

Andrzej ODON

POLITECHNIKA POZNAŃSKA, INSTYTUT ELEKTRONIKI I TELEKOMUNIKACJI, ZAKŁAD METROLOGII

Analogowy przetwornik napięciowy o kształtowanej charakterystyce przejściowej do rozszerzania skali mierników analogowych

Dr inż. Andrzej ODON

Ukończył studia na Wydziale Elektrycznym Politechniki Poznańskiej w 1974 roku. Na tym samym wydziale w roku 1983 uzyskał stopień doktora nauk technicznych. Obecnie jest zatrudniony na stanowisku adiunkta w Zakładzie Metrologii Instytutu Elektroniki i Telekomunikacji Politechniki Poznańskiej. Głównie zainteresowania naukowe dotyczą badań przetworników i czujników pomiarowych, zwłaszcza dla optoelektronicznych zastosowań pomiarowych. Jest autorem i współautorem ponad 40 publikacji naukowych.

e-mail: odon@et.put.poznan.pl



Streszczenie

W artykule przedstawiono rozwiązanie konstrukcyjne i analizę układu przetwornika analogowego umożliwiającego uzyskanie efektu ekspansji skali mierników analogowych. Przetwornik umożliwia podział skali miernika na dwie części: odpowiednio o małej oraz dużej rozdzielczości, przy czym każda z tych części skali ma podziałkę równomierną, co jest istotną zaletą w porównaniu do tradycyjnych technik kształtowania podziałki. Opracowano prostą metodę projektowania przetwornika, zapewniającą możliwość doboru żądanych parametrów przejściowej charakterystyki przetwarzania.

Abstract

The paper presents analysis and design of a voltage converter that allows analogue meters obtaining scale expansion. This converter permits to divide the meter's scale into two parts of low and high resolution, respectively. Both subscales have uniform scale what is a very important advantage when compared to traditional methods of scale shaping. A simple method of the converter design is proposed, making possible to choose the desired parameters of the transfer processing characteristic.

Słowa kluczowe: miernik z rozszerzoną skalą, kształtowanie sygnału analogowego, kształtowanie stałoprądowych charakterystyk przejściowych, wzmacniacz nieliniowy

Keywords: expanded-scale meter, shaping of analogous signal, shaping of DC transfer characteristic, non-linear amplifier

1. Wstęp

W niektórych zastosowaniach pomiarowych zalecane jest stosowanie mierników analogowych o kształtowanej podziałce. Przykładem są mierniki z analogowym odczytem (odchylenie wskazówki lub panel odczytowy typu *bargraph*) przeznaczone do takich zadań jak: monitorowanie stanu naładowania akumulatorów, pomiar częstotliwości sieciowej, pomiar poziomu sygnału. Część podziałki w tego typu miernikach jest zagęszczona, ma małą rozdzielczość i przeznaczona jest dla pomiarów o charakterze informacyjnym, natomiast pozostała część podziałki ma dużą rozdzielczość i umożliwia dokładniejszy odczyt wielkości mierzonej. Uzyskuje się w ten sposób efekt tzw. „lupy wskazań” miernika dla istotnej, z punktu widzenia konkretnych potrzeb, części zakresu pomiarowego. Proste konstrukcje mierników o kształtowanej podziałce mają nieliniową charakterystykę przetwarzania, którą uzyskuje się przez odpowiednią konstrukcję mechaniczną ustroju pomiarowego lub zastosowanie w torze prądowym elementu nieliniowego o odpowiedniej charakterystyce prądowo-napięciowej. Tego typu rozwiązania konstrukcyjne mierników charakteryzują się nierównomierną podziałką w pobliżu wartości progowej dzielącej skalę na część o małej i dużej rozdzielczości, a ponadto na dokładność ich wskazań może istotny wpływ wywierać podatność elementu nieliniowego na temperaturę.

