

KOREKCJA WŁAŚCIWOŚCI METROLOGICZNYCH PRZETWORNIKÓW SZYBKOSMIENNYCH SYGNAŁÓW ELEKTRONICZNYCH

Bartosz DOMINIKOWSKI¹, Krzysztof PACHOLSKI²

Politechnika Łódzka, Wydział Elektrotechniki, Elektroniki, Informatyki i Automatyki

1. tel.: 0-42 631 25 20 e-mail: bartosz.dominikowski@yahoo.com

2. tel.: 0-42 631 25 20 e-mail: krzysztof.pacholski@p.lodz.pl

Streszczenie: Autorzy przedstawili w sposób syntetyczny mankamenty wejściowych wzmacniaczy programowalnych stosowanych w układach wejściowych przetworników pomiarowych oraz zaprezentowali sposób działania scalonych układów o wzmacnieniu regulowanym napięciowo. W artykule przedstawiono także możliwości wykorzystania ww. wzmacniaczy w układzie automatycznej korekcji wzmacnienia toru prądowego przetwornika mocy czynnej lub licznika energii elektrycznej.

Słowa kluczowe: scalone przetworniki mocy, korekcja współczynnika wzmacnienia, wzmacniacze o programowalnym współczynniku wzmacnienia.

1. WSTĘP

Efektywnym sposobem powiększenia dokładności systemu pomiarowego przetwarzającego sygnały elektryczne jest odpowiednie wzmacnienie sygnału wejściowego scalonego przetwornika mocy i energii tak, aby wykorzystany został pełny zakres układu dopasowania występującego na jego wejściu [1, 2, 3].

Stosowane metody korekcji stałej przetwarzania sygnału wejściowego w scalonych przetwornikach mocy i energii elektrycznej (np.: AD 77xx, CS5467, EVM MSP 430) wykorzystują w wejściowych torach wzmacniacze sterowane cyfrowo typu PGA (ang. Programmable Gain Amplifier) lub wzmacniacze operacyjne o współczynniku wzmacnienia ustalonym przez zewnętrzne rezystancje o wartościach dobranych arbitralnie [4]. W celu zwiększenia płynności regulacji stałej przetwarzania mierzonego sygnału, wykorzystać można układy sterowane napięciowo w sposób ciągły typu VCA (ang. Voltage Controlled Amplifier, wzmacniacz sterowany analogowo).

Wykorzystanie wzmacniaczy PGA wymaga znajomości szybkości zmian sygnału występującego na ich wejściu ze względu na ograniczone pasmo częstotliwości. Algorytm sterujący pracą wzmacniacza zapisany jest w sposób sekwencyjny (liniowy) i zdaniem autorów tego artykułu czasowa złożoność obliczeniowa algorytmu jest na poziomie $O(n^2)$ [5, 6]. Taką złożonością obliczeniową cechują się algorytmy zawierające wielokrotne pętle. Wiąże się to z istotnym czasem oczekiwania t_{alg} potrzebnym na wysłanie słowa sterującego, powodującego załączenie odpowiedniego obwodu z rezystorem określającym wartość stałej przetwarzania w torze pomiarowym.

W przypadku systemów wielokanałowych pracujących równolegle (np. przetworniki mocy), algorytmy sterujące pracą poszczególnych analogowych torów mogą występować w różnych miejscach struktury algorytmu. Przykładowo, działanie programu wyznaczającego współczynnik wzmacnienia toru prądowego kończy się na pierwszej napotkanej instrukcji warunkowej, natomiast w kanale napięciowym na ostatniej, czego wynikiem jest wprowadzenie dodatkowego przesunięcia fazowego pomiędzy wejściowymi sygnałami.

Zweryfikowane badaniami symulacyjnymi wyniki działania ww. metod korekcji wzmacnienia wykazały, że mogą być one stosowane dla sygnałów o zmienności dopasowanej do szybkości działania wzmacniaczy w torach wejściowych przetworników mocy oraz energii elektrycznej.

