

Ocena postępów rehabilitacji za pomocą testu stabilografii nadażnej

Streszczenie. Artykuł prezentuje metodę oceny postępów rehabilitacji za pomocą testu stabilografii nadażnej. Głównym efektem prac jest metoda wydzielenia oraz parametryzacji subtrajektorii różnicowych lewej i prawej nogi z pierwotnej trajektorii stabilograficznej. Badania pilotażowe pacjentów przeprowadzone w czasie rehabilitacji po endoprotezoplastyce stawu biodrowego wskazują na to, że porównanie parametrów lewej i prawej subtrajektorii różnicowej z wykorzystaniem zaproponowanych metod pozwala na ocenę postępów rehabilitacji.

Abstract. The paper presents the rehabilitation progress evaluation method by means of follow-up posturography test. The main effect of the work is left and right differential subtrajectory subtraction (from the original one) and their parameterization method. Preliminary examinations of the patients after hip replacement surgery shows that presented approach allows to evaluate the rehabilitation progress. (**Rehabilitation progress evaluation by means of follow-up posturography test**).

Słowa kluczowe: stabilografia nadażna, trajektoria różnicowa, otoczka wypukła, endoprotezoplastyka stawu biodrowego.

Keywords: follow-up posturography, differential trajectory, convex hull, hip arthroplasty.

doi:10.12915/pe.2014.09.14

Wstęp

Stabilografia (posturografia) zajmuje się rejestracją oraz analizą sił nacisku stóp człowieka na płaszczyznę podstawy. W stabilografii statycznej osoba badana stoi swobodnie na platformie stabilograficznej starając się zachować swoje ciało w stanie równowagi. Badanie trwa od 30 do 60 sekund [1]. Przemieszczający się punkt przyłożenia wypadkowej siły nacisku stóp na płytę górną platformy (COP – Center of Pressure) w funkcji czasu tworzy tak zwaną trajektorię stabilograficzną i obrazuje mikroruchy jakie wykonuje osoba stojąca w celu utrzymania równowagi [2]. Dokonując analizy oraz parametryzacji trajektorii stabilograficznej można wnioskować o stanie układu utrzymywania równowagi badanego oraz diagnozować schorzenia, które mają wpływ na funkcjonowanie tego układu [3, 4, 5]. Platforma stabilograficzna z dzieloną płytą górną pozwala dodatkowo na synchroniczną rejestrację trajektorii lewej i prawej nogi [6]. Stabilografia umożliwia między innymi ocenę postępów rehabilitacji osób po endoprotezoplastyce stawu biodrowego, podczas której dąży się do tego, by osoba rehabilitowana obciążała obie nogi w takim samym stopniu [7, 8, 9, 10].

Stabilografia nadażna wykorzystuje biologiczne, wzrokowe sprzężenie zwrotne w celu wymuszenia na osobie badanej ustalonego sposobu przemieszczania środka ciężkości jej ciała w pozycji stojącej. Głównymi elementami stanowiska stabilografii nadażnej jest platforma stabilograficzna oraz monitor, na którym osoba badana obserwuje bieżące położenie punktu COP swojego ciała oraz przemieszczający się punkt bodźca. Jej zadaniem jest tak odchyłać swoje ciało by oba punkty wyświetlane na monitorze były jak najbliżej siebie. Zaprojektowane i wykonane w Instytucie Elektroniki Politechniki Śląskiej stanowisko stabilografii nadażnej wykorzystywane jest z pozytywnym skutkiem w Śląskim Szpitalu Reumatologiczno-Rehabilitacyjnym w Ustroniu w ramach ćwiczeń rehabilitacyjnych pacjentów po endoprotezoplastyce stawu biodrowego [11]. Stanowisko stabilografii nadażnej może być jednak wykorzystane nie tylko do ćwiczeń rehabilitacyjnych, ale także do oceny (diagnozowania) postępów rehabilitacji [12, 13]. W tym celu zaproponowano test stabilografii nadażnej oraz przedstawiono sposób parametryzacji uzyskanych trajektorii pod kątem diagnozowania stanu pacjentów po endoprotezoplastyce stawu biodrowego.