Problem kształtowania podziałki miernika można rozwiązać przez zastosowanie scalonych układów analogowych do budowy przetwornika napięciowego o odpowiednio dobranej charakterysty-

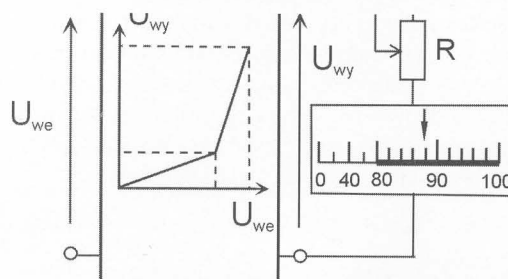
ce przejściowej. Uzyskuje się dzięki temu satysfakcjonującą dokładność wskazań miernika, a także technicznie łatwo realizowalny dobór parametrów charakterystyki przetwarzania. Badania dotyczące realizacji układowych i zastosowań przetworników o kształtowanej charakterystyce przejściowej są prowadzone od wielu lat [1, 2] i nadal są aktualne [3], przy czym prace koncentrują się najczęściej na problematyce korekcji i linearyzacji nieliniowych charakterystyk czujników pomiarowych. Jednym ze specyficznych zastosowań tego typu układów przetwornikowych może być również wykorzystanie ich do kompresji i ekspansji skali mierników analogowych o liniowej charakterystyce statycznej.

W artykule przedstawiono propozycję rozwiązania konstrukcyjnego układu przetwornika napięciowego przeznaczonego do współpracy z miernikiem analogowym w celu kształtowania podziałki takiego miernika. Zaprezentowano analizę pracy układu przetwornika i sposób doboru jego parametrów w celu uzyskania żądanego kształtu podziałki.

2. Koncepcja układu przetwornika

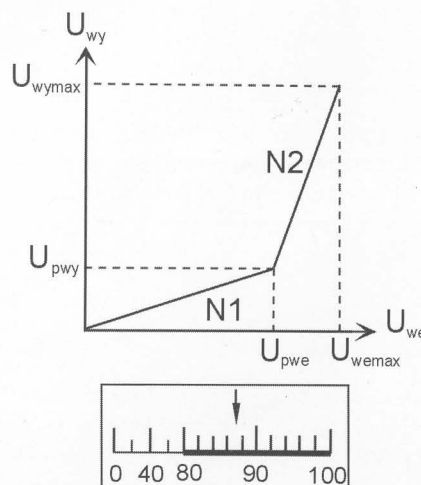
Schemat blokowy układu do kształtowania podziałki miernika przedstawiono na rys. 1.

Realizację zadania kształtowania podziałki miernika wykonano

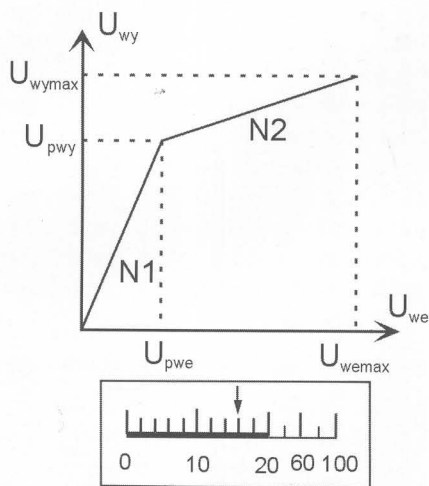


Rys. 1. Schemat blokowy układu przetwornika do kształtowania podziałki miernika.

przez zastosowanie w jego torze pomiarowym układu przetwornika napięciowego o kształtowanej charakterystyce przejściowej, w postaci dwóch linii łamanych o nachyleniach $N1$ i $N2$. Do wejścia przetwornika doprowadzony jest mierzony sygnał napięciowy, a do wyjścia dołączony jest miernik analogowy o liniowej charakterystyce statycznej, np. woltomierz magnetoelektryczny. Rezystor R umożliwia dogodne dopasowanie zakresu miernika do zakresu



Rys. 2. Charakterystyka przejściowa przetwornika do kształtowania napięciowej podziałki miernika z „lupą wskazań” dla końcowej części skali.



Rys. 3. Charakterystyka przejściowa przetwornika do kształtowania napięciowej podziałki miernika z „lupą wskazań” dla początkowej części skali.

$U_{wy\max}$ przetwornika napięciowego. Na rysunkach 2 i 3 zamieszczono przebiegi charakterystyk przejściowych przetworników napięciowych, które umożliwiają uzyskanie małej lub dużej rozdzielczości pomiaru w żądanych częściach podziałki.

Symbole literowe na rys. 2 i rys. 3 oznaczają: U_{pwe} – napięcie progowe sygnału wejściowego, U_{pwy} – napięcie progowe na wyjściu przetwornika, odpowiadające progowi napięcia wejściowego, $U_{wy\max}$ – napięcie maksymalne na wyjściu przetwornika (zakres miernika), odpowiadające maksymalnemu sygnałowi wejściowemu U_{wemax} .

