimo rezultatų pateikimo, jų panaudojimo matavimo priemonės eksploatavimo ir tolesnės periodinės priežiūros procesuose. Remiantis šiais kriterijais toliau nagrinėjamas kalibravimo procesas.

Neapibrėžties dydis kiekviename hierarchijos lygyje skiriasi. Leidžiantis susietumo grandine, atsižvelgiant į matavimo tikslus, reikalingą tikslumą, matavimo grandinės modeliai gali būti supaprastinami [26]. Todėl svarbu išsiaiškinti, kokie neapibrėžties sandai, priklausantys nuo aplinkos sąlygų, naudojamų etalonų ir kt. faktorių, vertintini viename ar kitame lygyje.

Darbe tiriama ir analizuojama slėgio nuotėkio matuoklių susietumo sistema, naudojama perduodant slėgio vieneto vertę nuo darbinių etalonų darbinėms matavimo priemonėms. Susietumas realizuojamas, naudojant kalibravimo procedūrą, kurios metu matavimo rezultatas nustatomas su atitinkama neapibrėžtimi. Taigi, kiekviena matavimo priemonė kalibravimo grandinėje privalo turėti išreikštą neapibrėžties įvertį aukštesniame lygyje esančios etaloninės priemonės atžvilgiu.

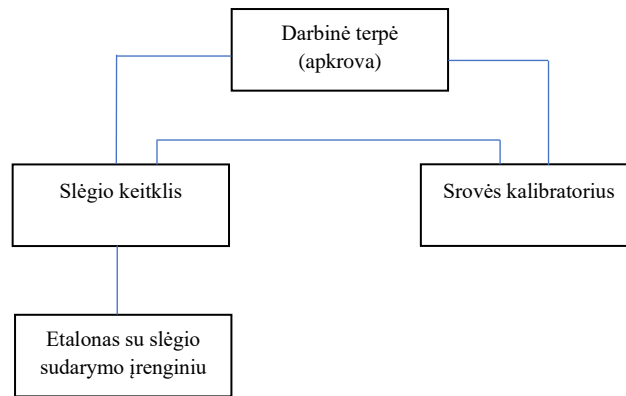
Paprasčiausias rekomenduotinas kalibravimo metodas slėgio matavimo priemonėms yra palyginimo su etalonu metodas (skirtuminis metodas), kurio metu kalibruojamas slėgio matuoklis lyginamas su etalonine matavimo priemone, kai jie abu reaguoja į tokį pat slėgį, esant vienodoms aplinkos sąlygomis.

Kaip ir minėta anksčiau, slėgio nuotėkio matuoklių pjezoelektriniai slėgio keitikliai suformuoja elektrinį signalą, todėl į indikatorių gali būti išvedama ne tik slėgio nuotėkio (ar protėkio) vertė, bet ir elektrinis parametras, toks kaip įtampa, srovė ar dažnis, priklausomai nuo keitiklio tipo ir naudojimo pobūdžio. Darbe tiriamas slėgio nuotėkio matuoklis su pjezoelektriniu keitikliu, kurio slėgio vertė tiesiogiai išvedama į slėgio nuotėkio matuoklio indikatorių.

2.1. Slėgio keitiklių, kurio matavimo rezultatas elektrinis parametras, kalibravimas

Tokie slėgio keitikliai, kurie suformuoja srovės (dažnio arba įtampos) signalą, proporcingą slėgiui (arba slėgio skirtumui) keitiklio įėjime, kalibravimas gali būti atliekamas naudojant įvairius etalonus ir skirtingus būdus sisteminei paklaidai nustatyti bei neapibrėžčiai įvertinti. Galimi kalibravimo metodai skiriasi pačia matavimo schema, kuri apsprendžia etalonų pasirinkimą.

Dažniausiai naudojamo metodo kalibruoti tokiems keitikliams principas yra tas, kad slėgio keitiklio sisteminė paklaida ir neapibrėžtis įvertinama, matuojant slėgį keitiklio įėjime ir srovę keitiklio išėjime bei palyginant išmatuotą srovės vertę su paskaičiuotąja srovės verte, atitinkančia matuojamąjį slėgį (žr. 6 paveikslą). Etalonu slėgio keitiklio įėjime nustatoma matuojamojo parametro vardinė vertė. Kitu etalonu išmatuojama elektrinio signalo vertė keitiklio išėjime [mA]. Tada lyginama, kiek tikroji išėjimo signalo vertė, nustatyta etalonu, skiriasi nuo apskaičiuotos išėjimo signalo vertės [24].



6 pav. Slėgio keitiklio kalibravimo schema, naudojant srovės kalibratorių

Paskaičiuotoji srovės vertė surandama pagal 1 formulę, kur p_v – vardinė slėgio vertė (kPa); p_{max} ir p_{min} – viršutinė ir apatinė slėgio matavimo ribos (kPa); I_{max} , I_{min} – maksimali ir minimali srovės signalo vertės (mA), atitinkančios p_{max} ir p_{min} ; I_{min} – išėjimo signalo apatinė ribinė reikšmė (mA). Taikant tokį metodą, slėgio keitiklio sisteminė paklaida Δ lygi $\Delta = I_m - I_p$, kur I_m – išmatuotas išėjimo signalas.

$$I_p = \frac{(I_{max} - I_{min})p_v}{p_{max} - p_{min}} \quad (1)$$

2.2. Slėgio keitiklių, kurių matavimo rezultatas slėgis, kalibravimas

Slėgio keitiklių, kurie tiesiogiai išveda slėgio rodmenį į indikatorių, kalibravimas atliekamas naudojant stumoklinį manometrą, slėgio kalibratorių arba etaloninį slėgio keitiklį (diferencinio slėgio matuoklį), žinoma, priklausomai nuo kalibruojamos MP tipo, tikslumo klasės ir naudojimo pobūdžio [25].

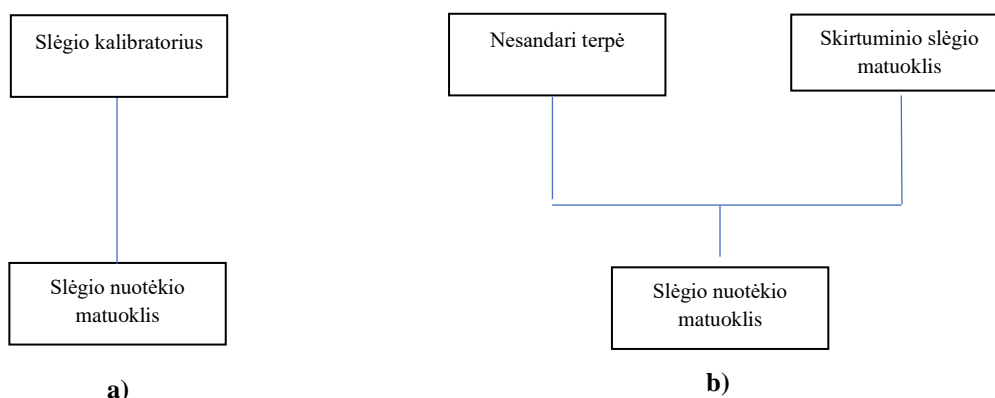


7 pav. ATEQ F620 slėgio nuotėkio matuokliai

Slėgio nuotėkio matuokliai (7 pav.) yra sudaryti iš slėgio sudarymo įrenginio, vožtuvų ir slėgio keitiklio, kuris, kaip ir minėta, yra pagrindinė prietaiso sudedamoji dalis.

Slėgio nuotėkio matuoklių kalibruojami parametrai yra ne tik skirtuminis, bet ir manometrinis slėgis. Principinė įrangos sujungimo schema kalibruojant SNM pateikta 8 paveiksle.

Manometrinis nuotėkio matuoklio slėgis kalibruojamas tiesiogiai prijungiant slėgio kalibratorių, o diferencinis (skirtuminis) MP slėgis sujungiant į sistemą lygiagrečiai kartu su nesandaria, atskirta vožtuvu, terpe ir etaloniniu skirtuminio slėgio matuokliu.



8 pav. Kalibravimo įrangos sujungimo schema slėgio nuotėkio matuokliams kalibruoti (a – manometriniams slėgiui kalibruoti, b – diferenciniam slėgiui kalibruoti)

Kalibruojant slėgio MP galima taikyti skirtingas kalibravimo procedūras [25, 27]. Šios apima skirtingą kalibruojamų taškų ir matavimų viename taške skaičių. Priklausomai nuo prietaiso perdavimo charakteristikos tiesiškumo paprastai reikia mažiausiai trijų kalibravimo taškų, o norint įvertinti tikslumą esant tam tikriems slėgio lygiams arba atsižvelgti į histerizės poveikį, gali prireikti papildomų taškų [27, 28]. Matavimų skaičius viename taške priklauso nuo konkretaus kalibruojamų prietaisų konstrukcinių savybių, patikimumo charakteristikų, reikalaujamo tikslumo [25]. Kalibruojama didinant ir mažinant slėgį [27].

Bazinę kalibravimo procedūrą paprastai rekomenduojama taikyti žemų tikslumo klasių slėgio matuokliams [25]. Naudojant bazinę kalibravimo procedūrą, matavimo prietaiso išplėstinė neapibrėžtis ($k = 2$) kalibruojamuose taškuose gaunama ne mažesnė nei 0,2 %. Kalibruojamų taškų ir matavimo viename taške skaičius didėja, kai kalibruojami tikslesni (0,05 %) slėgio matuokliai.

Darbe *ATEQ* nuotėkio matuoklis sukalibruotas remiantis bazine procedūra. *Furness Controls* nuotėkio matuoklio tikslumas skiriamas į dvi sritis (0–10 % maks. ir 10–100 % maks. matavimo ribos), t.y., manometrinio slėgio sričiai (0–20 kPa) ir (0–200 Pa) skirtuminio slėgio sričiai. Pirmajai sričiai kalibravimas atliekamas remiantis taip pat bazine procedūra. Kitoje srityje prietaisas kalibruojamas 11 taškų, kai matavimų ciklų skaičius = 1, o matavimų skaičius $n = 3$ (taikoma etalonams tinkama procedūra).

2.3. Paklaidos skirtuminio slėgio matavimuose

Atlikus paklaidų analizę slėgio matavimuose tiriamojo projekto 1 ir tiriamojo projekto 2 metu, galima teigti, kad slėgio nuotėkio matuoklių paklaidų [25, 29, 30] šaltiniai yra:

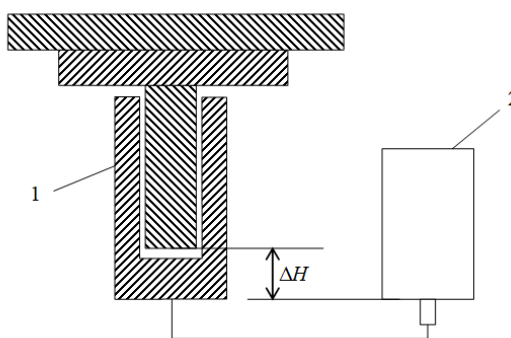
- slėgio etalono paklaida;
- temperatūrų skirtumas;
- nulio nustatymo paklaida;
- paklaida dėl histerizės;
- etalono ir MP skiriamoji geba;

- paklaida dėl darbinės aplinkos (dujų arba skysčio) lygių skirtumo;
- laisvojo kritimo pagreitis.

EURAMET cg3 nurodoma [30], kad kai skiriasi slėgio terpės fluidų lygiai etalono ir kalibruojamo slėgio matuoklio kanaluose (9 pav.), matavimo rezultatas koreguojamas, įvedant multiplikatyvų pataisos koeficientą K :

$$K = 1 + \frac{\rho_{sk} g_v \Delta H}{\bar{p}_e} \quad (2)$$

čia ρ_{sk} – skysčio tankis, g_v – vietinis laisvo kritimo pagreitis, ΔH – etalono ir MP skysčių lygių skirtumas, \bar{p}_e – etalono vidutinė slėgio vertė.



9 pav. Skirtingų darbinių skysčių lygių schema, kur 1 – etalonas, o 2 – kalibruojamoji MP

Įvertinus paklaidas, pasireiškiančias 0,1–2,5 % tiksl. kl. slėgio nuotėkio matuoklių kalibravimo metu, sudarytas jų kalibravimo modelis, pateiktas 3 formulėje.

$$\Delta p = \bar{p}_e - \bar{p}_k \cdot K + \Delta p_{hist} + \Delta p_{sg} + \Delta p_{sis} + \Delta p_{dr} \quad (3)$$

čia Δp – slėgio skirtumas tarp MP ir etalono, \bar{p}_e – etalono vidutinė reikšmė kalibruojamame taške, \bar{p}_k – kalibruojamosios MP aritmetinis vidurkis, Δp_{hist} – paklaida dėl histerezės; Δp_{sg} – paklaida dėl nuotėkio matuoklio skiriamosios gebos, Δp_{sis} – etalono sisteminė paklaida, Δp_{dr} – paklaida dėl slėgio nuotėkio matuoklio dreifo (nominalios vertės paklaida).

Neapibrėžties sandas dėl temperatūros skirtumo tarp aplinkos temperatūros ir slėgio sudarymui naudojamos darbinės terpės temperatūros nevertinamas kalibravimo modelyje, nes nuotėkio matuoklis kalibruojamas įmonėje „x“, kurioje palaikoma pastovi temperatūra ir santykinė oro drėgmė. Nėgana to, šiuolaikinių skaitmeninių nuotėkio matuoklių programinė įranga įgalina atlikti perdavimo charakteristikos korekciją, atsižvelgiant į aplinkos sąlygas.

Pjezoelektriniai slėgio keitikliai pasižymi histerize (rodmenų priklausomybe nuo slėgio kitimo krypties), todėl į šį paklaidų šaltinį būtina atsižvelgti, sudarant kalibravimo modelį. Histerezė įvertinama slėgį didinant ir mažinant ir lygi rodmenų, gautų didinant ir mažinant slėgį, skirtumui atskiruose taškuose.

Slėgio kalibratorių paklaida dėl skiriamosios gebos priimta laikyti jų žemiausiąją skiltį [3].

Kiti neapibrėžties sandai, t.y. $u(\rho_{sk})$ – etalono darbinio skysčio tankio įvertinimo ir $u(g_v)$ - Žemės traukos pagreičio (vietinio ir norminio) įvertinimo apskaičiuojami remiantis moksline informacija arba kalibravimų rezultatais.

3 formulėje pateiktas kalibravimo modelis naudojamas nuotėkio matuoklio manometrinio ir skirtuminio slėgio paklaidai nustatyti.

2.3.1. Matavimo neapibrėžties sandai

Atsitiktinės paklaidos dėl histerizės ir slėgio nuotėkio matuoklio padalos vertės turi stačiakampį sklaidos dėsnį, todėl jų standartinės neapibrėžtys gali būti paskaičiuojamos pagal atitinkamai 4 ir 5 formulę [31], kur d – slėgio nuotėkio matuoklio padalos vertė, h – kalibruojamojo taško histerizė.

$$u(\Delta p_{hist}) = \frac{h}{2\sqrt{3}} \quad (4)$$

$$u(\Delta p_{sg}) = \frac{d}{2\sqrt{3}} \quad (5)$$

Histerizė apskaičiuojama pagal 6 formulę, kur \bar{p}_{km} ir \bar{p}_{kd} – kalibruojamosios MP rodmenų vidutinės vertės, mažinant slėgį ir didinant slėgį, o \bar{p}_{em} ir \bar{p}_{ed} – etalono rodmenų vidutinės vertės, gaunamos mažinant ir didinant slėgį. Šie vidutiniai dydžiai gaunami n matavimo serijų metu.

$$h = (\bar{p}_{km} - \bar{p}_{em}) - (\bar{p}_{kd} - \bar{p}_{ed}) \quad (6)$$

Etalono standartinė neapibrėžtis $u(p_e)$ apskaičiuojama pagal formulę:

$$u(p_e) = \frac{U(p_e)}{k} \quad (7)$$

čia $U(p_{ei})$ – etalono išplėstinė neapibrėžtis iš kalibravimo liudijimo, k – aprėpties koeficientas, esant 95% pasikliautinumo lygmeniui. Etalono neapibrėžties tikimybinis pasiskirstymas – Gauso (normalusis).

Standartinė neapibrėžtis dėl aukščio skirtumo tarp etaloninės MP ir slėgio matuoklio $u(p_{\Delta H})$ bei standartinė neapibrėžtis dėl slėgio nuotėkio matuoklio dreifo (nominalios vertės paklaidos) $u(p_{dr})$ turi taip pat stačiakampį sklaidos dėsnį ir apskaičiuojami pagal 8 ir 9 formules, kur $spec$ – gamintojo specifikacija (tikslumo charakteristika):

$$u(p_{\Delta H}) = \frac{\rho_{sk} g_v \Delta H}{2\sqrt{3}} \quad (8)$$

$$u(p_{dr}) = \frac{spec}{\sqrt{3}} \quad (9)$$

Standartinė neapibrėžtis dėl rodmenų sklaidos $u(p_{rod})$ (eksperimentinis standartinis aritmetinio vidurkio nuokrypis) įvertinama remiantis 10 formule [29], kur $stdev$ – eksperimentinis standartinis nuokrypis, n – matavimų skaičius. Pataisos įvertinimo Δp eksperimentinis standartinis nuokrypis apskaičiuojamas pagal 11 formulę (tikimybinis pasiskirstymas – Gauso).

$$u(p_{rod}) = u(\bar{p}_k) = \frac{stdev}{\sqrt{n}} \quad (10)$$

$$u(\Delta p) = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\bar{p}_{k_i} - \bar{p}_e)^2 \quad (11)$$

Standartinė neapibrėžtis dėl etalono sisteminės paklaidos pataisos $u(\Delta p_{sis})$ pateikta 12 formulėje, kur Δp_{et} – etalono sisteminės paklaidos pataisa. Tikimybinis skirstinys – stačiakampis.

$$u(\Delta p_{sis}) = \frac{\Delta p_{et}}{2\sqrt{3}} \quad (12)$$

Suminė standartinė neapibrėžtis kiekviename kalibruojamame slėgio taške $u(p_{std})$ apskaičiuojama pagal 13 formulę [32].

$$u(p_{std}) = \sqrt{(u(\Delta p_{hist}))^2 + (u(\Delta p_{sg}))^2 + (u(p_e))^2 + (u(p_{\Delta H}))^2 \dots \dots + (u(p_{dr}))^2 + (u(p_{rod}))^2 + (u(\Delta p_{sis}))^2} \quad (13)$$

Išplėstinė matavimo neapibrėžtis kiekviename slėgio matavimo taške $U(p_{i\check{s}p})$ apskaičiuojama suminę standartinę neapibrėžtį $u(p_{std})$ padauginus iš $k = 2$ aprėpties daugiklio, kuris, esant normaliajam skirstiniui, atitinka 95 % pasikliautinumo lygmenį. 2-oje lentelėje pateikta kalibruojamosios MP įtakos koeficientų lentelė.

2 lentelė. Slėgio nuotėkio matuoklių kalibravimo įtakos koeficientų lentelė

Standartinės neapibrėžties sandas	Neapibrėžties šaltinis	Sando matematinė išraiška	Tikimybinis skirstinys	Įtakos koeficientai, W_i
A tipo				
$u(p_{rod}) = u(\bar{p}_k)$	Rodmenų sklaida	$\frac{stdev}{\sqrt{n}}$	Gauso	$W_1 = 1 + \frac{\rho_{sk} g_v \Delta H}{\bar{p}_e}$
$u(\Delta p)$	Pataisos įvertinimas	$\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\bar{p}_{k_i} - \bar{p}_e)^2$	Gauso	$W_2 = 1$
B tipo				
$u(p_e)$	Etalono neapibrėžtis	$\frac{U_e}{k}$	Gauso	$W_3 = 1$
$u(\Delta p_{dr})$	Dėl MP dreifo (gamintojo specifikacija)	$\frac{spec}{\sqrt{3}}$	Stačiakampis	$W_4 = 1$
$u(\Delta p_{sg})$	Dėl MP skiriamosios gebos	$\frac{d}{2\sqrt{3}}$	Stačiakampis	$W_5 = 1$
$u(\Delta p_{hist})$	Dėl MP histerizės	$\frac{h}{2\sqrt{3}}$	Stačiakampis	$W_6 = 1$
$u(p_{\Delta H})$	Dėl MP ir etalono aukščio skirtumo	$\frac{\rho g \Delta H}{2\sqrt{3}}$	Stačiakampis	$W_7 = \bar{p}_k \left(\frac{\rho_{sk} g_v}{\bar{p}_e} \right)$
$u(\Delta p_{sis})$	Dėl etalono sisteminės paklaidos	$\frac{\Delta p_{et}}{2\sqrt{3}}$	Stačiakampis	$W_8 = 1$

2.4. Etalonų parinkimas

Reikalavimas etalonui, kai jis naudojamas kalibruojant MP [32]:

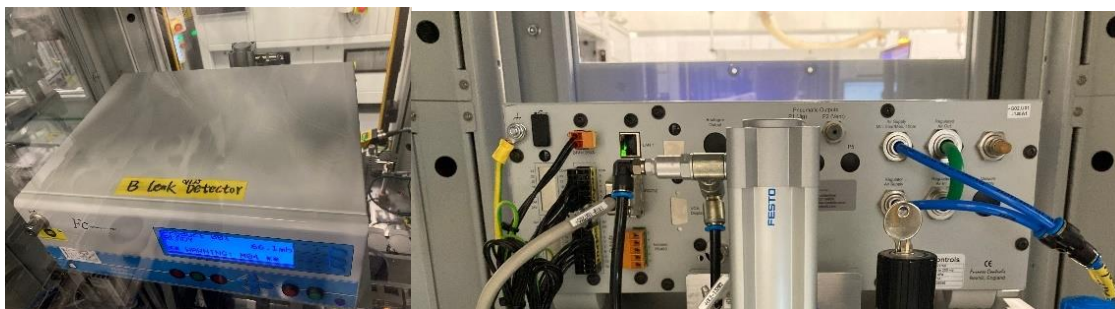
$$\frac{\Delta_e}{\Delta_l} = \frac{1}{3} \left(\frac{1}{2} \right) \quad (14)$$

Δ_e – etalono paklaida (sistemingoji paklaida + kalibravimo neapibrėžtis, jeigu matuojant atskaitome MP rodmenis, neįvedame jokių pataisų); Δ_l – matuojamojo parametro leistinasis nuokrypis. Iš pastarosios formulės matyti, kad etalonas privalo bent 2 (3) kartus būti tikslesnis negu kalibruojama matavimo priemonė.