2. ZASADA DZIAŁANIA WZMACNIACZY STEROWANYCH CYFROWO

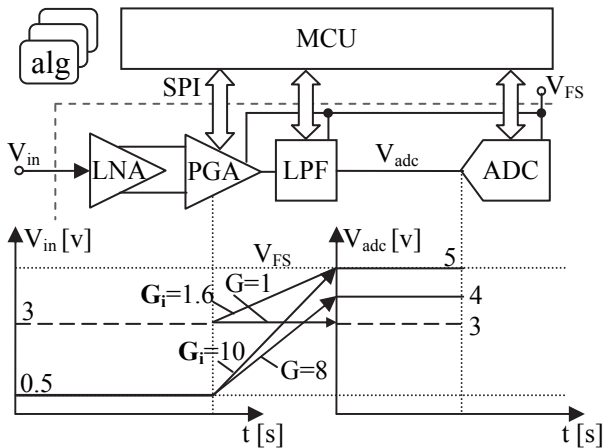
Zasada działania wzmacniaczy o programowalnym współczynniku wzmacnienia typu PGA polega na załączaniu za pomocą analogowego przełącznika odpowiedniego obwodu zawierającego rezystor o wartości wpływającej na stałą przetwarzania układu. Wzmacnienie tego wzmacniacza może przyjmować wartości binarne będące potęgami liczby 2 – 1, 2, 4, ..., 128 (np. układ typu PGA 112/6 firmy Texas Instruments) [7].

Wadą tego typu wzmacniaczy przy przetwarzaniu sygnałów szybkozmiennych są parametry kluczy analogowych w ich układzie:

- czas potrzebny na przełączenie wzmacnienia, przeciętnie 200 ns (Texas Instrument PGA 11x) [5],
- rezystancja klucza R_{ON} , która w stanie włączenia jest niezerowa (modulacja rezystancji kanału) i może wprowadzić błąd nierównoważenia, jeżeli prąd polaryzujący wzmacniacza ma duże wartości,
- pojemności pasożytnicze (C_{DS} - źródło dren, C_D - dren-masa, C_L - obciążenia) mogące wpływać na funkcję przetwarzania wzmacniacza [4].

Zintegrowane przetworniki pomiarowe zbudowane są z układów połączonych ze sobą kaskadowo: niskoszumowego przedwzmacniacza (LNA, ang. Low-Noise Amplifier), wzmacniacza programowalnego sterowanego cyfrowo (PGA), filtru dolnoprzepustowego oraz przetwornika analogowo cyfrowego ADC [4]. Na rysunku 1

przedstawiono schemat toru prądowego scalonego przetwornika mocy typu ADE 7755.



Rys. 1. Tor prądowy scalonego przetwornika ADC mocy, gdzie: V_{in} - napięcie wejściowe, G_i - idealne wzmocnienie, G - wzmocnienie wzmacniacza PGA, alg. - algorytm sterujący pracą układu PGA

Zwiększenie dokładności toru wejściowego systemu, można uzyskać przez zastosowanie płynnej regulacji stałej przetwarzania, przy równoczesnym zmniejszeniu napięciowego wejściowego zakresu. Na schemacie z rysunku 1 przedstawiono różnicę pomiędzy wzmocnieniem uzyskanym z analizowanego układu PGA, a idealnymi wartościami stałej przetwarzania G_i pozwalającymi wykorzystać pełny dynamiczny zakres przetwornika ADC tego układu.

