

Specyfika analizy sygnałów biomedycznych na przykładzie słuchowych potencjałów wywołanych

Jarosław Bułka, Andrzej Izworski

AGH Akademia Górniczo Hutnicza, Wydział EAIiE, Katedra Automatyki

Streszczenie: Analiza procesów zachodzących w żywym organizmie z uwagi na jego właściwości odbiega od analizy technicznych układów dynamicznych. Również metody akwizycji i wstępnego przetwarzania sygnałów biomedycznych (generowanych przez organizm) oraz ich przetwarzanie wymaga, aby sygnały te były traktowane inaczej niż sygnały zbierane z urządzeń technicznych. W pracy przedstawiono specyfikę przetwarzania i analizy sygnałów biomedycznych na przykładzie przebiegów słuchowych potencjałów wywołanych pnia mózgu – ABR (Auditory Brainstem Response). Są one wyrazem aktywności elektrycznej nerwu słuchowego i dróg słuchowych w pniu mózgu, jaka powstaje na skutek stymulacji akustycznej. Słuchowe potencjały wywołane pnia mózgu stosowane są w praktyce klinicznej przede wszystkim do obiektywnej oceny proggu słyszenia oraz w diagnostyce różnicowej zaburzeń słuchu.

Słowa kluczowe: słuchowe potencjały wywołane, sygnały biologiczne, cyfrowe przetwarzanie sygnałów, klasyfikacja

1. Wprowadzenie

Systemy wspomaganie diagnostyki medycznej bazujące na akwizycji, analizie i rozpoznawaniu sygnałów biomedycznych znajdują coraz szersze zastosowanie w praktyce klinicznej. Stale doskonalone są metody akwizycji tych sygnałów, a dostępność profesjonalnych urządzeń jest duża. Niestety sam prawidłowy pomiar sygnałów nie zapewnia jeszcze uzyskania poprawnych wyników analizy i rozpoznawania. Wynika to głównie ze specyfiki samych sygnałów biomedycznych, na ogół zaszumionych i losowo zakłócanych artefaktami pochodzenia głównie biologicznego. Analizowane sygnały są najczęściej skorelowane ze sobą, niebagatelne stają się zatem wykrycie właściwych reguł analizy – nie istnieją bowiem ogólne metody rozpoznawania dające się stosować w różnych obszarach wspomaganie diagnostyki medycznej, co – łącznie rozpatrywane – prowadzi bardzo często do ścisłego dostosowania wykorzystywanych metod do specyfiki jedynie konkretnych rozważanych zadań. Dodatkowo, w procesie podlegającym diagnozowaniu powstaje całe obszerne i różnorodne pole zjawiskowe, zawierające m.in. informacje przydatne dla potrzeb diagnozy, ale także mające komponenty całkowicie niezwiązane z diagnozowanym procesem. Całkowite oddzielenie jednych od drugich na wstępnym etapie, kiedy sygnał pochodzący od pacjenta jest pozyski-

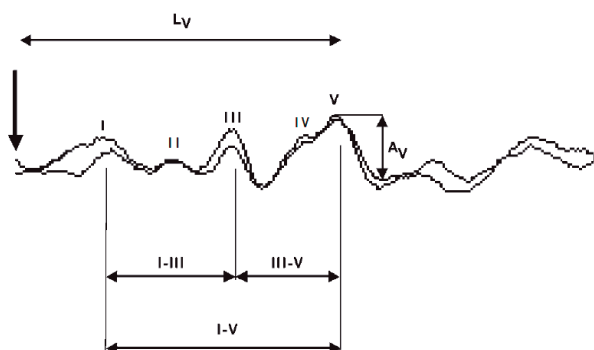
wany i rejestrowany, okazuje się z reguły niemożliwe. W związku z tym w systemach diagnostycznych mierzy się i rejestruje różnorakie zjawiska fizyczne, będące później podstawą decyzji podejmowanej przez lekarza. Jednak na to, by proces podejmowania decyzji diagnostycznych był sprawny i efektywny – trzeba koniecznie poddać „surowe” sygnały celowemu i często bardzo wyrafinowanemu przetwarzaniu, związanemu z wydobywaniem wspomnianych cech. Olbrzymią rolę odgrywa też zmienność indywidualna – każdy organizm charakteryzuje się specyficznym dla siebie progiem czułości, czasami reakcji itp. W ograniczonym zakresie między organizmami ludzkimi zachodzą różnice w anatomii i fizjologii. Wszystko to sprawia, że bardzo trudna jest skalowalność modeli, a próby uogólniania modeli identyfikowanych na pojedynczych pacjentach lub niewielkich grupach pacjentów są ryzykowne. Również przenoszenie zależności wykrywanych na dużych populacjach nie muszą się przenosić na pojedyncze organizmy.

