

АНАЛИЗА ГРЕШАКА ПРИ УПРАВЉАЊУ ПОЈАЧАЊЕМ ИНСТРУМЕНТАЛНОГ ПОЈАЧАВАЧА

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

У раду је приказан принцип рада прецизног инструменталног појачавача са микроконтролерским управљањем појачањем. Извршена је математичка анализа грешака управљања појачањем променом еквивалентне вредности паралелне отпорничке мреже од 12 стандардних отпорника, преко прекидачке мреже од 12 електронских прекидача. Изведени су неопходни изрази за процену средњеквадратног одступања заданих бројних вредности појачања и дате одговарајуће графичке представе.

1. Увод

Уградњом отпорника R_G , сагласно Сл.1, између одговарајућих тачака интегрисаног кола INA333 фирме Texas Instruments, добија се комплетна шема инструменталног појачавача, која у себи садржи уграђене одговарајуће операционе појачаваче, отпорнике и филтерске радиофреквентне елементе високе стабилности и мале температурне зависности, бројна вредност појачања добијеног појачавача може се представити изразом

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

при томе је релативна нестабилност коефицијента $k=100000 [\Omega]$ у изразу (1) 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 $G \approx 100$, може се за познату релативну нестабилност уграђеног отпорника R_G одредити релативна средњеквадратна нестабилност $(\Delta G/G)_{sk}$ појачања G . Максимална стабилност бројне вредности појачања G при томе захтева релативну нестабилност отпорности R_G не већу од 10^{-4} и малу температурну зависност, на пример реда $10^{-6} [K^{-1}]$. Ако се зависност $\Delta k/k$ релативне нестабилности коефицијента k на интервалу бројне вредности појачања G апроксимира правом линијом, онда се унутар бројног интервала $G \in (1,00;16,99)$ појачања регулационог инструменталног појачавача добија релативна нестабилност $\Delta k/k \sim 5,210^{-4}$. Интегрисано коло

INA333 такође карактерише ниски напонски офсет од $25 [\mu V]$, дрифт $0,1 [\mu V / ^\circ C]$ и мала вредност мирне струје $200 pA (max)$, што указује на врло велику улазну отпорност, чија каталожка вредност износи $100 [G\Omega]$.

2. Принцип рада

Управљање појачањем G инструменталног појачавача са Сл.1 врши се из микроконтролера, сагласно изразу (1), преко отпорности R_G , која је реализована у облику паралелне везе 12 стандардних отпорника, релативне нестабилности 10^{-4} , укључивање којих се врши уз помоћ прекидачке мреже од 12 електронских прекидача $XYZ = x_1, x_2, x_3, x_4, y_1, y_2, y_3, y_4, z_1, z_2, z_3, z_4$; при томе се управљачки импулси из микроконтролера доводе на 12-битну магистралу, са којом су управљачки пинови прекидачке мреже повезани.

Отпорности примењених 12 стандардних отпорника могу се представити следећим векторима,

$$\begin{aligned} R_{n,n=0,4}^x &= \{\infty, 10^5; 0,510^5; 0,2510^5; 0,12510^5\}, \\ R_{n,n=0,4}^y &= \{\infty, 10^6; 0,510^6; 0,2510^6; 0,12510^6\}, \quad (2) \\ R_{n,n=0,4}^z &= \{\infty, 10^7; 0,510^7; 0,2510^7; 0,12510^7\}, \end{aligned}$$

где стање $n=0$ прекидачких блокова X, Y и Z указује да је свих 12 електронских прекидача мреже XYZ отворено, а отпорност $R_G = \infty$.

Генерисање целобројних вредности појачања G_i на интервалу $G_i \in (1;16)$ врши се зада-

вањем помоћу специјалног програма из микроконтролера одговарајућих стања прекидачког блока X, тако да се добијају следеће радне отпорности,

