

Problem Burst Suppression w monitorowaniu i diagnostyce mózgu wcześniaków

Streszczenie. W pracy przedstawiono dużą przydatność kliniczną przekształcenia sygnału EEG w silnie skompresowany zapis CFM. Bardzo dużo informacji, które tworzy zapis EEG (setki próbek na sekundę na każdy kanał) wymagają do interpretacji specjalistycznej wiedzy, w aparacie CFM zostaje zamienione w zwarty w czasie i łatwy do interpretacji dla neonatologa zapis. Przydatność zapisu CFM może być różnorodna w zależności od użytego algorytmu transformacji. W niniejszej pracy zaprezentowano i przetestowano różne algorytmy przekształcające EEG w CFM i badamy ich istotne relacje z konkretnymi stanami klinicznymi, zasygnalizowano znaczenie problemu Burst Suppression w badaniach i diagnostyce wcześniaków.

Abstract. The paper presents the application of the transforming EEG signal into highly compressed CFM record in clinical useful. A lot of information created by EEG record and which require interpreting with specialist knowledge are transformed into time compressed record easy to interpret by a neonatologist. The usefulness of CFM record might differ depending on the used transformation algorithm. This paper presents monitoring and brain diagnostics of premature infants. It also tests various EEG to CFM algorithms and studies their relations with concrete clinical cases, burst suppression problems in CFM are also signaled. (**Problem Burst Suppression in monitoring and brain diagnostics of premature infants**)

Słowa kluczowe: elektroencefalografia, monitoring i diagnostyka mózgu, CFM, aEEG

Keywords: electroencephalography, monitoring and Brain diagnostic, CFM - □ cerebral function monitor, signal processing method, aEEG

Wprowadzenie

Wcześniaki, zwłaszcza urodzone przed 32 tygodniem ciąży, mają bardzo wysokie wskaźniki zachorowalności i umieralności oraz częste zaburzenia w rozwoju psychoruchowym w dalszym okresie życia. W tej grupie dzieci w okresie noworodkowym obecne są często objawy krwawienia do ośrodkowego układu nerwowego oraz zmiany leukomalacyjne.

Zaburzenia przepływu pojawiające się w pierwszych dobach życia noworodków przedwcześnie urodzonych wywołują pęknięcie naczyń i wyciek krwi pod wyściółkę lub do samych komórek i miąższu mózgu. Późnymi następstwami krwawienia może być mózgowy porażenie dziecięce, padaczka lub uszkodzenia słuchu i wzroku [8]. Leukomalacja okołokomorowa występuje głównie u noworodków przed 34 tygodniem ciąży. Cechuje się uszkodzeniem istoty białej mózgu.

Kolejnym istotnym problemem klinicznym u noworodków przedwcześnie urodzonych jest przetrwały przewod tętniczy (PDA). Wywołuje on wzrost ryzyka występowania innych powikłań jak martwice zapalenia jelit, upośledzenie funkcji nerek oraz krwawienie dokomorowe. Z tego względu PDA jest istotnym czynnikiem ryzyka zgonu i ciężkich powikłań neurologicznych u noworodków [3]. Ze względu na delikatną budowę, wcześniak jest narażony w pierwszych dobach życia na trwałe uszkodzenia ośrodkowego układu nerwowego, niewydolność oddechową, niewydolność układu krążenia oraz zakażenia. Powyższe problemy prowadzą do uszkodzenia funkcji ośrodkowego układu nerwowego (OUN) i wymagają intensywnego nadzoru oraz terapii.