Zarysowane problemy znacząco utrudniają możliwość oceny wartości sygnałów i ich stanu oraz wymagają adaptacji metod stosowanych w analizie obiektów technicznych. W pracy zarysowano specyfikę analizy sygnałów biomedycznych wykorzystując jako przykład sygnał słuchowych potencjałów wywołanych pnia mózgu – ABR (Auditory Brainstem Response).

2. Słuchowe potencjały wywołane – przykład sygnału biomedycznego

Po raz pierwszy potencjały mózgowe człowieka zostały zarejestrowane i opisane przez Hansa Bergera w 1924 r. Odkryto wówczas spontaniczną aktywność mózgu rejestrowaną w postaci zmian potencjałów z powierzchni czaszki (zjawisko to dziś jest wykorzystywane w elektroencefalografii). W 1934 r. przedstawiono możliwość zarejestrowania charakterystycznych zmian potencjałów elektrycznych wywołanych bodźcem zewnętrznym. Uzyskały one nazwę potencjałów wywołanych, a w przypadku bodźca akustycznego słuchowych potencjałów wywołanych. Dzięki opracowaniu technik rejestracji na powierzchni głowy słuchowych potencjałów wywołanych, będących pochodną procesów bioelektrycznych przebiegających na poziomie pnia mózgu i kory słuchowej, możliwe stało się skonstruowanie obiektywnych metod diagnostycznych i badawczych pozwalających na kompleksową ocenę funkcjonowania całego systemu słuchowego.

Typowy przebieg słuchowego potencjału wywołanego składa się z pięciu do siedmiu fal, oznaczanych cyframi rzymskimi (I-VII). Przykładowy przebieg ABR przedstawiony został na rys. 1.



Rys. 1. Przebiegi słuchowych potencjałów wywołanych prądem mózgu z zaznaczonymi falami i latencjami (źródło: [7])

Fig. 1. Auditory Brainstem Responses with waves and latencies marked (source: [7])

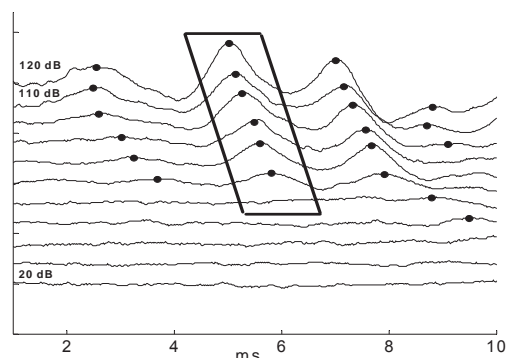
Przebieg ten wydobywany jest z sygnału EEG metodą synchronicznego uśredniania i jest rejestrowany w ciągu 10 lub 12 ms od chwili zadziałania bodźca akustycznego. W medycznej ocenie potencjału wywołanego bierze się pod uwagę głównie czas utajenia fali V oraz odstęp I-V. Duże znaczenie diagnostyczne ma także brak któregoś załamka, zwłaszcza fali V, zaś pomiar ilorazu wartości amplitud fal V i I stanowi ważny wskaźnik przy ocenie prawidłowości procesów zachodzących w nerwowej części systemu słuchowego.

Jednym z podstawowych problemów w automatycznej diagnostyce ABR jest wykrycie i prawidłowe oznaczenie poszczególnych fal. Ze względu na dużą zmienność osobniczą, wysoki poziom szumów niskoczęstotliwościowych oraz występowanie artefaktów mięśniowych, zadanie oznaczenia danej fali staje się skomplikowane. Największe trudności występują przy małej amplitudzie sygnału pobudzającego (<50 dB). Bardzo łatwo wówczas pomylić rzeczywistą falę z szumem lub przypadkowym artefaktem. Należy wyraźnie stwierdzić, że oznaczenie fal na podstawie pojedynczej rejestracji przy małym natężeniu bodźca jest obciążone dużym błędem, czasami wręcz niemożliwe. Identyfikacja fal staje się łatwiejsza, przy kontekstowej analizie wielu zapisów wykonanych przy stopniowo zmniejszonym natężeniu bodźca. Wnioskowanie metodą kontekstową korzysta bowiem z informacji zawartej w sąsiednich zapisach i charakteryzuje się znacznie większą odpornością.