Paprastai ši tikslumo santykio įvertinimo formulė slėgio matavimuose taikoma ties MP maksimalia matavimo reikšme (PS). Dažnu atveju pastebima, kad iš etalono kalibravimo liudijimo tokios pat kalibruoto taško vertės nerasime, kaip MP matavimo riba, todėl, galima interpoliuoti etalono paklaidų ir neapibrėžties regresinę tiesę ties norimais taškais. Regresinė tiesė gaunama mažiausių kvadratų metodu (15 formulė), kur n – tiesės taškų skaičius, a – adityvus tiesės lygties koeficientas, b – multiplikatyvus tiesės lygties koeficientas [33]. Interpoliuotos regresinės tiesės reikšmės, žinoma, priklauso nuo kalibruotų etalono taškų išdėstymo, todėl racionalu pasirinkti kalibruoti etaloną ties tais taškais, kuriuose jis bus daugiausiai naudojamas kalibruoti kitoms MP.

$$\begin{cases} na + b \sum_{i=1}^n x_i = \sum_{i=1}^n y_i \\ a \sum_{i=1}^n x_i + b \sum_{i=1}^n x_i^2 = \sum_{i=1}^n x_i y_i \end{cases} \quad (15)$$

Etalono parinkimo algoritmas kalibruojant slėgio MP, sudarytas tiriamojo projekto 2 metu, pateiktas 1 priede. Remiantis šiuo algoritmu buvo parinkta etaloninė kalibravimo įranga slėgio nuotėkio matuokliams (10 pav.).



10 pav. Furness Controls FC0750 nuotėkio matuoklis



11 pav. Druck DPI705E slėgio kalibratorius

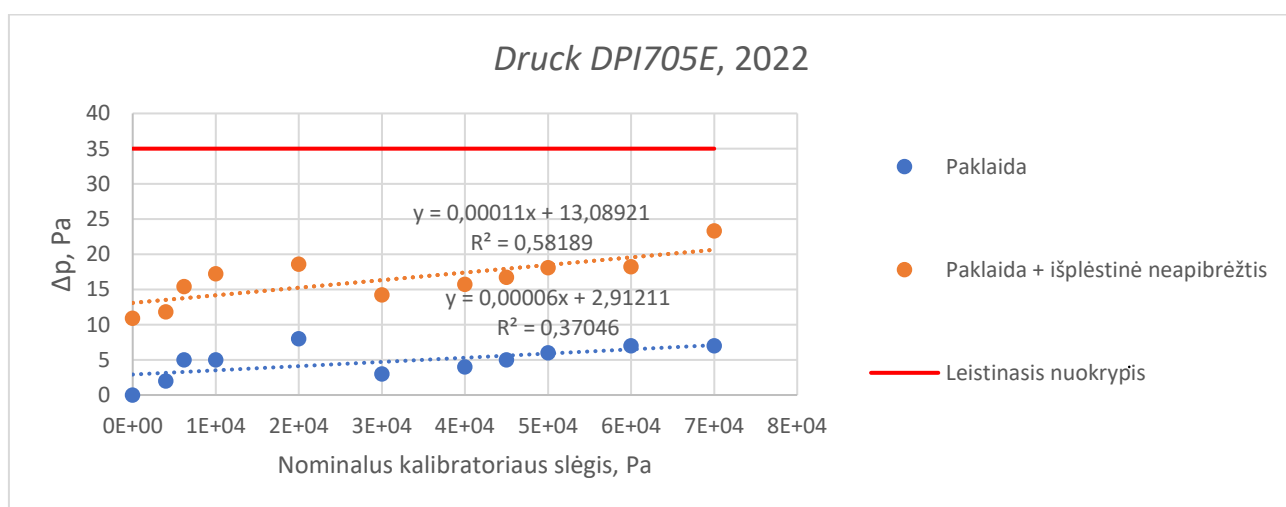
Manometriniam SNM slėgiui parinktas *Druck DPI 705E* (11 pav.) etaloninis slėgio kalibratorius, kurio gamintojo deklaruojamas tikslumas yra 0,05 % PS. Kadangi *DPI 705E* maksimalus matuojamas slėgis yra 700 mbar ($7 \cdot 10^4$) Pa, jo leistinasis nuokrypis apskaičiuojamas $7 \cdot 10^4 \text{ Pa} \cdot (0,05 \% / 100 \%) = 35 \text{ Pa}$. Tuo tarpu didžiausia slėgio kalibratoriaus paklaida matoma ties matavimo riba ir lygi sisteminės paklaidos bei išplėstinės neapibrėžties sumai, kuri apskaičiuojama $\Delta_{eDPI}max = 7 \text{ Pa} + 16,3 \text{ Pa} = 23,3 \text{ Pa} < 35 \text{ Pa}$. Iš pateiktų išorinės kalibravimo laboratorijos kalibravimo duomenų 12 pav. ir 2 priede, galima teigti, kad prietaisas telpa į deklaruojamo tikslumo ribas visame matavimo diapazone (todėl etalono derinimas nėra būtinas) ir priemonė tinkama SNM manometrinio slėgio kalibravimui.

Remiantis kalibravimo liudijimo duomenimis, apskaičiuota etalono sisteminė paklaida ties kalibruojamais manometriniu slėgio *Furness Controls FCO750* taškais, interpoliavus regresinę tiesę lygtį. Pavyzdžiui, ties 5000 Pa tašku, etalono paklaida (sisteminė paklaida + išplėstinė neapibrėžtis) apskaičiuota $\Delta_{eDPI}5kPa = 0,3 \text{ Pa} + 2,9 \text{ Pa} = 3,2 \text{ Pa}$. Etalono sisteminės paklaidos skaičiavimo rezultatai pateikti 3 lentelėje.

0 Pa kalibravimo taške sisteminė etalono paklaida (*Druck DPI705E* ir *Additel ADT681-DP* etaloninių MP) visuose tolimesniuose skaičiavimuose priimta lygi nuliui.

3 lentelė. Etalono paklaida ties kalibruojamais manometriniu slėgio *Furness Controls FCO750* matuoklio taškais, matavimo diapazone 10–100 % PS

Kalibruojamas manometrinis slėgis, $\cdot 10^2 \text{ Pa}$	0	40	80	120	160	200
Kalibratoriaus sisteminė paklaida, Pa	0,0	3,2	3,4	3,6	3,9	4,1
Kalibratoriaus išplėstinė neapibrėžtis, Pa	10,2	10,4	10,6	10,8	11,0	11,2

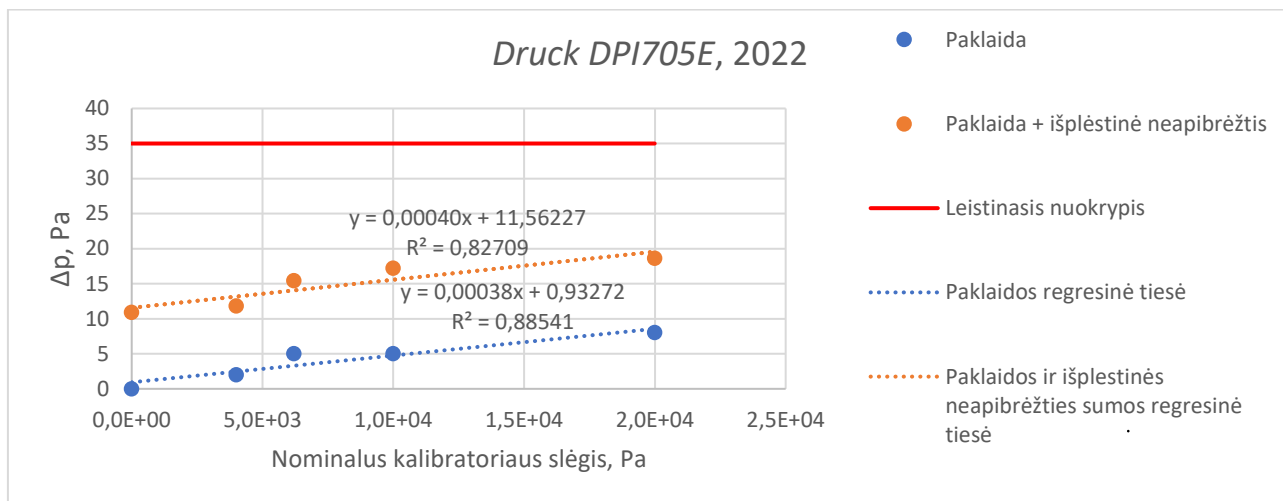


12 pav. Etaloninio slėgio kalibratoriaus kalibravimo rezultatai (1)

Kadangi 12 paveiksle pateiktas paklaidos R^2 kriterijus yra pakankamai žemas (0,37046), regresinė tiesė tinkamai neatspindi paklaidos priklausomybės visame kalibratoriaus matavimo diapazone, o

FCO750 matuoklis bus kalibruojamas iki maksimalios, $2 \cdot 10^4$ Pa ribos, vadinasi, slėgio kalibratoriaus paklaidos apskaičiuojamos iš regresinės tiesės, pavaizduotos 13 paveiksle. Gauti interpoliuotos regresinės tiesės paklaidos rezultatai pateikti 4 lentelėje. Palyginus 3 ir 4 lentelės duomenis, pastarųjų tiesių R^2 kriterijus skiriasi daugiau nei dvigubai.

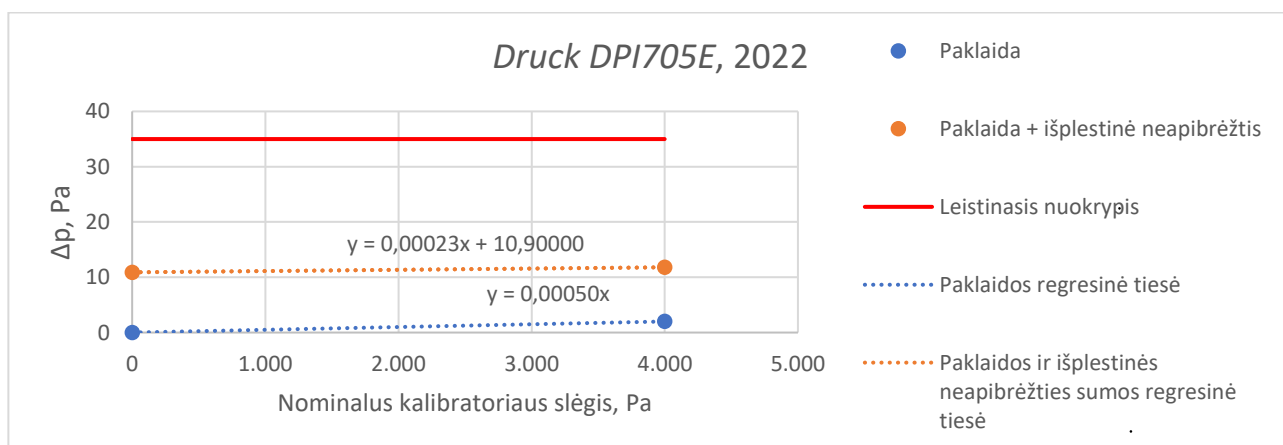
5-oje lentelėje pateikta slėgio kalibratoriaus sisteminė paklaida 0–10 % PS nuotėkio matuoklio matavimo diapazone (žr. 14 pav.).



13 pav. Etaloninio slėgio kalibratoriaus kalibravimo rezultatai (2)

4 lentelė. Etalono paklaida ties kalibruojamais manometriniu slėgio *Furness Controls FCO750* matuoklio taškais, matavimo diapazone 10–100 % PS

Kalibruojamas manometrinis slėgis, $\cdot 10^2$ Pa	0	40	80	120	160	200
Kalibratoriaus sisteminė paklaida, Pa	0,0	2,5	4,0	5,5	7,0	8,5
Kalibratoriaus išplėstinė neapibrėžtis, Pa	10,6	10,7	10,8	10,9	11,0	11,0



14 pav. Etaloninio slėgio kalibratoriaus kalibravimo rezultatai (3)

5 lentelė. Etalono paklaida ties kalibruojamais manometrinio slėgio *Furness Controls FCO750* matuoklio taškais, matavimo diapazone 0–10 % PS

Kalibruojamas manometrinis slėgis, Pa	0	200	400	600	800	1000	1200	1400	1600	1800	2000
Kalibratoriaus sisteminė paklaida, Pa	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
Kalibratoriaus išplėstinė neapibrėžtis, Pa	10,6	10,6	10,6	10,6	10,6	10,7	10,7	10,7	10,7	10,7	10,7

Taip pat tokiu pat principu etalono sisteminė paklaida apskaičiuota ties kalibruojamais *ATEQ F620* manometrinio slėgio taškais, pateiktais 6 lentelėje. Kadangi etaloninis slėgio kalibratorius geba matuoti iki $7 \cdot 10^4$ mbar ir *ATEQ* nuotėkio matuoklis sukelia manometrinių slėgių testuojamoje detalėje maksimaliai taip pat iki $7 \cdot 10^4$ Pa, atitinkamai parinkti kalibravimo taškai, pagal 12 paveikslą.

6 lentelė. Etalono paklaida ties kalibruojamais manometrinio slėgio *ATEQ F620* matuoklio taškais

Kalibruojamas manometrinis slėgis, $\cdot 10^2$ Pa	0	140	280	420	560	700
Kalibratoriaus sisteminė paklaida, Pa	0,0	3,8	4,6	5,4	6,3	7,1
Kalibratoriaus išplėstinė neapibrėžtis, Pa	10,2	10,3	10,5	10,6	10,7	10,9

Gamintojo specifikacija nurodo [8], kad *Furness Controls FCO750* leistinasis nuokrypis maksimaliam manometriniams PS slėgiui 10–100 % PS diapazone yra lygus 1 % rodmens + 1 padalos vertė ($d = 10$ Pa), kas atitinkamai yra $\Delta_l FCO750 = 2 \cdot 10^4 \text{ Pa} \cdot 1 \% / 100 \% + 10 \text{ Pa} = 210 \text{ Pa}$ (3 priedas). Santykis $\Delta_{eDPI} \max / \Delta_l FCO750 = 0,09 < 0,33$ (0,5). Vadinasi, etaloninis slėgio kalibratorius ~10 kart tikslesnis 10–100 % PS diapazone negu manometrinis *FCO750* slėgio nuotėkio matuoklio slėgis. 0 – 10 % PS diapazone manometrinio slėgio tikslumas nurodytas 0,1 % PS + 1 Pa, iš to seka, kad šiame diapazone $\Delta_l FCO750 = 21 \text{ Pa}$, o santykis $\Delta_{eDPI} 2kPa / \Delta_l FCO750 = 0,48 > 0,5$. Vadinasi, neapibrėžčių santykis yra žemesnis nei rekomenduojamas šiame diapazone, todėl tikėtina, kad sukalibravus nuotėkio matuoklį *Druck* etalonu, paklaida viršys leistinąją, dėl to skaičiuojama klaidingo rezultato tikimybė ir atliekamas MP derinimas.

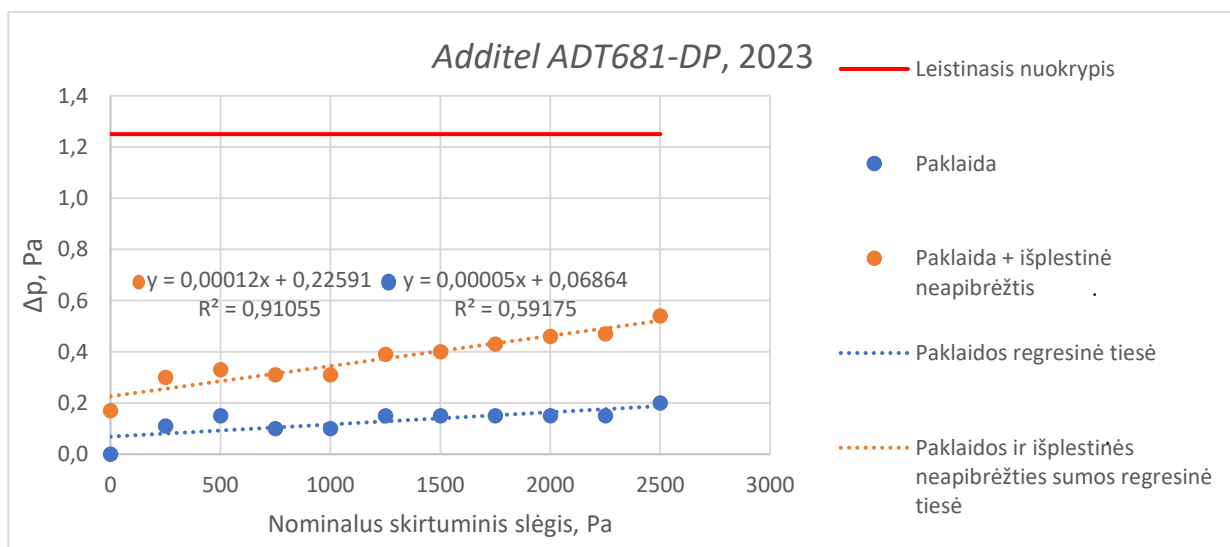
Remiantis *ATEQ F620* techniniu pasu [7], leistinasis nuokrypis $7 \cdot 10^4$ Pa manometriniams slėgiui yra lygus 1,5 % rodmens + 7,5 hPa padalos vertė ($d = 10$ Pa), kas atitinkamai yra $\Delta_l F620 = 7 \cdot 10^4 \text{ Pa} \cdot 1,5 \% / 100 \% + 750 \text{ Pa} = 1800 \text{ Pa}$ (4 priedas). Santykis $\Delta_{eDPI} \max / \Delta_l F620 = 0,01 < 0,33$ (0,5). Vadinasi, etaloninis slėgio kalibratorius apie 100 kartų tikslesnis negu sukeliamas manometrinis *F620* slėgio nuotėkio matuoklio slėgis.

Tuo tarpu *Additel ADT681-DP* (15 pav.) etaloniniu skirtuminio slėgio matuoklio (slėgio kalibratoriaus) deklaruojamas tikslumas taip pat yra 0,05 % PS [34]. Prietaiso maksimalus matuojamas slėgis yra ± 25 mbar (± 2500 Pa). Iš gamintojo kalibravimo duomenų, pateiktų 16-18 pav.

ir 5 priede, galima teigti, kad prietaisas taip pat telpa į deklaruojamo tikslumo ribas (didžiausia etalono paklaida yra lygi $\Delta_{eDif}max = 0,54$ Pa ir mažesnė nei 1,25 Pa leidžiamosios, žr. 7 – 9 lenteles).



