



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

Įterptinių sistemų vartojamos galios analizatoriaus sukūrimas ir tyrimas

Baigiamasis magistro projektas

Simonas Giris

Projekto autorius

prof. Dangirutis Navikas

Vadovas

Kaunas, 2019



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

Įterptinių sistemų vartojamos galios analizatoriaus sukūrimas ir tyrimas

Baigiamasis magistro projektas

Elektronikos inžinerija (6211EX012)

Simonas Girnis

Projekto autorius

prof. Dangirutis Navikas

Vadovas

prof. Žilvinas Nakutis

Recenzentas

Kaunas, 2019



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

Simonas Girnis

Įterptinių sistemų vartojamos galios analizatoriaus sukūrimas ir tyrimas

Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad mano, Simono Girnio, baigiamasis projektas tema „Įterptinių sistemų vartojamos galios analizatoriaus sukūrimas ir tyrimas“ yra parašytas visiškai savarankiškai ir 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)

Girnis, Simonas. Įterptinių sistemų vartojamos galios analizatoriaus sukūrimas ir tyrimas. Magistro baigiamasis projektas / vadovas prof. Dangirutis Navikas; Kauno technologijos universitetas, Elektros ir elektronikos fakultetas.

Studijų kryptis ir sritis (studijų krypčių grupė): elektronikos inžinerija, inžinerijos mokslai.

Reikšminiai žodžiai: matavimo sistema, galios matavimas, srovės matavimas

Kaunas, 2019. 50 p.

Santrauka

Darbo tikslas – suprojektuoti ir iširti galios matavimo prietaisą, skirtą įterptinių sistemų analizei. Darbe nagrinėjami srovės ir įtampos matavimo metodai bei panašios analogiškos matavimo sistemos. Sukurta sistemos struktūra bei matavimo metodika, pagamintas prototipas. Sistema sudaryta iš vieno įtampos ir vieno srovės matavimo kanalų. Srovei matuoti naudojami šunto bei grįžtamojo ryšio ampermetro metodai. Matavimo diapazonai: $\pm 5,5$ V ir ± 600 mA. Atlikti atskirų sistemos dalių tyrimai ir charakteristikų matavimai. Įrenginys testuotas su dinamine apkrova, matavimo rezultatai palyginti su osciloskopu atliktais matavimais.

Girnis, Simonas. Embedded systems power analyzer development and research. Master's Final Degree Project / supervisor prof. Dangirutis Navikas; Faculty of Electrical and Electronics Engineering, Kaunas University of Technology.

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

Keywords: measuring system, power measurement, embedded, current measurement

Kaunas, 2019. 50 pages.

Summary

The aim of this work is to design and research measurement device dedicated for embedded systems power analysis. Current and voltage measurement methods and similar measurement systems are analyzed in this paper. Developed system structure and measurement methodology as well as prototype was produced. The system consists of one voltage and one current measuring channels. Shunt and feedback ammeters are used in current measurement channel. Measuring ranges: $\pm 5,5$ V and ± 600 mA. Individual system components research and characteristics measurements were performed. System has been tested with dynamic load, measurement results compared with measurements made with oscilloscope.

Turinys

Paveikslų sąrašas	7
Lentelių sąrašas	9
Santrumpų ir terminų sąrašas	10
Įvadas.....	11
1. Literatūros analizė.....	12
1.1. Mažų galių matavimas.....	12
1.2. Mažų įtampų matavimas.....	12
1.3. Mažų srovių matavimas.....	13
1.3.1. Srovės zondo metodas	13
1.3.2. Ampermetras su šuntu	14
1.3.3. Grįžtamojo ryšio ampermetras	15
1.3.4. Srovės matavimo metodų palyginimas.....	16
1.3.5. Mažų srovių matavimo paklaidų šaltiniai.....	17
1.4. Esamų matavimo sistemų apžvalga.....	18
1.4.1. Profesionali laboratorinė matavimo įranga	18
1.4.2. Bevielių jutiklių galios analizatorius „Nemo“	19
1.4.3. Galios analizatorius – kulonmetras „iCount“	20
1.4.4. Sensorių galios analizės ir derinimo įrenginys „Energy Bucket“	21
1.5. Apibendrinimas	22
2. Matavimo sistemos projektavimas.....	23
2.1. Matavimo metodika.....	23
2.2. Sistemos struktūra	23
2.3. Keitiklio analogas-kodas parinkimas	24
2.4. Įtampos matavimo dalis.....	26
2.5. Srovės matavimo dalis.....	27
2.5.1. Didelių srovių diapazonas	28
2.5.2. Mažų srovių diapazonas	29
2.5.3. Srovės matavimo diapazonų perjungimas	29
3. Sistemos tyrimai.....	31
3.1. Įtampos matavimo kanalo dažninių charakteristikų tyrimas	31
3.2. Didelių srovių diapazono tyrimas.....	32
3.3. Mažų srovių diapazono tyrimas.....	33
3.4. Srovės matavimo diapazonų perjungimo tyrimas	35
3.5. Galios analizatoriaus efektyvių bitų skaičiaus tyrimas	36
3.6. Galios analizatoriaus tyrimas su programuojama apkrova.....	38
Išvados	48
Literatūros sąrašas	49

Paveikslų sąrašas

1.1 pav. Daiktų interneto (IoT) įrenginio vartojamos srovės kitimas laike [3]	12
1.2 pav. Operacinio stiprintuvo jungimas įtampos stiprinimui [4].....	13
1.3 pav. Srovės transformatoriaus matavimo metodas [8]	14
1.4 pav. Srovės zondas su Holo jutikliu [8].....	14
1.5 pav. Srovės matavimas su šunto rezistoriumi [4]	15
1.6 pav. Srovės matavimas grįžtamojo ryšio ampermetru [4].....	15
1.7 pav. Grįžtamojo ryšio ampermetras su keičiamu stiprinimo koeficientu [4]	16
1.8 pav. Grįžtamojo ryšio grandies modifikacija, skirta kompensuoti C_F [4]	16
1.9 pav. „Nemo“ sistemos architektūra [18].....	19
1.10 pav. Skirtingų DC/DC keitiklių darbo dažnio priklausomybė nuo išėjimo srovės [19].....	21
1.11 pav. „Energy Bucket“ matavimo schema [20]	22
2.1 pav. Apibendrinta matavimo sistemos struktūra	24
2.2 pav. Apibendrinta ADS1274 struktūra [21]	25
2.3 pav. Į ADS1274 integruoto ribotos impulsinės reakcijos (RIR) filtro ADCh [21]	25
2.4 pav. Įtampos matavimo kanalo įėjimo grandies schema	26
2.5 pav. Srovės matavimo kanalų perjungimo supaprastinta schema	28
2.6 pav. Didelių srovių matavimo įėjimo grandies schema.....	28
2.7 pav. Mažų srovių matavimo įėjimo grandies schema	29
2.8 pav. Matavimo diapazonų perjungimo schema	30
2.9 pav. Matavimo diapazonų perjungimo veikimo demonstravimas.....	30
3.1 pav. Matavimo sistemos naudotos tyrime prototipas	31
3.2 pav. Įtampos kanalo ADCh (viršuje)ir FDCh charakteristikos, gautos simuliacijos metu.....	32
3.3 pav. Įtampos kanalo ADCh (viršuje)ir FDCh charakteristikos, gautos matavimo metu.....	32
3.4 pav. Didelių srovių matavimo schemas simuliacijos LTSpice aplinkoje.....	33
3.5 pav. Didelių srovių matavimo kanalo ADCh ir FDCh	33
3.6 pav. Didelių srovių matavimo kanalo triukšmų analizė	33
3.7 pav. Mažų srovių matavimo kanalo schema LTSpice aplinkoje.....	34
3.8 pav. Didelių srovių matavimo kanalo triukšmų analizė	34
3.9 pav. Mažų srovių matavimo kanalo triukšmų analizė	34
3.10 pav. Srovės matavimo kanalų persijungimo veikimas	35
3.11 pav. Įtampos kritimas srovės intervalo perjungimo metu	35
3.12 pav. ENOB priklausomybė nuo diskretizacijos dažnio [27]	36
3.13 pav. ENOB priklausomybė nuo diskretizacijos dažnio.....	37
3.14 pav. ENOB priklausomybė nuo f_s pritaikius slenkančio vidurkio filtrą	37

3.15 pav. Programuojamos apkrovos supaprastinta struktūra	38
3.16 pav. Dinaminės apkrovos rezistorių valdymo signalai	39
3.17 pav. Testiniai galios kitimo profiliai – 1-as ir 2-as bandymai	39
3.18 pav. Testiniai galios kitimo profiliai – 3-as ir 4-as bandymai	40
3.19 pav. 1-ojo testinio galios kitimo profilio matavimo rezultatai. Analizatoriaus $f_s = 128$ kSps, osciloskopo $f_s = 5$ MSps	40
3.20 pav. 2-ojo testinio galios kitimo profilio matavimo rezultatai. Analizatoriaus $f_s = 128$ kSps, osciloskopo $f_s = 1$ MSps	41
3.21 pav. 3-ojo testinio galios kitimo profilio matavimo rezultatai. Analizatoriaus $f_s = 128$ kSps, osciloskopo $f_s = 1$ MSps	41
3.22 pav. 4-ojo testinio galios kitimo profilio matavimo rezultatai. Analizatoriaus $f_s = 128$ kSps, osciloskopo $f_s = 1$ MSps	42
3.23 pav. Slenkančio vidurkio filtro panaudojimas 1-ojo signalo filtravimui.....	43
3.24 pav. Slenkančio vidurkio filtro panaudojimas 2-ojo signalo filtravimui.....	43
3.25 pav. Slenkančio vidurkio filtro panaudojimas 3-ojo signalo filtravimui.....	44
3.26 pav. Slenkančio vidurkio filtro panaudojimas 4-ojo signalo filtravimui.....	44

Lentelių sąrašas

1 lentelė. Srovės matavimo metodų palyginimas.....	17
2 lentelė. Dinaminės apkrovos sukuriamų srovių lentelė.....	38
3 lentelė. 1-ojo galios kitimo profilio energijos intervaluose matuojant analizatoriumi	45
4 lentelė. 2-ojo galios kitimo profilio energijos intervaluose matuojant analizatoriumi	45
5 lentelė. 3-ojo galios kitimo profilio energijos intervaluose matuojant analizatoriumi	45
6 lentelė. 4-ojo galios kitimo profilio energijos intervaluose matuojant analizatoriumi	45
7 lentelė. 1-ojo galios kitimo profilio energijos intervaluose matuojant osciloskopu	46
8 lentelė. 2-ojo galios kitimo profilio energijos intervaluose matuojant osciloskopu	46
9 lentelė. 3-ojo galios kitimo profilio energijos intervaluose matuojant osciloskopu	46
10 lentelė. 4-ojo galios kitimo profilio energijos intervaluose matuojant osciloskopu	46

Santrumpų ir terminų sąrašas

Santrumpos:

EHS (angl. *energy harvesting system*) – aplinkos energijos kaupimo sistema

MCU (angl. *microcontroller*) – mikrovaldiklis

ADC (angl. *analog to digital converter*) – keitiklis analogas-kodas

ENOB (angl. *effective number of bits*) – efektyvių bitų skaičius

DUT (angl. *device under test*) – testuojamas įrenginys

PC (angl. *personal computer*) – asmeninis kompiuteris

LED (angl. *light emitting diode*) – šviesos diodas

PFM (angl. *pulse frequency modulator*) – impulso dažnio moduliatorius

SMU (angl. *source measure unit*) – matavimo prietaisas su dedikuotu maitinimo šaltiniu

SNR (angl. *signal to noise ratio*) – santykis signalas-triukšmas

PCB (angl. *printed circuit board*) – spausdintinio montažo plokštė

MOSFET (angl. *metal oxide semiconductor field effect transistor*) – metalo, oksido ir puslaidininkio lauko tranzistorius

IoT (angl. *Internet of Things*) – daiktų internetas

GPIO (angl. *general purpose input/output*) – bendros paskirties įėjimas/išėjimas

OS – operacinis stiprintuvas

DC (angl. *direct current*) – nuolatinė srovė

AC (angl. *alternating current*) – kintamoji srovė

TIA (angl. *transimpedance amplifier*) – transimpedanso stiprintuvas

DSP (angl. *digital signal processor*) – skaitmeninis signalų procesorius

RAM (angl. *random access memory*) – laisvosios prieigos atmintis

FPGA (angl. *field-programmable gate array*) – programuojamas loginis įrenginys

Ivadas

Šiandien plačiai taikomos įvairios elektroninės įterptinės sistemos, skirtos aplinkos parametrų stebėjimui, energijos apskaitai, medicinos tikslams, įrenginių valdymui ir t.t. Dažnai sistemos būna bevielės ir maitinamos iš aplinkos energijos kaupimo sistemų (EHS), baterijų, akumuliatorių. Nuo sunaudojamos energijos kiekio priklauso įrenginio autonomiško veikimo trukmė, todėl galia yra vienas iš pagrindinių parametrų į kurį reikėtų labiausiai atkreipti dėmesį sistemos projektavimo metu. Energijos sąnaudas galima sumažinti dviem būdais [1]:

1. Tobulinant elektroninės sistemos techninę dalį (angl. *hardware*) ir jos valdymą (pvz. atjungti mikrovaldiklio (MCU) taktinio dažnio generatorių nuo tuo metu nenaudojamų periferinių įrenginių).
2. Atliekant optimizacijas programinėje įrangoje (angl. *software*) (pvz. parenkamas efektyvesnis budėjimo režimas, kitas duomenų perdavimo protokolas ar naudojamas adaptyvus būdas duomenims iš sensorių surinkti).

Dėl abiejų minėtų priežasčių įterptinių sistemų kūrėjams naudinga turėti įrenginį – galios analizatorių, leidžiantį įvertinti, kaip vieni ar kiti pakeitimai aparatinėje bei programinėje įrangoje įtakoja energijos sąnaudas.

Pagrindiniai įterptinių sistemų energijos vartotojai dažniausiai yra mikrovaldikliai. Šiuo metu rinkoje esantys mažiausios galios MCU efektyviausiuose budėjimo režimuose (angl. *sleep modes*) vartoja dešimčių - šimtų nanoamperų (nA) eilės srovę [2], tuo tarpu aktyviame režime visos sistemos vartojama srovė gali išaugti iki dešimčių – šimtų miliamperų (mA). Esant tokiam dideliame srovės kitimo diapazonui darosi sudėtinga atlikti tikslų srovės matavimą dinamiame režime naudojant tipinius matavimo metodus. Pavyzdžiui, priimant, kad maksimali sistemos vartojama srovės sieks 20 mA ir norint matuoti su 10 nA skyra reikia keitiklio analogas-kodas (ADC) su 21 efektyviu bitu (ENOB).

Šio darbo tikslas – suprojektuoti ir iširti galios matavimo prietaisą, skirtą įterptinių sistemų vartojamos galios analizei.

Darbo uždaviniai:

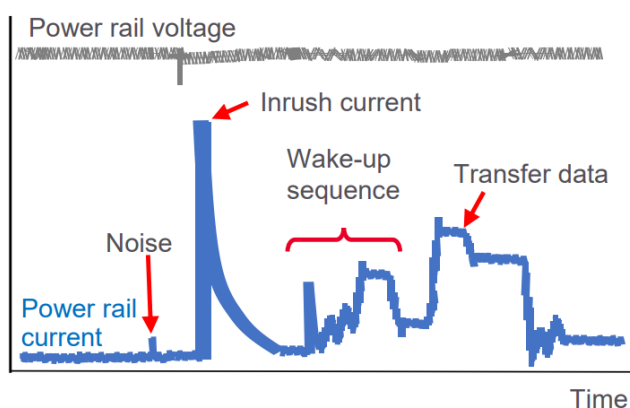
1. atlikti literatūros analizę, apžvelgti matavimo būdus ir kitus panašius įrenginius;
2. sudaryti matavimo sistemos struktūrą, parinkti matavimo metodiką;
3. sudaryti sistemos schemą ir pagaminti prototipą;
4. atlikti sistemos tyrimus.

1. Literatūros analizė

Šioje dalyje nagrinėjami įterptinių sistemų galios matavimo metodai ir mažų nuolatinių srovių bei įtampų matavimo specifika. Apžvelgiami kitų autorių sukurti matavimo prietaisai ir jų charakteristikos.

1.1. Mažų galių matavimas

Dažniausiai nuolatine srove maitinamo įrenginio vartojamos galios matavimas yra nesudėtingas uždavinys, kuris nesunkiai atliekamas skaitmeniniu multimetru. Tačiau, mažos galios įterptinėse sistemose susiduriama su dideliu srovės kitimo dinaminio diapazonu, plačia dažnių juosta, todėl tiksliam matavimui atlikti paprasto multimetrom nebepakanka. Tai matyti 1.1 pav. pateiktame pavyzdiniame srovės kitimo grafike.



1.1 pav. Daiktų interneto (IoT) įrenginio vartojamos srovės kitimas laike [3]

Bendras energijos kiekis, suvartotas nagrinėjamo periodo metu išreiškiamas taip:

$$E = \int_{T_1}^{T_2} u(t) \cdot i(t) dt \quad (1.1)$$

Čia $T_2 - T_1$ - nagrinėjamas periodas

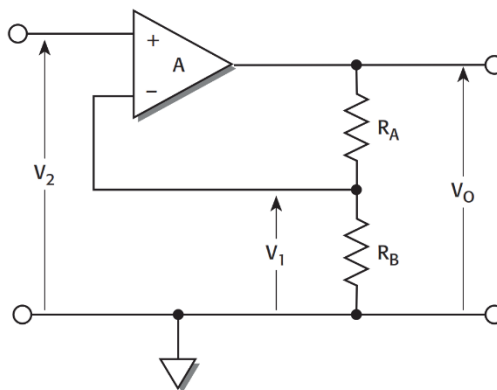
Geras matavimo prietaisas turėtų pasižymėti tokiais parametrais:

- didelis dinaminis diapazonas, kuris leistų tiksliai išmatuoti tiek mažas, tiek ir dideles sroves;
- plati dažnių juosta tiksliam pereinamųjų procesų stebėjimui;
- maži savieji triukšmai;
- galimybė stebėti testuojamo įrenginio (DUT) bendros paskirties įėjimų/išėjimų (GPIO) būseną, kad matavimą būtų galima susieti su nagrinėjamo laiko momentu vykdomo programinio kodo dalimi.

1.2. Mažų įtampų matavimas

Įterptinių sistemų maitinimo įtampa įprastai būna 1,2-5 V ribose, ji kinta nedideliame intervale ir palyginus lėtai. Todėl tiksliai išmatuoti maitinimo įtampą nėra sudėtinga. Įtampos matavimo

prietaisų įėjimo laipsniuose signalo normavimui dažniausiai naudojami operaciniai stiprintuvai (OS). Priklausomai nuo jungimo, signalą galima tiek stiprinti, tiek ir slopinti, t.y. normuoti, pritaikant prie turimo ADC įėjimo įtampos diapazono. 1.2 pav. pavaizduotas operacinis stiprintuvas įtampos stiprinimui.



1.2 pav. Operacinio stiprintuvo jungimas įtampos stiprinimui [4]

Išėjimo įtampa apskaičiuojama taip:

$$V_0 = V_2 \left(1 + \frac{R_A}{R_B} \right) \quad (1.2)$$

Kaip matyti iš formulės, išėjimo priklauso nuo įėjimo įtampos bei rezistoriais R_A ir R_B parinkto stiprinimo koeficiento. Dėl didelės OS įėjimo varžos bei mažos priešįtampio srovės (angl. *bias current*) operacinis stiprintuvas itin mažai apkrauna matuojamą grandinę ir nesukelia reikšmingo įtampos kritimo. Dauguma elektrometrų turi galimybę R_A užtrumpinti, o R_B atjungti, tokiu būdu gaunant vienetinį stiprinimą (operacinis stiprintuvas dirba kaip kartotuvai) [4].

1.3. Mažų srovių matavimas

Ankstesniuose skyriuose minėta, kad dėl didelio dinaminio diapazono, mažų srovių matavimas kelia daugiau iššūkių nei įtampos matavimas. Galima išskirti tris pagrindinius mažų srovių matavimo metodus, kurie naudojami dažniausiai [5], [6]:

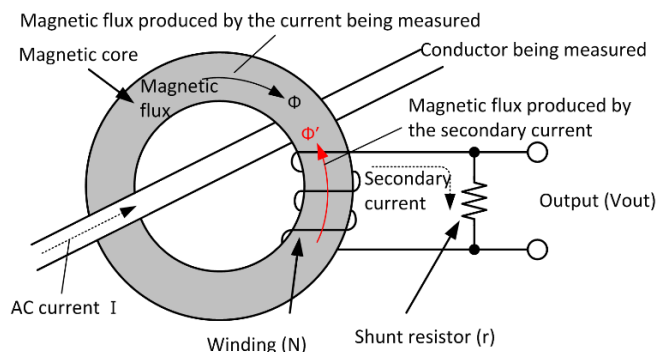
- srovės zondo (angl. *current probe*) metodas;
- ampermetras su šuntu (angl. *shunt ammeter*);
- grįžtamojo ryšio ampermetras (angl. *feedback ammeter*).