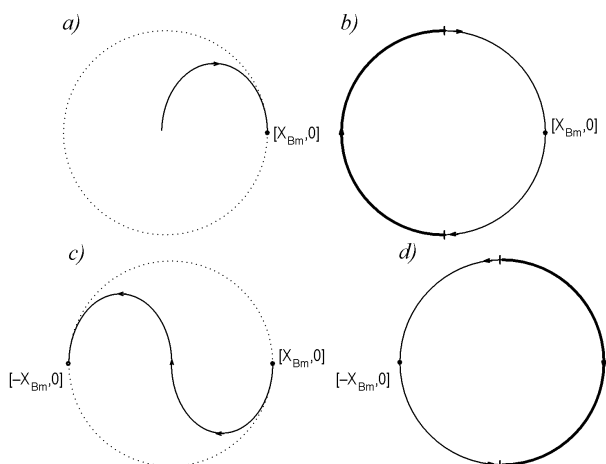
Stabilograficzny test nadażny

Stanowisko do testu stabilografii nadażnej wykorzystuje platformę stabilograficzną z dwoma płytami górnymi, przy czym każda z nich podparta jest na trzech mostkach tensometrycznych typu KM500 firmy Megatron (czułość: 0,004mV/V/N, liniowość: 0,05% pełnego zakresu pomiarowego). Sześć wzmacniaczy przyrządowych wzmacnia sygnał z mostków, który następnie poddawany jest filtracji antyaliasingowej i przetwarzany na postać cyfrową (przetwarzanie 12-bitowe, częstotliwość próbkowania 50 Hz) [6].

Przed właściwym testem stabilografii nadażnej, gdy osoba badana stoi już swobodnie na platformie, wyznaczane jest uśrednione położenie punktu COP w stanie spoczynkowym, niezbędne do właściwej ekspozycji bodźca i reprezentacji bieżącego punktu COP podczas testu. Następnie osoba badana proszona jest o maksymalne wychylenie swojego ciała w przód a następnie w tył bez przemieszczania stóp na platformie. Te maksymalne wychylenia są różne i zależne między innymi od kondycji badanego. Zarejestrowane maksymalne wychylenia w przód i w tył umożliwiają odpowiednie do możliwości badanego przeskalowanie reprezentacji bieżącego punktu COP w osi strzałkowej podczas testu – przy czym założono, że dokładne podążanie za bodźcem wymaga odchylenia ciała wynoszącego 66% wychylenia maksymalnego. Zmierzone maksymalne wychylenia przód-tył mogą być wykorzystane także jako parametry w diagnostyce stanu układu utrzymywania równowagi. Jeśli chodzi o maksymalny zakres wychylenia ciała w płaszczyźnie bocznej, to przyjęto, że będzie on równy przeniesieniu 2/3 swego ciała odpowiednio na lewą lub prawą nogę.

Właściwy test stabilografii nadażnej składa się z kilku etapów pokazanych na rysunku 1 [12]. Etap początkowy (nierejestrowany) wiąże się z przejściem od pozycji spoczynkowej do punktu [XBm,0] – maksymalnego odchylenia w prawo (rys. 1a). Kolejny etap (rejestrowany) wiąże się z przemieszczaniem środka ciężkości badanego tak, by podążać za bodźcem poruszającym się po okręgu zgodnie z kierunkiem ruchu wskazówek zegara – trwa on 30 sekund (rys. 1b). Następnie realizowany jest etap przejściowy, w którym badany z taką samą prędkością, płynnie wychyla swoje ciało tak by osiągnąć maksymalne wychylenie w lewo i jednocześnie zmienić kierunek wychylania na przeciwny do ruchu wskazówek zegara (rys. 1c). Wtedy rejestrowany jest etap ostatni, podobny do

drugiego, z tym że kierunek wychylania ciała badanego jest przeciwny. W rezultacie testu uzyskuje się dwie trajektorie nadążne, przy czym różnią się one kierunkiem odchylenia ciała w ruchu okrężnym.



