



**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS**  
**ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS**

**Donatas Miklušis**

**DINAMOMETRO SU DIDELIU PRADINIU NUOKRYPIU**  
**KOMPENSAVIMO METODŲ TYRIMAS**

Baigiamasis magistro projektas

**Vadovas**

Prof. Vytautas Markevičius

**KAUNAS, 2018**

**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS  
ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS  
ELEKTRONIKOS INŽINERIJOS KATEDRA**

**DINAMOMETRO SU DIDELIU PRADINIU NUOKRYPIU  
KOMPENSAVIMO METODŲ TYRIMAS**

Baigiamasis magistro projektas  
Elektronikos inžinerija(kodas621H61002)

**Vadovas**

(parašas) Prof. Vytautas Markevičius

(data)

**Recenzentas**

(parašas) Doc. dr. Mindaugas Žilys

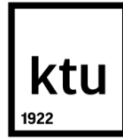
(data)

**Projektą atliko**

(parašas) Donatas Miklušis

(data)

**KAUNAS, 2018**



# KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

Elektros ir elektronikos fakultetas

(Fakultetas)

Donatas Miklušis

(Studento vardas, pavardė)

Elektronikos inžinerija 621H61002

(Studijų programos pavadinimas, kodas)

Baigiamojo projekto „Dinamometro su dideliu pradiniu nuokrypiu kompensavimo metodų tyrimas“

## AKADEMINIO SAŽININGUMO DEKLARACIJA

20 18 m. Gegužės 30 d.  
Kaunas

Patvirtinu, kad mano Donato Miklušio baigiamasis projektas tema „Dinamometro su dideliu pradiniu nuokrypiu kompensavimo metodų tyrimas“ yra parašytas visiškai savarankiškai, o visi pateikti duomenys ar tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti sąžiningai. Šiame darbe nei viena dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar internetinių šaltinių, visos kitų šaltinių tiesioginės ir netiesioginės citatos nurodytos literatūros nuorodose. Įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs.

Aš suprantu, kad išaiškėjus nesąžiningumo faktui, man bus taikomos nuobaudos, remiantis Kauno technologijos universitete galiojančia tvarka.

\_\_\_\_\_  
(vardą ir pavardę įrašyti ranka)

\_\_\_\_\_  
(parašas)

Miklušis, Donatas. Dinamometro su dideliu pradiniu nuokrypiu kompensavimo metodų tyrimas. Elektronikos inžinerijos magistro baigiamasis projektas / vadovas prof. Vytautas Markevičius; Kauno Technologijos Universitetas, Elektros ir Elektronikos fakultetas, Elektronikos Inžinerijos katedra.

Mokslo kryptis ir sritis: Elektros ir elektronikos inžinerija, Technologiniai mokslai

Reikšminiai žodžiai: *Dinamometro jautrusis elementas, instrumentinis stiprintuvas, jėgos matavimas, nuokrypis.*

Kaunas, 2018. 56 psl.

## SANTRAUKA

Magistrinio darbo tikslas išanalizuoti ir ištirti galimus signalo stiprinimo metodus, skirtus tilto tipo jutikliams su nestandartiškai dideliu pradiniu nuokrypiu. Tyrimas atliekamas naudojant žiedo tipo dinamometro jautriąjį elementą su 50 kartų didesniu galimu pradiniu nuokrypiu už naudingą signalą.

Pirmojoje darbo dalyje yra pateikta techninio lygio literatūros analizė. Aprašyti įprastiniai tilto tipo jutiklių derinimo grandinių pavyzdžiai. Taip pat, išanalizuota specializuotų, dinamometrų jautriųjų elementų, integrinių lustų galimybės ir apribojimai.

Antrojoje dalyje yra analizuojami suprojektuoti kompensavimo grandinių metodai. Pateikiami grandinių struktūrinės diagramos ir esminių komponentų darbo režimo aprašymai. Taip pat yra atliekami teoriniai signalų dinaminio diapazono skaičiavimai, bei įvertinama teorinis matavimo tikslumas.

Eksperimentinėje šio darbo dalyje aprašomi atlikti tyrimai ir jų rezultatai. Atliekami dviejų tipų matavimai: laikiniai grandinių signalų stabilumai ir temperatūriniai stabilumai. Temperatūriniai matavimai atliekami naudojant temperatūrinę testavimo kamerą,  $[-30^{\circ}\text{C};60^{\circ}\text{C}]$  diapazone. Šioje kameroje ištiriami visi antrojoje dalyje aprašyti signalo derinimo metodai. Pateikiama išėjimo signalo priklausomybė nuo aplinkos temperatūros, bei aprašoma kiekvieno metodo trūkumai ir privalumai. Galiausiai šie rezultatai yra apibendrinami ir pateikiamos darbo išvados.

Miklušis, Donatas. Research of Methods for Compensation of a Load Cell with a Large Zero Balance Deviation. Master's thesis in Electronics Engineering / supervisor prof. Vytautas Markevičius; Kaunas University of Technology, Faculty of Electrical and Electronics Engineering, department of Electronics Engineering.

Research area and field: Electrical and Electronics Engineering, Technological Sciences

Key words: *Load cell, instrumentational amplifier, force measurement, zero balance.*

Kaunas, 2018. 56 p.

## SUMMARY

The aim of this master thesis is to analyze and investigate possible signal amplifying methods for bridge type sensors with non-standardly high zero balance deviation. The investigation is performed using load-cell of the ring type with 50 times higher zero balance deviation comparing to signal of interest.

The first part of research provides technical literature analysis. Typical examples of conditioning circuits for bridge type sensor are described. Furthermore, possibilities and limitations of the specialized integral chips for dynamometer load cell were analyzed.

In the second part designed circuit compensation methods were analyzed. Circuits structural diagrams and operating conditions of the essential components were presented. Theoretical dynamic signal range calculations were performed and theoretical measurement accuracy was evaluated.

Experimental part of this work describes the performed researches and their results. Two types of measurements were performed: temporal signal level stability and temperature stability. Temperature measurements were executed using temperature test chamber in the range from -30°C to 60°C. All signal conditioning methods, described in the second part of the research, were investigated in the mentioned chamber. Output signal dependence of ambient temperature is depicted and drawbacks and advantages of each method are described. Finally, results are summarized and the conclusions of the work are presented.

## TURINYS

SANTRUMPŲ IR ŽENKLŲ AIŠKINIMO ŽODYNAS .....	8
ĮVADAS .....	9
1. LITERATŪROS ŠALTINIŲ APŽVALGA .....	10
1.1 Standartinis vieno instrumentinio stiprintuvo metodas .....	11
1.2 Tilto jutiklių nuskaitymas naudojant specializuotą mikroschemą.....	11
1.3 Nulinės apkrovos signalo kompensavimas rankiniu būdu .....	12
1.4 Nulinės apkrovos kompensavimas keitikliu kodas-analogas .....	13
1.5 Automatinio kompensavimo grandinė .....	14
1.6 Programinis matavimų stabilizavimas.....	15
2. METODINĖ DALIS .....	17
2.1 Sistemos struktūra .....	17
2.2 Nulinės apkrovos nuokrypio kompensavimo metodai .....	18
2.2.1 Kompensavimas su komutatoriumi .....	18
2.2.2 Kompensavimas su komutatoriumi ir nesustiprinto $V_{ref}$ matavimu .....	20
2.2.3 Metodas su komutatoriumi ir sustiprinto $V_{ref}$ matavimu .....	21
2.2.4 Kompensavimas su dviejų pakopų stiprinimu .....	22
2.2.5 Papildomo neigiamos įtampos šaltinio panaudojimas .....	24
2.3 Mikrovaldiklio dalis .....	25
2.3.1 MCU ir analogas-kodas keitiklis.....	25
2.3.2 Įtaiso matavimo algoritmas .....	26
2.3.3 Matavimo paklaidų įvertinimas galutiniam signalui .....	29
2.3.4 Maitinimo grandinės stabilizavimas.....	30
2.3.5 Pagrindinės matavimo programos algoritmas .....	33
2.3.6 Jutiklių su komutatoriumi kompensavimo algoritmas .....	35
3. TIRIAMOJI DALIS .....	39
3.1 Naudojama matavimo metodika.....	39
3.2 Dinamometro jautriojo elemento temperatūrinis stabilumas.....	40
3.3 Maitinimo įtampų stabilumas darbo temperatūrų diapazone .....	42
3.4 Dvigubo komutatoriaus įtaka matavimo tikslumui .....	43
3.5 Kompensavimo su nestiprinto $V_{ref}$ matavimu temperatūrinis stabilumas.....	46

3.6	Įtaiso su neigiama atstojamąja įtampa terminis stabilumas.....	47
3.7	Įtaiso su komutatoriumi terminis stabilumas.....	50
3.8	Įtaiso su komutatoriumi varžų daliklio terminis stabilumas.....	51
3.9	Įtaiso su komutatoriumi ir sustiprintu $V_{ref}$ terminis stabilumas.....	53
IŠVADOS IR PASIŪLYMAI .....		56
INFORMACIJOS ŠALTINIŲ SĄRAŠAS.....		57
PRIEDAI .....		59
Priedas 1. Pagrindinė mikrovaldiklio programa .....		59
Priedas 2. Sukurta LIN protokolo komunikacijos vartotojo sąsaja .....		62

## SANTRUMPŲ IR ŽENKLŲ AIŠKINIMO ŽODYNAS

REF	Atraminės įtampos stiprintuvo išvadas
F.S.	Maksimalios apkrovos išėjimo signalo lygis ( <i>angl. Full Scale</i> )
LIN	Nuosekliojo tinklo protokolas ( <i>angl. Local Interconnect Network</i> )
$\Delta\Sigma$	Delta sigma analogas-kodas keitiklis
AKK	Analogas-kodas keitiklis
KKA	Keitiklis kodas-analogas
$V_{out}$	Instrumentinio stiprintuvo išėjimo įtampa ( <i>angl. out</i> )
$V_{ref}$	Atstojamoji stiprintuvo įtampa
LDO	Tiesinis įtampos keitiklis ( <i>angl. low dropout linear regulator</i> )
PWM	Impulso pločio moduliacija ( <i>angl. pulse width modulation</i> )
MCU	Mikrovaldiklio vienetas ( <i>angl. Micro Computer Unit</i> )
$V_{+in}$	Neinvertuojantis instrumentinio stiprintuvo įėjimas
$V_{-in}$	Invertuojantis instrumentinio stiprintuvo įėjimas
$V_{CM}$	Diferencialinio signalo bendrojo lygio įtampa
$V_{diff}$	Diferencinis jutiklio išėjimo signalas
$V_{ddminus}$	Neigiamos atstojamosios įtampos šaltinis
$V_{pwm}$	PWM generatoriaus išėjimo įtampa
STM	Gamintojas „STMicroelectronics“
LSB	Mažiausios įtakos bitas ( <i>angl. Least significant bit</i> )
$V_{temp}$	Elektroninio termometro įtampos lygis
SMP	Spausdintinio montažo plokštė ( <i>angl. Printed circuit board</i> )



## IVADAS

Transporto srityje vis plačiau taikomos išmanios stabdymo sistemos. Šios palengvina vairuotojų darbą ir padeda išvengti avarinių situacijų. Šiuolaikinis automobilis tiesiog neišsivaizduojamas be tokios sistemos. Kita vertus, automobiliams skirtos priekabos arba prikabinami automobiliniai nameliai dažnai tokių sistemų neturi. Šios problemos sprendimui buvo pasiūlyta sukurti išmaniają priekabos stabdymo sistemą. Pastarąją sudaro dinamometro jautrusis elementas, kuris skirtas matuoti jėgą tarp automobilio ir priekabos. Stabdymo atveju priekaba dėl savo inercijos stumia automobilį ir pagal išmatuojamos jėgos dydį, įjungiamo adaptyvūs priekabos stabdžiai. Darbo tyrimo objektas yra analoginis dinamometro jautrusis elementas ir jo signalo stiprinimo grandinė.

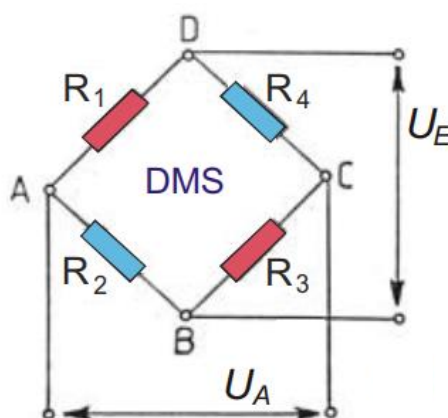
Varžinė tilto grandinė yra plačiai naudojama konvertuoti fizinius parametrus kaip jėgą ir slėgį į elektrinį signalą. Įprastai tokių jutiklių išėjimo signalas yra per žemo lygio, kad būtų galima tiesiogiai nuskaityti su AKK. Dėl to, būtina naudoti signalo stiprinimo grandinę. Taip pat, gamybinio proceso metu tokius jutiklius siekiama pagaminti taip, kad ramybės būsenoje diferencinis signalas būtų kuo artimesnis nuliui. Nulinės apkrovos nuokrypis yra neigiamas jutiklio parametras, dėl kurio sumažėja dinaminis matavimo diapazonas. Vis dėlto, ne visų jutiklių gamybos metu pavyksta tinkamai atlikti balansavimą. Dėl šios priežasties, buvo nuspręsta ištirti galimus grandinių jungimo metodus, skirtus nuskaityti ir kompensuoti dinamometro jautriojo elemento su nestandartiškai dideliu pradiniu nuokrypiu signalą.

Magistrinio darbo tikslas išanalizuoti ir ištirti galimus signalo stiprinimo grandinių metodus, skirtus tilto tipo jutikliams su nestandartiškai dideliu pradiniu nuokrypiu. Įvykdyti darbo tikslą yra išsikeliama šie uždaviniai:

- išanalizuoti praktikoje naudojamus metodus, ir išryškinti jų privalumus ir trūkumus;
- suprojektuoti matavimo sistemą su mažesne, nei  $\pm 5\%$  matavimo paklaida;
- pasiūlyti kompensavimo metodą skirtą dirbti su  $\pm 250mV$  nulinės apkrovos nuokrypiu;
- sukurti automatinį jutiklių kompensavimo algoritimą, be būtinybės fiziškai keisti signalinių laidų;
- praktiškai įvertinti pasiūlytų jungimo metodų temperatūrinį stabilumą,  $[-30^{\circ}C; 60^{\circ}C]$  intervale;
- suprojektuoti kompaktišką įtaisą, skirtą montuoti automobilio priekaboje.

## 1. LITERATŪROS ŠALTINIŲ APŽVALGA

Darbe tiriamas dinamometro jautrusis elementas sudarytas iš 4 į Vinstono tiltelį sujungtų tenzo rezistorių (**1 pav.**). Proporcingai tiltelį veikiančiai jėgai keičiasi diferencialinis signalas tarp priešingų tilto pečių  $U_A$ . Praktikoje įprasta, kad ramybės būsenoje (be apkrovos) diferencialinis išėjimo signalas yra artimas nuliui. Dėl to, gamybos proceso metu tenzo rezistoriai parenkami tokie, kad galiotų balanso sąlyga:  $R_1 \times R_3 = R_2 \times R_4$ . Tokiu atveju, ramybės būsenoje absoliutiniai A ir C taškų įtampų lygiai atitinka pusę maitinimo įtampos, o diferencialinis tarpusavio skirtumas yra lygus nuliui.

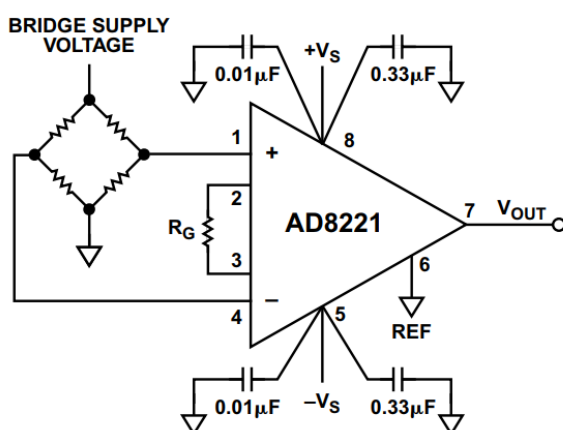


**1 pav.** Vinstono tiltelio jungimas[1]

Kita vertus, darbe tiriamas specifinės žiedo konstrukcijos dinamometro jutiklis. Šis jutiklis pasižymi nestandartiškai dideliu pradiniu nuokrypiu (t.y. ramybės būsenoje, kai jutiklis neveikiamas jėga, diferencialinis jutiklio išėjimas nėra artimas nuliui). Pagal gamintojo techninį aprašą, šio jutiklio nulinės apkrovos nuokrypis yra  $\pm 50mV/V$ . Numatoma įtaisą maitinti 5V įtampa, todėl pradinio nuokrypio kitimo diapazonas yra  $[-250mV; 250mV]$ . Tačiau, kaip ir daugumos tokio tipo dinamometro jutiklių, šio jutiklio jautrumas yra  $2mV/V$ . Taigi, matuojamas signalas yra  $500mV/10mV = 50$  kartų mažesnės amplitudės negu galimas nulinės apkrovos nuokrypis. Šios sąlygos priverčia ieškoti nestandartiškų problemos sprendimo metodų, kadangi praktikoje naudojamų standartinių dinamometro jautriųjų elementų nulinės apkrovos nuokrypis neviršija  $\pm 1\% F.S.$  naudingo signalo ( $10mV \times 1\% = 0.1mV$ ).

## 1.1 Standartinis vieno instrumentinio stiprintuvo metodas

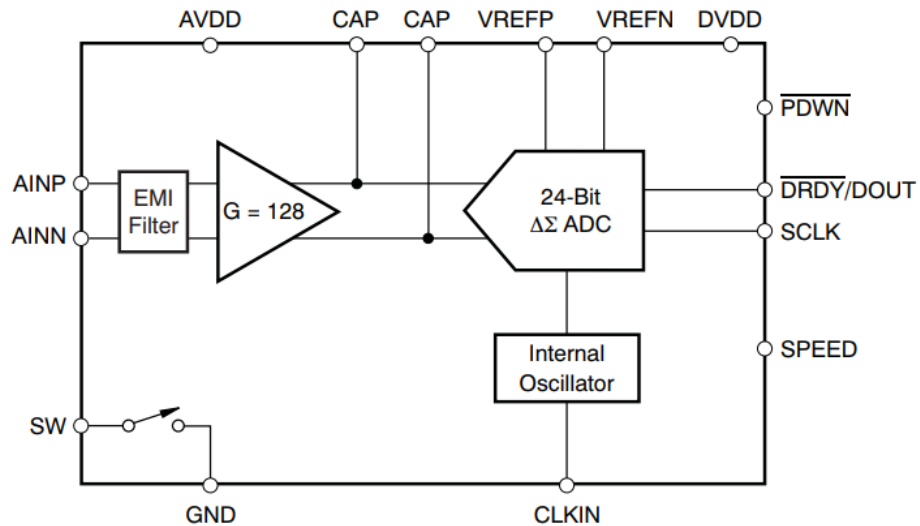
Praktikoje įprasta tilto tipo jutiklių diferencialinį signalą stiprinti naudojant vieno instrumentinio stiprintuvo konfigūraciją, kaip apateikta **2 pav.** Tai yra vienos pakopos stiprinimo blokas, kuri turi diferencialinį įėjimą ir vieną išėjimą, REF išvado įtampos lygio atžvilgiu. Dažniausiai įėjimo gnybtai yra subalansuoti ir turi aukštas įėjimo impedanso reikšmes, dažniausiai apie  $10^9\Omega$ . Paprastai, tilto tipo jutiklių diferencialinio signalo bendras lygis yra pusė maitinimo įtampos. Taigi maitinant subalansuotą tilto jutiklį ir instrumentinį stiprintuvą vienoda įtampa, stiprintuvo įėjimo signalo bendrojo lygio ribos tenkina leistinų stiprintuvo signalo ribas.



**2 pav.** Standartinis diferencialinio signalo stiprinimas[2]

## 1.2 Tilto jutiklių nuskaitymas naudojant specializuotą mikroschemą

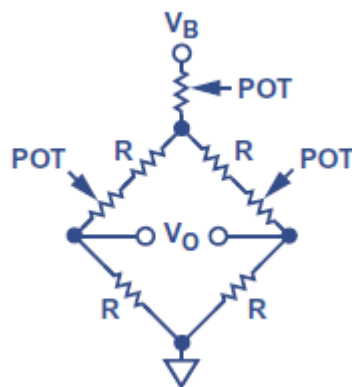
Rinkoje galima rasti specializuotų mikroschemų skirtų tilto tipo jutiklių signalo nuskaitymui. Vienas iš tokių yra „Texas Instruments“ gamintojo viskas-viename keitiklis „ADS1231“[3]. Jo struktūrinė diagrama pateikta **3 pav.** paveiksle. Mikroschemoje yra integruota elektromagnetinių trikdžių filtras, instrumentinis fiksuoto stiprinimo stiprintuvas, vidinis generatorius ir 24 bitų sigma-delta analogas-kodas keitiklis. Tai yra išbaigtas, universalus sprendimas, kurio naudojimui pakanka prijungti tilto jutiklio signalinius laidus ir skaitmeninis signalas perduodamas per dviejų laidų sąsają. Pagal techninį aprašą, mikroschema užtikrina žemą triukšmų lygį ir tokiems pritaikymams: svarstyklėms, tenzo jutikliams, dinamometrų jautriesiems elementas ir pramoniniams procesams. Kita vertus, maitinant čia mikroschemą 5V įtampa, maksimalus galimas diferencialinis signalas yra  $\pm 19.5mV$ . Darbe tiriamo dinamometro jautriojo elemento maksimali išėjimo įtampa yra 10mV. Dėl to, galimas nulinės apkrovos nuokrypis yra tik  $\pm 19.5mV - 10mV = \pm 14.5mV$ . Pagal užduoties aprašą nulinės apkrovos nuokrypis gali siekti  $\pm 250mV$ , taigi šita ir analogiškos mikroschemos yra netinka.



3 pav. „ADS1231“ mikroschemos struktūrinė diagrama [3]

### 1.3 Nulinės apkrovos signalo kompensavimas rankiniu būdu

Dinamometro jautriųjų elementų gamybos metu, dažniausiai atliekamas nulinės apkrovos signalo ir jautrumo derinimas. Po dinamometro pagaminimo toks kompensavimo metodas yra nekoreguojamas, kadangi dažniausiai jutikliai yra užliejami klėjais arba dervomis. Straipsnyje [4], [5] ir [6] aprašytas metodas, kaip naudojant papildomas išorines varžas kompensuojamas nulinės apkrovos nuokrypis (4 pav.). Šio kompensavimo metu tarp vieno iš tilto pečių ir maitinimo įtampos prijungiamas kintamos varžos rezistorius. Rankiniu būdu jo varža keičiama ir siekiama, kad neapkrauto jutiklio  $V_{diff}$  signalas būtų lygus 0mV.



4 pav. Rankinis tiltinio jutiklio kompensavimas naudojant papildomą rezistorių [4]

Kita vertus, papildomi išoriniai rezistoriai pakeičia jutiklio jautrumą ir temperatūrinį koeficientą. To įvertinimui atlikti teoriniai skaičiavimai. Dinamometro kompensavimui su 240mV

nulinės apkrovos nuokrypiu, kai tilto viršutinės varžos yra  $680\Omega$  ir  $550\Omega$ , o apatinės po  $330\Omega$ , reikia prijungti papildomą  $2.88k\Omega$  rezistorių prie  $680\Omega$ . Tokio jungimo atveju jutiklio jautrumas pasikeičia per 0.12%. Dinamometro tilto elementai yra naudojami vienodo tipo ir tvirtinami prie deformuojamojo elemento mažu atstumu vienas nuo kito. Dėl to, visų elementų varža turi panašų temperatūrinį koeficientą ir temperatūrų skirtumai tarp atskirų elementų yra artimi nuliui. Kita vertus, naudojant papildomą išorinį rezistorių, tiek jo temperatūrinis koeficientas, tiek absoliuti temperatūra nuo vidinių elementų skiriasi. Esant  $20^{\circ}\text{C}$  laipsnių skirtumui tarp vidinių elementų ir išorinio rezistoriaus ir naudojant išorinį rezistorių su  $200\text{ppm}/^{\circ}\text{C}$  koeficientu, diferencinis signalas pasikeičia per  $0,892\text{mV}$ , kas atitinka 8.92%.

#### 1.4 Nulinės apkrovos kompensavimas keitikliu kodas-analogas

Straipsnyje [7] aprašytas metodas naudojant TFT (*angl. Thick-film technology*) kuriama dinamometro jautrieji elementai. Signalo derinimo grandinei pasirinkta „Analog Devices“ gamintojo AD7730 mikroschema. Tai išbaigtas signalo nuskaitymo sprendimas, skirtas naudojimui su dinamometrais ir slėgio jutikliais. Kitame straipsnyje [8] taip pat aprašytas metodas, naudojant analogišką specializuotą AD8556 mikroschemą.

