

OPTINĖS GALIOS MATUOKLIO ĮĖJIMO PAKOPOS PROJEKTAVIMAS IR TYRIMAS

Edgaras KORSAKAS¹, Jevgenij CHARLAMOV²

Vilniaus Gedimino technikos universitetas, Vilnius, Lietuva
El. paštas: ¹edgaraskorsakas@yahoo.com; ²jevgenij.charlamov@vgtu.lt

Santrauka. Išanalizuota klasikinė pereinamosios varžos stiprintuvo (PVS) schema. Nustatyti stiprintuvo trūkumai, sudaryta patobulinta PVS schema. Išvestos klasikinės ir patobulintosios stiprintuvų schemų analitinės išraiškos, parodyta, kad patobulinto stiprintuvo išėjimo įtampos slinkis plačiame temperatūrų diapazone bus mažesnis. Atlikus eksperimentą gauti matavimų rezultatai parodė, kad patobulintos PVS schemos dinaminis diapazonas 4,5 dB didesnis negu klasikinės PVS schemos, temperatūroms esant nuo $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ iki $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Reikšminiai žodžiai: optinės galios matuoklis, pereinamosios varžos stiprintuvas, temperatūrinis stabilumas, optinis imtuvas.

Įvadas

Optinės galios matuokliai (OGM) yra skirti optinio signalo slopinimui optinės linijos skaidulose matuoti. Šie matavimai atliekami tiesiant naujas optines ryšių linijas arba nustatant gedimus jau nutiestose. Dažnai signalo slopinimas matuojamas veikiančiose optinėse linijose. Tai daroma į optinį galios matuoklį nukreipiant per šakotuvą 50 %, 5 % arba 1 % optinio signalo. Todėl reikalavimai, keliami OGM dinaminio diapazono apatinei ribai, yra iki dviejų eilių didesni nei duomenų perdavimo linijose naudojama signalų minimali galia. Kartais tenka matuoti signalo, pasiekiančio galutinį vartotoją, lygį, kuris penkiomis arba šešiomis dekadomis didesnis už optinės galios lygį matuojant slopinimą. Todėl optinės galios matuoklių dinaminis diapazonas turėtų viršyti 60 dB.

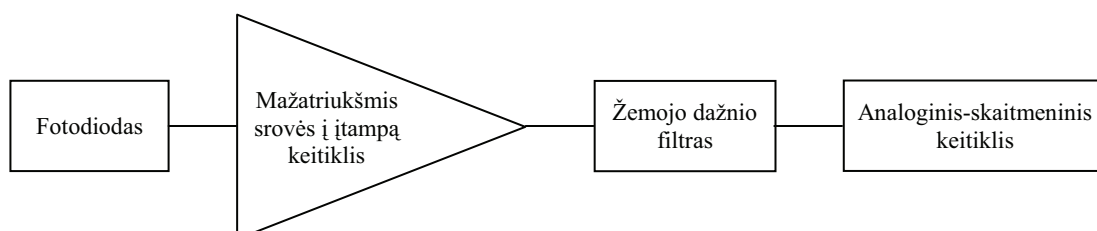
Projektuojant OGM įėjimo pakopą buvo nustatyta, kad didžiausią įtaką matavimų tikslumui turi temperatūros pokyčiai, o ne triukšmas. Triukšmas yra duomenų perdavimo linijų imtuvus ribojantis parametras (Hobbs 2009; Charlamov *et al.* 2012).

Darbo tikslas – rasti pagrindinius parametrus, turinčius įtakos OGM temperatūriniam stabilumui nuo $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ iki $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$ temperatūrose, ir pateikti sprendimą, kaip jį padidinti. Siekiant įsitikinti, kad siūlomas sprendimas pagerintų dabar naudojamų OGM mažiausią išmatuojamos galios lygį, reikia suprojektuoti optinio imtuvo maketą ir jį iširti.

