

# УПРАВЉАЊЕ ПОЈАЧАЊЕМ ИНСТРУМЕНТАЛНОГ ПОЈАЧАВАЧА ПОМОЋУ МИКРОКОНТРОЛЕРА

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

У раду је дат кратак приказ конструкције инструменталног појачавача, код кога се бројном вредношћу појачања управља програмски из одговарајућег микроконтролера. Урађен је алгоритам управљања појачањем инструменталног појачавача на нивоу дијаграма тока и указано на могућности његове примене при повећању тачности мерења излазног напона мерног претварача методом поређења, уз помоћ инструменталног појачавача са прецизном регулацијом бројне вредности појачања и аналогно-дигиталног конвертора одговарајуће прецизности.

## 1. Увод

Инструментални појачавач са програмским управљањем бројном вредношћу појачања на интервалу  $G \in (1,00;16,99)$  са децималном  $3\frac{1}{2}$  разредном прецизношћу приказан је шемом са Сл.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 и мале температурне зависности, при чему се спољном уградњом отпорника  $R_G$  бројна вредност појачања добијеног појачавача може представити изразом

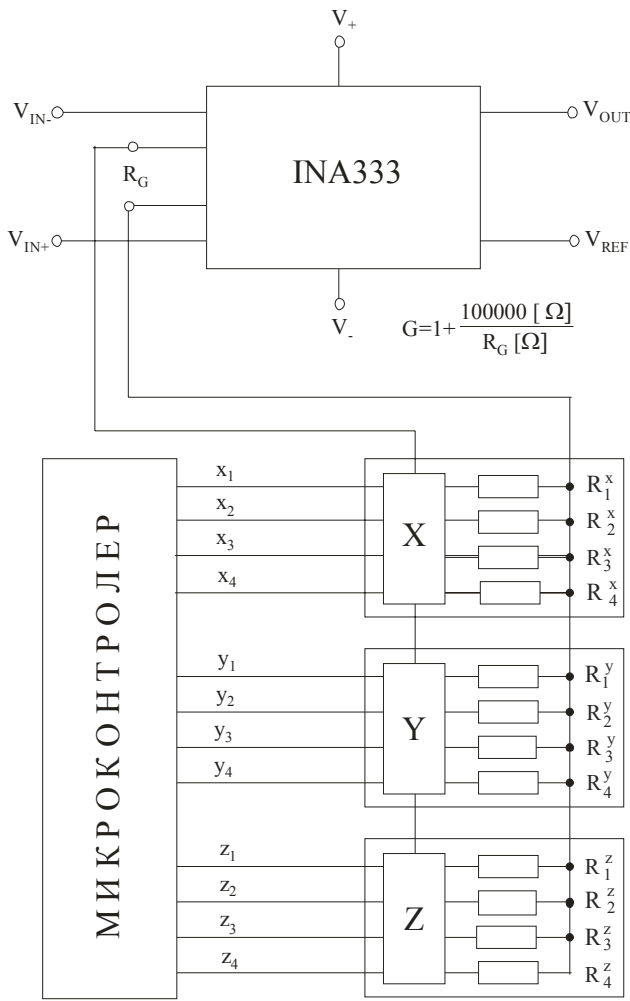
$$G = 1 + \frac{100000[\Omega]}{R_G[\Omega]}, \quad (1)$$

при томе, имајући у виду да 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 одредити вредност релативне средњеквадратне нестабилности  $(\Delta G/G)_{sk}$  добијене бројне вредности појачања  $G$ , ако је позната релативна нестабилност уграђеног отпорника  $R_G$ . Максимална стабилност бројне вредности појачања  $G$  при томе захтева релативну нестабилност отпорности  $R_G$  не већу од  $10^{-4}$  и минималну 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  $G \in (1,00;16,99)$  бројне вредности појачања регулационог инструменталног појачавача добија вредност релативне нестабилности  $\Delta k/k \sim 5,210^{-4}$ . 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, већу од  $1V/210^{-10} A = 510^9 [\Omega] \gg 10^7 [\Omega]$ , колико износи највећа вредност отпора  $R_G$ , која се користи у случају анализираниог инструменталног појачавача; каталошка вредност ове улазне отпорности износи  $100 [G\Omega]$ .