Šios mikroschemos išskirtinė dalis yra keitiklis kodas-analogas, kuris skirtas kompensuoti dinamometro jutiklio nulinės apkrovos nuokrypį. Pagal gamintojo pateikiamą techninį aprašymą, šis keitiklis turi 6 bitų rezoliuciją,  $2.5\text{mV LSB}$  ir  $2.5\text{ ppm}/^{\circ}\text{C}$  temperatūrinį dreifą. Kodas-analogas keitiklio išėjimo įtampos lygis apskaičiuojamas pagal formulę:

$$V_{KKA} = \frac{V_{ref}}{2000} \times D, \quad (1)$$

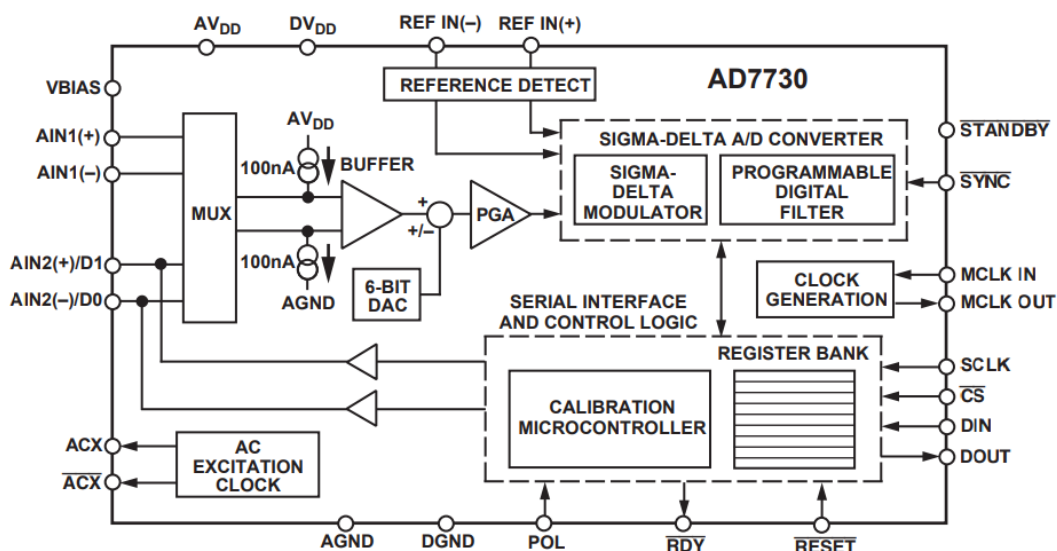
,čia  $V_{ref}$  – KKA atstojamoji įtampa,  $D$  – KKA vertės dešimtainės sistemos atitikmuo,  $V_{KKA}$  – KKA išėjimo signalas.

Taigi, naudojant  $5\text{V}$  atstojamąją įtampą galima kompensuoti  $[-77.5\text{mV}; 77.5\text{mV}]$  diapazono nulinės apkrovos nuokrypio vertę. Keitiklis turi 6 bitų rezoliuciją, bet vyriausiasis bitas yra skirtas ženklo parinkimui. Pagal struktūrinę diagramą šis išėjimo signalas yra pridodamas prie analoginio  $V_{diff}$  signalo ir sustiprinamas naudojamas programuojamą analoginės įtampos stiprintuvą. Signalas patenkantis į  $\Delta\Sigma$  analogas-kodas keitiklį apskaičiuojamas pagal formulę:

$$V_{\Delta\Sigma} = G \times (V_{+AIN} - V_{-AIN} + V_{KKA}), \quad (2)$$

čia  $V_{+AIN}$  -įėjimo signalas,  $V_{-AIN}$  -invertuotas įėjimo signalas,  $G$  -programuojama stiprinimo konstanta,  $V_{KKA}$ -KKA išėjimo signalas,  $V_{\Delta\Sigma}$  –  $\Delta\Sigma$  keitiklio matuojamas signalas.

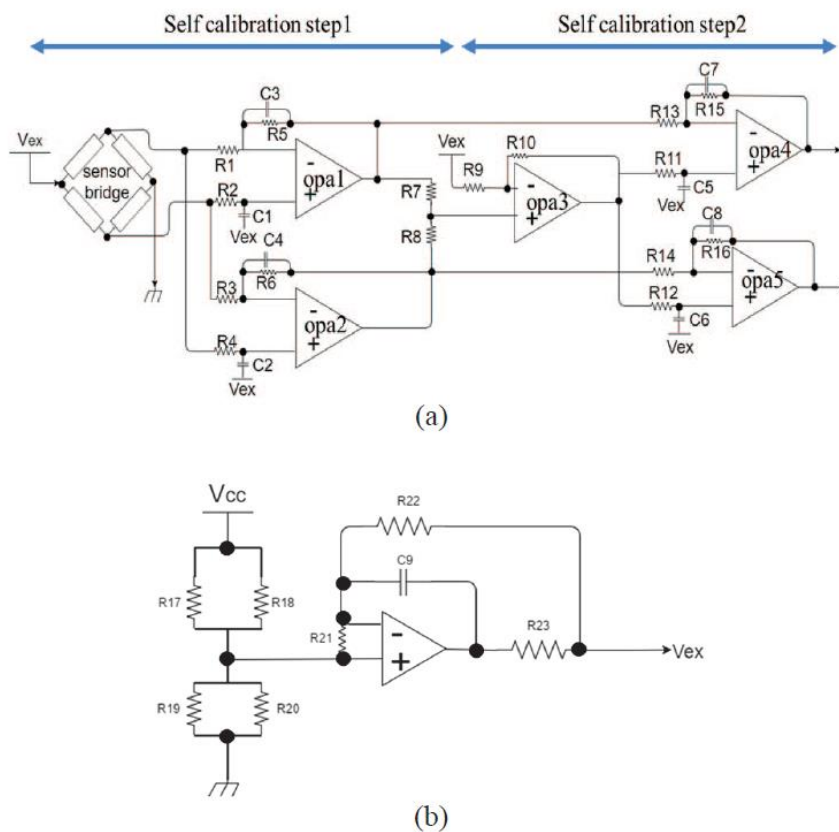
Kodas-analogas keitiklio signalas yra sustiprinamas kartu su jutiklio diferencialiniu signalu, todėl visi KKA keitiklio triukšmai ir temperatūrinis dreifas yra perduodami į išėjimo signalą. Dėl šios priežasties,  $V_{KKA}$  signalas turi būti kuo stabilesnis.



5 pav. Struktūrinė mikroschemos AD7730 diagrama [7]

### 1.5 Automatinio kompensavimo grandinė

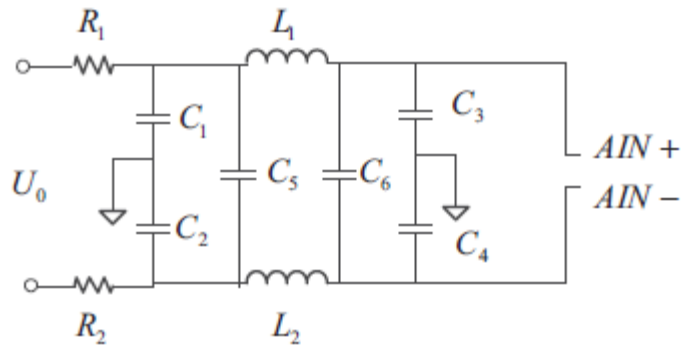
Straipsnyje [9] aprašytas tenzo jutiklių pritaikymas stebėti stacionarių objektų, kaip tiltų, būklę. Šiam tikslui jutikliai įliejami į konstrukcinių medžiagų vidų arba tiesiog priklijuojami iš išorės. Tokiu būdu registruojamas ilgalaikis medžiagų nusidėvėjimas, poslinkis ir deformacija. Svarbiausia straipsnyje analizuojama dalis yra analoginė kompensavimo grandinė. Pristatytos grandinės schema pateikta **6 pav.** Ilgo periodo matavimas paremtas energiją taupančiu budėjimo režimu ir tik trumpalaikiu įjungimu atlikti matavimams. Dėl priežasties, kad didžiąją laiko dalį grandinė būna išjungta, programinis atstojamosios įtampos kompensavimas nėra įmanomas. Tam pristatyta analoginė kompensavimo grandinė su penkiais operaciniais stiprintuvais. Iš šio jungimo išėjimo signalo išmatuojama bipolė deformacija, nepriklausomai nuo nuokrypio įtampos.



**6 pav.** Analoginė (a) automatinio kalibravimo ir jutiklių maitinimo įtampos grandinė (b) [9]

### 1.6 Programinis matavimų stabilizavimas

Dinamometro diferencinis signalas yra labai jautrus išoriniams triukšmams. Dėl to, straipsnyje [10] aprašyta analoginis ir skaitmeninis signalo apdorojimo būdas. Visų pirma, pateikiama diferencinio signalo analoginio filtravimo grandinė (**7 pav.**). Jutiklio signalą įtakoja maitinimo įtampos fluktuacijos, pašaliniai signalai ir atstumas tarp jutiklio ir nuskaitymo dalies. Grandinėje naudojamos L1 ir L2 ritės turi identišką induktyvumą. Jose kuriamas magnetinis laukas yra identiškų amplitudžių bet priešingų ženklų. Taip pat, naudojami C5 ir C6 kondensatoriai efektyviai nuslopiną diferencinio signalo triukšmus.



**7 pav.** Pasyvinis diferencinio signalo filtras prieš instrumentinį stiprintuvą [10]

Signalu nuskaitymas atliekamas su viskas viename integruota mikroschema. Kuo tikslesnių matavimo rezultatų gavimui, straipsnyje aptarta ir programiniai matavimų derinimo metodai. Autoriai išskiria tris pagrindinius metodus:

- dinamometro kalibravimas;
- nulio nustatymas;
- duomenų filtravimas.

Kiekvienas jutiklis turi būti kalibruojamas. Procedūros metu prietaiso rodmenys turi būti kalibruojami bent su penkiomis etaloninėmis vertėmis. Šios vertės įrašomos į mikrovaldiklio „FLASH“ tipo atmintį ir naudojant tiesinę interpoliaciją apskaičiuojama spaudimo jėga kiekviename intervale pagal skirtingus koeficientus. Žemiau pateikta skaičiavimo formulė:

$$m = m_i + (Z - z_i) \times \frac{m_{i+1} - m_i}{z_{i+1} - z_i}, \quad (3)$$

čia  $m$  - apskaičiuota spaudimo jėga,  $m_i$  ir  $m_{i+1}$  - pasirinkto intervalo ribos  $Z$ -išmatuota analogas-kodas keitiklio reikšmė,  $z_{i+1}$  ir  $z_i$  - kraštinės pasirinkto intervalo ribos.

Nulio nustatymo metodas paremtas automatinio nulio nustatymu. Prietaiso įjungimo momentu, išmatuota apkrova prilyginama nuliui. Prietaisui veikiant ilgesnį laiką atliekama automatinis nulio sekimas. Jeigu per laiko intervalą  $\Delta t$ , nulio lygis pasikeičia per mažesnę negu slenkstinę vertę, atliekama nulio korekcija. Jeigu nulio vertė nebegali būti atsekta – yra būtinas vartotojo įsikišimas.

Skaitmeninis duomenų filtravimas susideda iš kelių etapų. Visų pirma duomenys yra kaupiami į masyvą. Sukaupus nustatytą kiekį duomenų, atliekamas slenkamasis pildymas



(paskutinis matavimas pašalinamas iš masyvo ir papildoma nauju). Pašalinus iš masyvo maksimumus ir minimumus, atliekamas slenkamasis vidurkinimas pagal formulę:

$$y(n) = \frac{1}{L-2} \left\{ \sum_{i=n-L}^n x(n+i) - \max_{0 \leq i \leq L} \{x(n+i)\} - \min_{0 \leq i \leq L} \{x(n+i)\} \right\} \quad (4)$$

čia  $\max\{x(n+1)\}$ - matavimo maksimumai,  $\min\{x(n+1)\}$ -matavimo minimumai.

## 2. METODINĖ DALIS

### 2.1 Sistemos struktūra

Darbe tiriamą matavimo sistemą sudaro trys pagrindinės dalys: jutiklis, signalo derinimo grandinė ir mikrovaldiklis (8 pav.). Pirmoji sistemos dalis – dinamometro jutiklis, yra išbaigtas prietaisas ir jo koreguoti nebeįmanoma. Kita vertus, signalo derinimo grandinė ir mikrovaldiklis yra darbo tyrimo objektas. Matavimų reikšmės perduodamos naudojant LIN komunikavimo protokolą ir duomenų priėmimo mazgas neanalizuojamas.



8 pav. Sistemos empirinė struktūra

Didžiausias šio matavimo įtaiso iššūkis dinamometro jautriojo elemento nulinės apkrovos nuokrypis yra 25 kartus didesnis už naudingą signalą. Maksimalus jėgos sensoriaus naudingas (ieškomas) signalas, kai tiltas maitinamas 5V maitinimo įtampa, yra  $2mV/V \times 5V = 10mV$ . Numatoma mikrovaldiklį, kartu ir analogas-kodas keitiklį, maitinti 3.3V įtampa, taigi šį signalą reikia stiprinti apie 330 kartų –  $10mV \times 330 = 3.3V$ . Tuo metu galimas nulinės apkrovos nuokrypis gali būti  $\pm 50mV \times 5V = \pm 250mV$ . Jeigu naudingas signalas stiprinamas kartu su nulinės apkrovos nuokrypiu gaunama:  $(10mV + 250mV) \times 330 = 85,8V$  kai nuokrypis teigiamas ir  $-82.5V$  kai – neigiamas. Akivaizdu, kad toks sprendimas neįmanomas.

Dėl šios priežasties, pirma būtina iškompensuoti nulinės apkrovos nuokrypį ir tik tada stiprinti naudingą signalą. Tam reikalinga kompensavimo grandinė, skirta jutikliui kurio diferencialinio bendras signalo lygis yra apie 1.66V, o pats diferencinis signalas kinta  $[-250mV; 260mV]$  diapazone.

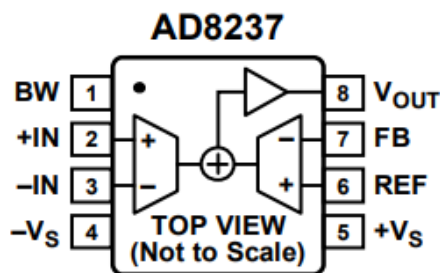
## 2.2 Nulinės apkrovos nuokrypio kompensavimo metodai

Šios užduoties sprendimui galimos kelios sprendimo strategijos, kurias apsprendžia įtaise naudojamoms maitinimo įtampoms. Pagal užduoties aprašymą, įtaisas turi funkcionuoti (atlikti matavimus), prie minimalaus 6V maitinimo įtampos lygio. Taigi maksimali maitinimo įtampa, nenaudojant papildomo DC/DC aukštinančiojo keitiklio, yra 5V. Šia įtampa bus maitinami stiprintuvai (instrumentiniai ir operaciniai) ir dinamometro tiltinis jautrusis elementas.

Taip pat, nagrinėjami kompensavimo metodai pasirinkti pagal minimalias kaštus, energijos suvartojimą ir sudėtingumą. Siekiama sukurti kuo paprastesnį ir mažiau komponentų turintį įtaisą, kuris tenkintų užduoties reikalavimus. Todėl metodai naudojantys brangius arba kompleksinius komponentus čia neanalizuojami.

### 2.2.1 Kompensavimas su komutatoriumi

Nulinės apkrovos nuokrypio kompensavimui gali būti naudojami instrumentiniai stiprintuvai, su stiprinama atstojamąja įtampa. Tokiems instrumentiniams stiprintuvams būdingas specialus darbo režimas, kai diferencialinis signalas stiprinamas kartu su atstojama įtampa. Vienas iš tokių stiprintuvų yra AD8237 iš „Analog Devices“. Šio prietaiso stiprinimas reguliuojamas dviem išoriniais rezistoriais tarp „FB“ ir „Vout“ išvadų, o atstojamoji įtampa prijungiama tiesiogiai prie „Ref“ išvadą (9 pav.).



9 pav. AD8237 išvadų konfigūracija[11]

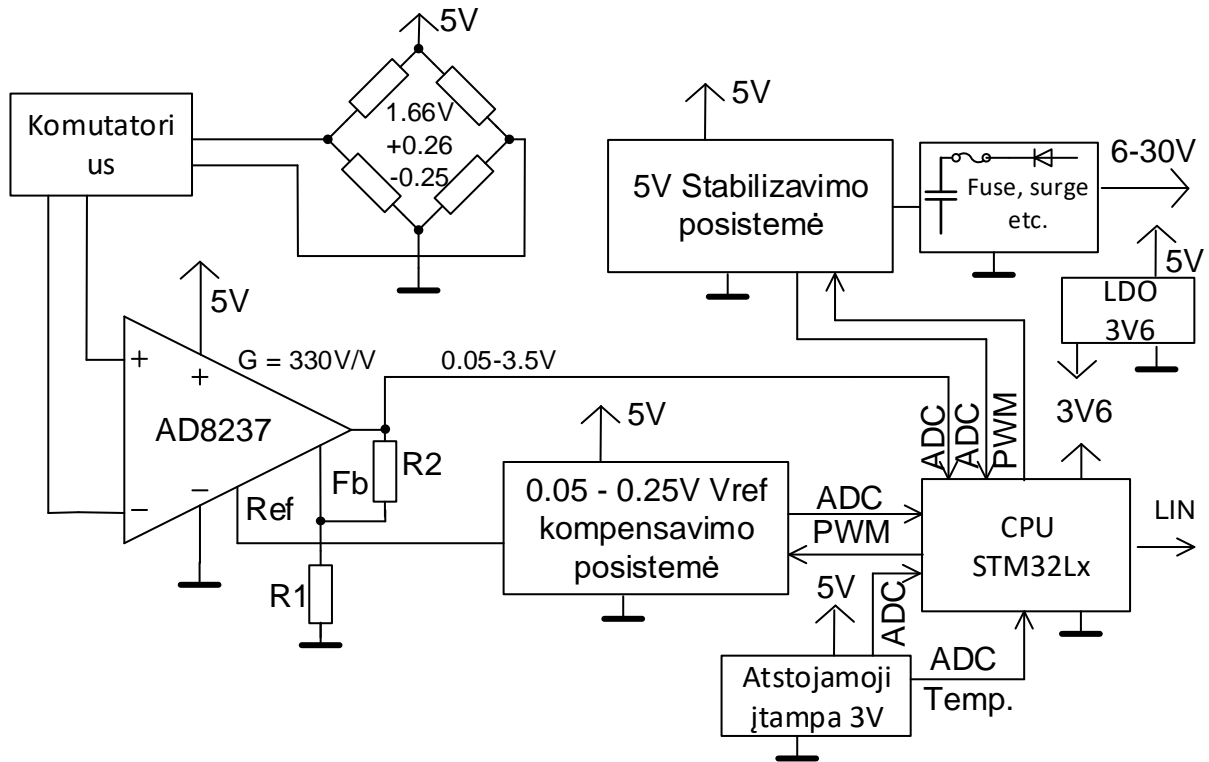
Prijungus šį instrumentinį stiprintuvą pagal (10 pav.), schemą, jo išėjimo signalo lygtis yra paskaičiuojamas pagal (5) formulę:

$$V_{out} = (V_{-in} + V_{+in} + V_{REF}) \times G, \quad (5)$$

čia  $V_{-in}$  ir  $V_{+in}$  - įtampos ant tilto pečių,  $V_{REF}$  - atstojamoji įtampa,  $G$  - stipinimo koeficientas (šiuo atveju tai 330V/V).

Tačiau toks sprendimas turi du trūkumus iš kurių didžiausias yra tai, kad  $V_{ref}$  įtamos paklaidos stiprinamos kartu su naudingą signalu. Pvz.  $\pm 1\text{mV}$  atstojamosios įtamos pokytis po instrumentinio stiprintuvo tampa  $\pm 330\text{mV}$  ir tai yra  $\pm 10\%$  paklaida ir yra absoliučiai nepriimtina. Antra problema yra tai, kad jutiklis gali turėti neigiamą nulinės apkrovos nuokrypį ir tuo atveju reikia turėti galimybę kompensuoti ir neigiamą nuokrypį. Šiam sprendimui realizuoti reikalingas neigiamos įtamos DC/DC keitiklis. Dar didesnė problema, kad neigiamą  $V_{ref}$  sudėtinga kontroliuoti mikrovaldikliu.

Neigiamos atstojamosios įtamos problemą galima apeiti atlikus tilto pečių komutaciją. Tuo atveju  $V_{ref}$  kompensavimo įtampa visada bus teigiama, tačiau atsiranda kita problema - jėgai veikiant tiltą naudingas tilto signalas mažėja. Šią problemą įmanoma apeiti su matuoklio programine įranga.



**10 pav.** Principinė schema naudojant AD8237 su dvigubu komutatoriumi

Techniniuose reikalavimuose numatyta, kad automobilio ir priekabos įtampa yra 12V, tačiau prietaisas turi veikti ir įtampai nukritus iki 6V. Dėl šios priežasties didžiausia prietaise galima naudoti įtampa yra 5V su apsauginio diodo atsarga. Šios įtampos srove ir maitinamas prietaisas: dinanometrinis elementas, išorinis 3V atstojamosios įtamos šaltinis, 3.6V LDO keitiklis, instrumentinis stiprintuvas ir  $V_{ref}$  kompensavimo posistemė. Tenzo tiltinių jutiklių išėjimo signalas, su didele nulinės apkrovos nuokrypio verte, stipriai priklauso nuo maitinimo

įtampos pokyčių. Dėl šios priežasties, 5V įtampa turi turėti kuo mažesnę nestabilumą. Tai užtikrinama naudojant 5V įtampos stabilizavimo posistemę.

Mikrovaldiklis maitinamas 3.6V įtampa, nors standartinė „STM“ mikrovaldiklių maitinimo įtampa yra 3.3V. Naudojant didesnę įtampą mikrovaldiklio, o kartu ir analogas-kodas keitiklio maitinimui, pasiekiamas platesnis matavimo diapazonas, ir užtikrinamas didesnis matavimo stabilumas.

Realizuojant šį sprendimą iš viso naudojami 5 analogas-kodas keitiklio kanalai: (1) 5V stabilizavimui, (2) išorinės 3V atstojamosios įtampos matavimui, (3) išorinio termometro įtampos (temperatūros) matavimui, (4) Vref signalo matavimui ir (5) Vout išėjimo signalo matavimui. Didžiausio tikslumo reikalaujantys matavimai yra (2) ir (4), nes šių keitiklių paklaida yra stiprinama. Kiekvieno ciklo metu matavimai kalibruojami pagal išorinį atstojamosios įtampos šaltinį ir dėl to jis yra visų kitų analogas-kodas matavimų etalonas. Kita vertus, Vref signalas stiprinamas kartu su jutiklio diferencialiniu įėjimu, taigi jo reguliavimas ir matavimas turi būti atliekamas su minimalia paklaida.

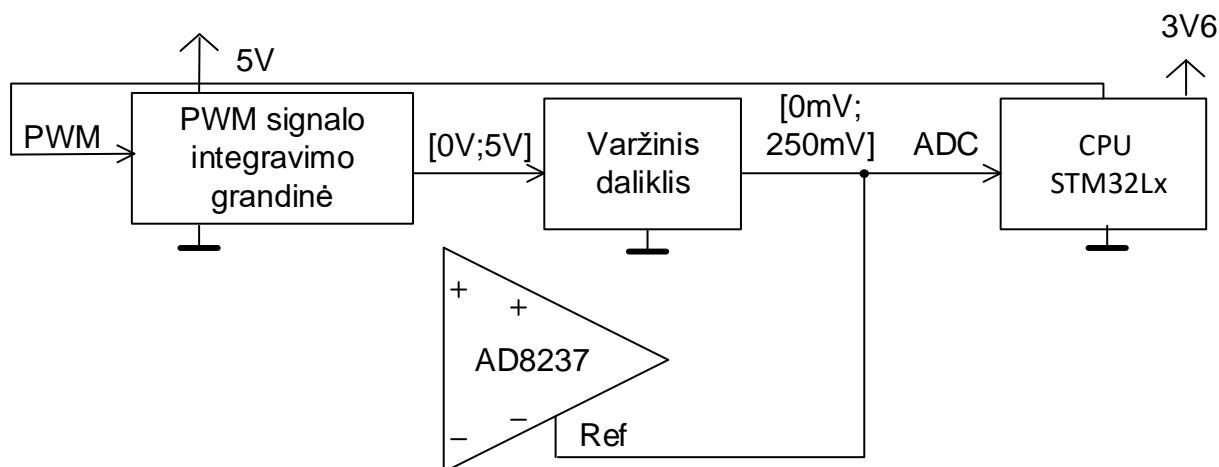
Vref signalo kompensavimo posistemė generuoja PWM signalą, kuris nufiltruotas ir sustiprintas kartotuvu prijungiamas tiesiai prie instrumentinio stiprintuvo Ref išvado. Atgaliniam ryšiui naudojamas signalas prieš varžinį daliklį ir yra 12 kartų aukštesnės amplitudės. Vref signalas kinta [0.05V;0.25V] diapazone, o atgalinio ryšio [0.6V;3.5V]. Tokiu būdu kontroliuojant didesnįjį signalą su  $\pm 1.2\text{mV}$  paklaida, pasiekiamas Vref kontroliavimas su  $\pm 0.1\text{mV}$  paklaida ir išėjimo signale tai sukuria  $\pm 33\text{mV}$  paklaidą, kuri neviršija leistinų ribų.