Monitoring i diagnostyka

Jednym z podstawowych sposobów monitorowania mózgu jest EEG – jest to uznana metoda diagnostyczna w neonatologii. Umożliwia okresowe monitorowanie funkcji ośrodkowego układu nerwowego, pozwalające na określenie jego dojrzałości lub stopnia uszkodzenia. Klasyczny zapis EEG jest trudny do interpretacji i wymaga udziału lekarza specjalisty oraz przeszkolonego technika wykonującego badanie. Ze względu na trudności w utrzymaniu prawidłowego kontaktu oraz położenia elektrod przez kilka godzin lub dni ograniczona jest również możliwość długotrwałego monitorowania funkcji mózgu. W warunkach intensywnej terapii zapewnienie prawidłowego kontaktu

dużej liczby elektrod ze skórą pacjenta jest bardzo trudne. Powyższe przeszkody i ograniczenia klasycznego EEG są w dużej mierze zmniejszone w metodzie CFM (*ang.* Cerebral Function Monitor), inaczej zwaną elektroencefalografią zintegrowaną amplitudowo (*ang.* amplitude integrated EEG). Jest ona obok spektroskopii w bliskiej podczerwieni jednym z najczęściej stosowanych sposobów bezpośredniego, nieinwazyjnego i ciągłego monitorowania ośrodkowego układu nerwowego noworodków.

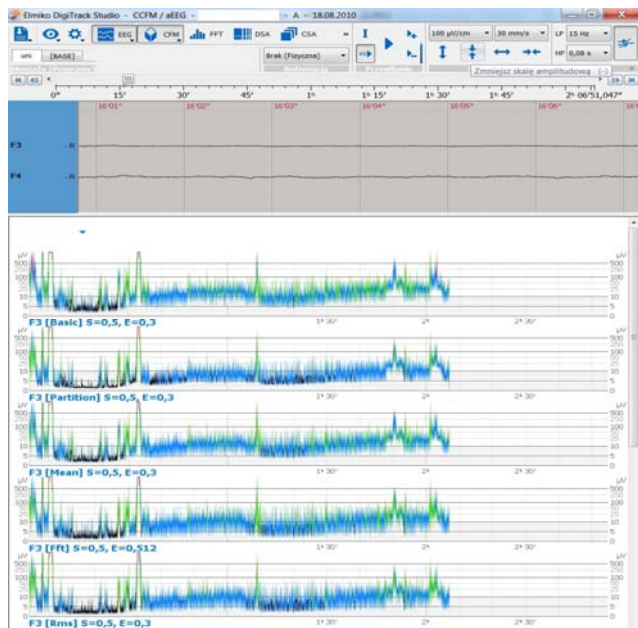
Monitorowanie stanu zdrowia wcześniaków i noworodków, a zwłaszcza monitorowanie mózgu, ma na celu zwiększenie ich przeżywalności i uniknięcie późniejszych powikłań. Wskazaniem do tego typu diagnostyki są ocena funkcji OUN, kwalifikacja do rozpoczęcia leczenia hipotermii i monitorowanie w trakcie hipotermii, drgawki oraz efekty leczenia drgawek, podejrzenie drgawek, wcześniactwo - zalecane jest monitorowanie pacjentów z masą ciała poniżej 1500 g, niedotlenienie okołoporodowe, monitorowanie rozwoju, ocena akceleracji zapisu, zapalenie opon mózgowo - rdzeniowych (mogą być drgawki), wodogłowie (podejrzenie drgawek, choć pod wpływem leków może ich nie być widać klinicznie), ciężkie choroby wirusowe (cytomegalia, toksoplazmoza) [2,3].

W przypadku długotrwałego monitorowania przy pomocy CFM używa się standardowo od dwóch do czterech elektrod aktywnych. Zmniejszenie ilości elektrod w stosunku do standardowego EEG pozwala na znacznie szybszą ich instalację i ułatwia utrzymanie poprawnej impedancji kontaktu skóra-elektroda, od której bezpośrednio zależy jakość rejestrowanego sygnału, oraz bezbłądność interpretacji sygnału przez lekarza. CFM stanowi uproszczony i przetworzony zapis klasycznego EEG, przedstawiony po odpowiedniej transformacji i analizie matematycznej, w postaci trendu sygnału. Pokazuje wielogodzinny zapis aktywności mózgu w sposób zbiorczy, co pozwala na ocenę długoterminową stanu OUN i z powodzeniem może być użyteczny dla neonatologów na oddziałach dziecięcych bez konieczności konsultacji neurologa. W prostych przypadkach pozwala uzyskać przydatne informacje przez personel pielęgniarski. Metoda ta pozwala również na łatwe porównywanie pracy poszczególnych półkul co jest istotne w okresie wczesnego rozwoju mózgu. Głównym obszarem zainteresowań w trakcie monitoringu CFM pozostają granice rejonów

