Teodor SERWICKI, Józef KUŚMIERZ, Jerzy AUGUSTYN
POLITECHNIKA ŚWIĘTOKRZYSKA, KATEDRA ELEKTROTECHNIKI I SYSTEMÓW POMIAROWYCH
Al. Tysiąclecia Państwa Polskiego 7, 25-314 Kielce

Precyzyjny regulator prądu wzbudzenia w przetwornikach jedno i dwucewkowych do bezstykowego pomiaru konduktywności elektrycznej

Mgr inż. Teodor SERWICKI

Ukończył studia na Politechnice Świętokrzyskiej ze specjalnością Komputerowe Systemy Pomiarowe w 2010 roku. Obecnie jest doktorantem w Katedrze Elektrotechniki i Systemów Pomiarowych na Wydziale Elektrotechniki Politechniki Świętokrzyskiej. Głównymi zainteresowaniami autora są konduktometria, cyfrowe przetwarzanie sygnałów oraz programowanie systemów wbudowanych.

e-mail: t.serwicki@tu.kielce.pl

Dr hab. inż. Józef KUŚMIERZ

Ukończył studia ze specjalnością Metrologia Elektryczna w Instytucie Metrologii Elektrycznej Politechniki Wrocławskiej w 1972 roku. Stopień doktora uzyskał w 1981 roku na Wydziale Elektrycznym Politechniki Śląskiej. Stopień doktora habilitowanego uzyskał na Wydziale Elektrycznym Politechniki Wrocławskiej w 2008 roku. Autor kilkudziesięciu publikacji z zakresu bezstykowych pomiarów konduktywności elektrycznej materiałów oraz współautor kilku patentów.

e-mail: kuśmierz@tu.kielce.pl

Dr hab. inż. Jerzy AUGUSTYN

Ukończył studia na Wydziale Elektrycznym Politechniki Śląskiej w 1978 r. Na tym samym Wydziale w roku 1988 uzyskał stopień doktora nauk technicznych, a w roku 2008 – doktora habilitowanego. Profesor w Katedrze Elektrotechniki i Systemów Pomiarowych Wydziału Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki Politechniki Świętokrzyskiej. Główne zainteresowania naukowe: pomiary impedancji, algorytmy przetwarzania danych pomiarowych, propagacja niepewności w systemach pomiarowych.

e-mail: j.augustyn@tu.kielce.pl

Streszczenie

W pracy przedstawiono układ precyzyjnego regulatora prądu cewki wzbudzenia dla przetworników indukcyjnościowych jedno i dwucewkowych wykorzystywanych w bezstykowych pomiarach konduktywności elektrycznej, który został opracowany w oparciu o wzmacniacz z napięciowo regulowanym wzmocnieniem. Prezentowany regulator prądu umożliwia precyzyjne utrzymanie prądu o ustalonej wartości w obwodzie cewki wzbudzenia przetworników indukcyjnościowych w szerokim zakresie częstotliwości pracy. Układ został wykonany w technologii montażowej SMD, a następnie poddany badaniom sprawdzającym założenia i wymagania odnośnie dokładności regulacji prądu cewki wzbudzenia przetworników indukcyjnościowych.

Słowa kluczowe: regulator prądu, wzmacniacz z regulowanym wzmocnieniem, przetwornik indukcyjnościowy, bezstykowy pomiar konduktywności.

A precise regulator circuit of excitation current for single and double coil transducers used in contactless measurements of electrical conductivity

