

ИНСТРУМЕНТАЛНИ ПОЈАЧАВАЧ СА ПРЕЦИЗНОМ РЕГУЛАЦИЈОМ ПОЈАЧАЊА

Љ.Р.Голубовић - Технички факултет Чачак
М.К.Стојчев - Електронски факултет Ниш

У овом раду је приказана могућност реализације инструменталног појачавача са прецизном регулацијом бројне вредности појачања на интервалу $G \in (1,00; 16,99)$ са три важеће цифре. Висока прецизност регулације постигнута је захваљујући малим толеранцијама, релативне грешке реда 10^{-4} и коефицијента температурне зависности реда $10^{-6} [K^{-1}]$, параметара уграђених електронских компонената: интегрисаног кола INA333 фирме Texas Instruments, напонских референци фирме ANALOG DEVICES, електронских прекидача отпорности једног ома у стању провођења, фирме Texas Instruments и отпорника чију дистрибуцију врши фирма RIEDON.

1. Увод

Мерне појачаваче карактеришу следеће особине: 1) врло висока улазна и врло ниска излазна отпорност, 2) заравњена амплитудна и линеарна фазна карактеристика у довољно широком фреквентном опсегу, 3) мале флукуације (drift) и мало померање нуле (offset) излазног напона у случају појачавања разлике међусобно једнаких сигнала, 4) мала температурна зависност и 5) висока стабилност бројне вредности појачања.

Мерни појачавачи са прецизном регулацијом појачања имају значајне примене при дигитализацији мерних метода, што се може поткрепити следећим једноставним примером. Нека је компензациона метода мерења једносмерног напона остварена применом поменутог појачавача и 12-битног аналогно-дигиталног ADC конвертора, при чему прецизност задавања појачања одговара релативној грешки мањој од $\delta_G = \pm 0,5 \cdot 10^{-3}$, а максимална вредност напона на улазу ADC конвертора, остварена применом одговарајуће напонске референце, износи $\max u_{ADC} = 4,096 [V]$. Ако је прикључењем напона u_1 на улаз ADC конвертора, дисплеј на његовом излазу приказао децимални број 409, што одговара напону $u_1 = 0,409 [V]$, са релативном грешком $\delta_{ADC1} = \pm 0,0005 / 0,409 = \pm 1,22 \cdot 10^{-3}$, интервал поверења мереног напона износи $u_1 = 0,409 \pm 1,22 \times 10^{-3} \times 0,409 = 0,409 \pm 0,0005$

[V]. У случају да је напон u_1 преко појачавача напонског појачања $G=10,00$ доведен на улаз ADC конвертора, онда ће бити $u_2 = Gu_1 = 4,090 [V]$,

те се на дисплеју добија број 4090 са релативном грешком $\delta_G = \pm 0,5 \cdot 10^{-3}$. Овај напон је ADC конвертор регистровао са релативном грешком $\delta_{ADC2} = \pm 0,5/4090 = \pm 1,22 \cdot 10^{-4}$, која се може занемарити у односу на $\delta_G = \pm 0,5 \cdot 10^{-3}$, те је сада $u_1 = u_2 / G = 0,409 \pm 0,5 \cdot 10^{-3} \times 0,409 = 0,409 \pm 0,0002 [V]$; применом компензационе методе релативна грешка и ширина интервала поверења смањили су се 2,5 пута у односу на методу директног прикључења ADC конвертора.

2. Избор компонената

Приликом синтезе инструменталног појачавача са 12-битном регулацијом појачања, која омогућава тачно читавање прва три децимална разреда дисплеја, потребно је користити електронске компоненте релативне мерне несигурности не веће од 10^{-4} и коефицијента температурне осетљивости реда $10^{-6} [K^{-1}]$.

Интегрисано коло INA333 фирме Texas Instruments представља комплетну шему појачавача са уграђеним одговарајућим операционим појачавачима, отпорницима и филтерским радиофреквентним елементима високе стабилности и мале температурне зависности.