Apibendrintoji optinės galios matuoklio struktūra

Siekiant išsiaiškinti veiksnius, trukdančius išplėsti OGM dinaminį diapazoną ir padidinti temperatūrinį stabilumą, pirmiausia reikia išanalizuoti matuoklio struktūrą ir kiekvienam jo blokui taikytinus ribojimus.

OGM įėjimo pakopos sandaros schema pateikta 1 pav. Joje fotodiodas (FD) optinį signalą verčia elektros srove. Ši srovė įteka į srovės į įtampą keitiklį, jame ji verčiama įtampa. Tai svarbiausioji įėjimo pakopos dalis, nes ji lemia OGM dinaminį diapazoną (Razavi 2003).



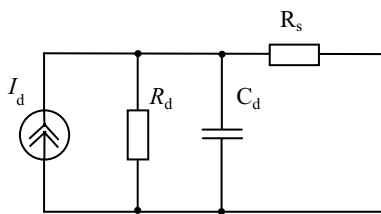
1 pav. Optinės galios matuoklio įėjimo pakopos sandaros schema

Fig. 1. Block diagram of the optical power meter front end

Toliau signalas patenka į jo dažnio filtrą, apribojantį sistemos praleidžiamųjų dažnių juostos plotį. Taip sumažinamos įtampos keitimo į skaitmeninį kodą paklaidos. Analoginio-skaitmeninio keitiklio išėjime gaunamas skaitmeninis kodas apdorojamas mikrovaldikliu ir atvaizduojamas indikatoriuje.

Fotodiodo dinaminis diapazonas

Į FD aktyviąją sritį patenkantys fotonai jame sukuria atgalinę fotosrovę. Fotodiodo ekvivalentinėje schemeje (2 pav.) šią srovę generuoja šaltinis I_d . Jei tarp FD išvadų yra potencialų skirtumas, per FD teka parazitinė tamsinė srovė, kurios stiprumas priklauso nuo atgalinės fotodiodo sandūros varžos R_d . Tamsinė srovė sumuojasi su fotosrove ir iškraipo matavimo rezultatus. Fotodiodo pn sandūros parazitinė talpa C_d riboja sistemos spartą. Ekvivalentinėje schemeje atvaizduota FD išvadų varža R_s . Dėl išvadų varžos susidaro įtampos daliklis R_s-R_d .



2 pav. Fotodiodo ekvivalentinė schema
Fig. 2. Equivalent circuit of the photodiode

Matuojant fotosrovę naudotinas kuo mažesnės įėjimo varžos srovės į įtampą keitiklis, nes R_d ir keitiklio įėjimo varža taip pat sudaro įtampos daliklį. Be to, mažiausios paklaidos gaunamos, kai fotodiodo išvadų potencialas yra vienodas (Texas Instruments 2011).

Idealiu atveju minimalų išmatuojamą optinės galios lygį lemia fotodiodo triukšmai. Jie apskaičiuojami pagal formulę

$$I_{tr} = \sqrt{\frac{4kTB}{R_d \parallel X_{cd}}}, \quad (1)$$

čia k – Bolcmano konstanta; T – temperatūra; B – dažnių juostos plotis; R_d – fotodiodo ekvivalentinė varža, veikiant atgalinei įtampai; X_{cd} – fotodiodo talpioji varža.

Skaičiavimams ir makete panaudotas fotodiodas, kurio atgalinė sandūros varža 298 K kambario temperatūroje yra 60 MΩ, o nustatytas optinio imtuvo dažnių juostos plotis 3 Hz. Pagal (1) formulę minimalus išmatuojamas optinės galios lygis nustatant 5% neapibrėžtį yra ~-92 dBm.

Kai temperatūrų diapazonas yra platus, apskaičiuoto minimalaus optinės galios lygio išmatuoti neįmanoma, nes

FD atgalinė sandūros varža priklauso nuo temperatūros, kaip tai apibūdina formulė (BurrBrown 2000)

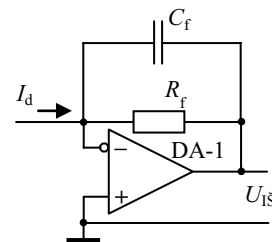
$$R_d = \frac{U_{VD}}{I_s e^{\frac{qU_{VD}}{nkT}} - 1}, \quad (2)$$

čia I_s – diodo soties srovė; q – elektrono krūvis; U_{VD} – įtampa, veikianti fotodiodą; n – sugerties koeficientas.