### **2.2.2 Kompensavimas su komutatoriumi ir nesustiprinto Vref matavimu**

Ankstesniame paragrafe aprašytame metode naudojama Vref reguliavimo posistemė. Šioje grandinėje matuojamas signalas yra prieš varžinį daliklį. Vėliau naudojant dalinimo koeficientą netiesioginiu būdu apskaičiuojama įtampa ant instrumentinio stiprintuvo REF išvado. Šio jungimo trūkumas, kad dalinimo koeficientas nėra pastovus visame temperatūrų diapazone ir jo reikšmė kinta nuo prietaiso aplinkos temperatūros. Siekiant eliminuoti šią problemą, analogas-kodas keitikliu matuojamas signalas po varžinio daliklio. Tokiu būdu tiesiogiai išmatuojama įtampos vertė ant Ref išvado. Tačiau šiam metodai būtina kuo didesnė analogas-kodas rezoliucija.

Matuojamas signalas yra [0mV-250mV] diapazone. Jo amplitudė reguliuojama 50'000 atskaitų periodo PWM signalu, todėl teoriškai skverbti padidinus per 1 atskaitą, Vref lygis pakis per 0.005mV.

Eksperimentiniu būdu buvo ištirta, kad naudojant 16 bitų  $\Delta\Sigma$  analogas-kodas keitiklį ir reikšmių vidurkinimą su 100 narių slenkamuoju filtru, galima pasiekti 0.2mV keitiklio rezoliucija. Taigi, nors ir PWM rezoliucija leidžia signalą reguliuoti 0.005mV kvantais, bet  $V_{ref}$  reikšmė išmatuojama su  $\pm 1mV$  paklaida. Stiprintuvo išėjime tai pavirsta  $\pm 33mV$ , kas yra apie  $\pm 1\%$  F.S.

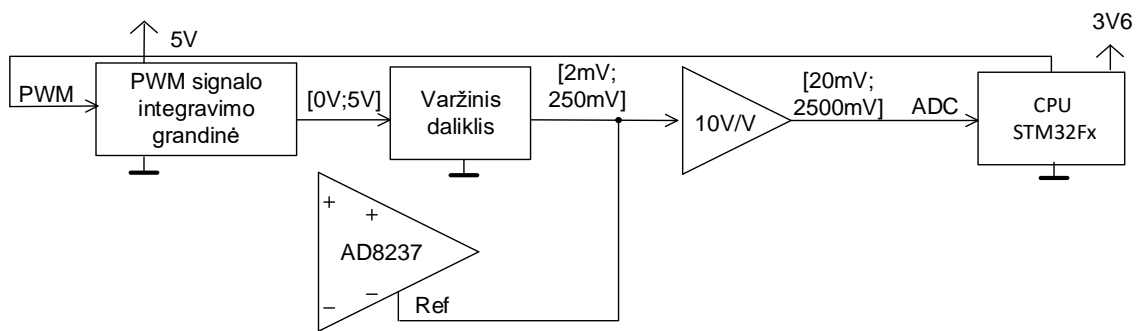


**11 pav.** Principinė schema naudojant AD8237 su dvigubu komutatoriumi ir nestiprintu  $V_{ref}$

### 2.2.3 Metodas su komutatoriumi ir sustiprinto $V_{ref}$ matavimu

Aukščiau aptarto metodo, paragrafe 2.2.2, pagrindinė problema yra reikalinga aukšta analogas-kodas keitiklio rezoliucija. Pastarąją problemą galima išspręsti, sistemą papildžius stiprintuvu. Šio jungimo struktūrinė diagrama pateikta **12 pav.**  $V_{ref}$  signalas po varžinio daliklio tiesiogiai prijungiamas prie instrumentinio stiprintuvo Ref išvado, bet matuojamas Ref signalas yra sustiprinamas. Tai išsprendžia pagrindinę reikiamos analogas-kodas keitiklio rezoliucijos problemą. Pagal teorinius skaičiavimus, naudojant 10V/V stiprinimą,  $V_{ref}$  signalas gal būti reguliuojamas  $\pm 0.02mV$  paklaidų ribose ir išėjimo signale tai yra  $\pm 6.6mV$  ( $\pm 0.19\%$  F.S.), kas visiškai tenkina užduoties sąlygas.

Tačiau, stiprinimui turi būti naudojama neinvertuojantis operacinis stiprintuvas, kurio stiprinimas nustatomas dviem išoriniais rezistoriais. Tiek šių rezistorių, tiek ir pačio stiprintuvo parametrai keičiasi dėl temperatūros. Dėl to, būtina parinkti vienodo temperatūrinio koeficiento rezistorius ir kuo stabilesnį operacinį stiprintuvą. Šio jungimo būdo stabilumo tyrimo rezultatai pateikti tyrimų dalyje.



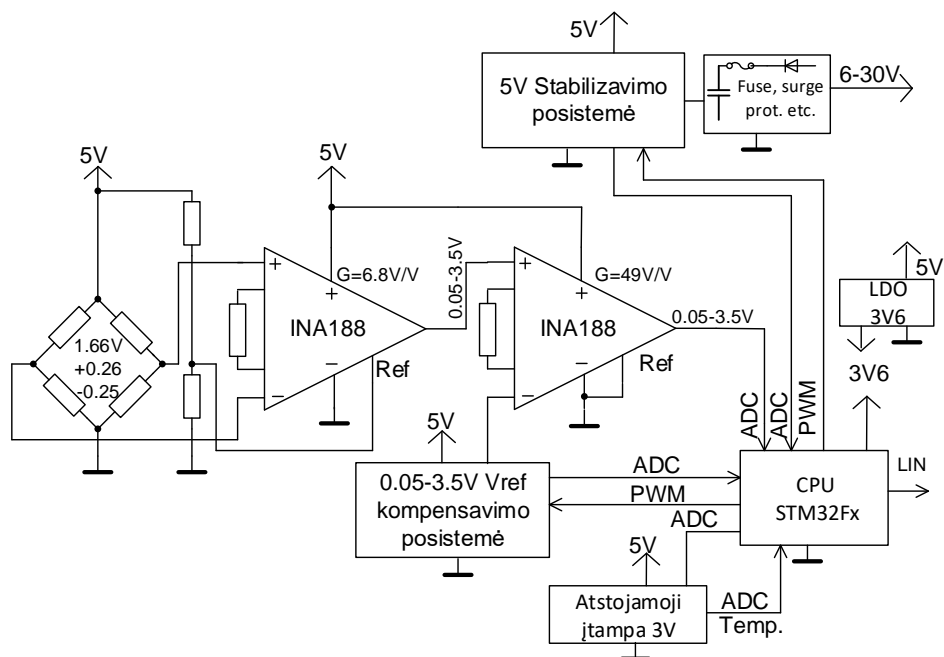
12 pav. Principinė schema naudojant AD8237 su dvigubu komutatoriumi ir sustiprintu Vref

### 2.2.4 Kompensavimas su dviejų pakopų stiprinimu

Kitas galimas metodas, nereikalaujantis instrumentinio stiprintuvo su specialia atstojamosios įtampos stiprinimo konfigūracija pateiktas 13 pav. Šiame metode naudojama dvi stiprinimo pakopos, kurioms naudojama du standartiniai instrumentiniai stiprintuvai. Vienas iš tokių stiprintuvų yra „Texas Instruments“ gamintojo, INA188. Šio stiprintuvo išėjimo signalas apskaičiuojamas pagal (6) formulę:

$$V_{out} = G \times (V_{+in} - V_{-in}) + V_{REF}, \quad (6)$$

čia  $V_{out}$  -išėjimo signalas,  $G$  -stiprinimo koeficientas,  $V_{+in}$  -teigiamas įėjimo signalas  $V_{-in}$ -invertuotas įėjimo signalas,  $V_{REF}$ -atstojamosios įtampos signalas.



13 pav. Principinė schema naudojant dviejų pakopų stiprinimą

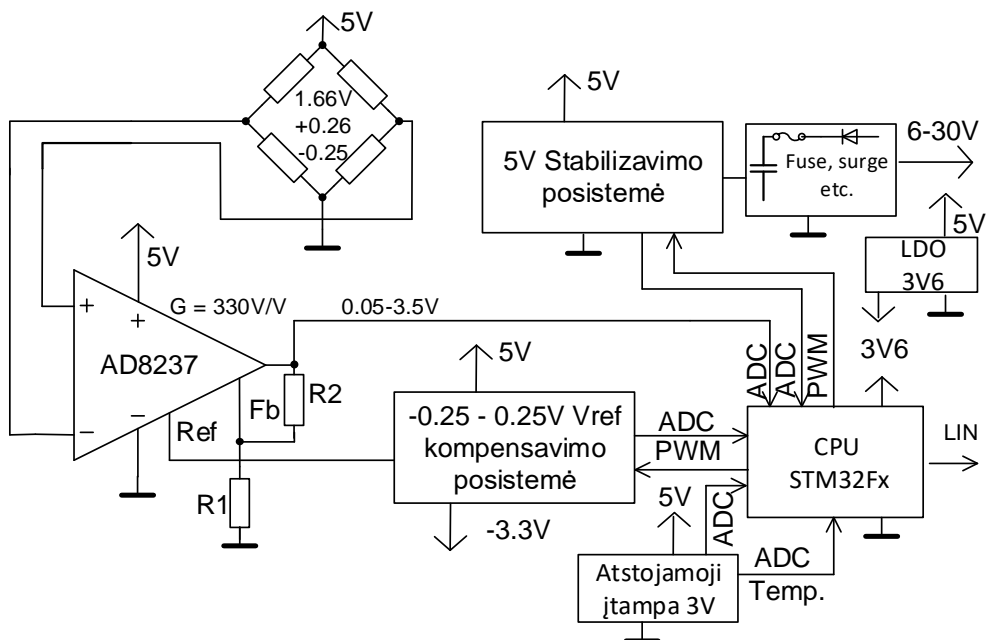
Tokio jungimo atveju, pirmojoje stiprinimo pakopoje naudingas signalas yra stiprinamas kartu su nulinės apkrovos nuokrypiu. Dėl to stiprinimo koeficientas turi būti parinktas toks, kad neviršytų leistinų įtampos ribų. Įvertinant instrumentinio stiprintuvo galimybes, galimas stiprinimas yra  $(4.95V - 0.05V)/(0.25V + 0.26V) = 9.6V/V$ . Stiprintuvai maitinami 5V įtampa, todėl maksimalus išėjimo signalas irgi yra beveik 5V, atsižvelgiant į gamintojo techninį aprašą. Jutiklio diferencialinio signalo su galimu nulinės apkrovos nuokrypiu darbo diapazonas yra nuo -0.25V iki 0.26V. Prie stiprintuvo REF išvado prijungiama  $\frac{5V}{2} = 2.5V$  lygio atstojamoji įtampa, atitinkanti pusę maitinimo įtampos. Tai atliekama siekiant simetriškai kompensuoti tiek teigiamą, tiek neigiamą nulinės apkrovos nuokrypį.

Antrojoje stiprinimo pakopoje siekiama kompensuoti pradinį nulinės apkrovos nuokrypį. Jo vertė yra nustatoma kiekvienam dinamometro jautriajam elementui individualiai, įrašoma į atmintį ir naudojama vėlesniuose matavimuose. Atstojamosios įtampos reguliavimo grandinę sudaro PWM signalo integravimo ir grįžtamojo ryšio dalys. Antrojoje stiprinimo pakopoje naudojamas identiškas instrumentinis stiprintuvas, tačiau jo išėjimo įtampos diapazonas turi atitikti analogas-kodas keitiklio darbo ribas. Tai yra nuo 0.05V iki 3.25V su atsarga triukšmams. Šioje stiprinimo pakopoje įėjimo signalas gali būti tikrai teigiamas. Nulinės apkrovos atveju,  $V_{ref}$  signalo lygis sutampa su pirmojo stiprintuvo išėjimo signalu, todėl jų diferencialinis skirtumas yra nulis ir antrosios pakopos išėjimo signalas irgi nulis. Maksimalios apkrovos atveju, diferencialinis signalas yra  $96mV$  ( $10mV \times 9.6V/V = 96mV$ ), todėl antrosios pakopos stiprinamas parenkamas taip:  $(3.25V - 0.05V)/96mV = 33.3V/V$ . Atstojamosios įtampas REF išvadas prijungiamas prie nulinio potencialo lygio.

Kita vertus toks kompensavimo metodas turi ir trūkumų. Diferencinio signalo bendrojo lygio įtampa privalo neviršyti gamintojo nurodytų stiprintuvo ribų, kuri yra:  $V_{CM} = (V_{+in} + V_{-in})/2$ . Pastarosios ribos yra skirtingos visiems instrumentiniams stiprintuvams ir priklauso nuo temperatūros, maitinimo įtampos, bei norimo maksimalaus išėjimo signalo lygio. Anksčiau minėto INA188 stiprintuvo modeliui šios ribos yra tokios: maitinant tik teigiama 5V įtampa ir pageidaujant [0V;3.3V] diapazono išėjimo signalo, bendro lygio įtampa turi būti nuo 2.8V iki 3.5V. Pagal anksčiau darytus skaičiavimus, antrosios pakopos diferencialinis įėjimo signalas viršija bendrojo lygio ribas. Kita vertus, jeigu instrumentinis stiprintuvas būtų maitinamas  $V_{SS} = -4V$  ir  $V_{CC} = 7V$ , tokiu atveju diferencialinio signalo bendro lygio įtampa gali būti [0V; 5.V] diapazone. Tiek neigiamos maitinimo įtampos, tiek ir 7V projektavimas reikalauja papildomų komponentų ir sukelia daugiau problemų.

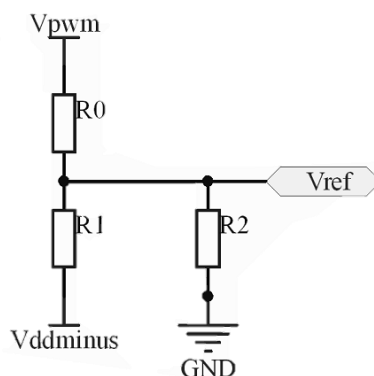
## 2.2.5 Papildomo neigiamos įtampos šaltinio panaudojimas

Naudojant tik teigiamas įtampas su AD8327 tipo instrumentiniais stiprintuvais, nekeičiant signalinių laidų, neįmanoma kompensuoti jutiklių su teigiamu nulinės apkrovos nuokrypiu. Dėl to, buvo suprojektuota ir iširta schema, naudojanti papildomą neigiamos įtampos šaltinį (**14 pav.**).



**14 pav.** Principinė prietaiso schema naudojant AD8237 su papildomu neigiamos įtampos šaltiniu

Šis jungimo būdas yra beveik analogiškas 2.2.1 paragrafe aprašytam metodui, bet nebenaudojamas dvigubas komutatorius ir pridedamas įtampos inverteris. Pastarasis naudojamas maitinimo įtampą invertuoti į neigiamą  $V_{DD}$ . Tokiu būdu turint atstojamąją neigiamą įtampą,  $V_{ref}$  kompensavimo posistemės išėjimo signalas gali kisti  $[-250mV; 250mV]$  intervale. Supaprastinta šios posistemės schema pateikta **15 pav.** Ją sudaro fiksuotas neigiamos įtampos šaltinis  $V_{dminus}$ , trys varžai ir kontroliuojama  $V_{pwm}$  įtampa.



**15 pav.** Supaprastinta  $V_{ref}$  kompensavimo posistemės schema su papildoma neigiamu įtampos šaltiniu



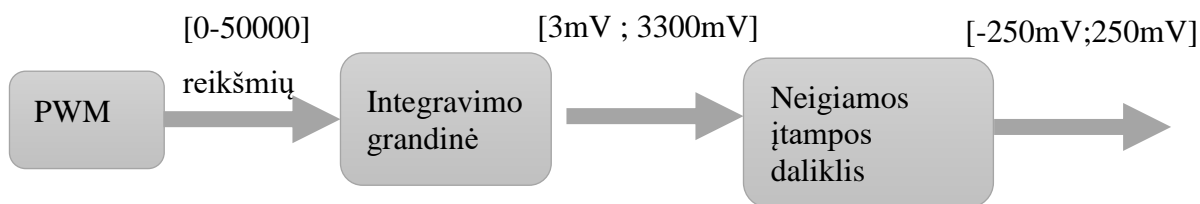
$V_{ref}$  grandinės dalis tiesiogiai jungiama prie instrumentinio stiprintuvo atstojamosios įtampos išvado. Kadangi ši įtampa kinta  $\pm 250mV$  diapazone, jos išmatuoti su teigiamai maitinamu mikrovaldikliu neįmanoma. Dėl to matuojama ir kontroliuojama yra tik  $V_{pwm}$  įtampa, kurios kitimo diapazonas yra  $[3mV; 3300mV]$ . Tinkamai parinkus visus varžus, gaunama, kad kontroliuojant teigiamą  $V_{pwm}$  įtampa, atitinkamai kontroliuojama ir  $V_{ref}$  teigiamame ir neigiamame diapazone.

Sistemos veikimo metu, mikrovaldikliui bus įrašyta norima  $V_{ref}$  vertė, pagal kurią reikia nustatyti atitinkamą  $V_{pwm}$  vertę. Reikiamos formulės išvedimui panaudota kontūrinių srovių skaičiavimo metodas.  $V_{DDminus}$  įtampa gaunama invertuojant teigiamą maitinimo įtampa, dėl to jos vertė netiesioginiu būdu išskaičiuojama iš analogas-kodas keitiklio maitinimo įtampos.

$$V_{PWM_{tikslas}} = \frac{(V_{ref} * R_0 - V_{DDminus} * R_0) * \left(\frac{R_1 * R_2}{R_0} + R_1 + R_2\right)}{R_0 * R_2} - \frac{R_1 * (-V_{DDminus})}{R_0} + V_{DDminus}, \quad (7)$$

čia  $V_{PWM_{tikslas}}$  - reikiama  $V_{PWM}$  reikšmė atitinkamai  $V_{ref}$  reikšmei,  $V_{DDminus}$  - neigiama maitinimo įtampa,  $V_{ref}$  - norima  $V_{ref}$  reikšmė.

$V_{ref}$  kompensavimo posistemės perdavimo grandinė pateikta **16 pav.** Pagal teorinius skaičiavimus pakeičiant PWM skverbties vertę per mažiausią galimą padalą (0.002%),  $V_{ref}$  signalas pakinta per 10uV. Praktiniai rezultatai pateikiami vėlesnėje tyrimų dalyje.



**16 pav.**  $V_{ref}$  kompensavimo posistemės perdavimo grandinės struktūrinė diagrama

## 2.3 Mikrovaldiklio dalis

### 2.3.1 MCU ir analogas-kodas keitiklis

Kontrolierio valdymui pasirinktas STM32F373CB procesorius[12]. Tai 32 bitų RISC architektūros procesorius turintis FPU, MPU, 128kB Flash tipo atminties. Svarbiausia šio mikrovaldiklio pasirinkimo priežastis yra 16 bitų  $\Delta\Sigma$  tipo analogas-kodas keitiklis. Taip pat, kompaktiško korpuso ir reikiamo išvadų kiekio. „STMicroelectronics“ gamintojas suteikia

galimybę naudoti patikrintomis sprendimų bibliotekomis ir pateikia pavyzdžius, kaip naudoti kiekvienu periferiniu įrenginiu.

Standartiniai STM mikrovaldikliuose naudojami „SAR“ tipo analogas-kodas keitikliai yra 12 bitų. Tokių keitiklių LSB, maitinant standartinė 3,3V įtampa yra 0,8mV. Kita vertus, naudojant 16 bitų  $\Delta\Sigma$  keitiklį LSB yra tik 0,05mV, deklaruojama rezoliucija be triukšmų yra 14 bitų ir tai yra 0,2mV LSB. Taigi naudojant  $\Delta\Sigma$  analogas-kodas keitiklį galima pasiekti bent 4 kartus geresnę rezoliuciją.

Pagal **10 pav.** pateiktą schemą, matuojamas atstojamojo lygio signalas gali kisti [3mV; 3200mV] diapazone. Galimos  $\Delta\Sigma$  keitiklio matavimo ribos buvo nustatytos atlikus pradinį keitiklio testavimą. Testavimo rezultatai pateikti

lentelė 1. Iš žemiau pateiktų rezultatų matoma, kad minimali vertė, kurią galima išmatuoti su šiuo keitikliu yra apie 3mV, maksimali vertė yra 3185mV. Tai yra 115mV mažiau negu keitiklio naudojama atstojamoji įtampa, kuri matavimo metu buvo 3.3V, kaip ir CPU maitinimo įtampa.

Naudojamas  $\Delta\Sigma$  [13] keitiklis turi dviejų tipų paklaidas, stiprinimo paklaidą ir nulinio lygio paklaidą. Pastaroji yra iškompensuojama kiekvieną kartą įjungus mikrovaldiklį. Norint iškompensuoti stiprinimo paklaidą būtinas išorinis įtampos etalonas. Tokiu būdu galima įvesti papildomą daugiklį arba skaičiuojant išmatuotą įtampą naudoti kitokią pilnos skalės vertę.

lentelė 1.  $\Delta\Sigma$  analogas-kodas keitiklio kalibravimo rezultatai

Išorinio multimetromatavimas, mV	$\Delta\Sigma$ keitiklio reikšmė, bitai
0	-32678
3	-32678
10	-32450
3100	30980
3185	32678
3300	32678

### 2.3.2 Įtaiso matavimo algoritmas

Pagal užduoties techninius reikalavimus, prietaisas su numatyta paklaida privalo veikti nuo -30°C iki 60°C temperatūrų diapazone. Mažiausiai sąnaudų reikalaujantis būdas leidžiantis iš dalies stabilizuoti prietaiso išėjimo įtampos kitimą nuo temperatūros yra vidinio mikrovaldiklio temperatūros jutiklio ir vidinės atstojamosios įtampos priklausomybės įvertinimas. Šis variantas turi porą problemų. Visų pirma, vidinis termometras rodo paties mikrovaldiklio temperatūrą, kuri

nėra tokia pati kaip kitų plokštės elementų ir priklauso nuo procesoriaus darbo režimo. Antroji problema, norint nuskaityti vidinio termometro rodmenis būtina sukalibruoti analogas-kodas keitiklį, kuris priklauso nuo maitinimo įtampos. Dėl to, nežinant nei temperatūros, nei maitinimo įtampos – tiksliai sukalibruoti analogas-kodas keitiklio ir taip pat, tiksliai išmatuoti temperatūros neįmanoma.

Šiai problemai spęsti, galima daryti prielaidą ir matavimo pradžioje teigti, kad integruota procesoriaus atstojamoji įtampa yra konstanta visame matavimo diapazone. Pagal mikrovaldiklio techninį aprašą, nominali atstojamoji įtampa yra 1.25V, o temperatūrinis koeficientas 100ppm/°C, kas per visą diapazoną maksimaliai yra 17mV. Tokiu būdu visų pirma reikia nustatyti mikrovaldiklio temperatūrą darant prielaidą, kad atstojamoji įtampa yra 1.25V, nors blogiausiu atveju ji gali būti ir 1.267V. Skaičiavimai atliekami tokiu nuoseklumu:

(1) Atstojami įtampa yra 1.25V (reali vertė irgi 1.25V), išmatuojama reikšmė 1551, 1bit reikšmė 0,806mV, tada išmatuojama vidinio termometro AKK reikšmė 1774, kas yra  $V_{temp}=1429.6mV$  ir tai atitinka 25°C.

(2) Atstojami įtampa yra 1.25V (reali vertė 1.267V), išmatuojama reikšmė 1572, 1bit reikšmė 0,795mV, tada išmatuojama vidinio termometro AKK reikšmė 1774, kas yra  $V_{temp}=1401.5mV$ , tai 28mV skirtumas ir pagal 4.3mV/°C atitinka 6.3°C paklaidą.

Nustačius temperatūrą su 6.5°C paklaida, AKK kalibruojamas dar kartą pagal perskaičiuotą procesoriaus atstojamąją įtampą. Pirmuoju atveju, kai teorinė ir reali  $V_{ref}$  sutampa  $V_{ref25°C} = 1,25V$ , antruoju kai reali vertė yra labiausiai nutolus nuo teorinės  $V_{ref} = 1,2508V$ . Apskaičiuota pagal (8) formulę.

$$V_{ref} = V_{ref25°C} \times 100ppm/°C \times 6,3°C \quad (8)$$

Kitas variantas yra naudoti išorinį atstojamosios įtampos šaltinį su papildomu integruotu termometru. Tuo tikslu buvo pasirinktas „Texas Instruments“ precizinis REF5030 įtampos šaltinis. Šis komponentas pasižymi labai mažu temperatūriniu dreifu, tik 3ppm/°C. Taip pat, maitinamas iš 5V ir turi papildomą išvadą įtampos proporcingos temperatūrai matavimui. Šis komponentas jungiamas prie aukšto impedanso analogas-kodas įėjimų, dėl šios priežasties užtikrinamas mažas srovės sunaudojimas ir pats komponentas išskiria nereikšmingą dalį šilumos, todėl priešingai negu naudojant vidinį mikrovaldiklio termometrą, tinka bendros įrenginio temperatūros matavimui.