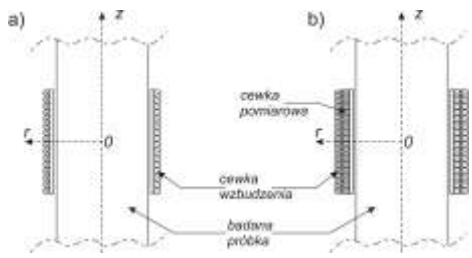
Abstract

The paper presents a precise current regulator circuit for the excitation coil of single and double coil inductive transducers used in contactless measurements of electrical conductivity. The proposed current regulator circuit for inductive transducers is free from disadvantages of solutions based on the programmable devices that need software algorithms to determine the desired value excitation current. Moreover, the use of analog circuit allows obtaining better performance and reliability in a wide range of operating frequencies. This current regulator circuit uses a wide dynamic range AD8336 variable gain amplifier (VGA) as the gain control element [10]. The current regulator circuit provides precise current regulation in the circuit excitation coil of the inductive transducers up to 270 kHz. Because of the wide range of operating frequencies and the wide range of input voltages, the current regulator circuit can be widely applied in the systems in which the precise regulation is required for the resistive or inductive loads. The current regulator was made in the SMD technology and was tested to check the assumptions and requirements for the current regulation accuracy for inductive transducers. From the tests and analysis of the results obtained there was determined the current regulation accuracy equal to 0.7% for the average value of the current in the relevant frequency range of the regulator circuit. It is the sufficient accuracy to meet the requirement of maintaining a constant excitation current in inductive transducers in both cases of the measurement [1] in contrast to the situation when such a regulation would not be applied.

Keywords: current regulator, variable gain amplifier, inductive transducer, contactless measurement of electrical conductivity.

1. Wstęp

W pracach [1, 2, 3] przedstawiono konstrukcje oraz modele matematyczne opisujące równania przetwarzania przetworników indukcyjnościowych wykorzystywanych w bezstylowych pomiarach konduktywności elektrycznej. Podstawowe konstrukcje tych przetworników przedstawiono na rysunku 1, tj.: w wersji przelotowej jedno i dwucewkowej.



Rys. 1. Struktura geometryczna a) jednocewkowego oraz b) dwucewkowego przetwornika indukcyjnościowego
Fig. 1. Geometric structure of a) single-coil and b) double-coil inductive transducer

Natomiast zależności (1) i (3) opisują równania przetwarzania tych przetworników odpowiednio dla przetwornika jedno i dwucewkowego [1].

$$\underline{\Delta^0 Z} = \frac{j\int_0^\infty F_1(y)\left[K_1(y\delta)\frac{\sin y\delta\xi}{y}\right]^2 dy}{\int_0^\infty I_1(y\delta)K_1(y\delta)\left[\frac{\sin y\delta\xi}{y}\right]^2 dy}, \tag{1}$$

w której: $y = \lambda/\sqrt{\omega\mu_0\sigma}$ – bezwymiarowa zmienna całkowania, ω – pulsacja prądu zasilania, μ_0 – przenikalność magnetyczna próżni, σ – konduktywność elektryczna materiału.

Pozostałe parametry znormalizowane wchodzące w skład równania (1) opisują wyrażenia:

$$\delta = r_0\sqrt{\omega\mu_0\sigma}, \alpha = \frac{r_1}{r_0}, \xi = \frac{l}{r_0} \tag{2}$$

$$F_1(y)=\frac{yI_0(y\delta\alpha)I_1(\alpha\delta)\sqrt{y^2+j}-\sqrt{y^2+j}I_1(y\alpha\delta)I_0\left(\alpha\delta\sqrt{y^2+j}\right)}{yI_0(y\delta\alpha)I_1(\alpha\delta)\sqrt{y^2+j}+\sqrt{y^2+j}K_1(y\alpha\delta)I_0\left(\alpha\delta\sqrt{y^2+j}\right)}$$

gdzie: r_0 – promień cewki wzbudzenia, r_1 – promień próbki, l – długość cewki wzbudzenia. I_0, I_1, K_1 – zmodyfikowane funkcje Bessla pierwszego i drugiego rodzaju, zerowego i pierwszego rzędu.

$$\underline{\Psi}=\frac{\underline{U}_2}{\underline{U}_{20}}=\frac{\int f_1(y)K_1\left(y\frac{\delta_1}{\alpha_1\alpha_2}\right)\left[\frac{\sin\frac{\delta_1\xi}{\alpha_1\alpha_2}y}{y}\right]^2dy}{\int I_1\left(y\frac{\delta_1}{\alpha_1}\right)K_1\left(y\frac{\delta_1}{\alpha_1\alpha_2}\right)\left[\frac{\sin\frac{\delta_1\xi}{\alpha_1\alpha_2}y}{y}\right]^2dy}. \quad (3)$$

w której: $\underline{U}_2$, $\underline{U}_{20}$ – napięcie na zaciskach cewki pomiarowej przetwornika w obecności badanej próbki.