ukrwienia tętnicy mózgowej przedniej, środkowej i tylnej [2] gdyż w tych właśnie strefach występuje największe prawdopodobieństwo niedokrwienia [5,6]. Elektrody pomiarowe, zgodne z systemem „10 - 20” [9], umieszcza się głównie w punktach P3, P4 dla badań dwukanalowych oraz dodatkowo w punktach F3, F4 w przypadku badań cztero-kanalowych. Czasem ze względu na stan dziecka zamienia się w badaniu dwukanalowym elektrody ciemieniowe na frontalne.

Prezentowane w niniejszej pracy obrazy z aparatu CFM składają się z trzech głównych obszarów. W obszarze górnym ustawiamy parametry prezentacji i analizy sygnałów. Dostarcza on informacji o podstawie czasu prezentowanego sygnału w oknie EEG i jego wzmocnieniu. W obszarze tym przedstawiono również własności filtrów jakim poddany jest sygnał przetransformowany w CFM. Domyślny standard CFM to filtry: LP = 15 Hz i HP = 2 Hz (0,08 s), które są bardzo łagodnymi filtrami pierwszego rzędu. Aktywny jest również filtr sieciowy pasmowo-zaporowy 50 ± 60 Hz.

Poniżej obszaru ustawień znajduje się okno ukazujące sygnał EEG. Jest on wyświetlany zgodnie z oznaczoną wcześniej ustawieniami wzmocnienia, stałej czasowej oraz filtrów. Z lewej jego strony znajduje się opis wyświetlanych kanałów wraz z odniesieniem do używanej referencji. W górnej części okna po lewej stronie pionowych znaczników sekundowych opisany jest dokładny czas danej chwili. Na Rys. 1 przedstawiono zapis EEG zarejestrowany w 1 dobie życia wcześniaka urodzonego w 32 tygodniu ciąży z krwawieniem dokomorowym II stopnia - masa urodzeniowa 1030g.



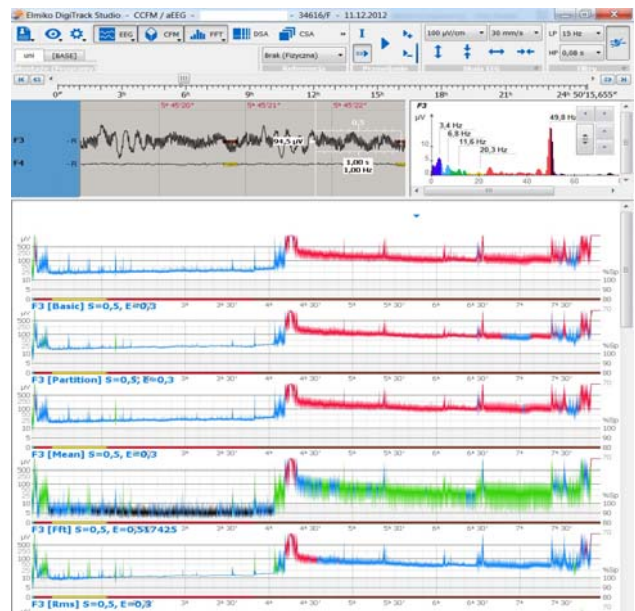
Rys. 1. Porównanie algorytmów CFM - na krzywych EEG widać sygnał ciągle niskonapięciowy (depresja) na obu odprowadzeniach. Algorytm Partition zaznacza depresję znacznie silniej choć zaniża jej wartość