Jeżeli zwiększona rozdzielczość skali, określana również jako „lupa wskazań”, ma być usytuowana w końcowej części miernika, należy wtedy zastosować przetwornik o charakterystyce przejściowej przedstawionej na rys. 2. Jeżeli napięcie sygnału wejściowego przekroczy zadane napięcie progowe U_{pwe} , następuje przejście punktu pracy do tej części charakterystyki, która ma większe nachylenie. Uzyskuje się w ten sposób efekt lupy napięciowej dla sygnałów z zakresu: $U_{pwe} \leq U_{we} \leq U_{wemax}$, gdzie U_{wemax} oznacza napięcie maksymalne sygnału wejściowego, odpowiadające zakresowi pomiaru (rys.2).

Charakterystyka z rys. 3 będzie miała zastosowanie, jeżeli stawia się wymagania, aby lupa napięciowa usytuowana była w początkowej części podziałki – wówczas dużą rozdzielczość podziałki otrzymuje się dla $0 < U_{we} < U_{pwe}$.

Jeżeli zdefiniowane zostaną współczynniki m oraz s , określające w wartościach względnych stosunek wartości progowych do wartości maksymalnych na wejściu i wyjściu przetwornika zgodnie z zależnościami (1) i (2)

$$s = \frac{U_{pwe}}{U_{wemax}} \quad (1)$$

$$m = \frac{U_{pwy}}{U_{wy\max}} \quad (2)$$

to łatwo można znaleźć następujące zależności (3) i (4) opisujące wymagania odnośnie nachylenia zbroczy $N1$ oraz $N2$ odcinków charakterystyki wzmacnienia przetwornika:

$$N1 = \operatorname{tg}\alpha_1 = \frac{m \cdot U_{wy\max}}{s \cdot U_{wemax}} \quad (3)$$

$$N2 = \operatorname{tg}\alpha_2 = \frac{(1-m) \cdot U_{wy\max}}{(1-s) \cdot U_{wemax}} \quad (4)$$

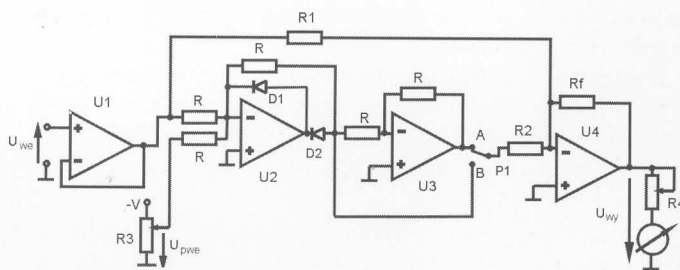
W wyniku podzielenia stronami równań (4) i (3) otrzymujemy zależność (5) na wymagany stosunek nachyleń odcinków charakterystyki wzmacnienia przetwornika - dla zadanych wartości m i s :

$$\frac{N2}{N1} = \frac{(1-m) \cdot s}{(1-s) \cdot m} \quad (5)$$

Pomiędzy współczynnikami s i m mogą zachodzić następujące relacje matematyczne. Jeżeli przetwornik ma zapewnić lupę napięciową miernika na końcu podziałki, to $s > m$, natomiast gdy lupa napięciowa ma być usytuowana w początkowej części podziałki, wówczas $s < m$. W przypadku, gdy przetwornik ma pełnić rolę wzmacniacza liniowego, $s = m$. W zależności od przyjętych wartości s i m , informację o wymaganym stosunku nachyleń $N1/N2$ obydwu linii łamanych charakterystyki przejściowej przetwornika uzyskuje się na podstawie zależności (5).

3. Konstrukcja i zasada działania układu przetwornika do kształtowania podziałki miernika

Uproszczony schemat układu przetwornika przedstawiono na rys. 4. Napięcie sygnału wejściowego jest separowane za pomocą wtórnika napięciowego ($U1$). Wartość wejściowego napięcia progowego U_{pwe} , która decyduje o położeniu punktu załamania charakterystyki przejściowej przetwornika, ustawia się za pomocą potencjometru $R3$ współpracującego ze stabilizowanym źródłem napięcia $-V$. Napięcie progowe U_{pwe} musi mieć przeciwną biegunowość niż napięcie wejściowe U_{we} . Kształtowanie charakterystyki wzmacnienia przetwornika realizuje się przez podanie sygnału wejściowego U_{we} do dwóch torów wzmacniających o charakterystykach przejściowych precyzyjnie dobranych, a następnie sumowanie wzmacnionych sygnałów z obydwu torów za pomocą sumatora ($U4$).



