

Bogusław WIŚNIEWSKI, Barbara SZECÓWKA – WIŚNIEWSKA, Paweł ADAMUS, Jakub WÓJCIK
 AKADEMIA GÓRNICZO - HUTNICZA, KATEDRA ELEKTRONIKI, Al. Mickiewicza 30, 30 -059 Kraków

Układy wzbudzające dla stanowiska pomiarowego sygnału swobodnej precesji protonów w ziemskim polu magnetycznym

Dr inż. Bogusław WIŚNIEWSKI

Adiunkt w Katedrze Elektroniki na Wydziale Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Elektroniki Akademii Górniczo – Hutniczej. Zajmuje się systemami mikroprocesorowymi i praktycznymi aplikacjami mikrokontrolerów. Jest twórcą laboratorium Techniki Mikroprocesorowej i Systemów Aparatury Cyfrowej. Jest organizatorem corocznych studenckich prezentacji mikrokontrolerów w ramach krakowskiego Festiwalu Nauki (każdorazowo od 70 – 100 działających aplikacji).

e-mail: bwisniew@agh.edu.pl



Paweł ADAMUS

Student w Katedrze Elektroniki na Wydziale Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Elektroniki Akademii Górniczo – Hutniczej. Główne zainteresowania to elektronika analogowa i sieci komputerowe.

e-mail: padamus81@gmail.com



Dr inż. Barbara SZECÓWKA - WIŚNIEWSKA

Adiunkt w Katedrze Elektroniki na Wydziale Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Elektroniki Akademii Górniczo – Hutniczej. Zajmuje się systemami mikroprocesorowymi i praktycznymi aplikacjami mikrokontrolerów i procesorów sygnałowych.

e-mail: bawisn@agh.edu.pl



Jakub WÓJCIK

Student w Katedrze Elektroniki na Wydziale Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Elektroniki Akademii Górniczo – Hutniczej. Główne zainteresowania to elektronika i informatyka.

e-mail: jakubfwojcik@gmail.com



Streszczenie

Stanowisko pomiarowe wykorzystuje sygnał swobodnej precesji (SSP) od protonów, w ziemskim polu magnetycznym, a przeznaczone jest do badań porowatości i współczynnika cieczy swobodnej próbek ciał stałych. Wybrano optymalną metodę redukcji pola polaryzującego w celu efektywnego wzbudzenia SSP, a jego powtarzalność zapewniają układy stabilizacji sterowane cyfrowo. Są one konieczne do cyfrowego uśredniania SSP. Przedstawiono prawdopodobne przyczyny ograniczające ilość powtarzalnych sekwencji pomiarowych.

Słowa kluczowe: sygnał precesji protonów w polu Ziemi, stabilizator prądu obciążony indukcyjnie.

Excitation circuits for measurement stand of free protons precession in Earth magnetic field

Abstract

Measurement stand, which is devoted to research of porosity and free liquid factor in samples of solid state, takes advantage of free induction decay of protons in the earth magnetic field. In order to achieve the excitation of the signal, it is essential, to submit the sample to the high constant field and next the adequate fast reduction of the field to zero value. The conditions, which guarantee the stable excitation of free induction decay for the single measurement and for the measurement sequence, were researched (Fig.1). The comparison of decay shape and of essential polarization current steepness for the same absolute maximum voltage of switching transistors was done [1]. Practical solutions for the optimal method of reduction with reference to the nowadays technical opportunities were shown (Tab.1). In order to achieve the same repeatability of excitation signal, systems of reduction the polarization current (field) were completed with the stability circuits (Fig.5). The operation of stability circuits must be controlled by the superior dedicated microprocessor system (M68030). Digital system assures of given current level. Repeatability of value, duration and shape of polarization field decay determines ability of digital averaging free induction decay. Basing on measurement results, reasons of constrains of repeatable sequences were shown (Fig.6).

Keywords: free protons precession, Earth magnetic field, current regulator with coil load.