Rys. 1. Etapy stabilograficznego testu nadążnego

W diagnostyce osób po endoprotezoplastyce stawu biodrowego najlepszym przypadkiem jest sytuacja, w której pacjent używa obu nóg w takim samym stopniu. Zachodzi więc potrzeba zdefiniowania parametru, który można by wyznaczyć niezależnie dla jednej i drugiej nogi, a następnie porównać wartości tego parametru. Analizując przedstawiony scenariusz testu można stwierdzić, że udział prawej nogi w procesie korygowania wychylenia ciała i podążania za bodźcem jest większy od udziału lewej nogi dla całego prawego półokręgu trajektorii bodźca (największy, gdy bodziec znajduje się w punkcie $[X_{Bm}, 0]$). Z kolei udział lewej nogi w procesie korygowania wychylenia dominuje dla lewego półokręgu trajektorii bodźca. Można zatem wyróżnić dwa półokręgi (na rysunku 1b i 1d zaznaczone pogrubioną linią), w których dominuje odpowiednio lewa i prawa noga. Ponadto charakter ruchu w obu przypadkach jest identyczny (wychylenie ciała od maksymalnego odchylenia w tył do maksymalnego odchylenia w przód). By porównać zatem zdolność lewej i prawej nogi do realizacji zadania testowego należy dokonać parametryzacji uzyskanych subtrajektorii stabilograficznych dla wskazanych półokręgów trajektorii bodźca.

Parametryzacja trajektorii testu nadążnego

Bezpośrednia analiza trajektorii stabilograficznych dostarcza wielu cennych informacji, jednakże z punktu widzenia diagnostyki podejście to jest mało efektywne i narażone na subiektywizm oceny. Z tego powodu, za pomocą różnego rodzaju algorytmów, dokonuje się parametryzacji trajektorii. W efekcie, uzyskujemy wartość liczbową, która w sposób ilościowy określa wybraną cechę trajektorii (np. długość, widmo częstotliwościowe, wymiar fraktalny trajektorii) [4, 5]. Jak wspomniano wcześniej, istotnym elementem zaproponowanej metody jest wydzielenie z całkowitej trajektorii dwóch subtrajektorii, pierwszej związanej z przeważającą aktywnością nogi lewej, drugiej – z aktywnością nogi prawej (rys. 2).

Ocenę stanu pacjenta przeprowadza się na podstawie jego zdolności do utrzymywania w jak najmniejszej odległości bieżącego punktu COP od punktu bodźca. W tym celu wygodnie jest posługiwać się trajektorią różnicową, której współrzędne $[X_R(i), Y_R(i)]$ punktów są różnicą współrzędnych kolejnych par punktów trajektorii COP

$[X(i), Y(i)]$ i trajektorii bodźca $[X_B(i), Y_B(i)]$. Jak łatwo zauważyć środkiem tej trajektorii jest początek układu współrzędnych. W praktyce, bardzo często stosuje się parametry opisujące geometryczne aspekty trajektorii, a więc jej długość, pole powierzchni. Parametry te, zdefiniowane dla trajektorii różnicowej mają postać [12]:

Długość trajektorii:

$$(1) \quad Dl = \sum_{i=1}^N l(i)$$

gdzie:

$$(2) \quad l(i) = \sqrt{[X_R(i) - X_R(i-1)]^2 + [Y_R(i) - Y_R(i-1)]^2}$$

Pole powierzchni pod rozwiniętą trajektorią:

$$(3) \quad P_B = \sum_{i=2}^N p(i)$$

$$\text{gdzie } p(i) = \sqrt{ob(i) \cdot [ob(i) - r(i-1)] \cdot [ob(i) - r(i)] \cdot [ob(i) - l(i)]}$$

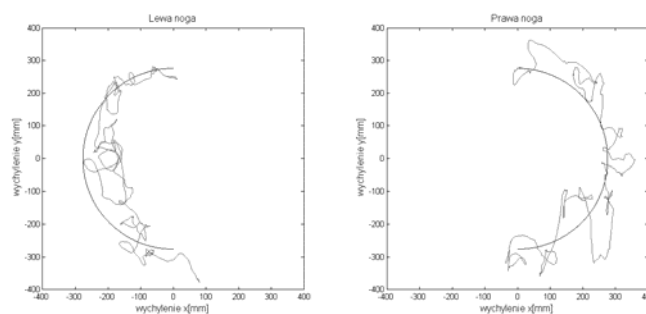
jest polem powierzchni trójkąta (wzór Herona) utworzonego przez dwa kolejne punkty trajektorii i początek układu współrzędnych; $l(i)$ dane jest równaniem (2), a pozostałe wielkości wynoszą:

$$r(i) = \sqrt{X_B^2(i) + Y_B^2(i)}$$

$$r(i-1) = \sqrt{X_B^2(i-1) + Y_B^2(i-1)}$$

$$ob(i) = \frac{l(i) + r(i) + r(i-1)}{2}$$

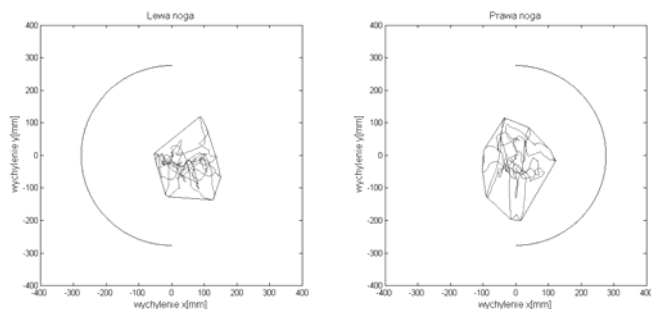
Sposób wyznaczania pola dany równaniem (3) posiada wadę, związaną z możliwością wielokrotnego zliczania elementarnych pól, co prowadzi do przeszacowania wartości końcowej [6]. W niniejszej pracy, do obliczania wspomnianego pola wykorzystano metodę znaną z geometrii obliczeniowej, tj. algorytm znajdowania otoczki wypukłej na płaszczyźnie.



Rys. 2. Lewa i prawa subtrajektoria stabilograficzna

Otoczka wypukła

Otoczka wypukła zbioru punktów P, zwana też powłoką wypukłą (ang. convex hull), stanowi najmniejszy wielokąt wypukły taki, że każdy punkt zbioru P leży albo na brzegu, albo wewnątrz tego wielokąta. Ponieważ w przypadku badania stabilograficznego mamy do czynienia ze zbiorem punktów, dzięki wyznaczeniu otoczki wypukłej zbioru punktów trajektorii różnicowej otrzymujemy wielokąt, którego pole jest miarą zdolności pacjenta do nadążania punktu COP za bodźcem. Na rysunku 3 przedstawiono zarówno dla nogi lewej jak i prawej: trajektorię bodźca, trajektorię różnicową oraz jej otoczkę wypukłą.



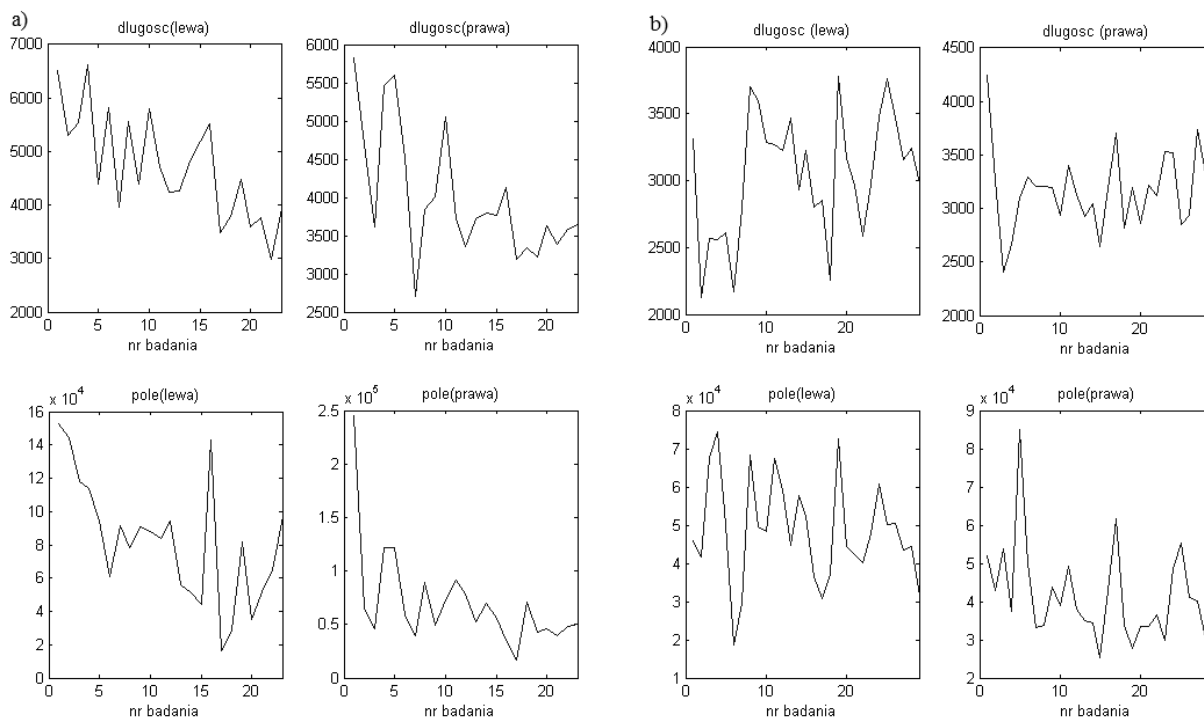
Rys. 3. Trajektorie bodźca, trajektorie różnicowa oraz jej otoczka wypukła (dla nogi lewej i prawej)