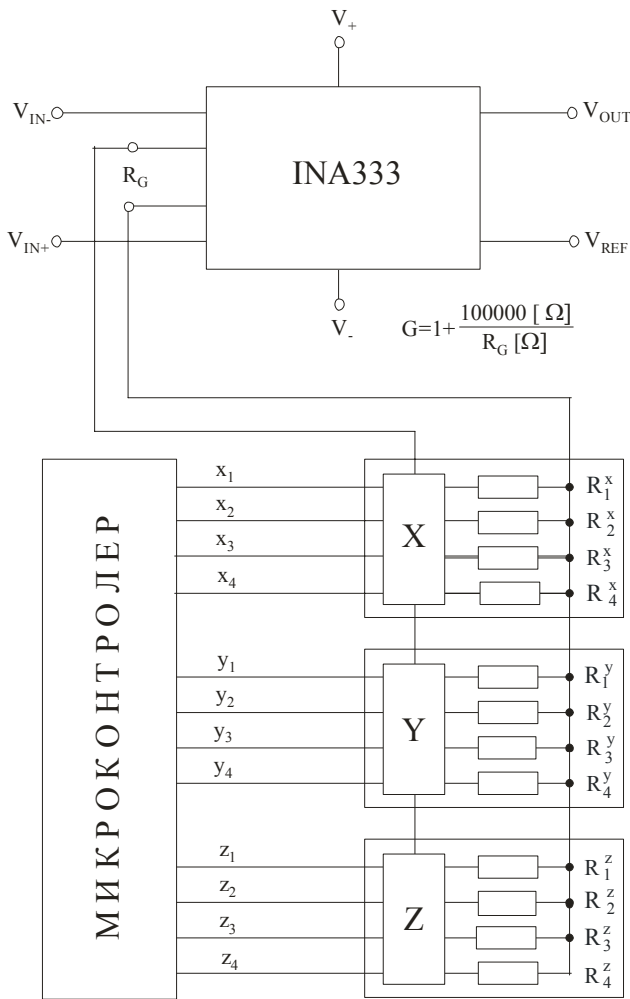
$$R_{i,i=0,15} = R_{i=0}^x \vee \frac{R_1^x}{i}_{i=1,15}$$

$$= \{\infty, 10^5; 0,5 \cdot 10^5; 0,33333 \cdot 10^5; 0,25 \cdot 10^5;$$

$$0,2 \cdot 10^5; 0,16667 \cdot 10^5; 0,14286 \cdot 10^5; 0,125 \cdot 10^5;$$

$$0,11111 \cdot 10^5; 0,1 \cdot 10^5; 0,90909 \cdot 10^4;$$

$$0,83333 \cdot 10^4; 0,76923 \cdot 10^4; 0,66667 \cdot 10^4\} [\Omega]. \quad (3)$$



Сл.1.

На сличан начин се генерисање прве цифре бројне вредности појачања после децималне запете на интервалу $G_j \in (0,0; 0,9)$ и друге цифре после децималне запете на бројном интервалу $G_k \in (0,00; 0,09)$ врши задавањем одговарајућих команди из микроконтролера за генерисање вектора отпорности отпорне мреже $R_{j,j=0,9}$ и $R_{k,k=0,9}$, односно

$$R_{j,j=0,9} = R_{j=0}^y \vee \frac{R_1^y}{j}_{j=1,9}$$

$$= \{\infty, 10^6; 0,5 \cdot 10^6; 0,33333 \cdot 10^6; 0,25 \cdot 10^6;$$

$$0,2 \cdot 10^6; 0,16667 \cdot 10^6; 0,14286 \cdot 10^6; 0,125 \cdot 10^6;$$

$$0,11111 \cdot 10^6\} [\Omega], \quad (4)$$

$$R_{k,k=0,9} = R_{k=0}^z \vee \frac{R_1^z}{k}_{k=1,9}$$

$$= \{\infty, 10^7; 0,5 \cdot 10^7; 0,3333333 \cdot 10^7; 0,25 \cdot 10^7;$$

$$0,2 \cdot 10^7; 0,1666667 \cdot 10^7; 0,1428571 \cdot 10^7;$$

$$0,125 \cdot 10^7; 0,1111111 \cdot 10^7\} [\Omega]. \quad (5)$$

Могући број комбинација логичких стања електронских прекидача $x_1, x_2, x_3, x_4, y_1, y_2, y_3, y_4, z_1, z_2, z_3, z_4$ дефинише укупан број отпорности паралелно спрегнутих стандардних отпорника, које се могу представити следећим вектором,

$$R_{i,j,k,i=0,15,j=0,9,k=0,9}$$

$$= R_{i,i=0,15} \mid \mid R_{j,j=0,9} \mid \mid R_{k,k=0,9}$$

$$= \{R_{i-0} \mid \mid R_{j-0} \mid \mid R_{k-0}; R_{i-0} \mid \mid R_{j-0} \mid \mid R_{k-1};$$

$$R_{i-0} \mid \mid R_{j-0} \mid \mid R_{k-2}; \dots; R_{i-0} \mid \mid R_{j-0} \mid \mid R_{k-9};$$

$$R_{i-0} \mid \mid R_{j-1} \mid \mid R_{k-1}; R_{i-0} \mid \mid R_{j-1} \mid \mid R_{k-2}; \dots;$$