## 2. Принцип рада

Управљање појачањем  $G$  инструменталног појачавача са Сл.1 врши се на основу израза (1) управљањем вредношћу отпора  $R_G$ . Променљива отпорност  $R_G$  је реализована, сагласно Сл.1, у облику паралелне везе 12 стандардних отпорника, мале релативне нестабилности, реда  $10^{-4}$ , чије се укључивање врши уз помоћ прекидачке мреже, састављене од 12 електронских прекидача  $XYZ = x_1, x_2, x_3, x_4, y_1, y_2, y_3, y_4, z_1, z_2, z_3, z_4$ , којом се управља програмски из микроконтролера, тако што управљачки сигнали долазе на 12-битну магистралу, са којом су управљачки пинови поменуте електронске прекидачке мреже повезани.



Сл.1.

Отпорности примењених 12 стандардних отпорника су следеће,

$$\begin{aligned}
 R_1^x &= 100\,000[\Omega], & R_1^y &= 1\,000\,000[\Omega], \\
 R_2^x &= 50\,000[\Omega], & R_2^y &= 5\,000\,000[\Omega], \\
 R_3^x &= 25\,000[\Omega], & R_3^y &= 250\,000[\Omega], \\
 R_4^x &= 12\,500[\Omega], & R_4^y &= 125\,000[\Omega], \\
 R_1^z &= 10\,000\,000[\Omega], \\
 R_2^z &= 5\,000\,000[\Omega], \\
 R_3^z &= 2\,500\,000[\Omega], \\
 R_4^z &= 1\,250\,000[\Omega],
 \end{aligned} \quad (2)$$

које се у сажетом облику могу представити следећим векторима,

$$\begin{aligned}
 R_{n,n=0,4}^x &= \{\infty, 10^5; 0,5 \cdot 10^5; 0,25 \cdot 10^5; 0,125 \cdot 10^5\}, \\
 R_{n,n=0,4}^y &= \{\infty, 10^6; 0,5 \cdot 10^6; 0,25 \cdot 10^6; 0,125 \cdot 10^6\}, \\
 R_{n,n=0,4}^z &= \{\infty, 10^7; 0,5 \cdot 10^7; 0,25 \cdot 10^7; 0,125 \cdot 10^7\},
 \end{aligned} \quad (3)$$

где стање  $n=0$  прекидачких блокова X, Y и Z указују да је свих 12 електронских прекидача

прекидачке мреже XYZ отворено, а отпорност  $R_G = \infty$ .

Генерисање целобројних вредности појачања  $G_i$  на интервалу  $G_i \in (1;16)$  врши се задавањем помоћу специјалног програма из микроконтролера одговарајућих стања прекидачког блока X, тако да се добијају следеће радне отпорности,

$$\begin{aligned}
 R_{i,i=0,15} &= R_{i=0}^x \vee \frac{R_1^x}{i} \quad i=1,15 \\
 &= \{\infty, 10^5; 0,5 \cdot 10^5; 0,33333 \cdot 10^5; 0,25 \cdot 10^5; \\
 &0,2 \cdot 10^5; 0,16667 \cdot 10^5; 0,14286 \cdot 10^5; 0,125 \cdot 10^5; \\
 &0,11111 \cdot 10^5; 0,1 \cdot 10^5; 0,90909 \cdot 10^4; \\
 &0,83333 \cdot 10^4; 0,76923 \cdot 10^4; 0,66667 \cdot 10^4\}[\Omega].
 \end{aligned} \quad (4)$$