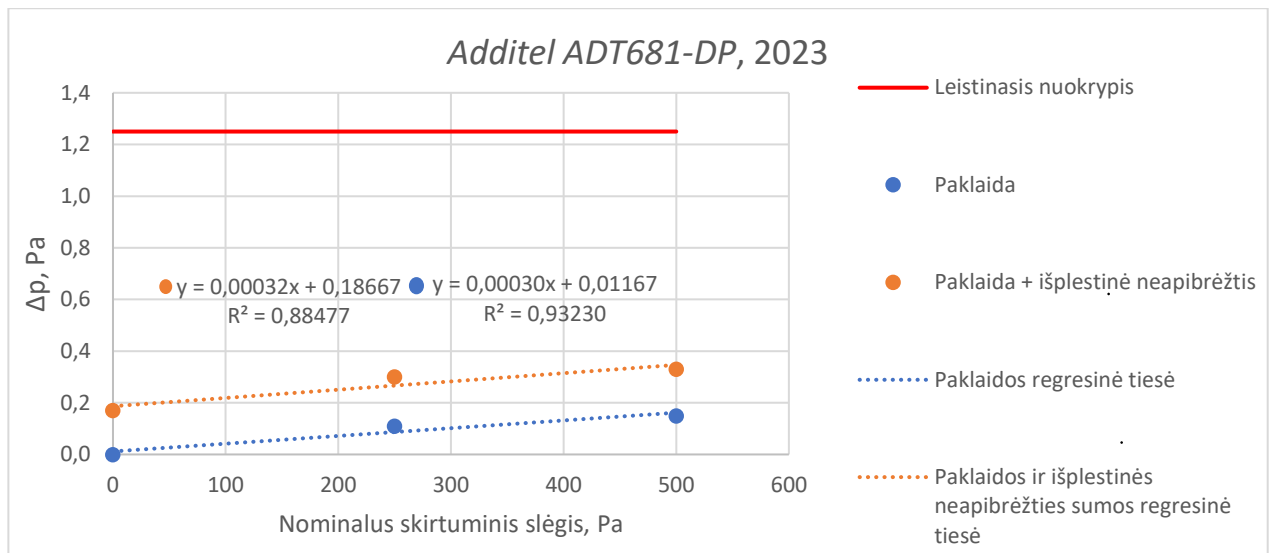
15 pav. Additel ADT681-DP skirtuminio slėgio matuoklis



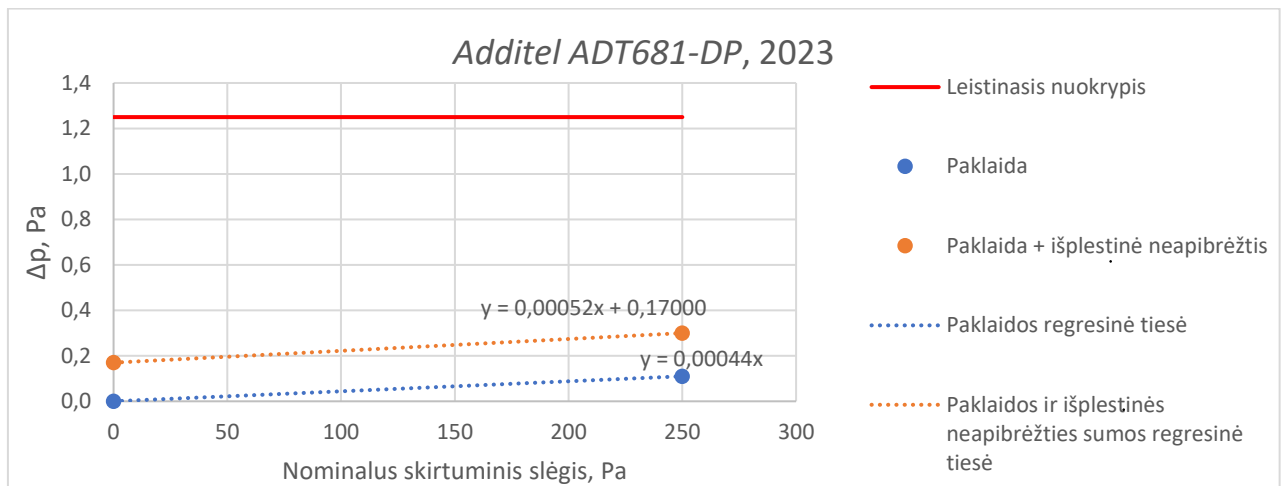
16 pav. Etaloninio skirtuminio slėgio matuoklio kalibravimo rezultatai (1)

7 lentelė. Etalono paklaida ties kalibruojamais skirtuminio slėgio *Furness Controls FCO750* matuoklio taškais, matavimo diapazone 10–100 % PS

Kalibruojamas skirtuminis slėgis, Pa	0	400	800	1200	1600	2000
Etaloninio DP sisteminė paklaida, Pa	0,00	0,09	0,11	0,13	0,15	0,17
Etaloninio DP išplestinė neapibrėžtis, Pa	0,16	0,19	0,21	0,24	0,27	0,30



17 pav. Etaloninio skirtuminio slėgio matuoklio kalibravimo rezultatai (2)



18 pav. Etaloninio skirtuminio slėgio matuoklio kalibravimo rezultatai (3)

8 lentelė. Etalono paklaida ties kalibruojamais skirtuminio slėgio *Furness Controls FCO750* matuoklio taškais matavimo diapazone 0–10 % PS

Kalibruojamas skirtuminis slėgis, Pa	0	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200
Etaloninio DP sisteminė paklaida, Pa	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
Etaloninio DP išplėstinė neapibrėžtis, Pa	0,17	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18

Furness Controls FCO750 leistinasis nuokrypis maksimaliam skirtuminiam PS slėgiui [8] yra lygus 1 % rodmens + 1 padalos vertė ($d = 1 \text{ Pa}$), kas atitinkamai yra $\Delta_l FCO750 = 2000 \text{ Pa} \cdot 1 \% / 100 \% + 1 \text{ Pa} = 21 \text{ Pa}$ (3 priedas). Etalono paklaida (sisteminės paklaidos + išplėstinės neapibrėžties) 2000 Pa taške $\Delta_{eDiff} 2kPa = 0,46 \text{ Pa}$. Santykis $\Delta_{eDiff} 2kPa / \Delta_l FCO750 = 0,022 < 0,33 (0,5)$. Vadinasi, etaloninis skirtuminio slėgio matuoklis ~45 kart tikslesnis 10–100 % PS diapazone negu *FCO750*

matuojamas skirtuminis slėgis. 0–10 % PS diapazone $\Delta_l FCO750$ tikslumas yra lygus 0,1 % PS + 1 Pa = 3 Pa, santykis $\Delta_{eDiff}200Pa / \Delta_l FCO750 = 0,11 < 0,33$ (0,5) (~10 kart didesnis etalono tikslumas).

9 lentelė. Etalono paklaida ties kalibruojamais skirtuminio slėgio *ATEQ F620* matuoklio taškais

Kalibruojamas skirtuminis slėgis, Pa	0	100	200	300	400	500
Etaloninio DP sisteminė paklaida, Pa	0,00	0,04	0,07	0,10	0,13	0,16
Etaloninio DP išplėstinė neapbrėžtis, Pa	0,17	0,18	0,18	0,18	0,18	0,19

ATEQ F620 leistinasis nuokrypis [7] 500 Pa skirtuminiui slėgiui yra lygus 2,5 % rodmens + 1 Pa (padalos vertė $d = 1$ Pa), kas atitinkamai yra $\Delta_l F620 = 500 \text{ Pa} \cdot 2,5 \% / 100 \% + 1 \text{ Pa} = 13,5 \text{ Pa}$ (4 priedas). Tuo tarpu etalono paklaida (sisteminės paklaidos + išplėstinės neapibrėžties) 500 Pa taške $\Delta_{eDiff}500Pa = 0,35 \text{ Pa}$ (16 pav.). Santykis $\Delta_{eDiff}500Pa / \Delta_l F620 = 0,026 < 0,33$ (0,5). Vadinasi, etaloninis slėgio kalibratorius ~38 kartus tikslesnis negu skirtuminis *F620* slėgio nuotėkio matuoklio slėgis.

Išvados

Tyrimui naudojami etalonai – *Druck DPI705E* 0,05 % tiksl. kl. slėgio kalibratorius, kurio matavimo ribos (0– $7 \cdot 10^5$) Pa; skirtuminio slėgio matuoklis *Additel ADT681-DP*, kurio tikslumo klasė 0,05 %, matavimo ribos ± 2500 Pa.

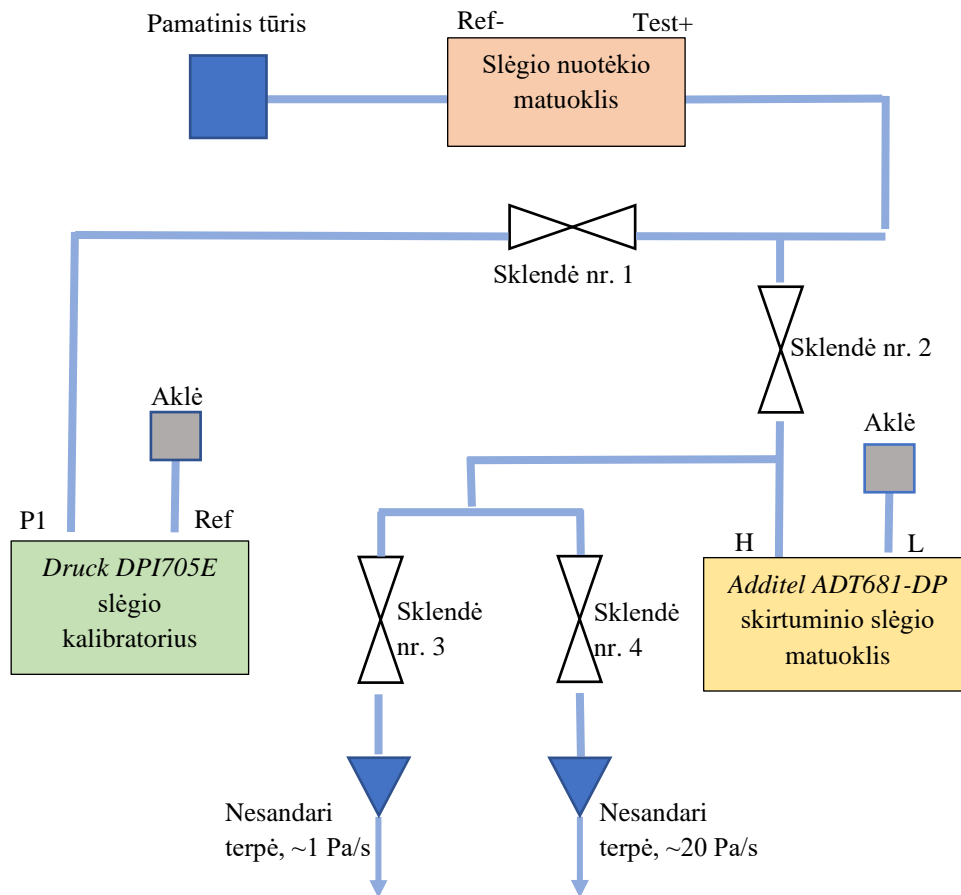
Remiantis atlikta etalono sisteminės paklaidos analize, į kalibruojamą MP matavimo rezultatą įvedama etalono sisteminės paklaidos pataisa, tokiu būdu užtikrinamas reikalaujamas etalono išplėstinės neapibrėžties ir MP leistinosios paklaidos santykis.

2.5. Matavimo metodo realizavimo schema

Realizuota matavimo schema naudojant parinktus etalonus slėgio nuotėkio MP kalibravimui (19 pav.). Ji susideda iš kalibruojamosios MP – slėgio nuotėkio matuoklio (išėjimo jungtys *Ref-* ir *Test+*), skirtuminio slėgio matuoklio (jungtys *H* ir *L*), slėgio kalibratoriaus (jungtys *P1* ir *Ref*), pneumatinių žarnelių, dviejų aklių, keturių sklendžių ir dviejų nesandarių terpių (20 pav.).

Slėgio nuotėkio matuoklio manometriniu slėgio kalibravimui *Druck* kalibratoriumi, sklendės nr. 2, 3 ir 4 uždaromos. Atidaroma tik sklendė nr. 1, kuri tiesiogiai sujungta su *Test+* SNM matuoklio jungtimi, per kurią sukuriamas slėgis sistemoje nuotėkio matuokliu. *Druck* slėgio kalibratoriaus *Ref* jungtis lieka užaklinta visų matavimų metu. Slėgio reikšmės fiksuojamos tik MP stabilizavimo fazės metu.

Atlikus matavimus manometriniui slėgiui, pereinama prie diferencinio slėgio matavimų. Uždaroma sklendė nr. 1, tada atidaroma sklendė nr. 2, tačiau sklendės nr. 3 ir 4 lieka uždarytos. *Additel* skirtuminio slėgio matuoklio *L* jungtis lieka užaklinta visų matavimų metu. Slėgio nuotėkio matuoklyje nustatomas sandarumo testas. Jo metu, sistema prisipildo slėgio (nustatoma ne daugiau 25 mbar, t.y. *ADT681-DP* matavimo ribos).



19 pav. Matavimo schema

Po stabilizavimo fazės, prasideda SNM testavimo fazė, kurios metu atidaroma 3 arba 4 sklendė, priklausomai nuo to, kaip greitai ir tiksliai norime pasiekti atitinkamą slėgio nuotėkio kalibravimo tašką. Galima miksuoti nuotėkius, pavyzdžiui, atidaryti sklendę nr. 4 ir matavimo pradžioje naudoti grubesnę nuotėkį, o kai slėgio nuotėkio reikšmė priartėja prie kalibruojamojo taško, galima uždaryti sklendę nr. 4 ir priartėti prie kalibruojamo slėgio taško glotnesniu nuotėkiu per sklendę nr. 3.



20 pav. Nesandarių terpų sistema, atskirta sklendėmis

Verta paminėti, kad kalibruojant SNM skirtuminį slėgį, slėgis, kuris sudaromas sistemoje, neturi įtakos skirtuminio slėgio matavimo rezultatui. Natūralu, kad kuo didesnis sukeltas slėgis – tuo didesnis nuotėkio greitis. Rekomenduotina parinkti tokią nesandarią terpę, kurios tolygiai, kuo pastovesniu srautu, oras nutekėtų [13]. Todėl reiktų racionaliai įvertinti, kokį slėgį reiktų sukelti

sistemoje ir koku greičiu fiksuoti skirtuminį slėgį *Additel* matuokliu ir jį palyginti su SNM, atsižvelgiant į gamintojo nurodymus, MP darbinės sąlygas ir reikalaujamą tikslumą.

FCO750 ir *F620* tipų SNM kalibravimui parinktos atitinkamos nesandarios terpės, kurių nuotėkio greičiai ~1 Pa/s ir ~20 Pa/s (išmatuoti bandymų keliu), matavimo schema ir *Additel* etalonas įgalina atlikti iki 2500 Pa diferencinio slėgio matavimo.

Išvados

ATEQ F620 ir *Furness Controls FCO750* 10–100 % maks. diapazone kalibravimas atliekamas vienu matavimo ciklu šešiuose skirtinguose taškuose, didinant ir mažinant slėgį. Matavimų skaičius viename taške $n = 3$.

Furness Controls FCO750 0–10 % maks. diapazone kalibravimas atliekamas vienu matavimo ciklu 11-oje slėgio taškų didinant ir mažinant slėgį. Matavimų skaičius viename taške $n = 3$.

Metodams realizuoti pasirinktomis priemonėmis sudaryta matavimo schema, kuri pritaikyta darbinėms terpėms diferenciniam ir manometriniams slėgiams matuoti.

Atlikta paklaidų analizė leido išskirti suminės slėgio matavimo neapibrėžties dedamąsias. Jų įtaka skirtingo tikslumo objektams toliau bus tiriamos darbe.

3. Tyrimo rezultatai ir jų analizė

Kalibravimo procedūra susideda iš šių etapų:

- etalonų parinkimas;
- aplinkos sąlygų užtikrinimas ir fiksavimas;
- etalonų ir MP paruošimas kalibravimui ir regimoji kontrolė;
- matavimo schemas realizavimas;
- kalibravimo pataisos (slėgio vienetais) įvertinimas;
- kalibravimo neapibrėžties (slėgio vienetais) įvertinimas;
- kalibravimo periodiškumo įvertinimas.

Aplinkos sąlygos – aplinkos temperatūra SNM kalibravimo ir eksploatavimo metu yra (20 ± 3) °C. Termometro išplėstinė kalibravimo neapibrėžtis neturi viršyti 0,5 °C, kai $k = 2$. Prieš atliekant matavimus, *Druck* ir *Additel* etalonišose MP nustatoma „nulinio“ vertė.

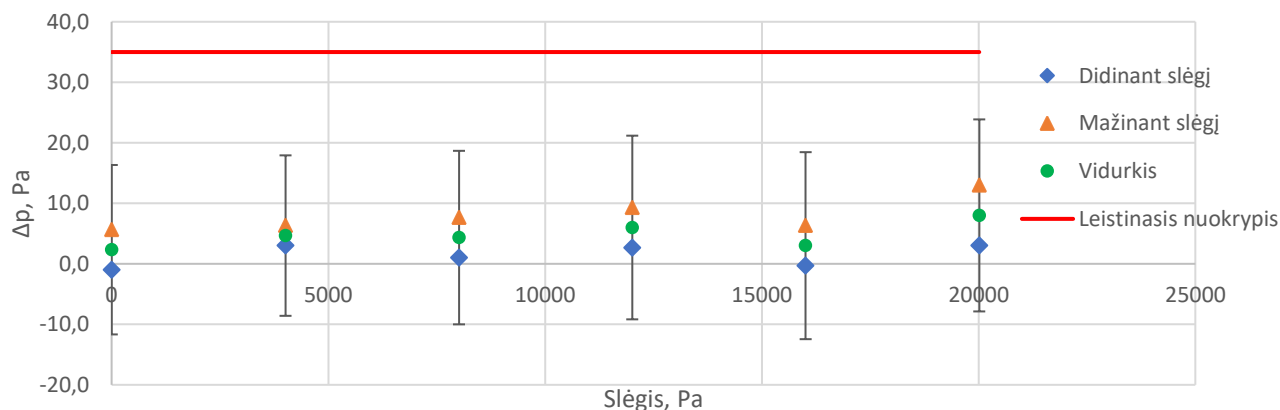
Kitos sąlygos – tariama, kad slėgio nuotėkio matuokliai kalibruojami ir eksploatuojami tomis pačiomis sąlygomis, todėl galima laikyti, kad vietiniai Žemės traukos pagreičiai lygūs. Etalonišio ir kalibruojamo manometrų slėgio stulpelių aukščių skirtumas $\Delta H \geq 0$. Eksperimentinių matavimų metu slėgio stulpelių aukščių skirtumas bei temperatūros pokytis buvo lygūs 0, todėl su šiais dydžiais susijusių neapibrėžčių sandai yra paneigtinai maži, todėl supaprastintas kalibravimo modelis pateiktas 16 formulėje.

$$\Delta p = \bar{p}_e - \bar{p}_k + \Delta p_{hist} + \Delta p_{sg} + \Delta p_{sis} + \Delta p_{dr} \quad (16)$$

3.1. Kalibravimo rezultatai

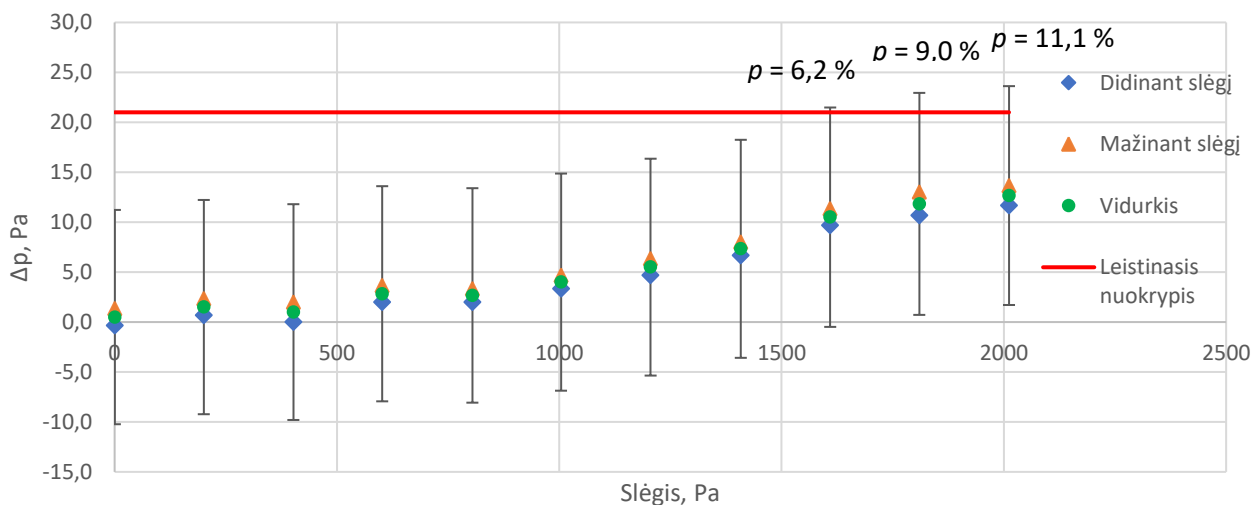
3.1.1. Furness Controls FCO750 kalibravimo rezultatai

Slėgio nuotėkio matuoklio manometrinio slėgio 0,1 % ir 1 % tikslumo srityse kalibravimo rezultatai pateikti 6 priede bei 21–23 paveiksluose. Gautiems SNM rezultatams pritaikyta sprendimo taisyklė (MP sisteminė paklaida+išplėstinė neapibrėžtis neviršija gamintojo nurodytos specifikacijos). Pastaruosiuose ir tolimesniuose kalibravimo rezultatų paveiksluose simbolis „ \pm “ atitinka išplėstinės neapibrėžties skaitinę vertę.



21 pav. Furness Controls FCO750 manometrinio slėgio 10–100 % PS diapazone kalibravimo rezultatai

Sukalibravus SNM 6-uose taškuose 1 % slėgio diapazone, MP manometrinio slėgio išplėstinė neapibrėžtis gauta $\pm 14,0$ – $21,6$ Pa, o sisteminė paklaida kinta nuo 3 iki 8 Pa (10 lent.), todėl, galima teigti, kad SNM neviršija leistinojo 35 Pa nuokrypio (21 pav.).

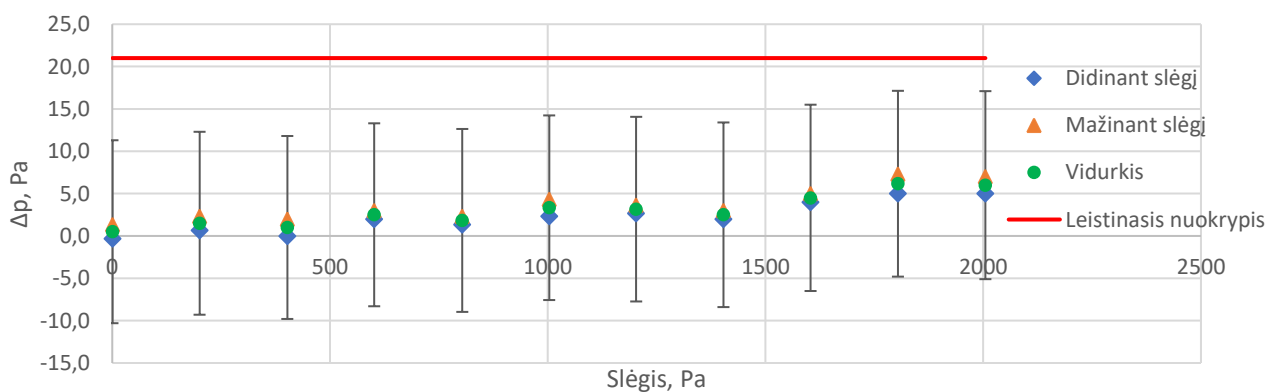


22 pav. *Furness Controls FCO750* manometrinio slėgio 0–10 % PS diapazone kalibravimo rezultatai (1)

Iš kalibravimo, kuris atliktas remiantis standartine procedūra, duomenų (0,1 % tikslumo diapazone) pastebima, kad MP viršija leistiną nuokrypi nuo 1600 Pa manometrinio slėgio kalibruojamo taško (22 pav.). Todėl apskaičiuotas diskretinis dydis α (17 formulė) pagal OIML G19 [35], kur Δ – sistemingoji MP paklaida, u – suminė standartinė neapibrėžtis.