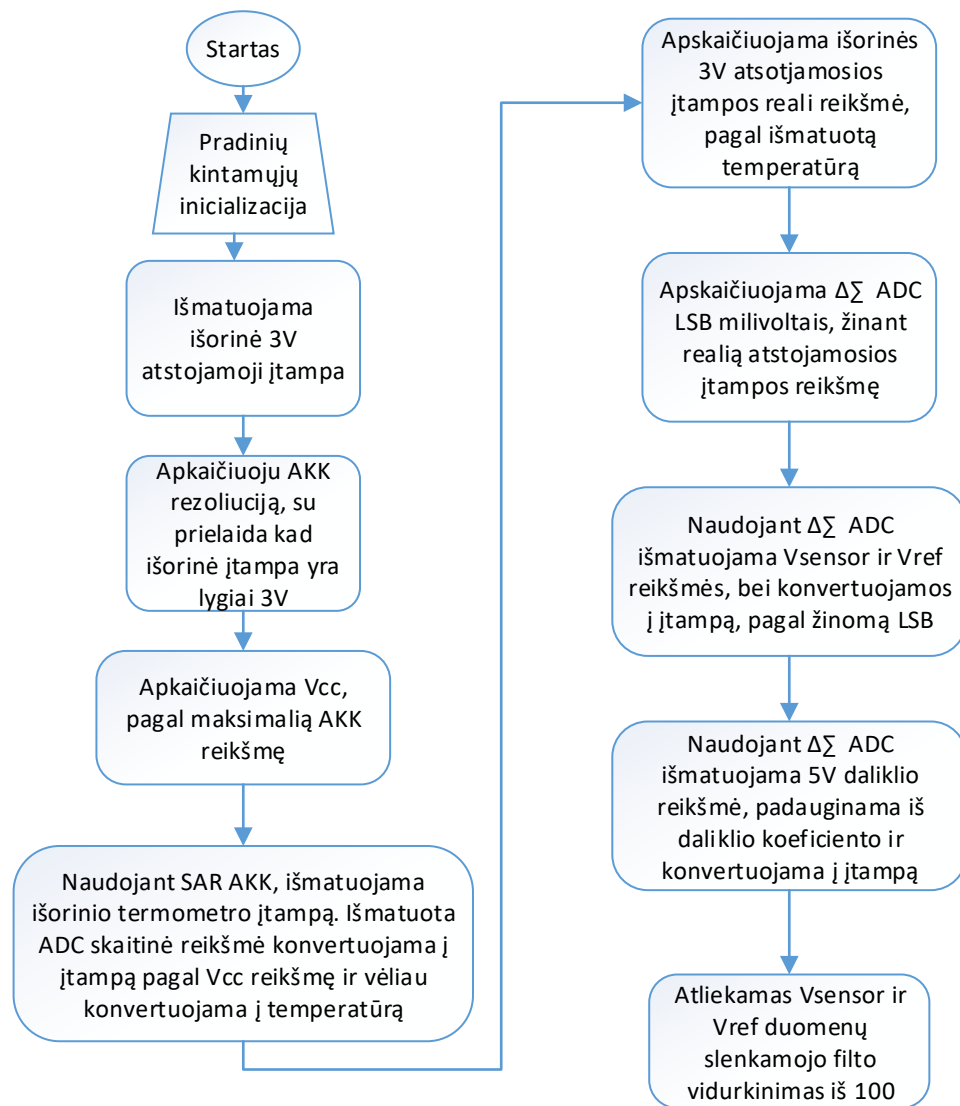
Mikrovaldiklio analogas-kodas keitiklio kalibravimui naudojamas toks pats algoritmas, kaip ir viena pastraipa aukščiau aptartame pavyzdyje, tik naudojama išorinė atstojamoji įtampa ir

atstojamosios įtampos šaltinio temperatūrai proporcinga įtampa. Kalibravimo tikslumo įvertinimui naudojamos kraštutinės galimos reikšmės.

(1) Teorinis  $V_{ref}=3V$  (realus taip pat  $3V$ ), išskaičiuojama  $LSB = 3V/AKK\_reikšmė_{3V} = 0.8058mV$ , išmatuota  $V_{temp}=574,6mV$  (reali  $574,6mV$ ).

(2) Teorinis  $V_{ref}=3V$  (realus  $3,001mV$ ), išskaičiuojama  $LSB = 3V/AKK\_reikšmė_{3V} = 0.8056mV$ , išmatuota  $V_{temp}=574,4mV$  (reali  $574,6mV$ ).

Naudojantis šiuo algoritmu, maksimali išmatuotos temperatūrai proporcinga įtampos paklaida  $\pm 0,172mV$ , termometro jautrumas yra  $2,64mV/^{\circ}C$ , taigi temperatūra išmatuojama su  $0,45^{\circ}C$  paklaida. Nustačius pastarąsias reikšmes, analogas-kodas keitiklis kalibruojamas dar kartą, bet šį kartą  $V_{ref}$  reikšmė yra perskaičiuoja pagal žinomą temperatūrą. Turint  $V_{ref25^{\circ}C}=3V$ , prie maksimalios paklaidos  $V_{ref} = V_{ref25^{\circ}C} \times 3ppm/^{\circ}C \times 0,45^{\circ}C = 3.00000405V$ . Taigi naudojantis šiuo algoritmu analogas-kodas keitiklį galima sukalibruoti su maža  $4\mu V$  paklaida. Algoritmo diagrama pateikta **17 pav.**



17 pav. Analogas-kodas keitiklio kalibravimo algoritmas

### 2.3.3 Matavimo paklaidų įvertinimas galutiniam signalui

Metodinėje dalyje aptartų schemų su instrumentiniu AD8237 stiprintuvu konfigūracijose, išėjimo signalas skaičiuojamas pagal formulę:

$$V_{out} = (V_{-in} + V_{-in} + V_{REF}) \times G \quad (9)$$

Šiame stiprintuve  $V_{ref}$  signalas stiprinamas kartu su diferencialiniu jutiklio signalu ( $G=330V/V$ ) ir menkiausias šio signalo pokytis, pvz: 1mV pokytis išėjime pavirsta 330mV pokyčiu, kas yra visiškai nepriimtina pagal užduoties reikalavimus. Siekiant kad išėjimo signalo dreifas per visą darbo temperų diapazoną neviršytų 2% F.S. paklaidos, išėjimo signalo dreifas

negali viršyti 66mV. Tokios paklaidos užtikrinimui, Vref signalo dreifas privalo neviršyti

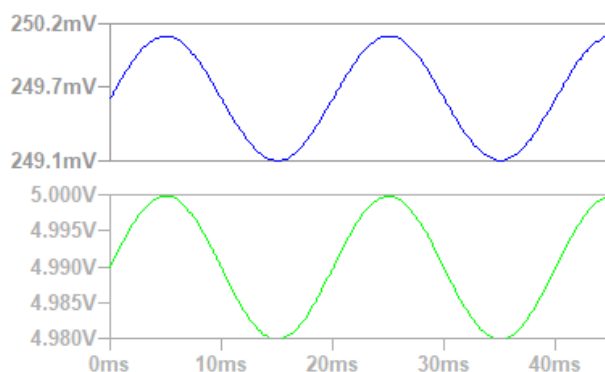
$$V_{REF\ drifas} = \frac{66mV}{330V/V} = 0.2mV.$$

### 2.3.4 Maitinimo grandinės stabilizavimas

Dinamometro jautrusis elementas maitinimas 5V įtampa. Maitinant aukštesne įtampa galima pasiekti geresnį signalo dinaminį diapazoną, tačiau pagal užduoties reikalavimą prietaisas turi veikti minimaliai nuo 6V maitinimo įtampos. Dėl šios priežasties pasirinktas „STMicroelectronics“ gamintojo reguliuojamas mažo įtampos kritimo teigiamos įtampos reguliatorius LD1117.

Naudojant standartinius dinamometrinius elementus, kurių nulinės apkrovos nuokrypis yra nykstamai mažas, maitinimo įtampos fluktuacijos neturi reikšmingos įtakos išėjimo signalui. Tačiau šiuo atveju, jutiklio nulinės apkrovos nuokrypis gali būti net  $\pm 250mV$ , dėl šios priežasties maitinimo įtampos dreifas turi reikšmingą įtaką diferencialiniam signalui. Maitinimo įtampos svyravimų įtaka įvertinta pasinaudojus „LTspice“ modeliavimo programą (**18 pav.**).

Iš žemiau pateikto grafiko matoma, kad turint 250mV nulinį nuokrypį ir maitinimo įtampai svyruojant per 10mV, diferencialinis signalas svyruoja per 0,5mV, stiprintuvo išėjime tai pavirsta 165mV dreifu.



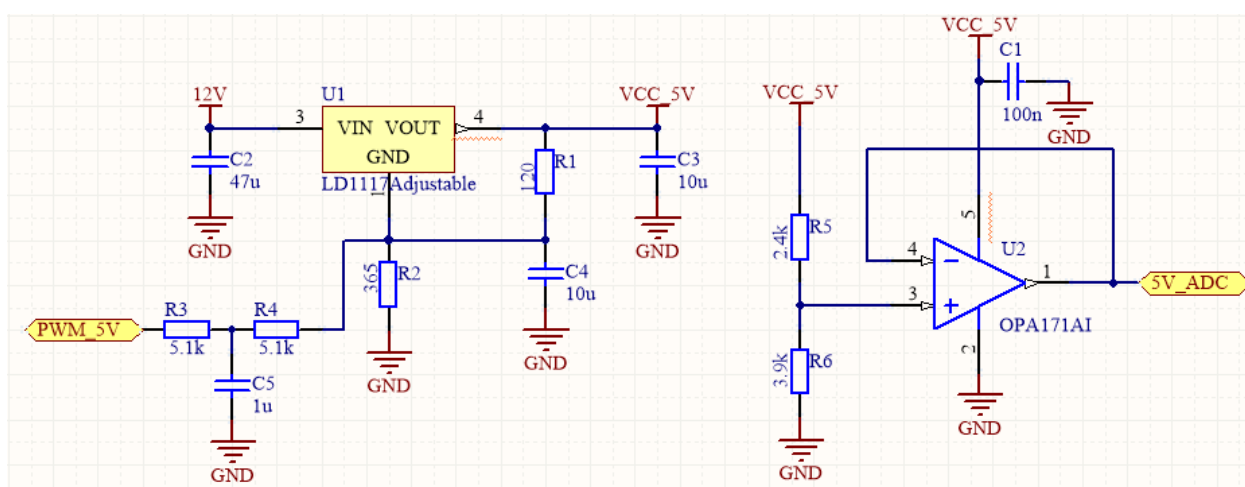
**18 pav.** 5V maitinimo įtampos svyravimo (apačioje) įtaka, diferencialiniam jutiklio signalui (viršuje)

Naudojant **19 pav.** pateiktą schemą, 5V maitinimo įtampą tikimasi palaikyti  $\pm 0,5mV$  svyravimo paklaidose. Tokiu atveju diferencialinis signalas svyruotų per  $50\mu V$  ir išėjime tai pavirstų 16mV dreifu, kas tenkina užduoties reikalavimus.

Įprastiniu būdu, 5V maitinimo išėjimo įtampa reguliuojama dviem išoriniais rezistoriais R1 ir R2, pagal formulę:

$$V_{out} = V_{Ref} \times \left(1 + \frac{R2}{R1}\right) \quad (10)$$

Tačiau, šiuo atveju reikalingas realaus laiko įtampos reguliavimas, kuris įgyvendintas įvedus atgalinio ryšio grandinę. Pastarąją sudaro 5V matavimo posistemė ir 5V išėjimo įtampos reguliatorius su PWM grandine. Parinkus tinkamo nominalo grandinės varžas, LD1117 reguliatoriaus išėjimo įtampa pareguliuojama [4.950V;5.050V] diapazone, priklausomai nuo PWM skverbties. PWM periodas parinktas 13,8us ir naudojama 1000 atskaitų. Tokiu būdu 5V reguliavimo rezoliucija yra  $\frac{100mV}{1000} = 0,1mV$ .



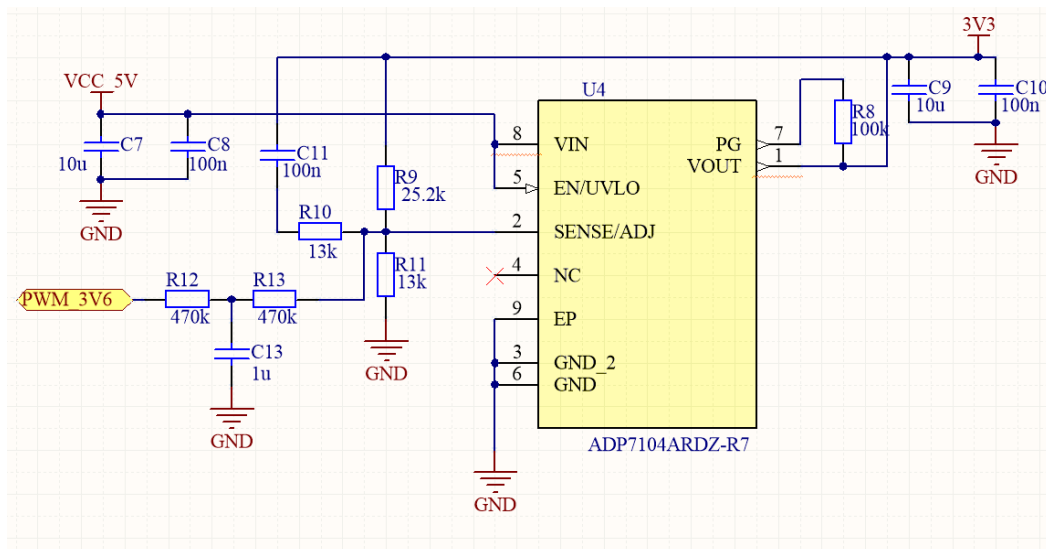
19 pav. 5V stabilizavimo posistemės schema

Galima naudojamo mikrovaldiklio maitinimo įtampa yra [2.8V-3.6V]. Ši įtampa yra naudojama ir  $\Delta\Sigma$  analogas-kodas keitiklio maitinimui. Naudojant didesnę įtampą, didesnis yra ir analogas-kodas keitiklio matavimo diapazonas, todėl pasirinkta naudoti 3.6V maitinimo įtampą.

Reikiama įtampa gaunama panaudojus LDO tipo DC/DC įtampos žeminantįjį keitiklį, ADP7104ARDZ. Jis pasirinktas dėl mažo triukšmų lygio, reikiamos galios ir galimybės reguliuoti išėjimo įtampą. Šio keitiklio reguliavimo schema pateikta **20 pav.** Keitiklis maitinamas 5V įtampa, o išėjimo lygis reguliuojamas panaudojus PWM signalo integravimo grandinę. PWM periodas parinktas 13,8us ir naudojama 1000 atskaitų. R12 ir R13 rezistoriai parinktai taip, kad išėjimo įtampos lygis reguliuojamas [3.5V;3.6V] diapazone. Reguliavimo rezoliucija yra 0.1mV.

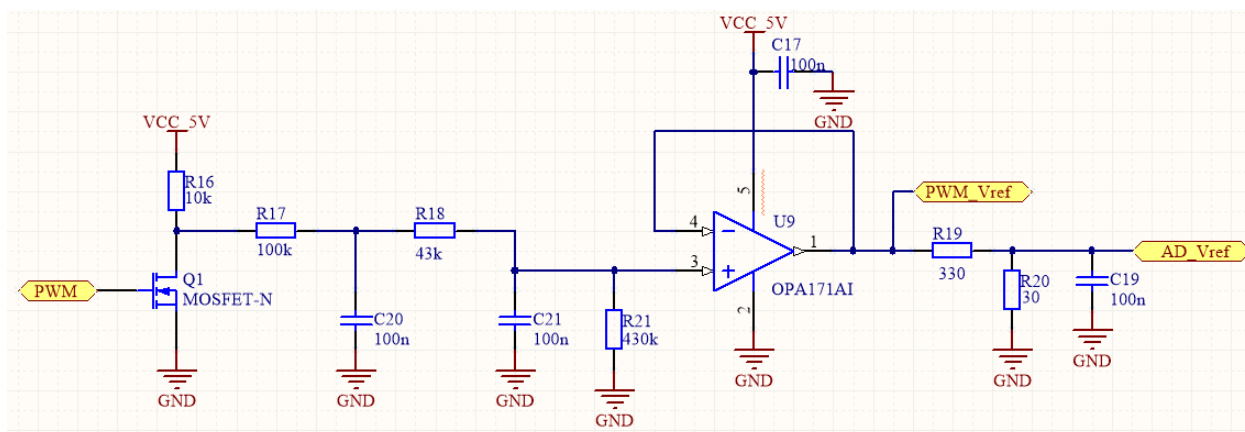
Kita vertus, sistemoje naudojama atstojamosios įtampos šaltinis. Kiekvieną kartą prieš matavimą analogas-kodas keitiklis yra sukalibruojamas pagal šį šaltinį. Toks matavimo būdas eliminuoja matavimo paklaidas, dėl analogas-kodas keitiklio maitinimo įtampos dreifo. Vėlesnių

tyrimų metu, bus nuspręsta ar 3.6V stabilizavimo grandinė yra būtina. Vietoje aprašytos grįžtamojo ryšio sistemos, galbūt galima tiesiog naudoti stabilius rezistorius.



20 pav. 3.6V maitinimo įtampos reguliavimo grandinė

Viena iš svarbiausių sistemos dalių yra Vref signalo kompensavimo posistemė. Jos pradinė schema pateikta **21 pav.** Šią posistemę sudaro PWM integravimo dalis, operacinis kartotuvas ir varžų daliklis. Posistemės paskirtis užtikrinti stabilų ir 250mV diapazone kintantį Vref signalą. Kadangi Vref signalas stiprinamas kartu su naudingiu signalu, būtina užtikrinti kuo mažesnę Vref dreifą.

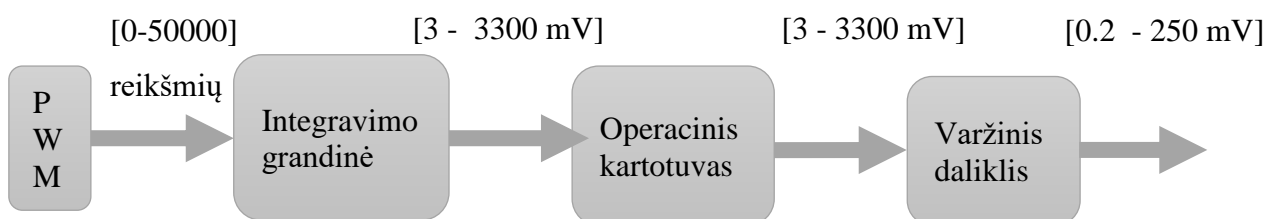


21 pav. Vref signalo kontroliavimo grandinė

Posistemės analizavimas pradedamas nuo išėjimo dalies. Toleruojant  $\pm 33\text{mV}$  paklaidą instrumentinio stiprintuvo išėjime, Vref signalas negali svyruoti daugiau negu  $\pm 0.1\text{mV}$ . Šis signalas matuojamas prieš varžinį daliklį, todėl jo lygis yra 12 kartų didesnis. Taigi matuojamas



Vref signalas prieš varžinį daliklį (PWM\_Vref) negali kisti daugiau negu  $\pm 1.2\text{mV}$ . Šio signalo lygis valdomas naudojant PWM integravimo grandinę. Panaudojus 72Mhz taktinio dažnio PWM signalą su 50'000 atskaitų periodu, teoriškai Vref signalas valdomas su 0.005mV rezoliucija. Tai yra pakankama rezoliucija, kadangi išėjimo signale 0.005mV Vref pakitimas atitinka 1.65mV. Tai tenkina užduoties sąlygas, kadangi išėjimo signale 1.65mV pokytis lieka triukšmų lygyje ir praktiškai yra nepastebimas. Šios posistemės perdavimo schema pateikta **22 pav.**



**22 pav.** Pradinės Vref kompensavimo posistemės perdavimo grandinė

### 2.3.5 Pagrindinės matavimo programos algoritmas

Pagrindiniame programos cikle atliekamas visų naudojamų analogas-kodas kanalų nuskaitymas, maitinimo įtampų reguliavimas ir spaudimo jėgos išskaičiavimas. Algoritmo diagrama pateikiama **23 pav.** Ciklo pradžioje atliekamas įtampų nuskaitymas ir išskaičiavimas kitų parametrų. Maitinimo 5V įtampa matuojama panaudojus varžinį daliklį ir operacinį kartotuvą. Mikrovaldiklio 3.6V maitinimo įtampa apskaičiuojama netiesioginiu būdu, panaudojant išorinę atstojamąją įtampą. Kadangi  $\Delta\Sigma$  analogas-kodas keitiklio atstojamoji įtampa yra tokia pati kaip mikrovaldiklio maitinimo įtampa, taigi pasinaudojant žinomą atstojamąją įtampą apskaičiuojama maksimali analogas-kodas keitiklio matuojama įtampa, kuri sutampa su 3.6V maitinimo įtampa.

Kompensavimo grandinėse naudojami 3 PWM kanalai (du maitinimo įtampų kontrolei ir vienas stiprintuvo Vref reguliavimui). Visiems kanalams naudojamas tas pats taktinis dažnis, bet Vref reguliavimui naudojama 1,4kHz dažnis, norint pasiekti mažesnę reguliavimo rezoliuciją. Dėl šios priežasties, PWM skverbti negali būti keičiami dažniau negu pačio PWM periodas, priešingu atveju nustatyta ir reali skverbti nesutaps. Tam sukonfigūruota pagrindinio ciklo pertrauktis, kuri išskviečiama kiekvieną kartą PWM skaitikliui užsipildžius iki Vref periodo reikšmės. Pertrauktyje įstatoma vėliavėlė TIM\_4 ir tada pagrindiniame cikle apskaičiuojamos naujos PWM skverbčių reikšmės pagal išmatuotas ir norimas pasiekti reikšmes. Tam įgyvendintas PI (*angl. Proportional and integral*) kontroleris. Kiekvieno PWM kanalo PI kontroleriai privalo būti suderinti individualiai, dėl to kad jų tiek fizinės grandinės, tiek ir reguliuojamos įtampos bei diapazonai skiriasi.

Kiekvieną kartą prijungus naują dinamometrinių elementų būtiną atlikti jo kompensavimo mechanizmą, kuris aprašytas paskesnėje dalyje. Tokiu būdu į atminį yra įrašoma 3 statiniai parametrai: jutiklio jautrumas, poliarumas ir nulinės apkrovos nuokrypis. Taip pat, numatoma įvesti jutiklio termokompensacinį koeficientą, bet tai bus nuspręsta vykdant tolesnius tyrimus. Žinant šiuos parametrus yra apskaičiuojama jutiklį spaudžianti jėga pagal algoritmą:

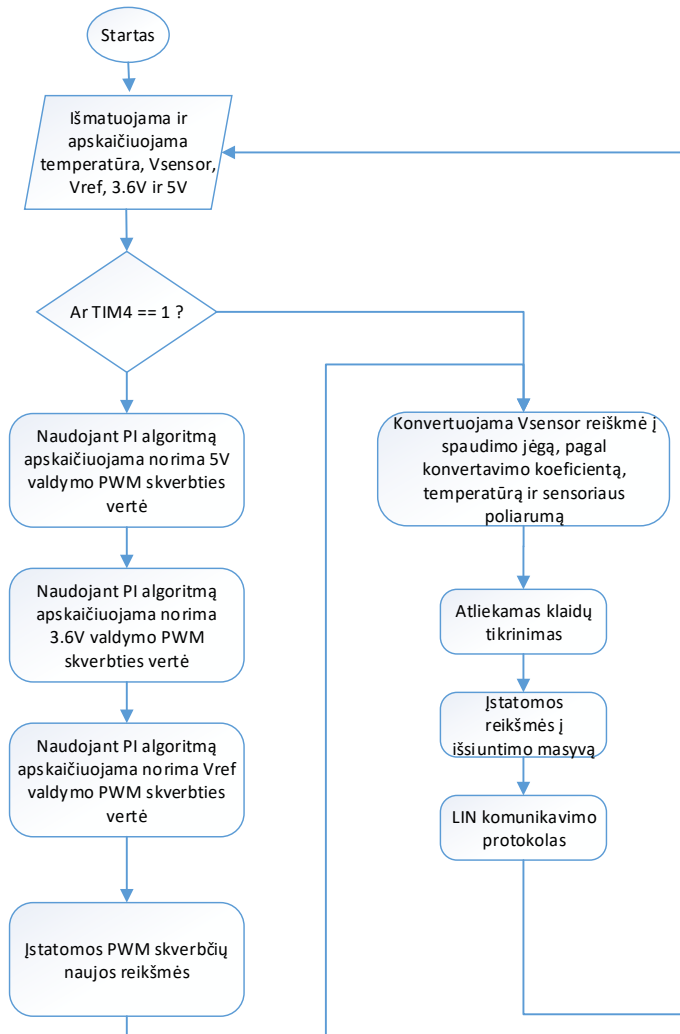
(1) Jeigu jutiklio nulinės apkrovos nuokrypio poliarumas teigiamas:

$$Niutonai = \frac{(jutiklio \text{ įtampa } mV - taravimo \text{ įtampa } mV)}{jutiklio \text{ jautrumas } \frac{mV}{N}} \quad (11)$$

(2) Jeigu jutiklio nulinės apkrovos nuokrypio poliarumas neigiamas:

$$Niutonai = \frac{(taravimo \text{ įtampa } mV - jutiklio \text{ įtampa } mV)}{jutiklio \text{ jautrumas } \frac{mV}{N}} \quad (12)$$

Vėliau atliekamas klaidų tikrinimas, kur identifikuojama ar tinkamos maitinimo įtampų vertės, ar pasiekta norima  $V_{ref}$  signalo vertė, ar jutiklį veikia viršsvoris, ar atitrūkęs jutiklio laidas. Klaidos kodas įvedamas į išsiunčiamų duomenų paketą. Toliau tikrinama ar yra užklausa iš pagrindinio valdymo kompiuterio per LIN protokolo komunikaciją. Jeigu užklausa yra, atitinkamai atsakoma į komandą, jeigu ne – kartojamas pagrindinis ciklas.