$$R_{i-0} \mid \mid R_{j-1} \mid \mid R_{k-9}; \dots; R_{i-0} \mid \mid R_{j-2} \mid \mid R_{k-0};$$

$$R_{i-0} \mid \mid R_{j-2} \mid \mid R_{k-1}; R_{i-0} \mid \mid R_{j-2} \mid \mid R_{k-2}; \dots;$$

$$R_{i-0} \mid \mid R_{j-2} \mid \mid R_{k-9}; R_{i-1} \mid \mid R_{j-0} \mid \mid R_{k-0};$$

$$R_{i-1} \mid \mid R_{j-0} \mid \mid R_{k-1}; R_{i-1} \mid \mid R_{j-0} \mid \mid R_{k-2}; \dots;$$

$$R_{i-1} \mid \mid R_{j-0} \mid \mid R_{k-2}; \dots; R_{i-1} \mid \mid R_{j-0} \mid \mid R_{k-9};$$

$$\dots; R_{i-1} \mid \mid R_{j-1} \mid \mid R_{k-0}; R_{i-1} \mid \mid R_{j-1} \mid \mid R_{k-1};$$

$$R_{i-1} \mid \mid R_{j-1} \mid \mid R_{k-2}; \dots; R_{i-1} \mid \mid R_{j-1} \mid \mid R_{k-9};$$

$$R_{i-1} \mid \mid R_{j-2} \mid \mid R_{k-0}; R_{i-1} \mid \mid R_{j-2} \mid \mid R_{k-1};$$

$$R_{i-1} \mid \mid R_{j-2} \mid \mid R_{k-2}; \dots; R_{i-1} \mid \mid R_{j-2} \mid \mid R_{k-9}; \dots;$$

$$R_{i-1} \mid \mid R_{j-9} \mid \mid R_{k-9}; \dots; R_{i-2} \mid \mid R_{j-0} \mid \mid R_{k-0}; \dots;$$

$$R_{i-2} \mid \mid R_{j-0} \mid \mid R_{k-1}; R_{i-2} \mid \mid R_{j-0} \mid \mid R_{k-2}; \dots;$$

$$R_{i-15} \mid \mid R_{j-9} \mid \mid R_{k-9}\}.$$

На основу израза (6) и (1) појачање микроконтролерски управљаног инструменталног појачавача добија облик

$$G_{i,j,k,i=0,15,j=0,9,k=0,9} = 1 + \frac{100000 [\Omega]}{R_{i,j,k,i=0,15,j=0,9,k=0,9} [\Omega]}, \quad (7)$$

те се применом одговарајућег алгоритма у микроконтролеру врши његово израчунавање.

3. Анализа грешака управљања отпорношћу паралелне отпорничке мреже

Паралелна отпорничка мрежа са Сл.1 састоји се од 12 стандардних отпорника $R_1^x, R_2^x, R_3^x, R_4^x, R_1^y, R_2^y, R_3^y, R_4^y, R_1^z, R_2^z, R_3^z, R_4^z$, отпорности дефинисаних изразима (2) и (3), чије релативне мерне несигурности износе $\Delta R_n^x / R_n^x = \Delta R_n^y / R_n^y = \Delta R_n^z / R_n^z = 10^{-4}$, $n = \overline{1,4}$, при чему је сваки од њих везан на ред са одговарајућим електронским прекидачем $x_1, x_2, x_3, x_4, y_1, y_2, y_3, y_4, z_1, z_2, z_3, z_4$. Комбинацијом паралелних веза поменутих отпорника стандардних отпорности добија се 16 вредности отпорности $R_{i,i=\overline{0,15}}$, 10 вредности $R_{j,j=\overline{0,9}}$, 10 вредности $R_{k,k=\overline{0,9}}$ и 1599 вредности $R_{i,j,k,i=\overline{0,15},j=\overline{0,9},k=\overline{0,9}}$. Мерне несигурности појединих паралелних веза поменутих отпорника стандардних отпорности и стандардних релативних мерних несигурности од 10^{-4} , одредићемо израчунавањем средњеквадратних вредности одговарајућих промена отпорности паралелно везаних отпорника, при чему се ове промене отпорности добијају апроксимацијом диференцијала одговарајућим прираштајима. Поступак израчунавања објаснићемо на конкретним примерима који следе.