Do wyznaczenia otoczki wypukłej wykorzystano funkcję `convhull` dostępną w pakiecie MATLAB, realizującą obliczenia w oparciu o szybki algorytm Qhull [14]. Jego złożoność obliczeniowa, w przypadku punktów na płaszczyźnie, wynosi $O(n \log r)$, gdzie n – liczba danych wejściowych, r – liczba przetwarzanych punktów. Biorąc pod uwagę liczbę danych wejściowych (punktów) równą 750, gwarantuje to krótki czas obliczeń.

Wyniki

Skuteczność opisanych wcześniej metod parametryzacji trajektorii różnicowej zweryfikowano w oparciu o wyniki pilotażowych badań przeprowadzonych w Śląskim Szpitalu Reumatologiczno-Rehabilitacyjnym. W tym celu przeprowadzono regularne testy stabilografii nadążnej kilku

pacjentów po endoprotezoplastyce stawu biodrowego, w okresie czasu obejmującym proces rehabilitacji. Na tej podstawie wyciągnięto szereg wniosków. Dla przykładu na rysunku 4a przedstawiono zmiany długości oraz pola otoczki wypukłej subtrajektorii różnicowej nogi lewej i prawej, pacjenta poddanego 23 testom w okresie jego rehabilitacji. Na osi X zaznaczono numer kolejnego testu. Na podstawie rysunku można dostrzec wyraźną tendencję pacjenta w kierunku lepszego kontrolowania odległości punktu COP od bodźca, co objawia się w zmniejszaniu wartości obydwu parametrów wraz z upływem czasu w którym był poddawany rehabilitacji. Można jednak zauważyć, iż zakres zmian wartości długości trajektorii jest podobny zarówno dla nogi lewej jak i prawej. Sytuacja wygląda inaczej w przypadku pola otoczki, dla którego wyraźnie większy zakres zmian odnotowuje noga lewa. Jeżeli weźmiemy pod uwagę fakt, iż pacjent ten przeszedł zabieg chirurgiczny endoprotezoplastyki stawu biodrowego nogi lewej, zachowanie tego parametru w lepszym stopniu oddaje postępy jego rehabilitacji. Widać wyraźnie, iż na początku pacjent miał duże trudności z właściwym obciążaniem nogi lewej (ponadto, można również dostrzec efekt „uczenia się” zachowań na platformie, który tłumaczy duże wartości współczynników na początkowym etapie testów). Jednakże, wraz z upływem czasu, efekty rehabilitacji zaczynają być widoczne, co przekłada się na zmniejszenie wartości współczynników. Warto również zwrócić uwagę na niewielką zmianę wartości pola otoczki dla nogi prawej, co jest zrozumiałe, biorąc pod uwagę iż kończyna ta nie podlegała ingerencji chirurgicznej.



Rys. 4. Zmiana wartości długości oraz pola trajektorii różnicowej dla dwóch przypadków

Odnotowano również przypadek (dla innego pacjenta) odmiennego zachowania się wartości współczynników, co przedstawiono na rysunku 4b. Jak widać, tendencje zmian wartości współczynników nie są już tak jednoznaczne. Pacjent, którego dotyczą wyniki, przeszedł zabieg endoprotezoplastyki stawu, tym razem dla nogi prawej. Zmiany wartości pola otoczki potwierdzają skuteczność rehabilitacji w stosunku do nogi prawej (noga lewa bez

zmian). Co jednak istotne, wartość długości trajektorii różnicowej uległa zwiększeniu, co świadczy o dużej wrażliwości tego parametru na szereg czynników nie mających związku z procesem rehabilitacji. Z tego wynika, iż z punktu widzenia diagnostyki bardziej użytecznym parametrem jest pole otoczki subtrajektorii.