W przypadku rysunków 2 ÷ 5, na sygnale można zauważyć kolorowe prostokąty odzwierciedlające wartość impedancji kontaktu elektroda – skóra zmierzona w danej chwili czasowej. Prezentacja wartości impedancji bardzo ułatwia lekarzowi ocenę kliniczną zapisu. Na rysunkach 2 ÷ 5 można również zauważyć tzw. „linijkę”. Jest to softwarowe narzędzie pomiarowe pozwalające określić chwilową wartość amplitudy p-p oraz dominujących częstotliwości w wybranym fragmencie badania. Na dolnej części znajduje się okno CFM. Jest ono podzielone na sekcje prezentujące trend sygnału w kolejnych kanałach. Trend CFM liczony jest

za pomocą algorytmów zastosowanych przy transformacji. Bardzo istotnym elementem rysowania trendu jest klasyfikacja kolorystyczna danej próbki CFM. Kolory związane są z głównymi stanami klinicznymi. Kolor czarny oznacza depresję sygnału (stan poniżej 5 µV lub 10 µV - według różnych źródeł). Kolor zielony związany jest z Burst Suppression, który pojawia się w momencie gdy amplituda sygnału wypełnia zakres od 10 do 65 µV. Kolor czerwony sygnalizuje, że sygnał nie spada poniżej 50 µV - stan ten jest nazywany Epileptic Like Activity (EPI). Zapis niebieski jest przebiegiem prawidłowym - wtedy sygnał nie wykracza poza postawione wcześniej warunki. Poniżej każdego wykresu trendu znajduje się nazwa reprezentowanego kanału, zastosowany algorytm, wielkość próbki CFM i długość epoki używanej w trakcie obliczeń. Wartość próbki CFM wyrażona w µV jest prezentowana na osi pionowej w skali semilogarytmicznej - na początku przedziału od 0 do 10 µV jest skala liniowa a powyżej logarytmiczna. Dla CFM jest to bardzo charakterystyczny sposób prezentacji danych podkreślający ważność informacji o spadku aktywności mózgu poniżej 10 µV (czyli depresję). W przypadku sygnałów z Rys. 3, 4 i 5 każdy trend CFM jest uzupełniony o trend saturacji krwi (krzywa fioletowa) i pulsu (krzywa szara) badanego dziecka. Okno EEG jest zsynchronizowane z miejscem wskazywanym w oknie CFM przez niebieską strzałkę widoczną nad wykresami trendu.

Do akwizycji sygnału w przedstawionych badaniach użyto pięciokanalowej głowicy typu 0x39B produkcji firmy Elmiko. Częstotliwość próbkowania głowicy wynosiła 500 Hz a prezentowany sygnał został poddany procesowi decymacji do 250 Hz.

Na rysunku 2 przedstawiono zapis CFM dla następującego przypadku klinicznego: noworodek donoszony, przyjęty w czwartym tygodniu życia z powodu zapalenia opon mózgowo-rdzeniowych oraz mózgu, przebieg kliniczny zakażenia bardzo ciężki z obrzędem mózgu i martwicą rozplywną mózgu; ostatecznie pojawiło się skrajne wodogłowie z bardzo złym rokowaniem co do prawidłowego rozwoju. Po zakażeniu dziecko prawdopodobnie pozostanie niewidome i głuche.



Rys. 2. Porównanie algorytmów CFM - kanał (F3) ewidentnie zaszumiony (wysoka impedancja). Porównanie z drugim kanałem (F4) oraz silniejsza filtracja pokazały że jedynie algorytm FFT poradził z zakłóceniami i utworzył dobry zapis CFM. Po prawej stronie EEG widać spektrogram FFT, gdzie wyraźnie dominują zakłócenia sieciowe

Praktyka kliniczna wskazuje że przekształcenie EEG w zapis CFM jest bardzo przydatne. Wskazuje również, że metoda ta może dostarczyć jeszcze więcej informacji, dlatego powinna być rozwijana oraz adaptowana do różnych okoliczności klinicznych (patologii). Niestety nie jest kwestią jednoznaczną w jaki sposób wyznaczymy w określonym przedziale czasu, zwanym próbką CFM, jednej wartości, określającej reprezentatywny poziom aktywności mózgu. Można zrobić to na wiele sposobów. Pomocne tu będzie przetestowanie różnych algorytmów CMF i wypracowanie optymalnej techniki dostosowania i transformacji sygnałów CFM.