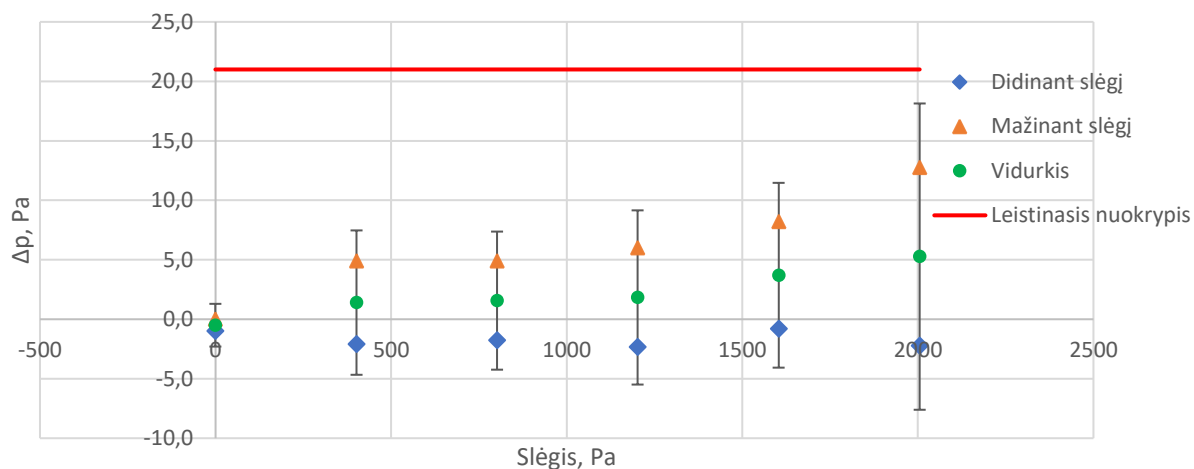
$$\alpha = [(MLP - \Delta)/u] \quad (17)$$

Pagal apskaičiuotą α randamas ieškomas plotas po normaliojo pasiskirstymo kreive (atitinkamuose kalibravimo taškuose) iš standartinės normaliojo dėsnio lentelės (7 priedas). Tada surandama visos skaičiuojamosios srities vertė ir klaidingo rezultato tikimybė p (optimali priimtina tikimybė iki 10 %). Kadangi tikimybė p pakankamai aukšta (22 pav.) ir kinta nuo 6,2 % iki 11,1 %, nuspręsta atlikti MP derinimą – tokiu būdu sumažinama sisteminė nuotėkio matuoklio paklaida ir išplėstinė neapibrėžtis (MP dreifo standartinės neapibrėžties sandas priimamas 0, žr. 3.1.3 skyrių). Rezultatai po MP derinimo pateikti 23 paveiksle ir 8 priede.

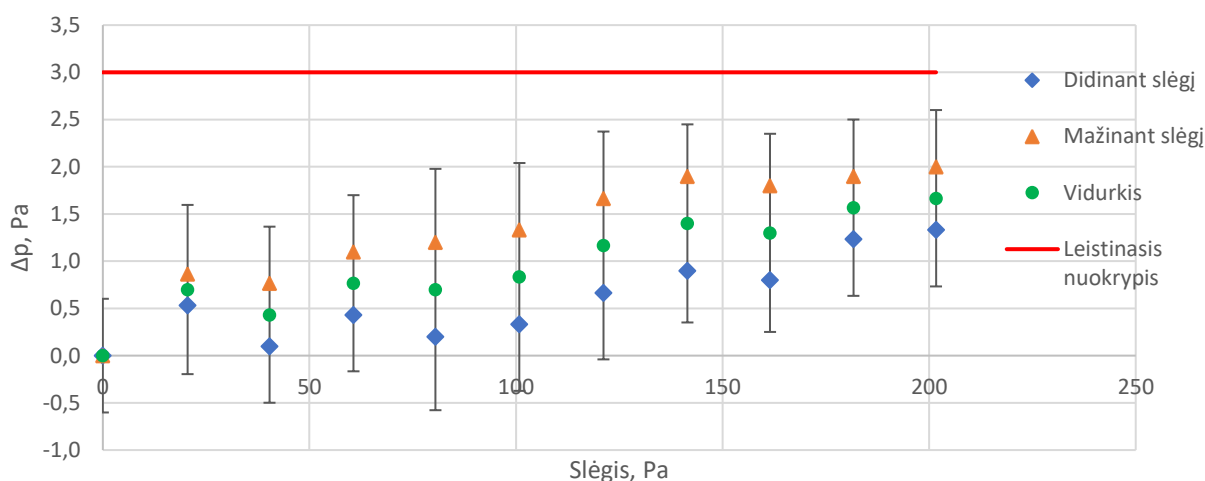


23 pav. *Furness Controls FCO750* manometrinio slėgio 0–10 % PS diapazone kalibravimo rezultatai (2)

Slėgio nuotėkio matuoklio skirtuminio slėgio 0,1 % ir 1 % tikslumo srityse kalibravimo rezultatai pateikti bei 24–25 paveiksluose bei 8 priede. Rezultatai rodo, kad pjezoelektriniam skirtuminio slėgio keitikliui būdinga reikšminga histerizė.



24 pav. *Furness Controls FCO750* skirtuminio slėgio 10–100 % PS diapazone kalibravimo rezultatai



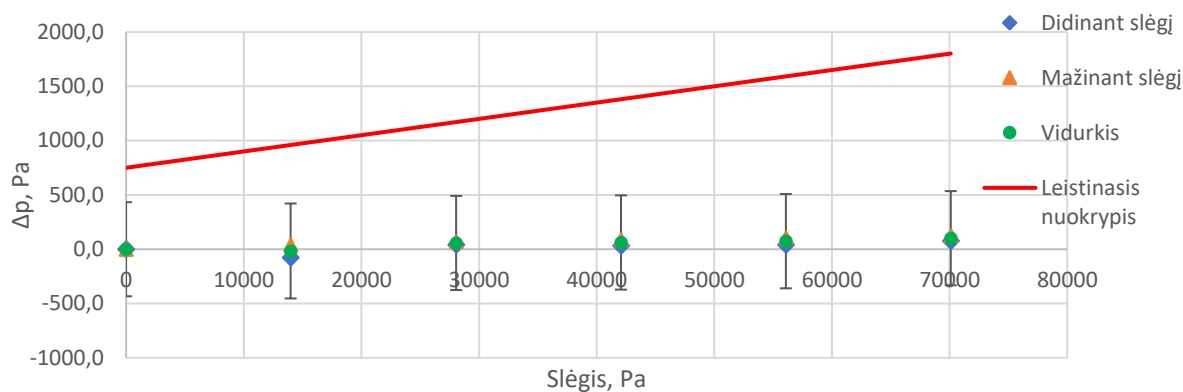
25 pav. *Furness Controls FCO750* skirtuminio slėgio 0–10 % PS diapazone kalibravimo rezultatai

Išvados

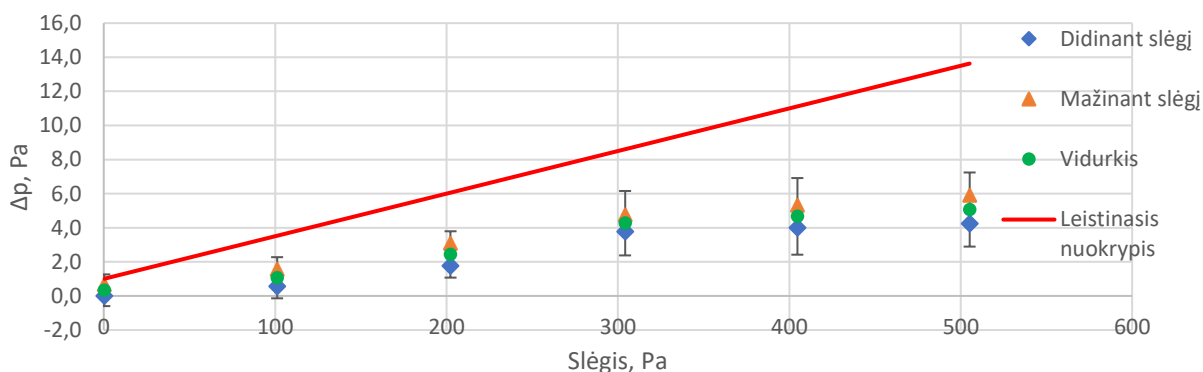
Atliktas *Furness Controls FCO750* kalibravimas skirtingų tikslumų srityse: 0–100 % PS ir 10–100 % PS. Nustatytos ir fiksuotos sąlygos, prie kurių MP kalibravimo rezultatai neviršija gamintojo deklaruojamų tikslumo reikalavimų manometriniams ir skirtuminiams slėgiui. Nustatytos neapibrėžties mažinimo galimybės.

3.1.2. ATEQ F620 kalibravimo rezultatai

ATEQ F620 slėgio nuotėkio matuoklio manometrinių ir skirtuminių slėgių kalibravimo rezultatai pateikti 26 ir 27 paveiksluose ir 9 priede. Kalibravimas atliktas remiantis bazine procedūra. Manometrinių slėgių išplėstinė neapibrėžtis siekia ± 433 – 437 Pa, o skirtuminių slėgių $\pm 0,47$ – $1,09$ Pa. Sisteminė MP paklaida atitinkamai 0–102 Pa ir 0–5 Pa.



26 pav. ATEQ F620 manometrinio slėgio kalibravimo rezultatai



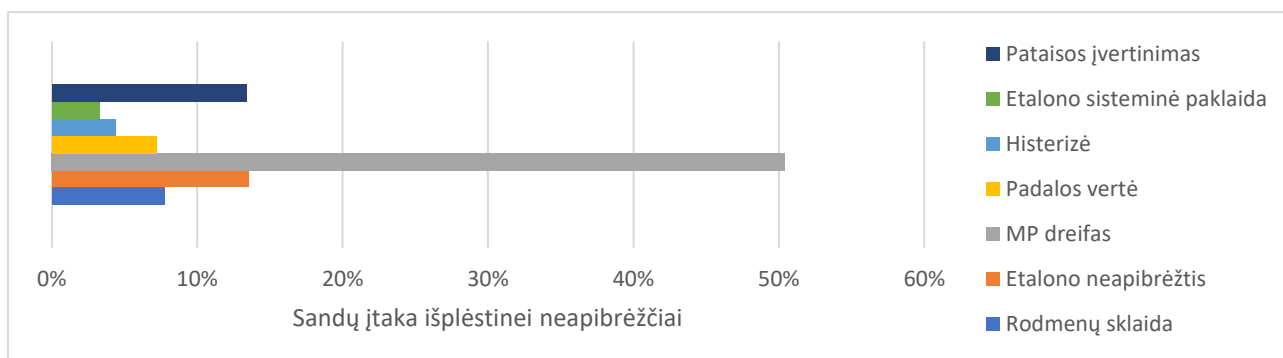
27 pav. ATEQ F620 skirtuminio slėgio kalibravimo rezultatai

Išvados

Atliktas ATEQ F620 slėgio nuotėkio matuoklio manometrinio (1,5 % tiksl. kl.) ir diferencinio (2,5 % tiksl. kl.) slėgių kalibravimas. Nustatytos ir fiksuotos sąlygos, prie kurių MP kalibravimo rezultatai neviršija gamintojo deklaruojamų tikslumo reikalavimų manometriniams ir skirtuminiams slėgiui.

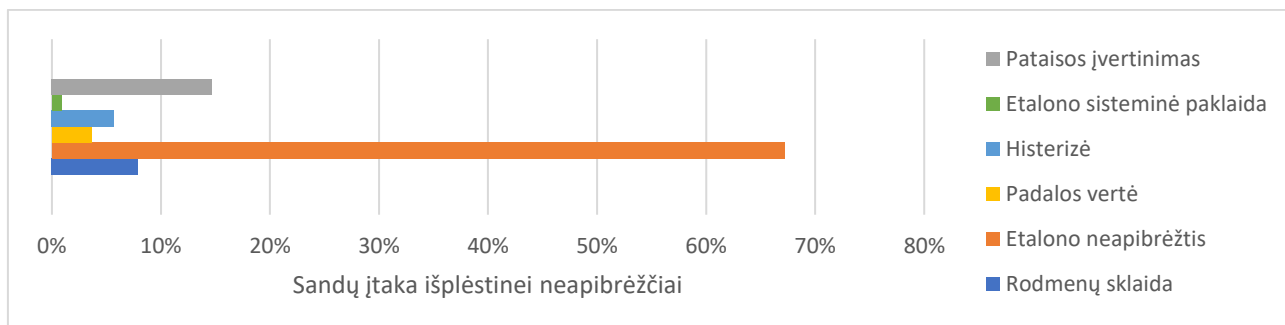
3.1.3. Sandų įtaka išplėstinei neapibrėžčiai

FCO750 ir F620 nuotėkio matuoklių tipai yra skirtingų tikslumo klasių, vadinasi, jų standartinių neapibrėžčių sandų įtaką išplėstinei neapibrėžčiai yra skirtinga. 28 paveiksle pavaizduota sandų įtaka (procentais) FCO750 matuokliui, 1 % manometrinio slėgio srityje.



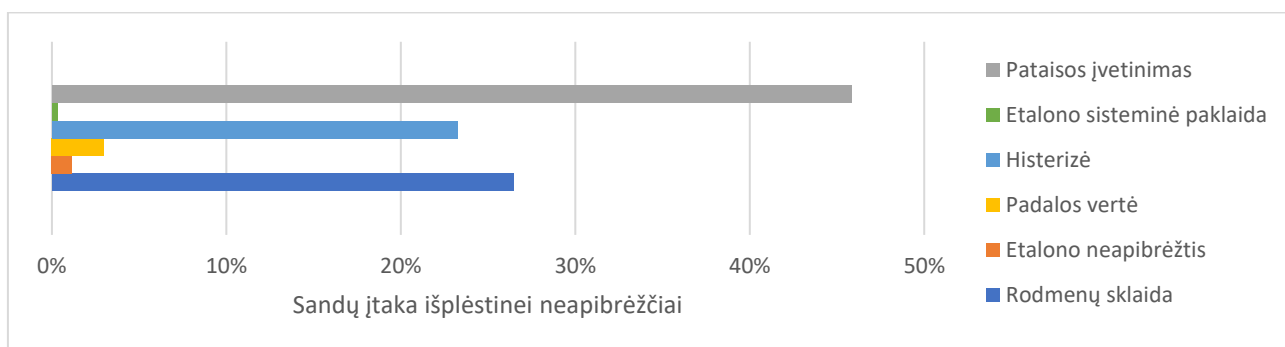
28 pav. Furness Controls FCO750 manometrinio slėgio sandų įtaka išplėstinei neapibrėžčiai 10–100 % PS diapazone (1)

Didžiausią įtaką turi MP dreifo sandas, kuris apibūdina SNM tiksluminių charakteristikų dreifą. Šis sandas dominuoja visuose tirtuose slėgio nuotėkio matuokliuose. Tačiau *ATEQ* ir *Furness Controls* MP pasižymi slėgio derinimo galimybėmis, todėl, kalibravimo metu, laike atsirandanti SNM sisteminė paklaida yra sumažinama arba panaikinama. Vadinasi, šį sandą galima laikyti nereikšmingu. Sandų įtaka išplėstinei neapibrėžčiai be dreifo sando *FCO750* 1 % srityje pateikta 29 pav. ir tolimesniuose paveiksluose.

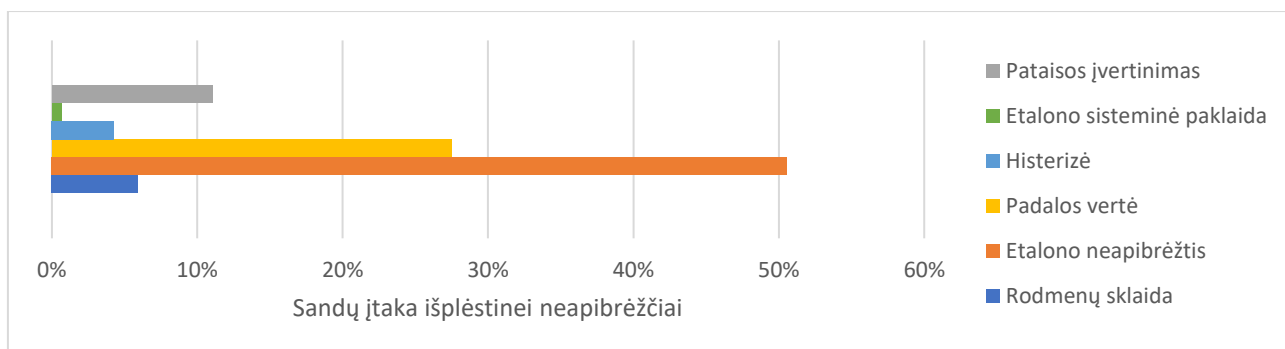


29 pav. *Furness Controls FCO750* manometrinio slėgio sandų įtaka išplėstinei neapibrėžčiai 10–100 % PS diapazone (2)

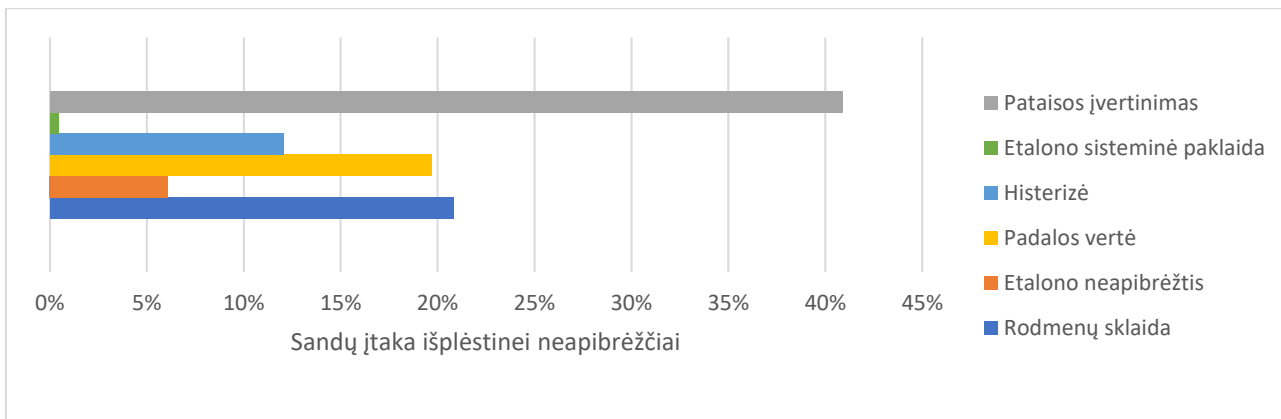
1 % tikslumo manometrinio slėgio SNM neapibrėžčiai daugiausiai įtakos turi etalono ir pataisos įvertinimo neapibrėžtys, po maždaug tiek pat rodmenų sklaidos ir padalos vertės sandas, o mažiausiai – etalono sisteminė paklaida. 30 paveiksle pavaizduota DP slėgio sandų įtaka, iš kurios matyti, jog dominuoja pataisos įvertinimo, rodmenų sklaidos ir histerizės sandai.



30 pav. *Furness Controls FCO750* DP slėgio sandų įtaka išplėstinei neapibrėžčiai 10–100 % PS diapazone

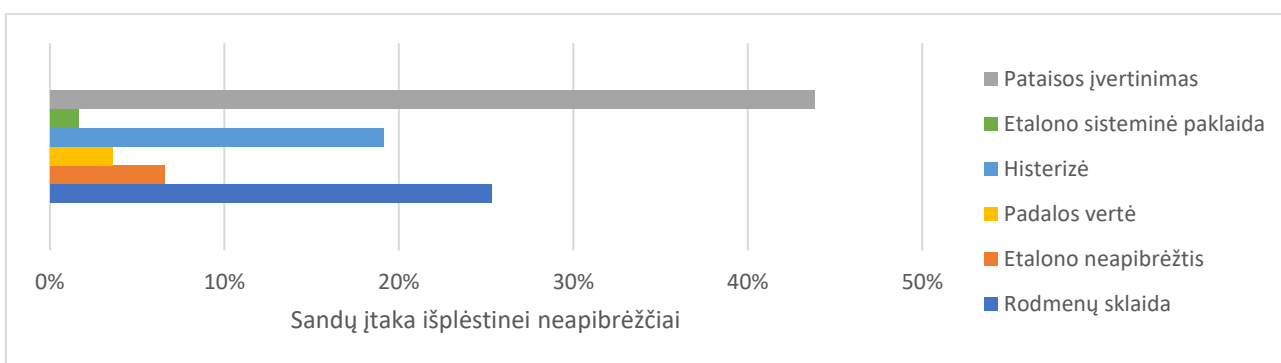


31 pav. *Furness Controls FCO750* manometrinio slėgio sandų įtaka išplėstinei neapibrėžčiai 0–10 % PS diapazone

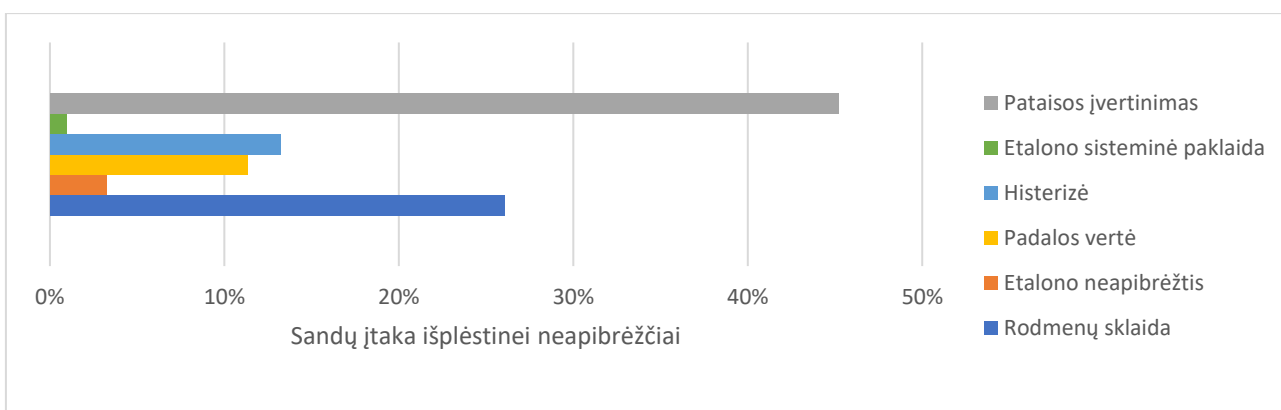


32 pav. *Furness Controls FCO750 DP* slėgio sandų įtaka išplėstinei neapibrėžčiai 0–10 % PS diapazone

31–32 paveiksluose pavaizduota sandų įtaka *FCO750* SNM 0,1 % tikslumo srityje. Grafikas rodo, kad manometriniam slėgiui didžiausią neapibrėžties dalį užima etalono neapibrėžties sandas bei padalos vertė, o skirtuminiam slėgiui – pataisos įvertinimas, rodmenų sklaida, padalos vertė ir histerizė.