Wadą zastosowanego programowalnego wzmacniacza typu PGA w scalonym przetworniku mocy jest brak możliwości uzyskania wymaganej stałej wzmocnienia z uwagi na dużą różnicę pomiędzy wbudowanymi wartościami wzmocnienia. W przypadku użycia określonej wartości wzmocnienia, za pomocą odpowiedniego słowa sterującego ustawiana jest wartość wzmocnienia mniejsza lub równa żądanej. Na podstawie schematu z rysunku 1 zamieszczono w wierszach tabeli 1 wyniki obliczeń dotyczące rozdzielczości pomiarowego systemu, przy danym wzmocnieniu napięciowym wzmacniacza:

- wiersz nr 1 - buforowanie, wzmocnienie napięciowe $G=1$ V/V (wartość żądana wzmocnienia jest możliwa do uzyskania przez układ PGA i jest równa 2^0 V/V),
- wiersz nr 2 dla wzmocnienia napięciowego $G=1,66$ V/V (wartość wzmocnienia równa 1,66 V/V nie jest możliwa do wygenerowania przez układ PGA, aby nie doprowadzić do wejścia w stan nasycenia bloku filtra dolnoprzepustowego LPF (rysunek 1) sygnał wejściowy jest buforowany wartością 2^0 V/V co wpływa na obniżenie wykorzystania zakresu dynamicznego przetwornika analogowo cyfrowego ADC o 40%),
- wiersz nr 3 dla wzmocnienia napięciowego $G=10$ V/V (wartość wzmocnienia równa 10 V/V nie jest możliwa do wygenerowania przez układ PGA, który wzmacnia sygnał wejściowy wartością zaimplementowaną w swojej strukturze 2^3 V/V, mniejszą od żądanej, co wpływa na obniżenie wykorzystania zakresu dynamicznego przetwornika analogowo cyfrowego ADC o 20%).

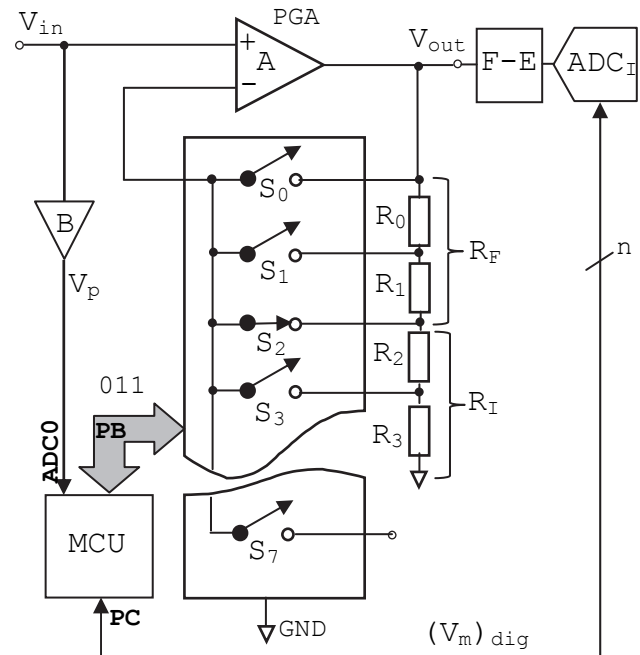
Stosując odpowiednio duże wzmocnienie napięciowe (G) w wejściowym torze pomiarowym scalonego przetwornika zawierającego 12 bitowy układ ADC możemy mierzyć niewielkie napięcie wejściowe (V_{in}) np. o wartości

0,5 V w systemie pomiarowym o rozdzielczości napięciowej równej 0,12 mV (Tabela 1. wiersz nr 3) przy jednoczesnym zmniejszonym zakresie do 500 mV.