Rys. 4. Schemat układu przetwornika do kształtowania podziałki miernika analogowego.

Przełącznik $P1$ dołączony do rezystora $R2$ i załączony w pozycję A umożliwia realizację funkcji przetwarzania pokazaną na rys. 2 i przeznaczoną do usytuowania lupy napięciowej w końcowej części podziałki miernika, a więc pomiędzy współczynnikami s i m zachodzi relacja $s > m$.

Analiza pracy układu przetwornika dla położenia przełącznika $P1$ w pozycji A umożliwia wyznaczenie następujących zależności opisujących funkcję przetwarzania:

$$|U_{wy}| = \begin{cases} \frac{Rf}{R1} \cdot |U_{we}| \rightarrow \text{dla } |U_{we}| < |U_{pwe}| \\ \left(\frac{Rf}{R1} + \frac{Rf}{R2} \right) \cdot |U_{we}| - \frac{Rf}{R2} \cdot |U_{pwe}| \rightarrow \text{dla } |U_{we}| \geq |U_{pwe}| \end{cases} \quad (6)$$

W celu uproszczenia obliczeń wykonywanych na wartościach liczbowych wielkości występujących w zależności (6) uwzględniono wartości bezwzględne poszczególnych sygnałów napięciowych. Należy jednak zauważyć, że ścisła zależność matematyczna opisująca funkcję przetwarzania wykazuje, że dla dodatniej biegunowości napięcia wejściowego U_{we} (tak jak zaznaczono na rys. 4), napięcie wyjściowe U_{wy} ma przeciwny kierunek, a więc ujemną biegunowość w stosunku do potencjału masy. W rezultacie rzeczywista charakterystyka przejściowa omawianego układu przetwornika będzie miała przebieg zgodny z charakterystyką pokazaną na rys. 2, pod warunkiem, że wartości na osi napięcia wyjściowego będą zapisane ze znakiem ujemnym.

Równanie (6) pozwala wyznaczyć zależności (7) i (8) opisujące nachylenia $N1$ oraz $N2$ odcinków charakterystyki przetwarzania jako funkcję rezystancji Rf , $R1$ i $R2$:

$$N1 = \frac{Rf}{R1} \quad (7)$$

$$N2 = \frac{Rf}{R1} + \frac{Rf}{R2} \quad (8)$$

Stosunek nachyleń odcinków charakterystyki $N1$ i $N2$ opisany jest zależnością:

$$\frac{N2}{N1} = \frac{R1}{R2} + 1 \quad (9)$$

Po podstawieniu do lewej strony zależności (9) równania (5) otrzymuje się wyrażenie opisujące wartość stosunku rezystorów $R2$ i $R1$ wymaganą w celu spełnienia żądania co do sposobu kształtowania podziałki miernika, sprecyzowanego przez zadanie konkretnych wartości współczynników s i m :

$$\frac{R1}{R2} = \frac{s - m}{(1 - s)m} \quad (10)$$

Zależność (10) jest słuszna przy założeniu, że $s > m$. Z zależności tej wynika, że o sposobie rozszerzenia podziałki decyduje wyłącznie stosunek rezystorów $R1$ i $R2$. Rezystor Rf wpływa jedynie na wartość zakresu napięcia wyjściowego ($U_{wy\max}$) przetwornika. Równanie (10) stanowi jedną z najważniejszych zależności, którą można wykorzystać dla celów projektowania proponowanego układu przetwornika do kształtowania podziałki miernika w taki sposób, aby lupa napięciowa była usytuowana w końcowej części skali.

W przypadku, jeżeli lupa napięciowa ma być usytuowana w początkowej części skali miernika, przełącznik P1 (rys. 3) musi być załączony w pozycję B, co umożliwi realizację funkcji przetwarzania pokazaną na rys. 3, a więc pomiędzy współczynnikami s i m zachodzi relacja $s < m$.