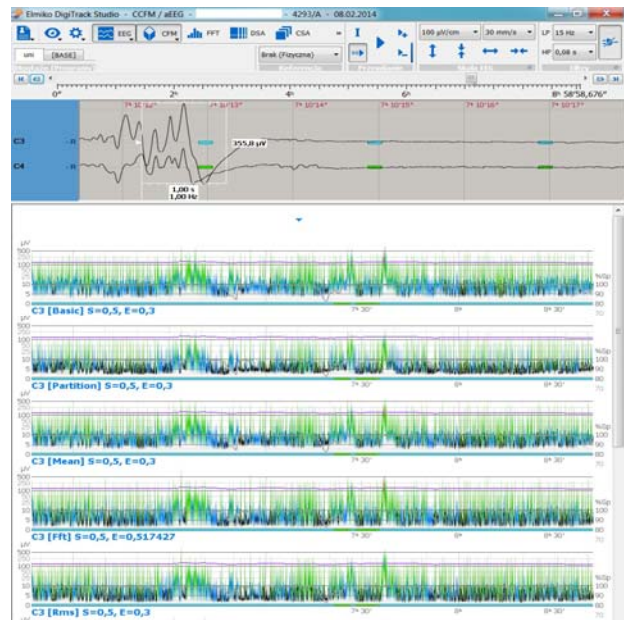
Algorytmy przetwarzające można podzielić na dwie podstawowe grupy: działające w dziedzinie czasu oraz w dziedzinie częstotliwości. Algorytmy przetwarzające w dziedzinie czasu będą opierały się na analizie kształtu samego sygnału, analizie amplitudy i mocy chwilowej. Algorytmy działające w dziedzinie częstotliwości będą wykorzystywały analizę mocy całkowitej poszczególnych składowych sygnału. Obie grupy algorytmów dają bardzo szerokie pole interpretacji przez zmiany wielkości próbki CFM, długości epoki, podziału próbki na podprzedziały, uśrednianie, modyfikację okna analizy widmowej, nakładanie okien, filtrację sygnału itp. Zaimplementowanie kilku wybranych algorytmów okazało się uzasadnione, gdyż występują widoczne różnice takiej analizy. W pierwszej ocenie nie można jednoznacznie rozstrzygnąć przewagi któregoś z algorytmów dlatego zasadna jest ich głębsza analiza. Użyte w badaniach algorytmy bazują na pojęciach sampla CFM, długości próbki CFM i długości epoki. W pierwszym podejściu zaimplementowano pięć algorytmów. "Basic" jest to algorytm podstawowy z wyznaczaniem wartości peek-to-peek w całym przedziale sampla CFM. Algorytm "Partition" działa jak Basic, lecz dzieli sampla na 5 podprzedziałów. Algorytm "Mean" - działa jak Basic, swoje obliczenia wykonuje nie w całym przedziale sampla ale w wielu jego fragmentach o długości zdefiniowanej rozmiarem epoki. W algorytm "FFT" obliczenia wykonywane są w dziedzinie częstotliwości. Wyznaczany jest pierwiastek mocy całkowitej sygnału w odpowiednich przedziałach częstotliwości. Algorytm "RMS" wyznacza pierwiastek średniej kwadratowej z próbek w przedziale o długości epoki. Jednym z ważniejszych parametrów pozwalających na ocenę aktywności mózgu zarówno wcześniaka jak i dziecka donoszonego, jest tzw. Burst Supresion (BS). W ocenie klinicznej przydatne są parametry związane z BS takie jak: Burst Supresion Ratio (BSR), Burst Frequency (BF), Burst-to-Burst Intervals (BBI) określający czas pomiędzy kolejnymi wzbudzeniami sygnału oraz korelacja pomiędzy BBI a Heart Rate (HR) [8].