Tabela 1. Rozdzielczość toru pomiarowego, w zależności od wartości wzmocnienia napięciowego G z wykorzystaniem przetwornika analogowo-cyfrowego 12 bitowego (AD 9226) na wyjściu

Nr.	Rozdzielczość ADC $\Delta_{ADC} = \frac{V_{FS}}{2^n - 1}$ [mV/bit]	G [V/V]	Pełny zakres V_{in} [V _{p-p}]	Rozdzielczość toru pomiarowego [mV _{p-p}]
1	1,22	1	5	1,22
2	1,22	1,66	3	0,73
3	1,22	10 (↑)	0,5 (↓)	0,12 (↑)

W monografii [1, 8] został przedstawiony model systemu pomiarowego służącego do regulacji stałej przetwarzania wartości mierzonej za pomocą „procedury adaptacji parametrów układu, zależnych od cech przetwarzanych sygnałów”. Zastosowanie np. wzmacniacza o programowalnym wzmocnieniu (PGA) [9] w ww. układzie, zostało przedstawione na rysunku 2.



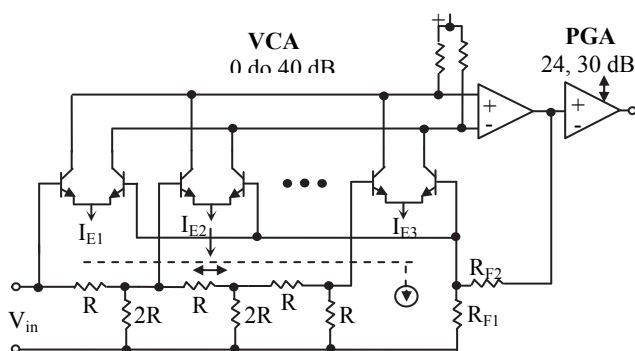
Rys. 2. Schemat korektora wzmocnienia, gdzie: B - bufor, układ F-E - Front-End (kondycjoner), ADC0 - port wejściowy mikrokontrolera podłączony do kanału wejściowego przetwornika ADC znajdującego się w strukturze mikroprocesora MCU, PB - port sterujący

Korektor stałej wzmocnienia przedstawiony na rysunku 2 zbudowany jest z wejściowego sterowanego cyfrowo wzmacniacza wykorzystującego analogowe układy przełączające - S_1, \dots, S_2 (wzmacniacz PGA - AD 526), przetwornika analogowo-cyfrowego (ADC) oraz mikrokontrolera (MCU - ADuC702). Procedura wyznaczenia wzmocnienia napięciowego wejściowego sygnału V_{in} opiera się na wstępnym jego pomiarze przez układ pomocniczy składający się z: bufora - B (wzmacniacz AD8000) cechującego się dużą wartością szybkości narastania napięcia wyjściowego $SR=4100$ V/ μ s oraz wewnętrznego przetwornika ADC typu SAR

znajdującego się wewnątrz mikrokontrolera (MCU) pozwalającego na wprowadzenie danej do pamięci wewnętrznej typu RAM. Na podstawie tej wartości, mikrokontroler za pomocą sekwencyjnego algorytmu (liniowego) wyznacza wzmocnienie napięciowe wzmacniacza (A) przez załączenie odpowiedniego obwodu sprzężenia zwrotnego wzmacniacza za pośrednictwem analogowych kluczy ($S_0 \dots S_n$) tak, aby pomiar odbywał się z jak największą rozdzielczością w celu wykorzystania pełnego zakresu dynamicznego przetwornika ADC (np. przetwornik ADC typu CS5530).

Wadą układu korektora stałej przetwarzania z rysunku 2 jest długi czas potrzebny na ustalenie żądanej wartości wzmocnienia, który składa się z następujących odcinków czasowych: t_{conv} (20 μs) - czas przetwarzania ADC, t_{mux} - czas przełączania wejściowego multiplexera mikroprocesora, t_{PGA} - czas ustalenia wzmocnienia oraz t_{alg} czas wyznaczenia wzmocnienia zależny od złożoności obliczeniowej algorytmu [4, 10, 11].

Współczynnik wzmocnienia można regulować w sposób ciągły za pomocą wzmacniacza sterowanego napięciowo VCA (ang. Voltage Controller Amplifier) wykorzystujących rezystor (tłumik) o rezystancji sterowanej sygnałem napięciowym VVA (ang. Voltage Variable Amplifier) przedstawionym na rysunku 3 (wzmacniacz typu AD 600 X-AMP) [12].