Taigi kintant R_d keičiasi tamsinė ir atitinkamai įėjimo slinkio srovės. Tai lemia papildomas matavimo paklaidas.

Dinaminio diapazono ribojimai dėl srovės į įtampą keitiklio išėjimo slinkio įtampos

Vienas iš galimų srovės į įtampą keitiklių įgyvendinimo variantų yra pereinamosios varžos stiprintuvas (PVS), kurio principinė elektrinė schema pateikta 3 paveiksle. PVS sudaro operacinis stiprintuvas DA-1, grįžtamojo ryšio varža R_f ir kondensatorius C_f . Tokio stiprintuvo maža įėjimo varža, o tiriamu atveju ji yra daug mažesnė nei R_d . Todėl galima laikyti, kad abu fotodiodo išvadai yra vienodo potencialo.



3 pav. Pereinamosios varžos stiprintuvas

Fig. 3. Transimpedance amplifier

3 pav. pateiktoje schemeje C_f riboja PVS praleidžiamųjų dažnių juostos plotį. Fotodiodo sukuriama fotosrovė yra kompensuojama srove, tekančia iš operacinio stiprintuvo išėjimo per grįžtamojo ryšio varžą R_f . Įtampos kritis varžoje R_f yra PVS išėjimo įtampa, apskaičiuojama pagal formulę

$$U_{īs} = I_d \cdot R_f, \quad (3)$$

čia $U_{īs}$ – PVS išėjimo įtampa; I_d – fotosrovė; R_f – grįžtamojo ryšio varža.

(3) formulė galioja tik idealiems operaciniams stiprintuvams, kurių įėjimo srovė lygi nuliui. Realiuose operaciniuose stiprintuvuose egzistuoja slinkio įtampos, sudarančios išėjimo įtampos paklaidas. Slinkio įtampos apskaičiuojamos taip:

$$U_{SII} = R_f \cdot I_{SI}, \quad (4)$$

čia U_{SII} – slinkio įtampa išėjime, atsirandanti dėl įėjimo srovių; I_{SI} – operacinio stiprintuvo įėjimo srovė.

Suminė įtampa ir jos komponentai pereinamosios varžos stiprintuvo išėjime aprašomi tokiomis išraiškomis:

$$U_{I\check{s}} = I_{VD} \cdot R_f + U_{SI}, \quad (5)$$

čia U_{SI} – suminė operacinio stiprintuvo slinkio įtampa išėjime:

$$U_{SI} = U_{SII} + U_{SIOamp}, \quad (6)$$

U_{SIOamp} – operacinio stiprintuvo išėjimo įtampos slinkis.

PVS paklaidos taip pat atsiranda dėl srovės ir įtampos triukšmų. Įėjimo pakopos įtampos sustiprinto triukšmo vertė apskaičiuojama taip:

$$A_{Utr} = U_{tr} \frac{Z_d + R_f}{Z_d}, \quad (7)$$

čia A_{Utr} – įtampos triukšmo vertė po stiprinimo; U_{tr} – operacinio stiprintuvo įtampos triukšmo vertė; Z_d – fotodiodo pilnutinė varža.

Įtampos triukšmas U_{tr} PVS išėjime, priklausantis nuo įėjimo srovės triukšmo, apskaičiuojamas taip:

$$U_{tr} = I_n \cdot R_d + U_{Itr}, \quad (8)$$

čia U_{Itr} – įėjimo srovės triukšmo dedamoji išėjimo įtampoje; I_n – įėjimo srovės triukšmas.