Уградњом споља отпорника R_G бројна вредност појачања одређена је изразом

$$G = 1 + \frac{100000[\Omega]}{R_G[\Omega]}, \quad (1)$$

где је релативна нестабилност коефицијента $k = 100000 [\Omega]$ реда величине $\Delta k/k \sim 10^{-4}$ за бројне вредности појачања $G \approx 1$, $\Delta k/k \sim 510^{-4}$ при $G \approx 10$ и $\Delta k/k \sim 710^{-4}$ за $G \approx 100$. Вредност релативне средњеквадратне нестабилности $(\Delta G/G)_{sk}$ бројне вредности појачања G може се одредити ако је позната релативна нестабилност уграђеног отпорника R_G . Ако се зависност $\Delta k/k$ релативне нестабилности коефицијента k на интервалу бројне вредности појачања G апроксимира правом линијом, онда се на интервалу $G \in (1,00;16,99)$ појачања регулационог појачавача добија вредност релативне нестабилности $\Delta k/k \sim 5,210^{-4}$. Интегрисано коло INA333 има ниски напонски офсет од $25 [\mu V]$, температурни дрифт $0,1 [\mu V / ^\circ C]$ и малу вредност мирне струје $200 pA (max)$, што указује на врло велику улазну отпорност, много већу од $10^7 [\Omega]$, колико износи највећа вредност R_G , која се користи у анализираном случају мерног појачавача.

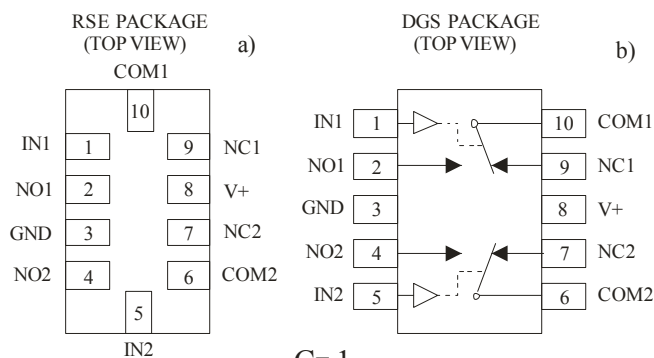
реног и нормално затвореног прекидача, при чему су NO1 и NO2 –пинови нормално отворених контаката, редних бројева 2 и 4, NC1 и NC2 –пинови нормално затворених контаката, редних бројева 9 и 7, а COM1 и COM2 –пинови заједничких контаката, редних бројева 10 и 6; 3) напајање $V+$ –пин са редним бројем 8 и 4) уземљење GND –пин са редним бројем 3.

Напонске референце фирме ANALOG DEVICES и отпорници у дистрибуцији фирме RIEDON такође задовољавају услове релативне мерне несигурности не веће од 10^{-4} и малог коефицијента температурне осетљивости, реда $10^{-6} [K^{-1}]$. Напонска заштита аналогних улаза у функционалној шеми са Сл.2 приказана је испрекиданим линијама и остварена применом диода D_1, D_2, D_3, D_4 , типа 1N918, фирме American Microsemiconductor.

3. Целобројна регулација појачања

Регулација појачања појачавача INA333 захтева промену отпорности R_G , која се сагласно шеми са Сл.2 може остварити програмским управљањем из микроконтролера прекидачима x_1, x_2, x_3 и x_4 паралелне везе отпорника

$$R_n^x = (\infty, n = 0) \vee (2^{1-n} 100\,000 [\Omega], n = \overline{1,4}). \quad (2)$$



Сл.1.

Електронски прекидачки елементи фирме Texas Instruments, отпорности од једног ома у проводном стању, паковани по два у сваком чипу, за случајеве RSE PACKAGE и DGS PACKAGE користе се сагласно подацима на Сл.1. Како RSE, тако и DGS варијанта имају по 10 одговарајућих пинова. При томе су: 1) улазни, напонски управљани пинови IN1 и IN2, редних бројева 1 и 5; 2) контактни пинови нормално отво-

T.1.

Укупан број стања прекидачког блока X са Сл.2 који чине прекидачи x_1, x_2, x_3 и x_4 износи $2^4 = 16$, што значи да се њоме може добити једно стање искључених свих отпорности $R_n^x, n=1,4$ и 15 стања различитих вредности отпора, које се могу описати изразом

$$R_i = (\infty, i=0) \vee \left(\frac{R_1^x}{i}, i=1,15 \right). \quad (3)$$

Логичка стања прекидачке мреже коју чине прекидачи x_1, x_2, x_3, x_4 блока X, отпорности усаглашене са изразима (2) и (3) и бројне вредности појачања G_i регулационог појачавача представљене су таблицом T.1, где ознака ||, у виду двеју паралелних црта, указује на паралелну везу отпорника.

