

# Kompleksowa ocena stanu funkcjonalnego narządu żucia z użyciem różnych technik pomiarowych

Complex analysis of the masticatory system function using various measurement techniques

J. Sawicki <sup>1</sup>, W. Mickiewicz <sup>1</sup>, A. Biedka <sup>1</sup>, K. Woźniak <sup>2</sup>, Ł. Faluta <sup>1</sup>, K. Wiśniewski <sup>1</sup>, K. Penkala <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Politechnika Szczecińska, Wydział Elektryczny, Instytut Elektroniki, Telekomunikacji i Informatyki, Zakład Cybernetyki i Elektroniki, tel. ...., e-mail: jerzy.sawicki@ps.pl

<sup>2</sup> Pomorska Akademia Medyczna, Zakład Stomatologii Zachowawczej, al. Powstańców Wlkp. 72, 70-111 Szczecin

## Streszczenie

W pracy omówiono biomechaniczne podstawy funkcjonowania narządu żucia człowieka, występujące zaburzenia czynnościowe oraz instrumentalne metody diagnostyki czynnościowej. Na podstawie analizy dotychczas stosowanych metod diagnostyki zaburzeń czynności narządu żucia zaproponowano nową koncepcję kompleksowego pomiaru trajektorii ruchu żuchwy z równoczesną rejestracją towarzyszących ruchom sygnałów akustycznych i sygnałów elektromiograficznych (EMG). Do trójwymiarowej rejestracji ruchu żuchwy zastosowano kamerę wideo oraz świecące znaczniki umieszczone na głowie badanej osoby. Przetestowano różne przetworniki mikrofonowe do poprawnego odbioru sygnału akustycznego towarzyszącego ruchom stawu żuchwowo-skroniowego. Omówiono zagadnienia rejestracji sygnałów EMG. Przedstawiono wyniki przeprowadzonych badań trajektorii ruchu żuchwy oraz analizy sygnałów akustycznych towarzyszących tym ruchom.

**słowa kluczowe:** ruchy żuchwy, sygnały akustyczne, sygnały elektromiograficzne

## Abstract

In the paper fundamentals of biomechanics of the human masticatory system, its dysfunctions and instrumental diagnostic methods, are presented. Based on the analysis of methods commonly used in diagnostics of functional disorders of the masticatory system, a new conception for complex measurement of jaw movements is proposed, with simultaneous recording of accompanying acoustical and electromyographic (EMG) signals. For three-dimensional recording of the jaw movements, a video camera was used and light-emitting markers placed on the head of a patient. Several microphone transducers were tested for proper recording of the acoustical signal associated with jaw joint movements. Recording techniques for EMG signals are discussed. Results of examination of the jaw movement trajectory, as well as analysis of acoustical signals are presented.

**keywords:** jaw movements, acoustical signals, electromyographic signals

## Wprowadzenie

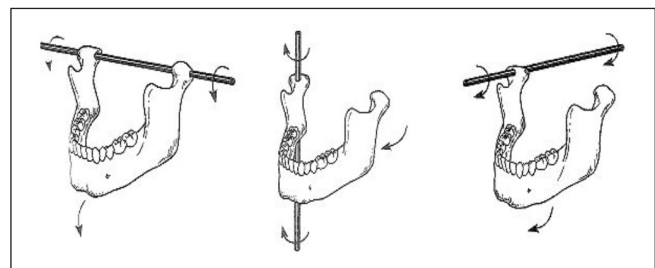
Narząd żucia z punktu widzenia biomechaniki we wszystkich sytuacjach klinicznych przejawia się jako część całego narządu ruchu [1]. Specyficzne uwarunkowania anatomiczne narządu żucia wyróżniają go jednak w relacji do pozostałych elementów tego układu. Głównym wyróżnikiem jest obecność niespotykanego w innej części układu ruchu anatomicznego sprzężenia jednoimiennych stawów za pośrednictwem gałęzi i

trzonu żuchwy. Drugim elementem charakterystycznym są łuki zębowe, zapewniające stabilne, cranialne podparcie jedynej ruchomej kości w obrębie czaszki, jaką jest żuchwa. Kolejną niespotykaną w innych stawach cechą jest bezpośrednie połączenie krążka stawowego z jedną z głów mięśnia skrzydłowego bocznego. Wszystkie przedstawione cechy determinują szczególną złożoność czynności układu ruchowego narządu żucia (rys. 1).