На основу вектора отпорности (6) могу се написати изрази за отпорност паралелне везе неких стандардних отпорника,

$$R_{i=3,j=0,k=0} = R_1^x \parallel R_2^x = \frac{R_1^x R_2^x}{R_1^x + R_2^x} = 33333[\Omega], \quad (8)$$

$$R_{i=0,j=3,k=0} = R_1^y \parallel R_2^y = \frac{R_1^y R_2^y}{R_1^y + R_2^y} = 333333[\Omega], \quad (9)$$

$$R_{i=0,j=0,k=3} = R_1^z \parallel R_2^z = \frac{R_1^z R_2^z}{R_1^z + R_2^z} = 3333333[\Omega], \quad (10)$$

где су вредности $R_1^x, R_2^x, R_1^y, R_2^y, R_1^z$ и R_2^z дате изразима (2).

Тотални диференцијали паралелних веза отпорника, описаних односима (8-10), биће

$$dR_{i=3,j=0,k=0} = \frac{(R_1^x)^2 dR_2^x + (R_2^x)^2 dR_1^x}{(R_1^x + R_2^x)^2}, \quad (11)$$

$$dR_{i=0,j=3,k=0} = \frac{(R_1^y)^2 dR_2^y + (R_2^y)^2 dR_1^y}{(R_1^y + R_2^y)^2}, \quad (12)$$

$$dR_{i=0,j=0,k=3} = \frac{(R_1^z)^2 dR_2^z + (R_2^z)^2 dR_1^z}{(R_1^z + R_2^z)^2}. \quad (13)$$

Апроксимацијом диференцијала у изразу (11-13) одговарајућим прираштајима добија се

$$\Delta R_{i=3,j=0,k=0} = \frac{(R_1^x)^2 \Delta R_2^x + (R_2^x)^2 \Delta R_1^x}{(R_1^x + R_2^x)^2}, \quad (14)$$

$$\Delta R_{i=0,j=3,k=0} = \frac{(R_1^y)^2 \Delta R_2^y + (R_2^y)^2 \Delta R_1^y}{(R_1^y + R_2^y)^2}, \quad (15)$$

$$\Delta R_{i=0,j=0,k=3} = \frac{(R_1^z)^2 \Delta R_2^z + (R_2^z)^2 \Delta R_1^z}{(R_1^z + R_2^z)^2}, \quad (16)$$

где су

$$\Delta R_1^x = \frac{\Delta R_1^x}{R_1^x} R_1^x = 10^{-4} 100000 = 10[\Omega], \quad (17)$$

$$\Delta R_1^y = \frac{\Delta R_1^y}{R_1^y} R_1^y = 10^{-4} 1000000 = 100[\Omega], \quad (18)$$

$$\Delta R_1^z = \frac{\Delta R_1^z}{R_1^z} R_1^z = 10^{-4} 10000000 = 1000[\Omega], \quad (19)$$

$$\Delta R_2^x = \frac{\Delta R_2^x}{R_2^x} R_2^x = 10^{-4} 50000 = 5[\Omega], \quad (20)$$

$$\Delta R_2^y = \frac{\Delta R_2^y}{R_2^y} R_2^y = 10^{-4} 500000 = 50[\Omega], \quad (21)$$

$$\Delta R_2^z = \frac{\Delta R_2^z}{R_2^z} R_2^z = 10^{-4} 5000000 = 500[\Omega]. \quad (22)$$

У општем случају може се десити да због различитих знакова апсолутних грешака на десној страни израза (14-16), дође до њиховог поништења; тиме укупна апсолутна грешка с леве стране ових израза постаје једнака нули, што је немогуће. Зато се при процени грешака користе средњеквадратна одступања постојећих компонената грешке. Средњеквадратне вредности израза (14-16) биће

$$(\Delta R_{i=3,j=0,k=0})_{sk} = \frac{\sqrt{((R_1^x)^2 \Delta R_2^x)^2 + ((R_2^x)^2 \Delta R_1^x)^2}}{(R_1^x + R_2^x)^2}, \quad (23)$$

$$(\Delta R_{i=0,j=3,k=0})_{sk} = \frac{\sqrt{((R_1^y)^2 \Delta R_2^y)^2 + ((R_2^y)^2 \Delta R_1^y)^2}}{(R_1^y + R_2^y)^2}, \quad (24)$$

$$\begin{aligned} (\Delta R_{i=0,j=0,k=3})_{sk} &= \\ &= \frac{\sqrt{((R_1^z)^2 \Delta R_2^z)^2 + ((R_2^z)^2 \Delta R_1^z)^2}}{(R_1^z + R_2^z)^2}. \end{aligned} \quad (25)$$