У својству прекидача x_1, x_2, x_3, x_4 примењени су електронски прекидачи фирме Texas Instruments, типа TS5A23159, који имају врло малу отпорност у проводном стању, $r_{ON} = 1[\Omega]$, занемарљиво малу у односу на отпорности $R_1^x, R_2^x, R_3^x, R_4^x$, са којима су поменути прекидачки елементи везани на ред, сагласно Сл.2, а којима се управља преко програмски задатих управљачких речи x_1, x_2, x_3, x_4 из микроконтролера, које у облику напонских нивоа дејствују на улазе IN1, IN2, IN3 и IN4 електронских прекидача. Одговарајући отпорници $R_1^x, R_2^x, R_3^x, R_4^x$ везани су на заједничке излазе COM1, COM2, COM3, COM4. Преостали пинови NO1, NO2, NO3, NO4 представљају нормално отворене (normal open), NC1, NC2, NC3, NC4 –нормално затворене (normal closed), који у разматраном случају нису искоришћени, док $V+$ (4,5 V - 5,5 V) означава напајање кола.

Микроконтролерским управљањем отпорностима блока X, односно отварањем и затварањем грана са паралелно везаним отпорницима $R_1^x, R_2^x, R_3^x, R_4^x$ врши се регулација појачања $G_i \in (1;16)$ у јединичним скоковима $\Delta G_i = 1$. Задавање десетих делова $\Delta G_j = 0,1$ и стотих $\Delta G_k = 0,01$ постиже се применом регулационих блокова Y и Z са Сл.2, односно управљањем паралелном

i	стања прекидачке мреже	$R_G = R_i[\Omega]$	G_i
0	$\bar{x}_1\bar{x}_2\bar{x}_3\bar{x}_4$	$R_0^x = \infty$	1
1	$x_1\bar{x}_2\bar{x}_3\bar{x}_4$	$R_1 = R_1^x = 100\,000$	2
2	$\bar{x}_1x_2\bar{x}_3\bar{x}_4$	$R_2 = R_2^x = 50\,000$	3
3	$x_1x_2\bar{x}_3\bar{x}_4$	$R_3 = R_1^x \parallel R_2^x = 33\,333$	4
4	$\bar{x}_1\bar{x}_2x_3\bar{x}_4$	$R_4 = R_3^x = 25\,000$	5
5	$x_1\bar{x}_2x_3\bar{x}_4$	$R_5 = R_1^x \parallel R_3^x = 12\,500$	6
6	$\bar{x}_1x_2x_3\bar{x}_4$	$R_6 = R_2^x \parallel R_3^x = 16\,667$	7
7	$x_1x_2x_3\bar{x}_4$	$R_7 = R_1^x \parallel R_2^x \parallel R_3^x = 14\,286$	8
8	$x_1x_2x_3x_4$	$R_8 = R_4^x = 12\,500$	9
9	$x_1\bar{x}_2\bar{x}_3x_4$	$R_9 = R_1^x \parallel R_4^x = 11\,111$	10
10	$\bar{x}_1x_2\bar{x}_3x_4$	$R_{10} = R_2^x \parallel R_4^x = 10\,000$	11
11	$x_1x_2\bar{x}_3x_4$	$R_{11} = R_1^x \parallel R_2^x \parallel R_4^x = 9\,081$	12
12	$\bar{x}_1\bar{x}_2x_3x_4$	$R_{12} = R_3^x \parallel R_4^x = 8\,333$	13
13	$x_1\bar{x}_2x_3x_4$	$R_{13} = R_1^x \parallel R_3^x \parallel R_4^x = 7\,762$	14
14	$\bar{x}_1x_2x_3x_4$	$R_{14} = R_2^x \parallel R_3^x \parallel R_4^x = 7\,143$	15
15	$x_1x_2x_3x_4$	$R_{15} = R_1^x \parallel R_2^x \parallel R_3^x \parallel R_4^x = 6\,667$	16

везом отпорника $R_1^y, R_2^y, R_3^y, R_4^y$ преко прекидачких елемената y_1, y_2, y_3, y_4 и везом отпорника $R_1^z, R_2^z, R_3^z, R_4^z$ преко прекидачких елемената z_1, z_2, z_3, z_4 , коришћењем микроконтролера.