Warunkiem równowagi czynnościowej jest uzyskanie największej sprawności biomechanicznej układu przy najmniejszym zużyciu energii. Elementem nadrzędnym odpowiedzialnym za zachowanie harmonii pomiędzy kształtem a czynnością w narządzie żucia jest system nerwowo-mięśniowy. Niespełnienie tego warunku determinuje znaczną częstość chorób, a więc zjawisk o podłożu czynnościowym. Zachowanie prawidłowej czynności stanowi bowiem cel nadrzędny każdego ustroju żywego, tym samym nawet wyraźne zmiany anatomiczne nie są uważane za chorobę, jeśli nie powodują jednoczesnego ograniczenia czynności.

Zaburzenia czynności układu ruchu narządu żucia dotyczą aż 80% populacji. Znaczny jednak zakres stacjonarny układu, warunkowany wydajnymi systemami regulacji opartymi na wielu pętlach sprzężeń zwrotnych, jest odpowiedzialny za niewielką, bo 15% objawowość tych patologicznych stanów.

Ilościową oceną wzajemnych relacji poszczególnych elementów układu ruchu narządu żucia w sytuacjach statycznych oraz dynamicznych zajmuje się instrumentalna diagnostyka czynnościowa. Pierwsze prace dotyczące diagnostyki instrumentalnej, mające na celu stworzenie modelu wzajemnych relacji pomiędzy zwarem zębów szczęki i żuchwy oraz stawem skroniowo-żuchwowym, pojawiły się dopiero pod koniec XIX wieku. Rozpoczęto wówczas intensywne prace nad związkiem morfologii stawów skroniowo-żuchwowych i kontaktów zwarem zębów oraz wynikającej z nich różnorodności ruchów żuchwy. Dopiero w 1934 roku McCollum opracował w pełni mechaniczne urządzenie do trójwymiarowej rejestracji ruchów żuchwy. Urządzenie to umożliwiało zapis ruchów żuchwy za pomocą umiejscowionego na zewnątrz ust bolca. Dalszy rozwój diagnostyki instrumentalnej ruchów żuchwy był związany z zastosowaniem do ich rejestracji urządzeń elektronicznych, w tym wykorzystujących głowice ultradźwiękowe [2, 3, 4].



Rys. 1 Rotacja żuchwy wokół osi poziomej (zawiasowej), pionowej i strzałkowej

Celem analizy ruchów żuchwy nie jest jednak tylko graficzna, jakościowa i ilościowa analiza ruchów zwarciowych i wolnych żuchwy, ale określenie powtarzalnych wzajemnych relacji żuchwy względem pozostałej części twarzoczaszki. Realizację tego celu umożliwi określenie położenia osi zawiasowej żuchwy jako osi obrotu wyrostków kłykciowych podczas początkowego ruchu przywodzenia i odwodzenia żuchwy. Identyfikacja położenia osi zawiasowej ma ogromne znaczenie kliniczne, gdyż umożliwia zindywidualizowanie tzw. trójkąta Bonwilla i przestrzenne przyporządkowanie łuków zębowych szczęki i żuchwy do stawu skroniowo-żuchwowego.

Wszystkie stosowane współcześnie urządzenia do aksjografii wykorzystują kinematyczną technikę lokalizacji osi opartą na prostym założeniu, że wszystkie punkty rotującego ciała poruszają się wokół centrum jego rotacji. Wymusza to konieczność wykonywania pomiaru osi zawiasowej tylko w zakresie ruchu rotacyjnego żuchwy, bez uwzględnienia składowej translacyjnej wyrostków kłykciowych. Sytuacja taka możliwa jest tylko w początkowej fazie odwodzenia i przywodzenia żuchwy przy przeciętnym kącie rotacji  $15^\circ$  i 8-milimetrowym zakresie odstępów między brzegami siecznymi zębów przy uwzględnieniu wielkości pionowego nagryzu zębów siecznych [5]. Podczas ustalania osi zawiasowej najlepszym rozwiązaniem jest minimalne rozkłonowanie zębów przeciwstawnych, zapewniające najmniejszy błąd pomiaru. Warunek ten może być spełniony tylko przy zastosowaniu paraokluzyjnych elementów utrzymujących urządzenie lokalizujące oś.