Rys. 3. Budowa wzmacniacza o wzmocnieniu sterowanym napięciowo typu VCA [12, 13] pracującego w konfiguracji wzmacniacza nieodwracającego kaskadowo połączonego z układem sterowanym cyfrowo typu PGA

Dużym problemem w precyzyjnym określeniu stałej przetwarzania napięcia wejściowego w układzie korektora z rysunku 2, wykorzystującym sterowany układ PGA jest brak możliwości uzyskania współczynnika wzmocnienia mniejszego od 1, co oznacza brak możliwości tłumienia sygnału wejściowego. Wartość wzmocnienia precyzyjnego układu programowalnego typu VCA (np. wzmacniacz AD 8320) podana jest w specyfikacji producenta Analog Devices i określona zależnością [14]:

$$A_V(\text{code}) = 0.316 + \left(0.077 \times \frac{\text{code}}{2^n_{DEC}} \right) \quad (1)$$

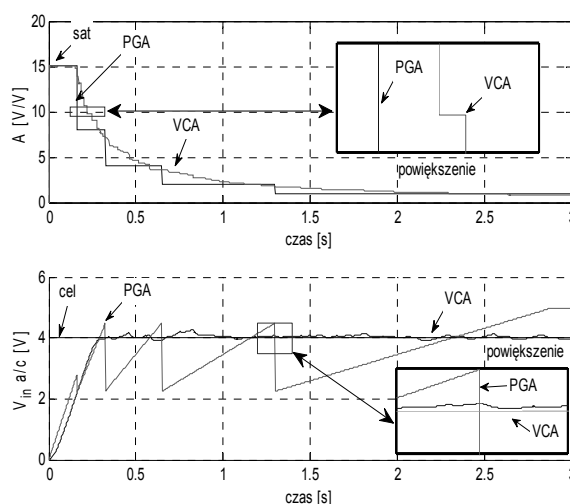
Parametr ten opisany jest funkcją o argumentie 8 bitowym „code”, zmieniającym się liniowo według zależności 1 z krokiem co 0,077 V/V, w granicach wartości od 0,316 V/V do 19,95 V/V (26 dB). Tego typu regulacja stałej przetwarzania umożliwia płynną zmianę wzmocnienia w obwodzie wejściowym przetwornika. Autorzy artykułu w celu zwiększenia dokładności odwzorowania żądanej wartości wzmocnienia wykorzystali w układzie AGC (ang.

Automatic Gain Control, automatyczne wyznaczenie wzmocnienia) przedstawionym na rysunku 2 wzmacniacz wytwarzający wartość wzmocnienia określoną zależnością (1) [15].

Wyniki otrzymane na drodze symulacji potwierdzające użyteczność wykorzystania w układzie korekcji wzmocnienia układów wzmacniaczy sterowanych napięciowo zostały przedstawione w następnym punkcie referatu.

3. OCENA DOKŁADNOŚCI UKŁADU KOREKTORA WZMOCNIENIA

W celu weryfikacji właściwości metrologicznych układów korekcyjnych wzmocnienia autorzy stworzyli dwa modele wzmacniaczy operacyjnych o programowalnym wzmocnieniu: w sposób ciągły oraz cyfrowo w programie Matlab/Simulink. Na rysunku 4 porównano charakterystyki wzmocnienia - krzywe G będące odpowiedzią na eksperymentalny liniowy sygnał wejściowy $V_{in} = at$ o wartości narastającej w całym wejściowym zakresie pomiarowym.