Apžvelgsime kiekvieną iš jų plačiau.

1.3.1. Srovės zondo metodas

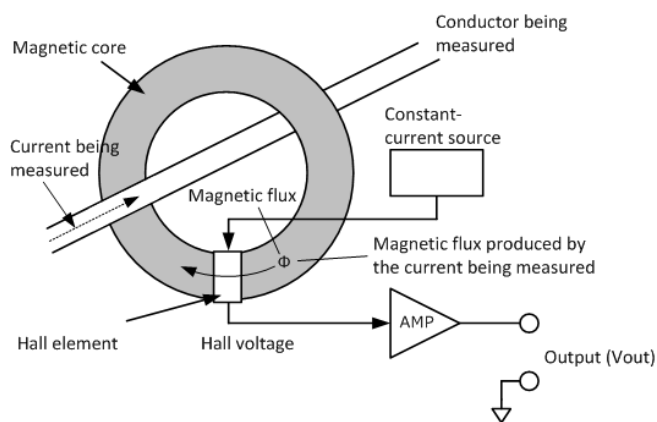
Srovės zondas tai neinvazinis, bekontaktis matavimo metodas, pagrįstas magnetinio lauko, kuriame aplink laidą kuriuo teka srovė, matavimu. Tinkamas mA – šimtų A eilės srovėms matuoti. Yra du populiariausi matavimo principai, kurie naudojami srovės zonde [7].

Vienas iš jų yra srovės transformatoriaus metodas (1.3 pav.): uždaroje šerdyje patalpintas laidas, kuriuo teka kintamoji elektros srovė (AC), kuria magnetinį srautą, indukuojantį srovę antrinėje transformatoriaus apvijoje. Ši srovė, tekėdama per šunto varžą, sukuria įtampos kritimą, proporcingą laidu tekančiai elektros srovei, kuri galima stebėti osciloskopu.



1.3 pav. Srovės transformatoriaus matavimo metodas [8]

Norint matuoti nuolatinės (DC) arba žemo dažnio AC srovės, reikalinga kitokia srovės zondo konstrukcija su integruotu Holo jutikliu [9] (1.4 pav). Matuojamo laidininko srovės sukurto magnetinio srauto linijos kerta šerdyje įterptą Holo jutiklį, kuris dėl Holo efekto sukuria Holo įtampą, proporcingą tekančios srovės stipriui. Tokie zondai tinkami matavimams iki kelių kHz.



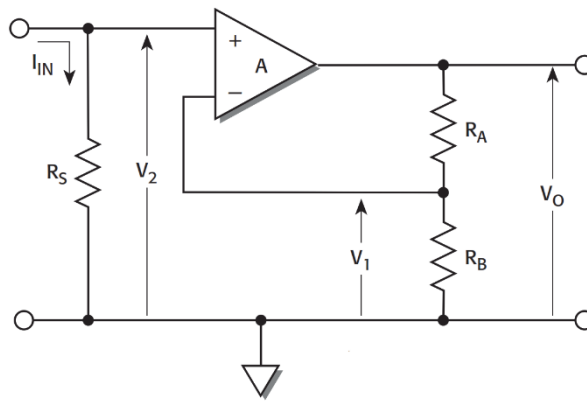
1.4 pav. Srovės zondas su Holo jutikliu [8]

Egzistuoja ir trečias zondų tipas – kombinuotas, kuriame integruotas tiek Holo jutiklis, tiek ir srovės transformatorius. Tokie zondai leidžia atlikti matavimus dažnių juostoje iki 150 MHz [10].

1.3.2. Ampermetras su šuntu

Šunto metodas – populiariausias būdas tiesioginiam srovės matavimui, dažniausiai naudojamas multimetruose bei kai kuriuose srovės matavimo zonuose. Tinkamas $\mu\text{A} - \text{A}$ eilės nuolatinei ir kintamai srovei matuoti dažnių juostoje iki kelių GHz. 1.5 pav. pavaizduota srovės matavimo su šunto varža schema. Išėjimo įtampa išreiškiama taip:

$$V_o = I_{IN} R_S \left(1 + \frac{R_A}{R_B} \right) \quad (1.3)$$



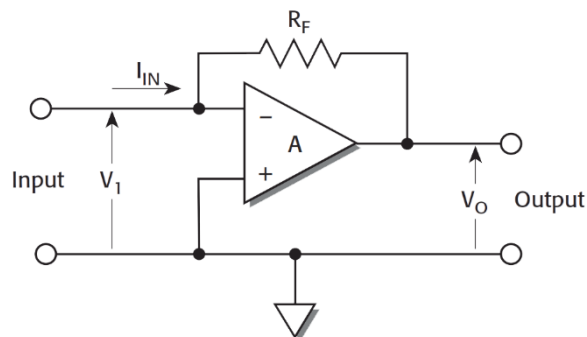
1.5 pav. Srovės matavimas su šunto rezistoriumi [4]

Svarbu tinkamai parinkti šunto varžą, nes nuo jos labai priklauso ne tik matavimo tikslumas, bet ir įtaka matuojamai grandinei. Kuo varža didesnė, tuo didesnis įtampos kritimas ant varžos (angl. *burden voltage*), leidžiantis pasiekti didesnę matavimo tikslumą ir geresnę santykį signalas-triukšmas (SNR). Tačiau įprastai šunto varža R_S parenkama kuo mažesnė dėl šių priežasčių [11]:

- mažos varžos rezistoriai gaminami tikslesni, dėl mažesnio įkaitimo ($P = I^2 \cdot R$) jų varža mažiau kinta matavimo metu;
- mažesnė varža sumažina laiko pastoviąją τ , todėl gaunama platesnė dažnių juosta;
- mažesnė varža sudaro mažesnę nepageidaujamą įtampos kritimą V_2 testuojamo įrenginio maitinimo grandinėje.

1.3.3. Grįžtamojo ryšio ampermetras

Mažą srovę galima išmatuoti ir dar vienu būdu – panaudojus grįžtamojo ryšio ampermetrą [12], [13]. Supaprastinta jo schema pateikta 1.6 pav.



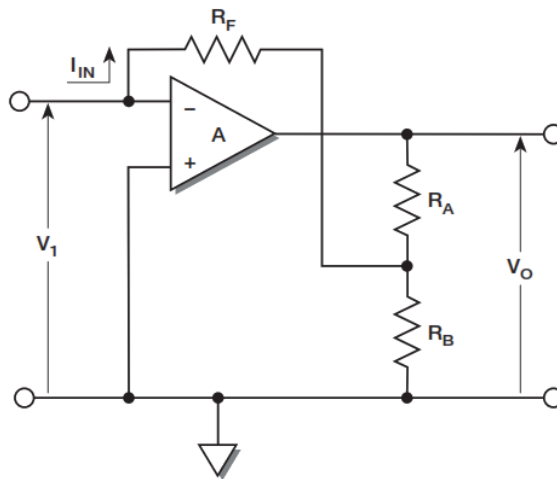
1.6 pav. Srovės matavimas grįžtamojo ryšio ampermetru [4]

Šiuo atveju įėjimo srovė teka grįžtamojo ryšio rezistoriumi R_F bei operaciniu stiprintuvu. Dėl didelio stiprinimo koeficiento susidarantis įtampos kritimas V_1 – minimalus (įprastai neviršija kelių mV). Išėjimo įtampa išreiškiama taip:

$$V_0 = -I_{IN} R_F \quad (1.4)$$

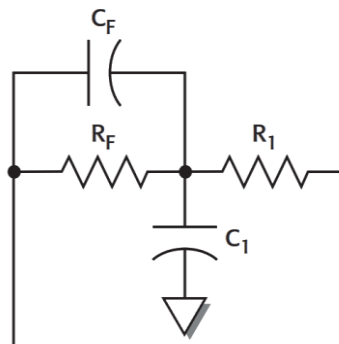
Jei matuojama srovė itin maža (pvz. pA eilės), galima sudaryti papildomą stiprinimą kaip pavaizduota 1.7 pav. Tuomet išėjimo įtampa:

$$V_0 = -I_{IN} R_F \left(1 + \frac{R_A}{R_B} \right) \quad (1.5)$$



1.7 pav. Grįžtamojo ryšio ampermetras su keičiamu stiprinimo koeficientu [4]

Projektuojant spausdintinio montažo plokštę (PCB) su grįžtamojo ryšio ampermetru stengiamasi mažinti parazitinę talpą C_F , šuntuojančią rezistorių R_F , nes parazitinė talpa didina laiko pastoviąją, dėl kurios ribojamas ampermetro dažnių juostos plotis [14]. Šią problemą galima išspręsti į grįžtamojo ryšio grandinę įterpus papildomus elementus R_1 ir C_1 bei suderinus grandinėlių laiko pastoviąsias (t.y. $R_F C_F = R_1 C_1$), kaip pavaizduota žemiau:



1.8 pav. Grįžtamojo ryšio grandies modifikacija, skirta kompensuoti C_F [4]

1.3.4. Srovės matavimo metodų palyginimas

Toliau esančioje lentelėje pateiktas visų trijų apžvelgtų srovės matavimo metodų palyginimas.

1 lentelė. Srovės matavimo metodų palyginimas

	Srovės zondas	Ampermetras su šuntu	Grįžtamojo ryšio ampermetras
Kokiai srovei tinkamas	AC arba AC/DC	AC ir DC	AC ir DC
Dažnių juostos plotis	Iki 150MHz	Nuo DC iki kelių GHz	Nuo DC iki dešimčių MHz
Optimalus matuojamos srovės dydis	mA – šimtai A	μA – keliolika A	pA – mA
Triukšmų dydis	Vidutinis	Mažas	Mažas
Grandinėje sukeliamas įtampos kritimas	Nėra (neinvazinis)	Vidutinis – didelis	Mažas
Kaina	Aukšta	Žema – Vidutinė	Žema – Vidutinė

Kaip matyti iš lentelės, itin mažų srovių matavimui tinkamiausias grįžtamojo ryšio ampermetras, tuo tarpu norint matuoti vidutinio dydžio sroves tinkamiausias pasirinkimas būtų ampermetras su šuntu.

1.3.5. Mažų srovių matavimo paklaidų šaltiniai

Mažos galios įterptinėse sistemose staigių maitinimo įtampos pokyčių dažniausiai nebūna, o be to maitinimo įtampa dažniausiai yra voltų eilės, todėl apžvelgiant galimas matavimo paklaidas dėmesį reiktų skirti mažų srovių matavimo specifikai. Srovės matavimuose kaip pagrindinius paklaidų šaltinius būtų galima išskirti pašalines sroves, triukšmą dėl testuojamo įrenginio impedanso, įtampos kritimą dėl ampermetro vidinės varžos, įėjimo laipsnio apsauginių komponentų sąlygotus triukšmus [4], [15]. Plačiau apžvelgsime kiekvieną iš jų.

Matavimo sistemos pašalinės srovės susisumuoja su matuojama srove, taip sukeldamos matavimo paklaidas. Pagrindinis pašalinių srovių šaltinis – operacinio stiprintuvo priešįtampos srovė (angl. *bias current*), tačiau, parinkus operacinį stiprintuvą su kelių pA priešįtampos srove bei matuojant ne mažesnes nei nA eilės sroves ši pašalinė srovė sudarys mažesnę nei 1% paklaidą.

Dėl triboelektrinio efekto naudojant standartinius kabelius gali būti sukurta iki 10 nA srovė, todėl nA srovių matavimuose rekomenduojami mažatriukšmiai kabeliai prijungimui prie DUT. Panašios eilės pašalinės srovės gali susidaryti ir dėl paviršių nešvarumų, drėgmės, litavimo pastų likučių ir pan.

Grįžtamojo ryšio ampermetro triukšmams turi įtaką ir DUT impedansas – mažėjant impedansui didėja ampermetro išėjimo įtampos triukšmas:

$$V_{OUT_noise} = V_{IN_noise} \left(1 + \frac{Z_F}{Z_S} \right) \quad (1.6)$$

Čia Z_F - ampermetro grįžtamojo ryšio impedansas, Z_S - DUT impedansas

Jei DUT impedansas mažas, problemą iš dalies galima spręsti nuosekliai į grandinę įjungus papildomą varžą DUT impedansui padidinti, tačiau reikia atsižvelgti į tai, kad nuosekli varža padidins įtampos kritimą bei apribos pralaidos dažnių juostą dėl išaugusios laiko pastoviosios τ . Idealaus ampermetro varža lygi 0, tačiau realiu atveju ji yra. Dėl šunto varžos gaunamas įtampos kritimas, kuris mažina DUT tekančią srovę, taip sudarant srovės matavimo paklaidą. Pavyzdžiui, DUT maitinimo įtampa $V_S = 0,7\text{ V}$; DUT tekanti srovė $I_S = 100\ \mu\text{A}$; DUT vidinė varža $R_S = 10\ \text{k}\Omega$; $I_{FS} = 200\ \mu\text{A}$ (matavimo prietaiso nagrinėjamo matavimo diapazono maksimali srovės vertė (angl. *full-scale current*)); įtampos kritimas ant šunto tekant I_{FS} dydžio srovei (angl. *burden voltage*): $V_B = 200\ \text{mV}$. Tuomet išmatuota srovė I_M bus lygi:

$$I_M = \frac{V_S - V_B \left(\frac{I_S}{I_{FS}} \right)}{R_S} = \frac{0,7\text{V} - 0,2\text{V} \left(\frac{100\ \mu\text{A}}{200\ \mu\text{A}} \right)}{10\ \text{k}\Omega} = 60\ \mu\text{A} \quad (1.7)$$

Kai iš tikrųjų grandine tekanti srovė lygi:

$$I_M = \frac{V_S}{R_S} = \frac{0,7\text{V}}{10\ \text{k}\Omega} = 70\ \mu\text{A} \quad (1.8)$$

Kaip matyti iš atliktų skaičiavimų, dėl didelio šunto įtampos kritimo gaunama 14 % matavimo paklaida. Tuo tarpu matavimui naudojant pikoampermetrą su integruotu grįžtamojo ryšio ampermetru, kurio $V_B = 200\ \mu\text{V}$ išmatuota srovė bus lygi $I_M = 69,99\ \mu\text{A}$ (matavimo paklaida šiuo atveju tėra 0,01 %). Šiam efektui minimizuoti visada reiktų rinktis mažiausią matavimo diapazoną, į kurį „telpa“ matuojamas dydis.

1.4. Esamų matavimo sistemų apžvalga

Rinkoje yra nemažai matavimo įrankių galios analizei atlikti, besiskiriančių tikslumu, funkcionalumu, matavimo metodais, duomenų perdavimo būdais, gabaritais ir kaina. Apžvalgoje pateikiami tiek profesionalūs galios analizės prietaisai, tiek ir pigesni, alternatyvūs įvairių autorių sukurti įrenginiai, palengvinantys mažos galios įterptinių sistemų kūrimo ir derinimo darbus.

1.4.1. Profesionali laboratorinė matavimo įranga

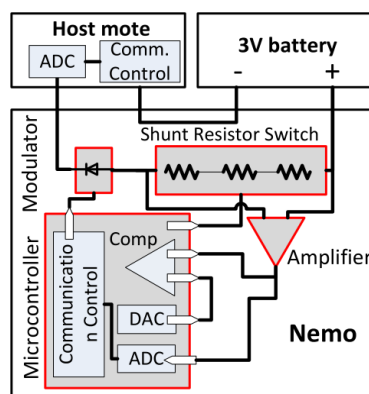
Profesionalūs laboratoriniai prietaisai įterptinių sistemų vartojamai galiai matuoti siūlo aukštą matavimo tikslumą, didelį diskretizacijos dažnį bei turi eilę kitų papildomų funkcijų. Tačiau dažniausiai šie įrenginiai yra didelių gabaritų ir brangūs, todėl nepatogūs naudoti bei ne visiems prieinami.

Keithley DMM7510 yra precizinis skaitmeninis multimetras, pasižymintis 1 MS/s matavimų dažniu, 1 pA ($\pm 0.06\%$) srovės ir 10 nV ($\pm 0.0014\%$) įtampos matavimo skyra, 27.5 mln. taškų atminties buferiu, turi integruotas matematinės funkcijas greitiems skaičiavimams atlikti. Multimetras turi tik vieną matavimo kanalą, todėl norint atlikti vartojamos galios, o ne tik srovės matavimą reikia bent dviejų tokių prietaisų. Prietaiso kaina apie \$4000 [16].

Gamintojas Keysight Technologies įrenginį N6705C pristato kaip nuolatinės srovės galios analizatorių. Matuoja iki 200 kS/s dažniu, įtampos matavimo skyra 50 μV ($\pm 0.025\%$), srovės – 8 nA ($\pm 0.025\%$). Vienas iš šio prietaiso privalumų yra modulinė technologija, leidžianti išplėsti įrenginio galimybes. Jame gali būti integruoti maitinimo šaltiniai, osciloskopas, duomenų surinkimo sistemos, matuokliai su dedikuotu maitinimo šaltiniu (SMU). Bazinė prietaiso kaina be modulių siekia apie 6000-7000 € [17].

1.4.2. Bevielių jutiklių galios analizatorius „Nemo“

Šaltinyje [18] tyrėjų pristatomas galios analizatorius yra specialiai skirtas bevielių jutiklių vartojamai galiai analizuoti. „Nemo“ maitinamas iš to paties šaltinio kaip ir testuojamas įrenginys (DUT), todėl kūrėjai didelį dėmesį skiria paties analizatoriaus energijos sąnaudoms. Dėl keturių nuosekliai sujungtų šunto rezistorių (kurie gali būti dinamiškai komutuojami, t.y. užtrumpinami, tranzistoriniais raktais priklausomai nuo grandine tekančios momentinės srovės), užtikrinamas didelis srovės matavimo diapazonas (2 μA – 200 mA) naudojant fiksuoto stiprinimo koeficiento priešstiprintuvį bei 12 bitų ADC keitiklį. Vidutinė matavimo paklaida siekia 1,34 %, maksimalus diskretizacijos dažnis – 8 kS/s. Kai parinkto šunto varža yra didelė, staigus srovės šuolis gali sukelti reikšmingą įtampos kritimą, kol pagal ADC matavimo duomenis nesumažinamas šunto dydis. Greitai reakcijai į srovės šuolius užtikrinti įrenginyje panaudotas komparatorius, kuris atsiradus staigiam srovės šuoliui generuoja pertrauktį MCU. 1.9 pav. pateikta „Nemo“ architektūra.



1.9 pav. „Nemo“ sistemos architektūra [18]

Pagal pirminę „Nemo“ paskirtį galios analizatorius neturi komunikacijos su asmeniniu kompiuteriu (PC), grafinio indikatorius ar kito duomenų išvedimo įtaiso. Duomenys perduodami tiesiogiai į DUT, kad įterptinė sistema pati galėtų stebėti savo energijos sąnaudas ir pagal tai parinkti optimaliausią darbo režimą. Kūrėjai „Nemo“ pristato kaip neinvazinę matavimo sistemą, nes komunikacijai su DUT nereikalingi jokie papildomi laidai. Duomenys perduodami naudojant naujovišką metodą – srovės (duomenims iš DUT perduoti į „Nemo“) ir įtampos (duomenims iš „Nemo“ perduoti į DUT) moduliaciją:

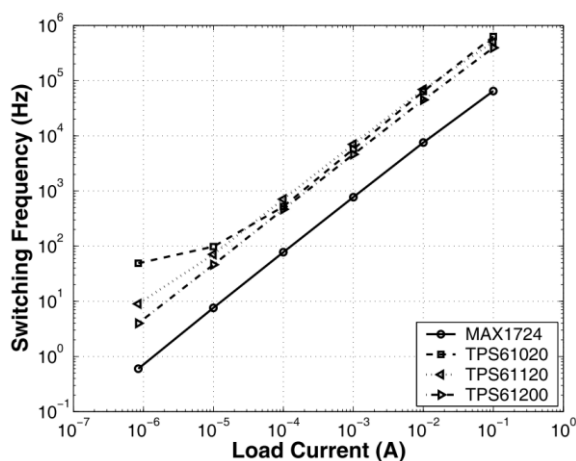
- **Įtampos moduliacija.** Bene visi šiuolaikiniai MCU turi galimybę matuoti savo paties maitinimo įtampą su vienu iš integruoto ADC kanalų. Analizatoriuje esančioje DUT maitinimo grandinėje (žr. 1.9 pav.) yra įterptas mažo įtampos kritimo Šotkio diodas, kurį įjungiant/atjungiant nuo grandinės gaunamas maitinimo įtampos pokytis – duomenų bitai. Anot autorių, tokių įtampos svyravimų įtaka DUT atliekamiems matavimams nedidelė: dėl MCU esančio vidinio ADC atraminės įtampos šaltinio ADC keitimo paklaida išauga tik 0,27 %.
- **Srovės moduliacija.** DUT būtų sunku moduluoti maitinimo įtampą, todėl komunikacijai iš DUT į „Nemo“ užtikrinti naudojama srovės moduliacija: įterptinė sistema įprastai turi įvairių elektrinių komponentų, jutiklių, šviesos diodų, kuriuos įjungiant/išjungiant keičiasi vartojama srovė. Galios analizatorius fiksuodamas šį vartojamos srovės svyravimą gali atkoduoti srove moduluotus duomenų bitus.