Analiza pracy układu przetwornika dla położenia przełącznika P1 w pozycji B prowadzi do wyznaczenia następujących zależności opisujących funkcję przejścia przetwornika:

$$|U_{wy}| = \begin{cases} \frac{Rf}{R1} \cdot |U_{we}| \rightarrow \text{dla: } |U_{we}| < |U_{pwe}| \\ \left(\frac{Rf}{R1} - \frac{Rf}{R2} \right) \cdot |U_{we}| + \frac{Rf}{R2} \cdot |U_{pwe}| \rightarrow \text{dla: } |U_{we}| \geq |U_{pwe}| \end{cases} \quad (11)$$

Podobnie jak w przypadku poprzednio omawianej zależności (6), również w tym przypadku napięcie wyjściowe U_{wy} będzie miało przeciwną biegunowość niż napięcie wejściowe U_{we} , a zatem dla dodatniej biegunowości napięcia wejściowego napięcie wyjściowe będzie miało wartość ujemną w stosunku do potencjału masy.

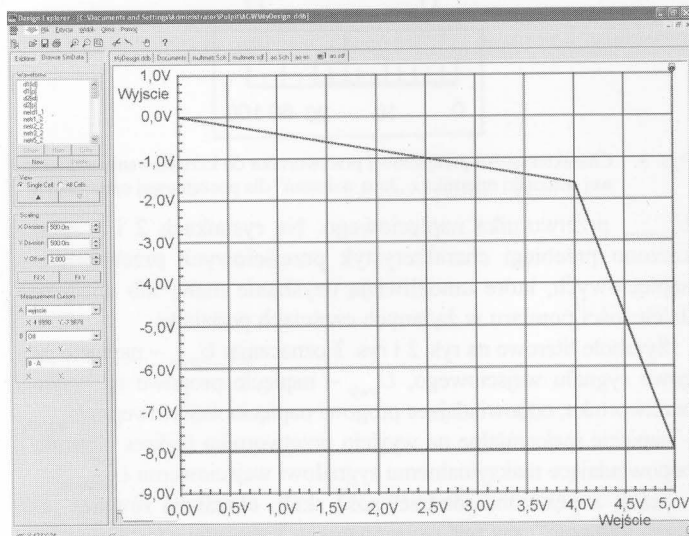
Przeprowadzając analizę w podobny sposób jak dla poprzednio rozważanego przypadku, ostatecznie uzyskuje się zależność na wymagany stosunek rezystorów $R1$ i $R2$ dla zadanych wartości s i m , przy czym $s < m$:

$$\frac{R1}{R2} = \frac{m - s}{(1 - s)m} \quad (12)$$

4. Badania symulacyjne przetwornika

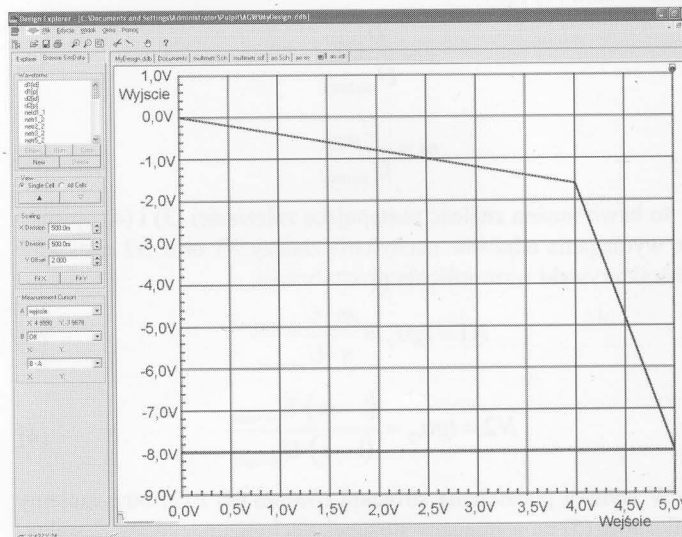
W celu weryfikacji poprawności działania zaprojektowanego układu przetwornika wykonano badania symulacyjne za pomocą programu Protel. Badania dotyczyły projektów dwóch przetworników o odmiennych sposobach kształtowania podziałki. Pierwszy z projektowanych przetworników był przeznaczony do realizacji lupy wskazań miernika analogowego w górnej części skali. Przyjęto, że maksymalna wartość napięcia sygnału wejściowego wynosi $U_{wemax} = 5$ V, a odpowiadająca mu maksymalna wartość sygnału na wyjściu przetwornika $U_{wymax} = 8$ V. Założono, że wejściowe sygnały napięciowe z przedziału wartości (0–80) %