Pozostałe parametry znormalizowane wchodzące w skład równania (3) opisują wyrażenia:

$$\delta_1=r_1\sqrt{\omega\mu_0\sigma},\alpha_1=\frac{r_1}{r_2},\alpha_2=\frac{r_2}{r_0},\xi=\frac{l}{r_0} \quad (4)$$

$$f_1(y)=I_1\left(y\frac{\delta_1}{\alpha_1}\right)+C(y)K_1\left(y\frac{\delta_1}{\alpha_1}\right),$$

$$C(y)=\frac{yI_0(y\delta_1)I_1\left(\delta_1\sqrt{y^2+j}\right)-\sqrt{y^2+j}I_1(y\delta_1)I_0\left(\delta_1\sqrt{y^2+j}\right)}{yK_0(y\delta_1)I_1\left(\delta_1\sqrt{y^2+j}\right)+\sqrt{y^2+j}K_1(y\delta_1)I_0\left(\delta_1\sqrt{y^2+j}\right)}$$

gdzie: r_0 – promień cewki wzbudzenia, r_1 – promień próbki, r_2 – promień cewki pomiarowej, l – długość cewki wzbudzenia. I_0, I_1, K_0, K_1 – zmodyfikowane funkcje Bessla pierwszego i drugiego rodzaju, zerowego i pierwszego rzędu.

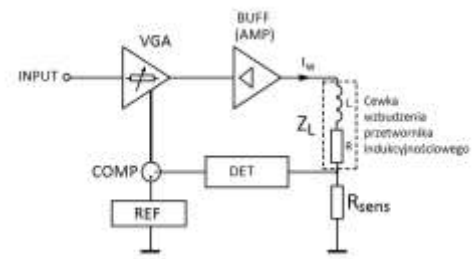
Podczas wyprowadzania równań (1) i (3) założono, że prąd przepływający przez cewkę wzbudzenia przetwornika ma taką samą wartość w dwóch przypadkach pomiaru tj.: w przypadku obecności badanego materiału w wnętrzu przetwornika oraz w przypadku jego braku [1].

Aby utrzymać stałą wartość prądu wzbudzenia I_w w obu przypadkach pomiaru, należało opracować układ elektronicznego regulatora, który spełniałby założone wymaganie. Znanych jest wiele sposobów realizacji układów spełniających to założenie, na przykład poprzez odpowiednie algorytmy programowe zaimplementowane w mikrokontrolerach lub układach FPGA w połączeniu z przetwornikami analogowo cyfrowymi [4], lub wykorzystując źródła prądowe oparte na wzmacniaczach operacyjnych w postaci tzw. prądowej pompy Howlanda [5, 6]. Jednak wadą pierwszego rozwiązania są duże wymagania dotyczące mocy obliczeniowej mikrokontrolera lub układu FPGA, w celu przetworzenia uzyskanych próbek z przetwornika analogowo cyfrowego i wyznaczenia pożądanej wartości prądu wzbudzenia I_w. W przypadku, gdy dany mikrokontroler lub układ FPGA miałby być użyty również do realizacji innych zadań, spowolniłoby to działanie całego sytemu. Z kolei wadą drugiego rozwiązania jest brak stabilności układu, pojawiający się przy wyższych częstotliwościach pracy dla obciążeń indukcyjnych [7, 8, 9]. Mimo prostoty układu, wymagane jest zastosowanie wyspecjalizowanego wzmacniacza o odpowiednio dobranej kompensacji częstotliwościowej [7, 8, 9], dla tego rodzaju obciążeń.

Zaproponowany w pracy układ regulatora prądu cewki wzbudzenia jest pozbawiony z jednej strony wad rozwiązań opartych na układach programowalnych, wymagających programowych algorytmów do ustalania wymaganej wartości prądu wzbudzenia, a z drugiej strony zastosowany układ analogowy jest stabilny w szerokim zakresie częstotliwości pracy. Regulator prądu opracowano na podstawie układu wzmacniacza z regulowanym wzmocnieniem (VGA) AD8336 firmy Analog Devices [10], który posiada szeroki zakres wzmocnienia sterowany napięciowo za pomocą wejścia różnicowego. Układ regulatora prądu zapewnia stabilizację prądu w obwodzie cewki wzbudzenia przetworników indukcyjnościowych w szerokim zakresie częstotliwości.