1.4.3. Galios analizatorius – kulonmetras „iCount“

Šaltinyje [19] pristatomas kitas naudojamos galios matavimo būdas, kuriuo naudojantis įterptinė sistema (DUT) gali pati analizuoti savo vartojamą galią. Pagrindiniai reikalavimai šio metodo realizacijai yra šie:

- sistemoje turi būti mikrovaldiklis su aparatiniu laikmačiu, gebančiu skaičiuoti išorinius impulsus;
- sistema turi būti maitinama iš DC/DC kurio išėjimo įtampai reguliuoti naudojamas impulso dažnio moduliatorius (PFM) (tokie DC/DC populiarūs mažos galios įterptinėse sistemose dėl didesnio naudingumo esant mažoms apkrovoms lyginant su DC/DC naudojančiais pastovaus dažnio impulso pločio moduliatorius).

„iCount“ matavimo principas yra toks: DC/DC keitiklyje su PFM moduliatoriumi kiekvieno darbo ciklo metu į išėjimą yra atiduodama $0,5 \cdot L \cdot i^2$ džaulių (J) energijos (čia i – maksimali induktoriaus srovė). Padavus signalą iš DC/DC keitiklio perjungimo rakto į MCU laikmačio įėjimą bei skaičiuojant keitiklio darbo ciklų skaičių galima įvertinti sunaudotos energijos kiekį. Pastebėta, kad daugelio DC/DC PFM tipo keitiklių darbo dažnis beveik tiesiogiai priklauso nuo apkrovos srovės plačiame dinaminame diapazone (1.10 pav.).



1.10 pav. Skirtingų DC/DC keitiklių darbo dažnio priklausomybė nuo išėjimo srovės [19]

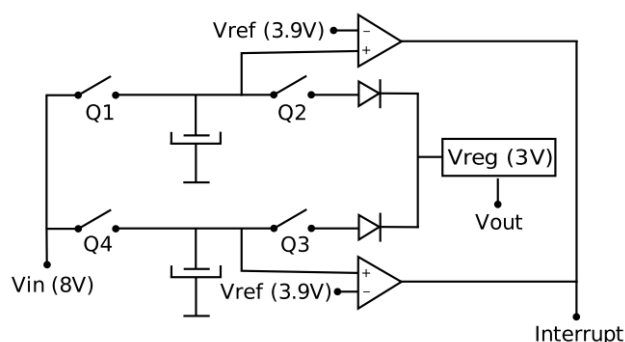
Matuojant 5 μA – 50 mA diapazone pasiekama mažesnė nei $\pm 15\%$ matavimo paklaida, matavimo rezoliucija viršija 1 μJ (naudojant 10 μH galios induktorių. Mažesnio nominalo induktorius leistų pasiekti didesnę skyrą ir atvirkščiai). Prie matavimo metodo trūkumų galima priskirti kalibracijos poreikį (autoriai rekomenduoja individualiai kalibruoti kiekvieną gaminį, nes dėl komponentų parametrų išsibarstymo galimos iki $\pm 10\%$ paklaidos), priklausomybę nuo įėjimo įtampos ir temperatūros, kurias galima iš dalies kompensuoti programinėmis priemonėmis.

1.4.4. Sensorių galios analizės ir derinimo įrenginys „Energy Bucket“

Šaltinyje [20] aprašomo įrenginio „Energy Bucket“ autoriai teigia, kad analizatorius sukurtas specialiai bevielųjų sensorių programuotojams, nes kartu su specialia programine įranga grafiškai bei skaitine forma atvaizduoja energijos sąnaudas vykdant tam tikrus, iš anksto apibrėžtus programinio kodo segmentus. Tokiu būdu palengvinamas programos derinimo etapas, nustatoma kaip programos kodo pakeitimai veikia įterptinės sistemos energijos sąnaudas.

„Energy Bucket“ kaip ir 1.4.3 skyriuje aprašytas „iCount“ naudoja kulonmetrinį matavimo principą. Prie „Energy Bucket“ skaitmeninių įėjimų jungiami DUT bendros paskirties skaitmeniniai išvadai. Kuriant programinį kodą įterpiamos specialios iš anksto paruoštos funkcijos, valdančios šiuos prievadus. Taip nurodoma analizatoriui kur yra analizuojamų kodo segmentų pradžios ir pabaigos.

Matavimui „Energy Bucket“ naudoja krūvio pernešimo metodą (1.11 pav.). Sujungus vieną iš Q1 ir Q4 raktų iki 8V užkraunamas tarpinis kondensatorius. Tuo metu kitas tarpinis kondensatorius tiekia energiją į 3V įtampos stabilizatorių. Jam išsikrovus iki 3,9V vyksta perjungimas, energija tiekama iš kito kondensatoriaus. Tokiu būdu skaičiuojant kondensatorių įkrovimo/iškrovimo ciklus nustatomos DUT energijos sąnaudos. 1 μA – 100 mA diapazone matavimo paklaida neviršija $\pm 2\%$.



1.11 pav. „Energy Bucket“ matavimo schema [20]

Komunikacijai su PC naudojama UART sąsaja, kuri riboja maksimalų kondensatorių komutavimo dažnį iki 1152 kartų per sekundę. Dėl panaudoto fiksuotos 3V įtampos reguliatoriaus šio analizatoriaus panaudojimas yra gana ribotas. Kaip teigia autoriai, „Energy Bucket“ pasižymi nedidele kaina – sistemą sudarantys komponentai kainuoja apie 50 €.

1.5. Apibendrinimas

Atlikus literatūros analizę nustatyta, kad mažų įtampų matavimo prietaisų įėjimo pakopose dažniausiai naudojami operaciniai stiprintuvai įtampos signalo stiprinimui. Tuo tarpu srovės matavimuose dažniausiai sutinkamos dvi metodikos: srovės šuntas bei grįžtamojo ryšio ampermetras. Pastarasis metodas labiausiai tinkamas mažų srovių matavimui. Nustatyti pagrindiniai srovės matavimo paklaidų šaltiniai: pašalinės srovės, triukšmas dėl DUT impedanso bei ampermetro vidinės varžos.

Atlikus rinkos bei mokslinių darbų analizę apžvelgti panašūs į prietaisai į projektuojamą. Galios analizatoriai skiriasi ne tik kaina, dydžiu, funkcionalumu, jungimo į schemą sudėtingumu, tačiau ir matavimo būdais: „Nemo“ naudoja perjungiamas šunto varžas, bei pasižymi komunikacijos su DUT galimybe be papildomų duomenų linijų; kolonmetre „iCount“ atliekamas DC/DC keitiklio darbo ciklą skaičiavimas; „Energy Bucket“ matavimą realizuoja krūvio pernešimo metodu.

Naujai kuriamame galios analizatoriuje srovės matavimui pasirinkta naudoti du matavimo metodus: srovės šuntą ir grįžtamojo ryšio ampermetrą, dėl didesnės skyros bei sudaromo mažesnio įtampos kritimo prie mažų srovių.

2. Matavimo sistemos projektavimas

2.1. Matavimo metodika

Galios analizė atliekama tais pačiais laiko momentais matuojant įterptinės sistemos maitinimo įtampą ir srovę. Dažnu atveju maitinimo įtampos matavimas nėra reikalingas, jei įterptinė sistema maitinama iš stabilizuotos įtampos šaltinio. Tačiau, jei testuojama sistema maitinama tiesiogiai iš nedidelės talpos baterijos arba aplinkos energijos kaupimo sistemos, fiksuoti maitinimo įtampą būtina. Įtampos kitimo diapazonas dažniausiai neviršija kelių voltų, todėl įtampos matavimas su kelių dešimčių μV rezoliucija ir nedidele santykine paklaida yra nesunkiai įgyvendinamas naudojant precizinį ADC keitiklį. Pavyzdžiui, matuojant įtampą $\pm 5,5 V$ diapazone su $N=24$ bitų ADC keitikliu teorinė įtampos matavimo skyra bus:

$$\frac{V_{pp}}{2^n} = \frac{5,5 - (-5,5)V}{2^{24}} = 655,65 nV \quad (2.1)$$

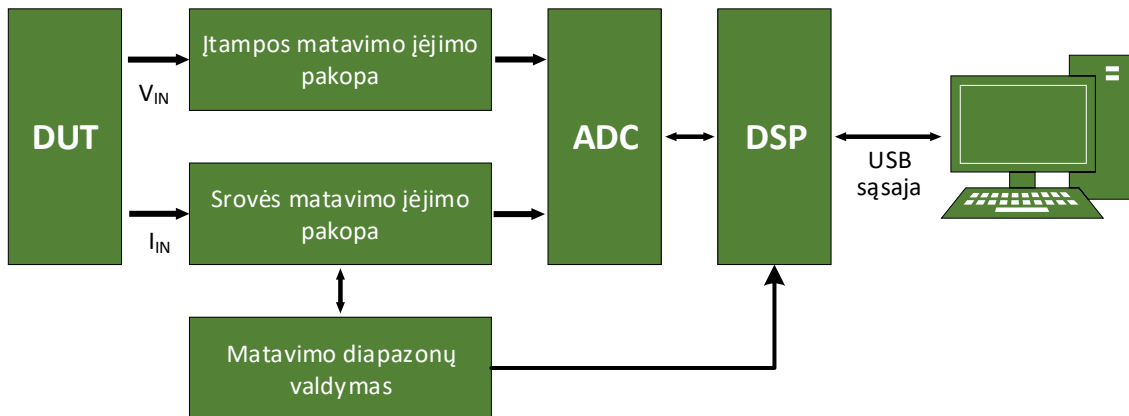
Tuo tarpu srovės kitimo dinaminis diapazonas dažniausiai būna nuo dešimčių nA iki dešimčių ar šimtų mA, todėl, norint pasiekti mažą matavimo paklaidą visame diapazone, vieno matavimo intervalo neužtenka. Projektuojamoje sistemoje srovės matavimas padalintas į du intervalus: ± 2 mA ir ± 600 mA. ± 2 mA intervale naudojamas grįžtamojo ryšio ampermetras. Šis metodas pasirinktas dėl mažos įtakos matavimo grandinei, nes nenaudojant šunto sukuriama labai nedidelis įtampos kritimas. Tuo tarpu didesnių srovių matavimui metodas netinka dėl ribotos operacinio stiprintuvo išėjimo srovės. ± 600 mA diapazone bus naudojamas tradicinis srovės šuntas. Matavimo grandinės turės būti perjungiamos automatiškai matavimo metu, nes prie didesnių srovių grįžtamojo ryšio ampermetras imtų sotintis, sukeldamas nekontroliuojamą ir didelį įtampos kritimą srovės matavimo grandinėje.

2.2. Sistemos struktūra

Apibendrinta matavimo sistemos struktūra pateikta 2.1 pav. Matuojama įtampa V_{IN} perduodama į įėjimo buferį bei aktyvųjį silpnintuvą, kuris nuslopina ją iki ADC įėjimui tinkamo lygio, t.y. kad nebūtų viršijama ADC atraminio įtampos šaltinio įtampa, šiuo atveju $V_{REF} = \pm 2,5 V$.

Srovės matavimo kanalas įprastai yra prijungtas prie šunto rezistoriaus. Šunto sudaromas įtampos kritimas (proporcingas tekančiai srovei) matuojamas skirtuminiu stiprintuvu. Pastarasis atlieka dar vieną svarbią funkciją – pagal šio stiprintuvo matuojamą srovę Šmito trigeris bei loginiai elementai valdo automatinį matavimo diapazonų perjungimą.

Išmatuotos srovės ir įtampos vertės perduodamos į keitiklį analogas-kodas, kurį valdo skaitmeninis signalų procesorius (DSP). Į DSP patenka ir matavimo diapazonų valdymo signalas. Jis reikalingas tam, kad procesorius galėtų atrinkti kuris matavimo diapazonas buvo naudojamas konkrečiu laiko momentu. Galiausiai matavimo rezultatai USB sąsajos pagalba perduodami į kompiuterį tolimesniam apdorojimui.



2.1 pav. Apibendrinta matavimo sistemos struktūra

Kituose skyreliuose apžvelgsime kiekvieną sistemos bloką detaliau.

2.3. Keitiklio analogas-kodas parinkimas

Keitiklius analogas-kodas charakterizuoja du pagrindiniai parametrai – diskretizacijos dažnis bei bitų skaičius (skyra). Šiuo metu rinkoje galima rasti gana nemažai dideles rezoliucijos ADC keitiklių, kurie pasižymi 18-32 bitų skyra, o jų diskretizacijos dažnis siekia nuo šimtų hercų iki kelių megahercų. Atlikus įvairių literatūros šaltinių, Bluetooth, LoRa, Sigfox ir kitus populiarius bevielio ryšio protokolus naudojančių sistemų vartojamos galios analizę, nepavyko rasti keliamų reikalavimų srovės matuoklio juostos pločiui.

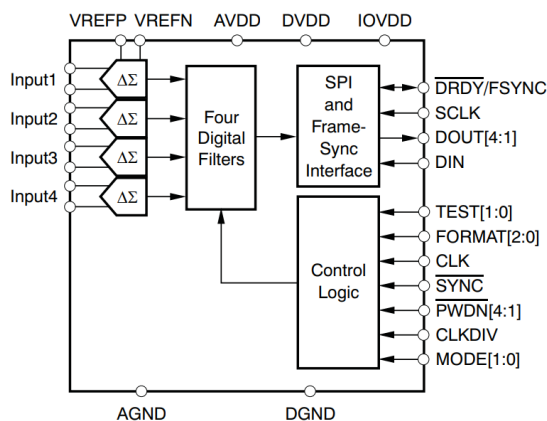
Išnagrinėtose galiojančiose direktyvose ir standartuose taip pat neminimi jokie reikalavimai mažos galios įterptinių sistemų galios matavimo įrangai. Artimiausias rastas standartas yra IEC 62301 (Elektrinė ir elektroninė buitinė ir įstaigų įranga. Mažo energijos suvartojimo analizė), tačiau jis skirtas iš elektros tinklo (100 – 250 VAC) maitinamiems prietaisams, todėl mažos galios nuolatinę srovę vartojantiems įrenginiams netinkamas.

Šio darbo apžvalginėje dalyje nagrinėtų prietaisų diskretizavimo dažnis siekia 1 – 77 kHz, taigi tuo remiantis priimama, kad pageidaujamas diskretizavimo dažnis turėtų būti 50 – 200 kHz intervale. Pasirinkus mažesnę – didėjančią paklaidų tikimybę diskretizuojant greitus srovės kitimo frontus. Tuo tarpu pasirinkus aukštesnę dažnį – sudėtingėja pačios sistemos realizacija, reikalingas nemažas laisvosios prieigos atminties (RAM) atminties kiekis, atsiranda poreikis programuojamai loginei matricai (FPGA), o taip pat ir pats keitiklis analogas-kodas kainuoja ženkliai brangiau.

Kaip buvo minėta anksčiau, srovės matavimas padalintas į du intervalus (iki ± 2 mA ir iki ± 600 mA). Dėl šios priežasties, norit gauti kuo tikslesnę matavimą, reikalingas didelės skyros ADC. Kita vertus, būtų galima pasirinkti keitiklį analogas-kodas su mažesne skyra, tačiau tuomet tam pačiam tikslumui išlaikyti reikėtų sudaryti daugiau matavimo intervalų. Taigi, sudėtingėtų ir analoginio

kanalų perjungimo schema, matavimo rezultatuose atsirastų daugiau nepageidaujamų įtampos šuolių kanalų perjungimo metu.

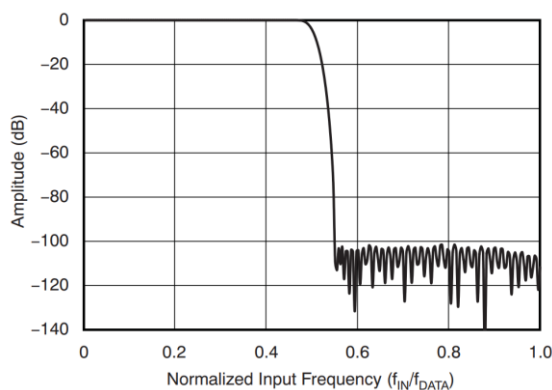
Atsižvelgiant į keliamus reikalavimus pasirinktas Texas Instruments ADS1274 delta-sigma ($\Delta\Sigma$) tipo analogas-kodas keitiklis. Jo struktūra pateikta 2.2 pav.



2.2 pav. Apibendrinta ADS1274 struktūra [21]

Keitiklis pasižymi 24 bitų skyra bei 144 kHz diskretizacijos dažniu, turi simetrinius (diferencinius) įėjimus, teorinis SNR esant maksimaliam diskretizacijos dažniui siekia 106 dB. Keturi šio ADC kanalai veikia sinchroniškai – taip užtikrinama, kad tiek srovė abiejuose matavimo kanaluose, tiek ir įtampa bus skaitmenizuojama tais pačiais laiko momentais. $\Delta\Sigma$ modulatorius signalą diskretizuoja 64 kartus didesniu dažniu ($64 \cdot 144 \text{ kHz} = 9,216 \text{ MHz}$) nei yra šio keitiklio išėjimo dažnis. Ši keitiklio savybė suteikia tokius privalumus:

- Kvantavimo triukšmas yra perstumiamas į aukštesnius dažnius už pralaidos juostos ribų, kurie vėliau yra nufiltruojami integruotu ribotos impulsinės reakcijos filtru. Filto ADCh pateikta 2.3 pav.
- Dėl didelio signalo diskretizacijos dažnio įėjime pakanka 1-3 eilės antisanglodinio filtro, kad būtų tenkinamas Naikvisto kriterijus ($f_s / 2$).



2.3 pav. Į ADS1274 integruoto ribotos impulsinės reakcijos (RIR) filtro ADCh [21]

Apskaičiuojame šio keitiklio efektyvų bitų skaičių (ENOB) esant maksimaliam 144 kHz diskretizacijos dažniui:

$$ENOB = \frac{SINAD - 1,76 \text{ dB}}{6,02} = \frac{103,88 - 1,76 \text{ dB}}{6,02} = 16,96 \approx 17 \text{ bit} \quad (2.2)$$

Randame šio keitiklio analogas-kodas triukšmų efektinę vertę, kai $V_{ref} = \pm 2,5 \text{ V}$, o $SNR = 106 \text{ dB}$

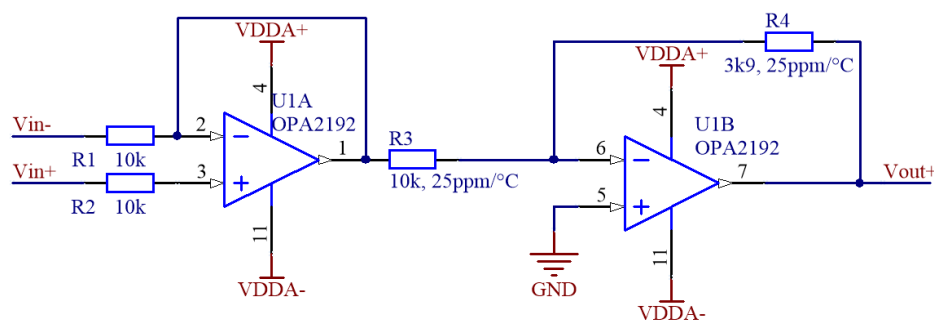
$$V_{ADC_NOISE} = \frac{(V_{ref_max} - V_{ref_min}) / \sqrt{2}}{10^{SNR/20}} = \frac{(2,5 - (-2,5)) / \sqrt{2}}{10^{106/20}} = 17,72 \mu V_{RMS} \quad (2.3)$$

Taigi, jeigu stiprintuvų savieji triukšmai neviršys apskaičiuotos ADC triukšmų įtampos, jie reikšmingos įtakos galutiniam rezultatui neturės.

Paprastumo dėlei bei siekiant sumažinti triukšmų, sklindančių iš skaitmeninės sistemos dalies įtaką, matavimo sistemos prototipinėje versijoje analogas kodas keitiklis nėra projektuojamas ant plokštės kartu su stiprintuvais. Vietoje to naudojama ADS1274 maketinė plokštė su integruotu DSP procesoriumi bei ADCPro programine įranga, skirta duomenų iš analogas-kodas keitiklio rinkimui bei analizavimui.

2.4. Įtampos matavimo dalis

Įtampos matavimo įėjimo grandis sudaryta iš dviejų operacinių stiprintuvų: pirmasis veikia kaip įėjimo buferis-komparatorius, kurio išėjimo įtampa $V_{OUT1A} = V_{IN+} - V_{IN-}$, tuo tarpu antrasis atlieka buferio-įtampos daliklio funkciją. Jo išėjimo įtampa: $V_{OUT+} = (R4 / R3) \cdot V_{OUT1} = (3,9 \text{ k} / 10 \text{ k}) \cdot V_{OUT1} = 0,39 \cdot V_{OUT1}$. Šios grandies principinė schema pateikta žemiau:



2.4 pav. Įtampos matavimo kanalo įėjimo grandies schema

Įtampos matavimui pasirinktas OPA2192, pasižymintis $5,5 \text{ nV}\sqrt{\text{Hz}}$ įtampos ir $1,5 \text{ fA}\sqrt{\text{Hz}}$ srovės triukšmais, maža įėjimo srove ($\pm 5 \text{ pA}$) bei priešįtampiu ($\pm 5 \mu \text{V}$).