Burst Supresion jest to wzorzec EEG charakteryzujący się naprzemiennym występowaniem okresów fal wolnych o wysokiej amplitudzie (Burst) na zmianę z okresami tzw. płaskiego EEG o niskiej amplitudzie (Supresion) [7]. Fazy wysokiej amplitudy towarzyszy zjawisko wyczerpywania się wapnia w międzykomórkowych przestrzeniach kory mózgowej, co powoduje zahamowanie procesów neurotransmisyjnych, prowadzące do fazy niskoamplitudowej. W trakcie fazy supresji pompy neuronalne przywracają poziom wapnia do stanu normalnego, co powoduje kolejny wzrost amplitudy EEG i rozpoczęcie procesu od nowa.

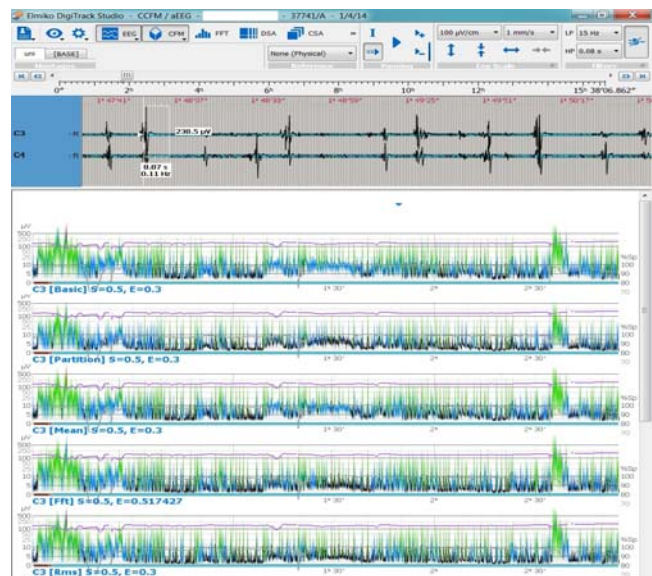
Burst Supresion jest dla lekarza bardzo cennym wskaźnikiem w trakcie monitorowania stanu pacjenta.

W przypadku dziecka donoszonego występowanie takiego wzorca w zapisie EEG i trendu CFM jasno wskazuje na następstwa związane z niedotlenieniem, zapaleniem opon mózgowo – rdzeniowych itp. pozwalając lekarzowi na wczesne wykrycie problemu i reakcję. W przypadku

wcześniaka urodzonego pomiędzy 24 a 26 tygodniem ciąży występowanie BS jest objawem prawidłowym. Na podstawie gęstości akceleracji (czyli współczynników BF i BBI) lekarz mógłby oceniać stan pacjenta. Jeśli częstotliwość spada, oznacza to pogorszenie stanu (np.: krwawienie dokomorowe, stan zapalny – posocznica, itp.), zagęszczenie akceleracji oznacza poprawę. Na rysunku 3 przedstawiono zapis zarejestrowany w 1 dobie życia: badania przeprowadzone dla przypadku klinicznego: dziecko urodzone w 28 tygodniu ciąży, masa urodzeniowa 1475 g, bez krwawienia do OUN, w czasie badania wentylacja mechaniczna.



Rys. 3. Porównanie algorytmów CFM - na zapisie widoczne silne supresje wyładowań. Algorytm Partition wyraźniej niż inne pokazuje stan supresji decydujący o zakwalifikowaniu zapisu jako BS. W oknie EEG (podstawa czasu 30 mm/s) wyraźnie widać zarówno Burst o amplitudzie 355,8 μ V oraz występującą tuż za nim silną supresję spadającą do 3,1 μ V