2. Zasada działania i konstrukcja układu regulatora prądu

Koncepcja konstrukcji precyzyjnego regulatora prądu cewki wzbudzenia przetworników indukcyjnościowych [1, 2, 3] została zaczerpnięta z noty aplikacyjnej [11], w której przedstawiono układ kompresora dynamiki sygnału audio o szerokim zakresie dynamicznym, opartym na wzmacniaczu z regulowanym wzmocnieniem AD8336 firmy Analog Devices [10]. Układ ten został zmodyfikowany do postaci jak przedstawiono na schemacie blokowym na rysunku 2, w którym regulowanym sygnałem wyjściowym jest prąd I_w przepływający przez impedancję obciążenia Z_L, a nie napięcie.



Rys. 2. Schemat blokowy regulatora prądu cewki wzbudzenia dla jedno oraz dwu cewkowych przetworników indukcyjnościowych.
Fig. 2. Block diagram of the current regulator for single and double coil inductive transducers

Dla osiągnięcia tego rezultatu, należało do wyjścia wzmacniacza o regulowanym wzmocnieniu (VGA) dołączyć układ bufora prądowego BUFF lub szerokopasmowego wzmacniacza mocy AMP, zapewniający odpowiednie źródło prądu dla impedancji obciążenia Z_L, którym jest cewka wzbudzenia przetworników indukcyjnościowych. Impedancja obciążenia Z_L jest połączona szeregowo z rezystorem pomiarowym R_{SENS} o małej wartości rezystancji, na którym występuje spadek napięcia U_{RSENS} proporcjonalny do przepływającego przezeń prądu. Spadek napięcia U_{RSENS} stanowi zmienny sygnał wejściowy dla konwertera RMS/DC, pracującego w układzie detektora DET, którego rolą jest wykrycie zmian napięcia na rezystorze pomiarowym R_{SENS}, spowodowanego zmianami wartości impedancji obciążenia Z_L. Następnie napięcie to jest przetwarzane przez układ detektora na proporcjonalną wartość napięcia stałego na jego wyjściu. Układ konwertera RMS/DC o architekturze log-antilog [12] użytego w nocie aplikacyjnej [11], zastąpiono układem konwertera RMS/DC o architekturze delta-sigma [13], który charakteryzuje się znacznie wyższą linowością i dokładnością przetwarzania oraz znacznie szerszym pasmem częstotliwości pracy, niezależnie od wartości amplitudy wejściowego sygnału zmiennego w porównaniu z klasyczną architekturą konwertera log-antilog [12]. Otrzymane napięcie stałe na wyjściu układu detektora DET jest następnie porównywane z napięciem źródła odniesienia REF o ustalonej wartości za pomocą wzmacniacza operacyjnego, pracującego jako komparator COMP z otwartą pętlą strzeżenia zwrotnego dla napięcia stałego. W zależności od tego, czy napięcie z wyjścia detektora DET osiągnie wyższą lub też niższą wartość w porównaniu z napięciem źródła odniesienia REF, to na wyjściu komparatora COMP pojawi się odpowiednio napięcie liniowo narastające lub opadające, które jest napięciem sterującym dla wejścia różnico-

wego wzmacniacza o regulowanym wzmocnieniu. Napięcie to reguluje wzmocnienie układu tak, aby prąd I_w przepływający przez impedancję obciążenia Z_L zawsze miał stałą wartość, niezależne od zmiany impedancji. Wartość prądu I_w, który przepływa przez impedancję obciążenia Z_L jest dobierana na podstawie wartości rezystora pomiarowego R_{SENS} według poniższej zależności:

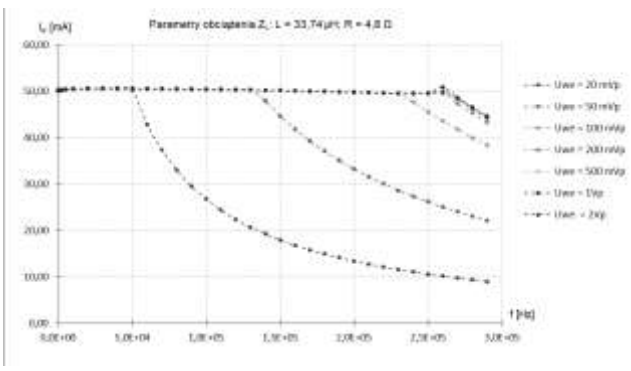
$$I_w = \frac{U_{RSENS}}{R_{SENS}}. \tag{5}$$

Wartość napięcia stałego źródła referencyjnego REF musi odpowiadać wartości skutecznej spadkowi napięcia U_{RSENS} występującego na rezystorze pomiarowym R_{SENS}.