Dar vienas triukšmų šaltinis PVS yra grįžtamojo ryšio varža. Jos triukšmas aprašomas formule (Razavi 2003):

$$U_{Rtr} = \sqrt{4kTR_f B}. \quad (9)$$

Analizuojamu atveju daugiausia paklaidas lemia temperatūros pokytis. Kintant temperatūrai, keičiasi rezistoriaus vertė ir operacinio stiprintuvo įėjimo srovė, kartu ir operacinio stiprintuvo bei varžos triukšmų lygiai. Paklaida dėl elementų parametrų slinkio aprašoma taip:

$$U_{SSL} = \Delta t \left(R_f \partial_{Rf} \cdot I_{In} \partial_{In} \cdot \frac{\partial_{Rf}}{\partial_{Rd}} \right), \quad (10)$$

čia Δt – prietaiso veikimo temperatūrų diapazonas; I_{In} – operacinio stiprintuvo įėjimo srovė; ∂_{In} – operacinio stiprintuvo įėjimo srovės temperatūrinis koeficientas; ∂_{Rf} – grįžtamojo ryšio varžos temperatūrinis koeficientas; ∂_{Rd} – fotodiodo atgalinės sandūros varžos temperatūrinis koeficientas.

Operacinio stiprintuvo įėjimo srovės U_{SSL} dedamąją galima sumažinti suprojektavus įėjimo pakopą, kurios jautrumas temperatūros pokyčiams mažesnis.

Pereinamosios varžos stiprintuvai, kurio jautrumas temperatūros pokyčiui mažesnis

Iš atliktos analizės matyti, kad klasikinio PVS paklaidas lemia šie veiksniai:

- fotodiodo pilnutinės varžos temperatūrinis dreifas;
- grįžtamojo ryšio varžos temperatūrinis dreifas;
- operacinio stiprintuvo įėjimo srovės slinkio temperatūrinis dreifas.

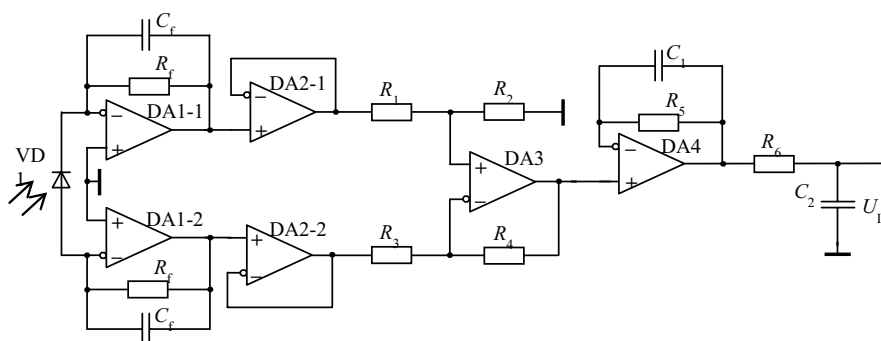
Operacinio stiprintuvo lemiamas paklaidas galima sumažinti taikant diferencinę schemą. Grįžtamojo ryšio varžų temperatūrinis dreifas gali būti sumažintas naudojant priešingų temperatūrinių koeficientų rezistorius. Fotodiodo atgalinės varžos temperatūrinį dreifą kompensuoti sudėtinga.

Siūloma diferencinę pereinamosios varžos stiprintuvo (DPVS) schema, pagerinanti PVS temperatūrinio stabilumo parametrus, pateikta 4 paveiksle. Šiame įtaise operacinis stiprintuvas (DA-1) naudojamas kaip diferencinė įėjimo pakopa. Operacinis stiprintuvas (DA-2) atlieka įtampos kartotuvo funkciją. Šis kartotuvus sumažina analoginės atimties schemos (DA-3) įtaką įėjimo pakopai. Po analoginės atimties įrenginio esantis aktyvusis žemojo dažnio filtras (DA-4) ir pasyvusis žemojo dažnio filtras apriboja analoginio skaitmeninio keitiklio įėjimo signalo dažnių juostą. Tokiu būdu yra sumažinamos paklaidos, atsirandančios diskretizuojant analoginį signalą.