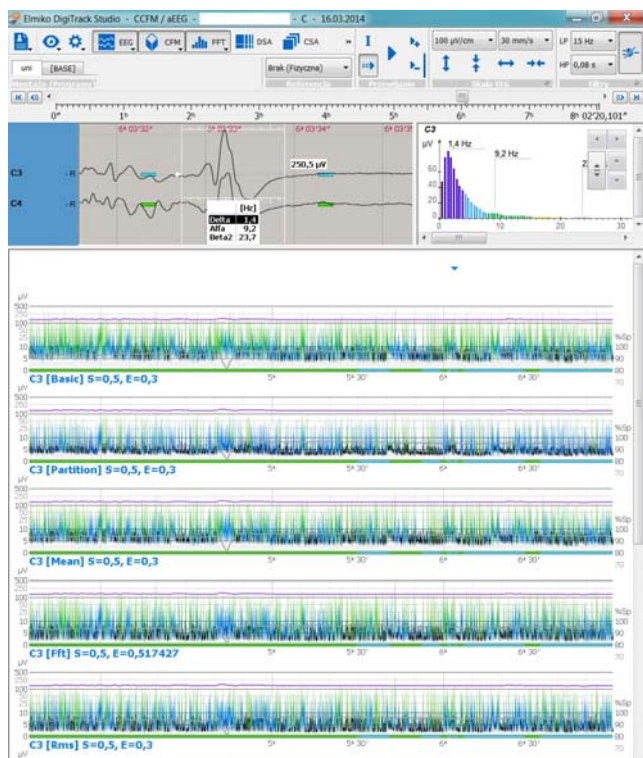


Rys. 4. Porównanie algorytmów CFM - widoczne są silne supresje wyładowań (ang. Burst Supresion). W algorytmie FFT widać znaczne wyładowania wraz sygnałem głównym o wyższej amplitudzie. Różni się on istotnie od przebiegu z algorytmu Partitiona, który wykazuje mniejsze wyładowania i słabiej zarysowaną część główną sygnału. Mocno zmniejszona podstawa czasu w oknie EEG [1 mm/s] pozwala wyraźnie dostrzec w zapisie EEG stany Burst

Na rysunku 4 przedstawiono zapis zarejestrowany w 1 dobie życia, badania przeprowadzone dla przypadku klinicznego: dziecko urodzone w 27 tygodniu ciąży, masa urodzeniowa 930 g, bez krwawienia do OUN, w czasie badania wentylacja mechaniczna.

Rysunek 5 przedstawia zapis zarejestrowany w 1 dobie życia dla raportu klinicznego: wcześniak urodzony w 26 tygodniu ciąży, masa urodzeniowa 965 g, obustronne krwawienie do komór mózgu II stopnia; w czasie badania wentylacja mechaniczna.

Należy zwrócić uwagę, że na rysunkach 2 i 5 pojawiło się okno FFT po prawej stronie przebiegów EEG (można je uaktywnić dla wybranego kanału pomiarowego), które mówi o poziomie i zawartości harmonicznych w interesującym sygnale. Informacje tą można wykorzystać przy ustawianiu parametrów filtrów i analizie częstotliwościowej przebiegów.



Rys. 5. Porównanie algorytmów CFM - na zapisie widoczne silne supresje wyładowań. Algorytm Partition wyraźniej niż inne pokazuje stan supresji decydujący o zakwalifikowaniu zapisu jako BS. W oknie EEG (podstawa czasu 30 mm/s) wyraźnie widać zarówno Burst o amplitudzie 250,5 μV oraz występującą tuż za nim silną supresję spadającą do 2,2 μV

Niestety w aktualnie dostępnych opracowaniach medycznych parametry Burst Suppression liczone są post-factum. Dlatego wskazane jest opracowanie analizy online, pozwalającej lekarzowi na jak najszybsze wykorzystanie jej wyników, gdyż wtedy reakcja jest najcenniejsza i może przynieść najlepsze rezultaty. W dalszych pracach zajmiemy się tym zadaniem a w ramach prac przygotowawczych przeanalizowaliśmy wpływ badanych algorytmów na prezentację BS.

Podsumowanie

Prezentując opracowanie mamy przekonanie, że badania CFM przy wykorzystaniu różnych algorytmów transformacji w pełni są uzasadnione, gdyż odpowiedni dobór algorytmu powinien pozwolić personelowi medycznemu na łatwiejszą ocenę aktualnego stanu mózgu wcześniaka i właściwą reakcję. Jednoznacznym wnioskiem z prowadzonych prac jest: silny wpływ użytego algorytmu na

kształt wykresu CFM a zatem i na interpretację lekarza. Drugim ważnym wnioskiem wynikającym z analizy zapisów CFM i porównywaniu ich ze stanem medycznym pacjenta, jest wytypowanie dwóch algorytmów z badanych pięciu. Wytypowane algorytmy Partition i FFT wydają się najefektywniejsze w ocenie klinicznej (Rys. 1 i 2).