Układ regulatora prądu został zmontowany na jednostronnym obwodzie drukowanym w technologii montażu powierzchniowego (SMD).

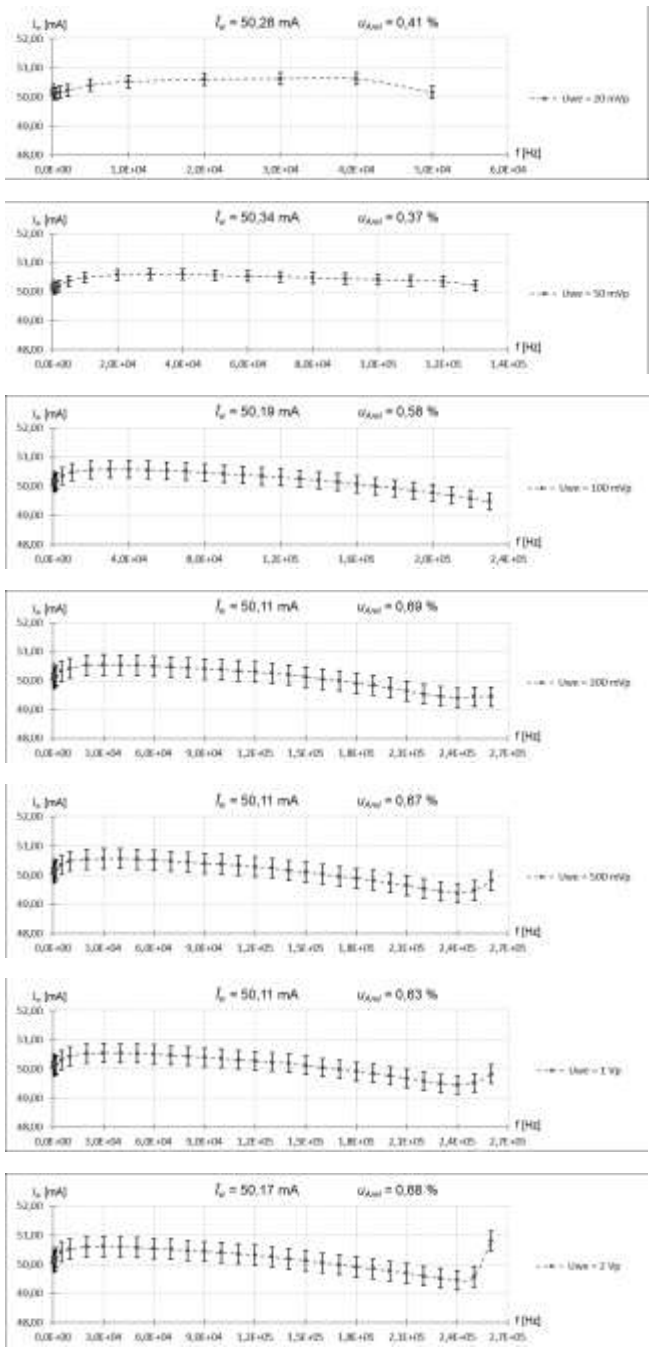
3. Wyniki przeprowadzonych badań oraz ich analiza

Układ regulatora prądu został poddany badaniom w celu weryfikacji założenia i wymagania odnośnie dokładności regulacji prądu w obwodach cewki wzbudzenia przetworników indukcyjnościowych. Wartość prądu I_w przepływającego przez impedancję obciążenia Z_L cewki ustalono na 50 mA, natomiast parametry elektryczne cewki wzbudzenia przetwornika wynosiły: indukcyjność L = 33,74 μH oraz rezystancja R = 4,83 Ω, które zostały wyznaczone za pomocą mostka impedancyjnego LCR HM8118 firmy Hameg. Pomiary prądu cewki wzbudzenia I_w układu regulatora przeprowadzono w zakresie częstotliwości od 5 Hz do 290 kHz za pomocą modułu 14-bitowego digitizera NI PXIe-5122 firmy National Instruments. Ze względu na trudności dokładnego pomiaru prądu cewki wybudzenia przetwornika w tak szerokim zakresie częstotliwości, mierzono spadek napięcia U_{RSENS} występujący na rezystorze pomiarowym R_{SENS}, a następnie wyznaczono wartość tego prądu. Pomiary wykonano dla siedmiu różnych napięć wejściowych o wartości szczytowej: 20 mV, 50 mV, 100 mV, 200 mV, 500 mV, 1V, 2V w celu wykazania poprawnej pracy układu dla szerokiego zakresu napięć wejściowych. Wyniki pomiarów prądu cewki wzbudzenia w funkcji częstotliwości $I_w = f(f)$ dla różnych wartości napięć wejściowych zostały przedstawione w postaci wykresów na rysunku 3.