maksymalnego sygnału wejściowego ($s = 0,8$), będą odczytywane w początkowej części skali miernika o małej rozdzielczości, stanowiącej 20% pełnego zakresu wskazań miernika ($m = 0,2$). Szczegółowe obliczenia wykonane w oparciu o zależności (1), (10) i (6) umożliwiły określenie wartości napięcia progowego: $U_{pwe} = 4$ V i wartości rezystorów układu przetwornika: $R1 = 30$ k Ω , $R2 = 2$ k Ω , $Rf = 12$ k Ω . Wynik symulacji charakterystyki przejściowej pokazany na rys. 5 w pełni potwierdził poprawność opisu matematycznego zaprojektowanego przetwornika. Zgodnie z komentarzem dotyczącym zależności (6), napięcie wyjściowe ma wartość ujemną.



Rys. 5. Symulacja za pomocą programu Protel charakterystyki przejściowej przetwornika do realizacji lupy wskazań w końcowej części skali miernika dla współczynników: $s = 0,8$, $m = 0,2$. Zastosowano napięcie progowe $U_{pwe} = 4$ V i rezystory w układzie przetwornika o wartościach: $R1 = 30$ k Ω , $R2 = 2$ k Ω , $Rf = 12$ k Ω .

Drugi przetwornik był przeznaczony do realizacji lupy wskazań miernika analogowego w początkowej części skali. Przyjęto następujące wartości zakresu przetwornika: maksymalna wartość napięciowego wejściowego: $U_{wemax} = 5$ V, a odpowiadająca mu maksymalna wartość sygnału na wyjściu przetwornika: $U_{wymax} = 8$ V. Założono, że wejściowe sygnały napięciowe z przedziału wartości (0–20) % maksymalnego sygnału wejściowego ($s = 0,2$) będą odczytywane w początkowej części skali miernika o dużej rozdzielczości, stanowiącej 80% pełnego zakresu wskazań miernika ($m = 0,8$). W wyniku dokonanych obliczeń,



Rys. 6. Symulacja za pomocą programu Protel charakterystyki przejściowej przetwornika do realizacji lupy wskazań w początkowej części skali dla współczynników: $s = 0,2$, $m = 0,8$. Zastosowano napięcie progowe $U_{pwe} = 1$ V i rezystory w układzie przetwornika o wartościach $R1 = 15$ k Ω , $R2 = 16$ k Ω , $Rf = 96$ k Ω .

w oparciu o zależności (1), (12) i (11), określono wartości napięcia progowego $U_{pwe} = 1$ V i wartości rezystorów układu przetwornika: $R_1 = 15$ k Ω , $R_2 = 16$ k Ω , $R_f = 96$ k Ω . Podobnie jak w poprzednim przypadku, rezultat symulacji charakterystyki przejściowej pokazany na rys. 6 w pełni potwierdził poprawność opisu matematycznego zaprojektowanego przetwornika.

5. Podsumowanie

Zaprojektowano i przeprowadzono analizę pracy układu przetwornika do dwuodcinkowego kształtowania podziałki miernika analogowego. Przetwornik przewidziany jest do współpracy z miernikiem analogowym o liniowej charakterystyce przetwarzania i umożliwia podział skali na dwie części: jedną o małej rozdzielczości i drugą o dużej rozdzielczości, przy czym każda z tych części ma podziałkę równomierną, co stanowi istotną zaletę w porównaniu z tradycyjnymi technikami podziałki, które zwykle kształtują podziałki o znacznej nieliniowości, zwłaszcza w pobliżu punktu dzielącego skalę na dwie wspomniane części. Zaprezentowano opis matematyczny i metodę projektowania przetwornika, zapewniającą możliwość doboru żądanych parametrów kształtowania podziałki miernika. Opracowany układ przetwornika umożliwia łatwą adaptację do różnorodnych wymagań odnośnie parametrów charakterystyki przetwarzania. Istotnym walorem jest proste i tanie rozwiązanie konstrukcyjne

przetwornika. Przetwornik może być wykorzystany także dla innych zadań pomiarowych, w których występuje konieczność kondycjonowania sygnału napięciowego uzyskanego z czujnika pomiarowego.