4. Регулација појачања са једном цифром иза децималне запете

Нека је потребно добити вредност појачања $G_{ij} = 1,1$. Тада се отпорности отворених свих x_1, x_2, x_3, x_4 прекидача придодаје паралелно отпорничко-прекидачка мрежа са отпорницима $R_n^y, n=1,4 = R_1^y, R_2^y, R_3^y, R_4^y$ и прекидачима y_1, y_2, y_3, y_4 прекидачког блока Y, те се у случају логичког стања $\bar{x}_1\bar{x}_2\bar{x}_3\bar{x}_4y_1\bar{y}_2\bar{y}_3\bar{y}_4 = 00001000$ добија следећа бројна вредност појачања

$$G_{i=0,j=1} = 1 + \frac{100\,000}{R_0 \parallel R_1^y} = 1 + \frac{100\,000}{R_{0,1}} = 1,1, \quad (4)$$

односно

$$R_{0,1} = \frac{100\,000}{0,1} = 10^6 [\Omega], \quad (5)$$

јер је паралелна веза отпорности $R_0 = \infty$ и R_1^y једнака R_1^y .

На сличан начин за

$$G_{i=0,j=2} = 1 + \frac{100\,000}{R_{0,2}} = 1,2 \quad (6)$$

добива се $R_{0,2} = R_1^y / 2 = 5 \cdot 10^5 [\Omega]$. Ако овај поступак одређивања прве цифре после децималне запете наставимо од $R_{i=0,j=0} = R_{0,0} = \infty$ преко $R_{0,1} = 10^6 [\Omega]$, $R_{0,2} = 5 \cdot 10^5 [\Omega]$ до $R_{0,9}$ добијају се следећи вектори отпорности $R_{i=0,j,j=\overline{1,9}}$ и појачања $G_{i=0,j,j=\overline{1,9}}$,

$$R_{i=0,j,j=\overline{0,9}} = \{\infty, 10^6; 0,5 \cdot 10^6; 0,33333 \cdot 10^6; 0,25 \cdot 10^6; 0,2 \cdot 10^6; 0,16667 \cdot 10^6; 0,14286 \cdot 10^6; 0,125 \cdot 10^6; 0,11111 \cdot 10^6\} [\Omega], \quad (7)$$

$$G_{i=0,j,j=\overline{0,9}} = 1 + \frac{100\,000}{R_{i=0,j,j=\overline{0,9}}} = \{1,0; 1,1; 1,2; 1,3; 1,4; 1,5; 1,6; 1,7; 1,8; 1,9\}; \quad (8)$$