Rys. 3. Wykresy charakterystyk prądu wzbudzenia układu regulatora prądu w funkcji częstotliwości dla różnych napięć wejściowych
Fig. 3. The excitation current of the current regulator circuit vs. frequency for various values of the input voltage

Natomiast na rysunku 4 zamieszczono wykresy słupków niepewności prądu wzbudzenia I_w wyznaczonych w zakresie częstotliwości, w którym wartości te nie przekraczają 1% dla różnych wartości napięć wejściowych U_{we}. Jak wynika z rysunku 3, układ regulatora umożliwia poprawne działanie w szerokim zakresie zmiany napięcia wejściowego ($U_{\mathrm{wemax}}/U_{\mathrm{wemin}}$ = 100). Tak szeroki zakres napięć wejściowych zapewnia wzmacniacz z regulowanym wzmocnieniem AD8336, który charakteryzuje się 60dB zakresem dynamicznym. Najszerszy zakres częstotliwości pracy układu uzyskuje się dla napięć wejściowych powyżej 100mV. Dla napięć wejściowych poniżej 100mV zakres częstotliwości zawęża się z powodu ograniczenia zakresu dynamicznego wzmacniacza z regulowanym wzmocnieniem. Mimo tego, uzyskuje się zakres częstotliwości pracy nie mniejszy niż 50 kHz dla najniższych wartości napięć wejściowych.



Rys. 4. Zależność prądu wzbudzenia I_w w funkcji częstotliwości f dla danej wartości napięcia wejściowego U_{we} przy zachowaniu dopuszczalnej 1% zmiany wartości prądu I_w.
Fig. 4. The dependence of the excitation current I_w on frequency f for a given value of the input voltage U_{we} while maintaining the permissible 1% change of the current value I_w.

Szeroki zakres częstotliwości pracy układu wynika z częstotliwości pracy przetworników indukcyjnościowych wykorzystywanych w bezstykowych pomiarach konduktywności. Dla przetwornika dwucewkowego na podstawie zależności (4) można wyznaczyć jego częstotliwość pracy:

$$f_{opt} = \frac{\delta_1^2}{2\pi r_1^2 \mu_0 \sigma_{bad}}. \tag{7}$$

gdzie: f_{opt} – optymalna częstotliwość pracy przetwornika indukcyjnościowego; δ_1 – bezwymiarowy parametr, mieszczący się w zakresie od 2,5 do 3,5, dla którego otrzymuje się optymalną częstotliwość pracy przetwornika indukcyjnościowego, przy której pomiar konduktywności jest wykonywany z najmniejszą niepewnością pomiarową; r_1 – promień badanej próbki o nieznanej konduktywności; μ_0 – przenikalność magnetyczna próżni; σ_{bad} – konduktywność badanej próbki.

Przykładowo, aby poprawnie (z małą niepewnością pomiarową) wyznaczyć konduktywność w zakresie od 3 do 100 MS/m dla badanych próbek o promieniu od 1 do 40 mm, przyjmując parametr δ_1 równy 2,5, uzyskuje się zakres częstotliwości pracy przetwornika od 5Hz do 260 kHz. To określa wymagany zakres częstotliwości pracy układu regulatora. Należy wziąć pod uwagę, że zależność 4 jest funkcją trzech wielkości, które ustalają dolną i górną granicę częstotliwości pracy przetwornika, jak również układu regulatora.