1. Sygnał swobodnej precesji

Sygnał swobodnej precesji (SSP) powstaje przy przejściu jąder izotopów, dysponujących niezerowym momentem magnetycznym (spinem), pomiędzy dwoma stanami równowagi wymuszonymi przez zewnętrzne pole magnetyczne. Aby doszło do precesji zmiana pola musi być odpowiednio szybka (tzw. przejście nieadiabaticzne), a nowe pole wystarczająco jednorodne. Precesujące jądra generują sygnał, którego pulsacja jest wprost proporcjonalna do nowej wartości zewnętrznego pola magnetycznego (pole ziemskie), zgodnie z zależnością:

$$\omega = \gamma_p \cdot H_Z, \quad (1)$$

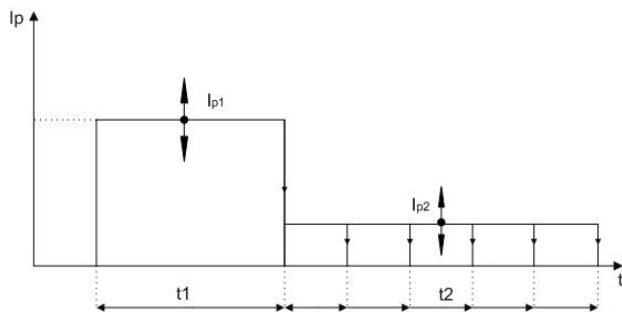
gdzie: γ_p to współczynnik giromagnetyczny protonu 267,52 m/As (jest największy dla jądra H_1^1 - wodoru), a wartość H_Z wynosi 48,6 A/m - w okolicach Krakowa. Stąd SSP odbierany w cewce ma częstotliwość $f = 2070$ Hz.

Generalnie spin jest właściwością izotopów, posiadających nieparzystą ilość nukleonów w jądrze. SSP jest obserwowany dla związków znajdujących się w fazie ciekłej. O częstotliwości SSP decyduje dany izotop pierwiastka, zaś parametry obwiedni zależą od związku chemicznego, w którym ten izotop jest zawarty. Sygnał jest odbierany tylko w trakcie ustalania się nowego położenia spinów. Procesy przejściowe są określone przez stałą czasową T_2 (tzw. stałą spinowo - spinową), która np. dla wody destylowanej wynosi 2,7 s, dla spirytusu etylowego 3,1 s, a dla benzenu aż 19 s (wzrost wartości odwrotnie proporcjonalny do lepkości). Ziemskie pole magnetyczne jest powszechnie dostępne i charakteryzuje się najmniejszym gradientem, oczywiście poza centrami urbanistyczno – przemysłowymi. Sama aparatura nie może oczywiście zawierać materiałów ferromagnetycznych. Niska częstotliwość SSP powoduje, że sygnał indukowany, zależny wprost proporcjonalnie od częstotliwości, jest rzędu mikrowoltów. Alternatywne użycie silnego pola jest przedsięwzięciem kosztownym, ze względu na konieczność zachowania jednorodności w polu pomiarów (tomografia MRJ).

2. Wymogi funkcjonalne toru wzbudzenia

Stanowisko pomiarowe składa się z dwóch torów: wzbudzenia i odbioru SSP. Korzystają one ze wspólnej cewki polaryzująco – odbiorczej. W fazie polaryzacji wymusza ona w próbce silne pole porządkujące spiny, zgodnie ze swoim kierunkiem. Po odpowiednio szybkiej redukcji tego pola (prądu) w cewce przyłączonej do toru odbioru otrzymywany jest SSP.

Dla celów kompleksowych badań związanych z określaniem efektywnej porowatości próbki (np. skały złożowej) powinniśmy dysponować przebiegiem prądu (pola) polaryzacji jak na rysunku 1. Pojedyncza faza „ t_1 ” pozwala na określenie ilości cieczy w próbce. Aby było możliwe wyznaczenie porowatości całkowitej i przede wszystkim indeksu cieczy swobodnej, konieczne jest użycie wielu sekwencji „ t_1 ” – „ t_2 ” (t_1 – const, t_2 – var).



Rys. 1. Sekwencje prądu polaryzacji
Fig. 1. Sequences of polarization current

3. Wybór sposobu redukcji pola polaryzującego

Wzbudzenie precesji wymaga odpowiednio szybkiej redukcji pola polaryzującego, przede wszystkim w jego końcowej fazie [1]. W celu usunięcia energii z cewki możemy użyć różnych układów. Zostały one przedstawione w tabeli 1.