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 се задавањем одговарајућих команди из микроконтролера за генерисање одговарајућих вектора отпорности отпорне мреже  $R_{j,j=0,9}$  и  $R_{k,k=0,9}$ , односно

$$\begin{aligned}
 R_{j,j=0,9} &= R_{j=0}^y \vee \frac{R_1^y}{j} \quad j=1,9 \\
 &= \{\infty, 10^6; 0,5 \cdot 10^6; 0,33333 \cdot 10^6; 0,25 \cdot 10^6; \\
 &0,2 \cdot 10^6; 0,16667 \cdot 10^6; 0,14286 \cdot 10^6; 0,125 \cdot 10^6; \\
 &0,11111 \cdot 10^6\}[\Omega],
 \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned}
 R_{k,k=0,9} &= R_{k=0}^z \vee \frac{R_1^z}{k} \quad k=1,9 \\
 &= \{\infty, 10^7; 0,5 \cdot 10^7; 0,333333 \cdot 10^7; 0,25 \cdot 10^7; \\
 &0,2 \cdot 10^7; 0,1666667 \cdot 10^7; 0,1428571 \cdot 10^7; \\
 &0,125 \cdot 10^7; 0,1111111 \cdot 10^7\}[\Omega].
 \end{aligned} \quad (6)$$

Како се види, да се дејством прекидачких блокова X, Y и Z понаособ добијају отпорности представљене изразима (4-6), укупно  $16+10+p=36$ . Заједничким дејством прекидачких блокова X, Y и Z на основу одговарајућих програмских команди из микроконтролера са Сл.1 добијају се преосталих  $1699-36=1663$  различитих отпорности, колико има и преосталих могућих комбинација стања електронских прекидача  $x_1, x_2, x_3, x_4, y_1, y_2, y_3, y_4, z_1, z_2, z_3, z_4$ . Тиме се могуће комбинације отпорности пара-

лелно спрегнутих стандардних отпорника могу представити следећим вектором,

$$\begin{aligned}
 & R_{i,j,k,i=0,15,j=0,9,k=0,9} \\
 & = R_{i=0,15} \mid \mid R_{j=0,9} \mid \mid R_{k=0,9} \\
 & = \{R_{i-0} \mid \mid R_{j-0} \mid \mid R_{k-0}; R_{i-0} \mid \mid R_{j-0} \mid \mid R_{k-1}; \\
 & R_{i-0} \mid \mid R_{j-0} \mid \mid R_{k-2}; \dots; R_{i-0} \mid \mid R_{j-0} \mid \mid R_{k-9}; \\
 & R_{i-0} \mid \mid R_{j-1} \mid \mid R_{k-1}; R_{i-0} \mid \mid R_{j-1} \mid \mid R_{k-2}; \dots; \\
 & R_{i-0} \mid \mid R_{j-1} \mid \mid R_{k-9}; \dots; R_{i-0} \mid \mid R_{j-2} \mid \mid R_{k-0}; \\
 & R_{i-0} \mid \mid R_{j-2} \mid \mid R_{k-1}; R_{i-0} \mid \mid R_{j-2} \mid \mid R_{k-2}; \dots; \\
 & R_{i-0} \mid \mid R_{j-2} \mid \mid R_{k-9}; R_{i-1} \mid \mid R_{j-0} \mid \mid R_{k-0}; \\
 & R_{i-1} \mid \mid R_{j-0} \mid \mid R_{k-1}; R_{i-1} \mid \mid R_{j-0} \mid \mid R_{k-2}; \dots; \\
 & R_{i-1} \mid \mid R_{j-0} \mid \mid R_{k-2}; \dots; R_{i-1} \mid \mid R_{j-0} \mid \mid R_{k-9}; \\
 & \dots; R_{i-1} \mid \mid R_{j-1} \mid \mid R_{k-0}; R_{i-1} \mid \mid R_{j-1} \mid \mid R_{k-1}; \\
 & R_{i-1} \mid \mid R_{j-1} \mid \mid R_{k-2}; \dots; R_{i-1} \mid \mid R_{j-1} \mid \mid R_{k-9}; \\
 & R_{i-1} \mid \mid R_{j-2} \mid \mid R_{k-0}; R_{i-1} \mid \mid R_{j-2} \mid \mid R_{k-1}; \\
 & R_{i-1} \mid \mid R_{j-2} \mid \mid R_{k-2}; \dots; R_{i-1} \mid \mid R_{j-2} \mid \mid R_{k-9}; \dots; \\
 & R_{i-1} \mid \mid R_{j-9} \mid \mid R_{k-9}; \dots; R_{i-2} \mid \mid R_{j-0} \mid \mid R_{k-0}; \dots; \\
 & R_{i-2} \mid \mid R_{j-0} \mid \mid R_{k-1}; R_{i-2} \mid \mid R_{j-0} \mid \mid R_{k-2}; \dots; \\
 & R_{i-15} \mid \mid R_{j-9} \mid \mid R_{k-9}\}.
 \end{aligned} \quad (7)$$