Operaciniam stiprintuvui būdingos trys pagrindinės triukšmo dedamosios [22], [23]:

- Šiluminiai (Džonsono-Naikvisto) triukšmai:

$$V_{n_temp} = \sqrt{4 \cdot k_B \cdot T \cdot \Delta f \cdot R} \quad (2.4)$$

Čia $k_B = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J} / \text{K}$ - Bolcmano konstanta, T - absoliutinė temperatūra, Δf - dažnių juosta, R - varža

- Įtampos triukšmai:

$$V_{n_V} = v_n \sqrt{\Delta f} \quad (2.5)$$

Čia v_n - triukšmų įtampa

- Srovės triukšmai:

$$V_{n_I} = i_n \sqrt{\Delta f} \cdot R \quad (2.6)$$

Čia i_n - triukšmų srovė

Skaičiuojame suminius triukšmus U1A stiprintuvui iki 72 kHz, kai $T = 298 K$ ($25^\circ C$):

$$V_{total_U1A} = \sqrt{(V_{n_temp})^2 + (V_{n_V})^2 + (V_{n_I})^2} = 1,48 \mu V_{RMS} \quad (2.7)$$

Suminiai triukšmai U1B stiprintuvui:

$$V_{total_U1B} = \left[\sqrt{(V_{n_temp})^2 + (V_{n_V})^2 + (V_{n_I})^2} \right] \cdot G = 0,58 \mu V_{RMS} \quad (2.8)$$

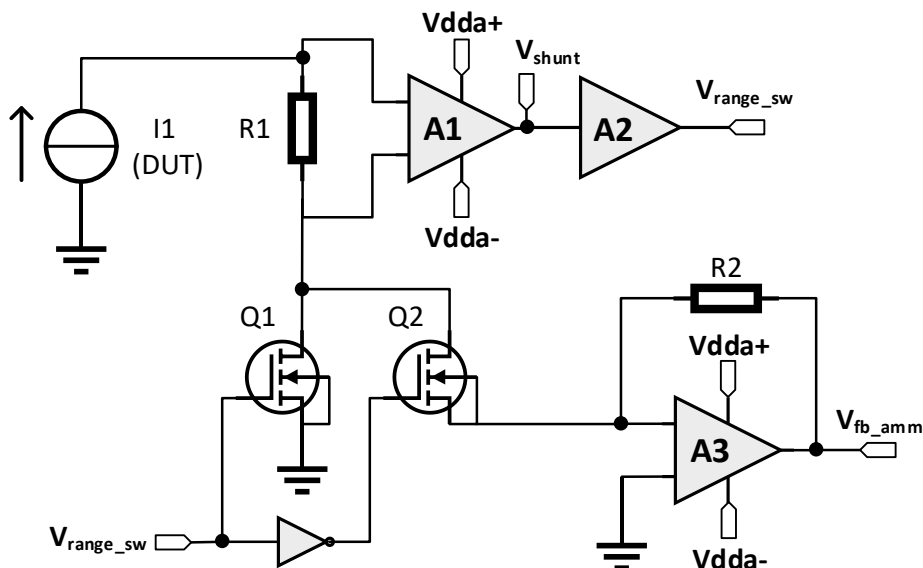
Tuomet suminiai abiejų pakopų triukšmai:

$$V_{total} = \sqrt{(V_{total_U1A})^2 + (V_{total_U1B})^2} = 1,59 \mu V_{RMS} \quad (2.9)$$

Taigi, kaip matyti iš atliktų skaičiavimų, suminiai įtampos matavimo grandies triukšmai yra daugiau nei 11 kartų mažesni už ADC triukšmus, taigi jų įtaka yra nereikšminga.

2.5. Srovės matavimo dalis

Srovės matavimą padalinus į du intervalus bei juose naudojant skirtingus matavimo būdus išškyla intervalų perjungimo problema. Paprasčiausias ir dažniausiai naudojamas matavimo diapazonų perjungimo metodas yra elektromechaninės relės, tačiau jų pagrindinis trūkumas yra maža greitaveika: nusistovėjimo laikas (angl. *settle time*) įprastai neviršija 5-15 ms [24]. Greitam perjungimui daug tinkamesni metalo, oksido ir puslaidininkio (MOSFET) tranzistoriniai raktai, kurie ir naudojami galios analizatoriuje. Supaprastinta srovės matavimo kanalo struktūra pateikta 2.5 pav. Testuojamo įrenginio srovei neviršijant 2mA srovė teka per šunto varžą R1, tranzistorinį raktą Q2 bei iš operacinio stiprintuvo sudarytą grįžtamojo ryšio ampermetrą A3. Tekančios srovės stipris apskaičiuojamas iš (1.4) formulės.



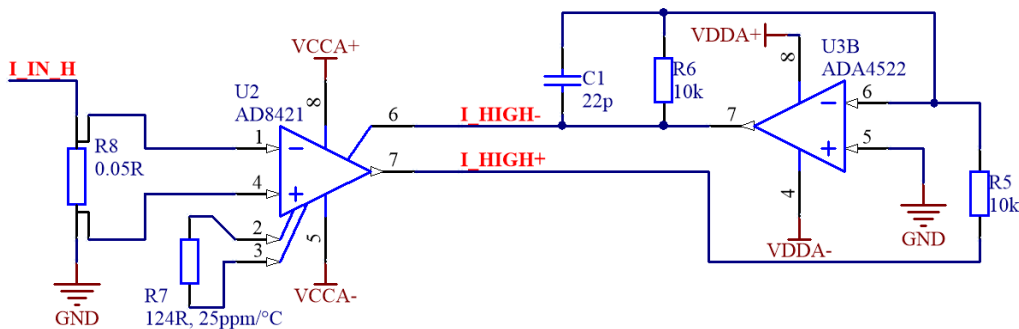
2.5 pav. Srovės matavimo kanalų perjungimo supaprastinta schema

Srovei viršijus 2 mA, vyksta automatinis perjungimas į kitą matavimo diapazoną: atidaromas tranzistorius Q2, o tuo tarpu Q2 yra uždaromas (grįžtamojo ryšio ampermetras šuntuojamas). Šiuo atveju tekančios srovės stipris išreiškiamas taip:

$$I_{OUT} = \frac{V_{R1}}{R1 \cdot A1} \quad (2.10)$$

2.5.1. Didelių srovių diapazonas

Didelių srovių matavimui naudojamas klasikinis srovės šuntas. Šios grandies principinė schema pateikta žemiau:



2.6 pav. Didelių srovių matavimo įėjimo grandies schema

Turint omenyje, kad matavimui naudojami tik du diapazonai ir didesnis bus skirtas 2 – 600 mA dydžio srovių matavimui, pasirinktas gana nedidelės, 50 mΩ varžos šuntas R8, sudarantis vos 30 mV įtampos kritimą tekant 600 mA srovei. Įtampa ant šunto stiprinama mažatriukšmiu instrumentiniu stiprintuvu AD8421, pasižyminčiu $3,2 nV\sqrt{Hz}$ įtampos ir $200 fA\sqrt{Hz}$ srovės triukšmais. Stiprintuvo vienetinio stiprinimo juostos plotis siekia 10 MHz, todėl rezistoriumi R7 nustatomas reikiamas $G=80$ kartų (38 dB) stiprinimo koeficientas, išvengiant papildomų

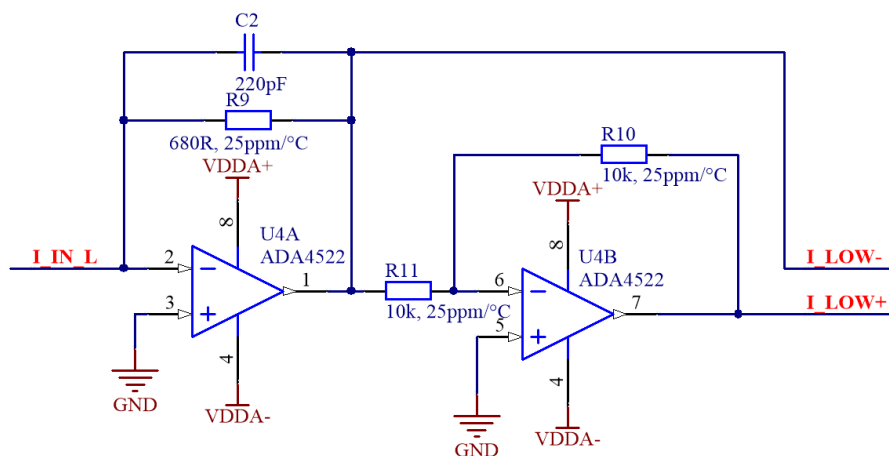
stiprinimo pakopų. Skaičiuojame absoliučią maksimalią įėjimo srovę, kai $G=80$, o ADC $V_{REF} = \pm 2,5$ V:

$$I_{IN_MAX} = \frac{\pm V_{REF}}{R8 \cdot G} = \pm 625 \text{ mA} \quad (2.11)$$

Grandinėje esantis papildomas vienetinio stiprinimo operacinis stiprintuvas U3B invertuoja U2 išėjimo signalą, tokiu būdu nesimetrinis išėjimo signalas paverčiamas simetriniu.

2.5.2. Mažų srovių diapazonas

Grįžtamojo ryšio ampermetrai svarbu parinkti operacinį stiprintuvą, pasižymintį mažais savaisiais triukšmais bei nedidele priešįtampio srove [25]. Matavimui pasirinktas Analog Devices operacinis stiprintuvas ADA4522, kurio $I_B = \pm 50 \text{ pA}$; $e_n = 5,8 \text{ nV} / \sqrt{\text{Hz}}$ prie 1 kHz , $i_n = 0,8 \text{ pA} / \sqrt{\text{Hz}}$ prie 1 kHz . Matavimo schema pateikta 2.7 pav.



2.7 pav. Mažų srovių matavimo įėjimo grandies schema

U4A išėjimo srovė apskaičiuojama iš (1.4) formulės. Įėjimo srovė stiprinama 680 kartų. Simuliacijų metu nustatyta, kad transimpedanso stiprintuvo (TIA) išėjimo ADCh pilnai tiesinė iki $\sim 140 \text{ kHz}$. Antrasis operacinis stiprintuvas U4B, analogiškai kaip ir didelių srovių matavimo atveju, invertuoja U4A išėjimo signalą, nesimetrinis signalas paverčiamas simetriniu.

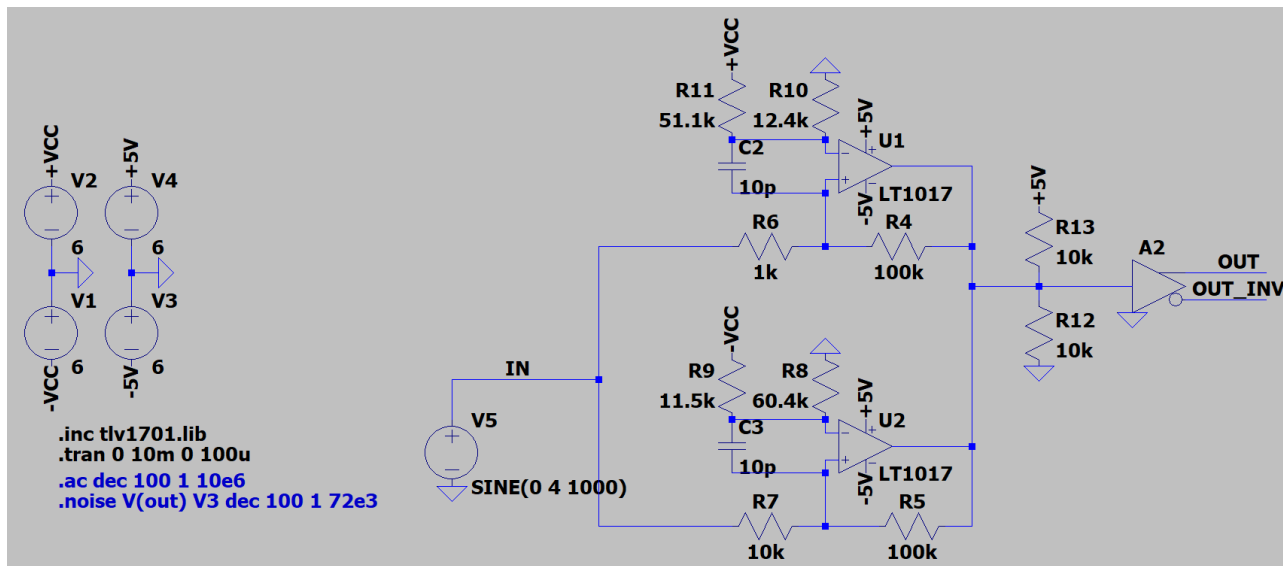
2.5.3. Srovės matavimo diapazonų perjungimas

Parentant MOSFET tranzistorius srovės diapazonų perjungimui svarbiausi parametrai yra šie:

- mažas užtūros talpumas ($C_{iss} = C_{gs} + C_{gd}$) ir varža (R_G) greitam perjungimui užtikrinti;
- nedidelė santakos-ištakos varža $R_{DS(on)}$, kad matavimo grandinėje būtų sudaromas kuo mažesnis įtampos kritimas;
- maža santakos-ištakos nuotėkio srovė I_{DSS} , kai tranzistorius uždarytas.

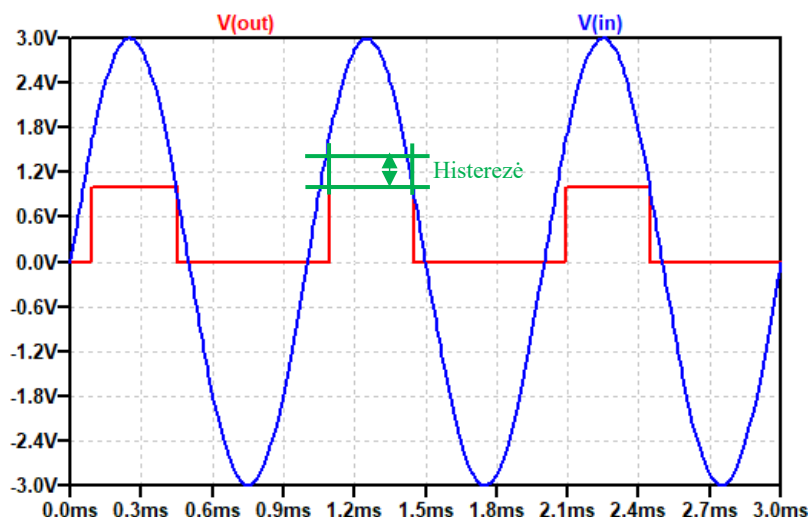
Kaip matyti iš 2.5 pav., santakos-ištakos nuotėkio srovė matuojant su šunto varža didelės įtakos neturės, tuo tarpu matuojant mažų srovių intervale su grįžtamojo ryšio ampermetru Q1 nuotėkio

srovės bus papildomas paklaidos šaltinis, nes dalis DUT srovės nutekės ne per ampermetrą, o tiesiai į žemę per Q1. Diapazonų perjungimui pasirinktas Texas Instruments BSD316SN tranzistorius, kurio pagrindiniai parametrai tokie: $R_{DS(on)} = 12.5m\Omega$, $Q_g = 2,8nC$, $t_r = 8,2ns$. Žemiau pateikta diapazonų perjungimo grandinės schema:



2.8 pav. Matavimo diapazonų perjungimo schema

Perjungimui panaudoti du komparatoriai iš kurių suformuotas Šmito trigeris. Persijungimo iš mažų srovių į dideles slenkstis užduodamas iš R10 ir R11 rezistorių suformuotu dalikliu, tuo tarpu iš didelių į mažas – dalikliu R8-R9. Tokiu būdu gaunama histerezė, sauganti nuo greito diapazonų junginėjimosi kai įėjimo srovė artima slenkstinei. Diapazonų perjungimo veikimas demonstruojamas 2.9 pav.



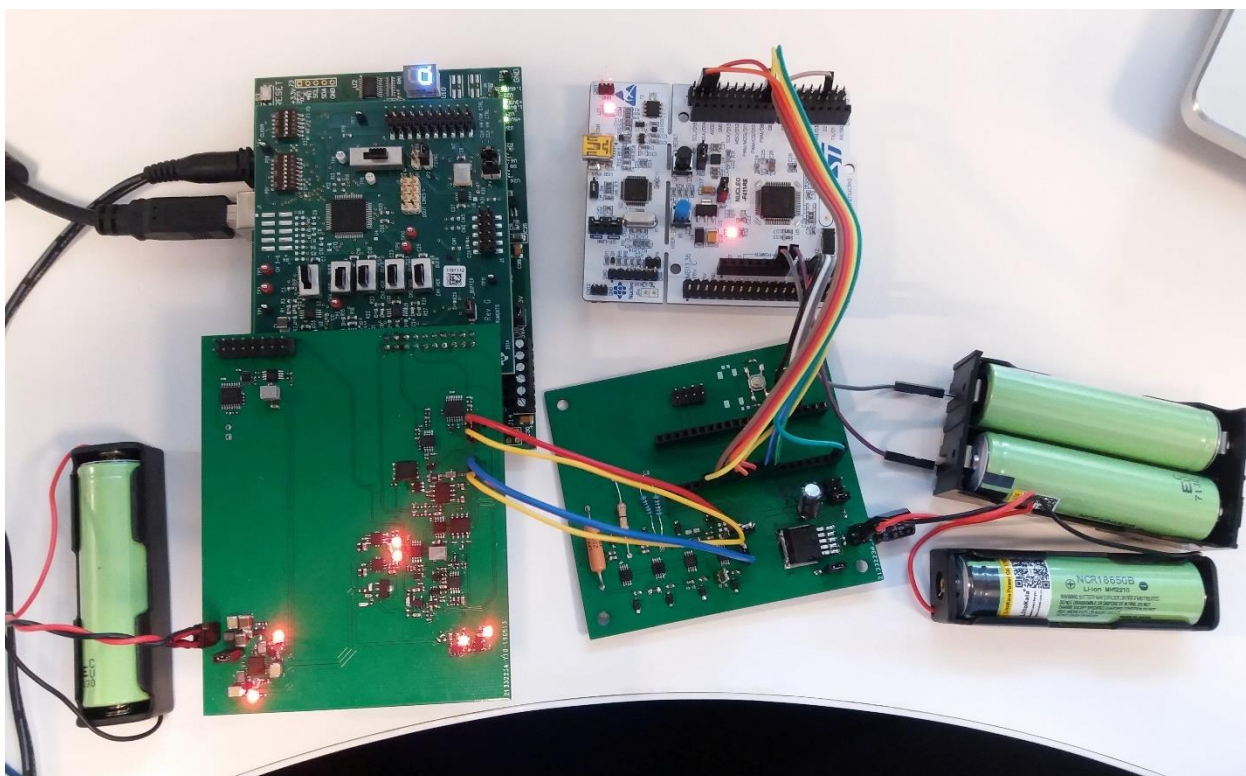
2.9 pav. Matavimo diapazonų perjungimo veikimo demonstravimas

Kaip matyti iš aukščiau pateikto simuliacijos laikinės charakteristikos pereinant iš mažų srovių matavimo diapazono į didelių ir atvirkščiai, persijungimas vyksta prie skirtingų srovės stiprių.

3. Sistemos tyrimai

Šioje dalyje atliekamas sukurto matavimo sistemos prototipo tyrimas, atliktų matavimų rezultatai lyginami su simuliacijų metu gautais rezultatais. Atliekami mažų ir didelių srovių, įtampos matavimo kanalų dažninių charakteristikų matavimas, tiriamas diapazonų perjungimo metu atsirandantis įtampos kritimo šuolis, automatinio matavimo diapazonų persijungimo veikimas. Atliekamas bandymas su dinamine apkrova, imituojančia įterptinės sistemos veikimo ciklą. Gauti rezultatai lyginami su analitiniais skaičiavimais bei osciloskopu atliktais matavimais.

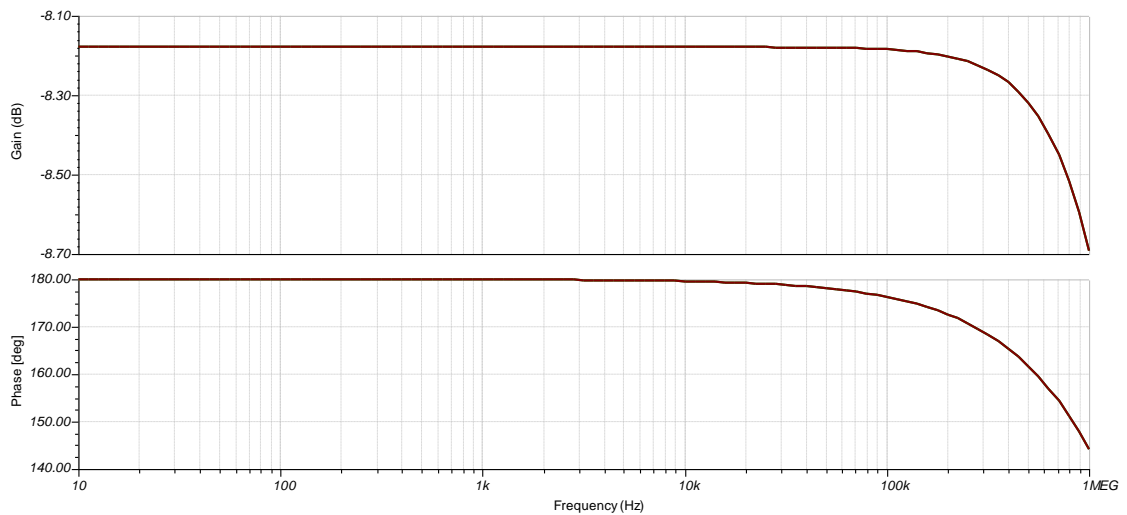
Tyrime naudojamos matavimo sistemos vaizdas pateiktas 3.1 pav.