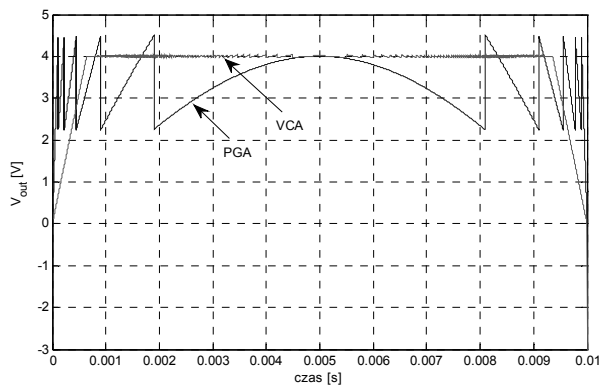


Rys. 4. Funkcja wzmocnienia napięciowego G wygenerowana przez wzmacniacz PGA oraz VCA oraz sygnał wejściowy przetwornika ADC będący iloczynem stałej G wraz z sygnałem niskonapięciowym pomiarowego toru wejściowego V_{in}

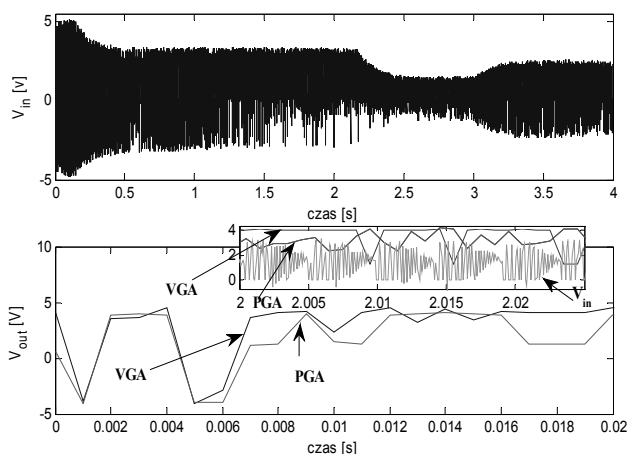
Obszar pomiędzy krzywą PGA, a VCA (rysunek 4) wskazuje na brak efektywności układów typu PGA wykorzystywanych w procesie dopasowywania zakresu pomiędzy przetwornikiem wartości mierzonej a kanałem wejściowym urządzenia pomiarowego. Dla potwierdzenia powyższej tezy wykonano eksperyment polegający na wprowadzeniu na wejście korektora napięciowego sygnału będącego dodatnim półokresem sinusoidy (rysunek 5).

Przebiegi przedstawione na rysunku 5 pozwalają stwierdzić, że algorytm automatycznego wyznaczania wzmocnienia pozwala na odpowiednie dopasowanie poziomu wejściowego sygnału do zakresu pomiarowego przetwornika mocy lub energii elektrycznej przy wykorzystaniu układów sterowanych napięciowo w sposób ciągły.

Autorzy proponują wykorzystanie takiej metody w kanałach prądowych przetworników mocy i liczników energii elektrycznej, w których zmiany wartości niskonapięciowego sygnału wyjściowego toru prądowego obejmują cały zakres napięcia wejściowego przetwornika analogowo-cyfrowego (ADC) tego toru.



Rys. 5. Odpowiedź układu korekcyjnego V_{out} zawierającego wzmacniacz o współczynniku wzmocnienia sterowanym napięciowo VCA oraz cyfrowo PGA na wymuszenie będące dodatnim pół okresem sinusoidy



Rys. 6. Przebieg czasowy: V_{in} - niskonapięciowego sygnału wyjściowego przetwornika pomiarowego, V_{out} - przebieg wyjściowy z układu automatycznej korekcji wzmocnienia przy zastosowaniu układu PGA oraz VGA

Przebiegi na rysunku 6 przedstawiają rzeczywisty przebieg - V_{in} części niskonapięciowej przetwornika prądu trakcyjnego w czasie eksploatacji zmodernizowanego zestawu kolejowego. Krzywa VGA będąca napięciem wyjściowym V_{out} (rysunek 6) wskazuje, że wykorzystanie układu automatycznej korekcji wzmocnienia o schemacie przedstawionym na rysunku 2 przy wykorzystaniu układu wzmacniacza typu AD 600 (rysunek 3) jest właściwym narzędziem w pomiarach o dynamicznie zmieniającej się wartości szczytowej prądu.