На основу израза (7) и (1) појачање микроконтролерски управљаног инструменталног појачавача добија облик

$$G_{i,j,k,i=0,15,j=0,9,k=0,9} = 1 + \frac{100\,000[\Omega]}{R_{i,j,k,i=0,15,j=0,9,k=0,9}[\Omega]} \cdot (8)$$

Применом ове формуле и одговарајућег алгоритма управљања у микроконтролеру врши се његово израчунавање.

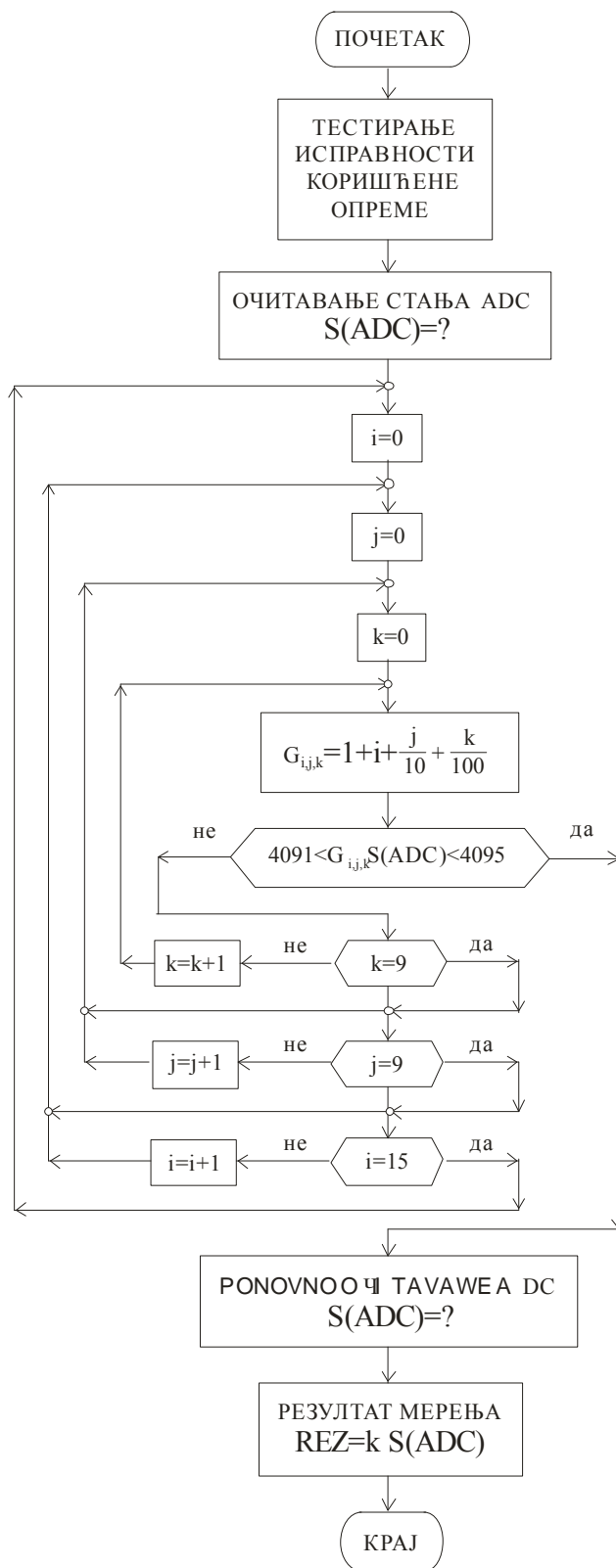
### 3. Алгоритам управљања појачањем

Дијаграм тока алгоритма за микропроцесорско управљање бројном вредношћу појачања разматране шеме инструменталног појачавача приказан је на Сл.2. Њега карактеришу следеће радне операције:

1) тестирање исправности коришћене мерне опреме, при чему овом приликом неће бити разматрани детаљи;

2) читавање стања  $S(ADC)$  аналого-дигиталног конвертора  $ADC$ , прикљученог на излазни напон одговарајућег мерног претварача електричне или неелектричне величине;

3) постављање почетних вредности  $i = 0$ ,  $j = 0$ ,  $k = 0$ , бројача управљаних стања паралел-



Сл.2.

не отпорничке мреже од 12 стандардних отпорника, релативних грешака  $10^{-4}$ , преко прекидачке мреже од 12 електронских прекидача  $x_1, x_2, x_3, x_4, y_1, y_2, y_3, y_4, z_1, z_2, z_3, z_4$ , при чему је сваки од ових прекидача везан на ред са одговарајућим стандардним отпорником;

4) генерисање бројне вредности појачања инструменталног појачавача

$$G_{i,j,k} = 1 + i + \frac{j}{10} + \frac{k}{100}; \quad (9)$$

5) испитивање критеријума

$$4091 < G_{i,j,k} S(\text{ADC}) < 4095, \quad (10)$$