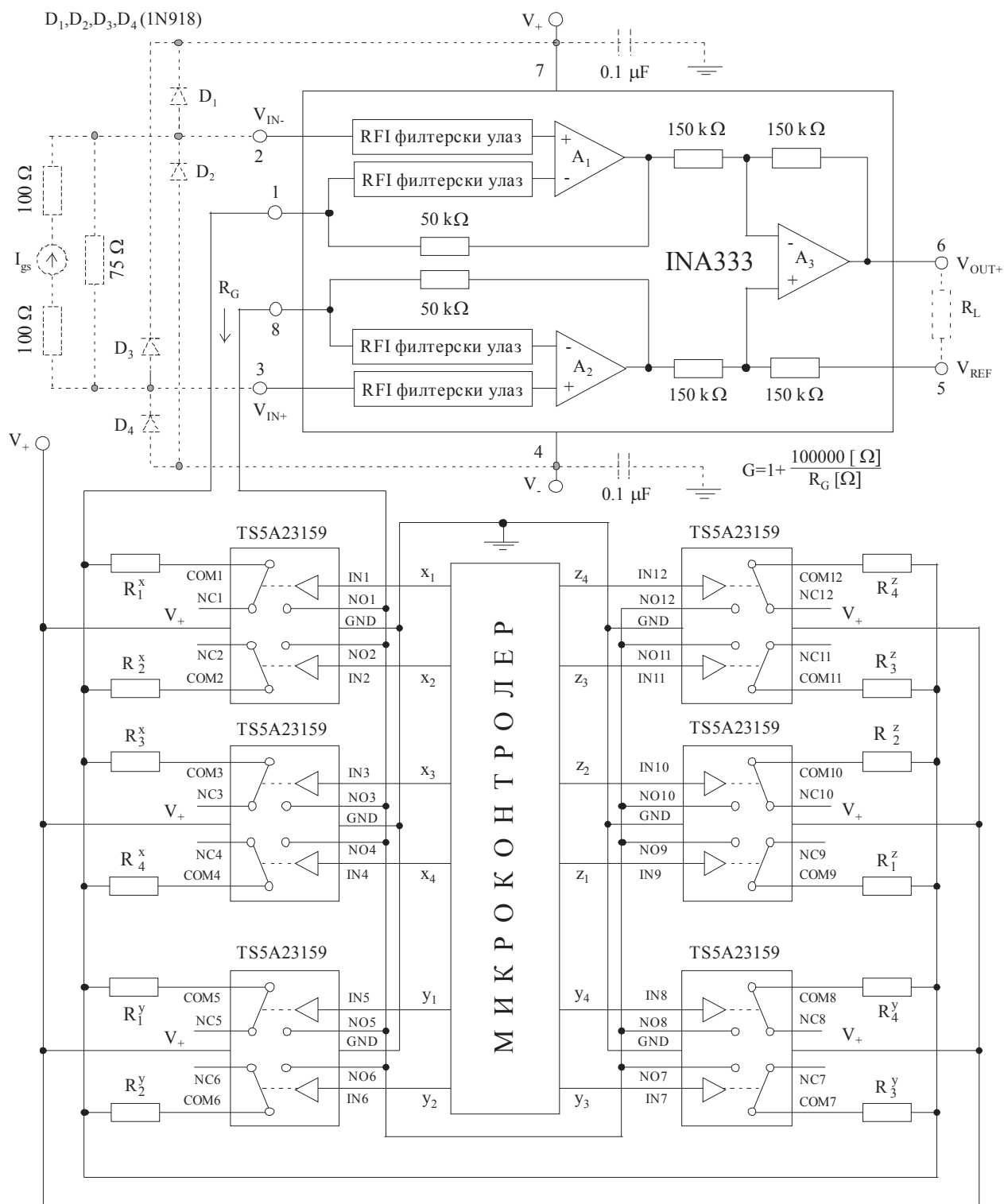
при томе су отпорности $R_{i=0,j,j=\overline{1,9}}$ дате изразом (7), добијене комбинацијом вредности

$$R_n^y = (\infty, n=0) \vee (2^{1-n} \cdot 1000\,000 [\Omega], n=\overline{1,4}), \quad (9)$$

којима одговара следећи вектор отпорности

$$R_n^y = \{\infty; 10^6; 5 \cdot 10^5; 2,5 \cdot 10^5; 1,25 \cdot 10^5\} [\Omega]. \quad (10)$$

Додељивање отпорности $R_n^x, n=\overline{1,4}$ врши се преко логичких стања прекидача x_1, x_2, x_3, x_4 , а отпорности $R_n^y, n=\overline{1,4}$ преко логичких стања прекидача y_1, y_2, y_3, y_4 . У случају да су сви прекидачи $\bar{x}_1, \bar{x}_2, \bar{x}_3, \bar{x}_4$ отворени, биће $i=0$, док се стања прекидача y_1, y_2, y_3, y_4 мењају на интервалу $j=\overline{1,9}$. Ако су отворени сви преки-



Сл.2.

даци, $\bar{x}_1, \bar{x}_2, \bar{x}_1, \bar{x}_2, \bar{x}_3, \bar{x}_4$ и $\bar{y}_1, \bar{y}_2, \bar{y}_3, \bar{y}_4$, биће $R_0^x = \infty$ и $R_0^y = \infty$.