4. PODSUMOWANIE

Autorzy w artykule przedstawili procedurę korekcji wzmocnienia, u podstaw której leży uwzględnienie niskonapięciowej wejściowej szybkości zmian sygnału. Zastosowany wzmacniacz operacyjny o wzmocnieniu

przestrajonym napięciowo w sposób ciągły AD600 pozwala na ciągłą regulację stałej przetwarzania w wejściowym kanale pomiarowym scalonego przetwornika mocy i energii elektrycznej. Autorzy wykazali także wyższość proponowanego rozwiązania w porównaniu z układami typu PGA, szczególnie w przypadku dynamicznie zmiennego w czasie sygnału mierzonego. Fakt ten dokumentują wyniki badań symulacyjnych.

5. BIBLIOGRAFIA

1. Bolikowski J.: System pomiarowy do wyznaczania parametrów obwodów wejściowych inteligentnych przetworników mocy. Metrologia i Systemy Pomiarowe, Zielona Góra, 1992.
2. Kichin Ch., Counts L.: Wzmacniacze operacyjne i pomiarowe, BTC, Legionowo, 2009.
3. Maloberti F.: Przetworniki danych C/A A/C, WKŁ, 2010.
4. Kester W.: Przetworniki A/C i C/A Teoria i praktyka, BTC, 2012.
5. Hintea S., Faragó P., Marius N. Roman., Oltean G., Feștilă L.: A Programmable Gain Amplifier for Automated Gain Control in Auditory Prostheses, Journal of Medical and Biological Engineering, 31(3): 185-192, 2010.
6. Drozdek D., Simon D.: Struktury danych w języku C, WNT, 1996.
7. PGA11x Zero-Drift Programmable Gain Amplifier With Mux, Texas Instruments, 2015.
8. Bolikowski J.: Podstawy projektowania inteligentnych przetworników pomiarowych wielkości elektrycznych. Monografie nr 68, Zielona Góra, 1993.
9. Xing S., Chen S., Wei Z., Xia J.: Unifying Electrical Engineering and Electronics Engineering Proceedings of the 2012 International Conference on Electrical and Electronics Engineering, Springer, 2014.
10. Nadachowski M., Kulka Z.: Analogowe układy scalone, WKŁ, Warszawa, 1985.
11. Nawrocki Z.: Wzmacniacze operacyjne i przetworniki pomiarowe, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 2008.
12. Gilbert B., Clarke B.: Low noise, Wideband Voltage-Controlled Amplifier With "Linear-in-dB" Gain, Analog Dialogue Analog Devices, 1992.
13. Dobrowolski A., Komur P., Sowiński A.: Projektowanie i analiza wzmacniaczy małosygnałowych, BTC, Warszawa, 2005.
14. Serial Digital Controlled Variable Gain Line Driver AD8320, Analog Devices, Inc., 1998.
15. Alegre Pérez, Juan Pablo, Celma, Santiago, López, Belén Calvo.: Automatic Gain Control Techniques and Architectures for RF Receivers, Springer, 2011.

CORRECTION OF METROLOGICAL PROPERTIES FOR FAST CHANGING ELECTRONIC SIGNAL OF TRANSDUCER

The authors of this paper presented in synthetic way the metrological drawbacks of input programmable operational amplifier used in the input channel of integrated transducer also shown the principle of operation integrated operational amplifier with programmable gain. In this paper authors also presented the capability of using mentioned earlier in paper operational amplifier in automatic gain correction circuit in the current channel of active power transducer or watt-hours meter.

Keywords: integrated power transducer, correction of gain factor, programmable gain amplifier.