Wartości czasów zaniku i stromości końcowej $\frac{dI_P}{dt} / I_P = 0$ wynoszą:

dla typu zaniku oscylacyjnego:

$$\text{czas zaniku: } t_C = \frac{\pi L I_P}{2 U_H}, \quad (2)$$

$$\text{stromość końcowa: } -\frac{U_P}{L}, \quad (3)$$

dla typu zaniku oscylacyjnego tłumionego:

$$\text{czas zaniku: } t_K = \frac{1}{\omega} \arctg \frac{\omega}{\alpha}, \quad \omega = \sqrt{\frac{1}{LC} - \alpha^2}, \quad (4)$$

$$\text{gdzie: } \alpha = \frac{R_L + R}{2L}$$

$$\text{stromość końcowa: } -\frac{E}{R_L} \frac{\alpha(3\omega^2 - \alpha^2)}{\omega \sqrt{\omega^2 + \alpha^2}} e^{-\frac{\alpha}{\omega} \arctg \frac{\omega}{\alpha}} \quad (5)$$

dla typu zaniku eksponencjalnego z forsowaniem:

$$\text{czas zaniku: } t_e = \frac{L}{R_L} \ln \frac{I_P R_L + U_H}{U_H}, \quad (6)$$

$$\text{stromość końcowa: } -\frac{U_P}{L}. \quad (7)$$

Tab. 1. Warianty redukcji pola polaryzującego
Tab. 1. Examples of the polarization field reduction

Typ zaniku	Układ	Kształt zaniku
Oscylacyjny		
Oscylacyjny tłumiony		
Eksponencjalny z forsowaniem		

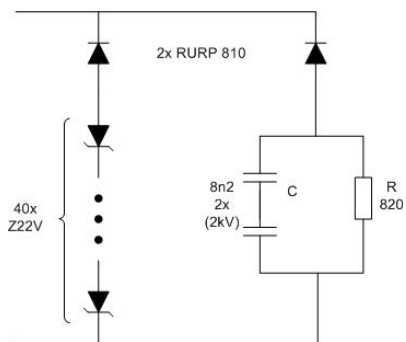
Zauważamy identyczną stromość końcową dla zaniku oscylacyjnego i eksponencjalnego z forsowaniem przy takiej samej wartości przepięcia U_H . Natomiast przez cały czas trwania zaniku przebieg eksponencjalny ma większą stromość. Zanik oscylacyjny tłumiony jest co prawda krótszy od słabo tłumionego, ale stromość końcowa będzie zawsze gorsza. Porównanie czasów zaniku, dla dostatecznie dużej wartości napięcia U_H , daje stały stosunek, zgodnie z zależnością:

$$t_e = \frac{2}{\pi} t_c \quad (8)$$

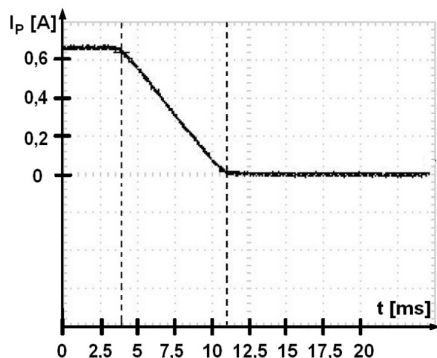
Zauważmy, iż wartość t_c , dla dużych U_H słabo zależy od prądu I_{P1} ($t_2=0$), czy I_{P2} . Natomiast dla zaniku oscylacyjnego, aby w pełni wykorzystać napięcie U_H , należy dla każdej wartości prądu I_P dołączać inną pojemność. Powyższe względy zdecydowały o wyborze zaniku eksponencjalnego z forsowaniem.

Stwierdzono doświadczalnie, iż skuteczne wzbudzenie SSP następuje dla czasu zaniku t_e wynoszącego 8 ms. Jego dalsze skracanie niczego nie zmienia, komplikując równocześnie problemy techniczne ($U_H > 1$ kV). Do realizacji układu zaniku prądu nie można użyć wysokonapięciowych diod Zenera. Np. dla diody $U_Z = 100$ V, przy prądzie na początku zaniku $I_P = 0,65$ A, mamy moc 65 W, co skutkuje degeneracją złącza. Z tego względu posłużono się zestawem diod o niższym napięciu, przedstawionym na rysunku 2.