DPVS paklaidos, susidaranti dėl elementų parametrų temperatūrinio dreifo, išreiškiamos taip:

$$U_{SSL} = \Delta t (2R_f \partial_{Rf} \cdot 2I_{In} \Delta \partial_{In}), \quad (11)$$

čia $\Delta \partial_{Rf}$ – grįžtamojo ryšio varžų temperatūrinių koeficientų skirtumas; $\Delta \partial_{In}$ – DA1 operacinių stiprintuvų įėjimo srovių temperatūrinių koeficientų skirtumas.



4 pav. Patobulinto pereinamosios varžos stiprintuvo schema

Fig. 4. Improved transimpedance amplifier schematics

Įėjimo pakopos vidutinė įtampa triukšmo vertė išreiškiama formule

$$\overline{Au_{tr}} = 2\sqrt{(U_{trDA1-1} - U_{trDA1-2})^2 \frac{Z_d + R_f}{Z_d} + \sqrt{(U_{trDA2-1} - U_{trDA2-2})^2}}, \quad (12)$$

čia $U_{trDAm-n}$ – operacinio stiprintuvo įtampas triukšmo vertė.

Pasiūlyto diferencinės pereinamosios varžos stiprintuvo išėjimo įtampas slinkis dėl srovės, tekančios į operacinių stiprintuvų DA1-1,2 įėjimus, apskaičiuojamas pagal formulę

$$U_{SI} = (I_{inDA1-1} - I_{inDA1-2}) \cdot 2R_f, \quad (13)$$

čia U_{SI} – slinkio įtampa operacinio stiprintuvo išėjime;

$I_{inDA1-1,2}$ – operacinio stiprintuvo įėjimo srovė.

Grįžtamojo ryšio varžų triukšmas patobulintame stiprintuve nusakomas formule

$$U_{Rtr} = \sqrt{8kTR_f B}. \quad (14)$$

Šioje formulėje neatsižvelgta į analoginės atimties schemas varžų triukšmą, nes jis daug kartų mažesnis už grįžtamojo ryšio varžų triukšmą.

Iš (11–14) formulių matyti, kad DPVS paklaidos, atsirandančios dėl įėjimo srovių slinkio, yra kompensuojamos, tačiau grįžtamojo ryšio varžos įtaka slinkio įtampai padvigubėja. Todėl didžiausią įtaką sistemos temperatūriniam stabilumui turi DA-1 operacinių stiprintuvų, R_f varžų ir analoginės atimties schemas varžų R_1 , R_2 , R_3 ir R_4 suderinimas.

Matavimų rezultatai

Eksperimentams buvo pagaminti du OGM maketai. Naudotų elementų sąrašas pateiktas 1 lentelėje.

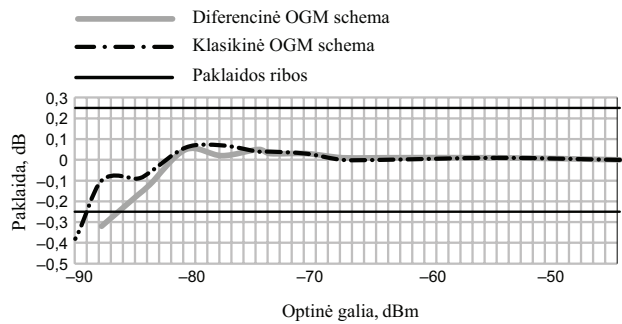
1 lentelė. Maketo elementų sąrašas

Table 2. List of the model elements

Elemento pavadinimas	Vertė, tipas
R_f	10 MΩ 0,1 %, 25 ppm
C_f	100pF, X7R, 25V
DA-1, DA-2	LMC6442
DA-3, DA-4	LTC2054
Fotodiodas	TMC-1C33-015

Matavimai atlikti +50 °C, +25 °C ir –10 °C temperatūrose. Abu optinės galios matuoklių maketai buvo kalibruoti +25 °C temperatūroje. Maketų tyrimų metu buvo naudojami mažesnės nei –45 dBm galios optiniai signalai. Esant didesnės galios signalams paklaidos tampa nykstamai mažos ir jų vertę sunku išmatuoti. Matavimų rezultatai pateikti 5, 6 ir 7 pav.