чије задовољење омогућава конверзију појачањег напона са излаза мерног претварача до горње границе аналогно-дигиталне конверзије и поновну аналогно-дигиталну конверзију са релативном грешком  $(4095 - 4091) / 4095 = 0,00098 \approx 0,001 = 10^{-3}$ ; напоменимо да је критеријум (10) дефинисан у границама довољно широког интервала (4091, 4095) како бисмо били сигурни да ће се на том интервалу наћи нека од генерисаних вредности појачања; анализом грешака генерисања задатих вредности појачања, може се одредити најужа вредност овог интервала;

6) провера критеријума  $k = 9$ ; ако није задовољен, број  $k$  се повећава на  $k + 1$ , у противном случају поставља се вредност  $k = 0$  и једновремено активира испитивање следећег критеријума;

7) следећи критеријум је  $j = 9$ ; у случају његовог незадовољења вредност  $j$  се увећава на вредност  $j + 1$ , а у противном се поставља вредност  $j = 0$ , после чега следи наредни критеријум;

8) наредни критеријум је  $i = 15$ ; у случају да овај критеријум није задовољен, вредност  $i$  се повећава на  $i + 1$ , у противном се иде на следећу операцију;

9) следећа операција је поновно читавање стања аналогно-дигиталног конвертора ADC, када је овај везан на излазу инструменталног појачавача, а мерни сигнал појачан до вредности која одговара максималном стању 4095 аналогно-дигиталног конвертора ADC;

10) резултат мерења биће

$$\text{REZ} = k S(\text{ADC}), \quad (11)$$

где су  $S(\text{ADC})$ -поновно стање аналогно-дигиталног конвертора ADC, унутар бројног интервала  $4091 < S(\text{ADC}) < 4095$ , а  $k$ -одговарајућа константа сразмерности, која уједно врши претварање напонске јединице у одговарајућу једи-

ницу мерене електричне или неелектричне величине.