Na szybkość obrotu wypadkowego wektora pola magnetycznego, największy wpływ ma końcowy odcinek zaniku prądu polaryzacji. Następuje wtedy wyłączenie zestawu diod Zenera, co spowodowałoby oscylacje (cewki posiadają pojemności pasożytnicze). Dlatego też dodano układ RC tłumiący oscylacje końcowe. Kształt prądu przedstawiono na rysunku 3.



Rys. 2. Rzeczywisty układ redukcji pola polaryzującego
Fig. 2. The actual circuit of polarization current reduction



Rys. 3. Kształt zaniku prądu polaryzacji
Fig. 3. The shape of polarization current decay

Przy pomiarach próbek o zawartości cieczy (woda, ropa naftowa) wynoszącej 10% i mniejszej, decydujący staje się stosunek sygnału do zakłóceń. Przy sygnale rzędu kilku do kilkunastu μ V poziom zakłóceń odbieranych współcześnie w cewkach jest dwa rzędy większy. Sygnał wyodrębnia się sekwencją filtrów o charakterystyce okienkowej, wspartych ogniwami górnoprzepustowymi dla eliminacji produktów sieciowych [2]. Oczywiście, że ze względu na poziom sygnału SSP (konieczność wzmocnienia całkowitego rzędu $10^5 - 10^6$ V/V) zastosowano środki specjalne (zasilanie akumulatorowe, symetryzacja, izolacja galwaniczna od części cyfrowej). Pozwoliło to na odbiór SSP, natomiast dokładność była niezadowalająca. Aby wyeliminować nieusuwalne zakłócenia z pasma sygnału, zdecydowano się na wykorzystanie efektu powtarzalności SSP. Przy odbiorze wielokrotnym z uśrednianiem, zakłócenia jako nieskorelowane z sygnałem, powinny podlegać redukcji wraz ze wzrostem liczby uśrednionych rejestracji. Nie można uśredniać interesującej nas obwiedni (SSP po detekcji), gdyż sygnały zakłócające zostaną też wyprostowane i ich poziom będzie wręcz narastał. Dodawać należy sygnał pierwotny (2070 Hz) stosując odpowiedni okres próbkowania (przyję-

to 10 μ s). Po uśrednieniu cyfrowym można dopiero wyodrębnić interesującą nas obwiednię.

4. Stabilizacja prądu polaryzacji

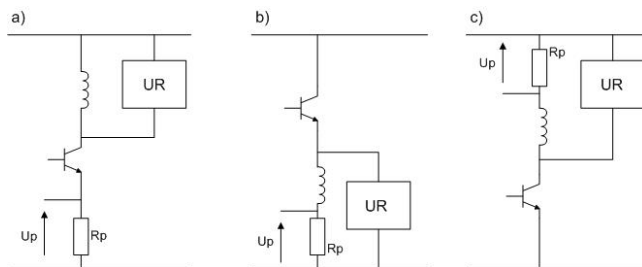
Aby uzyskać powtarzalność SSP niezbędna jest identyczna sekwencja prądu polaryzującego. Czas odmierzany jest precyzyjnie przez system mikroprocesorowy. Istotna jest natomiast stabilizacja wartości prądu polaryzującego.

Mimo stabilizacji ilość efektywnych uśrednień może być limitowana powolnymi zmianami wraz z temperaturą, parametrów komponentów analogowych toru polaryzacji. Ich wpływ można było określić tylko empirycznie, uzupełniając stanowisko o sterowany cyfrowo stabilizator prądu.

Zasilanie cewki w fazie polaryzacji wymaga napięć przewyższających 100 V, w celu uzyskania odpowiedniego natężenia pola polaryzującego. Ze względu na minimalizację pojemności międzywojowych, cewki są sekcjonowane. Łączenie równoległe sekcji przy polaryzacji, w celu obniżenia napięcia baterii nie jest możliwe. Prąd wypadkowy zanika wprawdzie do zera, lecz wskutek sprzężeń między sekcjami występują dalej procesy przejściowe uniemożliwiające wzbudzenie SSP.

Jako element regulacyjny dogodniej jest stosować tranzystory bipolarne (typ n dysponuje wyższym napięciem U_{CE}). W tranzystorach polowych dla dużych prądów kanału pojawia się niekorzystny efekt pojemności C_{GS} , co jak stwierdzono doświadczalnie miało wpływ na stabilność.