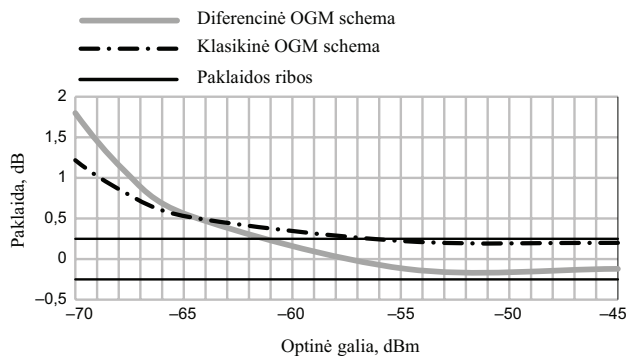
5 pav. pateikti klasikinio ir diferencinio OGM matavimo +25 °C temperatūroje rezultatai. Klasikinio OGM kalibravimo paklaidos yra mažesnės, nes įtampas slinkio paklaida grandinės išėjime priklauso tik nuo vieno operacinio stiprintuvo. Diferencinės schemas OGM kalibravimo metu operacinių stiprintuvų slinkio įtampas kompensuojasi nevisiškai arba net padidėja, nes slinkio įtampas gali būti priešingų ženklų. Todėl per fotodiodą teka didesnė tamsinė srovė. Be to, operacinių stiprintuvų slinkio įtampa priklauso nuo jų išėjimo srovės, nes, didėjant išėjimo srovei, didėja sklaidomoji galia ir kristalo temperatūra. Dvigubai didesnė ekvivalentinė grįžtamojo ryšio varža dar labiau padidina paklaidas.



5 pav. Klasikinio ir diferencinio OGM dinaminio diapazono +25 °C temperatūroje palyginimas

Fig. 5. Classic and differential OPM dynamic range comparison at +25 °C

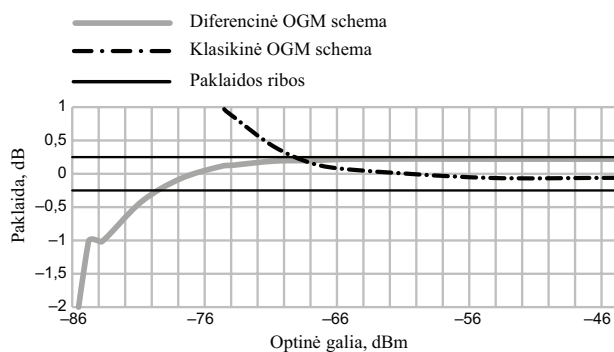
6 pav. atvaizduoti klasikinės ir diferencinės schemų OGM matavimo +50 °C temperatūroje rezultatai. Esant dideliems optinės galios lygiams, klasikinės schemas OGM paklaida yra artima didžiausiai leidžiamajai paklaidai. Šią paklaidą nulemia operacinio stiprintuvo įėjimo srovės dreifas.



6 pav. Klasikinio ir diferencinio OGM dinaminio diapazono +50 °C temperatūroje palyginimas

Fig. 6. Classic and differential OPM dynamic range comparison at +50 °C

Diferencinės schemos OGM paklaida esant dideliems optinės galios lygiams yra apie $-0,1$ dB. Ji mažesnė nei klasikinės schemos matuoklio, nes diferencinėje grandinėje kompensuojasi operacinių stiprintuvų įėjimo srovės slinkio dreifas. Mažėjant optinės galios lygiams pasireiškia paklaida dėl matuoklio diferencinės grandinės įėjimo srovių slinkio. Be to, matuoklio diferencinėje grandinėje naudojama dvigubai didesnė ekvivalentinė grįžtamojo ryšio varža, todėl diferencinio PVS schemos paklaida didėja dvigubai sparčiau. Neviršydama $\pm 0,25$ dB paklaidų diferencinės schemos grandinė leidžia pasiekti 4,5 dB didesnį dinaminį diapazoną.