Należy jednak pamiętać, że zarówno przy wyznaczaniu granicznej dotylnej pozycji osi zawiasowej żuchwy, jak i właściwej czynnościowej osi zawiasowej, wyniki analizy oraz ich powtarzalność są w znacznym stopniu zależne od stanu układu nerwowo-mięśniowego. Potwierdzają to rozbieżności torów odwodzenia i przywodzenia żuchwy, będące wynikiem zróżnicowanej aktywności mięśni. Uzasadniona wydaje się więc potrzeba równoczesnej rejestracji czynności elektrycznej mięśni biorących udział w realizacji ruchu [5, 6, 7].

Z kolei konieczność stosowania jednoczesnego z pomiarami aksjograficznymi badania sygnałów akustycznych w obrębie stawów skroniowo-żuchwowych jest podyktowana małą czułością rejestracji graficznej na występowanie określonych zaburzeń wewnątrzstawowych [8]. Badania doświadczalne dowiodły bowiem, iż tylko 30% przypadków klinicznie zauważalnych trzasków jest rejestrowana w aksjogramach. Niezwykle ważne jest więc stworzenie urządzenia diagnostycznego do kompleksowej oceny czynności całego układu narządu żucia, umożliwiającemu wczesne wdrożenie działań terapeutycznych.

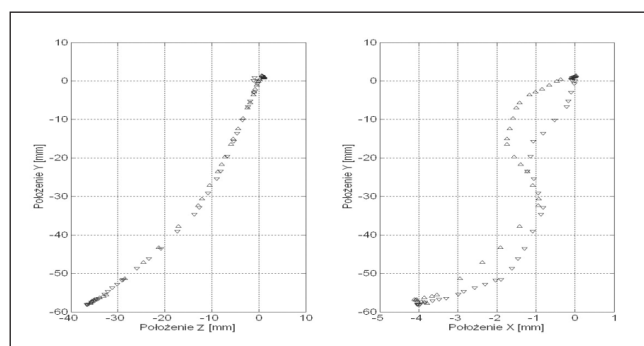
## Rejestracja i analiza ruchu żuchwy

Rejestracja ruchów żuchwy w znanych urządzeniach diagnostycznych odbywa się za pomocą wielopunktowego pomiaru odległości pomiędzy parami czujników, z których jeden jest zespolony z żuchwą (a konkretnie dolnymi zębami), a drugi umieszczony na nieruchomej części głowy. Do pomiaru odległości wykorzystuje się metody ultradźwiękowe lub sprężenia magnetyczne. Rozwiązania te mają kilka wad, z których wymienić należy przede wszystkim znaczny ciężar aparatury mocowanej do głowy, a zwłaszcza zębów pacjentów, co wpływa na naturalność wykonywanych ruchów. Zdaniem autorów, potrzebne do wyznaczenia trójwymiarowej trajektorii ruchu żuchwy dane można uzyskać w prostszy sposób, rejestrując synchronicznie za pomocą kamery wideo dwa lub trzy obrazy twarzy widzianej z przodu oraz prostopadłe obrazy boczne. Wystarczające jest śledzenie przez kamerę tylko pewnych wybranych punktów (znaczników), umieszczonych na ruchomej i nieruchomej częściach głowy. W eksperymencie, jako znaczniki ruchu zastosowano miniaturowe diody LED umieszczone na bardzo lekkim wysięgniku przymocowanym (zaciśniętym) na dolnych zębach oraz świecące w innym kolorze diody LED jako punkty odniesienia, umieszczone na opasce zakładanej na głowę (rys. 2).

Zastosowanie różnokolorowych znaczników umożliwia zautomatyzowanie procesu przetwarzania zarejestrowanego



Rys. 2 Rozmieszczenie znaczników - znacznik żuchwy (A) oraz znaczniki odniesienia: czołowy (B) i boczny (C)



Rys. 3 Wizualizacja trajektorii ruchu znacznika żuchwy podczas jej opuszczania i podnoszenia; po lewej stronie widok boczny ZY, po prawej stronie widok czołowy XY

obrazu wideo w celu pomiaru i wizualizacji trajektorii ruchu żuchwy w przestrzeni. W badaniach eksperymentalnych zastosowano kamerę wideo Creative Cam Optio AF przyłączonej do komputera PC oraz odpowiednio ustawione względem głowy i kamery zwierciadło (widoczne na rys. 2), w celu równoczesnej rejestracji dwóch rzutów: czołowego i boczego. W prosty sposób można wtedy wyznaczyć ruch znacznika żuchwy w płaszczyźnie czołowej XY oraz w płaszczyźnie bocznej ZY (rys. 3).