23 pav. Pagrindinės matavimo programos algoritmas

### 2.3.6 Jutiklių su komutatoriumi kompensavimo algoritmas

Jutiklio techniniame aprašyme nurodyta, kad nulinės apkrovos nuokrypis gali būti ir teigiamas ir neigiamas ( $\pm 250\text{mV}$ ). Naudojamas signalinių laidų komutatorius leidžia šią problemą išspręsti be papildomo neigiamos įtampos šaltinio. Tačiau, perjungus jutiklio signalinius laidus, diferencialinis signalas tampa atvirkščiai proporcingas spaudimo jėgai, t.y. didėjant spaudimo jėgai, diferencialinis signalas mažėja. Dėl to, naudojami du apkrovos skaičiavimo algoritmai.

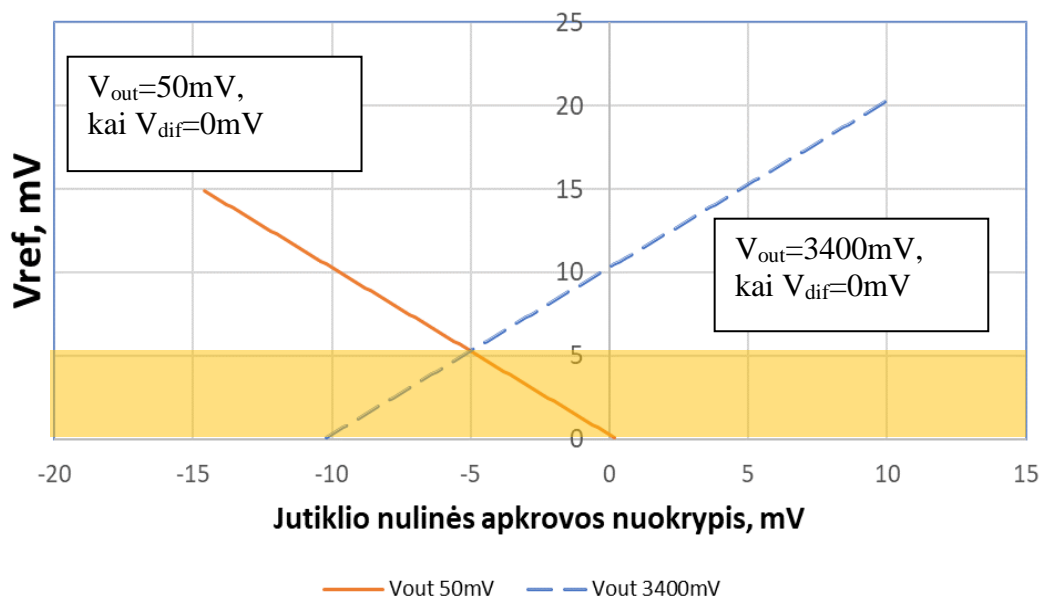
Kompensuojant jutiklį su neigiamu nulinės apkrovos nuokrypiu,  $V_{ref}$  parenkamas toks, kad be apkrovos stiprintuvo išėjimas būtų  $50\text{mV}$ . Didėjant apkrovai ant jutiklio, diferencialinis signalas didėja ir išėjimo signalas proporcingai didėja iki maksimalios matavimo ribos. Visas matavimo diapazonas yra nuo  $50\text{mV}$  iki  $3450\text{mV}$ .

Antruoju atveju, kai jutiklis turi teigiamą nulinės apkrovos nuokrypį, jo laidai invertuojami ir  $V_{ref}$  parenkamas toks, kad stiprintuvo išėjimas būtų 3400mV. Šios konfigūracijos atveju, didėjant apkrovai, diferencialinis signalas mažėja ir išėjimo signalas mažėja iki 0mV. Visas matavimo diapazonas yra nuo 3400mV iki 0mV.

Taigi naudojant tik teigiamą  $V_{ref}$  signalą galima sukompensuoti abiejų tipų jutiklius ir išlaikyti tokį pat dinaminį matavimo diapazoną. Žemiau pateikta (**24 pav.**) grafinė kompensavimo išraiška.  $V_{ref}$  signalas atvaizduotas tik ant teigiamos y ašies, kadangi jis negali būti neigiamas. Naudojant tiesiogiai proporcingą jungimą, tik neigiamą nulinės apkrovos nuokrypį turintys jutikliai gali būti sukompensuoti nuo 0mV ir mažiau (linija be trūkių). Antruoju, atvirščiai proporcingo jungimo atveju, kompensuoja jutikliai su didesniu negu -10mV nulinės apkrovos nuokrypiu (brūkšninė linija). Grafike aiškiai matoma, kad linijos susikerta ties -5mV. Tai rodo, kad jeigu jutiklis turi -5mV nulinės apkrovos nuokrypį, jį kompensuoti galima abiemis būdais su vienu  $V_{ref}=5.3\text{mV}$  signalu. Tik tiesioginio jungimo atveju  $V_{out}=50\text{mV}$ , o atvirščiai proporcingo  $V_{out}=3400\text{mV}$ .

Dar vienas šio dvigubo metodo privalumas, kad  $V_{ref}$  signalo minimali vertė neturi būti mažesnė negu 5.3mV. Tai pasiekama naudojant tokią logiką:

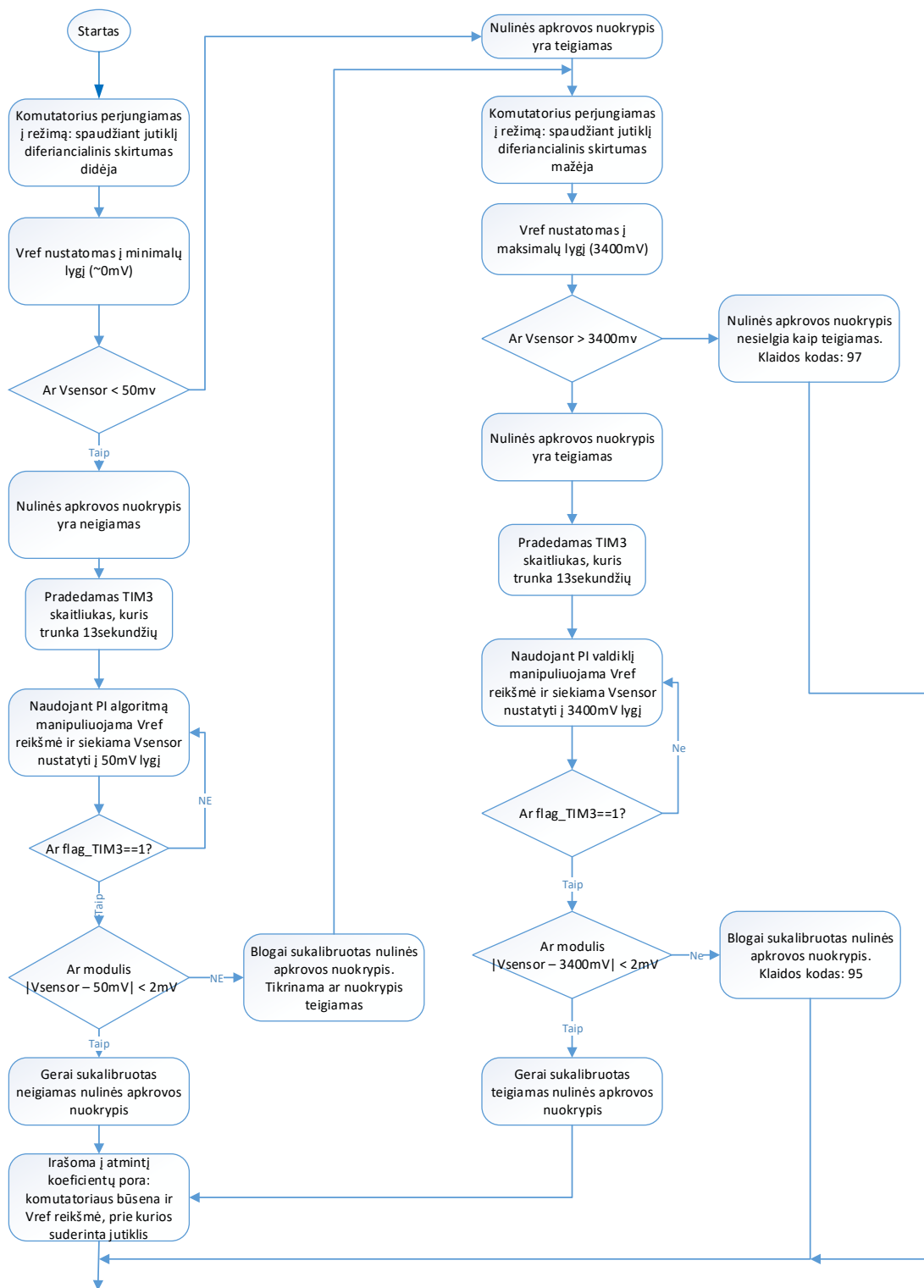
- (1) jeigu jutiklio nulinės apkrovos nuokrypis  $< -5\text{mV}$  → naudoti tiesioginį jungimą;
- (2) jeigu jutiklio nulinės apkrovos nuokrypis  $\geq -5\text{mV}$  → naudoti atvirščiai proporcingą jungimą.



**24 pav.**  $V_{ref}$  signalo priklausomybė nuo jutiklio nulinės apkrovos nuokrypio, naudojant tiesiogiai proporcingą (linija) ir atvirščiai proporcingą (brūkšninė linija) jungimą.

Prijungus naują dinamometrinių elementą, būtina parinkti tinkamą jungimo būdą ir sukalibruoti  $V_{ref}$  įtampą, prie kurios  $V_{out}$  yra 50mV arba antruoju būdu 3400mV. Tam įgyvendinti aprašyta kompensavimo procedūra. Jos algoritmas pateiktas

**25 pav.** Kalibravimo pradžioje tikrinama ar jutiklis elgiasi kaip su neigiamu nulinės apkrovos nuokrypiu. Jeigu ši sąlyga tenkinama  $V_{ref}$  suderinama, kad  $V_{out}$  būtų 50mV. Kalibravimas trunka apie 13sekundžių. Toks laiko tarpas nustatytas bandymų būdu su papildomu atsarginiu laiku. Jeigu kalibravimo pabaigoje  $V_{out}$  lygis yra 50mV su kelių milivoltų paklaida, fiksuojama kad jutiklis sukalibruotas ir į atmintį įrašoma  $V_{ref}$  vertė, kai  $V_{out}=50mV$  ir komutatoriaus jungimo būdas (tiesiogiai ar atvirkščiai proporcingas jungimas). Jeigu kalibravimo procesas nesėkmingas bandoma kalibruoti prijungus jutiklį atvirkščiai proporcingu būdu ir reguliuojant  $V_{ref}$  siekiama, kad  $V_{out}$  būtų 3400mV. Sėkmės atveju reikšmės įrašomos į atmintį, priešingu – įrašoma klaidos kodo reikšmė.



25 pav. Dinamometro jautriojo elemento su dideliu nulinės apkrovos nuokrypiu kompensavimo algoritmas

### 3. TIRIAMOJI DALIS

#### 3.1 Naudojama matavimo metodika

Viena svarbiausių užduoties sąlygų yra užtikrinti pilną įrenginio funkcionavimą  $[-30^{\circ}\text{C}; 60^{\circ}\text{C}]$  temperatūrų intervale. Dėl šios priežasties, visi tiriami metodai buvo išbandyti terminėje kameroje (**26 pav.**). Visi matavimai, jeigu nenurodyta kitaip, buvo atliekami naudojant užtrumpintą Vdiff signalą, tokiu būdu įvertinama tik pačios elektronikos terminės savybės, neatsižvelgiant į dinamometro jautriojo elemento išėjimo signalo pokytį. Kitu atveju, imituojant didelio nulinės apkrovos nuokrypio sąlygas, jautrusis elementas buvo patalpintas kameros išorėje, stabilioje kambario temperatūroje. Matavimai buvo atliekami  $[-30^{\circ}\text{C}; 70^{\circ}\text{C}]$  temperatūrų diapazone su maksimaliu  $3^{\circ}\text{C}/\text{min}$  tempu.



**26 pav.** Tyrimams atlikti naudojama temperatūros ir drėgmės kamera, „YUANYAO“ [14]

Mikrovaldiklio vidinio analogas-kodas keitiklio matavimai buvo sukalibruotos naudojant papildomą prietaisą - „PicoLog“ (**27 pav.**). Tai 24 bitų keitiklis analogas-kodas, turintis 16 analoginės įtampos matavimo kanalų. Įrenginys turi specializuotą programinę įrangą su galimybe realiu laiku registruoti skirtingų kanalų įtampų vertes.



**27 pav.** Tyrimams atlikti naudojama analogas-kodas 24 bitų rezoliucijas keitiklis - „PicoLog24“

[15]

### 3.2 Dinamometro jautriojo elemento temperatūrinis stabilumas

Atliekant matavimus plačiame temperatūrų intervale, keičiasi ne tik stiprinimo pakopos parametrai, bet ir pačio jautriojo elemento išėjimo signalas. Vis dėlto, dinamometro jautriojo elemento išėjimo signalo temperatūrinis stabilumas priklauso nuo gamybinių procesų ir yra nekeičiamas. Dėl to, vienintelis būdas kompensuoti jutiklio temperatūrinį dreifą yra programinis kompensavimas. Tyrimuose naudojamas dinamometro jautrusis elementas pateiktas **28 pav.** Šio jutiklio gamyklinis nulinės apkrovos nuokrypis yra artimas 0mV. Siekiant išmatuoti temperatūros įtaką, jutiklis buvo patalpintas į temperatūrinę kamerą, o signalo derinimo grandinė prijungta kameros išorėje, kur stabili kambario temperatūra. Tokiu būdu, išėjimo signalas  $V_{out}$  kinta tik dėl pačio jutiklio diferencialinio signalo pokyčio. Matavimo rezultatai pateikti lentelė 2, o  $V_{out}$  kitimas atvaizduotas **29 pav.**  $V_{out}$  signalas kinta atvirkščiai proporcingai temperatūrai ir per visą darbo temperatūrų diapazoną pakito per -90mV. Naudotas 330V/V stiprinimas, todėl atitinkamai jutiklio diferencialinis signalas sumažėjo per 0.318mV. Tai atitinka  $-3.18\mu\text{V}/^\circ\text{C}$  kitimą.

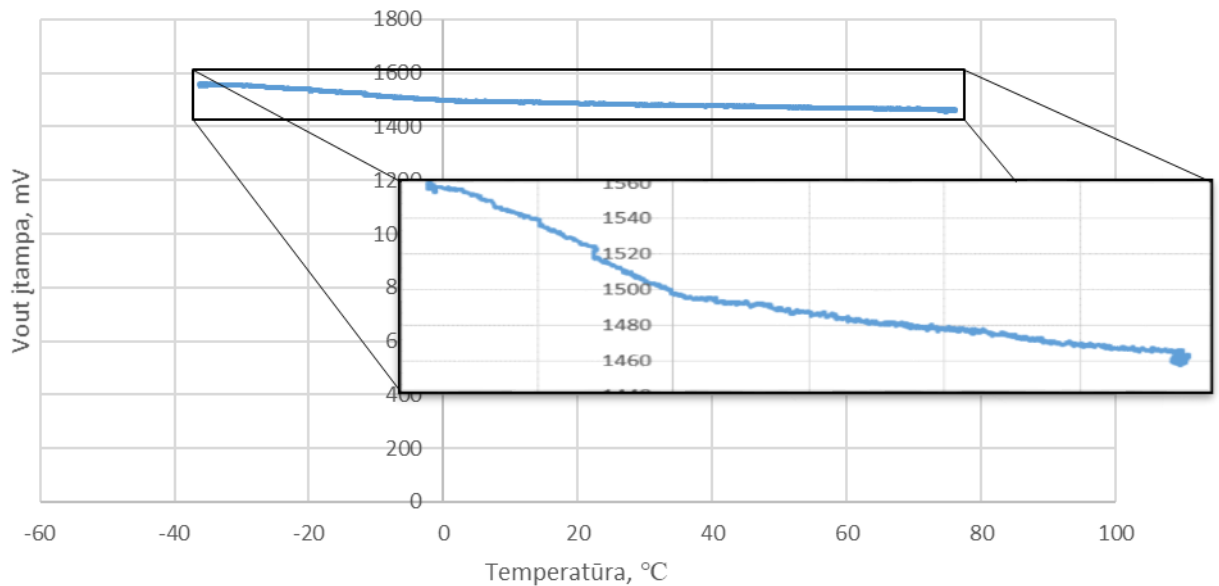


**28 pav.** Tyrimuose naudotas žiedo tipo dinamometro jautrusis elementas

lentelė 2. Dinamometro jautriojo elemento diferencialinio signalo priklausomybė nuo temperatūros

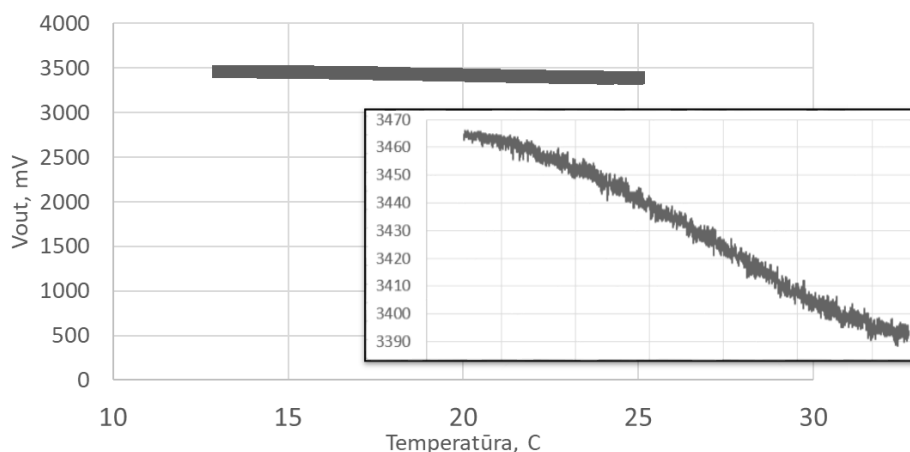
Temperatūra, $^\circ\text{C}$	$V_{out}$ , mV	$V_{diff}$ , stiprinimą, mV	prieš $V_{diff}$ jutiklio dreifas, mV
-30	1555	4.7121	-0.3182
70	1465	4.3939	





**29 pav.** Aplinkos temperatūros svyravimo įtaka dinamometro jautriojo elemento išėjimo signalui, kai temperatūrinėje kameroje patalpintas tik jautrusis elementas

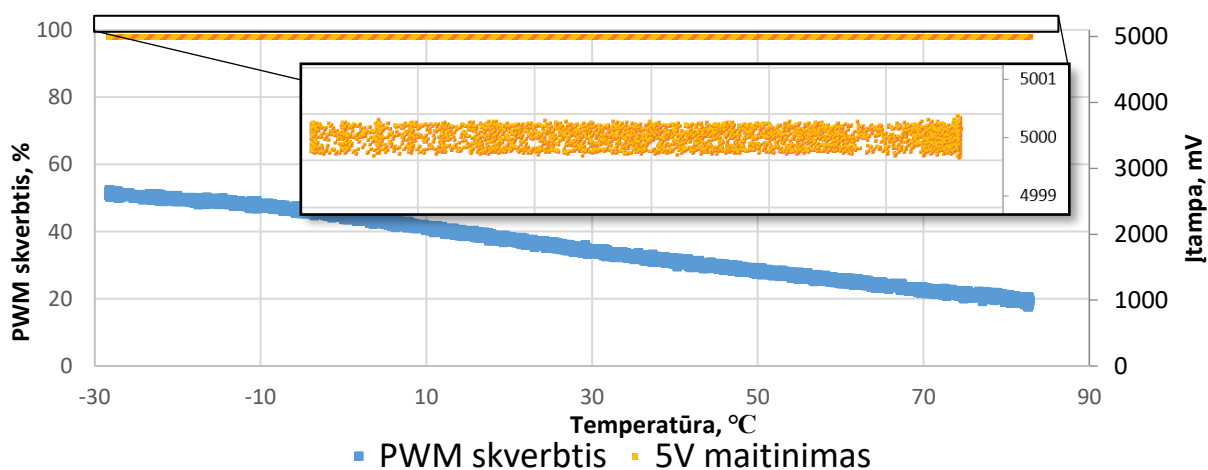
Didelio nulinės apkrovos nuokrypio terminiam įvertinimui, prie signalo derinimo grandinės reikia prijungti jutiklį su tokiu nuokrypiu. Vis dėlto, paprastesnis būdas yra naudoti turimą jutiklį su 0mV nulinės apkrovos nuokrypiu ir jį išderinti su vienu išoriniu rezistoriumi, kuris jungiamas tarp maitinio įtampos išvado ir vieno iš signalinių išvadų. Kita vertus, taip išderintas jutiklis yra daug jautresnis temperatūros svyravimams. To įvertinimui atliktas tyrimas. Prietaiso elektronika patalpinta į stabilią 24°C temperatūros kamara, o pats dinamometro jautrusis elementas yra kameros išorėje. Šio bandymo tikslas nustatyti kokia yra temperatūros įtaka jutiklio diferencialiniam signalui su dideliu nulinės apkrovos nuokrypiu, kai pati elektronika yra pastovios temperatūros terpėje. Matavimo rezultatai pateikti **30 pav.** Patalpos temperatūrai sumažėjus per 12°C, išėjimo signalas padidėjo per 78mV. Tai atitinka 0.236mV Vdiff signalo pokytį. Tokio jutiklio temperatūrinis jautrumas yra  $-20\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ . Tai net 6.6 kartus prastesnis jautrumas, negu jutiklio su 0mV nulinės apkrovos nuokrypiu. Tai rodo, kad išbalansuotas dinamometro jautrusis elementas su 250mV nulinės apkrovos nuokrypiu stipriai reaguoja į aplinkos temperatūros pokyčius ir atliekant tyrimus tai būtina įvertinti.