33 pav. *ATEQ F620* manometrinio slėgio sandų įtaka išplėstinei neapibrėžčiai



34 pav. *ATEQ F620 DP* slėgio sandų įtaka išplėstinei neapibrėžčiai

33 ir 34 paveikslas parodo *ATEQ* manometrinio ir DP slėgio įtaką išplėstinei neapibrėžčiai 1,5 % ir 2,5 % tikslumo srityse – abiejose matomi daugiausiai įtakos turintys pataisos įvertinimo, rodmenų sklaidos bei histerizės sandai. 10 lentelėje pateiktas sandų įtakos neapibrėžčiai apibendrinimas skirtingo tikslumo SNM.

10 lentelė. Sandų įtaka išplėstinei neapibrėžčiai

		Manometrinio slėgio tikslumas, %			Skirtuminio slėgio tikslumas, %		
		0,1	1,0	1,5	0,1	1,0	2,5
Įtaka, %	Etalono sisteminė paklaida	0,7	6,7	1,6	0,5	0,3	0,9
	Histerizė	4,3	8,9	19,1	12,0	23,2	13,2
	Padalos vertė	27,5	14,5	3,6	19,7	3,0	11,3
	Etalono neapibrėžtis	50,6	27,3	6,6	6,1	1,2	3,3
	Rodmenų sklaida	5,9	15,6	25,3	20,8	26,5	26,1
	Pataisos įvertinimas	11,0	27,0	43,8	40,9	45,8	45,2

Išvados

Slėgio nuotėkio matuoklių kalibravimo tyrimas parodė, jog turi būti skaičiuojami neapibrėžties sandai, įvertinantys rodmenų įtaiso padalos vertę, etalono kalibravimo neapibrėžtį, etalono sisteminę paklaidą, histerizę, dreifą, rodmenų sklaidą bei pataisą.

Palankiausiu (idealiu) atveju, atitinkančiu CMC, slėgio nuotėkio matuoklių suminė kalibravimo neapibrėžtis skirtuminiam ir manometriniam slėgiui susidės iš etalono kalibravimo neapibrėžties bei sando, įvertinančio kalibruojamojo SNM skiriamąją gebą. Taip pat palankiausiu atveju MP rodmenys didinant ir mažinant slėgį sutampa bei MP nuokrypis nuo etalono vertės lygus nuliui, atsikartojant ta pačia verte, vadinasi, histerizės standartinės neapibrėžtys ir vidurkio standartinis nuokrypis lygūs nuliui.

3.2. Kalibravimo periodiškumo nustatymas

Slėgio nuotėkio matuoklių kalibravimo intervalas gali būti prailgintas, jei MP teikia stabilius rezultatus pakankamai ilgą laikotarpį. Intervalą rekomenduojama ilginti tada, kai per 12 mėnesių buvo atlikti bent 3 kalibravimai ir gauti rezultatai yra gamintojo deklaruojamų specifikacijų ribose. Žinoma, šią taisyklę reikia koreguoti atsižvelgiant į matavimo priemonės sritį, tipą, matavimo principą, derinimo (reguliavimo) galimybes, reikalaujamą tikslumą, apkrovos (naudojimo) kiekį, resursus, personalo kvalifikaciją, duomenis apie ankstesnių kalibravimų rezultatus ir techninius aptarnavimus, MP transportavimą ir gamintojo nurodymus. Kitą vertus, jei užfiksuojami rezultatai, viršijantys gamintojo deklaruojamas specifikacijas, kalibravimo intervalas trumpinamas. Jei rezultatų nuokrypiai atsiranda dėl neaiškių priežasčių, rekomenduotina, kad kalibravimo intervalas turėtų būti trumpinamas pusiau [36].

Parentant pradinį slėgio matuoklių kalibravimo intervalą, visų pirma reikia atsižvelgti į gamintojo rekomendacijas, tada į matavimo priemonės naudojimo dažnį ir trukmę, aplinkos sąlygų įtaką, reikiamą matavimų neapibrėžtį, maksimalią leidžiamą paklaidą, matuojamojo dydžio įtaką matavimo priemonei (pvz., temperatūrą), sukaupia informaciją ar iš literatūros surinktus duomenis apie tokias pačias ar panašias matavimo priemones [37].

Parinkus pradinį kalibravimo intervalą ir toliau vykdant slėgio matuoklio stebėseną, kalibravimo periodiškumas koreguojamas: prailginamas, su tikslu sutaupyti kaštų; arba sutrumpinamas, jei pastebima, kad matuoklis nebeatitinka specifikacijų.

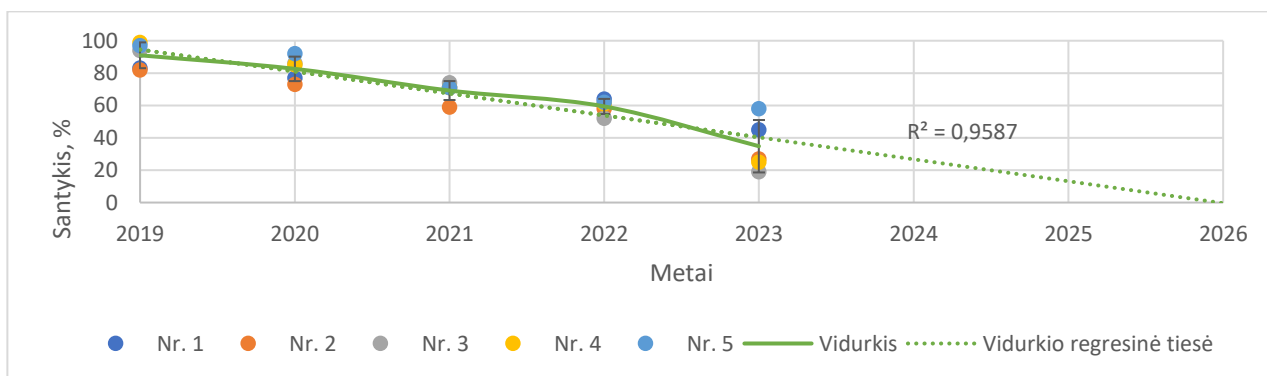
Remiantis *ILAC-G24* rekomendacijomis, slėgio matuoklių statistinei stebėsenai yra tinkami keletas metodų:

- kontrolinė diagrama su tiesine regresine analize (grafikas, kuriame atidedami taškai, atitinkantys suskaičiuotas statistikas (vidurkis, standartinis nuokrypis) pagal surinktus kalibravimo duomenis. Tiesinės regresijos analizės pagalba prognozuojamas kalibravimo intervalas);
- žingsninis derinimas (atlikus MP kalibravimą, sekančio kalibravimo data yra koreguojama užsiduotu trukmės žingsniu);
- svertinis metodas (naujas kalibravimo intervalas apskaičiuojamas įvertinant iš anksto nustatytus svertinius koeficientus pagal mažiausiai trijų paskutinių kalibravimų duomenis).

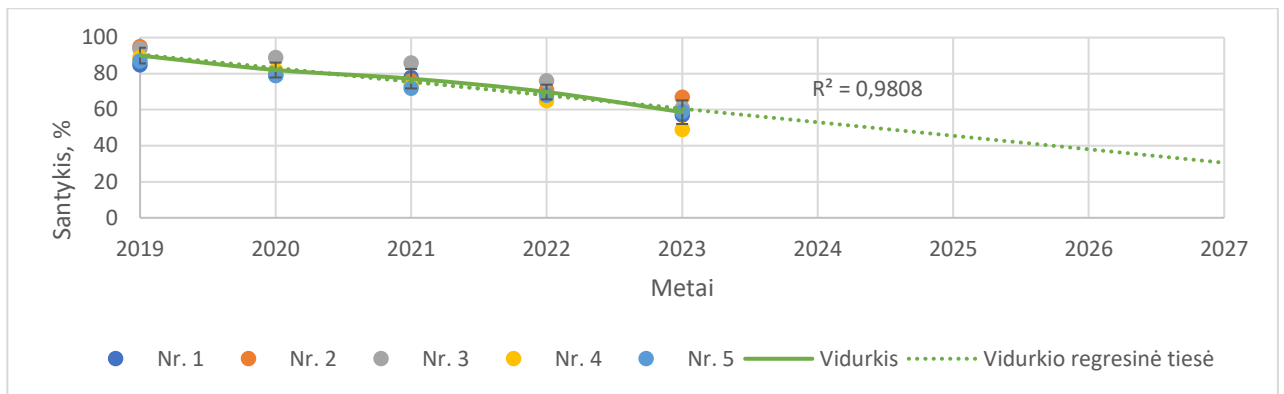
Kiti galimi būdai yra „stebėsenos etalonų“ naudojimas bei apkrautumo (darbo laiko apskaitos) vertinimas, tačiau jie nepraktiški slėgio nuotėkio matuokliams, nes dažnu atveju SNM yra sukomplektuoti gamybos linijose ar vamzdynuose, dėl to tampa sudėtinga išimti MP, atlikti kontrolę „stebėsenos etalonu“ ir vėl instaliuoti į sistemą. Taip pat pakankamai sudėtinga įvertinti slėgio matuoklių darbo laiko apskaitą, nes retai slėgio MP turi tiesioginę sąsają su kompiuteriu ar kitu įrenginiu, kuriame būtų kaupiama informacija apie MP apkrautumą, todėl tai reikalautų papildomų kaštų tokio tipo MP stebėsenai atlikti.

Stebėsenos metodo pasirinkimui slėgio MP daugiausiai įtakos turi prietaiso tikslumo klasė, naudojimo paskirtis (etalonas ar MP) ir praeitų kalibravimų duomenys – natūralu, kad kuo daugiau statistinių duomenų, tuo prognozavimas yra tikslesnis. Pavyzdžiui, etaloninių slėgio MP (stūmoklinių manometrų, tikslumas $U \leq 0,2\%$, deformacinių manometrų $U \leq 0,4\%$, slėgio kalibratorių $U \leq 0,05\%$) stebėsenai tinkamiausias būdas yra kontrolinė diagrama su tiesine regresine analize, vidutinio tikslumo darbinėms MP (slėgio keitikliams δ (sisteminė paklaida + neapibrėžtis) = 0,1 %, 0,15 %, bendrosios paskirties arba techniniams manometrams $\delta = 0,6\%$, 1 %, slėgio kalibratoriams $\delta = 0,5\%$, deformaciniams manometrams su sąlygine skale $\delta = 0,6\%$, 1 %) optimalus yra svertinis stebėsenos metodas, o žemo tikslumo darbinėms MP (žemesnių negu vidutinio tikslumo darbinėms MP) – žingsninis derinimas [38, 39].

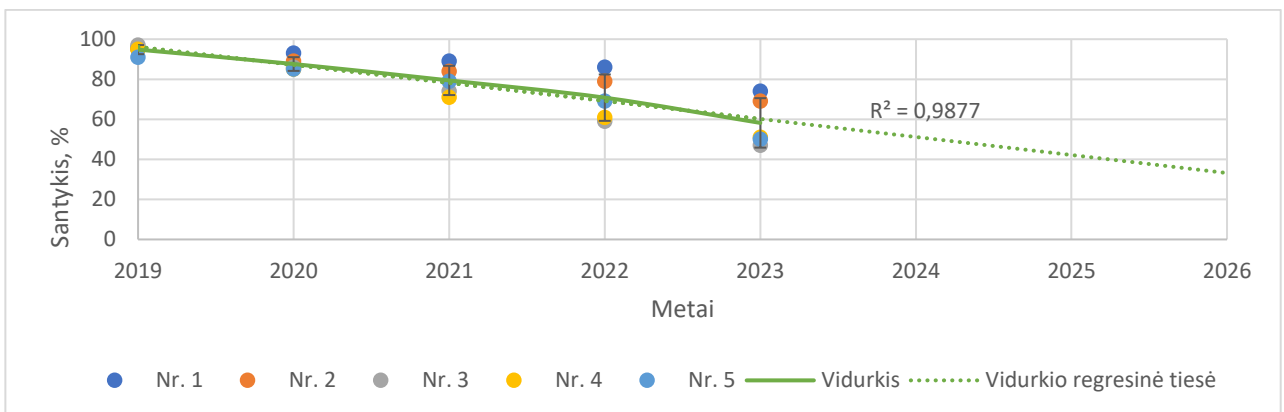
Remiantis 10 priede nurodymu algoritmu (sudarytas ir pakoreguotas tiriamųjų projektų metu), nustatytas kalibruotų slėgio nuotėkio matuoklių kalibravimo periodiškumas, naudojant kontrolinės diagramos stebėsenos metodą. Kontrolinės diagramos pavaizduotos 35–37 pav., kur SNM imtis – 5 vnt.



35 pav. *Furness Controls FCO750* kontrolinė diagrama (1 % manometrinio ir DP slėgio tikslumo sritis)



36 pav. *Furness Controls FCO750* kontrolinė diagrama (0,1 % manometrinio ir DP slėgio tikslumo sritis)



37 pav. *ATEQ F620* kontrolinė diagrama (1,5–2,5 % manometrinio ir DP slėgio tikslumo sritis)

Grafikai rodo, kad periodiškumas pavaizduotas ir konkreitiems prietaisams ir jų tipams (prietaisų tikslumo klasės grupei) remiantis vienerių metų rekomenduojamu gamintojo kalibravimo periodiškumu bei įskaitant MP derinimą, todėl statistinė analizė tampa sudėtingesnė. Darbe siūloma apskaičiuoti įverti (procentais), kiekvienos MP atskirai, kuris parodo, kaip gerai kalibravimo taškai atitinka leistiną paklaidą (gamintojo specifikaciją) ir atidėti jį kontrolinėje diagramoje (35–37 pav.). Įvertis apskaičiuojamas tokia tvarka:

- 1) apskaičiuojamas kiekvieno kalibravimo taško (slėgio vienetais) MP sisteminės paklaidos + išplėstinės neapibrėžties santykis su etalono rodmenimi atitinkamame taške;
- 2) apskaičiuojamas kiekvieno kalibravimo taško (slėgio vienetais) leistinojo nuokrypio santykis su etalono rodmenimi atitinkamame taške;
- 3) apskaičiuojama santykinė paklaida procentais (1-ame ir 2-ame žingsniuose gautų santykio rezultatu);
- 4) apskaičiuojamas įvertis procentais, t.y. aritmetinis vidurkis 3-ame žingsnyje gautų rezultatu.

Toks įvertinimas procentais parodo, kaip gerai MP atitinka leistiną nuokrypį kalibruojamuose taškuose. Tai daug supaprastina prognozavimą, nes įvertinama kiekvieno kalibruojamo taško paklaida ir neapibrėžtis (ne tik didžiausios paklaidų vertės).

Verta paminėti, kad MP derinimas panaikina arba sumažina tik MP sisteminę paklaidą. Dėl MP apkrovos, nuotėkio matuoklio slėgio keitiklio pjezoelektrinės savybės laike degraduoja ir iš

kalibravimo duomenų matyti, kad MP išplėstinė neapibrėžtis taip pat didėja – tam daugiausiai įtakos turi rodmenų sklaidos bei histerizės sandai (mažėja preciziškumas). Pagrįstai nustatčius optimalų kalibravimo periodiškumą ir pradinį kalibravimo intervalą, galima sumažinti lėšas MP kontrolės ir stebėjimo procesui, techninei priežiūrai. Intervalai parinkti subjektyviu sprendimu, racionaliai įvertinus MP paklaidos šaltinius, aplinkos ir eksploatacines sąlygas.

Remiantis kalibravimo proceso, sandų įtakos išplėstinei neapibrėžčiai ir ankstesnių kalibravimų rezultatų analize, priimta, kad elektronikos pramonėje naudojamų 1 % tiksl. kl. SNM kalibravimo pradinis intervalas gali būti prailgintas iki 2,5 metų, o periodinis kalibravimas – sutrumpinamas iki pusės metų, kadangi dėl neaiškių priežasčių 35 paveiksle matomas atitikimo specifikacijai (procentais) šuolis 2022–2023 m.; 0,1 % tiksl. kl. SNM pradinis kalibravimo intervalas parinktas 3 metai, o periodinis prailgintas iki 1,5 metų; 1,5–2,5 % tikslumo manometrinio ir DP slėgio SNM matuoklių – pradinis kalibravimo intervalas prailgintas iki 2 metų, o periodinis išlaikytas toks pat, t. y. 1 metai.

4. Siūloma slėgio nuotėkio matuoklių kalibravimo metodika

Bendrai MP kalibravimo metodika – tai procedūra, susidedanti iš esminių veiksmų, kurie yra susieti tarpusavyje. Visų pirma, nuo etalono parinkimo priklauso SNM kalibravimo rezultatas. O šis apibūdina sekantį kontrolės procesą, kai MP naudojama pagal paskirtį. Kitas veiksmas – paklaidų analizė, nuo kurios priklauso pasirenkamo kalibravimo modelio ir/ar procedūros realizavimo laiko sąnaudos, t.y. paties matavimo, duomenų analizės ir rezultato pateikimo efektyvumas. Taip pat kalibravimo rezultatas ir kiti MP kriterijai, apsprendžia kalibravimo dažnumą, kas taip pat yra kalibravimo metodologijos dalis, nes optimalus kalibravimo intervalo parinkimas mažina išlaidas kontrolės procesui. Verta paminėti, kad skirtingo tikslumo to paties veikimo principo slėgio matavimo priemonėms paklaidų įtaka skiriasi, todėl turi būti sudaromi matematiniai modeliai atskiroms MP grupėms ne tik pagal veikimo principą, bet ir pagal reikalaujamą tikslumą. Todėl darbe siūloma optimizuota kalibravimo metodika, pritaikyta 0,1–2,5 % tiksl. kl. SNM, kurių matavimo ribos 0–20 kPa manometrinių ir 0–2 kPa skirtuminio slėgio.

4.1 Aplinkos sąlygos ir etaloniškos matavimo priemonės

Slėgio nuotėkio matuoklių kalibravimo praktikoje dažniausiai sutinkamas atvejis, kai $\Delta H = 0$, o SNM kalibruojami ir eksploatuojami tomis pačiomis sąlygomis, todėl galima laikyti, kad vietiniai Žemės traukos pagreičiai lygūs (palankiausias matavimo atvejis), o darbinė terpė – oras. Darbo vietos aplinkos temperatūra – $(20 \pm 3)^\circ\text{C}$. Esant tokioms sąlygoms, temperatūros ir laisvojo kritimo pagreičio sandų įtaka kalibruojant slėgio kalibratorius (SNM) kalibravimo rezultatui yra nereikšminga [3]. Kai temperatūra kinta daugiau negu 3 laipsniais, turi būti įvedamas sandas, atsirandantis dėl temperatūrų skirtumo kalibravimo metu [3], tačiau jis bus reikšmingas tik aukštos tikslumo klasės SNM (didesnės negu 0,1 % tiksl. kl. ir mažame slėgiui diapazone (tikėtina iki kelių dešimčių paskalių manometrinių ir kelių vienetų paskalių skirtuminio slėgių eilės, remiantis atlikto kalibravimo duomenimis). Atlikta literatūros analizė rodo, kad SNM plačiausiai naudojami elektronikos ir automobilių pramonėje, todėl tirti tokių MP elgseną nestandartinėse aplinkos sąlygose iš praktinės matavimo pusės yra neracionalu, nes, pagal IATF 16949 standartą, tokio tipo gamyboje privaloma palaikyti ir stebėti norminę santykinę drėgmę, temperatūrą ir slėgį [10].

Paprastai vietinis Žemės traukos pagreitis SNM kalibravimo vietoje nesiskiria nuo etaloniškos matavimo priemonės (slėgio kalibratoriaus ar diferencinio slėgio matuoklio) kalibravimo vietos vietinio Žemės traukos pagreičio. Kitais atvejais, kai $g_{vk} \neq g_{ve}$, o vietinio Žemės traukos pagreičio vertės atitinka Lietuvos teritorijai būdingas pagreičio vertes, pataisos koeficiento dėl pagreičių skirtumo į matavimo rezultatą įvesti nereikia, o išplėstinę kalibravimo neapibrėžtį padidinti (arba sumažinti) dydžiu $Y(K-I)$, čia Y – matuojamasis dydis, K – pataisos koeficientas dėl vietinių Žemės traukos pagreičių skirtumo. Pataisos koeficientas gali būti apskaičiuotas pagal 18 formulę, kur g_n – normuotas Žemės traukos pagreitis; g_v – vietinis Žemės traukos pagreitis.

$$K = \frac{g_n}{g_v} \quad (18)$$

0,1–2,5 % tiksl. kl. SNM manometrinių ir DP slėgių kalibravimui reikalingi etalonai yra 0,05 % tikslumo slėgio kalibratorius (arba etaloniškas manometras), gebantis matuoti iki maksimalios SNM manometrinių slėgio vertės ir tokios pat tikslumo klasės diferencinio slėgio matuoklis, kurio maksimali matavimo vertė viršija arba yra lygi SNM diferencinio slėgio matavimo ribai.

Alternatyvi priemonė SNM manometrinio slėgio kalibravimui yra stūmoklinis manometras. Pastarasis yra palyginti aukštos tikslumo klasės (prasidedantis nuo 0,05 % iki 0,005 %) ir precizikos [40], tačiau nemobilus, palyginti brangus, todėl nepraktiškas nuotėkio matuoklių kalibravimui. Tuo tarpu deformaciniai manometrai plačiausiai taikomi 0,1–2,5 MPa slėgio matavimo diapazonuose [3] ir yra vidutinės arba žemos tikslumo klasės, dėl to netinkami SNM kalibravimui.