Położenie znacznika było rejestrowane w równych odstępach czasu, wynoszących ok. 33 ms (30 razy na sekundę), można zatem na podstawie zebranych wyników ocenić także dynamikę ruchu. Przetwarzania obrazu i wizualizacji wyników dokonano w środowisku programistycznym Matlab.

Planowane dalsze zwiększenie liczby obserwowanych znaczników pozwoli również na pomiar trajektorii wszystkich osi obrotu żuchwy, przy czym wymagać to będzie wprowadzenia dodatkowych danych o spoczynkowym położeniu osi obrotu i rozmiarach żuchwy. Dokładność pomiaru trajektorii ruchu żuchwy zależy przede wszystkim od rozdzielczości analizowanego obrazu wideo. W badaniach zastosowano kamerę o rozdzielczości 640 x 480 pikseli i szybkości 30 klatek na sekundę, pozwalającą uzyskać dokładność rejestracji znacznika świetlnego około 0,5 milimetra.

## Rejestracja i analiza sygnału akustycznego towarzyszącego ruchom żuchwy

Kolejnym źródłem informacji o stanie czynnościowym narządu żucia jest generowany podczas ruchu żuchwy sygnał akustyczny. Poprawne zarejestrowanie sygnału akustycznego generowanego przez narząd żucia nie jest zadaniem prostym. Powodem tego są małe amplitudy sygnału użytecznego, a z



drugiej strony - możliwe duże zakłócenia pochodzące od innych elementów. W trakcie badań do rejestracji sygnału akustycznego posłużył system, którego elementami stałymi był niskoszumowy przedwzmacniacz mikrofonowy (Millenia Media HV-3D), przetwornik analogowo-cyfrowy (Digidesign Digi002R, 24 bity/44,1 kHz) oraz komputer PC z oprogramowaniem do rejestracji sygnałów audio Digidesign ProTools 7.3 LE. Elementami zmiennymi były mikrofony oraz ich ustawienie. Próby przeprowadzono w następujących konfiguracjach (dla lewej i prawej strony):

- niskoszumowy studyjny mikrofon wielkomembranowy (Neumann TLM 103), ustawiony w odległości ok. 10 cm od stawu na wysokości ucha pacjenta;
- paluszkowy mikrofon pojemnościowy (Tonsil MCO53) wraz ze sprzęgaczem w postaci małej tulei, dociskany do skóry w rejonie ucha na linii łączącej go z nosem;
- stykowy przetwornik piezoelektryczny (Fishmann) umieszczony jak wyżej;
- miniaturowy mikrofon pojemnościowy (Sonion 8000) umieszczony centrycznie na sztywnym wsporniku, gwarantującym brak kontaktu ze skórą w bocznej części przewodu słuchowego zewnętrznego.