Бројне вредности појачања у интервалу $G_{ij} \in (2,0; 2,9)$ добијају се применом формуле

$$G_{i=1,j=0,9} = 1 + \frac{100000}{R_1^x \parallel R_j} = 1 + \frac{100000}{R_{1,j}, j=0,9}, \quad (11)$$

при чему су, $R_1^x = R_1 = 100000[\Omega]$, док су векто-

i j k	стања прекидача XYZ	$R_G = R_{i,j,k} [\Omega]$	$G_{i,j,k}$
0 0 0	$\bar{x}_1 \bar{x}_2 \bar{x}_3 \bar{x}_4$ $\bar{y}_1 \bar{y}_2 \bar{y}_3 \bar{y}_4$ $\bar{z}_1 \bar{z}_2 \bar{z}_3 \bar{z}_4$	$R_{0,0,0} = \infty$	1,00
0 0 1	$\bar{x}_1 \bar{x}_2 \bar{x}_3 \bar{x}_4$ $\bar{y}_1 \bar{y}_2 \bar{y}_3 \bar{y}_4$ $z_1 \bar{z}_2 \bar{z}_3 \bar{z}_4$	$R_{0,0,1} = 10\ 000\ 000$	1,01
0 1 0	$\bar{x}_1 \bar{x}_2 \bar{x}_3 \bar{x}_4$ $y_1 \bar{y}_2 \bar{y}_3 \bar{y}_4$ $\bar{z}_1 \bar{z}_2 \bar{z}_3 \bar{z}_4$	$R_{0,1,0} = 1\ 000\ 000$	1,10
1 1 1	$x_1 \bar{x}_2 \bar{x}_3 \bar{x}_4$ $y_1 \bar{y}_2 \bar{y}_3 \bar{y}_4$ $z_1 \bar{z}_2 \bar{z}_3 \bar{z}_4$	$R_{1,1,1} = 90\ 090$	2,11
5 1 4	$x_1 \bar{x}_2 x_3 \bar{x}_4$ $y_1 \bar{y}_2 \bar{y}_3 \bar{y}_4$ $\bar{z}_1 \bar{z}_2 z_3 \bar{z}_4$	$R_{5,1,4} = 19\ 455$	6,14
9 9 9	$x_1 \bar{x}_2 \bar{x}_3 x_4$ $y_1 \bar{y}_2 \bar{y}_3 y_4$ $z_1 \bar{z}_2 \bar{z}_3 z_4$	$R_{9,9,9} = 10\ 010$	10,99
10 1 8	$\bar{x}_1 x_2 \bar{x}_3 x_4$ $y_1 \bar{y}_2 \bar{y}_3 \bar{y}_4$ $\bar{z}_1 \bar{z}_2 \bar{z}_3 z_4$	$R_{10,1,8} = 9\ 823$	11,18
13 9 2	$x_1 \bar{x}_2 x_3 x_4$ $y_1 \bar{y}_2 \bar{y}_3 y_4$ $\bar{z}_1 z_2 \bar{z}_3 \bar{z}_4$	$R_{13,9,2} = 7\ 184$	14,92
15 4 9	$x_1 x_2 x_3 x_4$ $\bar{y}_1 \bar{y}_2 y_3 \bar{y}_4$ $z_1 \bar{z}_2 \bar{z}_3 z_4$	$R_{5,4,9} = 6\ 456$	16,49
15 9 9	$x_1 x_2 x_3 x_4$ $y_1 \bar{y}_2 \bar{y}_3 y_4$ $z_1 \bar{z}_2 \bar{z}_3 z_4$	$R_{5,9,9} = 6\ 254$	16,99

ри отпорности $R_{i=1,j=0,9}$ и бројне вредности појачања $G_{i=1,j=0,9}$ дати изразима,

$$R_{i=1,j=0,9} = \{R_1 \parallel R_{0,0}; R_1 \parallel R_{0,1}; R_1 \parallel R_{0,2}; R_1 \parallel R_{0,3}; R_1 \parallel R_{0,4}; R_1 \parallel R_{0,5}; R_1 \parallel R_{0,6}; R_1 \parallel R_{0,7}; R_1 \parallel R_{0,8}; R_1 \parallel R_{0,9}\} \quad (12)$$

$$= \{100\ 000; 90\ 909; 83\ 333; 76\ 923; 71\ 429; 66\ 667; 62\ 500; 58\ 824; 55\ 556; 52\ 632\},$$

$$G_{i=1,j=0,9} = 1 + \frac{100\ 000}{R_{1,j}, j=0,9} = \{2,0; 2,1; 2,2; 2,3; 2,4; 2,5; 2,6; 2,7; 2,8; 2,9\}, \quad (13)$$

где су вредности $R_{0,0}, R_{0,1}, R_{0,2}, \dots, R_{0,9}$ вектора $R_{i=1,j=0,9}$ представљене изразом (7).