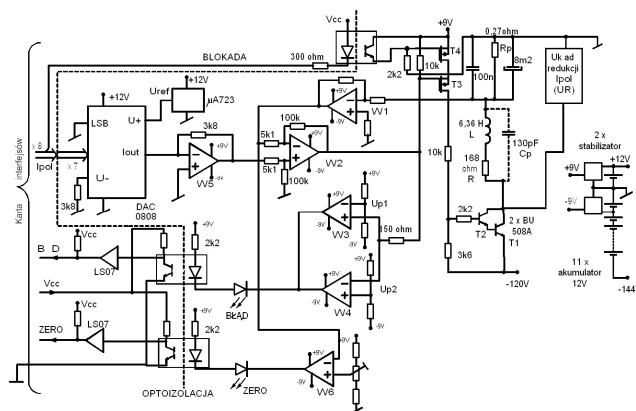
Możliwe konfiguracje usytuowania elementu regulacyjnego i rezystora pomiarowego R_p przedstawiono na rysunku 4.



Rys. 4. Warianty konfiguracyjne stabilizatora (UR – układ redukcji prądu polaryzacji)
Fig. 4. Examples of current regulator (UR – circuit of polarization current reduction)

Wszystkie rozwiązania wymagają użycia dodatkowych układów zasilających, a także wzmacniacza napięcia U_p .

Wariant (a) jest najwygodniejszy do realizacji technicznej, lecz stabilizacji podlega prąd emitera zamiast kolektora. Do realizacji praktycznej wybrano wariant (c).



Rys. 5. Zrealizowany układ stabilizatora prądu polaryzacji
Fig. 5. Polarization current regulator

Poglądowy schemat blokowo – ideowy stabilizatora przedstawiono na rysunku 5.

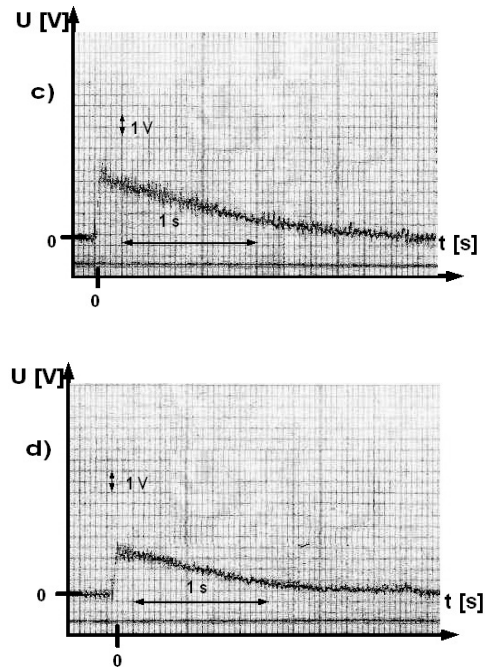
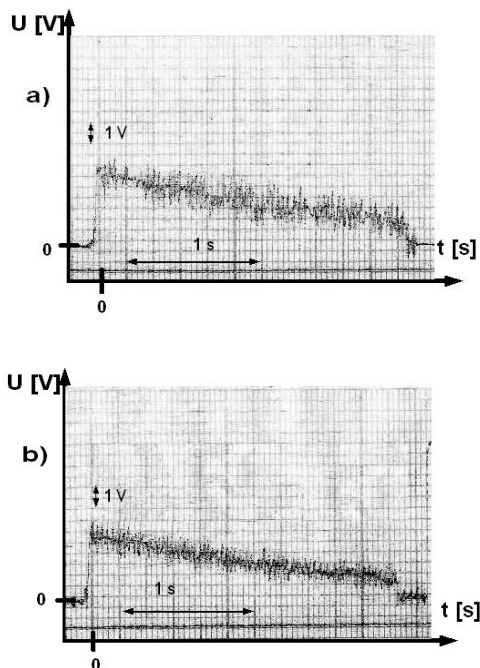
Układy regulacyjne stabilizatora związane z poziomem „0 V”, realizując przeniesienie sterowania do poziomu „-120 V”, poprzez dodatkowy wzmacniacz na tranzystorze T_3 . Wartość prądu zadawana jest cyfrowo z karty interfejsów. Należy liczyć się z dryfem zera, mimo zerowej nastawy prądu. Przełączenie cewki do toru odbioru, nawet z prądem rzędu ułamków miliampera, skutkuje uszkodzeniem czułych przedwzmacniaczy. Stąd dodatkowa logika cyfrowej blokady prądu. Na wszelki wypadek stabilizator generuje sygnał „ZERO”, sprawdzany przed podłączeniem cewki do wzmacniaczy.