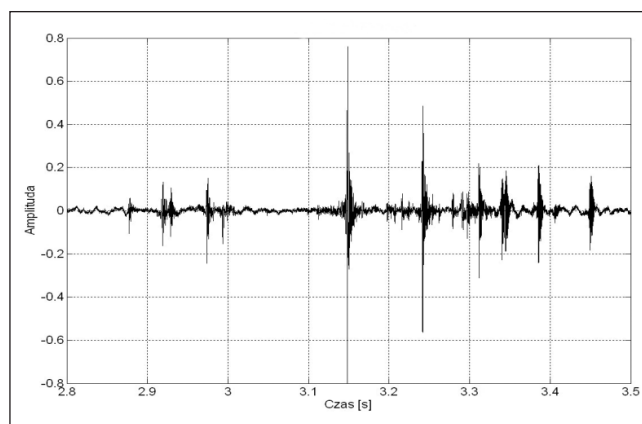
Wszystkie badania ze względu na zapewnienie niskiego poziomu zakłóceń z zewnątrz przeprowadzono w małej odizolowanej akustycznie komorze bezchowej o poziomie tła < 30 dB SPL. Najlepszej jakości sygnał zarejestrowano, stosując konfigurację a), gdyż dzięki niskiemu poziomowi szumów mikrofonu i przedwzmacniacza można było zastosować duże wzmocnienie (66 dB) i skompensować utratę sygnału spowodowaną dość słabym sprzężeniem mikrofonu ze źródłem. Metodę tę można uznać za referencyjną, lecz ze względu na wymagany bardzo niski poziom zakłóceń zewnętrznych raczej nie będzie można jej używać w zastosowaniu klinicznym. Całkowitym niepowodzeniem zakończyły się próby w konfiguracjach b) i c), gdyż w tych przypadkach - ze względu na stykowy charakter umieszczenia czujnika - poziom zakłóceń związany z ruchem skóry i mięśni w rejonie stawu był zbyt wysoki. Najbardziej obiecujące wyniki pod kątem zastosowania klinicznego dała natomiast konfiguracja d). Gorsze parametry mikrofonu (wyższe szumy, bardziej nierównomierna charakterystyka częstotliwościowa) są kompensowane lepszym sprzężeniem czujnika ze źródłem, co umożliwia stosowanie mniejszych wzmocnień w przedwzmacniaczu mikrofonowym i łagodzi wymagania dotyczące bardzo niskiego poziomu zakłóceń zewnętrznych. Zarejestrowany czynnościowy sygnał akustyczny narządu żucia jest generowany w wyniku tarcia powierzchni elementów stawu, które podczas rozwierania i zwierania wykonują wzajemne ruchy obrotowe i posuwiste. Sygnał ten można określić jako szumy, trzeszczenia, trzaski i stuki, a ich pojawianie się związane jest ściśle z fazą rozwierania i zwierania. Wszelkie dźwięki związane z ruchem zębów, języka i śliny są traktowane w tym przypadku jako sygnały zakłócające. Parametry akustycznych sygnałów "stawowych", takie jak amplituda czy widmo amplitudowe, zależą od trajektorii ruchu elementów stawu oraz stanu powierzchni trących. Przykładowy przebieg czasowy oraz jego widmo przedstawiono na rys. 4 i 5.

Na podstawie przeprowadzonych prób można stwierdzić, że powtarzalność wartości tych parametrów nie jest ścisła nawet dla danego pacjenta. Analiza statystyczna wielu odpowiedzi pozwoli znaleźć korelację między stanem funkcjonalnym narządu żucia a wielkościami związanymi z generowanym sygnałem akustycznym.

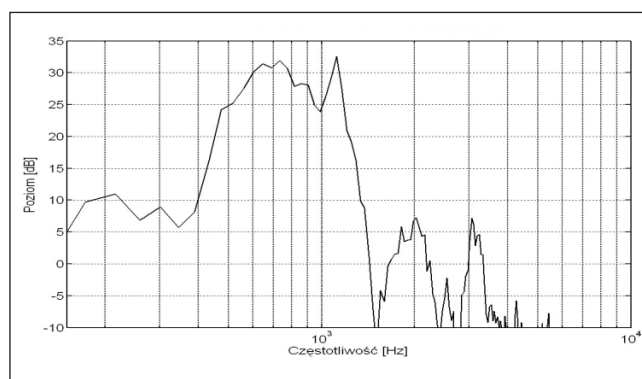
## Rejestracja i analiza sygnału EMG

Jak wspomniano, układem nadrzędnym i sterującym, odpowiedzialnym za czynność elementów biomechanicznych narządu żucia, jest system nerwowo-mięśniowy. Do pełnej, kompleksowej oceny stanu funkcjonalnego tego narządu istotne jest więc zastosowanie - oprócz innych technik pomiarowych - jednoczesnej rejestracji i analizy czynności elektrycznej mięśni, biorących udział w realizacji ruchu [6, 7].

Zapisy aktywności elektrycznej mięśni stanowią od wielu lat przedmiot zainteresowania elektromiografii (EMG), waż-



Rys. 4 Przykładowy przebieg czasowy sygnału akustycznego odpowiadający czynności żucia



Rys. 5 Widmo amplitudowe wybranego fragmentu sygnału akustycznego

nej dziedziny elektrofizjologii [9, 10]. Wyróżnia się przy tym elektromiografię elementarną (jednostkową), czyli analizę pracy jednostek motorycznych - stosowane są tu wkłuwane elektrody igłowe, oraz tzw. elektromiografię globalną, obejmującą cały mięsień; w tym przypadku badanie jest przeprowadzane nieinwazyjnie, z użyciem powierzchniowych elektrod mocowanych zewnętrznie na powierzchni skóry nad mięśniem.