Rinkoje plačiai paplitę stacionarūs (neportatyviniai) diferencinio slėgio matuokliai, pakankamai įvairių tikslumo klasių, montuojami vamzdynuose ar metrologinėse kalibravimo stotyse, tačiau konkrečiai tirtų SNM kalibravimui reikia rinktis mobilų variantą, bent 0,05 % tiksl. kl. Kitas galimas, tačiau nerekomenduotinas (dėl sudėtingo praktinio įgyvendinimo ir matavimo schemos, rodmenų atskaitos netikslumų) SNM diferencinio slėgio matavimas yra naudojant du etaloninius (tapačios etaloniniam DP matuokliui tikslumo klasės) manometrus arba slėgio kalibratorius. Tokiu būdu, skirtuminis slėgis išmatuojamas aritmetiškai atimant nuotėkio slėgio vertę matavimo pradžioje ir pabaigoje.

4.2 Kalibravimo modelis

Iš atliktos darbe 0,1–2,5 % tiksl. kl. nuotėkio matuoklių sandų įtakos išplėstinei neapibrėžčiai analizės, galima teigti, kad etalono sisteminės paklaidos sandą galima laikyti mažai reikšmingu ir, sudarant optimizuotą kalibravimo modelį, jo nevertinti. Sistemine etalono paklaidą galima pašalinti (arba sumažinti), atliekant etalono derinimą (jei įmanoma) arba sudarant regresinę paklaidos tiesę ir išskaičiuojant etalono sisteminę paklaidą kiekviename MP kalibravimo taške, tačiau tai užima papildomo laiko, nes sudėtingėja skaičiavimai. Kaip ir minėta anksčiau, MP dreifo sandas taip pat gali būti pašalinimas, nes galimas kalibruojamo SNM derinimas. Standartinės neapibrėžties vertė dėl „nulio“ nuokrypio lygi nuliui, nes tiek SNM, tiek šiuolaikinis etaloninis slėgio kalibratorius ar DP slėgio matuoklis, turi „nulio“ nustatymo funkciją.

Įvertinus sandų įtaką, ankstinių kalibravimų rezultatus bei aplinkos ir eksploatacines sąlygas, siūlomas optimizuotas kalibravimo modelis, pateiktas 19 formulėje.

$$\Delta p = \bar{p}_e - \bar{p}_k + \Delta p_{hist} + \Delta p_{sg} \quad (19)$$

Būtina paminėti, kad standartinė neapibrėžtis dėl histerizės taip pat gali būti anuliuojama 1–1,5 % manometrinio ir 1–2,5 % diferencinio slėgio SNM, nes jos dedamoji išplėstinei neapibrėžčiai taip pat sąlyginai maža. 18 formulėje pateikto kalibravimo modelio A tipo neapibrėžties (eksperimentinis standartinis aritmetinio vidurkio nuokrypis ir pataisos įvertinimas) apskaičiuojamos pagal anksčiau darbe aprašytas 10 ir 11 formules, o B tipo (histerizės, skiriamosios gebos, etalono) atitinkamai pagal 4,5 ir 7 formules.

18 formulėje sudaryto kalibravimo modelio, geriausia matavimo galimybė (CMC) susidės iš etalono ir skiriamosios gebos įvertinimo standartinių neapibrėžčių, pateiktų 11 lentelėje.

Naudojant *Druck*, *Additel* etalonus ir optimizuotą kalibravimo modelį, galima pasiekti mažiausią išplėstinę kalibravimo neapibrėžį ($U(\Delta p)$) 0,1 % kalibruojamo SNM tikslumo srityje, lygią $U(\Delta p_{mano}) = \pm 10,72$ Pa manometrinio slėgio intervale 0–2 kPa, kai aprėpties koeficientas $k = 2$. Diferencinio slėgio intervale 0–200 Pa, kai MP tikslumas 0,1 %, idealiu kalibravimo atveju neapibrėžtis gaunama $U(\Delta p_{dif}) = \pm 0,60$ Pa ($k = 2$).

11 lentelė. Slėgio nuotėkio matuoklių palankiausio kalibravimo atvejo (CMC) standartinės neapibrėžties sandai, kur p – etalono neapibrėžtis kalibruojamame MP taške

	Tikslumas	Dydis X_i	Įvertis x_i	Standartinė neapibrėžtis $u(X_i)$	Tikimybinis pasiskirstymas	Įtakos koeficientas W_{x_i}	Standartinės neapibrėžties sandas $u(Y_i) = W_{x_i} \cdot u(X_i)$
Manometrinis slėgis	0,1 %	\bar{p}_e	0–2 kPa	$(2 \cdot 10^{-5} \cdot p + 0,01063)$ kPa	Gauso	1	$(2 \cdot 10^{-5} \cdot p + 0,01063)$ kPa
		Δp_{sg}	-	0,289 Pa	Stačiakampis	1	0,289 Pa
	1 %	\bar{p}_e	0–20 kPa	$(5 \cdot 10^{-5} \cdot p + 0,01077)$ kPa	Gauso	1	$(5 \cdot 10^{-5} \cdot p + 0,01077)$ kPa
		Δp_{sg}	-	2,887 Pa	Stačiakampis	1	2,887 Pa
	1,5 %	\bar{p}_e	0–70 kPa	$(5 \cdot 10^{-5} \cdot p + 0,01077)$ kPa	Gauso	1	$(5 \cdot 10^{-5} \cdot p + 0,01077)$ kPa
		Δp_{sg}	-	2,887 Pa	Stačiakampis	1	2,887 Pa
Diferencinis slėgis	0,1 %	\bar{p}_e	0–200 Pa	$(2 \cdot 10^{-5} \cdot p + 0,175)$ Pa	Gauso	1	$(2 \cdot 10^{-5} \cdot p + 0,175)$ Pa
		Δp_{sg}	-	0,289 Pa	Stačiakampis	1	0,289 Pa
	1 %	\bar{p}_e	0–2000 Pa	$(7 \cdot 10^{-5} \cdot p + 0,1573)$ Pa	Gauso	1	$(7 \cdot 10^{-5} \cdot p + 0,1573)$ Pa
		Δp_{sg}	-	0,289 Pa	Stačiakampis	1	0,289 Pa
	2,5 %	\bar{p}_e	0–500 Pa	$(2 \cdot 10^{-5} \cdot p + 0,175)$ Pa	Gauso	1	$(2 \cdot 10^{-5} \cdot p + 0,175)$ Pa
		Δp_{sg}	-	0,289 Pa	Stačiakampis	1	0,289 Pa

Paprastumo dėlei geriausios kalibravimo galimybės apskaičiuotos ties MP maksimalia riba, kitu atveju, kuriame išreiškiama apibendrinta CMC formulė, gaunamas polinomas, apjungiantis skiriamosios gebos ir etalono neapibrėžties sandus, pateiktas 20 ir 21 formulėse, kur p – etalono neapibrėžtis kalibruojamame taške.

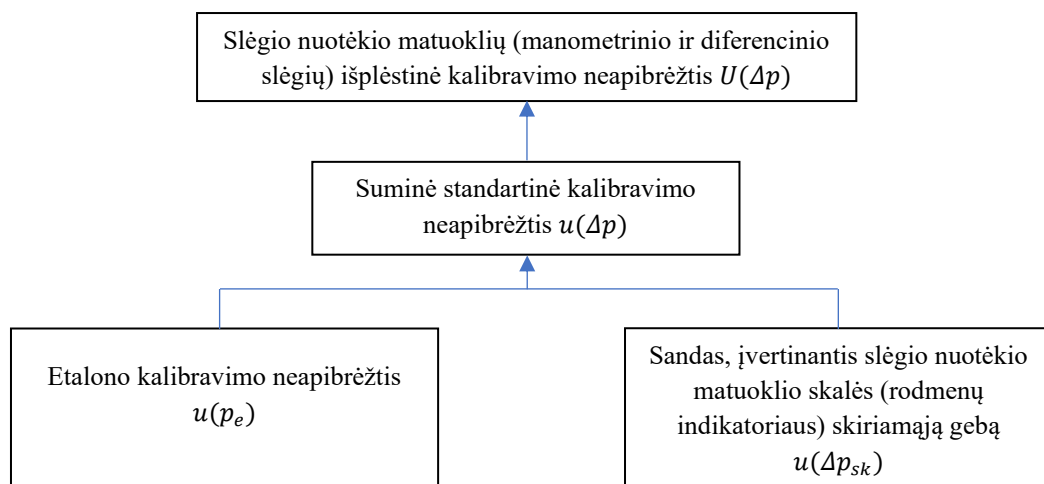
$$U(\Delta p_{mano}) = 2\sqrt{1^{-10} \cdot p^2 + 1,06 \cdot 10^{-4} \cdot p + 28,26} ; [U(p_{mano})] = Pa \quad (20)$$

$$U(\Delta p_{dif}) = 2\sqrt{1^{-10} \cdot p^2 + 1,75 \cdot 10^{-6} \cdot p + 0,0146} ; [U(p_{dif})] = Pa \quad (21)$$

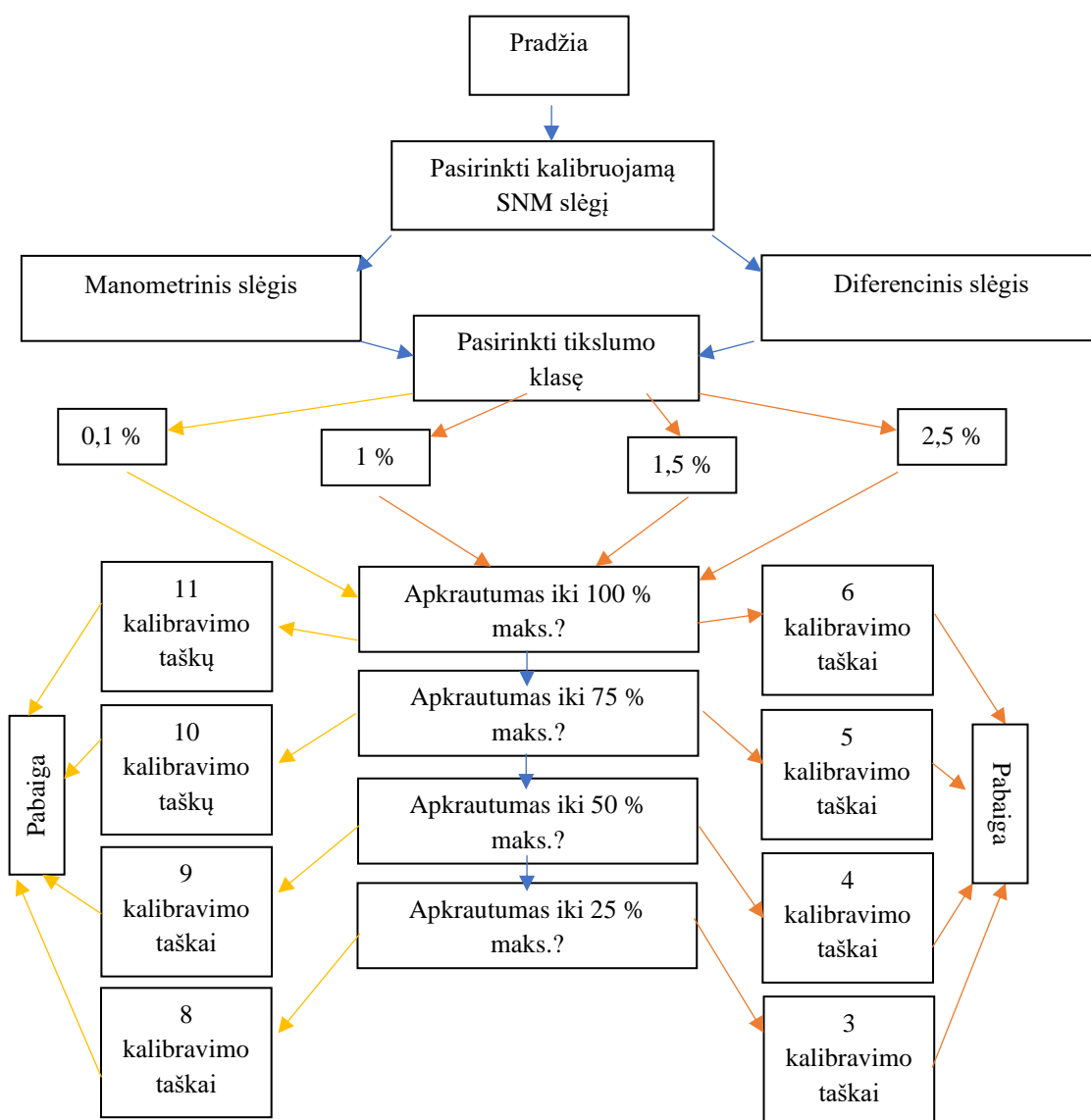
Išplėstinės kalibravimo neapibrėžties struktūra viename kalibravimo taške, atitinkanti geriausią SNM kalibravimo galimybę, pateikta 38 paveiksle. Kalibravimui naudojami etalonai *Druck DPI705E* ir *Additel ADT681-DP*, kurių išplėstinės kalibravimo neapibrėžtys mažiausiai du kartus mažesnės už tikėtiną slėgio nuotėkio matuoklių išplėstinę kalibravimo neapibrėžtį.

Iš kalibravimo duomenų, pateiktų 3.1. skyriuje, pastebima, kad remiantis EURAMET cg17 [25] slėgio MP kalibravimo vadovo, SNM kalibruoti 6-uose arba 11-oje taškų. Priimta, kad tai maksimalus skaičius taškų, pagal atitinkamas tikslumo klases.

Tačiau kalibravimo taškai gali būti sumažinti, atsižvelgiant į tai, kokiose slėgių ribose prietaisų apkrautumas yra didžiausias. Siūloma, kad jeigu slėgio nuotėkio matuokliai dirba per visą savo manometrinių ir DP slėgių matavimo diapazoną, kalibruojamų taškų skaičius nekeičiamas.



38 pav. Slėgio nuotėkio matuoklių CMC struktūra



39 pav. Kalibravimo taškų skaičiaus pasirinkimo algoritmas

Jei su MP matuojama iki 75 % maks. slėgio, galima sumažinti kalibruojamų taškų skaičių iki penkių (1–2,5 % tiksl. sritis) ir dešimties (0,1 % tiksl. sritis). Jei iki 50 % maks., galima sumažinti iki atitinkamai 4 ir 9 taškų, jei matuojama iki 25 % maks., sumažinama iki 3 ir 8 taškų. Mažiausias galimas kalibruojamų taškų skaičius nuotėkio matuokliams yra trys, 1–2,5 % tikslumo klasės sričiai, norint įvertinti histerizės poveikį [27, 28].

Natūralu, kad kalibravimo taškų skaičius neapibrėžties dydžiui įtakos neturi, nes ji nebus mažesnė negu CMC, tačiau priimta, kad trys taškai yra būtini regresinės neapibrėžties tiesės sudarymui. Jei tiesės R^2 kriterijus yra žemas (mažesnis negu 0,7) reiktų apsvarstyti padidinti kalibruojamų taškų skaičių, MP derinimo galimybes, įvertinti eksploatacines sąlygas, nes paklaidos verčių sklaida yra pernelyg didelė, kad būtų galima interpoliuoti (ar ekstrapoliuoti) tiesės vertes. Sukurtas kalibravimo taškų skaičiaus pasirinkimo algoritmas pateiktas 39 paveiksle.

4.3. Matavimo eiga, sieties schema ir rekomendacijos

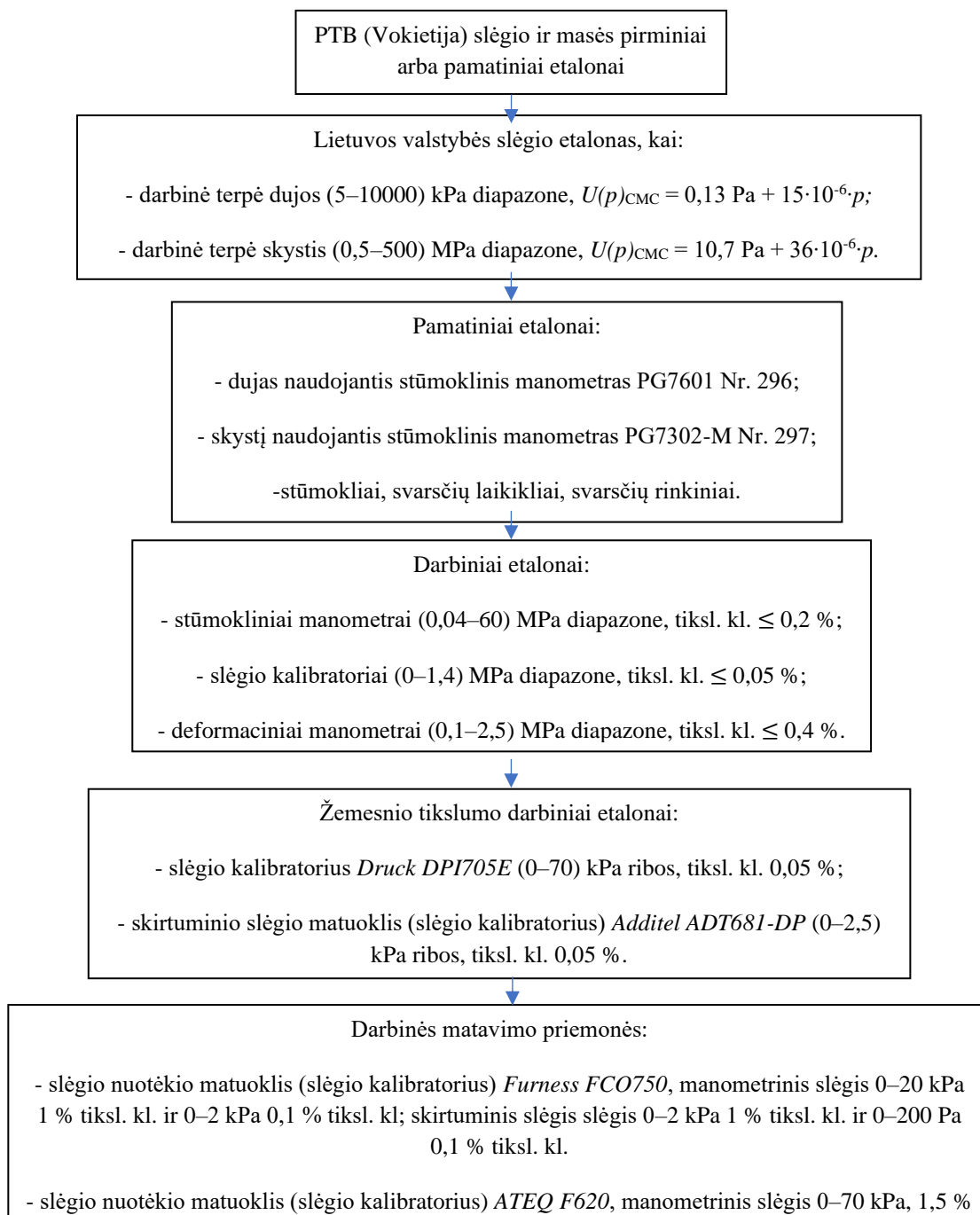
Slėgio nuotėkio matuoklių kalibravimas atliekamas 3 skyriaus pradžioje aprašyto eiliškumo ir laikantis nurodytų aplinkos sąlygų. Įsitikinus, kad etalonai ir MP paruošti matavimams, kalibravimo eiga gali būti atliekama tokia tvarka:

- 1) sujungiami MP ir etalonai pagal 19 paveiksle pateiktą schemą;
- 2) pagal 2.5. skyriuje pateiktą matavimo schemas aprašą, matavimo sistema paruošiama MP manometriniu slėgio kalibravimui;
- 3) sukeliama slėgis sistemoje iki maksimalios matavimo vertės bent 3 kartus („apšildomi“ MP ir etalonas);
- 4) nustatoma „0“ vertė slėgio kalibratoriuje ir MP;
- 5) atskaitomi MP ir etalono rodmenys atitinkamai sukeldami slėgį sistemoje iki kalibruojamo taško; fiksuojant matavimą, slėgis sumažinamas iki nulio – taip atliekamas vienas matavimas $n = 1$. Reikalaujamas matavimų skaičius $n = 3$;
- 6) sukalibruojami MP taškai likusiuose kalibravimo taškuose;
- 7) matavimo sistema paruošiama MP diferencinio slėgio kalibravimui (taip pat apkraunama iki maksimalios matavimo vertės bent 3 kartus), nustatoma MP ir *Additel* diferencinio slėgio matuoklio „0“ vertė;
- 8) kalibruojami diferencinio slėgio taškai, remiantis 5 žingsniu;
- 9) įvertinama kalibravimo pataisa manometriniams ir diferenciniams slėgiui;
- 10) įvertinama manometriniu ir DP slėgių kalibravimo neapibrėžtis;
- 11) jei MP viršija leistiną paklaidą, atliekamas MP derinimas remiantis gamintojo techniniais dokumentais ir kartojami 1–10 žingsniai. Jei po pakartotino kalibravimo MP viršija paklaidos ribą, ji turi būti izoliuojama nuo gamybos, remontuojama arba, jei ribų viršijimas nedidelis, įvertinama jos klaidingo rezultato tikimybė pagal OIML G19 [35] vadovą;

Pateiktos matavimo eigos nurodymais, elektronikos pramonėje slėgio nuotėkio matuoklių kalibravimas atliekamas tam tikrais intervalais, remiantis periodiškumo nustatymo analize 3.2. skyriuje. Racionaliai įvertintus visas sąlygas, kurios turi įtakos MP matavimo rezultatui, subjektyviu sprendimu priimta, kad metrologiškai saugu ir praktiška 1 % tiksl. kl. SNM kalibravimo pradinį intervalą prailginti iki 2,5 metų, o periodinį kalibravimą sutrumpinti iki pusės metų; 0,1 % tiksl. kl. SNM pradinis kalibravimo intervalas parinktas 3 metai, o periodinis prailgintas iki 1,5 metų; 1,5–2,5

% tikslumo manometrinio ir DP slėgio SNM matuoklių – pradinis kalibravimo intervalas prialintas iki 2 metų, o periodinis išlaikytas remiantis gamintojo nurodymais, t. y. 1 metai.