T.2.

Настављањем описаног поступка додељивања прве цифре после децималне запете у бројној вредности за појачање G , добијени резултати отпорности мењају се од $R_{0,j}, j=0,9$ (према изразу (7)) преко $R_{1,j}, j=0,9$ (израз (12)), $R_{2,j}, j=0,9$, $R_{3,j}, j=0,9$ итд., $R_{14,j}, j=0,9$ до $R_{15,j}, j=0,9$, а бројне вредности појачања од $G_{0,j}, j=0,9$ (у сагласности са изразом (8)) преко $G_{1,j}, j=0,9$ (израз (13)), $G_{2,j}, j=0,9$, $G_{3,j}, j=0,9$ итд., $G_{14,j}, j=0,9$ до $G_{15,j}, j=0,9$.

5. Регулација појачања са две цифре после децималне запете

Заменом израза (7) вектором отпорности

$$R_{i=0,j=0, k=0,9} = \{\infty, 10^7; 0,5 \cdot 10^7; 0,33333 \cdot 10^7; 0,25 \cdot 10^7; 0,2 \cdot 10^7; 0,16667 \cdot 10^7; 0,14286 \cdot 10^7; 0,125 \cdot 10^7; 0,11111 \cdot 10^7\} [\Omega], \quad (14)$$

добија се уместо израза (8) вектор бројне вредности појачања у облику

$$G_{i=0,j=0, k=0,9} = 1 + \frac{100\ 000}{R_{i=0,j=0, k=0,9}} = \{1,00; 1,01; 1,02; 1,03; 1,04; 1,05; 1,06; 1,07; 1,08; 1,09\}. \quad (15)$$

Ове векторе, сагласно Сл.2, генерише блок Z са прекидачима z_1, z_2, z_3, z_4 , којима се врши програмско управљање паралелном везом отпорника $R_n^z, n=1,4 = R_1^z, R_2^z, R_3^z, R_4^z$ из микроконтролера. При томе се отпорности $R_{0,0}, k=0,9$, дате изразима (14), добијају комбинацијом паралелних веза отпорности

$$R_n^z = (\infty, n=0) \vee (2^{1-n} \cdot 10\ 000\ 000 [\Omega], n=1,4). \quad (16)$$

Коришћењем одговарајућих бинарних кодова индекса i, j, k отпорности $R_{i,j,k}, i=0,15, j=0,9, k=0,9$ који су функција $f(X, Y, Z)$ логичких стања прекидачких блокова $X = \{x_1, x_2, x_3,$

$x_4\}$, $Y = \{y_1, y_2, y_3, y_4\}$ и $Z = \{z_1, z_2, z_3, z_4\}$ сачињена је таблица Т.2 са одговарајућим отпорностима $R_{i,j,k}$ и бројним вредностима појачања унутар интервала $G \in (1,00; 16,99)$.

6. Закључак

Приказана анализа принципа рада инструменталног појачавача са прецизном регулацијом бројне вредности појачања намеће питање саме величине мерне несигурности остварених вредности појачања. Мерна несигурност појачања одређена је мерном несигурношћу уграђених елемената и обрађена је у оквиру посебног рада, у коме се математички доказује да се децимална $3\frac{1}{2}$ разредна прецизност може постићи применом следећих електронских компонената: 1) интегрисаног кола операционог појачавача последње технолошке генерације, врло велике улазне отпорности (реда 100 гигаома) и коефицијента појачања (реда 10^5), а мале излазне отпорности (реда неколико ома), које карактерише мала релативна нестабилност (реда 10^{-4}); 2) паралелна отпорничка мрежа од 12 стандардних отпорника, релативне нестабилности реда 10^{-4} и коефицијента температурне зависности реда 10^{-6} [K^{-1}], чијим се комбинацијама укључености преко одговарајуће прекидачке мреже од 12 електронских прекидача добија укупно 1600 различитих децималних вредности управљачких отпорности, у циљу програмске регулације бројне вредности појачања регулационог појачавача, помоћу микроконтролера; при томе је у прекидачко-отпорничкој групи X искоришћено свих 16 могућих стања, а у групама Y и Z по 10 од 16 могућих; максималним искоришћењем група Y и Z може се добити 4096 различитих хексадецималних вредности управљачких отпорности; 3) 12 електронских прекидача, отпорности од једног ома у проводном стању, занемарљиво мале у односу на највећи из поменуте мреже од 12 стандардних отпорника и 4) високостабилних напонских референци, релативне нестабилности 10^{-4} .