Okazało się również w trakcie badań, że w analizowanych przebiegach CFM pojawiają się supresje wyładowań (*ang.* Burst Suppression), które są bardzo ważnym wskaźnikiem medycznym (Rys. 3, 4 i 5).

Stały monitoring CFM wraz z monitorowaniem parametrów BS pozwala lekarzowi na szybką reakcję przy zmianie stanu zdrowia dziecka. Na przykład, w przypadku drgawek, pozwala w na podanie odpowiednio wcześniej leku. W innych przypadkach wynik monitorowania jest wskazaniem do bardziej szczegółowych badań jak: przeciemiennowe USG głowy, echokardiograficzne badanie serca, badania biochemiczne, gazometryczne, poziom glikemii, równowaga kwasowo-zasadowa, odczyny zapalne. W przypadku stwierdzonego niedotlenienia, monitoring CFM pozwala na zakwalifikowanie dziecka do hipotermii.

Z powyższych powodów bardzo ważne jest dopracowanie metod monitorowania CFM w szczególności analizy Burst Suppression online aby podnieść wartość informacji zbieranych w trakcie monitorowania i umożliwić lekarzowi szybszą i bardziej adekwatną do zaistniałego stanu zdrowotnego reakcję. Dobra wizualizacja obecności Burst Suppression przez odpowiedni algorytm CFM jest istotnym problemem, który sygnalizujemy i będzie on tematem dalszych badań. W ramach pierwszych analiz udało się ustalić, że wśród badanych algorytmów, algorytm Partition lepiej sygnalizuje BS dzięki dużej podatności na większe różnice oryginalnego sygnału EEG.

LITERATURA

- [1] Amzica, F.: Basic physiology of burst-suppression. *Epilepsia*, 50 (2009) 38–39
- [2] Hellström-Westas L., de Vries L., Rosén I.: Atlas of Amplitude-integrated EEGs in the Newborn, 2008 Informa UK
- [3] Karpiński Ł.: Przydatność zintegrowanej elektroencefalografii (aEEG) i spektroskopii w bliskiej podczerwieni (NIRS) w ocenie czynności ośrodkowego układu nerwowego (OUN) u noworodków z bardzo małą urodzeniową masą ciała (VLBW), Rozprawa doktorska, Poznan University of Medical Sciences, 2011
- [4] Pfuerscheller K1, Bauernfeind G, Müller-Putz GR, Urlesberger B, Müller W, Pfuerscheller G.: Correlation between EEG burst-to-burst intervals and HR acceleration in preterm infants. *Neuroscience Letters* 437 (2008) 103–106
- [5] Priori P.F.: Monitoring cerebral function, Elsevier North-Holland, 1979
- [6] Prior P.F., Maynard D.E.: Monitoring cerebral function. Long-term recordings of cerebral electrical activity and evoked potentials. Amsterdam, Elsevier, 1986
- [7] Rosen I.: The Physiological Basis for Continuous Electroencephalogram Monitoring in the Neonate. *Clin Perinatol* 33 (2006) 593–611
- [8] Szczapa J.: Podstawy neonatologii. Wydawnictwo Lekarskie PZWL, Warszawa, 2008
- [9] Zyss T.: Zastosowanie układu 10-20 w rozmieszczaniu elektrod do EEG. Wyd. ELMIKO 2007

Autorzy:

Mgr inż. Paweł NIEDBALSKI, Elmiko® Medical Equipment, ul. Jezewskiego 5C/7, 02-796 Warszawa, E-mail: pawel.niedbalski@elmiko.pl; prof. dr hab. inż. Stefan F. FILIPOWICZ, Warsaw University of Technology, Institute of Theory of Electrical Engineering Measurement and Information Systems, Pl. Politechniki 1, 00-661 Warszawa, E-mail: 2xf@iem.pw.edu.pl