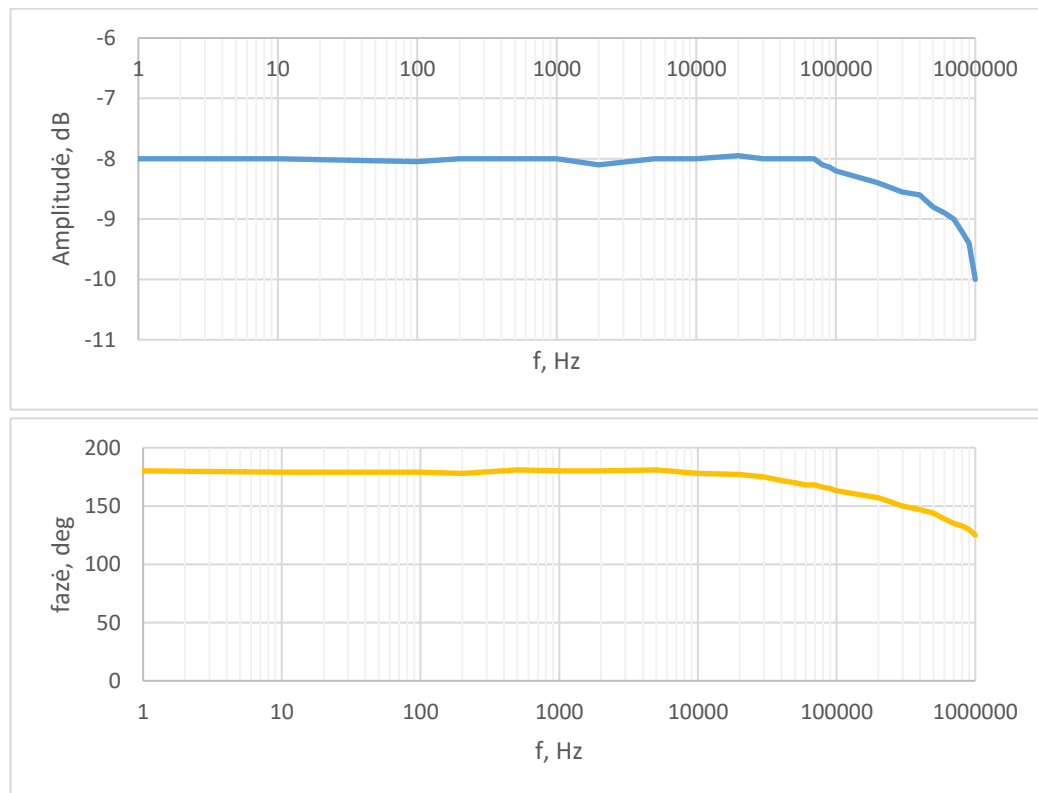
3.1 pav. Matavimo sistemos naudotos tyrime prototipas

3.1. Įtampos matavimo kanalo dažninių charakteristikų tyrimas

Atliekamas įtampos kanalo amplitudinės ir fazinės charakteristikos tyrimas dažnių diapazone iki 1 MHz. Matavimas atliekamas naudojantis skaitmeniniu osciloskopu Tektronix DPO4054B bei signalų generatoriumi Agilent 33250A. Iš generatoriaus signalas atšakojamas į osciloskopo pirmą įėjimą Ch1 bei įtampos matavimo kanalo įėjimą. Tuo tarpu antras osciloskopo kanalas Ch2 prijungtas prie įėjimo kanalo grandies išėjimo. 3.2 ir 3.3 pav. pateikti simuliacijų ir matavimų rezultatai. Kaip matyti iš grafikų, gautas stiprinimas koeficientas $-8,18 \text{ dB}$ ($\sim 0,39$ karto) atitinka stiprinimą, parinktą projektavimo metu.



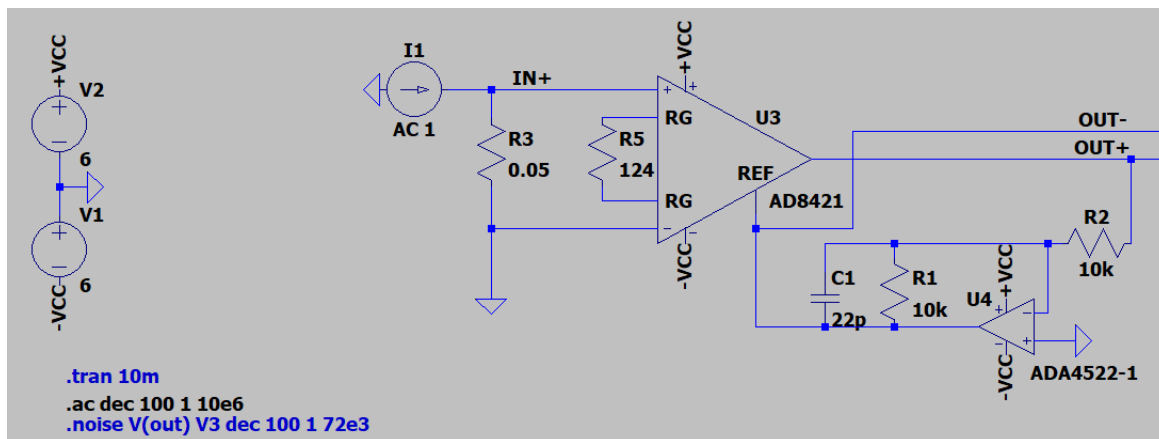
3.2 pav. Įtampos kanalo ADCh (viršuje) ir FDCh charakteristikos, gautos simuliacijos metu



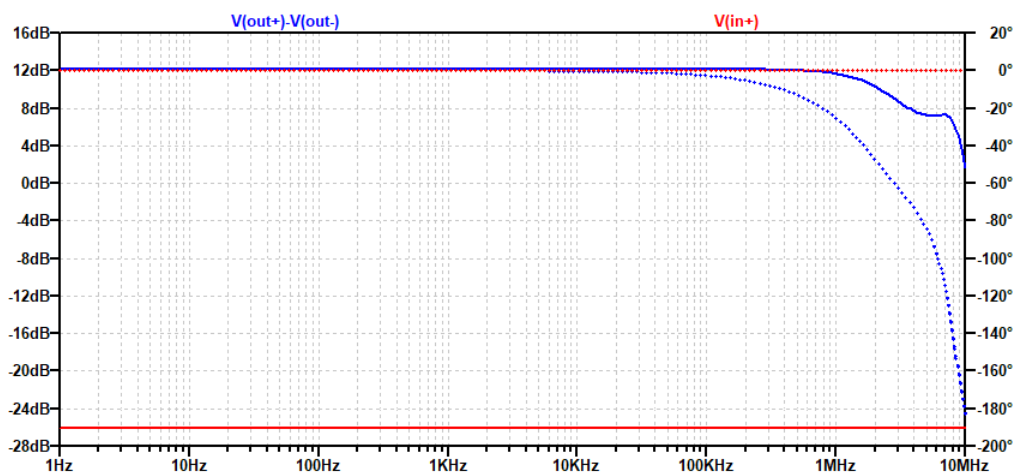
3.3 pav. Įtampos kanalo ADCh (viršuje) ir FDCh charakteristikos, gautos matavimo metu

3.2. Didelių srovių diapazono tyrimas

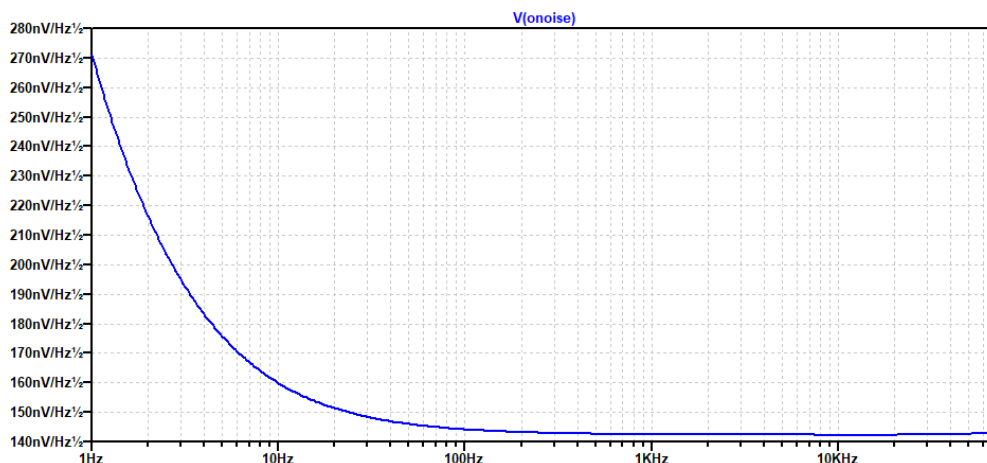
Srovės kanalui atliekamas ADCh simuliacijavimas naudojantis LTSpice programa 3.4 pav. Didelių srovių ADCh ir FDCh pateiktos 3.5 pav., tuo tarpu 3.6 pav. pateikti triukšmų analizės rezultatai. Simuliacijų metu nustatyta, kad sistemos juostos plotis -3 dB lygyje yra $2,72$ MHz, o iki ~ 350 kHz ADCh gaunama visiškai tiesi.



3.4 pav. Didelių srovių matavimo schemos simuliacijos LTSpice aplinkoje



3.5 pav. Didelių srovių matavimo kanalo ADCh ir FDCh

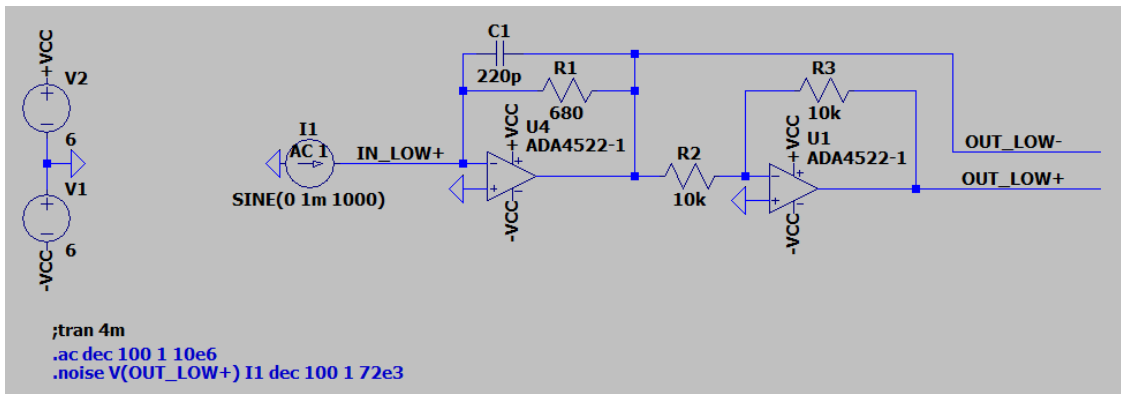


3.6 pav. Didelių srovių matavimo kanalo triukšmų analizė

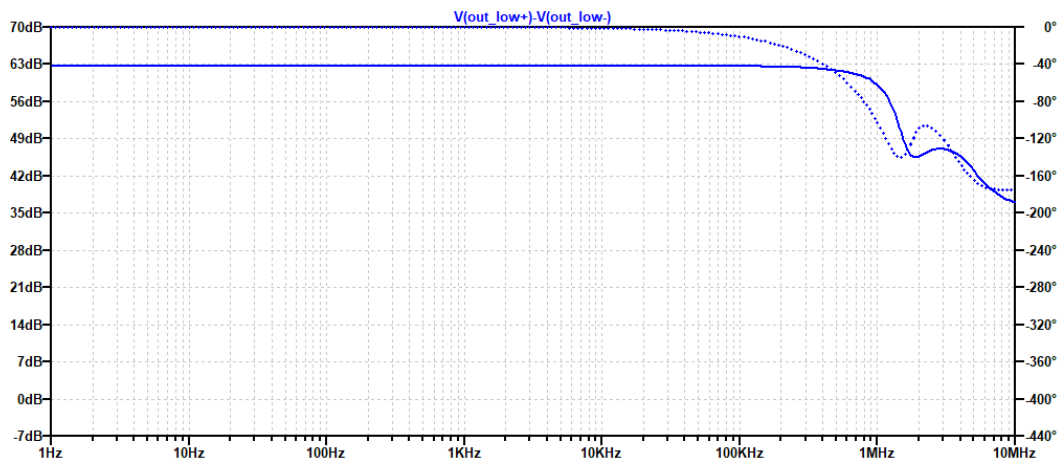
Atlikus triukšmų analizę matyti, kad kanale vyrauja mirgėjimo ($1/f$) triukšmai, kurių bendra galia diapazone iki 72 kHz yra 38,261 μVrms .

3.3. Mažų srovių diapazono tyrimas

Analogišku būdu tiriamas mažų srovių matavimui naudojamas TIA. 3.7 pav. pateikta simuliacijos schema, o 3.8 pav. šio stiprintuvo fazinė ir dažninė charakteristikos.

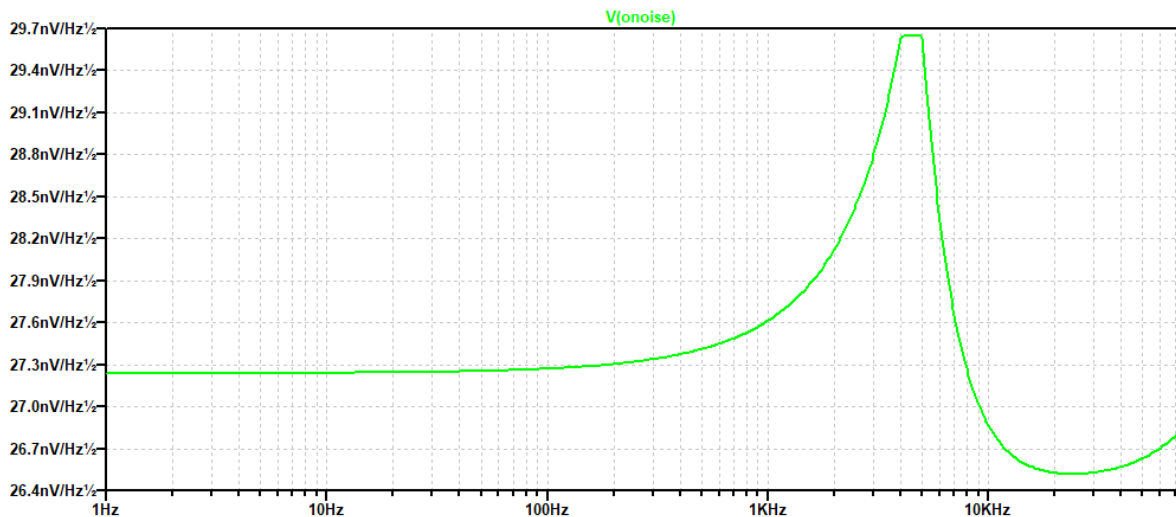


3.7 pav. Mažų srovių matavimo kanalo schema LTSpice aplinkoje



3.8 pav. Didelių srovių matavimo kanalo triukšmų analizė

Iš grafiko matyti, kad šio stiprintuvo juostos plotis siekia 958 kHz, iki ~230 kHz gaunama tiesinė dažninė charakteristika. Triukšmų analizės rezultatai pateikti 3.9 pav.

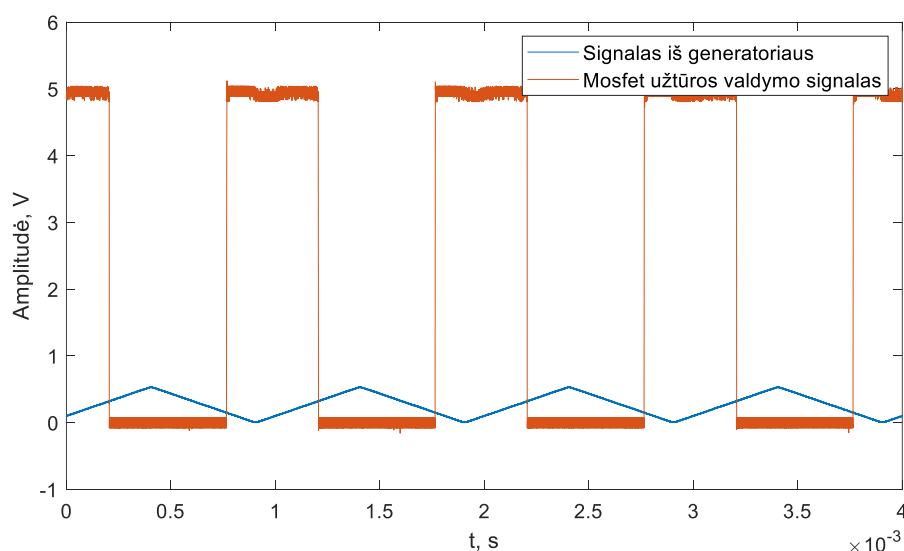


3.9 pav. Mažų srovių matavimo kanalo triukšmų analizė

Skirtingai nei didelių srovių kanalo atveju triukšmai pasiskirstę ne žemuose dažniuose, o 1 – 10 kHz juostoje. Bendras triukšmų galia – 7,2 μ Vrms.

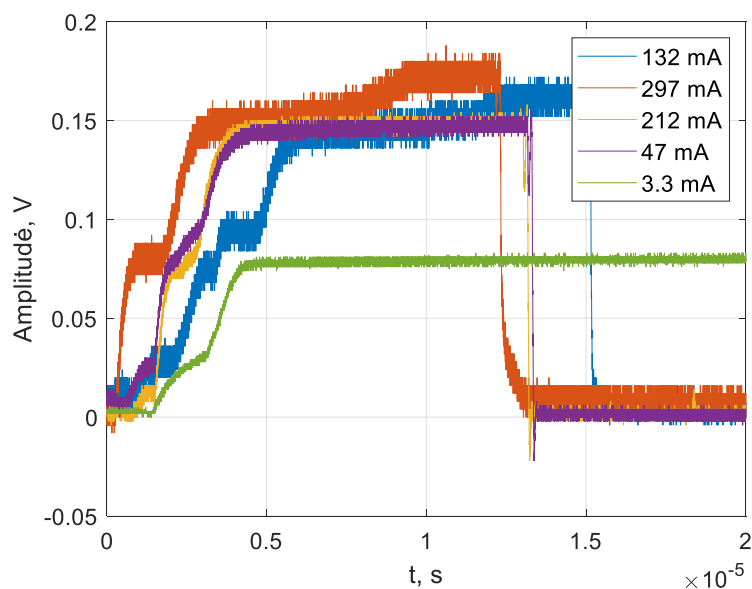
3.4. Srovės matavimo diapazonų perjungimo tyrimas

Srovės matavimo grandinėje suprojektuotas automatinis diapazonų perjungimas, kuris realizuotas analoginiu būdu sekant srovę per didelių srovių matavimui skirtą šuntą bei panaudojus Šmito trigerį su histerize kanalų perjungimui. Bandymas atliktas iš generatoriaus į srovės matavimo kanalą padavus trikampį signalą bei stebint MOSFET tranzistoriaus užtūros valdymo įtampą. 3.10 pav. pavaizduotas automatinio persijungimo veikimas.



3.10 pav. Srovės matavimo kanalų persijungimo veikimas

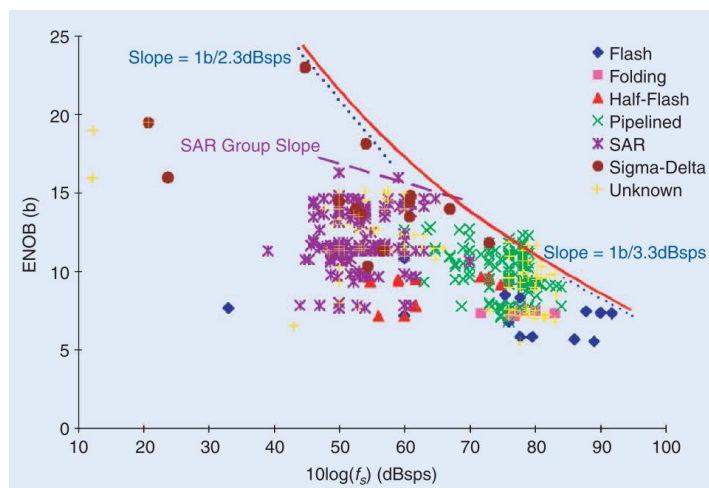
Taip pat atliekamas tyrimas, kaip keičiasi sudaromas įtampos kritimas skirtingo dydžio apkrovos prijungimo metu (3.11 pav). Kaip matyti iš grafiko, kai apkrova siekia 300 mA, įtampos kritimas ampermetre neviršija 0,18 V.