6. Literatura

- [1] Graeme J.G., Tobey G.E., Huelsman L.P.: Operational amplifiers design and applications, Burr Brown Research Company, McGraw-Hill, 1971.
- [2] Weiner M., Schneider D.: Linearized analog signals with high accuracy, El. Des., 24, Nov. 23, 1972.
- [3] Flockton S., Sheehan K.: Behavior of a building block for intrinsic evolution of analogue signal shaping and filtering circuits, Proceedings of the Second NASA/DoD Workshop on Evolvable Hardware (EH-2000), Palo Alto, California, July 13-15, 2000, pp. 117-124.

Title: An analogous voltage converter with shaped transfer characteristic for scale expansion of the analogous meters.

Artykuł recenzowany

IMPREZY NAUKOWO-TECHNICZNE

KONGRESY ☆ KONFERENCJE ☆ SYMPOZJA ☆ TARGI ☆ WYSTAWY

NAUKA

5-7 września 2005, Zielona Góra, POLSKA
MKM 2005, Międzyuczelniana Konferencja Metrologów
 Organizator: Instytut Metrologii Elektrycznej
 Uniwersytet Zielonogórski
 ul. Podgórna 50
 65-246 Zielona Góra
 tel.: (0-68) 328 22 22, fax: (0-68) 325 46 15
 e-mail: W.Kulesza@ime.uz.zgora.pl
 www.ime.uz.zgora.pl/mkm/

12-15 września 2005, Jurata, Polska
IMEKO TC 4, XIV Sympozjum
New Technologies In Measurement And Instrumentation
 Organizator: Akademia Morska w Gdyni
 Przewodniczący Komitetu Organizacyjnego: Prof. Janusz Mindykowski
 Al. Zjednoczenia 3, 81-225 Gdynia, Polska
 Tel.: (0-58) 69 01 261, Fax: (0-58) 62 06 701,
 e-mail: imeko2005@am.gdynia.pl, janmind@am.gdynia.pl
 http://atol.wsm.gdynia.pl/imeko2005/

15-17 września 2005, Lublin, POLSKA
MTW 2005 - XI Krajowa Konferencja Naukowa (II Międzynarodowa)
Metrologia w Technikach Wytwarzania
 Organizator: Katedra Podstaw Inżynierii Produkcji,
 Wydział Mechaniczny, Politechnika Lubelska
 ul. Nadbystrzycka 36, 20-618 Lublin,
 tel.: (0-81) 53 81 227, (0-81) 53 81 231, fax: (0-81) 525 08 08
 e-mail: metrologia2005@pollub.pl; b.krzowska@pollub.pl;
 www.metrologia2005.pollub.pl

NAUKA

18-22 września 2005, Krynica, POLSKA
MiSSP' 2005, XV Sympozjum
Modelowanie i Symulacja Systemów Pomiarowych
 Organizator: Katedra Metrologii, Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków
 Wydział Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Elektroniki
 Al. Mickiewicza 30, pawilon B-1, 30-059 Kraków
 tel.: (0-12) 617 39 72, fax: (0-12) 633 85 65
 e-mail: wajda@uci.agh.edu.pl
 http://galaxy.uci.agh.edu.pl/~zmetr/symp1.htm

17-19 października 2005, Rzeszów, POLSKA
MSM'2005, XIII Międzynarodowe Seminarium Metrologów
Metody i Technika Przetwarzania Sygnałów w Pomiarach Fizycznych
 Organizator: Zakład Metrologii i Systemów Pomiarowych,
 Wydział Elektrotechniki i Informatyki, Politechnika Rzeszowska,
 ul. W. Pola 2, 35-959 Rzeszów
 tel. (0-17) 865 14 38, tel./fax: (0-17) 865 15 75
 e-mail: zmisp@prz.rzeszow.pl
 www.prz.edu.pl/msm05

7-8 listopada 2005, Szczyrk, POLSKA
PD 2005, V Sympozjum nt. Pomiarów Dynamicznych
 Organizator: Instytut Metrologii i Automatyki Elektronicznej
 Wydział Elektryczny Politechniki Śląskiej
 Ul. Akademicka 10, 44-100 Gliwice
 tel. (0-32) 237 12 41, fax: 0-32 237 20 34
 Sekretarz Sympozjum: dr inż. Henryk Urzędniczek, tel. (0-32) 237 20 68,
 e-mail: Henryk.Urzedniczek@polsl.pl
 www.wega.elekt.polsl.gliwice.pl/pd