3. Wstępne przetwarzanie sygnału

Przed rozpoczęciem badania na podstawie rejestracji sygnału przy braku pobudzenia estymuje się wariancję zakłóceń. Po wykonaniu badania, dane pomiarowe poddawane są procesowi wstępnej obróbki. Usuwana jest wartość średnia i trend liniowy oraz wykonuje się filtrację dolnoprzepustową. Otrzymane dane poddaje się skalowaniu. Następnie, na podstawie dopasowania wielomianów

piątego stopnia w przedziałach, uzyskuje się dwukrotnie różniczkowaną aproksymację sygnału ABR.



Rys. 2. Przykładowy zapis ABR wraz z istotnymi statystycznie maksimumami. W ramce oznaczono grupę punktów odpowiadającą trzeciej fali

Fig. 2. Example of Auditory Brainstem Responses signal recording with important maximums marked. Group of points in line with third wave are marked in the frame

Analiza pierwszej i drugiej pochodnej aproksymacji pozwala wyznaczyć maksima sygnału.

Szczegóły zastosowanych algorytmów przedstawiono w pracach [1-5, 9, 10]. Wynik przykładowej analizy pokazano na rys. 2.

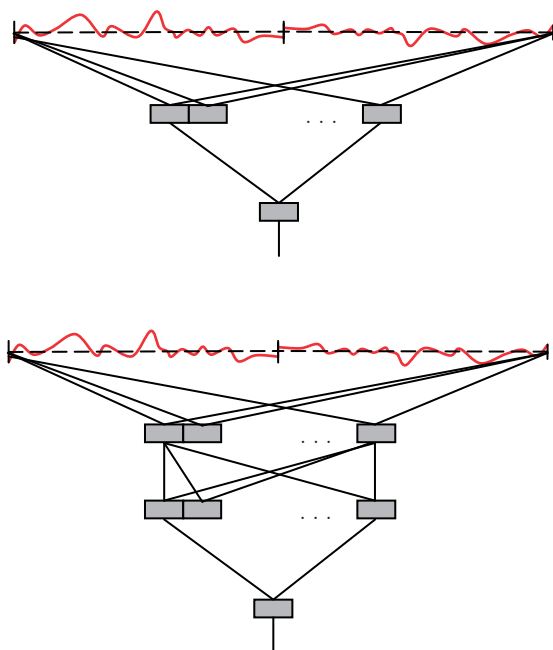
4. Analiza i klasyfikacja

Do automatycznego rozpoznawania V fali wykorzystano sztuczne sieci neuronowe. Dzięki procesowi uczenia sieci te mogą dostosowywać swoje działanie do specyfiki konkretnych zadań, a równocześnie ich obsługa jest bardzo prosta i sprowadza się do dostarczenia systemowi zbioru uczącego, pokazującego jak wyglądają przykładowe poprawnie przeanalizowane lub prawidłowo rozpoznane próbki sygnałów akustycznych.

W zadaniu znalezienia optymalnej struktury sieci neuronowej, pozwalającej na uwzględnienie informacji kontekstowej podczas automatycznego rozpoznawania sygnałów potencjałów słuchowych zastosowano sieci neuronowe o pewnych z góry ustalonych właściwościach. Po pierwsze zdecydowano, że będą to wyłącznie sieci uczone metodą wstecznej propagacji błędów. Następnie zdecydowano (i decyzji tej nie modyfikowano podczas badań), że neurony sieci będą miały unipolarną, sigmoidalną funkcję aktywacji. Założono także, że sieci neuronowe będą zawierały jedną lub dwie warstwy neuronów ukrytych. W materiale uczącym i w materiale testowym rozpatrywano klasę sygnałów, w których fala V jest obecna i klasę, w której jej nie ma, co odpowiadało wartościom 1 oraz 0 zwracanym przez neuron wyjściowy sieci.