3.11 pav. Įtampos kritimas srovės intervalo perjungimo metu

3.5. Galios analizatoriaus efektyvių bitų skaičiaus tyrimas

Efektyvių bitų skaičius yra svarbus ADC parametras, apibūdinantis realų keitiklio dinaminį diapazoną įvertinus atraminės įtampos šaltinio dydį bei temperatūrinių, kvantavimo ir drebinimo (angl. *jitter*) triukšmų lygį [26]. ENOB priklausomybė nuo diskretizacijos dažnio pateikta žemiau:



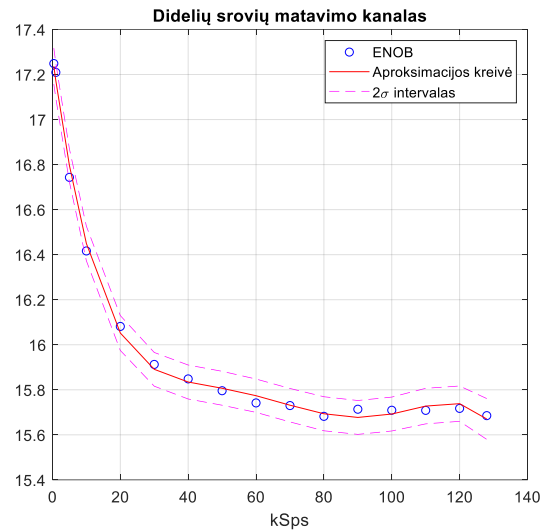
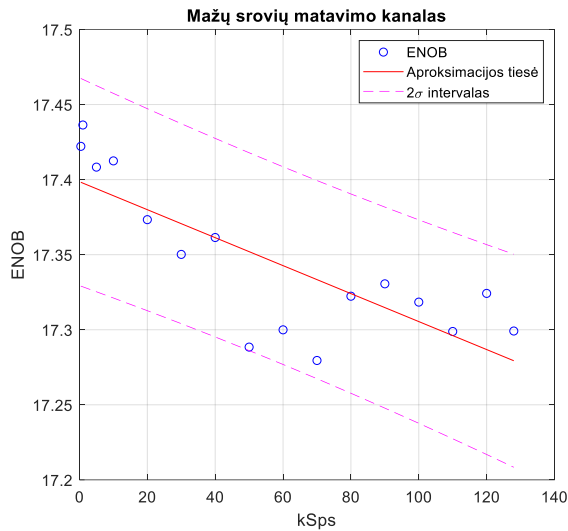
3.12 pav. ENOB priklausomybė nuo diskretizacijos dažnio [27]

Kaip matyti iš grafiko, augant diskretizacijos dažniui efektyvių bitų skaičius sparčiai mažėja. Didžiausiu ENOB pasižymi Delta-Sigma keitikliai, mažiausiu Flash tipo ADC.

Atliekamas didelių ir mažų srovių matavimo kanalų efektyvių bitų skaičiaus tyrimas kintant diskretizacijos dažniui. Tyrimo metu srovės matavimo kanalas yra prijungtas prie žemės, keitikliu sukaupiama 10 tūkst. atskaitų. Iš gautos triukšmo laikinės charakteristikos skaičiuojamas efektyvių bitų skaičius naudojantis žemiau pateikta formule [26].

$$ENOB = \frac{V_{REF}}{V_{nRMS} \cdot \sqrt{12}} = \frac{V_{REF}}{\frac{V_{REF}}{2^N} \cdot \sigma \cdot \sqrt{12}} = \frac{2^N}{\sigma \cdot \sqrt{12}} \quad (2.12)$$

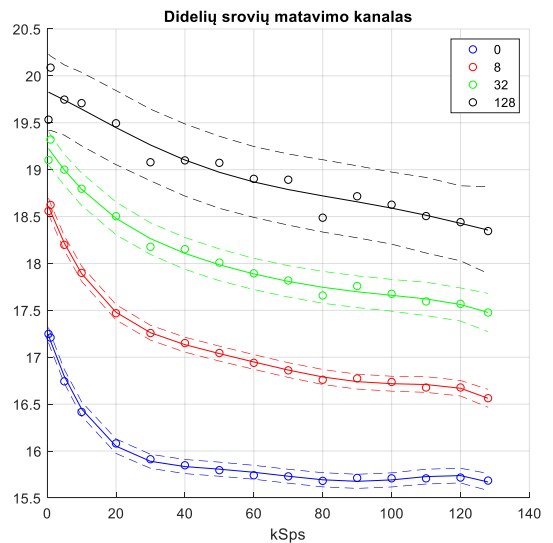
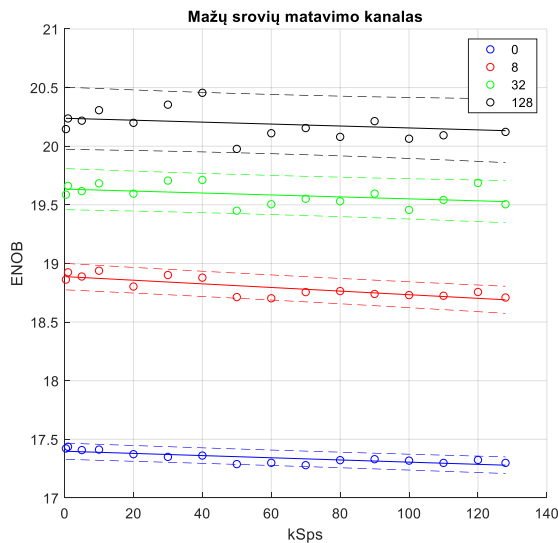
Čia $V_{REF} = 5V$ - ADC atraminio šaltinio įtampos dydis, V_{nRMS} - įtampos triukšmai, N - ADC skilčių skaičius, σ - triukšmo standartinė deviacija



3.13 pav. ENOB priklausomybė nuo diskretizacijos dažnio

Kaip matyti iš 3.15 pav. mažų srovių kanale ENOB kinta nedaug, apie 0,15 bito visam diskretizacijos dažnių diapazonui, tuo tarpu didelių srovių matavimo intervale ENOB pokytis didesnis – per visą diskretizacijos dažnių diapazoną ENOB sumažėja apie 1,5 bito.

Patikriname, kaip kinta ENOB signalo filtravimui pritaikius slenkančio vidurkio filtrą su 8, 32 ir 128 atskaitų langais.

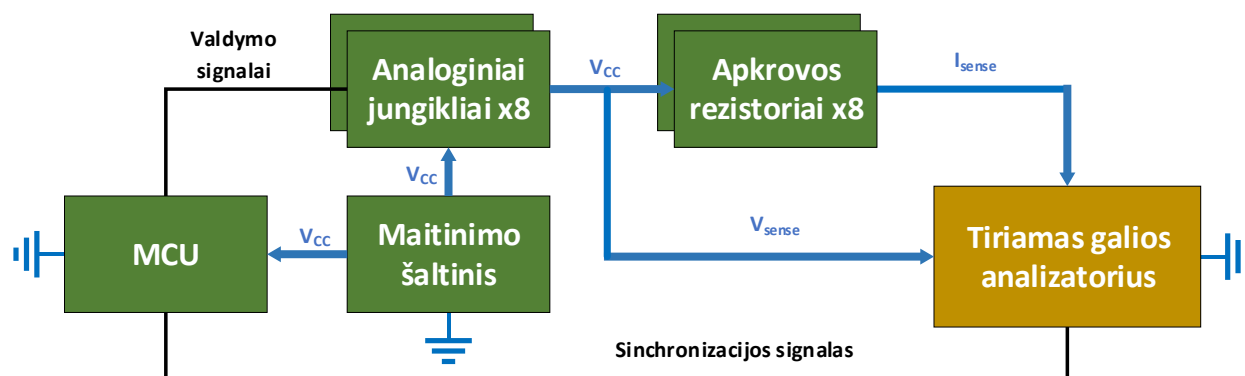


3.14 pav. ENOB priklausomybė nuo f_s pritaikius slenkančio vidurkio filtrą

Iš 3.14 pav. matyti, kad pritaikius slenkančio vidurkio filtrą ENOB išauga 2-3 bitais palyginus su pradiniu nefiltruotu signalu.

3.6. Galios analizatoriaus tyrimas su programuojama apkrova

Matavimo sistemos testavimui buvo susiprojektuotas atskiras įrenginys – dinaminė apkrova, skirta testuoti galios analizatorių, imituojant mažos galios įterptinės sistemos vartojamos srovės profilį. Jos vaizdas matomas 3.1 pav. dešinėje, o supaprastinta struktūra pateikta 3.15 pav.



3.15 pav. Programuojamos apkrovos supaprastinta struktūra

Apkrovą sudaro tokios pagrindinės dalys:

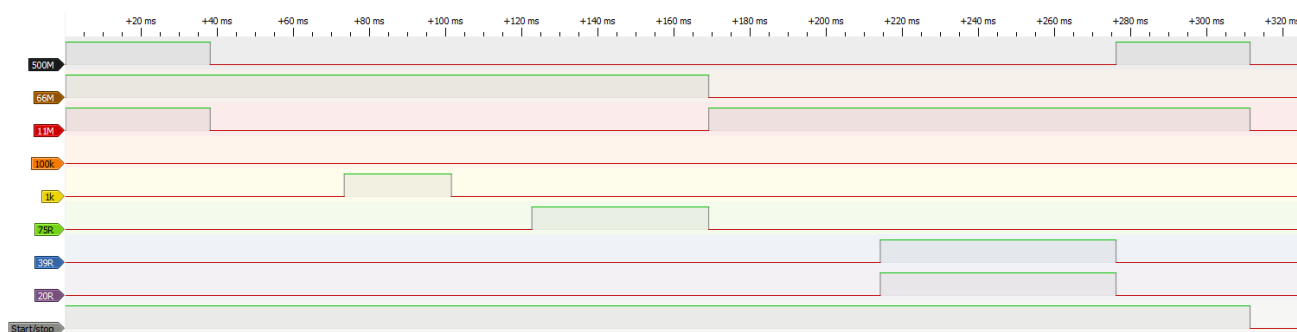
- Mikrovaldiklis STM32F411, valdantis raktų komutavimą pagal suprogramuotą srovės kitimo profilį;
- maitinimo šaltinis, maitinantis apkrovos varžas ir skaitmeninę sistemos dalį. Apkrovos varžas galima maitinti 1,8 V; 2,5 V; 3,3 V įtampa (įtampos parinktos atsižvelgiant į dažniausiai naudojamas maitinimo įtampas įterptinėse sistemose);
- aštuoni apkrovos rezistoriai, kurių nominaliai tokie: 500 M Ω , 66 M Ω , 11 M Ω , 100 k Ω , 1 k Ω , 75 Ω , 39 Ω , 20 Ω . Rezistoriai į grandinę jungiami lygiagrečiai, jais galima sukurti 2 lentelėje surašytas sroves bei įvairias šių srovių dydžių kombinacijas;

2 lentelė. Dinaminės apkrovos sukuriamų srovių lentelė

Varža, Ω	Įtampa		
	1,8 V	2,5 V	3,3 V
500 M	3,6 nA	5 nA	6,6 nA
66 M	27,3 nA	37,9 nA	50 nA
11 M	164 nA	227 nA	300 nA
100 k	18 μ A	25 μ A	33 μ A
1 k	1,8 mA	2,5 mA	3,3 mA
75	24 mA	33,3 mA	44 mA
39	46 mA	64,1 mA	84,6 mA
20	90 mA	125 mA	165 mA
I_{max} :	161,82 mA	224,93 mA	296,93 mA

- apkrovos rezistoriai komutuojami analoginiais jungikliais Analog Devices ADG821. Jie pasirinkti neatsitiktinai: šie jungikliai užtikrina mažą srovės nuotėkį išjungtoje būsenoje. Pagal gamintojo dokumentaciją maksimali nuotėkio srovė kambario temperatūroje neviršija $\pm 0,25$ nA.

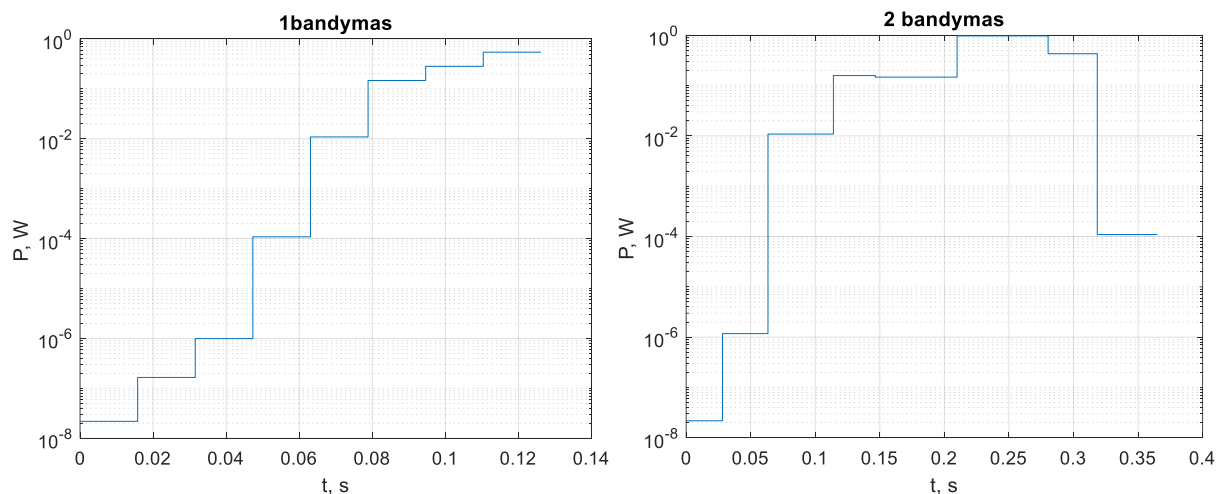
Mikrovaldiklyje suprogramuotas testinis srovės profilis. Atskirų rezistorių įjungimo-išjungimo laikai užfiksuoti naudojantis loginiu analizatoriumi (3.16 pav.).



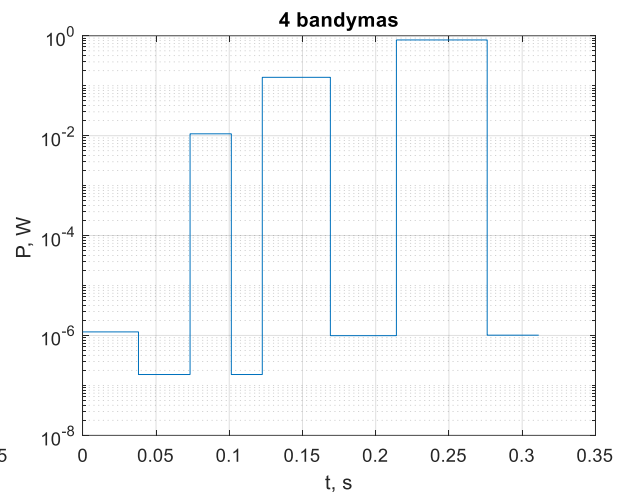
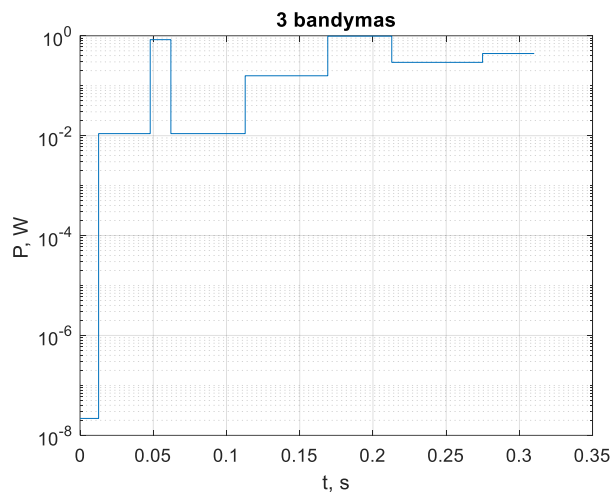
3.16 pav. Dinaminės apkrovos rezistorių valdymo signalai

Remiantis apkrovos rezistorių valdymo signalų laikiniais matavimais bei žinant maitinimo įtampą ($V_{CC} = 3,3V$) ir rezistorių nominalias varžas, analitiniu būdu randama teorinė galios kitimo laikinė diagrama. Bandymui atlikti parinkti 4 skirtingi vartojamos galios profiliai siekiant imituoti įvairias situacijas.

Matavimas atliekamas dviem prietaisais: naujai sukurtu galios analizatoriumi bei tradiciniu, plačiausiai paplitusiu metodu – osciloskopu šunto varžomis (naudojamos trys skirtingos varžos – 10Ω , 100Ω , $1 k\Omega$). 3.17 ir 3.18 pav. pateikti testiniai galios kitimo profiliai, naudoti bandymų metu. Tyrime naudojamas Tektronix DPO4054B skaitmeninis 8 bitų vertikalios skyros osciloskopas, signalas vidurkinamas 16 atskaitų langu.

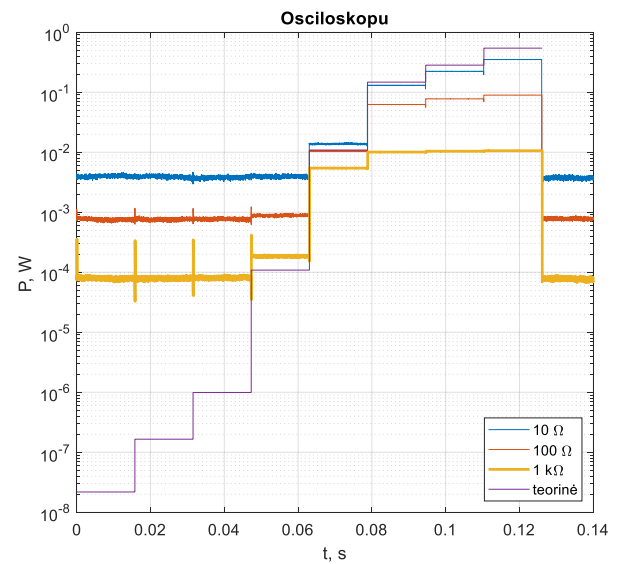
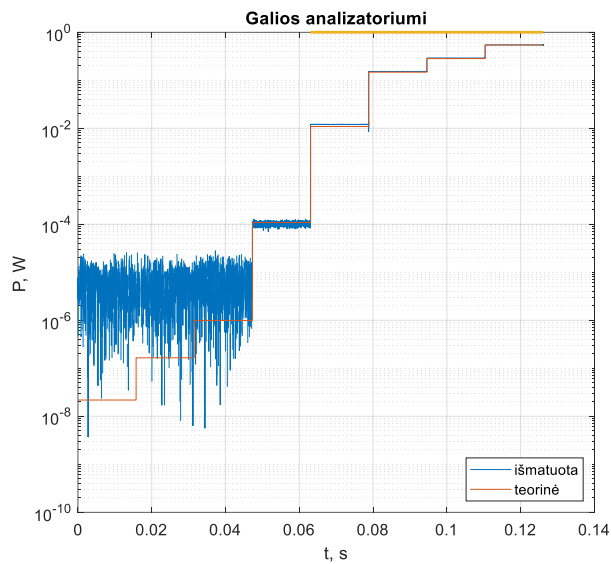


3.17 pav. Testiniai galios kitimo profiliai – 1-as ir 2-as bandymai

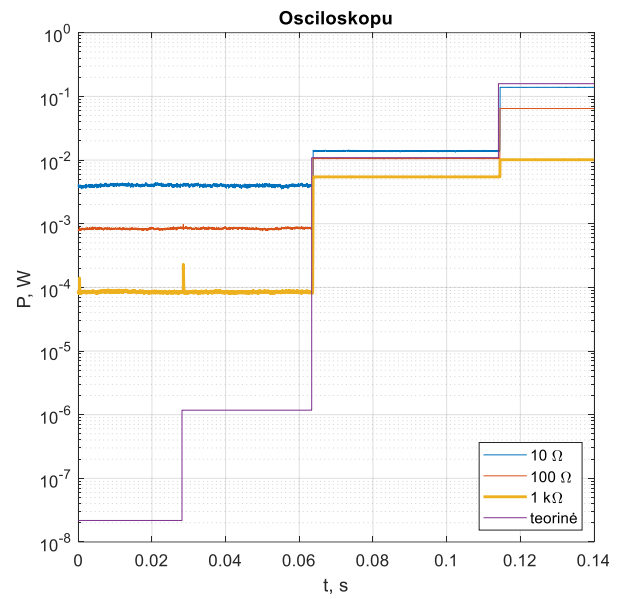
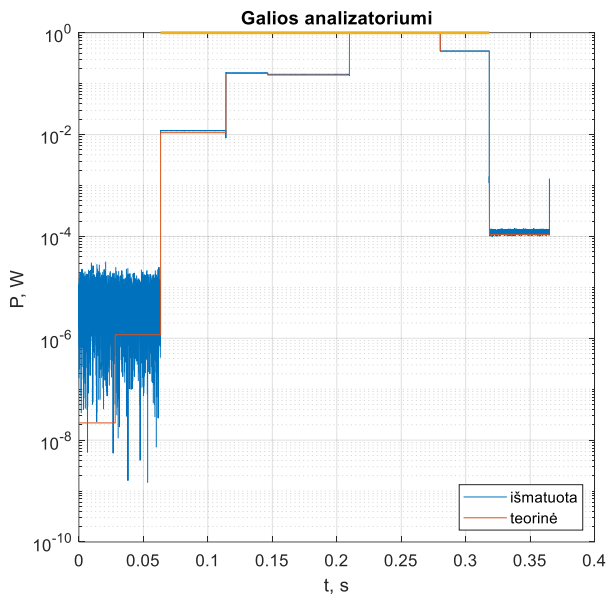