W celu rejestracji i analizy biopotencjałów wytwarzanych przez mięśnie sterujące pracą elementów stawu zuchwowo-skroniowego Zastosowano powierzchniową technikę EMG z 8-kanałowym, dwubiegunowym odprowadzaniem sygnałów. Jako elektrody zastosowano żelowe elektrody kubkowe Ag/AgCl. Eksperymenty z wykorzystaniem wcześniej opracowanych w zespole wzmacniaczy ze wzmacniaczami wstępnymi pomiarowymi (m.in. do rejestracji biopotencjałów układu wzrokowego) wykazały ich pełną użyteczność także w badaniu sygnałów EMG. W fazie badań laboratoryjnych, a zatem przed zaprojektowaniem systemu pomiarowego, do akwizycji sygnałów EMG był wykorzystywany wielokanałowy moduł akwizycyjny DAQ firmy National Instruments NI USB-6251 współpracujący ze środowiskiem LabVIEW, o bardzo dobrych parametrach przetwarzania A/C. W dalszej obróbce zapisów EMG w celach diagnostycznych można zastosować analizę widmową oraz analizę histogramów.

W celu usprawnienia diagnostycznej interpretacji wyników uzyskanych różnymi technikami pomiarowymi opracowano specjalistyczną relacyjną bazę danych. Baza jest zbudowana z kilku relacji (tabel) i umożliwi łatwe administrowanie danymi pacjentów oraz wynikami badań.

## Wnioski

Proponowana kompleksowa metoda pomiaru parametrów ruchu (aksjografia) z równoczesną rejestracją sygnału aku-

stycznego i EMG umożliwia wszechstronną ocenę funkcjonowania narządu żucia. W szczególności nowatorskie zastosowanie kamery wideo i świecących znaczników upraszcza konstrukcję sprzętu, przenosząc część zadań pomiarowych na stronę oprogramowania komputerowego. Proponowana metoda może być tanim, wygodnym i dokładnym sposobem wyznaczania trajektorii ruchu żuchwy, z możliwością dalszego zwiększania precyzji pomiaru, ilości dostarczanych danych diagnostycznych do analizy stanu funkcjonalnego narządu żucia oraz wprowadzania nowych sposobów prezentacji wyników.

### Literatura

1. V. Ferrario, C. Sforza, A.J. Miani, G. Serrao, G. Tartaglia: *Open-close movements in the human temporomandibular joint: does a pure rotation around the intercondylar hinge axis exist?*, J. Oral Rehabilitation., vol. 23, 1996, s. 401-408.
2. N.D. Mohl: *Reliability and validity of diagnostic modalities for temporomandibular disorders*, Adv. Dent. Res., vol. 7, 1993, s. 113-119.
- 3] S. Miyawaki, Y. Tanimoto, M. Inoue, Y. Sugawara, T. Fujiki, T. Takano-Yamamoto: *Condylar motion in patients with reduced anterior disc displacement*, J. Dent. Res., vol. 80, 2001, s. 1430-1435.
4. A. Illyés, R.M. Kiss: *Method for determining the spatial position of the shoulder with ultrasound-based motion analyzer*, J. Electromyogr. Kinesiol., vol. 16, 2006, s. 79-88.
5. A. Michelotti, M. Farella, S. Vollaro, R. Martina: *Mandibular rest position and electrical activity of the masticatory muscles*, J. Prosthet. Dent., vol. 78, 1997, s. 48-53.
6. R. Acosta-Ortiz, J.K. Schulte, B. Sparks, W. Marsh: *Prediction of different mandibular activities by EMG signal levels*, J. Oral Rehabil., vol. 31, 2004, s. 399-405.
7. R. Kerstein: *Combining technologies: A computerized occlusal analysis system synchronized with a computerized electromyography system*, J. Craniomandib. Pract., vol. 22, 2004, s. 96-109.
8. C.G. Widmer: *Temporomandibular joint sounds: a critique of techniques for recording and analysis*, J. Craniomandib. Disord., vol. 3, 1989, s. 213-217.
9. P. Augustyniak: *Przetwarzanie sygnałów elektrodiagnostycznych*, Uczelniane Wydawnictwo Naukowo-Dydaktyczne AGH, Kraków 2001.
10. J.D. Bronzino (ed.): *Biomedical Engineering Handbook*, CRC Press, IEEE Press, Boca Raton FL, USA 1995.

otrzymano / received: 02.09.2008 r.  
zaakceptowano / accepted: 15.10.2008 r.