#### 4. Могућности повећања резолуције и прецизности инструменталног појачавача

Анализирани инструментални појачавач са отпорничко-прекидачком мрежом од 12 стандардних отпорника и 12 електронских прекидачких елемената у могућности је да у сагласности са шемом на Сл.1, генерише укупно 4096 различитих вредности отпора  $R_G$ , а тиме уједно, исто толико различитих бројних вредности појачања  $G$ . Тиме би се, заменом интервала промене целобројних вредности  $j, j = \overline{0,9}$  и  $k, k = \overline{0,9}$  у дијаграму тока са Сл.2 вредностима  $j, j = \overline{0,15}$  и  $k, k = \overline{0,15}$ , уместо 1600 различитих децималних бројних вредности појачања добило 4096 хексадецималних, односно резолуција би се повећала  $16 \times 16 / (10 \times 10) = 2,56$  пута. При томе, имајући у виду да располажемо микроконтролером, претварање хексадецималних у децималне бројеве не представља озбиљан проблем.

Повећање прецизности представљеног инструменталног појачавача са децималне  $3\frac{1}{2}$  разредне на  $4\frac{1}{2}$  разредну, постиже се на следећи начин: 1) заменом свих уграђених елемената релативне грешке  $10^{-4}$ , елементима релативне грешке  $10^{-5}$ , који се нуде преко одговарајућих каталога на интернету и 2) применом отпорничко-прекидачке мреже од 16 стандардних отпорника и 16 електронских прекидачких елемената. Овим би се уједно и резолуција повећала са 1600 различитих децималних бројних вредности појачања или 4096 хексадецималних, у случају 12 стандардних отпорника и 12 електронских прекидачких елемената, на 16000 различитих децималних или 65536 хексадецималних бројних вредности појачања.

#### 5. Закључак

Инструментални појачавач напонских сигнала високе тачности регулације бројне вредности појачања представља један од најважнијих мерних средстава, реконфигурабилног карактера, неопходних при реализацији савремених аналогно-дигиталних напонских компензационих метода. Применом одговарајућег софтвера он се може на једноставан на-

чин преобратити у дигитални потенциометар и применити код програмски управљаних мерних мостова. Интересантних и програмски релативно једноставних примена мерног појачавача са прецизним задавањем бројне вредности појачања сигурно је много и свака од њих се може поставити као посебан проблем. Поменимо само неке.

У теорији осцилатора речи учестаност осциловања и услов осциловања имају тачно одређена значења, која су између осталог и математички прецизно дефинисана, у функцији бројне вредности појачања. Програмским задавањем бројне вредности појачања и одговарајуће конфигурације додатних пасивних елемената шеме (отпорности, индуктивности, капацитивности, плочице кварцног кристала и слично) могу се бирати одговарајуће могуће комбинације задовољених услова осциловања и фреквенције осциловања, чиме је реализован синтезатор фреквенције. У вези с овим може се још напоменути да се одговарајућим програмским управљањем амплитудном и фазном карактеристиком могу добити филтри одређених карактеристика.

Овај рад је подржала Влада Републике Србије, у оквиру пројекта *Реконфигурациони мерни системи*, под редним бројем Т.Р.11020.

## Литература

[1] Texas Instruments, INA 333, Micro-Power (50  $\mu$ A), Zero-Drift, Rail-to-Rail Out Instrumentation Amplifier, [www.ti.com](http://www.ti.com), SBOS4458 - JULY 2008 - REVISED OCTOBER 2008

[2] Texas Instruments, TC5A23159 1- $\Omega$  DUAL SPDT ANALOG SWITCH 5V/3.3V 2 CHANNEL 2:1 MULTIPLEXER / DEMULTIPLEXER, [www.ti.com](http://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](http://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  $\Omega$  to 125 M $\Omega$ , Short Form Catalog 2008