Сменом резултата (17-22) у изразе (23-25) добија се

$$\begin{aligned} (\Delta R_{i=3,j=0,k=0})_{sk} &= 2,483[\Omega], \\ (\Delta R_{i=0,j=3,k=0})_{sk} &= 24,83[\Omega], \\ (\Delta R_{i=0,j=0,k=3})_{sk} &= 248,3[\Omega]. \end{aligned} \quad (26)$$

На основу резултата (26) и (8-10) релативна средњеквадратна одступања отпорности $R_{i=3,j=0,k=0}$, $R_{i=0,j=3,k=0}$ и $R_{i=0,j=0,k=3}$ биће

$$\begin{aligned} \left(\frac{\Delta R_{i=3,j=0,k=0}}{R_{i=3,j=0,k=0}} \right)_{sk} &= \left(\frac{\Delta R_{i=0,j=3,k=0}}{R_{i=0,j=3,k=0}} \right)_{sk} \\ &= \left(\frac{\Delta R_{i=0,j=3,k=0}}{R_{i=0,j=3,k=0}} \right)_{sk} = 0,745 \cdot 10^{-4}. \end{aligned} \quad (27)$$

Понављањем описаног поступка одређивања средњеквадратних одступања осталих отпорности $R_{i,j=0,k=0}$, $i=0,1,5$, $R_{i=0,j,k=0}$, $j=0,9$ и $R_{i=0,j=0,k=3}$, $k=0,9$ сачињена је таблица Т.1, док то исто, за неке карактеристичне отпорности $R_{i,j,k}$, представљено таблицом Т.2.

3.1 Уопштена анализа нестабилности паралелних веза отпорника

Нека је дата паралелна веза произвољног броја n отпорника. Тада је еквивалентна отпорност везе дата изразом

$$\begin{aligned} R_{i,i=1,n} &= R_1 \parallel R_2 \parallel \dots \parallel R_n \\ &= \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n} \right)^{-1}. \end{aligned} \quad (28)$$

Тотални диференцијал изрази (28) може се представити у следећем облику

$$dR_{i,i=1,n} = \frac{\frac{dR_1}{R_1^2} + \frac{dR_2}{R_2^2} + \dots + \frac{dR_n}{R_n^2}}{\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n} \right)^2}. \quad (29)$$

Апроксимацијом тоталног и парцијалних диференцијала у изразу (29) одговарајућим прираштајима, добија се тотална апсолутна грешка $\Delta R_{i,i=1,n}$ као функција парцијалних апсолутних грешака ΔR_i , $i \in (1, n)$, односно

$$\Delta R_{i,i=1,n} = \frac{\frac{\Delta R_1}{R_1^2} + \frac{\Delta R_2}{R_2^2} + \dots + \frac{\Delta R_n}{R_n^2}}{\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n} \right)^2}. \quad (30)$$

Приликом одређивања апсолутног одступања отпорности $\Delta R_{i,i=1,n}$ на основу изрази (30) постоји опасност да парцијалне грешке имају како позитиван, тако и негативан знак, те да услед тога дође до одговарајућег поништења, чиме тотална грешка добија вредност једнаку нули. Ово је наравно немогуће, јер вероватноћа оваквог случајног догађаја тежи нули. Зато се при процени апсолутне грешке уместо изрази (30) користи његова средњеквадратна вредност, која је увек позитивна и различита од нуле, односно

$$\begin{aligned} \left(\Delta R_{i,i=1,n} \right)_{sk} &= \\ &= \frac{\sqrt{\left(\frac{\Delta R_1}{R_1^2} \right)^2 + \left(\frac{\Delta R_2}{R_2^2} \right)^2 + \dots + \left(\frac{\Delta R_n}{R_n^2} \right)^2}}{\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n} \right)^2}. \end{aligned} \quad (31)$$

Релативна средњеквадратна грешка на основу (31) и (28) износи

$$\begin{aligned} \left(\frac{\Delta R_{i,i=1,n}}{R_{i,i=1,n}} \right)_{sk} &= \\ &= \frac{\sqrt{\left(\frac{\Delta R_1}{R_1} \right)^2 + \left(\frac{\Delta R_2}{R_2} \right)^2 + \dots + \left(\frac{\Delta R_n}{R_n} \right)^2}}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n}}. \end{aligned} \quad (32)$$

У специјалном случају, када су модули релативних парцијалних грешака међусобно једнаки, односно

$$\left| \frac{\Delta R_1}{R_1} \right| = \left| \frac{\Delta R_2}{R_2} \right| = \dots = \left| \frac{\Delta R_n}{R_n} \right| = \left| \frac{\Delta R}{R} \right|, \quad (33)$$