Podsumowanie

W artykule zaprezentowano metodologię wykorzystania nadażnego testu stabilograficznego do oceny postępów rehabilitacji osób po endoprotezoplastyce stawu biodrowego. Zaproponowano sposób parametryzacji, polegający na wyznaczeniu pola prawej i lewej subtrajektorii różnicowej przy wykorzystaniu pojęcia otoczki wypukłej, co eliminuje problem związany z przeszacowaniem wartości pola wyznaczanego dla trajektorii rozwiniętej. Przeprowadzone badania pilotażowe pozwoliły na sformułowanie szeregu wniosków dotyczących zależności pomiędzy uzyskiwanymi wartościami parametrów a obserwowanymi zmianami zachowania pacjentów poddawanych procesowi rehabilitacji.

LITERATURA

- [1] Winter D.A., Human balance and posture control during standing and walking, *Gait & Posture*, 3 (1995), n.4, 193-214
- [2] Duarte M., Freitas S., Revision of posturography based on force plate for balance evaluation, *Rev. Bras. Fisioter.*, 14 (2010), n.3, 183-192
- [3] Prieto T.E., Myklebust J.B., Hoffmann R.G., Lovett E.G., Myklebust B.M., Measures of postural steadiness: differences between healthy young and elderly adults, *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, 43 (1996), n.9, 956-966
- [4] Raymakers J.A., Samson M.M., Verhaar H.J.J., The assessment of body sway and the choice of the stability parameter(s), *Gait & Posture*, 21 (2005), n.1, 48-58
- [5] Fiołka J., Kidoń Z., Method for stabilogram characterization using angular-segment function, *Bulletin of the Polish Academy of Sciences, Technical Sciences*, 61 (2013), n.2, 391-397
- [6] Kidoń Z., Cyfrowe przetwarzanie sygnałów stabilograficznych, *Rozprawa Doktorska*, Politechnika Śląska, Gliwice 2003
- [7] Belaid D., Rougier P., Lamotte D., Cantaloube S., Duchamp J., Dierick F., Clinical and posturographic comparison of patients with recent total hip arthroplasty, *Rev. Chir. Orthop. Reparatrice Appar. Mot.*, 93 (2007), n.2, 171-180
- [8] Kidoń Z., Kania D., Fiołka J., Pethe-Kania K., Stanowisko stabilograficzne do oceny stanu pacjentów po endoprotezoplastyce stawu biodrowego, *Elektronika – konstrukcje, technologie, zastosowania*, 49 (2008), nr.11, 242-244
- [9] Nantel J., Termoz N., Centomo H., Lavigne M., Vendittoli P.A., Prince F., Postural balance during quiet standing in patients with total hip arthroplasty and surface replacement arthroplasty, *Clin. Biomech (Bristol Avon)*, 23 (2008), n.4, 402-407
- [10] Quagliarella L., Sasanelli N., Monaco V., Belgiovine G., Spinarelli A., Notarnicola A., Moretti L., Moretti B., Relevance of orthostatic posturography for clinical evaluation of hip and knee joint arthroplasty patients, *Gait & Posture*, 34 (2011), n.1, 49-54
- [11] Kidoń Z., Kania D., Pethe-Kania K., Stabilografia nadażna w procesie przywracania symetrii postawy, *Przegląd Elektrotechniczny*, 89 (2013), nr.8, 87-93
- [12] Kidoń Z., Fiołka J., Test stabilografii nadażnej, *Elektronika – konstrukcje, technologie, zastosowania*, 53 (2012), nr.9, 123-126
- [13] Łukaszewicz T., Kania D., Kidoń Z., Pethe-Kania K., Ocena symetrii postawy w teście stabilografii nadażnej, *Elektronika – konstrukcje, technologie, zastosowania*, 55 (2014) nr.1, 51-54
- [14] Barber C.B., Dobkin D.P., Huhdanpaa H.T., The Quickhull Algorithm for Convex Hulls, *ACM Trans. on Mathematical Software*, 22 (1996), n.4, 469-483

Autorzy: dr inż. Zenon Kidoń, Politechnika Śląska, Instytut Elektroniki, ul. Akademicka 16, 44-100 Gliwice, E-mail: Zenon.Kidon@polsl.pl; dr inż. Jerzy Fiołka, Politechnika Śląska, Instytut Elektroniki, ul. Akademicka 16, 44-100 Gliwice, E-mail: Jerzy.Fiolka@polsl.pl.