Realizavus siūlomą kalibravimo procedūrą, galima užtikrinti slėgio nuotėkio matuoklių nepertraukiamos sieties su auksčiausio lygio pamatiniais etalonais grandinę, pateiktą 40 paveiksle. Sieties schema užtikrinta remiantis KTU Metrologijos instituto 2015 m. atlikta Lietuvos etalonų pagrindimo studija [39], kai laikoma, kad *Additel* ir *Druck* etalonai kalibruojami Lietuvoje esančiose akredituotose pagal ISO/IEC 17025 standartą kalibravimo laboratorijose.



40 pav. Slėgio nuotėkio matuoklių sieties schema [39]

Rekomendacijos

Galima išskirti bent 11 matavimo priemonių sričių, priklausomai nuo to, kaip matavimo priemonės yra sugrupuojamos [1]. Kiekviena metrologijos sritis pasižymi unikalia kalibravimo procedūra, kurios pagrindiniai žingsniai yra paklaidų šaltinių ir neapibrėžties sandų įvertinimas. Bendrosios gairės slėgio MP kalibravimui pateikiamos EURAMET, ILAC, OIML, WELMEC vadovuose, tačiau, kiekvienam prietaisui (ar prietaisų grupei) rekomenduojama sudaryti individualų kalibravimo modelį, atlikti paklaidų šaltinių ir neapibrėžties skaičiavimo analizę, atsižvelgiant į slėgio matavimo diapazoną, MP tikslumo klasę ir leistinąsias paklaidų ribas, siekiant užtikrinti matavimų tvarumą ir optimizavimą. Slėgio nuotėkio matuokliai priskirami slėgio MP sričiai, todėl darbe pateikta apibendrinta ir optimizuota kalibravimo procedūra tirtiems *Furness Controls* ir *ATEQ* prietaisams, užtikrinanti sietį su aukščiausio tikslumo etalonais.

Pateikiamos praktinės rekomendacijos slėgio nuotėkio matuoklių kalibravimui:

- 1) rekomenduojama pradėti kalibruoti SNM manometrinių slėgių, o tik po to pereiti prie diferencinio slėgio matavimų – tokiu pagrindu sukurta matavimo schema;
- 2) įvertinti etalono sistemingąją paklaidą (ne tik išplėstinę neapibrėžtį);
- 3) atlikti nuotėkio matuoklių vidinį derinimą, t. y. eliminuoti MP matavimo rezultato slinktį (rekomenduojama palyginti kalibravimo rezultatus prieš ir po derinimo);
- 4) priklausomai nuo techninių galimybių ir lėšų, naudoti adatinį vožtuvą kaip nesandarią terpę diferencinio slėgio kalibravimui – jis leis užtikrinti precizišką ir reguliuojamą nuotėkio srautą nuo kelių iki keleto dešimčių paskalių. Srauto reikšmė, papildomam reguliavimui, gali būti išmatuota naudojant srauto matavimo įtaisą *ATEQ CDF60* (41 pav.);



41 pav. Adatinis vožtuvas (kairėje), srauto matuoklis *ATEQ CDF60* (dešinėje)

5) slėgio nuotėkio matuoklių 1 % ir 1,5 % tikslumo klasių diferencinio slėgių diapazonuose (atitinkamai) 0–2 kPa ir 0–500 Pa skirtuminiame slėgiui kalibruoti gali būti naudojamas etaloniškas 0,05 % tiksl. kl. slėgio kalibratorius, vietoje etaloniško diferencinio slėgio matuoklio, kadangi šiose srityse išlaikomas atitinkamas MP ir slėgio kalibratoriaus neapibrėžčių santykis. Tuomet 19 paveiksle pateikta matavimo schema supaprastinama į 8 paveikslo (b) dalį. Kitaip tariant, manometriniame ir diferenciniame slėgiui kalibruoti naudojamas vienas etalonas;

6) statistinei matavimų analizei rekomenduojama naudoti *Minitab* programinę įrangą.

Išvados

1. Atlikus elektronikos pramonėje taikomo sandarumo testavimo ir slėgio nuotėkio matavimo proceso analizę, kalibravimui pasirinkti manometrinio ir skirtuminio slėgio matuokliai: Furness Controls FCO750, ATEQ F620. Jie leidžia realizuoti skirtuminį slėgio matavimo metodą ir užtikrina reikalingą aptikti nuotėkį (0–2000) Pa ribose (0,1–2,5) % tikslumu.
2. Matavimo schemai realizuoti sukomplektuota slėgio nuotėkio matuoklių kalibravimo įranga, kurią sudaro slėgio kalibratoriai Druck DPI705E ir Additel ADT681-DP, leido užtikrinti matavimo priemonių nepertraukiamo lyginimo principą ir kalibravimo rezultatų atitikimą gamintojo užduotoms leistinosioms paklaidoms:
 - FCO750 1 % manometrinio ir diferencinio slėgio srityje MLP 1 % rodmens + 1 padalos vertė;
 - FCO750 0,1 % manometrinio ir diferencinio slėgio srityje MLP 0,1 % maks. + 1 padalos vertė;
 - F620 1,5 % manometrinio slėgio srityje MLP 1,5 % rodmens + 1 padalos vertė;
 - F620 2,5 % diferencinio slėgio srityje MLP 2,5 % rodmens + 1 padalos vertė.
3. Slėgio nuotėkio matuokliams kalibruoti sudarytas matematinis modelis ir atliktas neapibrėžčių sandų kitimo tyrimas, įvertinant slėgio lygio skirtumą, skiriamąją gebą, histerizę, etalono sisteminę paklaidą ir etalono neapibrėžtį, pataisos įvertinimą, rodmenų sklaidą, MP dreifą. Tai leido:
 - nustatyti matavimo neapibrėžties sandus, turinčius įtakos kalibravimo rezultatams;
 - įvertinti paklaidų įtaką skirtingų tikslumo klasių prietaisams;
 - suformuluoti pasiūlymus neapibrėžčių vertinimui praktiniam naudojimui.
4. Remiantis FCO750 ir F620 tipų slėgio nuotėkio matuoklių kalibravimo rezultatais ir pritaikius regresinę analizę mažiausių kvadratų metodu, nustatyti jų kalibravimo periodiškumo intervalai, kurie atitinkamai lygūs:
 - FCO750 1 % tikslumo srityje pradinis kalibravimo intervalas 2,5 metai, o periodiškumas pusė metų;
 - FCO750 0,1 % tikslumo srityje pradinis kalibravimo intervalas 3 metai, o periodiškumas 1,5 metų;
 - F620 1,5 – 2,5 % tikslumo srityje pradinis kalibravimo intervalas 2 metai, o periodiškumas 1 metai.
5. Optimizuota slėgio nuotėkio matuoklių kalibravimo metodika ir pateiktos rekomendacijos jos realizavimui, pasirenkamų matavimo taškų ir skaičiaus, matematinio modelio, etaloninių priemonių ir darbo vietos metrologinių reikalavimų, kalibravimo periodiškumo, leidžia pasiekti mažiausią 0,1–2,5 % tiksl. kl. slėgio nuotėkio matuoklių manometrinio ir diferencinio slėgio kalibravimo neapibrėžtis, atitinkamai lygias $\pm 10,72$ Pa ir $\pm 0,60$ Pa, esant 95 % pasikliautinumo tikimybei intervaluose 0–70 kPa ir 0–2 kPa.

Literatūra

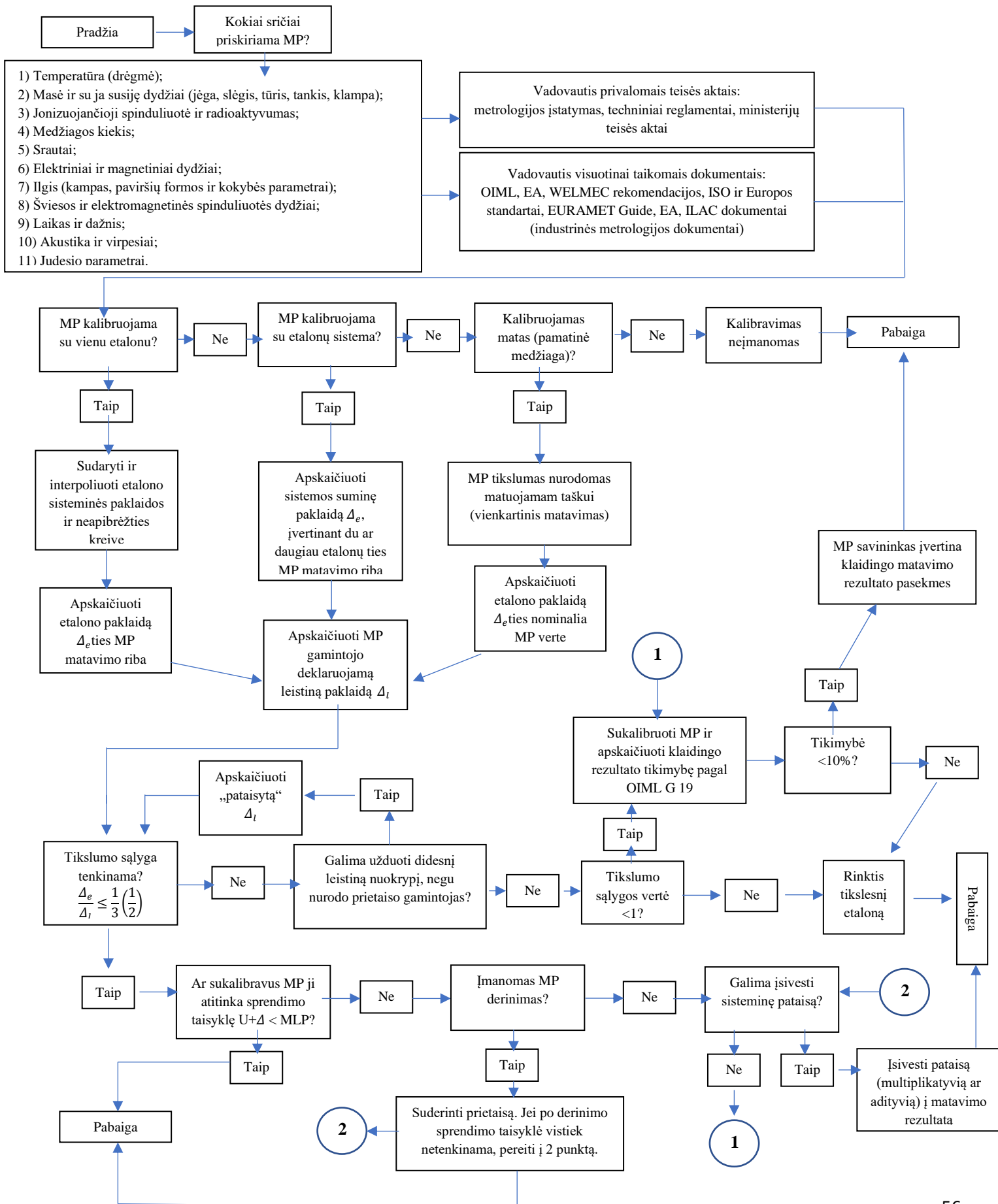
1. VEKTERIS, Vladas, KASPARAITIS, Albinas, KAUSINIS, Saulius ir KANAPĖNAS, Rimantas. Matavimų teorija ir praktika: vadovėlis. Vilnius: VGTU leidykla Technika, 2020. ISBN 9786094762291.
2. MEŠKUOTIENĖ, Asta, KAŠKONAS, Paulius, RAUDIENĖ, Edita, DOBILIENĖ, Justina ir URBONAVIČIUS, Benas Gabrielis. Calibration Periodicity of Fuel Tanks Assigned to Legal–Industrial Metrology: A Case Study. Sustainability (Switzerland). 2022. Vol. 14, no. 16. DOI 10.3390/su14169817.
3. MEŠKUOTIENĖ, Asta. Slėgio matavimo priemonių kalibravimo sieties sitemologinis tyrimas: daktaro disertacijos santrauka : technologijos mokslai, matavimų inžinerija (10T). Kaunas: Technologija, 2002.
4. EITUTIS, Andrius ir KAUSINIS, Saulius. Mechaninių dydžių matavimai: vadovėlis. Vilnius: Vilniaus pedagoginio universiteto leidykla, 2008. ISBN 9789955202622.
5. MAŽEIKA, Liudas. Neardomųjų bandymų metodai ir sistemos: mokomoji knyga.1-a laida. Kaunas: Technologija, 2012. ISBN 9786090204368.
6. CHIODO, J. D. ir IJOMAH, W. L. Use of active disassembly technology to improve remanufacturing productivity: Automotive application. International Journal of Computer Integrated Manufacturing. 2014. Vol. 27, no. 4, p. 361–371. DOI 10.1080/0951192X.2012.667151.
7. ATEQ. User Manual [interaktyvus]. [Žiūrėta 2023-03-25]. Prieiga per: <https://www.ateq.com/>
8. FCO 750 Leak Detector. Users Guide [interaktyvus]. [Žiūrėta 2023-03-25]. Prieiga per: <https://www.furness.com/>
9. LIETUVOS STANDARTIZACIJOS DEPARTAMENTAS. [LST EN 13160-4:2016]. Nuotėkio aptikimo sistemos. 4 dalis. Nuotėkio aptikimo jutikliu sistemų reikalavimai bei bandymo ir (arba) vertinimo metodai. 2018. 2018-11–10. Vilnius : Lietuvos standartizacijos departamentas, 2018.
10. INTERNATION AUTOMOTIVE TASK FORCE [IATF 16949:2016]. Quality management system requirements for automotive production and relevant service parts organizations. European standard, 2016.
11. LIETUVOS STANDARTIZACIJOS DEPARTAMENTAS. [LST EN 1779+A1:2004]. Neardomieji bandymai. Sandarumo bandymas. Metodo ir matavimo priemonių parinkimo kriterijai. Vilnius :Lietuvos standartizacijos departamentas, 2004.
12. LIETUVOS STANDARTIZACIJOS DEPARTAMENTAS. [LST EN 13184:2002/A1:2004]. Neardomieji bandymai. Sandarumo tikrinimas. Keičiamojo slėgio metodas. 2004-08–30. Vilnius :Lietuvos standartizacijos departamentas, 2004.
13. LIETUVOS STANDARTIZACIJOS DEPARTAMENTAS. [ISO 20486:2017]. Neardomieji bandymai. Sandarumo bandymas. Dujų lyginamųjų protėkių kalibravimas. Vilnius : Lietuvos standartizacijos departamentas, 2018.
14. LIETUVOS STANDARTIZACIJOS DEPARTAMENTAS. [LST EN 13160-1:2016]. Nuotėkio aptikimo sistemos. 1 dalis. Bendrieji principai. 2016-11–10. Vilnius : Lietuvos standartizacijos departamentas, 2016.
15. LIETUVOS STANDARTIZACIJOS DEPARTAMENTAS. [LST EN 13160-2:2016]. Nuotėkio aptikimo sistemos. 2 dalis. Slėginių ir vakuuminių sistemų reikalavimai bei bandymo ir (arba) vertinimo metodai. Vilnius : Lietuvos standartizacijos departamentas, 2016.

16. Leak Detection Equipment [interaktyvus]. [Žiūrėta 2023-03-25]. Prieiga per:
<https://www.cincinnati-test.com/>
17. Leak Testers – UsonProducts [interaktyvus]. [Žiūrėta 2023-03-25]. Prieiga per:
https://leaktesters.uson.com/collections/allproducts?pf_t_test_methods=Differential+Vacuum+Decay
18. Leak tester overview [interaktyvus]. [Žiūrėta 2023-03-25]. Prieiga per:
<https://www.hematech.de/en/leak-tester-overview.html>
19. Leak Testers | Furness Controls [interaktyvus]. [Žiūrėta 2023-03-25]. Prieiga per:
<https://www.furness.com/products/leak/>
20. Leakage tester - PROEMTEC [interaktyvus]. [Žiūrėta 2023-03-25]. Prieiga per:
<https://www.proemtec.de/en/leakage-tester/>
21. Leak tester - Ateq Leaktesting [interaktyvus]. [Žiūrėta 2023-03-25]. Prieiga per:
<https://www.ateq-leaktesting.com/products/leak-tester/>
22. SUKACKAS, Vidas ir GIEDRYS, Tautvilas. Neardomųjų bandymų fizikiniai pagrindai: mokomoji knyga. 1-a laida. Šiauliai [i.e. Kaunas] : Šiaulių universiteto leidykla [i.e. Technologija], 2012. ISBN 9786090203873.
23. Piezoelectric Pressure Sensors [interaktyvus]. [Žiūrėta 2023-03-29]. Prieiga per:
<https://www.avnet.com/wps/portal/abacus/solutions/technologies/sensors/pressuresensors/core-technologies/piezoelectric/>
24. JOINT COMMITTEE FOR GUIDES IN METROLOGY (JCGM). JCGM 101:2008 Evaluation of measurement data — Supplement 1 to the ‘Guide to the expression of uncertainty in measurement’ — Propagation of distributions using a Monte Carlo method. 2008. Vol. 1, p. 90.
25. WLADIMIR SABUGA (PTB, GERMANY), OLIVER OTT (PTB, GERMANY), YASIN DURGUT (UME, TURKEY), JANEZ ŠETINA (IMT, SLOVENIA), PIERRE OTAL (LNE, FRANCE), NIEVES MEDINA (CEM, SPAIN), AYKURT ALTINTAS (FORCE TECHNOLOGY, Denmark). Guidelines on the Calibration of Electromechanical and Mechanical Manometers. EURAMET Calibration Guide No. 17 [interaktyvus]. 2019. ISBN 9783942992565. Prieiga per: www.euramet.org
26. MEŠKUOTIENĖ, Asta, DOBILIENĖ, Justina, RAUDIENĖ, Edita ir GAIDAMOVIČIŪTĖ, Lilijana. A Review of Metrological Supervision: Towards the Common Understanding of Metrological Traceability in Legal and Industrial Metrology. *Mapan - Journal of Metrology Society of India*. 2022. Vol. 37, no. 3, p. 693–701. DOI 10.1007/s12647-022-00594-x.
27. Guideline DKD-R 6-1. Calibration of Pressure Gauges. Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Edition 03/2014. p. 51 [interaktyvus]. Prieiga per: <https://doi.org/10.7795/550.20210422>
28. YADAV, Sanjay, GUPTA, V K ir BANDYOPADHYAY, A K. Standardization of pressure calibration (7-70 MPa) using digital pressure calibrator. *Journal of Scientific and Industrial Research*. 2010. p. 27–33.
29. NT MECH 022:1989-11. Nordtest method. Pressure gauges: Calibration. 1987.
30. Calibration of Pressure Balances. EURAMET Calibration Guide No 3. [interaktyvus]. 2011. ISBN 9783942992022. Prieiga per: www.euramet.org
31. INTERNATIONAL ORGANIZATION OF LEGAL METROLOGY. Guide OIML G 19. The role of measurement uncertainty in conformity assessment decisions in legal metrology. 2017.
32. OIML. Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement. 2010.
33. WELLS, D E ir KRAKIWSKY, E J. The method of least squares. 1971.

34. Additel 681 [interaktyvus]. [Žiūrėta 2023-04-04]. Prieiga per: <https://additel.com/product-detail.html/681-digital-pressure-gauge/>
35. INTERNATIONAL ORGANIZATION OF LEGAL METROLOGY. OIML G19. The role of measurement uncertainty in conformity assessment decisions in legal metrology. 2017.
36. BARE, Allen. Simplified Calibration Interval Analysis. NCSL International Workshop and Symposium. 2006.
37. INTERNATIONAL LABORATORY ACCREDITATION COOPERATION ir INTERNATIONAL ORGANIZATION OF LEGAL METROLOGY. ILAG-G24:2007/OIML D10:2007 - Guidelines for the determination of calibration intervals of measuring instruments. Ilac-G24. 2007. Vol. 2007, p. 11.
38. INTERNATIONAL ORGANIZATION OF LEGAL METROLOGY. Accuracy classes of measuring instruments. 1979.
39. MEŠKUOTIENĖ, A., KAŠKONAS, P., RAUDIENĖ, E., DOBILIENĖ, J. ir URBONAVIČIUS, B. G. Etalonų poreikio pagrindimo studija. 2015. ISBN 9192631770.
40. Pressure balances - Product overview - WIKA. [interaktyvus]. [Žiūrėta 2023-05-04]. Prieiga per: https://www.wika.com/en-en/pressure_balances.WIKA

Priedai

1 priedas. Etalono pasirinkimo algoritmas



2 priedas. Druck DPI705E slėgio kalibratoriaus išorinės laboratorijos kalibravimo liudijimas

Kalibravimo liudijimo Nr. 69/22-S
išduoto 2022-05-13 2-asis psl.

Kalibravimo sąlygos.

Aplinkos sąlygos: atmosferos slėgis (100,4±0,1) kPa, oro temperatūra (21±0,3)°C, santykinė oro drėgmė (40,1±3,7) %.

Prieš pradėdant kalibravimą, slėgio indikatoriuje buvo nustatytas 0.

Kalibravimo metu darbinė terpė - azotas.

Kalibravimo rezultatai.

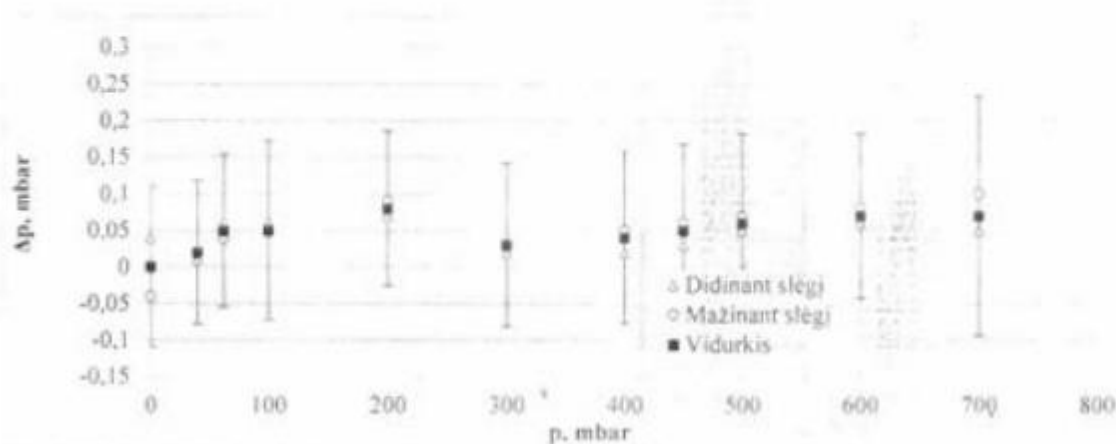
Kalibravimo rezultatai nurodyti lentelėje ir 1 pav.