израз (32) прелази у облик

$$\left(\frac{\Delta R_{i,i=1,n}}{R_{i,i=1,n}} \right)_{sk} = \frac{\sqrt{\frac{1}{R_1^2} + \frac{1}{R_2^2} + \dots + \frac{1}{R_n^2}}}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n}} \left| \frac{\Delta R}{R} \right|. \quad (34)$$

Нека су дате отпорности $R_{i,i=1,2}$, где су $R_1 = 100000[\Omega]$, $R_2 = 50000[\Omega]$, а њихове релативне мерне несигурности $|\Delta R_1 / R_1| = |\Delta R_2 / R_2|$

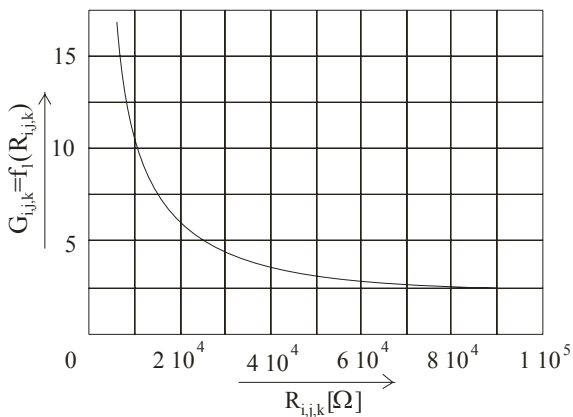
$=|\Delta R/R|=10^{-4}$. Тада се применом израза (34), када се отпорности са вишим индексом од 2 сматрају бесконачно великима, за релативну мерну несигурност паралелне везе ових отпорника добија $(\Delta R_{i,i=1,2})/R_{i,i=1,2}=0,745 \cdot 10^{-4}$. Интересантно је напоменути да се средњеквадратна мерна несигурност при паралелној спрези отпорника смањује, што је очигледно из таблице Т.1; у случају редне везе отпорника, лако се може доказати да се средњеквадратна мерна несигурност такође смањује.

4. Релативне несигурности појачања

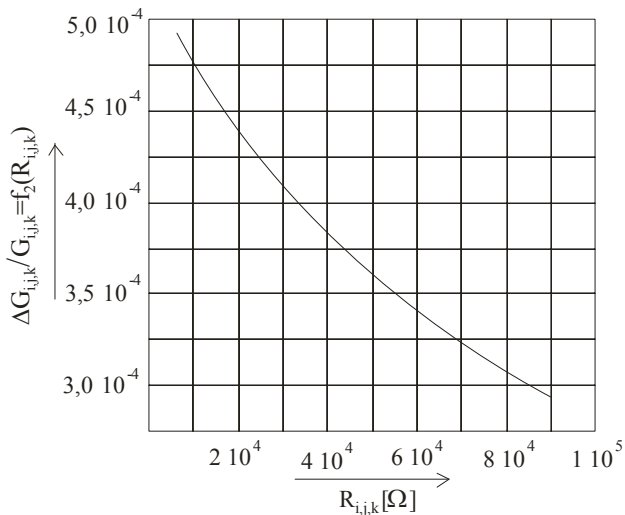
Појачање инструменталног појачавача, дато изразима (1) и (7), у сагласности са каталожним подацима [1], може се представити у облику

$$G_{i,j,k} = 1 + \frac{k[\Omega]}{R_{i,j,k}[\Omega]}, \quad (35)$$

где су $k=100\,000[\Omega]$ и $\Delta k/k=10^{-4}$ за $G=1$, $\Delta k/k=510^{-4}$ за $G=10$ и $\Delta k/k=710^{-4}$, за $G=100$.



Сл.2.



Сл.3.

Налажењем тоталног диференцијала израза (38) и заменом појединих диференцијала одговарајућим прираштајима добија се

$$dG_{i,j,k} = \frac{1}{R_{i,j,k}} dk - \frac{k}{R_{i,j,k}^2} dR_{i,j,k}, \quad (36)$$