Całość stanowiska pomiarowego, ze względu na konieczność posługiwania się niezakłóconym ziemskim polem magnetycznym (warunki polowe), jest zasilana akumulatorowo. Użycie zasilania sieciowego jest też niemożliwe, ze względu na bardzo niski poziom sygnału. W stabilizatorze dodano też logikę wykrywającą jego błędne działanie. Komparator okienkowy wykrywa przekroczenie poziomu napięcia błędu, czy to wskutek rozładowania się baterii, czy z innych przyczyn (np. uszkodzenie tranzystorów T_1/T_2). Wzrost prądu polaryzacji, następuje ze stałą czasową cewki, w stosunku do pełnego napięcia baterii (tranzystor T_1 nasycony) i jest tym szybszy, im wartość I_{p1} jest mniejsza. Każdorazowe zmniejszenie prądu uruchamia układ zaniku, a prąd przechodzi do mniejszej lub zerowej wartości, w sposób eksponencjalny z forsowaniem. Aby wyeliminować przeregulowania i inne procesy przejściowe, przy załączeniu prądu polaryzacji ograniczono wzmocnienie USZ (wzmacniacz W_2) oraz radykalnie zmniejszono pasmo zespołu: przetwornik c/a – konwerter prądu - napięcie (wzmacniacz W_5).

5. Wyniki badań

Częścią analogową stanowiska steruje dedykowany system mikroprocesorowy, oparty na układzie M68030. Oprócz sekwencji sygnałów sterujących ma on za zadanie gromadzenie i uśrednianie próbek, wyznaczanie obwiedni itp. Na końcu toru pomiarowego użyto przetwornik a/c typ AD7663 (16 bitów, wyjście szeregowe ze względu na ilość optoizolowanych linii).

Uzyskane efekty redukcji zakłóceń przedstawiono na rysunkach 6 a, b, c, d (próbka z alkoholem etylowym).



Rys. 6. SSP po uśrednieniu cyfrowym (a - bez uśredniania, b - uśrednianie z krotnością 4, c - uśrednianie z krotnością 8, d - uśrednianie z krotnością 16)

Fig. 6. Signal after digital averaging (a - without averaging, b - 4 times, c - 8 times, d - 16 times)

Okazało się, że uśrednianie z krotnością powyżej ośmiu, powoduje już redukcję SSP. Zachodzi zapewne efekt przesuwania się fazy sygnału [3].

Przyczyną tego efektu nie są zmiany charakterystyk amplitudowo – fazowych toru odbioru - kontrolne pomiary nie wykazały zauważalnych zmian z czasem i temperaturą. System mikroprocesorowy odmierza sekwencje czasowe bardzo precyzyjnie (generator kwarcowy). Źródło przesunięcia fazy musi znajdować się w torze polaryzacji. Dlatego też aktualnie przygotowywany jest stabilizator prądu polaryzacji o rozdzielczości 12 bitów. Jeśli próg efektywnej krotności uśredniania sygnału nie poprawi się, będzie to wskazywało na efekty termiczne układu redukcji prądu bądź zmiany wartości parametrów R , L , C_p samej cewki. W tym przypadku będzie można uśredniać obwiednię z 8-krotnych serii pomiarów.

6. Literatura

- [1] Wiśniewski B., Szcówka B., Ostrowski J., Brzozowski I.: Wzbudzenie i odbiór sygnału swobodnej precesji protonów w ziemskim polu magnetycznym. *Elektronika*, 40 (1999), nr.1, 19-23.
- [2] Wiśniewski B., Szcówka-Wiśniewska B., Ostrowski J.: Optymalizacja toru odbiorczego sygnału swobodnej precesji protonów w ziemskim polu magnetycznym. *Pomiary, Automatyka, Kontrola*, 53 (2007), n.9 bis, 112-114.
- [3] Zieliński T. P.: *Od teorii do cyfrowego przetwarzania sygnałów*. Wydawnictwo AGH, 2002

otrzymano / received: 17.05.2010

przyjęto do druku / accepted: 02.07.2010

artykuł recenzowany