Etaloninė slėgio vertė, p_{01}^*	Kalibruojamojo matuoklio rodmuo p_{20}			Paklaida, Δp^{**}	Sutartinė paklaida, δp^{**}	Išplėstinė neapibrėžtis $u(p)^{**}$
	didinant slėgį	mažinant slėgį	vidurkis*			
mbar	mbar	mbar	mbar	mbar	%	mbar
0,00	0,04	-0,04	0,00	0,00	0,000	0,109
39,97	39,98	39,99	39,99	0,02	0,003	0,098
61,95	62,01	61,99	62,00	0,05	0,007	0,104
99,93	99,99	99,98	99,99	0,05	0,007	0,122
199,85	199,92	199,94	199,93	0,08	0,011	0,106
299,99	300,01	300,02	300,02	0,03	0,004	0,112
399,99	400,01	400,04	400,03	0,04	0,006	0,117
449,99	450,02	450,05	450,04	0,05	0,007	0,117
499,98	500,03	500,05	500,04	0,06	0,009	0,121
599,98	600,04	600,06	600,05	0,07	0,010	0,112
700,00	700,06	700,08	700,07	0,07	0,010	0,163

Pastabos. 1 mbar = 100 Pa

* – aritmetinis vidurkis

** – dydžiai, apskaičiuoti pagal vidutines vertes



1 pav. Kalibravimo rezultatai

3 priedas. Furness Controls FCO750 slėgio nuotėkio matuoklio gamintojo specifikacija

SPECIFICATION

Pressure Ranges

Default Range	Alternative Pressure units
±99.99 mb	1.450psi, 9.999kPa, 40.14inWC, 75.00mmHg, 1020mmWC
±200.0 mb	2000bar, 2.901psi, 20.00 kPa, 80.29inWC, 150mmHg, 2039mmWC
±999.9 mb	9999bar, 14.50psi, 99.99kPa, 401.4inWC, 750mmHg
-1.000 to +4.000 bar	4000mb, 58.02psi, 400.0kPa, 1606 inWC, 3000mmHg
-1.000 to +8.000 bar	8000mb, 116.0psi, 800.0kPa, 3212inWC, 6001mmHg
-1.000 to +9.999 bar	9999mb, 145psi, 999.9kPa, 4014inWC, 7500mmHg
-1.00 to +14.00 bar	203.1psi, 1400kPa, 5620inWC
-1.00 to +30.00 bar	435.1psi, 3000kPa

Leak Ranges

Default Range	Alternative DP units	Flow Units
200.0 Pa	2.000mb, 20.39mmWC, 0.8029inWC, 20.00Pa/S, 0.2000mb/S	99.99cc/s, 999.9cc/min, 99.99cc/min, 9.999cc/min,
2.000 kPa	2000Pa, 20.00mb, 203.9mmWC, 8.029inWC, 200.0Pa/S, 2.000mb/S	999.9cc/hr, 999.9cmm/s, 9.999l/min, 999.9ml/m 99.99ml/m 9.999ml/m 0.9999mbl/s
20.00 kPa	200.0mb, 203.9cmWC, 80.29inWC, 2.000kPa/S, 20.00mb/S	

Calibration Accuracy	10% to 100% range: < ±(1% of reading +1 digit)
.....	0 to 10% range: < ±(0.1% of range +1 digit)
.....	(20kPa model = < ±(1% range + 1 digit)
Fluid Compatibility	Air and non corrosive gasses.
Temperature Limits	0-70°C storage, 0-40°C working.
Internal test volume	10cc (11cc if calibration port fitted).
Outputs	Transistor outputs (active high)
.....	12VDC - 45VDC, 120mA.
Inputs	Opto coupled, 5V to 24V DC.
.....	Can be wired active high or low.
Supply Voltage	24V DC ± 10% at < 0.5A
Supply Pressure	5 to 10 bar.
Regulated Air In	16 bar maximum, except for the 30 bar range which
.....	is a special build that accepts 35 bar maximum.
Program Data Retention	> 10 Years in non-volatile memory.
Weight	9kg

4 priedas. ATEQ F620 slėgio nuotėkio matuoklio gamintojo specifikacija

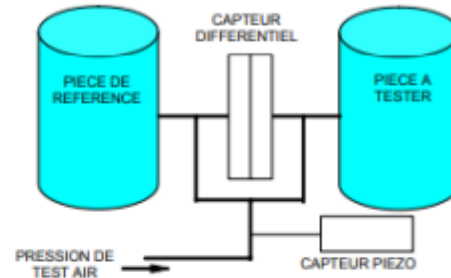
All manuals and user guides at all-guides.com

Sheet #673u – Definition, characteristics and measurement principles

DEFINITION, CHARACTERISTICS AND MEASUREMENT PRINCIPLES

1. DEFINITION OF THE ATEQ 6TH SERIES

The ATEQ 6th series is a state of the art touch color screen compact air/air leak detectors designed to test the airtightness of parts on production lines. It is specially adapted for automatic and semi-automatic workbenches. The method used is based on the measurement of a small variation or drop in differential pressure between the test and reference parts, when both are filled to an identical pressure.



2. MEASUREMENT CHARACTERISTICS

2.1. PRESSURE DROP MEASUREMENT

RANGE	ACCURACY	maximum RESOLUTION
0 – 500 Pa	2.5% of the pressure +/- 1 Pa	0.1 Pa

2.2. TEST PRESSURE MEASUREMENT

RANGE	ACCURACY	maximum RESOLUTION
F.S. = 200 mbar	+/- (1.5% of the pressure + 0.2 hPa)	0.1 % FS
0.2 < F.S. ≤ 5 bar	+/- (1.5% of the pressure + 7.5 hPa)	0.1 % FS
5 < F.S. ≤ 10 bar	+/- (1.5% of the pressure + 15 hPa)	0.1 % FS

2.3. MECHANICAL PRESSURE REGULATION



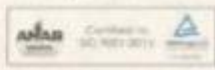
Mechanical regulation	Electronic regulation	
80 kPa to - 2 kPa.	- 80 kPa to - 2 kPa.	50 kPa to 500 kPa.
0,5 kPa to 14 kPa.	1 kPa to 20 kPa.	100 kPa to 1000 kPa
5 kPa to 50 kPa.	2 kPa to 50 kPa.	- 100 kPa to + 100 kPa.
20 kPa to 400 kPa.	10 kPa to 100 kPa.	- 100 kPa to + 400 kPa.
50 kPa to 900 kPa.	20 kPa to 200 kPa.	- 100 kPa to + 1000 kPa.

For other pressure ranges please contact ATEQ.

Version 1.04a

User guide ATEQ 6th series Page 1/7

5 priedas. *Additel ADT681-DP* išorinės laboratorijos kalibravimo liudijimas

Calibration Certificate
Certificate no. K25054141

Page 2

CALIBRATION RECORD

Differential pressure gauge
Type ADT681-OP
Range +/- 25 mbar

The results are corrected to standard conditions (1013,25 hPa - 293 K)

*Nominal gauge pressure (x)	**Reference pressure	Error	Expanded uncertainty (k = 2)
mbar			mbar
0,000	0,000	0,000	0,0017
2,500	2,499	0,001	0,0019
5,001	4,999	0,002	0,0018
7,501	7,500	0,001	0,0021
10,001	10,000	0,001	0,0021
12,501	12,499	0,001	0,0024
15,004	15,002	0,001	0,0025
17,503	17,501	0,001	0,0028
20,004	20,002	0,002	0,0031
22,502	22,500	0,002	0,0032
25,002	25,000	0,002	0,0034

Serial number 054621

6 priedas. *Furness FCO750* kalibravimo rezultatai

12 lentelė. *Furness Controls FCO750* 10–100 % PS diapazone manometrinio slėgio kalibravimo rezultatai

Eil. Nr.	Slėgio kalibratoriaus rodmenų vidurkis	Nuotėkio matuoklio rodmuo						Aritmetinis vidurkis	Paklaida*	Histerizė*	Išplėstinė neapibrėžtis (+/-), k = 2
		Didinant slėgį	Mažinant slėgį	Didinant slėgį	Mažinant slėgį	Didinant slėgį	Mažinant slėgį				
		n = 1		n = 2		n = 3					
Pa	Pa	Pa	Pa	Pa	Pa	Pa	Pa	Pa	Pa	Pa	
1	0	0	10	0	10	0	0	3	3	7	14,0
2	4007	4010	4010	4010	4010	4010	4020	4012	5	3	13,3
3	8009	8010	8010	8010	8020	8010	8020	8013	4	7	14,3
4	12004	12010	12020	12010	12010	12000	12010	12010	6	7	15,2
5	16007	16010	16010	16000	16010	16010	16020	16010	3	7	15,5
6	20007	20010	20020	20010	20020	20010	20020	20015	8	10	15,9

*Dydžiai apskaičiuoti pagal vidutines vertes

13 lentelė. *Furness Controls FCO750* 0–10 % PS diapazone manometrinio slėgio kalibravimo rezultatai

Eil. Nr.	Slėgio kalibratoriaus rodmenų vidurkis	Nuotėkio matuoklio rodmuo						Aritmetinis vidurkis	Paklaida*	Histerizė*	Išplėstinė neapibrėžtis (+/-), k = 2
		Didinant slėgį	Mažinant slėgį	Didinant slėgį	Mažinant slėgį	Didinant slėgį	Mažinant slėgį				
		n = 1		n = 2		n = 3					
Pa	Pa	Pa	Pa	Pa	Pa	Pa	Pa	Pa	Pa	Pa	
1	0	-1	2	0	1	0	1	1	1	2	13,6
2	199	200	201	199	201	200	202	201	2	2	13,6
3	401	400	402	401	403	402	404	402	1	2	13,6
4	599	602	602	600	602	601	604	602	3	2	13,6
5	802	803	804	805	806	804	806	805	3	1	13,6
6	1000	1002	1003	1004	1005	1004	1006	1004	4	1	13,6
7	1200	1205	1207	1204	1205	1205	1207	1206	6	2	13,6
8	1401	1409	1411	1407	1409	1407	1407	1408	7	1	13,6
9	1599	1607	1609	1608	1610	1611	1612	1610	11	2	13,6
10	1798	1810	1812	1806	1809	1810	1812	1810	12	2	13,6
11	1999	2012	2014	2011	2012	2009	2012	2012	13	2	13,6

7 priedas. Normaliojo dėsnio lentelė [35]

Area under the Normal Curve from $X = 0$ to $X = \alpha$

α	0.00	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09
0.0	0.00000	0.00399	0.00798	0.01197	0.01595	0.01994	0.02392	0.02790	0.03188	0.03586
0.1	0.03983	0.04380	0.04776	0.05172	0.05567	0.05962	0.06356	0.06749	0.07142	0.07535
0.2	0.07926	0.08317	0.08706	0.09095	0.09483	0.09871	0.10257	0.10642	0.11026	0.11409
0.3	0.11791	0.12172	0.12552	0.12930	0.13307	0.13683	0.14058	0.14431	0.14803	0.15173
0.4	0.15542	0.15910	0.16276	0.16640	0.17003	0.17364	0.17724	0.18082	0.18439	0.18793
0.5	0.19146	0.19497	0.19847	0.20194	0.20540	0.20884	0.21226	0.21566	0.21904	0.22240
0.6	0.22575	0.22907	0.23237	0.23565	0.23891	0.24215	0.24537	0.24857	0.25175	0.25490
0.7	0.25804	0.26115	0.26424	0.26730	0.27035	0.27337	0.27637	0.27935	0.28230	0.28524
0.8	0.28814	0.29103	0.29389	0.29673	0.29955	0.30234	0.30511	0.30785	0.31057	0.31327
0.9	0.31594	0.31859	0.32121	0.32381	0.32639	0.32894	0.33147	0.33398	0.33646	0.33891
1.0	0.34134	0.34375	0.34614	0.34849	0.35083	0.35314	0.35543	0.35769	0.35993	0.36214
1.1	0.36433	0.36650	0.36864	0.37076	0.37286	0.37493	0.37698	0.37900	0.38100	0.38298
1.2	0.38493	0.38686	0.38877	0.39065	0.39251	0.39435	0.39617	0.39796	0.39973	0.40147
1.3	0.40320	0.40490	0.40658	0.40824	0.40988	0.41149	0.41308	0.41466	0.41621	0.41774
1.4	0.41924	0.42073	0.42220	0.42364	0.42507	0.42647	0.42785	0.42922	0.43056	0.43189
1.5	0.43319	0.43448	0.43574	0.43699	0.43822	0.43943	0.44062	0.44179	0.44295	0.44408
1.6	0.44520	0.44630	0.44738	0.44845	0.44950	0.45053	0.45154	0.45254	0.45352	0.45449
1.7	0.45543	0.45637	0.45728	0.45818	0.45907	0.45994	0.46080	0.46164	0.46246	0.46327
1.8	0.46407	0.46485	0.46562	0.46638	0.46712	0.46784	0.46856	0.46926	0.46995	0.47062
1.9	0.47128	0.47193	0.47257	0.47320	0.47381	0.47441	0.47500	0.47558	0.47615	0.47670
2.0	0.47725	0.47778	0.47831	0.47882	0.47932	0.47982	0.48030	0.48077	0.48124	0.48169
2.1	0.48214	0.48257	0.48300	0.48341	0.48382	0.48422	0.48461	0.48500	0.48537	0.48574
2.2	0.48610	0.48645	0.48679	0.48713	0.48745	0.48778	0.48809	0.48840	0.48870	0.48899
2.3	0.48928	0.48956	0.48983	0.49010	0.49036	0.49061	0.49086	0.49111	0.49134	0.49158
2.4	0.49180	0.49202	0.49224	0.49245	0.49266	0.49286	0.49305	0.49324	0.49343	0.49361
2.5	0.49379	0.49396	0.49413	0.49430	0.49446	0.49461	0.49477	0.49492	0.49506	0.49520
2.6	0.49534	0.49547	0.49560	0.49573	0.49585	0.49598	0.49609	0.49621	0.49632	0.49643
2.7	0.49653	0.49664	0.49674	0.49683	0.49693	0.49702	0.49711	0.49720	0.49728	0.49736
2.8	0.49744	0.49752	0.49760	0.49767	0.49774	0.49781	0.49788	0.49795	0.49801	0.49807
2.9	0.49813	0.49819	0.49825	0.49831	0.49836	0.49841	0.49846	0.49851	0.49856	0.49861
3.0	0.49865	0.49869	0.49874	0.49878	0.49882	0.49886	0.49889	0.49893	0.49896	0.49900
3.1	0.49903	0.49906	0.49910	0.49913	0.49916	0.49918	0.49921	0.49924	0.49926	0.49929
3.2	0.49931	0.49934	0.49936	0.49938	0.49940	0.49942	0.49944	0.49946	0.49948	0.49950
3.3	0.49952	0.49953	0.49955	0.49957	0.49958	0.49960	0.49961	0.49962	0.49964	0.49965
3.4	0.49966	0.49968	0.49969	0.49970	0.49971	0.49972	0.49973	0.49974	0.49975	0.49976
3.5	0.49977	0.49978	0.49978	0.49979	0.49980	0.49981	0.49981	0.49982	0.49983	0.49983
3.6	0.49984	0.49985	0.49985	0.49986	0.49986	0.49987	0.49987	0.49988	0.49988	0.49989
3.7	0.49989	0.49990	0.49990	0.49990	0.49991	0.49991	0.49992	0.49992	0.49992	0.49992
3.8	0.49993	0.49993	0.49993	0.49994	0.49994	0.49994	0.49994	0.49995	0.49995	0.49995
3.9	0.49995	0.49995	0.49996	0.49996	0.49996	0.49996	0.49996	0.49996	0.49997	0.49997

8 priedas. Furness FCO750 kalibravimo rezultatai

14 lentelė. Furness Controls FCO750 manometrinio slėgio 0–10 % PS diapazone kalibravimo rezultatai (2)

Eil. Nr.	Slėgio kalibratoriaus rodmenų vidurkis	Nuotėkio matuoklio rodmuo							Paklaida**	Histerizė**	Išplėstinė neapibrėžtis, (+/-), k = 2
		Didinant slėgį	Mažinant slėgį	Didinant slėgį	Mažinant slėgį	Didinant slėgį	Mažinant slėgį	Aritmetinis vidurkis			
		n = 1		n = 2		n = 3					
Pa	Pa	Pa	Pa	Pa	Pa	Pa	Pa	Pa	Pa	Pa	
1	0	-1	2	0	1	0	1	1	1	2	10,8
2	199	200	201	199	201	200	202	201	2	2	10,8
3	401	400	402	401	403	402	404	402	1	2	10,8
4	599	602	602	600	602	601	602	602	3	1	10,8
5	802	803	804	803	804	804	805	804	2	1	10,8
6	1000	1002	1003	1002	1005	1003	1005	1003	3	2	10,9
7	1200	1202	1203	1204	1205	1202	1203	1203	3	1	10,9
8	1401	1404	1405	1403	1404	1402	1403	1404	3	1	10,9
9	1599	1602	1603	1604	1605	1603	1604	1604	5	1	11,0
10	1798	1803	1807	1803	1805	1803	1804	1804	6	2	11,0
11	1999	2005	2007	2003	2005	2004	2006	2005	6	2	11,1

15 lentelė. Furness Controls FCO750 skirtuminio slėgio 10–100 % PS diapazone kalibravimo rezultatai

Eil. Nr.	Slėgio kalibratoriaus rodmenų vidurkis	Nuotėkio matuoklio rodmuo							Paklaida**	Histerizė**	Išplėstinė neapibrėžtis, (+/-), k = 2
		Didinant slėgį	Mažinant slėgį	Didinant slėgį	Mažinant slėgį	Didinant slėgį	Mažinant slėgį	Aritmetinis vidurkis			
		n = 1		n = 2		n = 3					
Pa	Pa	Pa	Pa	Pa	Pa	Pa	Pa	Pa	Pa	Pa	
1	0	-2	-1	-1	-1	0	1	-1	-1	1	1,80
2	400,1	399	405	398	405	397	405	402	1	7	6,07
3	800,1	798	804	799	805	798	806	802	2	7	5,80
4	1200,0	1197	1204	1198	1208	1198	1206	1202	2	8	7,32
5	1599,8	1599	1607	1599	1608	1599	1609	1604	4	9	7,77
6	1999,9	1998	2012	1997	2013	1998	2013	2005	5	15	12,88

16 lentelė. Furness Controls FCO750 skirtuminio slėgio 0–10 % PS diapazone kalibravimo rezultatai

Eil. Nr.	Nuotėkio matuoklio rodmuo							Paklaida**	Histerizė**	Išplėstinė neapibrėžtis, (+/-), k = 2
	Didinant slėgį	Mažinant slėgį	Didinant slėgį	Mažinant slėgį	Didinant slėgį	Mažinant slėgį	Aritmetinis vidurkis			
	n = 1		n = 2		n = 3					
Pa	Pa	Pa	Pa	Pa	Pa	Pa	Pa	Pa	Pa	
1	0	0	-1	0	0	1	0	0	0	0,71
2	20	21	21	20	20	21	21	1	0	0,90
3	40	41	40	41	40	40	40	0	1	0,93
4	60	61	60	61	61	61	61	1	1	0,93
5	80	82	80	81	80	80	81	1	1	1,28
6	100	101	101	102	100	101	101	1	1	1,21
7	121	122	121	122	120	121	121	1	1	1,21
8	141	142	141	142	141	142	142	1	1	1,05
9	161	162	161	162	161	162	162	1	1	1,05
10	181	183	181	182	181	182	182	2	1	0,93
11	201	202	201	202	202	203	202	2	1	0,93

9 priedas. ATEQ F620 kalibravimo rezultatai

17 lentelė. ATEQ F620 manometrinio slėgio kalibravimo rezultatai

Eil. Nr.	Slėgio kalibratoriaus rodmenų vidurkis	Nuotėkio matuoklio rodmuo						Aritmetinis vidurkis	Paklaida**	Histerizė**	Išplėstinė neapibrėžtis, (+/-), k = 2
		Didinant slėgį	Mažinant slėgį	Didinant slėgį	Mažinant slėgį	Didinant slėgį	Mažinant slėgį				
		n = 1		n = 2		n = 3					
	Pa	Pa	Pa	Pa	Pa	Pa	Pa	Pa	Pa	Pa	Pa
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	433
2	14006	13980	14090	13970	14030	13840	14030	13990	-16	120	437
3	28004	28060	28090	28050	28090	28030	28050	28062	58	30	433
4	42003	42040	42070	42050	42090	42020	42120	42065	62	57	434
5	56004	56040	56120	56060	56090	56040	56120	56078	74	63	434
6	70000	70090	70130	70080	70130	70060	70120	70102	102	50	434

18 lentelė. ATEQ F620 skirtuminio slėgio kalibravimo rezultatai

Eil. Nr.	Nuotėkio matuoklio rodmuo						Aritmetinis vidurkis	Paklaida**	Histerizė**	Išplėstinė neapibrėžtis, (+/-), k = 2
	Didinant slėgį	Mažinant slėgį	Didinant slėgį	Mažinant slėgį	Didinant slėgį	Mažinant slėgį				
	n = 1		n = 2		n = 3					
	Pa	Pa	Pa	Pa	Pa	Pa	Pa	Pa	Pa	Pa
1	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0,93
2	101	102	101	101	100	102	101	1	1	1,21
3	202	203	202	203	201	203	202	2	1	1,36
4	302	303	304	305	305	306	304	4	1	1,89
5	404	405	406	407	402	404	405	5	1	2,25
6	504	504	504	506	505	508	505	5	2	2,17

10 priedas. Kalibravimo periodiškumo nustatymo algoritmas slėgio MP