3.18 pav. Testiniai galios kitimo profiliai – 3-as ir 4-as bandymai

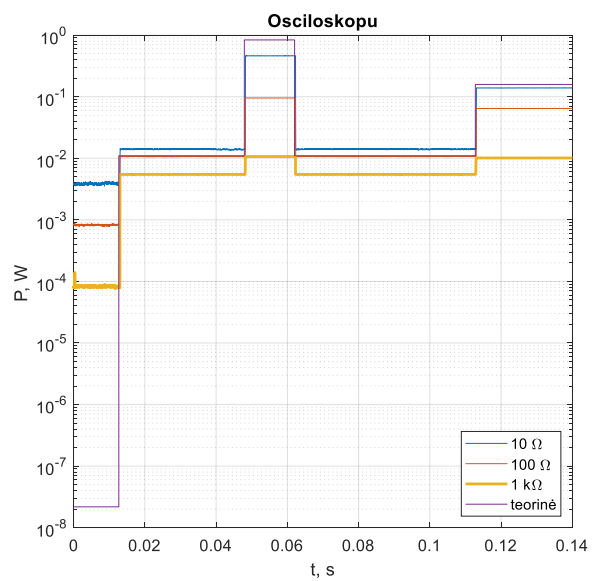
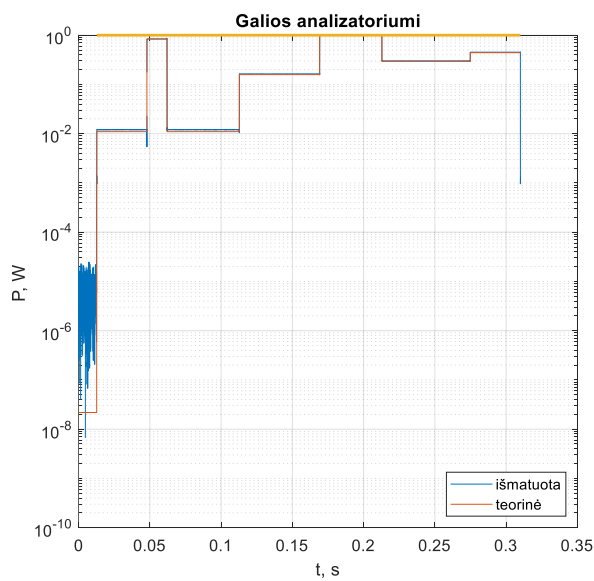
Toliau pateikti 1-ojo galios kitimo profilio matavimų rezultatai:



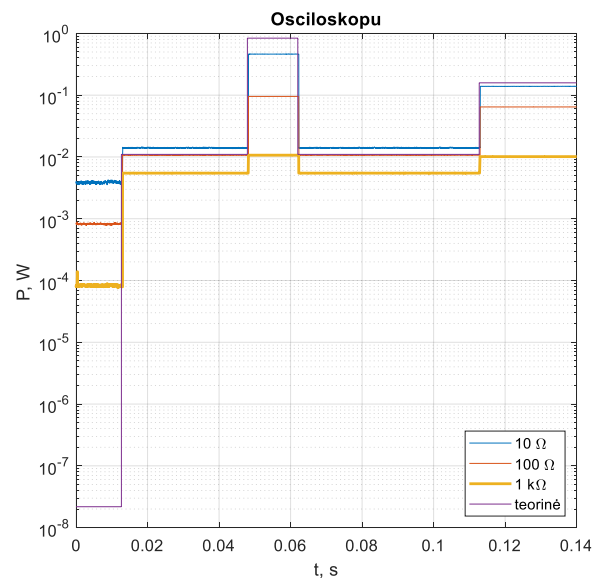
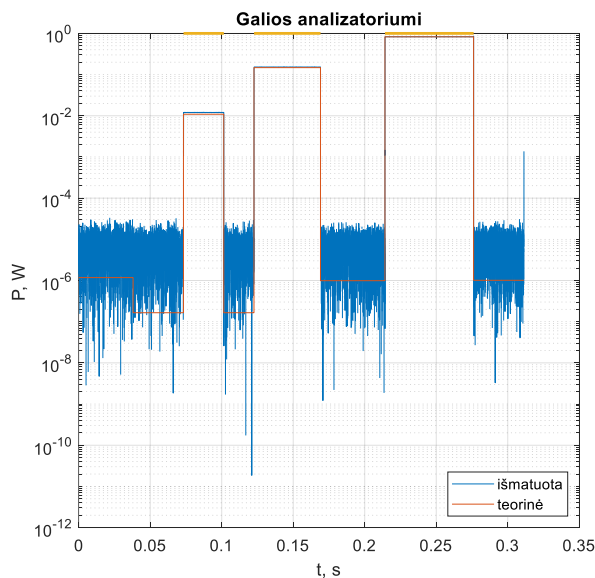
3.19 pav. 1-ojo testinio galios kitimo profilio matavimo rezultatai. Analizatoriaus $f_s = 128$ kSps, osciloskopo $f_s = 5$ MSps



3.20 pav. 2-ojo testinio galios kitimo profilio matavimo rezultatai. Analizatoriaus $f_s = 128$ kSps, osciloskopo $f_s = 1$ MSps



3.21 pav. 3-ojo testinio galios kitimo profilio matavimo rezultatai. Analizatoriaus $f_s = 128$ kSps, osciloskopo $f_s = 1$ MSps

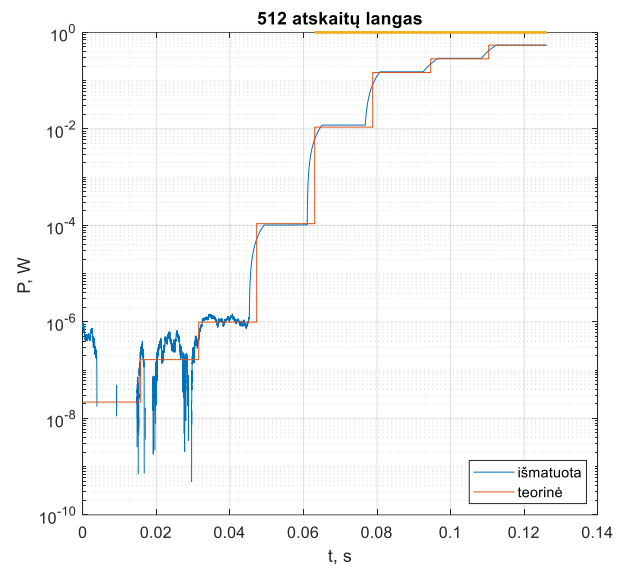
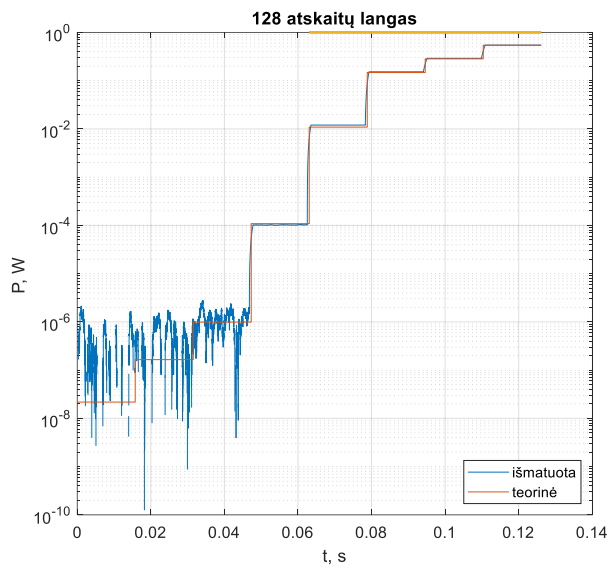


3.22 pav. 4-ojo testinio galios kitimo profilio matavimo rezultatai. Analizatoriaus $f_s = 128$ kSps, osciloskopo $f_s = 1$ MSps

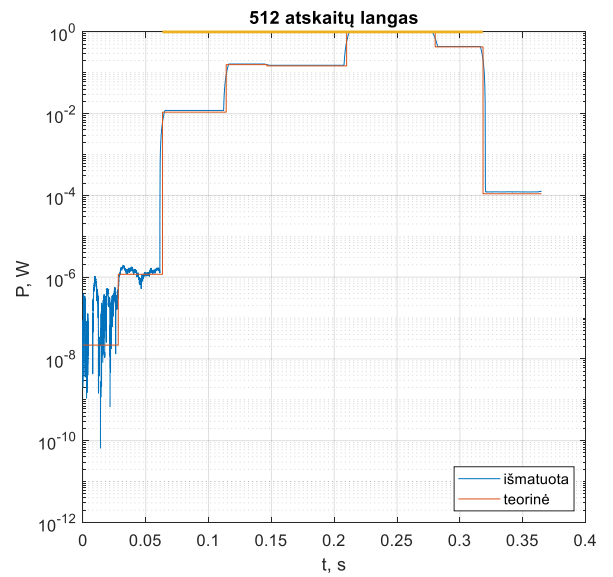
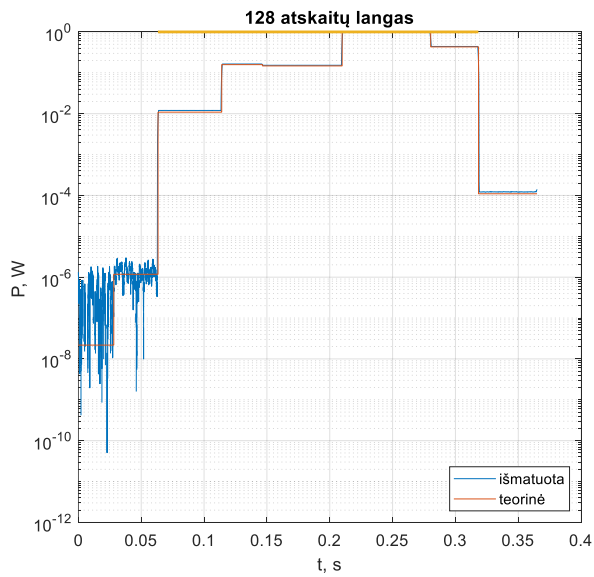
Kaip matyti iš 3.19-3.22 pav. tiriamuoju analizatoriumi gautas galios kitimo profilis visais bandymais tiksliai atitinka teoriškai suskaičiuotą galią didelių srovių matavimo intervale (horizontali geltona linija grafikų viršuje žymi didelių srovių matavimo dalies veikimą), o mažų srovių diapazone gaunamas gana nemažas triukšmas.

Tuo tarpu iš bandymų su osciloskopu rezultatų matyti, kad naudojant $1\text{ k}\Omega$ šuntą galima stebėti ne mažesnės nei $200\mu\text{W}$ galios kitimą (tai atitinka $60,6\ \mu\text{A}$ srovę prie $3,3\text{ V}$ maitinimo įtampos). Reikia paminėti, kad matavimo metu osciloskopo vertikalė skyra buvo nustatyta tokia, kad matuojamas signalas nebūtų ribojamas visame matavimo intervale. Taigi, jei srovės kitimo dinaminis diapazonas nebūtų toks didelis būtų galima pasiekti geresnę matavimo skyrą. Matuojant su $1\text{ k}\Omega$ rezistoriumi galiai viršijus 10 mW pats matavimo šuntas pradeda riboti srovę, dėl šios priežasties didesnių galių dalyje gaunama tiesė, srovės išmatuoti neįmanoma. Tuo tarpu pasirinkus mažesnę, 10 ar $100\ \Omega$ šuntą, galios kitimą galima stebėti nuo 10 mW , tačiau esant mažesnėms galioms osciloskopui nepakanka jautrumo tikslesniam matavimui atlikti.

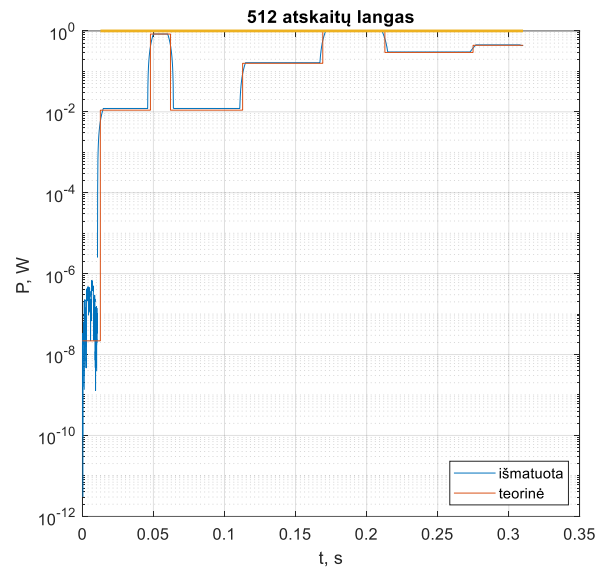
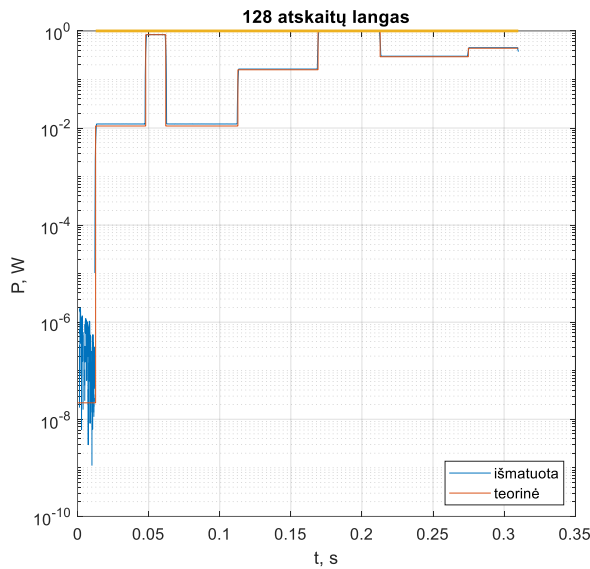
Analizatoriaus triukšmų problemą mažų galių srityje bandoma išspręsti slenkančio vidurkio filtru su 128 ir 512 atskaitų langu, stebima kaip filtras įtakoja matavimų rezultatus.



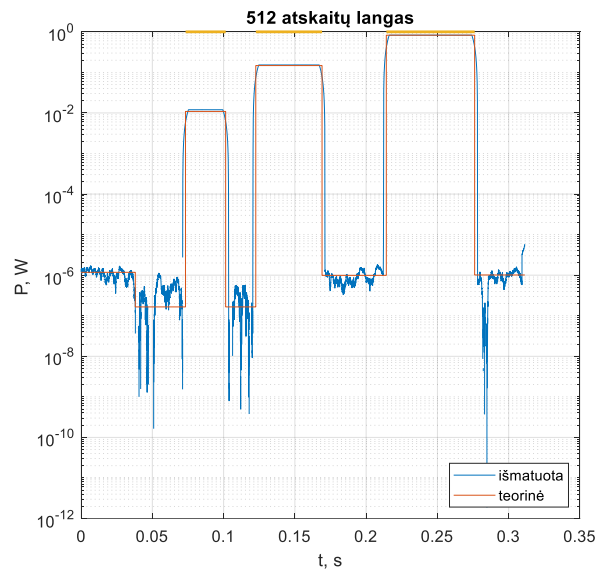
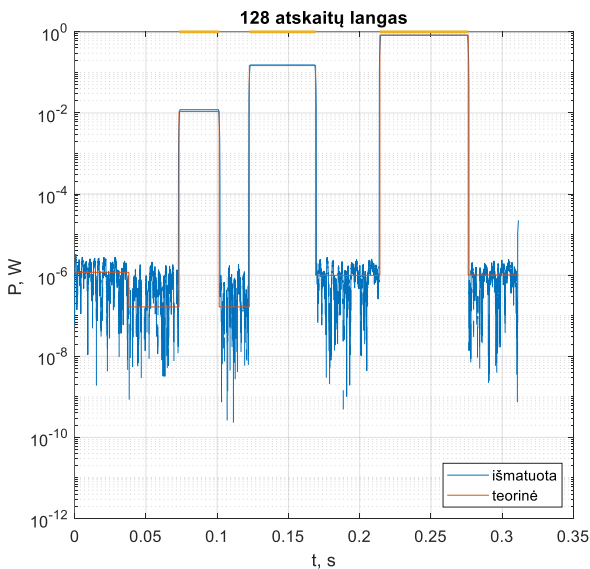
3.23 pav. Slenkančio vidurkio filtro panaudojimas 1-ojo signalo filtravimui



3.24 pav. Slenkančio vidurkio filtro panaudojimas 2-ojo signalo filtravimui



3.25 pav. Slenkančio vidurkio filtro panaudojimas 3-ojo signalo filtravimui



3.26 pav. Slenkančio vidurkio filtro panaudojimas 4-ojo signalo filtravimui

Kaip matyti iš 3.23-3.26 pav. slenkančio vidurkio filtras gana efektyviai nuslopina triukšmą mažų galių dalyje, visais atvejais triukšmo amplitudė sumažėja iki $90 \mu\text{W}$ ar labiau. Tačiau, tuo pačiu yra iškraipomi ir didesnių galių kitimo frontai. Siekiant objektyviau įvertinti gautus rezultatus atliekamas energijos skaičiavimas kiekviename matavimo intervale – palyginamas teorinis energijos kiekis su išmatuotu. Energijos skaičiavimas atliekamas MATLAB programa, kiekvieną galios kitimo intervalą integruojant su *trapz()* funkcija. Apskaičiuojamos išmatuotos energijos absoliutinės (Δx) ir santykinės (ϵ) paklaidos, skaičiavimų rezultatai pateikti toliau esančiose lentelėse: **3-6** lentelėse – matuojant analizatoriumi, **7-10** lentelėse - matavimus atliekant osciloskopu.