**30 pav.** Aplinkos temperatūros svyravimo įtaka dinamometro jautriojo elemento išėjimo signalui su 250mV nulinės apkrovos nuokrypiu

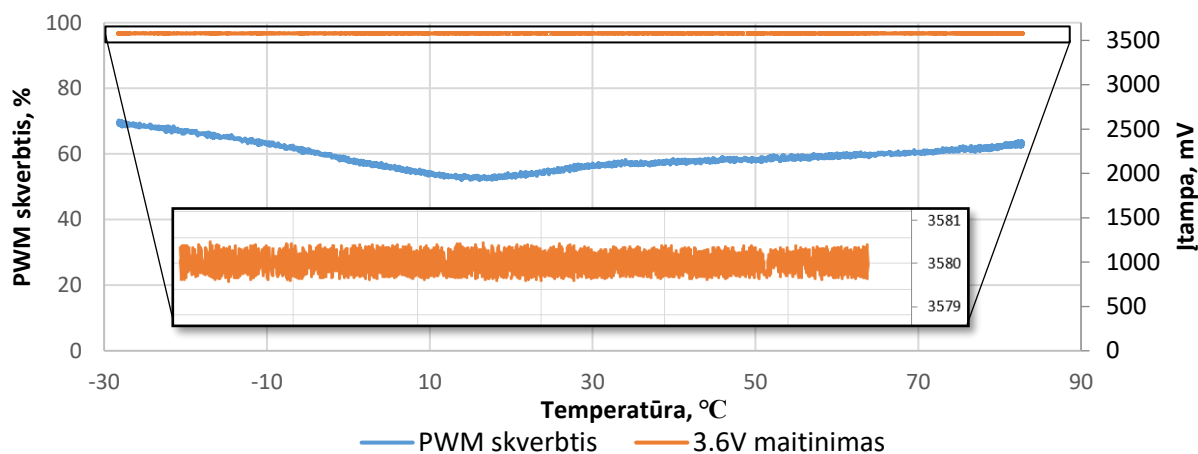
### 3.3 Maitinimo įtampų stabilumas darbo temperatūrų diapazone

5V ir 3.6V maitinimo įtampa stabilizuojama pagal Maitinimo grandinės stabilizavimas 2.3.4 paragrafe aprašytą metodą. Temperatūrinių matavimų rezultatai pateikti **31 pav.** ir **32 pav.** Grafikuose matoma, kad 5V maitinimo įtampa visame darbo temperatūrų diapazone išliko stabili, o triukšmų lygis neviršijo  $\pm 0.5\text{mV}$ . Šio keitiklio reguliavimo PWM signalo vertė pakito per 30%. Pagal teorinius skaičiavimus, nenaudojant uždarnosios kilpos stabilizavimo sistemos, 5V maitinimo įtampa pakistų per  $30\% \times 100\text{mV} = 30\text{mV}$ .



**31 pav.** 5V maitinimo įtampos stabilumas nuo temperatūros (viršuje) ir regulatoriaus PWM skverbtis (apačioje)

Identišku principu stabilizuojama ir 3.6V maitinimo įtampa. Pastaroji, užtikrinama stabili visame darbo temperatūrų diapazone [-30°C;60°C], su ±0.4mV triukšmų lygiu. Pagal PWM reguliavimo signalą matoma, kad žemoje temperatūroje (artimoje -30°C) keitiklio išėjimo signalo lygis krenta, dėl to PWM skverbtis yra didinama, o apie +20°C išėjimo signalo lygis maksimalus. Nenaudojant atgalinio ryšio stabilizavimo sistemos, 3.6V maitinimo įtampa pakistų per  $20\% \times 100mV = 20mV$ .

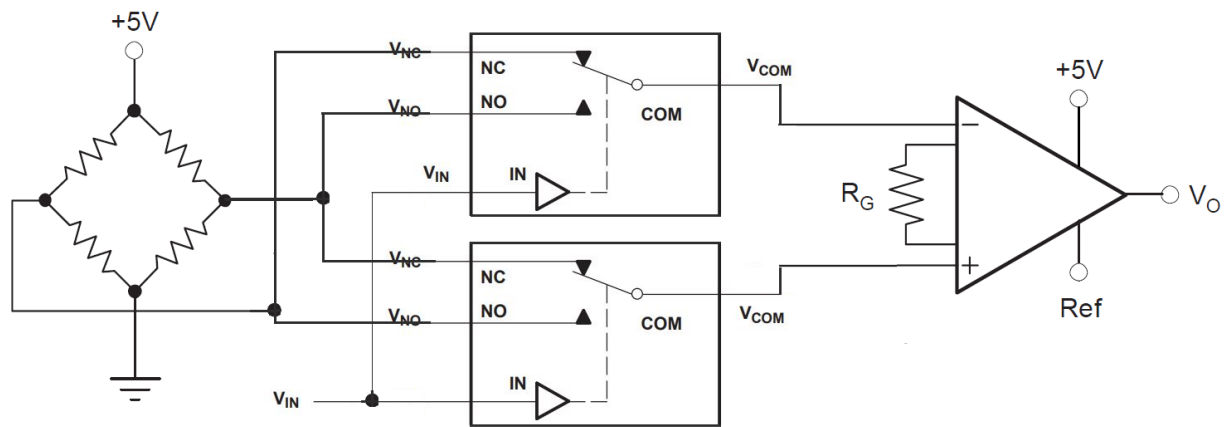


**32 pav.** 3.6V maitinimo įtampos stabilumas nuo temperatūros (viršuje) ir reguliatoriaus PWM skverbtis (apačioje)

### 3.4 Dvigubo komutatoriaus įtaka matavimo tikslumui

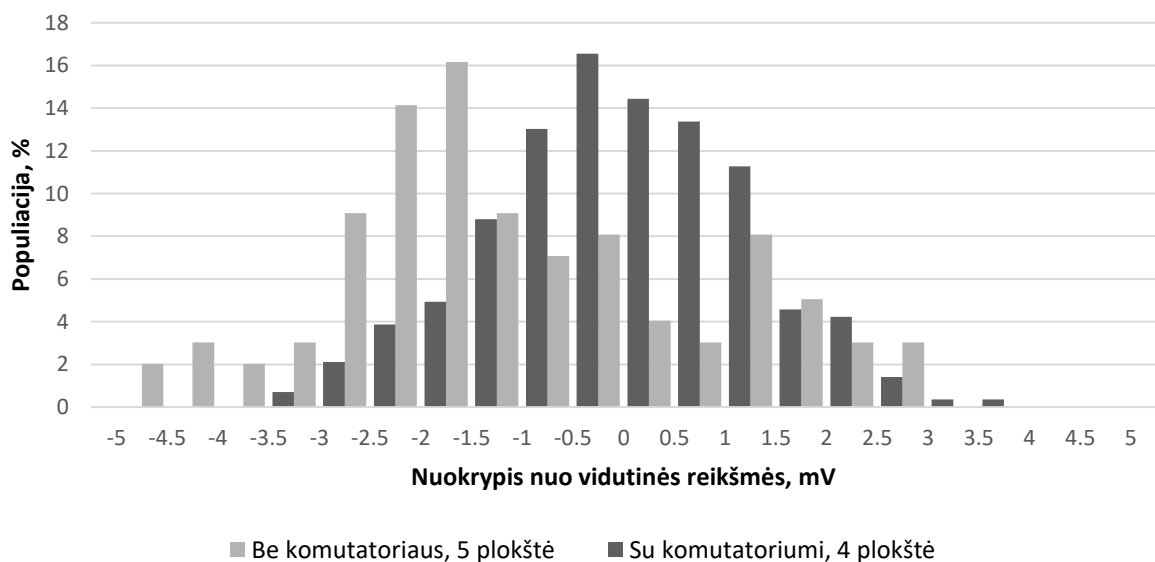
Tiltinių jutiklių signalą įprasta stiprinti naudojant instrumentinį stiprintuvą. Naudojant tokį jungimą yra kritiškai svarbu tinkamai sujungti tilto signalinius laidus su stiprintuvo invertuojančiu ir neinvertuojančiu įėjimais. Būtinas geras tilto signalinių laidų ekranavimas, kuo trumpesnių laidų parinkimas ir tinkamas SMP komponentų išdėstymas, norint apsaugoti signalą nuo papildomų triukšmų šaltinių.

Kita vertus, dėl 2.2.1 paragrafe aprašytų priežasčių naudojamas nestandartinis jungimo būdas. Tarp tiltinio jutiklio ir instrumentinio stiprintuvo įterpiamas dvigubas komutatorius (**33 pav.**). Tai yra analoginis dviejų kanalų jungiklis, kurio paskirtis yra sukeisti signalinius laidus. Pagal teoriją instrumentinio stiprintuvo įėjimo impedansas yra artimas begalybei, todėl srovės nuotėkis, o kartu ir įtampos kritimas ant komutatoriaus kanalų, kurių kiekvieno varža yra 15Ω, yra nereikšmingas dydis. Tačiau, visi komutatoriaus įnešami triukšmai yra sustiprinami kartu su naudingą signalu ir tiesiogiai įtakoja išėjimo signalą.



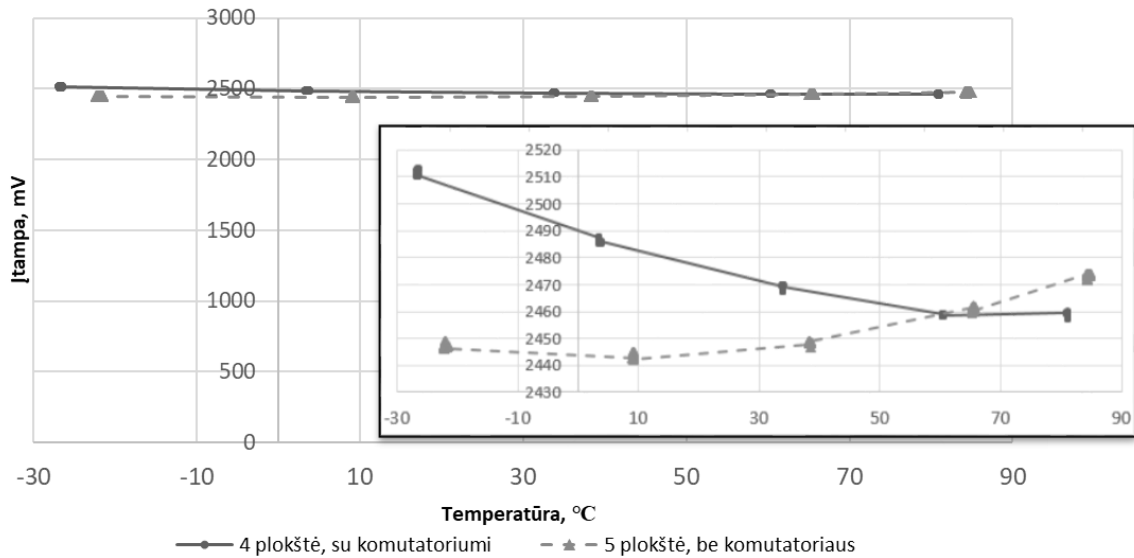
**33 pav.** Dvigubo komutatoriaus jungimo į tiltinio jutiklio principinė schema

Komutatoriaus įnešamų triukšmų lygis buvo įvertintas naudojant dvi analogiškas SMP su tokiu pat tiltiniu jutikliu ir identišku programiniu kodu. Vienintelis skirtumas buvo – komutatorius. Ketvirtojoje plokštėje komutatorius naudojamas, o penktojoje - tilto signaliniai laidai tiesiogiai sujungti su stiprintuvo įėjimais. Bandymo rezultatai pateikti **34 pav.** Histogramos x ašyje pateikta atskirų matavimų skirtumas nuo nusistovėjusios vertės. Y ašyje pateikta populiacijos dalis procentais, patenkančios į atitinkamo skirtumo grupę. Plokštėje be komutatoriaus matavimai išėjimo signalas svyruoja  $[-4.5mV; 3mV]$  diapazone, tuo tarpu plokštėje su komutatoriumi  $[-3.5mV; 3.5mV]$ . Iš to daroma išvada, kad komutatoriaus įnešami triukšmai nėra reikšmingi ir jis tinkamas naudoti šioje grandinėje.

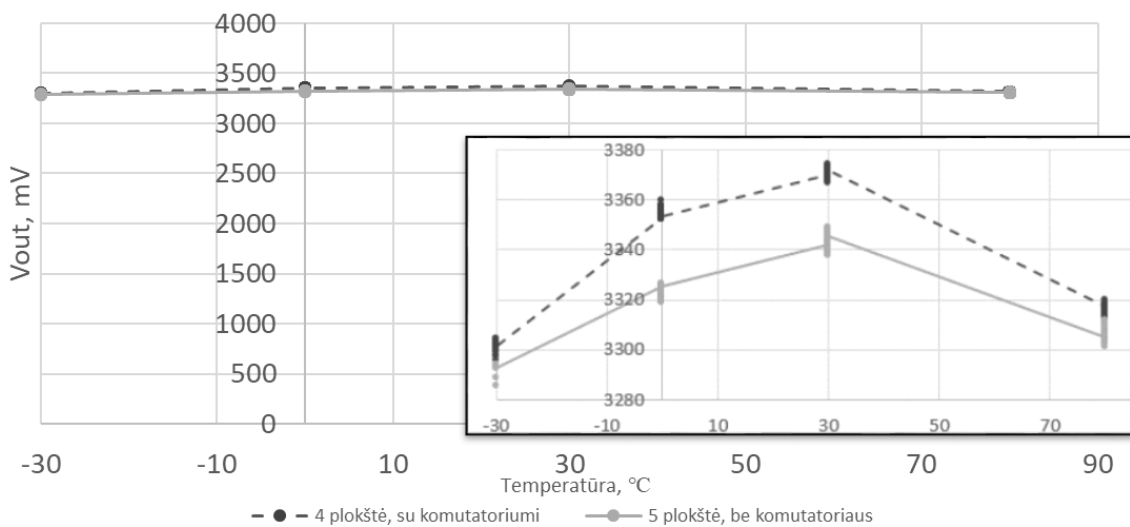


**34 pav.** Išėjimo signalo triukšmų pasiskirstymo histograma, be komutatoriaus ir su komutatoriumi

Komutatoriaus terminio stabilumo įvertinimui, buvo naudojamos identiškos plokštės patalpintos į terminę kamerą. Pirmojo bandymo metu prie plokščių buvo prijungti tiltiniai jutikliai su 0mV įėjimo signalu (**35 pav.**). Iš grafiko matoma, kad visų trijų plokščių išėjimo signalo dreifai neviršijo 50mV, tačiau visų trijų bandinių išėjimo signalai kito skirtinga priklausomybe. Antruoju bandymu naudoti išbalansuoti jutikliai su 250mV nulinės apkrovos nuokrypiu (**36 pav.**). Šio bandymo metu abiejų bandinių išėjimo signalai kito pagal panašią priklausomybę. Apibendrinant šiuos matavimus galima teigti, kad komutatorius neturi reikšmingos įtakos išėjimo signalo pokyčiui nuo temperatūros.



**35 pav.** Komutatoriaus įtaka išėjimo signalo dreifui nuo temperatūros su nuliniu (0mV) nulinės apkrovos nuokrypiu



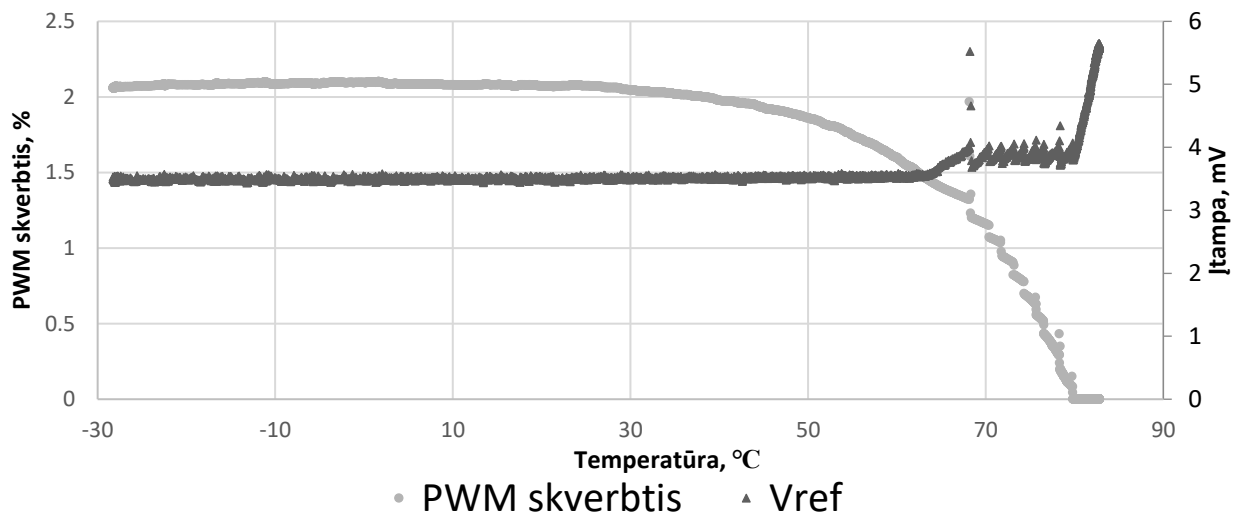
**36 pav.** Komutatoriaus įtaka išėjimo signalo dreifui nuo temperatūros su 250mV nulinės apkrovos nuokrypiu

### 3.5 Kompensavimo su nestiprinto $V_{ref}$ matavimu temperatūrinis stabilumas

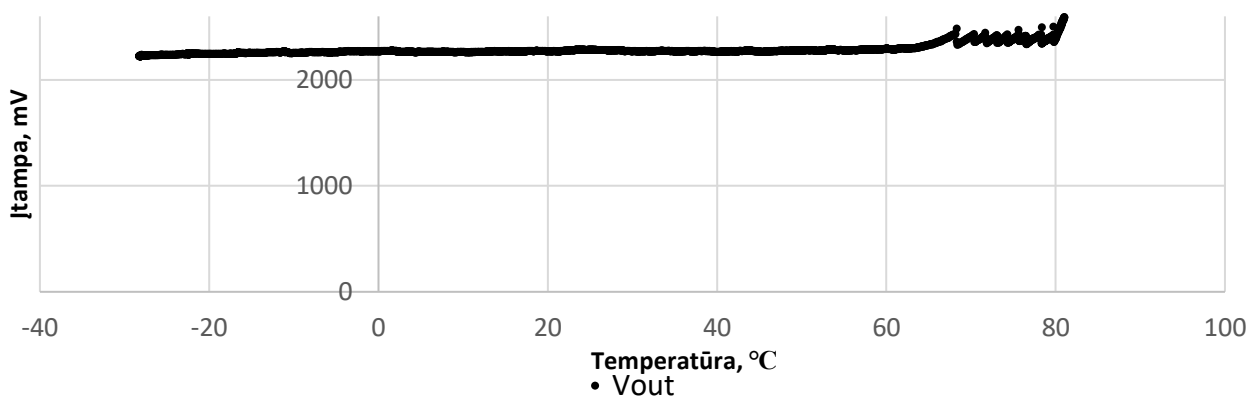
Šio metodo temperatūriniam tyrimui naudota žiedo formos dinamometro jautrusis elementas, kuris buvo patalpintas terminės kameros išorėje (stabilioje temperatūroje), o viduje patalpinta signalo derinimo grandinė.  $V_{ref}$  lygis nustatytas 3.5mV ir grįžtamojo ryšio grandinė manipuliuodama PWM skverbtime palaiko šį lygį.

Matavimo rezultatai pateikti **37 pav.** ir **38 pav.** Pirmajame grafike matoma, kad temperatūrų diapazone nuo  $-28^{\circ}\text{C}$  iki  $60^{\circ}\text{C}$ ,  $V_{ref}$  signalas stabiliai palaikomas pagal nustatytą lygį. Tačiau, temperatūrai didėjant,  $V_{ref}$  signalo lygis ženkliai pradeda didėti ir prie  $85^{\circ}\text{C}$ , viršija 5mV ribą. Taip pat, ties šia riba PWM skverbties lygis yra lygus 0%. Teoriškai  $V_{ref}$  signalo vertė taip pat turėtų būti 0mV. Atlikus praktinius tyrimus, matoma, kad  $V_{ref}$  signalas priklauso ne tik nuo reguliuojamos PWM skverbties, bet tam įtakos turi ir temperatūra. Gali būti, kad dėl netinkamai suprojektuotų SMP takelių ir jungčių kontaktų, atsiranda termoelektrovaros jėga.

Šio metodo išėjimo signalo pokytis darbinės temperatūros diapazone [ $-20^{\circ}\text{C};60^{\circ}\text{C}$ ] yra apie 50mV ( 1.4% F.S.). Tačiau viršijus  $60^{\circ}\text{C}$  signalo lygis stipriai pakinta. Ši problema paskesnių matavimų metu buvo nuslopinta, pakoregavus maitinimo grandinę.



**37 pav.**  $V_{ref}$  signalo dreifas nuo temperatūros ( viršuje) ir reguliuojamo PWM signalo skverbties kitimas (apačioje)

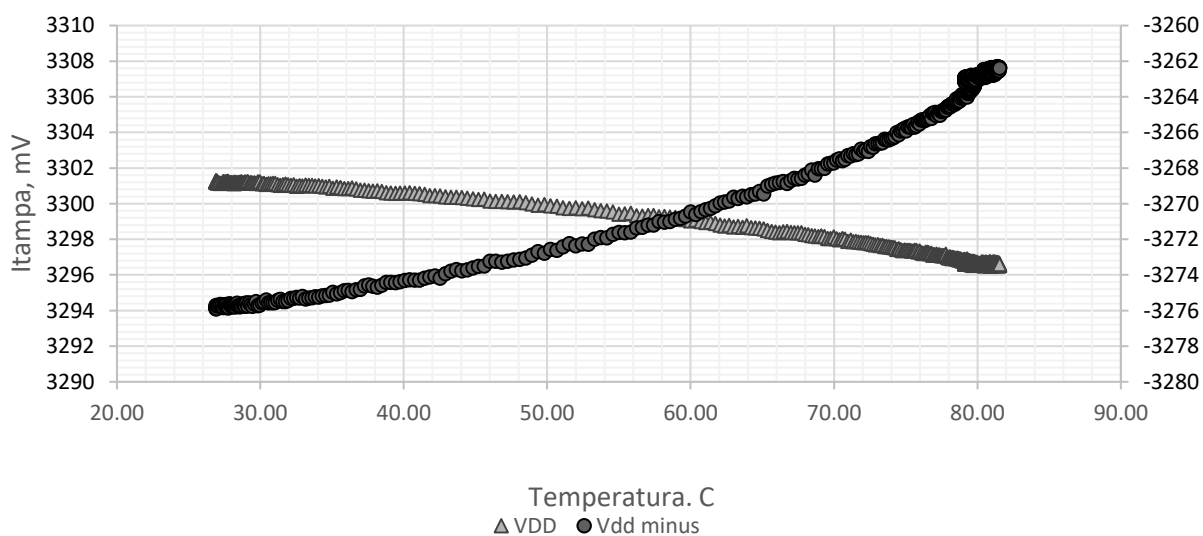


38 pav. Vout signalo dreifas nuo temperatūros

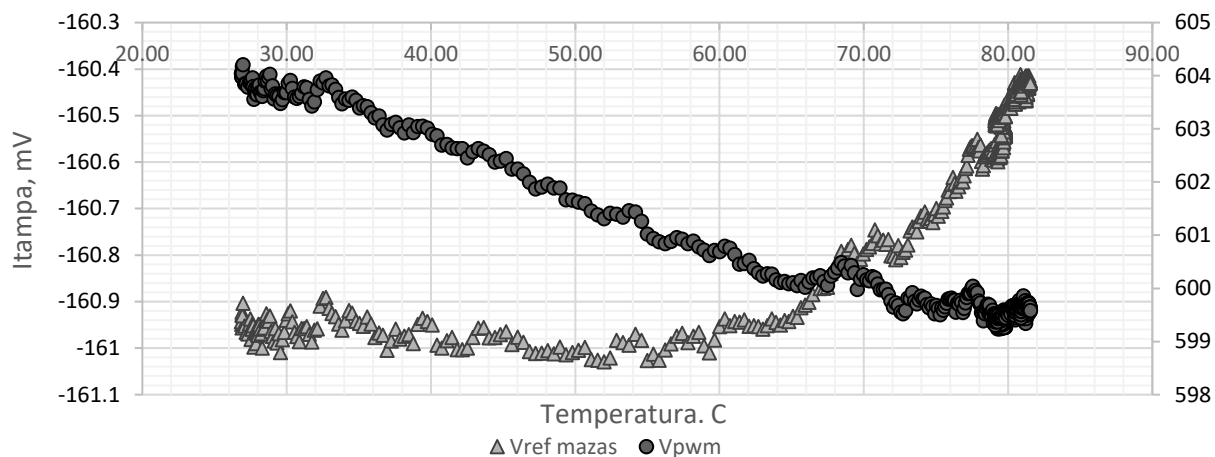
### 3.6 Įtaiso su neigiama atstojamąja įtampa terminis stabilumas

Šio metodo stabilumo tyrimui naudojama apie 160mV nulinės apkrovos nuokrypio dinamometro jautrusis elementas. Temperatūros kameroje patalpinama tik signalo derinimo grandinė (jutiklis išorėje). Testavimo temperatūrų diapazonas [27°C; 82°C], kurio užtekto įvertinti metodo stabilumui.

Elektroninė grandinė sujungta pagal 2.2.5 paragrafe aprašytą struktūrinę diagramą. Vref kompensavimo grandinėje naudojama invertuota maitinimo įtampa -3.3V. Matavimo rezultatai pateikti 39 pav. ir 40 pav. Grafikuose matoma, kad teigiama maitinimo įtampa per matavimo diapazoną pakito per 6mV, o invertuota įtampa per 14mV. Kadangi kompensavimo grandinėje įvertinama tik teigiama maitinimo įtampa ir iš jos skaičiuojama neigiama, dėl skirtingo dreifo pokyčio Vref signalas reguliuojamas klaidingai. Vref signalas pakinta per 0.6mV.