7 pav. Klasikinio ir diferencinio OGM dinaminio diapazono -10 °C temperatūroje palyginimas

Fig. 7. Classic and differential OPM dynamic range comparison at -10 °C

7 pav. atvaizduoti klasikinio ir diferencinio optinio galios matuoklio matavimo rezultatai -10 °C temperatūroje. Žemoje temperatūroje klasikinės schemos OGM įtampos slinkis yra labai mažas, nes krintant temperatūrai įėjimo srovės mažėja nedaug. Leidžiamoji paklaidos riba viršijama esant -68 dBm. Diferencinės schemos OGM paklaida esant didelės galios lygiams yra artima leidžiamajai 0,22 dB paklaidai, nes krintant temperatūrai skirtingai kinta išėjimo įtampų slinkis skirtinguose diferencinio stiprintuvo pečiuose. Be to, įėjimo srovės pakinta nedaug. Diferencinės schemos OGM išėjimo įtampos slinkis daug mažiau priklauso nuo įėjimo srovių ir grįžtamojo ryšio varžų slinkio nei klasikinės schemos OGM. Todėl pasiekiamas -80 dBm galios lygis, kuris yra 12 dB geresnis nei klasikinio OGM.

Išvados

1. Atliekant optinio imtuvo tyrimus nustatyta, kad OGM dinaminis diapazonas labiausiai priklauso nuo veikimo temperatūrų diapazono pločio. Pagrindiniai veiksniai, turintys įtakos OGM temperatūriniam stabilumui, yra operacinio stiprintuvo įėjimo srovės slinkis ir grįžtamojo ryšio varžų temperatūrinis stabilumas.

2. Panaudojant diferencinį pereinamosios varžos stiprintuvą pasiekiamas didesnis temperatūrinis stabilumas nei klasikinės schemos.
3. Diferencinis pereinamosios varžos stiprintuvas pagerina klasikinio pereinamosios varžos stiprintuvo minimalią išmatuojamą galią ribiniuose veikimo temperatūrų diapazono taškuose $+50$ °C ir -10 °C atitinkamai 4,5 dB ir 12 dB.

Literatūra

- BurrBrown. 2000. *Photodiode monitoring with op amps* [interaktyvus]. Application Bulletin SBOA035. 11 p. [žiūrėta 2015 m. kovo 5 d.]. Prieiga per internetą: <http://www.ti.com/lit/an/sboa035/sboa035.pdf>
- Charlamov, J.; Navickas, R.; Baskys, A.; Barzdenas, V.; Nickelson, L. 2012. Optical receiver for optical time domain reflectometer, *Electronics and Electrical Engineering* 18(8): 49–52. <http://dx.doi.org/10.5755/j01.eee.18.8.2624>
- Hobbs, P. C. D. 2009. *Building electro-optical systems: making it all work*. New York: Wiley. 820 p.
- Razavi, B. 2003. *Design of integrated circuits for optical communications*. Boston, New York: McGraw-Hill. 370 p.
- Texas Instruments. 2011. *Thermal Noise Analysis in ECG Applications* [interaktyvus]. Application report SBAA185 – May 2011. 6 p. [žiūrėta 2015 m. kovo 5 d.]. Prieiga per internetą: <http://www.ti.com/lit/an/sbaa185/sbaa185.pdf>

DEVELOPMENT AND INVESTIGATION OF AN OPTICAL POWER METER FRONT END

E. Korsakas, J. Charlamov

Abstract

Circuit of the classical transimpedance amplifier (TIA) is revised and improved circuit is developed. Analytical solutions for the classical and improved circuits are derived. Both circuits were built and their parameters were measured. An experiment results showed that improved TIA achieves 4.5 dB greater dynamic range than the classical TIA at $+50$ °C and 12 dB greater at -10 °C.

Keywords: optical power meter, transimpedance amplifier, temperature stability.