При максималној вредности $I_g = 20$ [mA] струје сензора, који се понаша као струјни ге-

нератор, напон на улазном отпорнику $R_u = 75$ [Ω] износи $u_u = I_g R_u = 1,5$ [V]. Ако максималан улазни напон аналогно-дигиталног конвертора ADC, коришћеног у компензационој методи, описаној у уводном делу овог рада, износи $\max u_{ADC} = 4,096$ [V], то значи да појачање регулационог мерног појачавача треба поставити на вредност $G = \max u_{ADC} / u_u = 4,096 / 1,5 = 2,731$ и она је константна за дати ADC конвертор и сензор струјногенераторског типа. У случају сензора напонскогенераторског типа, вредност потребног појачања расте са повећањем растојања између сензора и ADC конвертора, услед пада напона на каблу за повезивање.

Проширењем описаног регулационог појачавача са још 4 стандардна отпорника $R_n^u = 2^{n-1} 10^8$ [Ω], $n = \overline{1,4}$ и 4 истоветна електронска прекидача такође је могуће, јер је однос улазне отпорности $R_u = 10^{11}$ [Ω] инструменталног појачавача и највеће вредности отпорности $R_G = R_1^u = 10^8$ [Ω] још увек довољно велики и износи $R_u / R_G = 10^3$. Ако се још примене стандардни отпорници ултра високе прецизности [4], $\Delta R_n^x / R_n^x = \Delta R_n^y / R_n^y = \Delta R_n^z / R_n^z = \Delta R_n^u / R_n^u = 10^{-5}$, онда се проучена варијанта са 1600 различитих децималних вредности управљачких отпорности проширује на 16000 са максималном релативном несигурношћу појачања $\Delta G / G = 5 \times 10^{-5}$, а варијанта са 4096 различитих хексадецималних вредности управљачких отпорности на 65536, при чему максимална вредност шума износи 129 [μV]. Решења са овако великим отпорностима захтевају посебну заштиту од запрањаности околне атмосфере.

Овај рад је реализован уз финансијску подршку Владе Републике Србије, у оквиру пројекта *Реконфигурациони мерни системи*, под редним бројем Т.Р.11020.

Литература

[1] Texas Instruments, INA 333, Micro-Power (50 μA), Zero-Drift, Rail-to-Rail Out Instrumentation Amplifier, www.ti.com, SBOS4458 - JULY 2008 - REVISED OCTOBER 2008

[2] Texas Instruments, TC5A23159 1- Ω DUAL SPDT ANALOG SWITCH 5V/3.3V 2 CHANNEL 2:1 MULTIPLEXER / DEMULTIPLEXER, www.ti.com, CSDS 201D - AUGUST 2005 - REVISED SEPTEMBER 2007

[3] Analog Devices, High Precision Voltage Reference Microcomputer AD588, AD588.pdf (application /pdf Object), www.analog.com

[4] ee PRODUCT CENTER, MOUSER ELECTRONICS, Ultra-high-precision resistor targets high-reliability apps, Gina Roos, ee Product Center (06/27 / 2008;2:25 PMET)

[5] VISHAY, New VPR220Z Ultra-high-precision Z-Foil Resistor Features a Low Absolute TCR of $\pm 0,05$ ppm/ $^{\circ}$ C, Tolerance to $\pm 0,01\%$ and power rating to 8 W, <http://www.gogle.co>

[6] PRC-Precision Resistor Co., Inc., Manufacturer of Resistors, Sensors and Shunts, 2008 Product Catalog, <http://www.precisionresistor.com>

[7] CADDOCK Electronics, High Performance Film Resistors, Low TC and Ultra-Precision Resistors, TC of 2, 5 or 10 ppm/ $^{\circ}$ C, Tolerance to $\pm 0,01\%$, Resistance Range 50 Ω to 125 M Ω , Short Form Catalog 2008