4. Wnioski

Przedstawiony w artykule układ regulatora prądu został opracowany do kontroli i stabilizacji prądu w obwodzie cewki wzbudzenia przetworników jedno oraz dwucewkowych, które wymagają, aby wartość tego prądu była taka sama w przypadku obecności badanego materiału w wnętrzu przetwornika oraz w przypadku jego braku [1]. Jednak ze względu na szeroki zakres częstotliwości pracy układu oraz na szeroki zakres napięć wejściowych, układ regulatora może znaleźć wszechstronne zastosowanie tam, gdzie wymagana jest dokładna stabilizacja prądu dla obciążeń o charakterze rezystancyjnym lub indukcyjnym. Aby osiągnąć wymaganą dokładność i wydajność działania układu regulatora, układ opracowano na podstawie wzmacniacza z regulowanym wzmocnieniem AD8336 firmy Analog Devices o szerokim zakresie dynamicznym wynoszącym 60dB, a także precyzyjnego konwertera RMS/DC o architekturze delta-sigma. Układ regulatora jest stabilny w szerokim zakresie częstotliwości pracy oraz jest pozbawiony układów programowalnych, wymagających algorytmów wyznaczających pożądaną wartość prądu. Z przeprowadzonych badań oraz analizy uzyskanych wyników otrzymano niepewność względną regulacji prądu nie większą niż 0,7% dla uśrednionej wartości prądu w rozpatrywanym zakresie częstotliwości pracy układu, która jest wystarczającą dokładnością dla spełnienia warunku o zachowaniu stałej wartości prądu wzbudzenia I_w przetworników indukcyjnościowych w obu przypadkach pomiaru, w przeciwieństwie gdyby takiej regulacji nie wprowadzono.

5. Literatura

[1] Kuśmierz J.: Bezstykowe pomiary konduktywności materiałów przewodzących za pomocą przetworników indukcyjnościowych. Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej, s. 29-33, 55-56, 2007.

[2] Kuśmierz J.: Mathematical model of a double-coil inductive transducer for measuring electrical conductivity. Review of Scientific Instruments, 2007, Vol.78, Nr 8, 084704-1, 084704-7.

[3] Nakane H.: A method for simultaneously measuring resistivity and the Meissner effect of a superconductor used a solenoid coil, Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on, 1989.

[4] Analog Devices: Amplitude Control Circuit for AD9834 Waveform Generator (DDS), Circuit Note CN-0156, June 2010.

[5] Texas Instruments: A Comprehensive Study of the Howland Current, Application Report SNOA474A, January 2008.

[6] Steele J., Green T.: Tame Those Versatile Current-Source Circuits, Electronic Design 61, October 15, 1992.

[7] Apex Microtechonogy: Voltage to Current Conversion, Application Node AN-13, August 2013.

[8] Apex Microtechonogy: Hig Power Techniques, Technical Seminar Notebook V-12, p. 129-136, http://www.apexanalog.com/wp-content/uploads/2012/08/TechSemV12.pdf.

[9] Nikolova B. M., Nikolov G. T.: Investigation and Design of High Current Sources for B-H Loop Measurements, Electronics, September 2008.

[10] Analog Devices, AD8336 General-Purpose, −55°C to +125°C, Wide Bandwidth, DC-Coupled VGA, Data Sheet, 2006.

[11] Analog Devices: 60 dB Wide Dynamic Range, Low Frequency AGC Circuit Using a Single VGA, Application Note AN-934, 2007.

[12] Kitchin Ch., Counts L.: RMS to DC Conversion Application Guide, Application Guide, Analog Devices, 1986.

[13] Linear Technology, Instrumentation Circuitry Using RMS-to-DC Converters, Application Note AN-106, February 2007.

otrzymano / received: 19.05.2014
przyjęto do druku / accepted: 01.07.2014 *artykuł recenzowany / revised paper*

INFORMACJE

Wydawnictwo PAK

specjalizuje się w wydawaniu czasopisma Pomiary Automatyka Kontrola i książek popularno-naukowych w dziedzinie automatyki i pomiarów

Osoby i firmy przemysłowe zainteresowane współpracą z Wydawnictwem proszone są o kontakt bezpośredni dla uściślenia szczegółów współpracy

Wydawnictwo PAK
00-050 Warszawa
ul. Świętokrzyska 14A
tel./fax 22 827 25 40

Redakcja PAK
44-100 Gliwice
ul. Akademicka 10, p. 30b
tel./fax 32 237 19 45
e-mail: wydawnictwo@pak.info.pl

www.pak.info.pl