односно

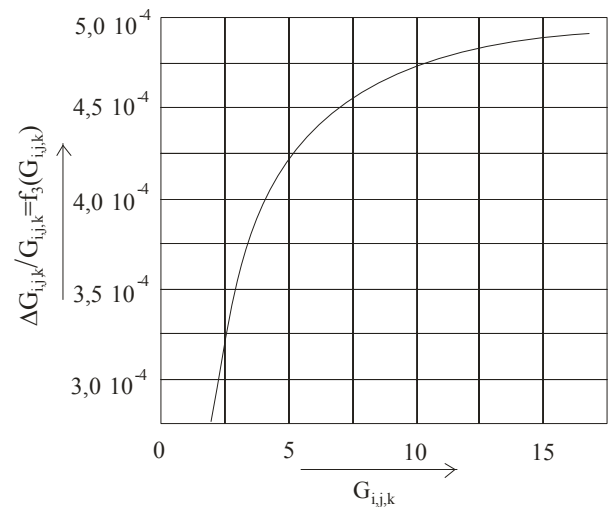
$$\Delta G_{i,j,k} = \frac{1}{R_{i,j,k}} \Delta k - \frac{k}{R_{i,j,k}^2} \Delta R_{i,j,k}. \quad (37)$$

Средњеквадратна вредност израза (37) може се представити у облику

$$(\Delta G_{i,j,k})_{sk} = \sqrt{\left(\frac{1}{R_{i,j,k}} \Delta k\right)^2 + \left(\frac{k}{R_{i,j,k}^2} \Delta R_{i,j,k}\right)^2}, \quad (38)$$

чиме се релативно средњеквадратно одступање бројне вредности појачања $G_{i,j,k}$ може написати у облику

$$\left(\frac{\Delta G_{i,j,k}}{G_{i,j,k}}\right)_{sk} = \frac{\sqrt{(\Delta k)^2 + \left(\frac{k}{R_{i,j,k}} \Delta R_{i,j,k}\right)^2}}{k + R_{i,j,k}}. \quad (39)$$



Сл.4.

Сагласно изразу (39) при $\Delta k/k=5,2 \cdot 10^{-4}$ сачињена је таблица Т.1, одакле за $\max G_{i,j,k}=16,99$ следе резултати $\max(\Delta G/G)_{sk}=\pm 0,5 \cdot 10^{-3}$, $\max(\Delta G)_{sk}=\pm 0,085$, $\max G_{i,j,k}=16,99 \pm 0,085$, којима одговара тачност са три важеће цифре.

Применом израза (35) и (37-39) нацртани су дијаграми $G_{i,j,k}=f_1(R_{i,j,k})$, $(\Delta G_{i,j,k}/G_{i,j,k})=f_2(R_{i,j,k})$ и $(\Delta G_{i,j,k}/G_{i,j,k})=f_3(G_{i,j,k})$, који су приказани на Сл.2, Сл.3 и Сл.4.