W celu uwidocznienia (i oceny) efektów wprowadzanych przez badane nietypowe architektury sieci neuronowych dostosowanych do analizy i automatycznej klasyfikacji potencjałów słuchowych, potrzebne były wyniki stanowiące punkt odniesienia. W charakterze takich wyników bazowych wykorzystano wyniki uzyskane w trakcie

wcześniejszych badań ukierunkowanych na rozpoznawanie pojedynczych sygnałów przez sztuczne sieci neuronowe.



Rys. 3. Sieci neuronowe dwu i trójwarstwowa, połączenia między neuronami wg reguły „każdy z każdym”, na wejście sieci podawane są pary sygnałów

Fig. 3. Two- and three layers neural networks used in ABR analysis, connections between neurons are made according to peer-to-peer rule, to input pairs of signals are given

Najprostsza architektura (rys. 3), która umożliwia uwzględnienie kontekstu w trakcie rozpoznawaniu sygnałów słuchowej odpowiedzi wywołanej to sieć neuronowa, na której wejście podawane są dwa kolejne sygnały (czyli wektory złożone z wartości kolejnych próbek czasowych rozważanych sygnałów, co powoduje, że rozważane sieci operują łącznie wektorem wejściowym o rozmiarach 200 punktów). Badano sieci posiadające jedną bądź dwie warstwy ukryte, z pełnym modelem połączeń między kolejnymi warstwami neuronów (neurony są łączone na zasadzie każdy z każdym). Rozważane architektury odpowiadały zatem strukturze 200-n-1 lub 200-n-m-1.

Opisaną architekturę sieci próbowano następnie zmodyfikować w taki sposób, żeby pierwsza warstwa ukryta była podzielona na dwie części, a na każdą z nich były osobno podawane dwa sygnały składowe wektora wejściowego. Dzięki temu rozdzielona warstwa neuronów warstwy ukrytej przetwarza wstępnie sygnał rozpoznawany oraz jego sygnał kontekstowy, pracując niezależnie od siebie.

Odejście od klasycznej sieci typu MLP i zastosowanie kontekstu spowodowało, że postawione zadanie znalazło znacznie bardziej satysfakcjonujące rozwiązanie niż w przypadku, kiedy kontekst nie był uwzględniany. Sieci neuronowe wykorzystujące dane kontekstowe, które w wyniku procesu uczenia najlepiej klasyfikowały sygnały słuchowych odpowiedzi wywołanych, uzyskiwały ponad 90 % prawidłowych rozpoznań.

5. Podsumowanie

Rejestracja i analiza potencjałów wywołanych pozwala na obiektywną ocenę funkcji zarówno części mechanicznej systemu słuchowego (zwłaszcza ucha środkowego i wewnętrznego), jak i na analizę procesów zachodzących w poszczególnych piętrach nerwowej części tego systemu. Badania te obecnie są szeroko wykorzystywane w klinicznych ocenach narządu słuchu, a postęp technik rejestracji i analizy słuchowych potencjałów wywołanych spowoduje zapewne jeszcze szersze upowszechnienie się tej techniki także w badaniach ambulatoryjnych.

Opracowanie praktycznego algorytmu i detektora fali V i jej progu ma ogromne znaczenie dla osób z niewielkim doświadczeniem. W ostatnich latach liczba ośrodków wczesnej diagnostyki audiologicznej, w których wykorzystuje się słuchowe potencjały wywołane pnia mózgu wzrosła kilkakrotnie.