39 pav.  $V_{DD}$  3.3V ir invertuotos -3.3V įtampos dreifas nuo temperatūros

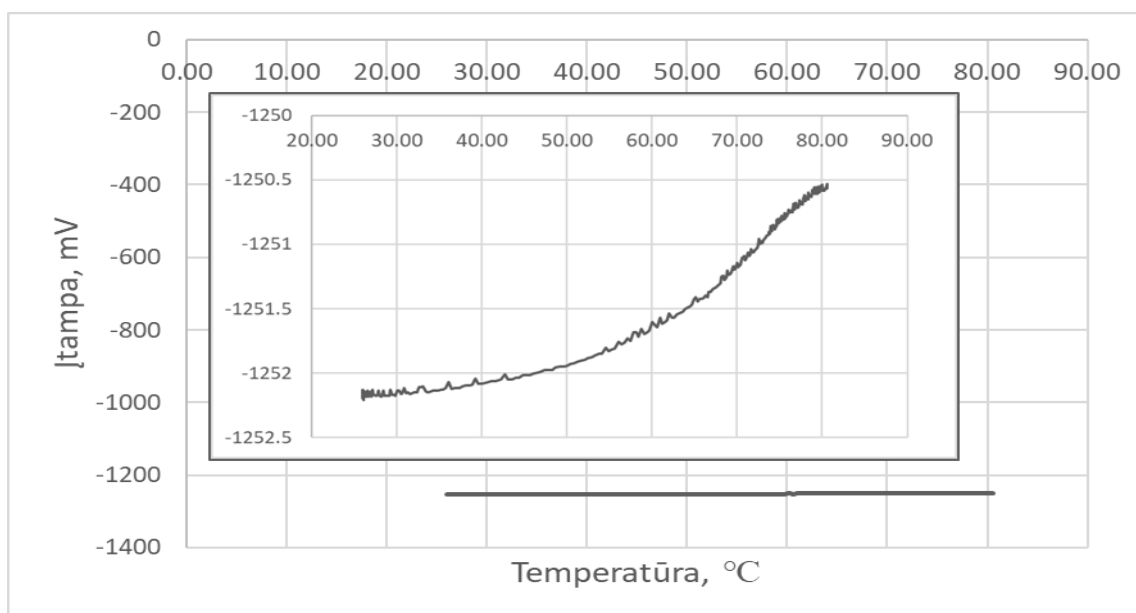


**40 pav.** Vref įtampos ir PWM valdymo signalo skverbties dreifas nuo temperatūros naudojant -3.3V įtampą

Nustačius, kad invertuota maitinimo įtampa kinta per 14mV, buvo išbandytas kitas jungimo būdas naudojant -1.25V atstojamosios įtampos šaltinį. Jungimo grandinė:

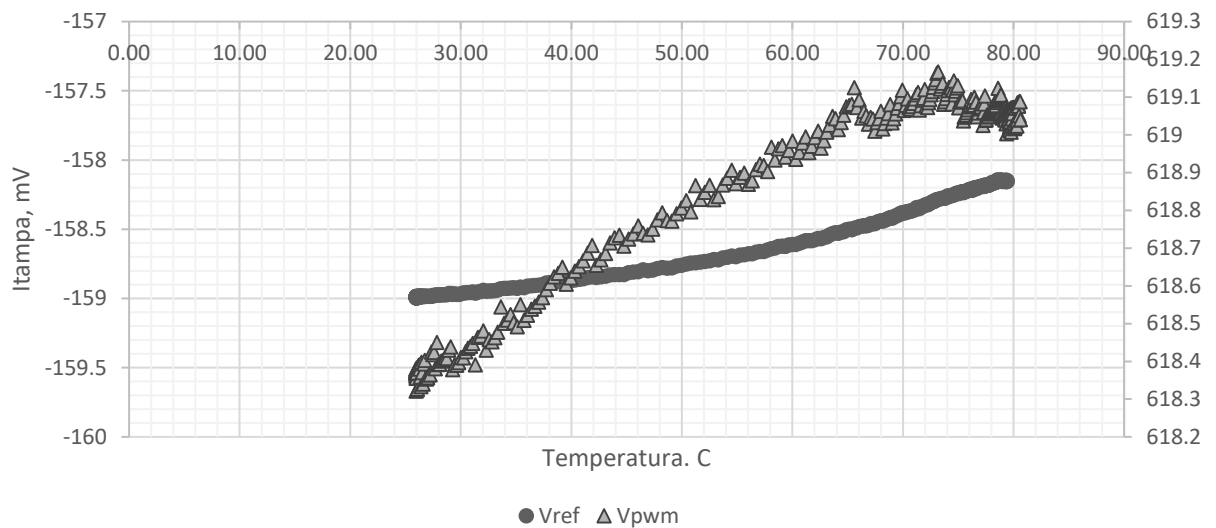
+3.3V → *inverteris* → -3.3V → *atstojamosios įtampos keitiklis* → -1.25V

Matavimo rezultatai su -1.25V atstojamąja įtampa pateikti **41 pav.** ir **42 pav.** Per tą patį temperatūrų diapazoną neigiamos atstojamosios įtampos lygis pakito tik per 1.6mV ( tai apie 9 kartus mažiau negu naudojant tik -3.3V įtampą). Šiuo atveju Vref pakito per 0.8mV.



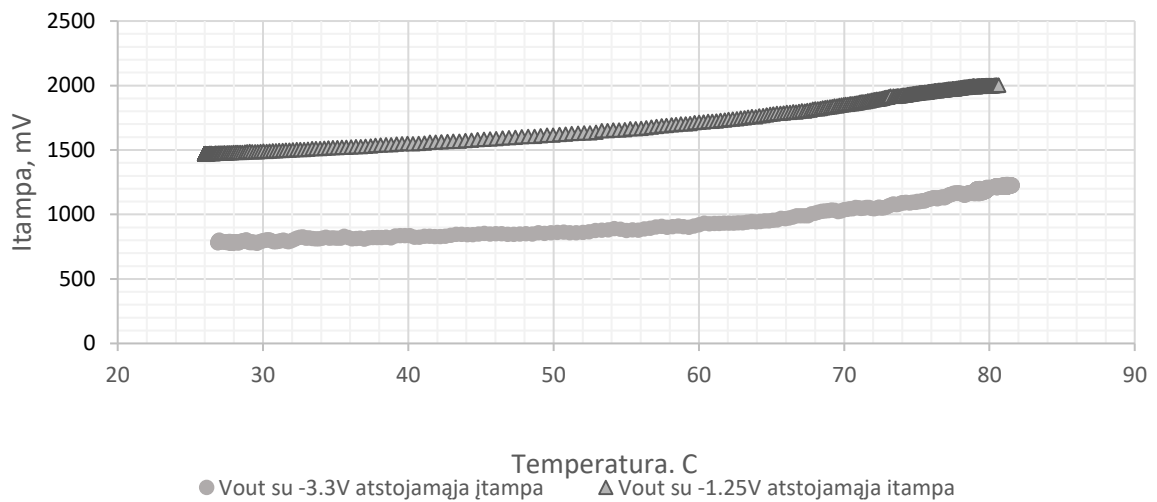
**41 pav.** Atstojamosios -1.25V įtampos dreifas nuo temperatūros





**42 pav.** Vref įtampos ir PWM valdymo signalo skverbties dreifas nuo temperatūros naudojant  $-1.25V$  atstojamąją įtampą

Dviejų metodų išėjimo įtampų palyginimui, kai naudojama neigiama  $-3.3V$  įtampa ir kai naudojama  $-1.25V$  atstojamoji įtampa rezultatai pateikti **43 pav.** Abiejų metodų išėjimo įtampų dreifas yra apie  $500mV$ , temperatūrų diapazone nuo  $28C$  iki  $82C$ . Tai yra apie  $14.7\%$  F.S., kas viršija užduoties sąlygas apie 3 kartus.



**43 pav.** Vout signalo dreifo palyginimas naudojant  $-1.25V$  atstojamąją įtampą (viršuje) ir naudojant  $V_{DD}$  įtampos inverterį (apačioje)

Mikrovaldiklio reguliuojama  $V_{pwm}$  įtampa (2.2.5 paragrafas) palaikoma pagal nustatytą reikšmę su  $\pm 0.25mV$  paklaida. Tikėtinas neigiamos atstojamosios įtampos dreifas apie  $2mV$ , visame užduoties darbo temperatūrų diapazone. Prie tokių sąlygų Vref lygis reguliuojamas su

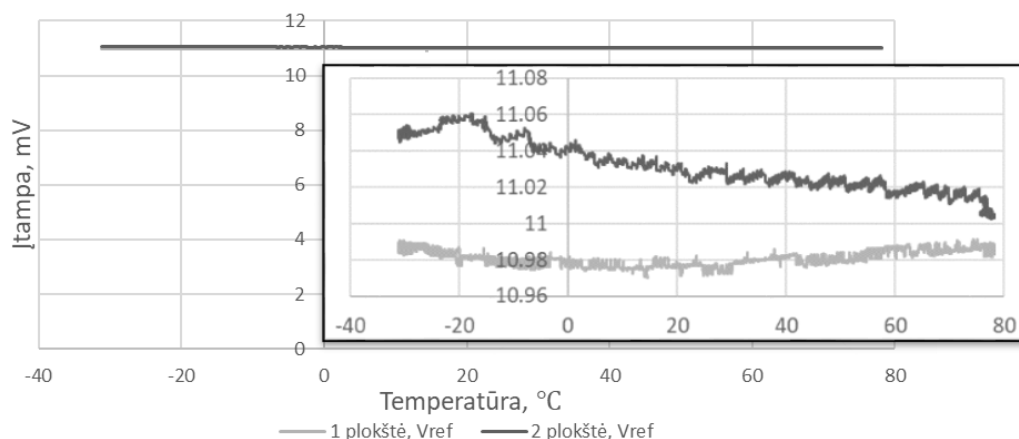
$\pm 144\mu V$  paklaida ir išėjime tai atitinka apie  $\pm 1.5\% F.S.$  Vis dėlto, tai yra optimistiški paskaičiavimai ir realioje sistemoje numatomos didesnės paklaidos.

Metodo su neigiama maitinimo įtampa pagrindinė problema – neturima tiesioginiu būdu išmatuotų duomenų apie neigiamą atstojamąją įtampą. Dėl šių duomenų trūkumo,  $V_{ref}$  signalo lygis yra tik nuspėjamas ir nėra būdų jo tiksliai kontroliuoti. Problemos eliminavimui reikalingas papildomas neigiamas įtampas galintis matuoti analogas-kodas keitiklis. Tačiau, šiame darbe toks metodas netiriamas.

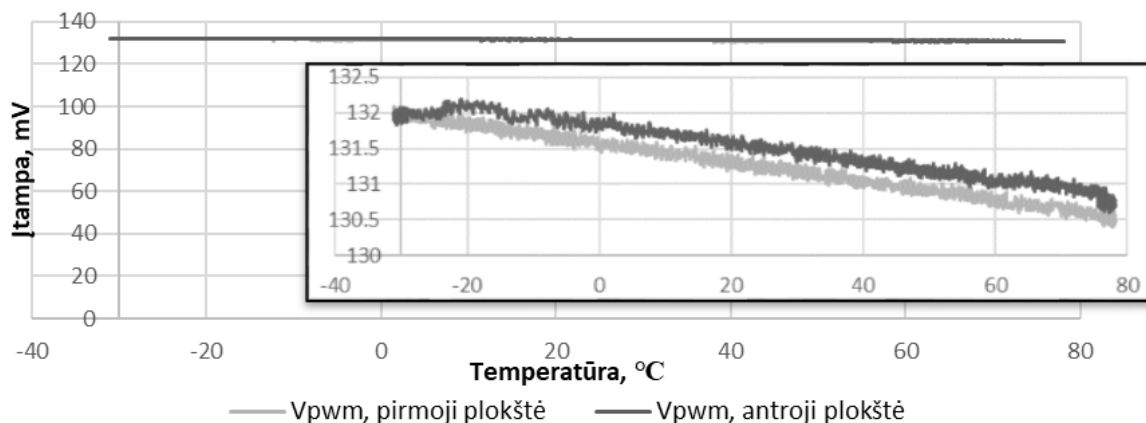
### 3.7 Įtaiso su komutatoriumi terminis stabilumas

Šio metodu tyrimui buvo pagaminti du identiški egzemplioriai (dvi SMP). Tai daroma su tikslu įvertinti komponentų parametų išsibarstymą. Plokštės surinktos pagal 2.2.1 paragrafe aprašytą struktūrinę diagramą. Bandiniai patalpinti temperatūrinėje kameroje ir tirti  $[-30^{\circ}C; 78^{\circ}C]$  temperatūrų diapazone. Instrumentinio stiprintuvo įėjime prijungiama dinamometrinis jutiklis su  $0mV V_{diff}$  signalu. Prie tokių sąlygų įvertinama tik pačios signalo derinimo grandinės stabilumas, neatsižvelgiant į prijungtą jutiklį.  $V_{ref}$  signalo lygis matuojamas papildomu „PicoLog“ matuokliu.

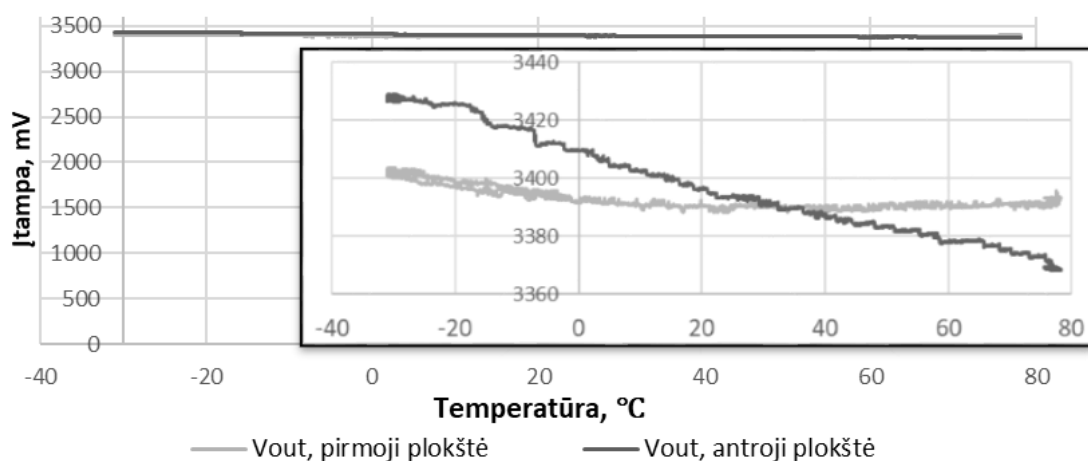
Matavimo rezultatai pateikti **44 pav.**, **45 pav.** ir **46 pav.** Ankstesnių matavimų metu buvo nustatyta, kad nors ir matuojamo  $V_{pwm}$  signalo vertė išlieka stabili, po varžinio daliklio nuslopintas  $V_{ref}$  signalas keičiasi. Dėl to, pagal pirmojo egzemplioriaus rezultatus, įvesta termokompensacija  $V_{pwm}$  signalui. Kylant temperatūrai jo vertė mažinama ir tokiu būdu  $V_{ref}$  išlieka stabilus. Kita vertus, naudojant analogišką algoritmą su antrąją SMP,  $V_{pwm}$  signalo lygis kinta tokiu pačia priklausomybe, bet  $V_{ref}$  signalo dreifas yra apie 4 kartus didesnis. Dėl tų pačių priežasčių, pirmosios plokštės išėjimo signalo dreifas yra tik apie  $10mV$ , o antrosios apie  $60mV$ .



**44 pav.**  $V_{ref}$  stabilumas nuo temperatūros. Pirmoji SMP (apačioje), antroji (viršuje)



**45 pav.** Vpwm stabilumas nuo temperatūros. Pirmoji SMP (apačioje), antroji (viršuje).



**46 pav.** Vout stabilumas nuo temperatūros. Pirmoji SMP (apačioje), antroji (viršuje).

Pagal pradinius modeliavimo rezultatus, Vref signalas turėtų visiškai kopijuoti Vpwm padalinus iš konstantos, kadangi ten naudojamas varžų daliklis. Kita vertus, reikia įvertinti komponentų temperatūrinius koeficientus. Visų pirma Vref signalas priklauso nuo varžų daliklio rezistorių. Jų įtaka įvertinta paskesniame 3.8 paragrafe. Antra, Vref tiesiogiai jungiamas prie instrumentinio stiprintuvo Ref išvado, kurio įėjimo impedansas irgi kinta nuo temperatūros.

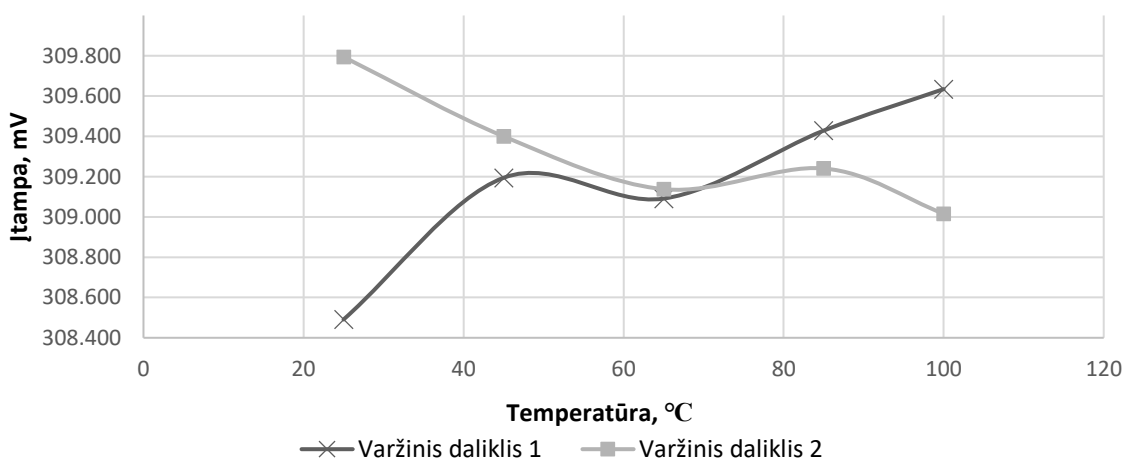
### 3.8 Įtaiso su komutatoriumi varžų daliklio terminis stabilumas

Vref signalui didelę įtaką turi varžų daliklio dalinimo koeficiento pokytis nuo temperatūros. Norint įvertinti šio faktoriaus įtaką buvo ištirti 10 identiškų varžų daliklių, prie tų pačių sąlygų. Dalikliams buvo naudojami 330Ω ir 30 Ω nominalo, 1% rezistoriai. Atsitiktinai parinkta po 10 vienetų vieno ir kito nominalo rezistorių ir išmatuota jų varža prie skirtingų

temperatūrų. Atsitiktinai parinktų dviejų porų matavimo rezultatai pateikti lentelė 3 ir **47 pav.** 330Ω nominalo rezistorių išmatuoti temperatūriniai koeficientai yra nuo 20ppm/°C iki 38ppm/°C, 30Ω – nuo 18ppm/°C iki 62ppm/°C. Iš grafiko matoma, kad pirmuoju atveju Vref įtampos lygis didėja nuo temperatūros per 1.1mV, antruoju mažėja per 0.8mV. Įtaiso išėjime tai atitinkamai pavirsta į 363mV (10.6% F.S.) ir 264mV (7.7%F.S.).

lentelė 3. Varžų daliklių išėjimo įtampos priklausomybė nuo temperatūros

Temperatūra, °C	Varžinis daliklis 1				Varžinis daliklis 2			
	R1, Ω	R2, Ω	Dalinimo koeficientas	Vout, mV	R1, Ω	R2, Ω	Dalinimo koeficientas	Vout, mV
25	329.54	29.9	11.021	308.491	329.58	30.03	10.975	309.794
45	329.56	29.97	10.996	309.194	329.78	30.01	10.989	309.400
65	329.67	29.97	11.000	309.091	330.06	30.01	10.998	309.138
85	329.75	30.01	10.988	309.428	330.28	30.04	10.995	309.241
100	329.86	30.04	10.981	309.634	330.52	30.04	11.003	309.016

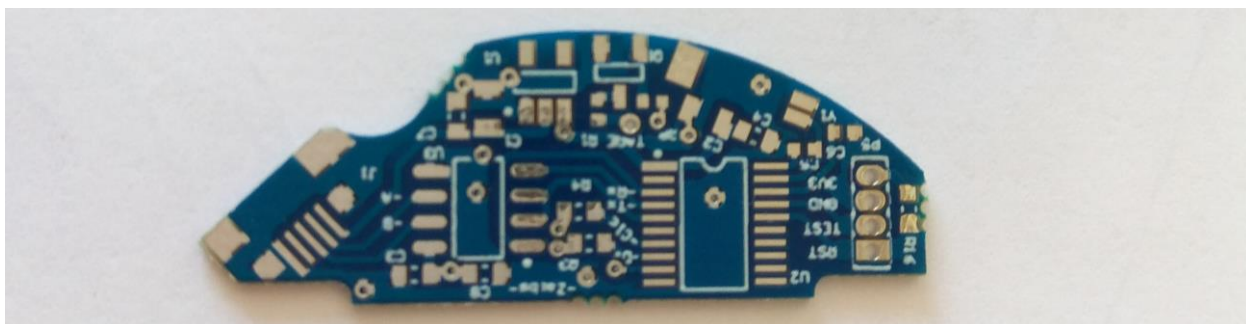


**47 pav.** Vref signalo dreifas nuo temperatūros dėl skirtingų rezistorių temperatūrinių koeficientų

Šio bandymo rezultatai patvirtina, kad naudojant metodą su komutatoriumi būtina parinkti kuo panašesnių temperatūrinių koeficientų rezistorius. Standartinių  $\pm 1\%$  nominalo rezistorių deklaruojamas temperatūrinis koeficientas yra  $\pm 100 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$ . Dėl šios priežasties, rezistorius reikia eksperimentiškai išmatuoti ir parinkti kuo panašesnių parametrų poras. Toks atrankos būdas galimas, bet nėra praktiškas.

### 3.9 Įtaiso su komutatoriumi ir sustiprintu $V_{ref}$ terminis stabilumas

Atlikus pradinį testavimą su paragrafe 2.2.3 aprašyta schema, gauta daug žadantys rezultatai. Dėl šios priežasties, buvo suprojektuotos ir surinktos 5 identiškos spausdintinio montažo plokštės (**48 pav.**). Visos plokštės buvo lygiagrečiai prijungtos prie to paties 12V maitinimo šaltinio, o įėjimo signalui naudota du režimai: 1) instrumentinių stiprintuvų įėjimo išvadai yra atskirai sutrumpinami ir pajungiami bendra lygio 2.5V įtampa, 2) visoms plokštėms prijungiamas 250mV diferencialinis signalas, o bendroji įtampa 2.5V. Pirmasis jungimo būdas skirtas ištirti grandinės stabilumui, kai  $V_{diff} = 0mV$ , o išėjimo įtampa priklauso tik nuo  $V_{ref}$  ir stiprintuvų stabilumo. Antruoju atveju siekiama ištirti schemos parametrus su maksimaliu galimu įėjimo signalu. Šiam tikslui būtina prie kiekvienos plokštės prijungti atskirą dinamometro jautrųjį elementą arba naudoti vieną ir lygiagrečiai sujungti su visomis plokštėmis. Abu variantai turi trūkumų. Naudojant atskirus jutiklius, kiekvieno iš jų išėjimo įtampa skiriasi, dėl to galima tik santykinai palyginti visų grandinių išėjimo įtampas. Antrajam jungimo variantui naudojama tik vienas jutiklis, bet dėl signalinių laidų lygiagretaus jungimo kiekvienai plokštei, įnešama papildomų triukšmų. Vis dėlto, dėl paprastesnio jungimo pasirinkta naudoti tik vieną jutiklį su visomis plokštėmis.