i	j	k	стање прекидачке мреже	$R_G = R_{i,j,k} [\Omega]$	$\left(\frac{\Delta R_{i,j,k}}{R_{i,j,k}}\right)$	$G_{i,j,k}$	$\left(\frac{\Delta G_{i,j,k}}{G_{i,j,k}}\right)_{sk}$
0	0	0	$\overline{x_1 x_2 x_3 x_4 y_1 y_2 y_3 y_4 z_1 z_2 z_3 z_4}$	$R_{0,0,0} = \infty$	0	1,00	0
1	1	1	$\overline{x_1 x_2 x_3 x_4 y_1 y_2 y_3 y_4 z_1 z_2 z_3 z_4}$	$R_{1,1,1} = 90\,090$	$0,91 \cdot 10^{-4}$	2,11	$2,78 \cdot 10^{-4}$
2	2	2	$\overline{x_1 x_2 x_3 x_4 y_1 y_2 y_3 y_4 z_1 z_2 z_3 z_4}$	$R_{2,2,2} = 45\,045$	$0,91 \cdot 10^{-4}$	3,22	$3,64 \cdot 10^{-4}$
3	3	3	$\overline{x_1 x_2 x_3 x_4 y_1 y_2 y_3 y_4 z_1 z_2 z_3 z_4}$	$R_{3,3,3} = 30\,030$	$0,67 \cdot 10^{-4}$	4,33	$4,03 \cdot 10^{-4}$
4	4	4	$\overline{x_1 x_2 x_3 x_4 y_1 y_2 y_3 y_4 z_1 z_2 z_3 z_4}$	$R_{4,4,4} = 22\,522$	$0,67 \cdot 10^{-4}$	5,44	$4,28 \cdot 10^{-4}$
5	5	5	$\overline{x_1 x_2 x_3 x_4 y_1 y_2 y_3 y_4 z_1 z_2 z_3 z_4}$	$R_{5,5,5} = 18\,018$	$0,91 \cdot 10^{-4}$	6,55	$4,47 \cdot 10^{-4}$
6	6	6	$\overline{x_1 x_2 x_3 x_4 y_1 y_2 y_3 y_4 z_1 z_2 z_3 z_4}$	$R_{6,6,6} = 15\,015$	$0,75 \cdot 10^{-4}$	7,66	$4,57 \cdot 10^{-4}$
7	7	7	$\overline{x_1 x_2 x_3 x_4 y_1 y_2 y_3 y_4 z_1 z_2 z_3 z_4}$	$R_{7,7,7} = 12\,870$	$0,67 \cdot 10^{-4}$	8,77	$4,65 \cdot 10^{-4}$
8	8	8	$\overline{x_1 x_2 x_3 x_4 y_1 y_2 y_3 y_4 z_1 z_2 z_3 z_4}$	$R_{8,8,8} = 11\,261$	$0,91 \cdot 10^{-4}$	9,88	$4,74 \cdot 10^{-4}$
9	9	9	$\overline{x_1 x_2 x_3 x_4 y_1 y_2 y_3 y_4 z_1 z_2 z_3 z_4}$	$R_{9,9,9} = 10\,010$	$0,81 \cdot 10^{-4}$	10,99	$4,78 \cdot 10^{-4}$
10	7	7	$\overline{x_1 x_2 x_3 x_4 y_1 y_2 y_3 y_4 z_1 z_2 z_3 z_4}$	$R_{10,7,7} = 9\,285$	$0,77 \cdot 10^{-4}$	11,77	$4,81 \cdot 10^{-4}$
11	7	7	$\overline{x_1 x_2 x_3 x_4 y_1 y_2 y_3 y_4 z_1 z_2 z_3 z_4}$	$R_{11,7,7} = 8\,496$	$0,71 \cdot 10^{-4}$	12,77	$4,84 \cdot 10^{-4}$
12	7	7	$\overline{x_1 x_2 x_3 x_4 y_1 y_2 y_3 y_4 z_1 z_2 z_3 z_4}$	$R_{12,7,7} = 7\,831$	$0,70 \cdot 10^{-4}$	13,77	$4,87 \cdot 10^{-4}$
13	7	7	$\overline{x_1 x_2 x_3 x_4 y_1 y_2 y_3 y_4 z_1 z_2 z_3 z_4}$	$R_{13,7,7} = 7\,262$	$0,65 \cdot 10^{-4}$	14,77	$4,89 \cdot 10^{-4}$
14	7	7	$\overline{x_1 x_2 x_3 x_4 y_1 y_2 y_3 y_4 z_1 z_2 z_3 z_4}$	$R_{14,7,7} = 6\,770$	$0,62 \cdot 10^{-4}$	15,77	$4,90 \cdot 10^{-4}$
15	7	7	$\overline{x_1 x_2 x_3 x_4 y_1 y_2 y_3 y_4 z_1 z_2 z_3 z_4}$	$R_{15,7,7} = 6\,341$	$0,59 \cdot 10^{-4}$	16,77	$4,92 \cdot 10^{-4}$
15	9	9	$\overline{x_1 x_2 x_3 x_4 y_1 y_2 y_3 y_4 z_1 z_2 z_3 z_4}$	$R_{15,9,9} = 6\,254$	$0,58 \cdot 10^{-4}$	16,99	$4,92 \cdot 10^{-4}$

T.1.

6. Закључак

Спроведена анализа грешака за микропроцесорско управљање појачањем инструменталног појачавача указује на следеће: 1) прецизност генерисања бројне вредности појачања G директно зависи од прецизности задавања отпорности R_G и вредност $(\Delta G/G)_{sk} = \pm 5 \cdot 10^{-4}$ на интервалу $G \in (1,00; 16,99)$ добија се при $\Delta R/R = \pm 10^{-4}$, док се утицај отпорности електронских прекидача у затвореном стању $r_{ON} = 1[\Omega]$ занемарује; 2) у случају 16-битног комбинавања свих X, Y, Z отпорничких група и прецизности стандардних отпорника $\Delta R/R = \pm 10^{-4}$, прецизност генерисања појачања остаје непромењена, а резолуција са 1600 вредности расте на 4096; 3) прецизност уграђених напонских референци такође износи $\pm 10^{-4}$; 4) смањењем релативне грешке уграђених елемената на ниво $\pm 10^{-5}$ врши се сразмерно смањење грешке генерисања бројне вредности појачања.

Овај рад је подржала Влада Републике Србије, у оквиру пројекта *Реконфигурациони мерни системи*, под редним бројем T.R.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.google.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