Bibliografia

1. Bania P., Bułka J., Izworski A., Tadeusiewicz R., Wochlik I.: „Automatic, mobile system for evaluation of human hearing abilities” [w:] *Proc. of the 2004 IEEE International Conference on Computational Intelligence for Measurement Systems and Applications*. Boston, USA, 2004, 17–20.
2. Bania P., Bułka J., Izworski A., Wochlik I.: „Application of RBF-type neural network to modeling of auditory brainstem response signal registration” [w:] *SCI 2004: The 8th World Multi-Conference on Systemics, Cybernetics and Informatics*. Orlando, USA, 2004, 199–202.
3. Bułka J., Wochlik I., Izworski A., Bania P.: „Determination of diagnostic parameters in the BAEP signal analysis”. *SCI 2002: The 6th World Multi-Conference on Systemics, Cybernetics and Informatics*. Orlando, USA, 2002, 391–394.
4. Bułka J., Wochlik I., Kowal J., Bania P., Izworski A.: „Determination of primary features of ABR signals in intelligent system aiding the auditory system diagnosis” [w:] *Advances in systems theory, mathematical methods and applications* Zemliak A., Mastorakis N.E. (red.). WSEAS Press, 2002, 163–167.
5. Bułka J., Izworski A., Wochlik I.: *Wykorzystanie słuchowych potencjałów wywołanych z pnia mózgu w diagnostyce systemu słuchowego człowieka*. [w:] *Podstawy inżynierii biomedycznej*, red.: Tadeusiewicz R., Augustyniak P., Wydawnictwa Naukowe AGH, Kraków 2009, t. 1, 205–214.
6. Kochanek K.: *Ocena progu słyszenia za pomocą słuchowych potencjałów wywołanych pnia mózgu w zakresie częstotliwości 500–4000 Hz*, Wydawnictwa Akademii Medycznej, Warszawa 2000.
7. Kochanek K.: *Zastosowanie słuchowych potencjałów wywołanych pnia mózgu w diagnostyce zaburzeń słuchu typu pozaślimakowego*, „Otorinolaryngologia”, rocznik. 13, nr 1, 2002, 167–172.
8. Tadeusiewicz R.: *Sieci neuronowe*. Akademicka Oficyna Wydawnicza, Warszawa 1993.

9. Wochlik I., Bułka J., Tadeusiewicz R., Bania P., Izvorski A.: „Determination of diagnostic parameters in an automated system for ABR signal analysis” [w:] *Proceedings of the international conference on Mathematics and Engineering Techniques in Medicine and Biological Sciences*, Las Vegas, Nevada, USA June 24–27, 2002, 391–394.
10. Izvorski A., Tadeusiewicz R., Paślowski A.: *The Utilisation of Context Signals in the Analysis of ABR Potentials by Application of Neural Networks*, „Lecture Notes in Artificial Intelligence”, Springer, no. 1810, 2000, 195–202.
11. Strzelczyk P., Wochlik I., Tadeusiewicz R., Izvorski A., Bułka J.: *Telemedical system in evaluation of auditory brainstem responses and support of diagnosis*, „Lecture Notes in Computer Science”. Springer, 2010, 21–28. ■

Specificity of analysis of biomedical signals using brainstem auditory evoked potentials as the example

Abstract: In view of its qualities analysis of processes occurring inside living organism is different from analysis of dynamical systems. Also signal acquisition and preprocessing methods used with biomedical signals (generated by organism) and their processing requires that they should be treated differently than signals gathered from technical devices. In this research specificity of processing and analysis of biomedical signals using Auditory Brainstem Responses (ABR) as the example is introduced. These responses are indicative of acoustic nerve and tracts electrical activity in brain stem, which came into being as the result of acoustic stimulation. Auditory Brainstem Responses are used in clinical practice mainly to objectively estimate hearing

are used in clinical practice mainly to objectively estimate hearing threshold and in differential diagnosis of hearing disorders.

Keywords: brainstem auditory evoked potentials, biological signals, digital signal processing, classification

dr inż. Jarosław Bułka

Biocybernetyk, absolwent Wydziału Inżynierii Mechanicznej i Robotyki Akademii Górniczo-Hutniczej, adiunkt w Laboratorium Biocybernetyki Katedry Automatyki Wydziału Elektrotechniki Automatyki Informatyki i Elektroniki Akademii Górniczo-Hutniczej. Autor ponad 40 publikacji z zakresu przetwarzania sygnałów biomedycznych, wykorzystania sieci neuronowych w diagnostyce medycznej oraz telemedycyny i systemów informatycznych wspierających diagnostykę medyczną. Współorganizator wielu konferencji branżowych. Od 2001 r. sekretarz Komisji Akredytacyjnej Uczelni Technicznych.



e-mail: bulek@agh.edu.pl

dr inż. Andrzej Izvorski

Biocybernetyk, specjalista w zakresie sztucznej inteligencji i inżynierii biomedycznej, adiunkt w Laboratorium Biocybernetyki Katedry Automatyki Wydziału Elektrotechniki Automatyki Informatyki i Elektroniki Akademii Górniczo-Hutniczej. Autor ponad 150 publikacji z zakresu przetwarzania sygnałów biomedycznych, wykorzystania sieci neuronowych w diagnostyce medycznej oraz telemedycyny i systemów informatycznych wspierających diagnostykę medyczną.



e-mail: izwa@agh.edu.pl