**48 pav.** Tyrime naudojamos suprojektuotos ir surinktos spausdintinio montažo plokštės nuotrauka

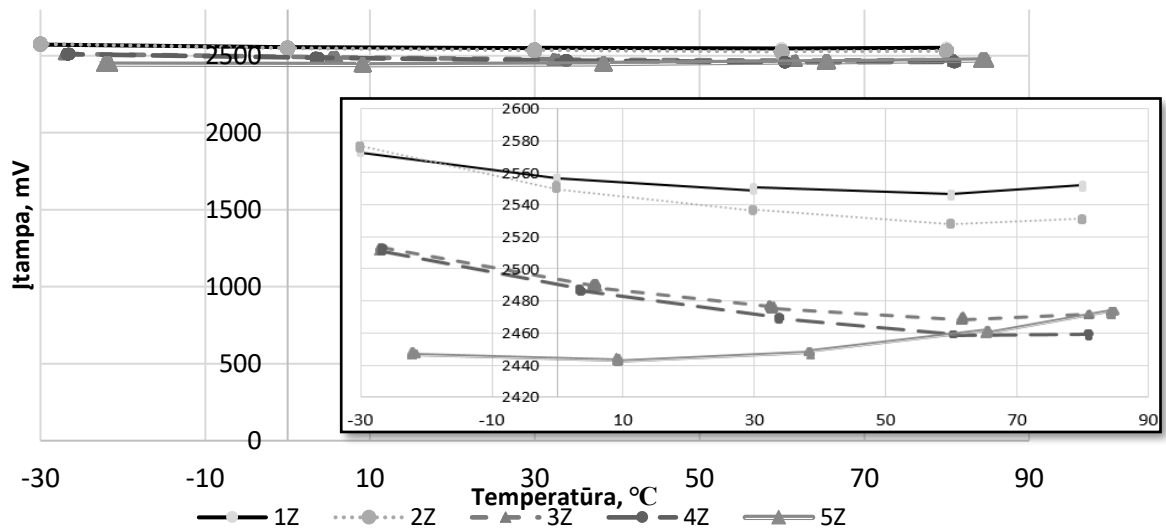
Sujungus visas plokštes pagal anksčiau aprašytą strategiją, pirmiausia buvo išmatuoti plokščių parametrai kambario temperatūroje. Matavimo rezultatai pateikti lentelė 4. Mikrovaldiklio analogas-kodas keitiklio išmatuotos vertės yra lyginamos su „Gwinstek DGM-8246“ skaitmeniniu multimetru išmatuotomis vertėmis. Įtaise naudojamos grįžtamojo ryšio stabilizavimo grandinės užprogramuotos palaikyti stabilias 5V ir 3.58V maitinimo įtampas. Realios absoliutinės vidutinės įtampos yra 4995.6mV ir 3570.8mV, su 2.5mV ir 1.9mV

standartinėmis deviacijomis atitinkamai. Galima to priežastis yra naudojamų komponentų parametrų išsibarstymas, tačiau matavimo tikslumui tai didelės įtakos neturi, nes kiekvienam prietaisui atliekamas individualus nunulinimas.

lentelė 4. Tiriamų SMP parametrai kambario temperatūroje

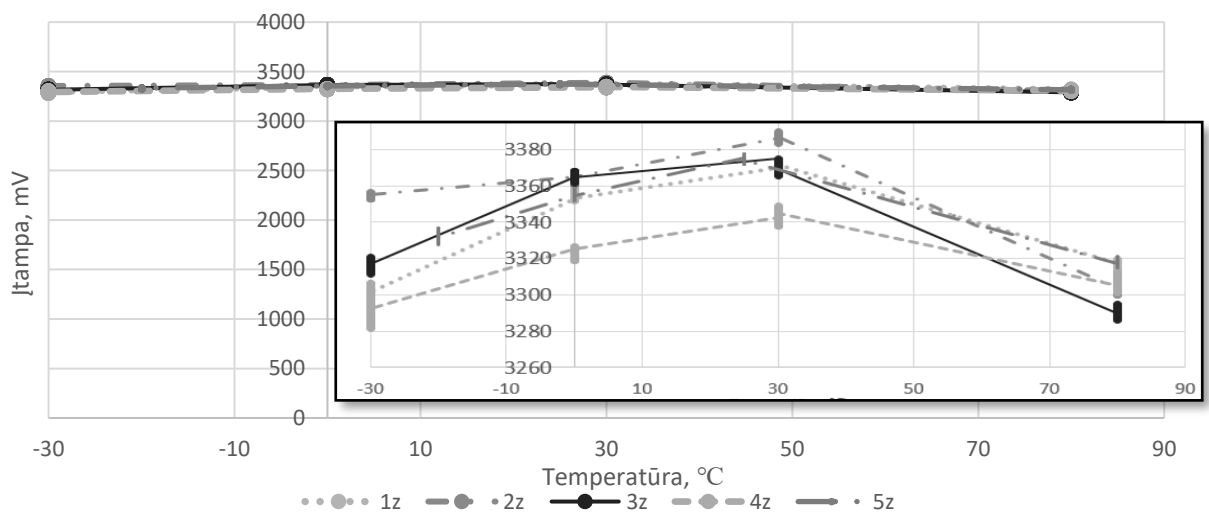
PCB Nr.	1	2	3	4	5	Vidurkis	Standartinė deviacija
5V reali, mV	4999	4991	4996	4997	4995	4995.60	2.65
5V daliklis, mV	3091	3091	3091	3091	3093	3091.40	0.80
5V AKK mV	5000	5000	5000	5000	5000	5000.00	0.00
DUTY_5V, bitai	315	107	134	89	213	171.60	83.29
3.6V reali, mV	3568	3570	3573	3573	3570	3570.80	1.94
3.6V Akk mV	3580	3580	3580	3580	3580	3580.00	0.00
DUTY_3V6, bitai	613	519	549	543	569	558.60	31.53
3V ref reali, mV	2999.5	2999.4	2999.7	2999.7	3000	2999.66	0.21
Temperatūra, °C	64.2	45.7	46.2	47	58	52.22	7.52
TEMP ADC, bitai	762	703	707	710	743	725.00	23.35
Vref, mV	100	100	100	100	100	100.00	0.00
Vsensor, mV	2542	2484	2461	2446	2283	2443.20	86.50

Paskesni matavimai buvo skirti ištirti įtaiso stabilumą visame darbo temperatūrų diapazone, nuo  $-30^{\circ}\text{C}$  iki  $60^{\circ}\text{C}$ . Pirma buvo matuojama visos plokštės su 0mV įėjimo signalu. Šiuo atveju išėjimo signalas nepriklauso nuo dinamometro jutiklio temperatūrinių savybių. Šio tyrimo rezultatai pateikti 49 pav. Visos plokštės buvo užprogramuotos palaikyti 100mV Vref lygį, kuris testavimo temperatūrų diapazone išliko stabilus su  $\pm 0.1\text{mV}$  triukšmų lygiu. Prie tokių sąlygų Vout lygis yra apie 2.5V. Antrajame grafike matoma, kad maksimalus išėjimo įtampų skirtumas tarp plokščių yra apie 120mV, tačiau maksimalus kiekvienos plokštės dreifas visame darbinių temperatūrų diapazone neviršija 60mV.



49 pav. Tiriamų plokščių  $V_{out}$  stabilumas nuo temperatūros su  $V_{diff} = 0mV$

Antrojo temperatūrinio bandymo metu prie visų plokščių lygiagrečiai prijungta dinamometro jutiklis su 250mV lygio nulinės apkrovos nuokrypiu. Matavimo rezultatai pateikti 50 pav. Visos plokštės buvo automatiškai sukompensuotos, kad išėjimo įtampos lygis būtų 3380mV, kambario temperatūroje. Dėl šios priežasties, visų plokščių  $V_{ref}$  įtampų lygiai skiriasi apie porą milivoltų, tačiau kaip ir pirmojo bandymo metu, testavimo temperatūrų diapazone  $V_{ref}$  lygis išlieka stabilus su  $\pm 0.1mV$  triukšmų lygiu. Kita vertus, visų tiriamų plokščių  $V_{out}$  signalo dreifas darbo temperatūrų intervale neviršijo 70mV (2% F.S.), tai yra rezultatas tenkino užduoties sąlygas.



50 pav. Tiriamų plokščių  $V_{ref}$  stabilumas nuo temperatūros su  $V_{diff} = 250mV$

## IŠVADOS IR PASIŪLYMAI

Išanalizavus dinamometro jautriojo elemento pradinio nuokrypio kompensavimo metodus, nustatyta, kad standartinių jėgos jutiklių nulinės apkrovos nuokrypis neviršija  $\pm 1\%$  F.S. Dėl šios priežasties, praktikoje naudojamos specializuotos signalo kondicionavimo mikroschemos skirtos dirbti su jutikliais kurių maksimalus pradinis nuokrypis neviršija  $\pm 77\text{ mV}$ . Kitais atvejais, jutikliai rankiniu būdu turi būti kompensuojami naudojant išorinius rezistorius. Toks kompensavimo metodas yra įmanomas, bet masinės gamybos metu nepraktiškas. Automatinių kompensavimo lustų galinčių dirbti su jutikliais turinčiais  $\pm 250\text{ mV}$  pradinį nuokrypį nėra.

Pasiūlyti penki priimtinių techninių ir ekonominių parametrų (mažų matmenų ir kainos) grandinių jungimo metodai, kurie gali būti naudojami su tyrime naudojamu jutikliu. Vieni iš šių metodų naudoja signalinių laidų komutatorių, kas leidžia kompensuoti teigiamo ir neigiamo poliarumo pradinį nuokrypį ir nereikalauja naudoti papildomo neigiamos įtampos šaltinio. Kitu atveju naudojama dviejų stiprinimo pakopų konfigūracija. Šiuo metodu taip pat galima kompensuoti abiejų poliarumų pradinį nuokrypį, bet dėl instrumentinių stiprintuvų techninių galimybių, sumažėja dinaminis signalo diapazonas.

Remiantis praktinio tyrimo rezultatais sukurti algoritmai, įgalinantys atlikti pradinį naujo jutiklio kompensavimą, apskaičiuoti spaudimo jėgą ir sukalibruoti AKK. Automatinio kompensavimo metu atliekama tiek neigiamo, tiek teigiamo pradinio nuokrypio korekcija, be būtinybės fiziškai sukeisti jutiklio signalinius laidus. Nustatyta, kad naudojant šį algoritmą reikalingas minimalus  $V_{\text{ref}}$  lygis yra  $5\text{ mV}$  ir viso užduoties diapazono  $[-250\text{ mV}; 250\text{ mV}]$  pradinis nuokrypis gali būti iškompensuotas.

Atlikti eksperimentiniai tyrimai, leidžiantys įvertinti pasiūlytų jungimo metodų temperatūrinį stabilumą, darbo temperatūrų diapazone  $[-30^{\circ}\text{C}; 60^{\circ}\text{C}]$ . Nustatyta, kad naudojant metodą su papildomu neigiamos įtampos šaltiniu, nepasiekiamas norimas stabilumas. To priežastis yra tai, kad naudojant mikrovaldiklį tiesioginiu būdu neįmanoma išmatuoti neigiamos atstojamosios įtampos. Tam reikalingas papildomas, neigiamas įtampas matuojantis AKK. Iširta, kad metodas su komutatoriumi tenkina užduoties sąlygas, tačiau tam būtina parinkti identiškus varžų daliklio rezistorius. Naudojant standartinius rezistorius su  $\pm 1\%$  paklaida ir  $\pm 100\text{ ppm}/^{\circ}\text{C}$  temperatūriniu koeficientu, išėjimo signalo dreifas gali siekti  $\pm 5\%$  F.S. Nustatyta, kad stabiliausias kompensavimo metodas yra matuojant sustiprintą  $V_{\text{ref}}$  (2.2.3 paragrafas). Šis jungimo variantas buvo išbandytas su 5 identiškais egzemplioriais ir nustatyta, kad visais atvejais išėjimo signalo dreifas nuo temperatūros neviršija  $2\%$  F.S.



## INFORMACIJOS ŠALTINIŲ SĄRAŠAS

- [1] D. Mihai, “STRAIN GAUGES AND WHEATSTONE BRIDGES – BASIC INSTRUMENTATION AND NEW APPLICATIONS FOR ELECTRICAL MEASUREMENT OF NON-ELECTRICAL QUANTITIES,” no. 2011 [interaktyvus] [žiūrėta 2017-01-24]. Prieiga per internetą: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5767428/>.
- [2] C. Kitchin and L. Counts, “A Designer’s Guide to Instrumentation Amplifiers 3,” 2006 [interaktyvus] [žiūrėta 2017-09-24]. Prieiga per internetą <http://www.analog.com/media/en/training-seminars/design-handbooks/designers-guide-instrument-amps-complete.pdf>.
- [3] S. Ads, “24-Bit Analog-to-Digital Converter for Bridge Sensors Complete Front-End for Bridge Sensors,” 2013 [interaktyvus] [žiūrėta 2017-01-24]. Prieiga per internetą <https://ieeexplore.ieee.org/document/5767428/>, no. October, 2013.
- [4] B. R. Moghimi, “Bridge-Type Sensor Measurements are Enhanced by Autozeroed Instrumentation Amplifiers with Digitally Programmable Gain and Output Offset,” 2004 [interaktyvus] [žiūrėta 2018-01-07]. Prieiga per internetą <http://www.analog.com/en/analog-dialogue/articles/bridge-type-sensor-measurements.html>, pp. 4–6, 2004.
- [5] A. Moradkhani, K. Ahmadi, I. Mirmohammadhosseni, M. Aliyari Sh, and M. Teshnehlab, “Load cell Design and Construct with Fault Detection by Probabilistic Neutral Network,” [interaktyvus] [žiūrėta 2018-03-14]. Prieiga per internetą <https://ieeexplore.ieee.org/document/4798725/>, pp. 55–60, 2008.
- [6] L. Kuang, Y. Lou, S. Member, and S. Song, “Design and Fabrication of a Novel Force Sensor for Robot Grippers,” [interaktyvus] [žiūrėta 2018-03-24]. Prieiga per internetą <https://ieeexplore.ieee.org/document/8241754/>, no. 4, pp. 1410–1418, 2018.
- [7] D. Crescini, “Load Cell for Dynamic Force Measurements : an Example in Thick-Film Technology,” [interaktyvus] [žiūrėta 2018-03-10]. Prieiga per internetą <https://ieeexplore.ieee.org/document/6229420/>, no. Dii, 2012.
- [8] A. Rai, “Simplified and Programmable Design Approach for Strain Sensor Interface,” [interaktyvus] [žiūrėta 2017-05-20]. Prieiga per internetą <https://ieeexplore.ieee.org/document/7939569/>, pp. 23–26, 2016.
- [9] T. H. Daisuke Kuramoto, “Self-calibrated Analog-Front-End Circuitry for Ultra Low Power Strain Sensors,” [interaktyvus] [žiūrėta 2018-01-09]. Prieiga per internetą <https://ieeexplore.ieee.org/document/8005165/>, 2017.

- [10] S. Gu, F. Wang, Z. Chen, L. Zhang, W. Zhang, and A. S. B. Diagram, “The Research and Design of High-Precision Strain Type Electronic Balance,” *[interaktyvus] [žiūrėta 2018-03-08]*. Prieiga per internetą <https://ieeexplore.ieee.org/document/6566596/>, pp. 1451–1455, 2013.
- [11] ANALOG DEVICES, “Micropower , Zero Drift , True Rail-to-Rail Instrumentation Amplifier, AD8237,” *[interaktyvus] [žiūrėta 2017-08-28]*. Prieiga per internetą <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD8237.pdf>, pp. 1–28, 2012.
- [12] K. B. Flash and K. B. Sram, “STM32F373xx Reference Manual,” *[interaktyvus] [žiūrėta 2017-10-15]*. Prieiga per internetą [http://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/reference\\_manual/fa/06/c7/15/3b/2a/4c/f1/DM00041563.pdf/files/DM00041563.pdf/jcrcontent/translations/en.DM00041563.pdf](http://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/reference_manual/fa/06/c7/15/3b/2a/4c/f1/DM00041563.pdf/files/DM00041563.pdf/jcrcontent/translations/en.DM00041563.pdf), no. June, 2016.
- [13] S. Sdadc, “Getting started with STM32F37x/38x SDADC (Sigma-Delta ADC),” *[interaktyvus] [žiūrėta 2017-10-20]*. Prieiga per internetą [http://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/application\\_note/d9/90/d7/70/7c/ff/45/6d/DM00070480.pdf/files/DM00070480.pdf/jcrcontent/translations/en.DM00070480.pdf](http://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/application_note/d9/90/d7/70/7c/ff/45/6d/DM00070480.pdf/files/DM00070480.pdf/jcrcontent/translations/en.DM00070480.pdf), no. December, pp. 1–28, 2012.
- [14] “Temperature humidity chamber,” *[interaktyvus] [žiūrėta 2017-01-24]*. Prieiga per internetą <http://http://www.gdmypt.com/>.
- [15] Pico Technology, “Data logger,” *[interaktyvus] [žiūrėta 2018-04-20]*. Prieiga per internetą <https://www.picotech.com/products/data-logger>.

## PRIEDAI

### Priedas 1. Pagrindinė mikrovaldiklio programa

```
void main(void)
{
    /*main variables*/
    int8_t error_code=0 RCC_ClocksTypeDef RCC_Clocks;
    /* SysTick end of count event each 1ms */
    RCC_GetClocksFreq(&RCC_Clocks);
    SysTick_Config(RCC_Clocks.HCLK_Frequency / 1000);

    GPIO_init();
    USART2_Configuration();
    InitializeTimer(PWM_PERIOD, PWM_PERIOD_5V, PWM_PERIOD_3V6);
    InitializePWMChannel();
    ADC_init();
    DMA_initSDADC();
    targetVoltagePWM = sensor_init();

    //nuskaitymas is flash
    temp = (uint32_t*)(pol_ADRESS);
    offset_poliarumas = *(uint8_t *)temp;
    temp = (uint32_t*)(ID_ADRESS);
    ID_number = *(uint8_t *)temp;
    temp = (uint32_t*)(COEFF_ADRESS);
    Newton_koef = *(float *)temp;
    temp = (uint32_t*)(Tare_ADRESS);
    zeroForce_mV = *(float *)temp;

    /* Test DMA1 TC flag */
    while(DMA_GetFlagStatus(DMA1_FLAG_TC1) == RESET);
    /* Clear DMA TC flag */
    DMA_ClearFlag(DMA1_FLAG_TC1);

    /* SDADC1 */
    if(SDADC1_Config() != 0)
    { while(1); /* Forever loop */
    }
    /* SDADC3 */
    else if(SDADC3_Config() != 0)
    { while(1); /* Forever loop */
    }
    else
    {
        while (1)
        {

    /* KALIBRAVIMAS */
        if (flag_calibruoti==1){
            calibravimo_rezult=offset_calib();//visi output daugiau nei 50decimal yra klaidos
            targetVoltagePWM = sensor_init();
            //nuskaitymas is flash
            temp = (uint32_t*)(pol_ADRESS);
            offset_poliarumas = *(uint8_t *)temp;
            flag_calibruoti=0;
        }
        if (flag_tare==1){
            zeroForce_mV=SetTARE_and_set_Flash();
            flag_tare=0;
        }
        if (flag_koef==1){
            WriteValuesFLASH(targetVoltagePWM, offset_poliarumas, zeroForce_mV, naujas_Newton_koef);
            Newton_koef=naujas_Newton_koef;
            flag_koef=0;
        }
        if (flag_ID==1){
            WriteIDnumberFlash(new_ID);
            ID_number=new_ID;
        }
    }
    }
}
```

```

    flag_ID=0;
}
/* ALL ADC AND SDADC MEASUREMENTS */
measureALL();
// Thermo_targetVpwm=Vrefpwm_thermo( Tempe, targetVoltagePWM);
Thermo_targetVpwm=targetVoltagePWM;

/* Feedback control triggered by Tim4*/
if ( flag_TIM4==1){
    /*Calculate PWM new DUTY*/
    if ( ((AVG_VrefMv-Thermo_targetVpwm)>0.5) || ((AVG_VrefMv-Thermo_targetVpwm)<-0.5)){
        DUTY=PI_controller(AVG_VrefMv,Thermo_targetVpwm,0.2,0.8); //0.2,2 3,10 30,0.2 0.6,0.1 10,20 3,10
        flag_ar_histereze=0;
    }
    else{
        if(nauja_AVG_Vref==1){ //skaiciavimai atliekami tik po naujos suvidrukintos reikšmes
            DUTY=histereze( AVG_VrefMv,Thermo_targetVpwm, DUTY);
            nauja_AVG_Vref=0;
        }
        flag_ar_histereze=1;
    }
    DUTY_5V = (uint16_t)PI_con_5V(Vdd5V, Vdd5V_target, 10,10);
    DUTY_3V6=(uint16_t)PI_con_3V6(Vcc_calculated, Vcc_3v6_target, 5,10); //(1)3580, 5,3
    /*Pakeicia PWM DUTY*/
    ChangePWM_duty( PWM_PERIOD - (uint16_t)DUTY );
    ChangePWM_5V_duty(DUTY_5V); //cia reikia invertuoti su nauju 5V LDO
    ChangePWM_3v6_duty(PWM_PERIOD_3V6- DUTY_3V6);
    flag_TIM4=0;
}
}
/* Convert to Newton */
Newton = get_Newton( offset_poliarumas, AVG_VsensorMv, zeroForce_mV, Newton_koef, Tempe);

/* Error detection*/
error_code=error_detection();
// errorDebug=error_code;
//----- LIN pradzia -----

if(LIN_header_received){ // slave received new command from master -> respond to message
//NAUJAS REIKSMES SUDEDU I MASYVA TIK KAI GAUNU KOMANDA IS LIN
Newton_skirtumas=Newton-Prior_Newton;
LIN_TX_data[0]=(Newton & 0x00FF); //lower byte 1
LIN_TX_data[1]=(Newton >> 8)& 0x00FF; //uper byte 1
LIN_TX_data[2]=(Prior_Newton & 0x00FF);
LIN_TX_data[3]=(Prior_Newton >> 8)& 0x00FF; //uper byte 2
LIN_TX_data[4]=(Newton_skirtumas & 0x00FF);
LIN_TX_data[5]=(Newton_skirtumas >> 8)& 0x00FF; //uper byte 3
LIN_TX_data[6]=(uint8_t)Tempe;
LIN_TX_data[7]=counter;
Prior_Newton=Newton;
LIN_header_received = 0; // clear flag
Parse_value_switch = 0; // clear value
switch(LIN_identifier){
// Device will be publisher:
    case(SENSOR_INFO): // send sensor info
        //sukrauti i masyva ir ...
        LIN_start_transmission(LIN_TX_data, 8);
        counter=counter+1;
        break;
    case(SENSOR_calibration): //sensor calibration
        //pradeti kalibravimo mechanizma
        calibravimo_rezult=offset_calib(); //visi output daugiau nei 50decimal yra klaidos
        targetVoltagePWM = sensor_init();
        //nuskaitymas is flash pakeistos reikšmes
        temp = (uint32_t*)(pol_ADDRESS);
        offset_poliarumas = *(uint8_t *)temp;
        zeroForce_mV=SetTARE_and_set_Flash(); //taruoti butina po offset nuskaitymo
        break;
    case(SENSOR_TARE): //sensor taravimas
        zeroForce_mV=SetTARE_and_set_Flash();
}
}

```

```

        break;
// Device will be subscriber:
    case(SENSOR_receive_OFFSET): // sensor is receiving offset control value
        LIN_slave_is_subscriber = 1;
        Parse_value_switch = SENSOR_receive_OFFSET;
        break;
    case(SENSOR_receive_SENSITIVITY): // sensor is receiving sensitivity control value
        LIN_slave_is_subscriber = 1;
        Parse_value_switch = SENSOR_receive_SENSITIVITY;
        break;
// Device received command which is not valid
    default:
        break;
}
}

// LIN slave is subscriber:
if(LIN_response_received){
    LIN_response_received=0;
    switch(Parse_value_switch){
        case(SENSOR_receive_OFFSET):
            break;
        case(SENSOR_receive_SENSITIVITY):
            // naujas_Newton_koef i sita sudet nauja reiksme;
            naujas_Newton_koef = Hex_to_float(LIN_RX_received_buffer, 1);
            WriteValuesFLASH(targetVoltagePWM, offset_poliarumas, zeroForce_mV, naujas_Newton_koef);
            Newton_koef=naujas_Newton_koef;
            break;

        default: //error occured
            break;
    }
    memset(LIN_RX_received_buffer, 0, 9); // clear buffer
}
}
//----- LIN pabaiga
} //end of while loop
} //end of else
} // end of main
int8_t error_detection()
{
    int8_t error_code=0;
    /* Is 5V not stable ? */
    if ( ((Vdd5V_AVG>Vdd5V_target+5) || (Vdd5V_AVG<Vdd5V_target-5)) && (
(DUTY_5V==PWM_PERIOD_5V)||(DUTY_5V==0) ) ){
        TIM5_switch(1); // Ijungia Timer5, ir jeigu 5V po TIM5 vis dar blogas tai error bus detektuotas
        if (counter_TIM5==1)
            error_code=11; //BAD 5V supply
    }
    /* Is 3,6V not stable ? */
    if ( ((AVG_Vcc_calculated>Vcc_3v6_target+5) || (AVG_Vcc_calculated<Vcc_3v6_target-5)) && (
(DUTY_3V6==PWM_PERIOD_3V6)||(DUTY_3V6==0) ) ){
        TIM5_switch(1); // Ijungia Timer5, ir jeigu 5V po TIM5 vis dar blogas tai error bus detektuotas
        if (counter_TIM5==1)
            error_code=12; //BAD 3V6 supply
    }
    /* Is Vref stable ? */
    if ( ((AVG_VrefMv>Thermo_targetVpwm+5) || (AVG_VrefMv<Thermo_targetVpwm-5)) && (
(DUTY==PWM_PERIOD)||(DUTY==0) ) ){
        TIM5_switch(1); // Ijungia Timer5, ir jeigu 5V po TIM5 vis dar blogas tai error bus detektuotas
        if (counter_TIM5==1)
            error_code=13; //BAD Vref control
    }
    /* Is temperature alright ? */
    if ((Tempe>100) || (Tempe<-40)) {
        error_code=14; //BAD Temperature
    }
    return error_code;
}
}

```

## Priedas 2. Sukurta LIN protokolo komunikacijos vartotojo sąsaja