3 lentelė. 1-ojo galios kitimo profilio energijos intervaluose matuojant analizatoriumi

Intervalas	Analitinis skaič.	Analizatorius			Analizatorius (128 atskaitų langas)			Analizatorius (512 atskaitų langas)		
	xt, J	xi, J	$\Delta x = x_i - x_t$, J	$\epsilon = \Delta x / x_i$	xi, J	$\Delta x = x_i - x_t$, J	$\epsilon = \Delta x / x_i$	xi, J	$\Delta x = x_i - x_t$, J	$\epsilon = \Delta x / x_i$
1	3,43E-10	2,23E-09	1,88E-09	85%	2,16E-09	1,82E-09	84%	2,10E-09	1,76E-09	84%
2	2,60E-09	2,63E-09	2,48E-11	1%	2,92E-09	3,21E-10	11%	3,13E-09	5,33E-10	17%
3	1,56E-08	1,85E-08	2,86E-09	15%	3,03E-08	1,47E-08	48%	6,78E-08	5,22E-08	77%
4	1,71E-06	1,82E-06	1,06E-07	6%	3,17E-06	1,45E-06	46%	7,59E-06	5,88E-06	77%
5	1,72E-04	1,90E-04	1,87E-05	10%	2,06E-04	3,39E-05	16%	2,54E-04	8,21E-05	32%
6	2,32E-03	2,40E-03	8,58E-05	4%	2,40E-03	8,55E-05	4%	2,40E-03	8,45E-05	4%
7	4,46E-03	4,57E-03	1,14E-04	2%	4,58E-03	1,25E-04	3%	4,63E-03	1,68E-04	4%

4 lentelė. 2-ojo galios kitimo profilio energijos intervaluose matuojant analizatoriumi

Intervalas	Analitinis skaič.	Analizatorius			Analizatorius (128 atskaitų langas)			Analizatorius (512 atskaitų langas)		
	xt, J	xi, J	$\Delta x = x_i - x_t$, J	$\epsilon = \Delta x / x_i$	xi, J	$\Delta x = x_i - x_t$, J	$\epsilon = \Delta x / x_i$	xi, J	$\Delta x = x_i - x_t$, J	$\epsilon = \Delta x / x_i$
1	6,13E-10	4,01E-09	3,39E-09	85%	4,39E-09	3,78E-09	86%	4,86E-09	4,25E-09	87%
2	4,14E-10	8,19E-07	8,19E-07	100%	1,93E-06	1,93E-06	100%	6,41E-06	6,41E-06	100%
3	5,52E-04	6,14E-04	6,18E-05	10%	6,29E-04	7,65E-05	12%	6,81E-04	1,29E-04	19%
4	5,13E-03	5,31E-03	1,78E-04	3%	5,29E-03	1,60E-04	3%	5,23E-03	9,94E-05	2%
5	9,35E-03	9,72E-03	3,64E-04	4%	9,80E-03	4,50E-04	5%	1,01E-02	7,62E-04	8%
6	6,86E-02	6,87E-02	1,47E-04	0%	6,86E-02	1,42E-05	0%	6,81E-02	4,94E-04	1%
7	1,64E-02	1,67E-02	3,35E-04	2%	1,67E-02	3,50E-04	2%	1,68E-02	3,86E-04	2%

5 lentelė. 3-ojo galios kitimo profilio energijos intervaluose matuojant analizatoriumi

Intervalas	Analitinis skaič.	Analizatorius			Analizatorius (128 atskaitų langas)			Analizatorius (512 atskaitų langas)		
	xt, J	xi, J	$\Delta x = x_i - x_t$, J	$\epsilon = \Delta x / x_i$	xi, J	$\Delta x = x_i - x_t$, J	$\epsilon = \Delta x / x_i$	xi, J	$\Delta x = x_i - x_t$, J	$\epsilon = \Delta x / x_i$
1	2,76E-10	6,76E-10	3,99E-10	59%	1,04E-06	1,04E-06	100%	5,55E-06	5,55E-06	100%
2	3,88E-04	4,26E-04	3,79E-05	9%	4,97E-04	1,09E-04	22%	8,01E-04	4,13E-04	52%
3	1,18E-02	1,18E-02	1,96E-05	0%	1,16E-02	1,82E-04	2%	1,10E-02	8,00E-04	7%
4	5,58E-04	6,60E-04	1,01E-04	15%	7,59E-04	2,01E-04	26%	1,12E-03	5,67E-04	50%
5	8,93E-03	9,23E-03	3,05E-04	3%	9,31E-03	3,85E-04	4%	9,56E-03	6,36E-04	7%
6	4,30E-02	4,31E-02	1,07E-04	0%	4,29E-02	7,49E-05	0%	4,24E-02	6,41E-04	2%
7	1,82E-02	1,87E-02	4,89E-04	3%	1,88E-02	5,85E-04	3%	1,91E-02	8,98E-04	5%

6 lentelė. 4-ojo galios kitimo profilio energijos intervaluose matuojant analizatoriumi

Intervalas	Analitinis skaič.	Analizatorius			Analizatorius (128 atskaitų langas)			Analizatorius (512 atskaitų langas)		
	xt, J	xi, J	$\Delta x = x_i - x_t$, J	$\epsilon = \Delta x / x_i$	xi, J	$\Delta x = x_i - x_t$, J	$\epsilon = \Delta x / x_i$	xi, J	$\Delta x = x_i - x_t$, J	$\epsilon = \Delta x / x_i$
1	4,48E-08	4,22E-08	2,52E-09	6%	4,24E-08	2,39E-09	6%	4,17E-08	3,03E-09	7%
2	5,81E-09	9,45E-09	3,64E-09	39%	1,14E-06	1,13E-06	99%	5,62E-06	5,61E-06	100%
3	3,07E-04	3,37E-04	3,04E-05	9%	3,35E-04	2,81E-05	8%	3,26E-04	1,91E-05	6%
4	3,49E-09	6,51E-07	6,47E-07	99%	1,60E-05	1,60E-05	100%	7,74E-05	7,74E-05	100%
5	6,85E-03	7,08E-03	2,30E-04	3%	7,05E-03	2,00E-04	3%	6,94E-03	8,55E-05	1%
6	4,46E-08	5,97E-06	5,93E-06	99%	1,07E-04	1,07E-04	100%	4,74E-04	4,74E-04	100%
7	5,12E-02	5,13E-02	1,11E-04	0%	5,11E-02	6,16E-05	0%	5,05E-02	6,81E-04	1%

7 lentelė. 1-ojo galios kitimo profilio energijos intervaluose matuojant osciloskopu

Intervalas	Analitinis skaič.	Osciloskopas (10Ω šuntas)			Osciloskopas (100Ω šuntas)			Osciloskopas (1kΩ šuntas)		
	xt, J	xi, J	$\Delta x = x_i - x_t$, J	$\epsilon = \Delta x / x_i$	xi, J	$\Delta x = x_i - x_t$, J	$\epsilon = \Delta x / x_i$	xi, J	$\Delta x = x_i - x_t$, J	$\epsilon = \Delta x / x_i$
1	3,43E-10	6,30E-05	6,30E-05	100%	1,20E-05	1,20E-05	100%	1,25E-06	1,25E-06	100%
2	2,60E-09	6,18E-05	6,18E-05	100%	1,21E-05	1,21E-05	100%	1,25E-06	1,25E-06	100%
3	1,56E-08	6,00E-05	6,00E-05	100%	1,22E-05	1,22E-05	100%	1,28E-06	1,27E-06	99%
4	1,71E-06	6,27E-05	6,10E-05	97%	1,40E-05	1,23E-05	88%	2,91E-06	1,20E-06	41%
5	1,72E-04	2,22E-04	5,08E-05	23%	1,66E-04	5,44E-06	3%	8,56E-05	8,61E-05	101%
6	2,32E-03	2,06E-03	2,58E-04	13%	9,86E-04	1,33E-03	135%	1,58E-04	2,16E-03	1362%
7	4,46E-03	3,52E-03	9,37E-04	27%	1,22E-03	3,24E-03	265%	1,64E-04	4,30E-03	2617%

8 lentelė. 2-ojo galios kitimo profilio energijos intervaluose matuojant osciloskopu

Intervalas	Analitinis skaič.	Osciloskopas (10Ω šuntas)			Osciloskopas (100Ω šuntas)			Osciloskopas (1kΩ šuntas)		
	xt, J	xi, J	$\Delta x = x_i - x_t$, J	$\epsilon = \Delta x / x_i$	xi, J	$\Delta x = x_i - x_t$, J	$\epsilon = \Delta x / x_i$	xi, J	$\Delta x = x_i - x_t$, J	$\epsilon = \Delta x / x_i$
1	6,13E-10	1,13E-04	1,13E-04	100%	2,35E-05	2,35E-05	100%	2,39E-06	2,39E-06	100%
2	4,14E-10	1,40E-04	1,40E-04	100%	2,97E-05	2,97E-05	100%	2,98E-06	2,98E-06	100%
3	5,52E-04	6,99E-04	1,47E-04	21%	5,33E-04	1,92E-05	4%	2,74E-04	2,78E-04	102%
4	5,13E-03	4,44E-03	6,89E-04	16%	2,07E-03	3,06E-03	148%	3,26E-04	4,80E-03	1475%
5	9,35E-03	8,28E-03	1,07E-03	13%	3,97E-03	5,38E-03	135%	6,38E-04	8,71E-03	1365%
6	6,86E-02	3,53E-02	3,33E-02	94%	6,83E-03	6,18E-02	904%	7,54E-04	6,78E-02	8999%
7	1,64E-02	1,16E-02	4,76E-03	41%	3,28E-03	1,31E-02	399%	4,02E-04	1,60E-02	3977%

9 lentelė. 3-ojo galios kitimo profilio energijos intervaluose matuojant osciloskopu

Intervalas	Analitinis skaič.	Osciloskopas (10Ω šuntas)			Osciloskopas (100Ω šuntas)			Osciloskopas (1kΩ šuntas)		
	xt, J	xi, J	$\Delta x = x_i - x_t$, J	$\epsilon = \Delta x / x_i$	xi, J	$\Delta x = x_i - x_t$, J	$\epsilon = \Delta x / x_i$	xi, J	$\Delta x = x_i - x_t$, J	$\epsilon = \Delta x / x_i$
1	2,76E-10	4,91E-05	4,91E-05	100%	1,04E-05	1,04E-05	100%	1,05E-06	1,05E-06	100%
2	3,88E-04	4,91E-04	1,03E-04	21%	3,72E-04	1,57E-05	4%	1,91E-04	1,97E-04	103%
3	1,18E-02	6,37E-03	5,43E-03	85%	1,32E-03	1,05E-02	795%	1,49E-04	1,17E-02	7816%
4	5,58E-04	8,44E-04	2,86E-04	34%	5,66E-04	7,96E-06	1%	2,79E-04	2,79E-04	100%
5	8,93E-03	7,80E-03	1,13E-03	15%	3,62E-03	5,31E-03	147%	5,69E-04	8,36E-03	1468%
6	4,30E-02	2,20E-02	2,10E-02	95%	4,24E-03	3,88E-02	914%	4,68E-04	4,25E-02	9098%
7	1,82E-02	1,43E-02	3,91E-03	27%	4,87E-03	1,34E-02	275%	6,47E-04	1,76E-02	2717%

10 lentelė. 4-ojo galios kitimo profilio energijos intervaluose matuojant osciloskopu

Intervalas	Analitinis skaič.	Osciloskopas (10Ω šuntas)			Osciloskopas (100Ω šuntas)			Osciloskopas (1kΩ šuntas)		
	xt, J	xi, J	$\Delta x = x_i - x_t$, J	$\epsilon = \Delta x / x_i$	xi, J	$\Delta x = x_i - x_t$, J	$\epsilon = \Delta x / x_i$	xi, J	$\Delta x = x_i - x_t$, J	$\epsilon = \Delta x / x_i$
1	4,48E-08	1,44E-04	1,44E-04	100%	3,17E-05	3,16E-05	100%	3,38E-06	3,33E-06	99%
2	5,81E-09	1,34E-04	1,34E-04	100%	2,92E-05	2,92E-05	100%	3,29E-06	3,29E-06	100%
3	3,07E-04	3,88E-04	8,08E-05	21%	2,95E-04	1,20E-05	4%	1,53E-04	1,54E-04	100%
4	3,49E-09	7,93E-05	7,92E-05	100%	2,07E-05	2,07E-05	100%	2,47E-06	2,46E-06	100%
5	6,85E-03	6,05E-03	7,99E-04	13%	2,89E-03	3,96E-03	137%	4,67E-04	6,38E-03	1366%
6	4,46E-08	1,78E-04	1,78E-04	100%	5,15E-05	5,15E-05	100%	5,30E-06	5,25E-06	99%
7	5,12E-02	2,84E-02	2,28E-02	80%	5,89E-03	4,53E-02	769%	6,61E-04	5,05E-02	7643%

Kaip matyti iš analizatoriumi išmatuotų energijų skaičiavimo (3-6 lentelės) didelių srovių intervale santykinė matavimo paklaida neviršija 4 %. Tuo tarpu matuojant mažas sroves paklaida gali siekti ir 100%, kai matuojama energija siekia $4,14E-10$ (4 lentelė, 2 intervalas). Panaudojus slenkančio vidurkio filtrą nė vienu matavimo tikslumo nepavyko pagerinti. Lyginant absoliutines matavimų vertes matyti, kad panaudojus vidurkinimą gaunamas didesnis energijos kiekis nei skaičiuojant su pradiniais duomenimis. Todėl ir stebimas santykinės paklaidos didėjimas. Prie paklaidų šaltinių reikėtų įtraukti ir testinės apkrovos rezistorių tolerancijas, tačiau prietaisai, kurie galėtų išmatuoti šimtų $M\Omega$ eilės varžas nebuvo prieinami, todėl rezistorių tolerancijos šiuo atveju nebuvo vertintos. Tuo tarpu analizuojant osciloskopo matavimo duomenis (7-10 lentelės) matyti, kad paklaidos yra didesnės nei tuose pačiuose intervaluose atliktuose matavimuose analizatoriumi. Matavimo tikslumą dar būtų galima padidinti osciloskope nustatius didesnę vertikalią skyrą, tačiau tokiu atveju nebūtų apimamas visas dinaminis diapazonas. Tiksliausią matavimą pavyko atlikti intervaluose, kurių energija siekia $1,72E-04$ – $5,58E-04$ J. Šiame intervale matavimo paklaida buvo 1-4 %.

Išvados

1. Sudaryta srovės matavimo metodika leidžianti matuoti sroves nuo $\pm 1\text{nA}$ iki $\pm 600\text{ mA}$ kombinuojant šunto ampermetro (srovės intervalė $\pm 2\div 600\text{ mA}$) ir grįžtamojo ryšio ampermetro (srovės iki $\pm 2\text{ mA}$) matavimo metodus.
2. Nustatyti keitiklio analogas-kodas savųjų triukšmų dydis, kuris lygus $17,72\ \mu\text{V}_{\text{RMS}}$, kai diskretizacijos dažnis yra maksimalus ($f_d = 144\text{ KHz}$).
3. Nustatyti įtampos matavimo kanalo suminiai triukšmai dažnių juostoje iki 72 kHz , kurie lygūs $1,59\ \mu\text{V}_{\text{RMS}}$ (daugiau nei 11 kartų mažesni nei ADC triukšmai, taigi stiprintuvas reikšmingos įtakos bendriems sistemos triukšmams neturi).
4. Išmatuotas įtampos matavimo kanalo juostos plotis, kuris lygus $3,25\text{ MHz}$ (-3 dB), kurio pakanka matavimams dažnių juostoje iki 72 kHz .
5. Išmatuotas didelių srovių matavimo juostos plotis -3 dB lygyje yra $2,72\text{ MHz}$, tuo tarpu iki $\sim 350\text{ kHz}$ ADCh visiškai tiesi, todėl matuojamų dažnių juostoje (iki 72 kHz) operacinio stiprintuvo sąlygotų amplitudės iškraipymų nebus.
6. Nustatyta suminių didelių srovių ($\pm 2\div 600\text{ mA}$) matavimo intervalo triukšmų įtampa diapazone iki 72 kHz yra $38,261\ \mu\text{V}_{\text{RMS}}$, vyraujantys triukšmai – mirgėjimo ($1/f$). Triukšmų efektinė vertė dvigubai viršija ADC savuosius triukšmus, taigi jie daro reikšmingą įtaką galutiniam matavimo rezultatui.
7. Mažų srovių (nuo $\pm 1\text{nA}$ iki $\pm 600\text{ mA}$) stiprintuvo juostos plotis siekia 958 kHz (-3 dB), iki $\sim 230\text{ kHz}$ ADCh tiesinė (jos pakanka matavimams iki 72 kHz juostoje atlikti).
8. Bendra mažų srovių (nuo $\pm 1\text{nA}$ iki $\pm 600\text{ mA}$) matavimo intervalo triukšmų galia diapazone iki 72 kHz yra $7,2\ \mu\text{V}_{\text{RMS}}$ (reikšmingos įtakos galutiniam rezultatui nėra, nes $\sim 2,5$ karto mažesni nei ADC savieji triukšmai).
9. Suprojektuota ir pagaminta dinaminė apkrova, skirta matavimo sistemos testavimui. Apkrovos dydis keičiamas nuo $3,6\text{ nA}$ iki 297 mA .
10. Maksimalus išmatuotas įtampos kritimas matavimo diapazonų persijungimo metu neviršija $0,18\text{ V}$, kai DUT maitinimo įtampa $3,3\text{ V}$, o srovė 297 mA .
11. Išmatuotas ENOB visame diskretizacijos dažnių diapazone siekia $15,6\text{-}17,5$ bito. Panaudojus slenkantį vidurkį jį galima padidinti iki $16,5\text{-}20,5$ bito, priklausomai nuo parinkto lango ir diskretizacijos dažnio dydžio.
12. Naudojant $10\ \Omega$ ir $100\ \Omega$ šuntą osciloskopu fiksuojami tik didesni nei $3,3\text{ mA}$ srovės šuoliai. Mažesnių srovių nepavyksta išmatuoti dėl parinktos mažos osciloskopo skyros (kad jos pakaktų visam apkrovos kitimo dinaminiam diapazonui apimti).
13. Bandymų metu didelių srovių ($\pm 2\div 600\text{ mA}$) intervalė santykinė energijos matavimo paklaida neviršija 4% , tuo tarpu matuojant mažas sroves paklaida siekia iki 100% (kai matuojamas tikrasis energijos dydis mažiau nei $44,6\text{ nJ}$, o išmatuotas dydis - $5,97\ \mu\text{J}$).
14. Siūloma tęsti prietaiso matavimus ir bandymus ieškant galimų triukšmų šaltinių plokštėje, kad būtų galima padidinti matavimo jautrumą. Teoriškai, šiuo metu mažų srovių matavimo jautrumas turėtų siekti 28 nA (kai ENOB 17 bitų), tačiau bandymu metu nebuvo pasiektas didesnis nei 300 nA jautrumas.

Literatūros sąrašas

- [1] M. T. I. Brant Ivey, „Low-Power Design Guide - Application Note“.
- [2] „STM32 Ultra Low Power Microcontrollers (MCUs) - STMicroelectronics“. [Interaktyvus]. Available at: <https://www.st.com/en/microcontrollers-microprocessors/stm32-ultra-low-power-mcus.html>. [Žiūrėta: 27-saus-2019].
- [3] Keysight Technologies, „Application Note: Characterize, Validate, and Debug Advanced Devices with Precision Dynamic Current Measurements“. 2018.
- [4] Keithley Instruments, *Low Level Measurements Handbook - 7th edition. Precision DC Current, Voltage, and Resistance Measurements*. 2013.
- [5] P. E. Bill Drafts, „Methods of Current Measurement“.
- [6] A. Al Mortuza *et al.*, „Pico-current Measurement Challenges and Remedies: A Review“, *Univers. J. Eng. Sci.*, t. 5, nr. 4, p. 57–63, 2017.
- [7] S. Ziegler, R. C. Woodward, H. H.-C. Iu, ir L. J. Borle, „Current Sensing Techniques: A Review“, *IEEE Sens. J.*, t. 9, nr. 4, p. 354–376, bal. 2009.
- [8] „Principles of Current Sensors - Hioki“. [Interaktyvus]. Available at: <https://www.hioki.com/en/products/listUse/?category=17>. [Žiūrėta: 15-saus-2019].
- [9] „Technical Information for DC Current Sensor | Technical Information | Multi Measuring Instruments Co.,Ltd.“ [Interaktyvus]. Available at: http://www.multimic.com/e/technical/dc_techinfo.html. [Žiūrėta: 30-kov-2019].
- [10] Keysight Technologies, „How to Select the Right Current Probe - Application Note“.
- [11] „White Paper-Sensing Elements for Current Measurements Sensing Elements for Current Measurements“.
- [12] E. Margan, „Transimpedance Amplifier Analysis“.
- [13] P. T. Patil, G. K. Mukherjee, A. K. Sharma, ir R. R. Mudholkar, „High-Gain Transimpedance Amplifier (TIA) for Night Airglow Photometer“, 2009.
- [14] J. Pearson, „Analog Dialogue 47-07, July (2013) -Compensating Current Feedback Amplifiers in Photocurrent Applications“, 2013.
- [15] F. R. Leon ir A. F. Hebard, „Low-current Noise Measurement Techniques“.
- [16] „Keithley DMM7510 7½-Digit Graphical Sampling Multimeter | Tektronix“. [Interaktyvus]. Available at: <https://www.tek.com/tektronix-and-keithley-digital-multimeter/dmm7510>. [Žiūrėta: 31-gruodž-2017].
- [17] „Keysight N6705C DC Power Analyzer, Modular, 600 W, 4 Slots | Keysight (formerly Agilent’s Electronic Measurement)“. [Interaktyvus]. Available at:

- <https://www.keysight.com/en/pd-2747858-pn-N6705C/dc-power-analyzer-modular-600-w-4-slots?nid=-35714.1195294&cc=LT&lc=eng>. [Žiūrėta: 31-gruodž-2017].
- [18] R. Zhou ir G. Xing, „Nemo: A high-fidelity noninvasive power meter system for wireless sensor networks“, *Proceedings of the 12th international conference on Information processing in sensor networks - IPSN '13*, 2013, p. 317.
- [19] P. Dutta, M. Feldmeier, J. Paradiso, ir D. Culler, „Energy Metering for Free: Augmenting Switching Regulators for Real-Time Monitoring“, *2008 International Conference on Information Processing in Sensor Networks (ipsn 2008)*, 2008, p. 283–294.
- [20] J. Andersen ir M. T. Hansen, „Energy Bucket: A Tool for Power Profiling and Debugging of Sensor Nodes“, *2009 Third International Conference on Sensor Technologies and Applications*, 2009, p. 132–138.
- [21] „ADS1274 ADS1278 Quad/Octal, Simultaneous Sampling, 24-Bit Analog-to-Digital Converters“, 2007.
- [22] „Making Accurate Voltage Noise and Current Noise Measurements on Operational Amplifiers Down to 0.1Hz“, 2011.
- [23] B. Carter, „Op Amp Noise Theory and Applications“.
- [24] „How to Choose the Right Relay - National Instruments“. [Interaktyvus]. Available at: <http://www.ni.com/white-paper/2774/en/#toc1>. [Žiūrėta: 22-saus-2018].
- [25] H. Hashemi, „Transimpedance Amplifiers (TIA): Choosing the Best Amplifier for the Job“, 2015.
- [26] „Understanding Noise, ENOB, and Effective Resolution in Analog-to-Digital Converters“, 2012.
- [27] Bin Le, T. W. Rondeau, J. H. Reed, ir C. W. Bostian, „Analog-to-digital converters“, *IEEE Signal Process. Mag.*, t. 22, nr. 6, p. 69–77, lapkr. 2005.