

## Układ 10-20 lokalizacji elektrod EEG czyli gdzie tkwi pewien błąd koncepcyjny

*Andrzej Stanisławczyk<sup>3</sup>, Tomasz Zyss<sup>1,2</sup>, Bartosz Sawicki<sup>4</sup>*

<sup>1</sup> Klinika Psychiatrii Dorosłych Collegium Medicum UJ

<sup>2</sup> Pracownia EEG i Potencjałów Wywołanych Kliniki Neurologii,  
Szpital Uniwersytecki, Kraków

<sup>3</sup> Zakład Komputerowego Modelowania Procesów Metalurgicznych,  
AGH Kraków

<sup>4</sup> Instytut Elektrotechniki Teoretycznej i Informatyki Stosowanej,  
Politechnika Warszawska

### Streszczenie

Opisano problemy związane z definiowaniem położenia elektrod do badań neurofizjologicznych w standardowym układzie 10-20. Przedstawiono możliwości skonstruowanego przez siebie solwera software'owego. Zaprezentowano propozycję zmodyfikowania zasad układu 10-20 - polegającą na zastosowaniu tych samych odległości kątowych (ty:  $22,5^{\circ}$ ) na wszystkich osiach głowy XYZ.

### Wstęp

Badanie EEG jest rutynowym badaniem stosowanym w diagnostyce nieprawidłowej czynności bioelektrycznej mózgu. Do rejestracji aktywności elektrycznej mózgu wykorzystuje się zwyczajowo 19-21 elektrod rozlokowywanych w odpowiednich miejscach na powierzchni głowy. Lokalizacja punktów położenia elektrod określana jest przy pomocy schematu zaproponowanego przez prof. Jaspera w 1958 r. - zwanego obecnie układem 10-20 [1]. Podane liczby odpowiadają 10 lub 20% odległości trzech odcinków wyznaczanych na powierzchni głowy dzięki standardowym punktom orientacyjnym [2, 3, 4]. Zasady wyznaczania punktów na trzech głównych osiach głowy XYZ (a właściwie - na trzech głównych liniach bądź łukach - strzałkowej, wieńcowej i poprzecznej), na których umieszcza się elektrody zostały opisane we wcześniejszych pracach [5, 6, 7, 8, 10].

Zaletą układu 10-20 jest jego łatwość stosowania i tzw. otwartość. Odcinki między elektrodami mogą zmniejszane (10, 5 i 2,5% odległości), a elektrody „dogęszczane”.

Dzięki postępowi technik cyfrowych możliwą stała się również równoczesna akwizycja sygnału EEG ze znacznie większej ilości elektrod niż stosuje się w badaniu rutynowym. Obecne najbardziej zaawansowane systemy cyfrowego EEG pozwalają na rejestrację sygnału EEG równocześnie spod 512 elektrod.

Techniki EEG pozwalające na rejestrację sygnału EEG z więcej niż 32 (według niektórych - dopiero 64) elektrod określane są mianem EEG wysokich/dużych rozdzielczości (hrEEG = high resolution EEG) [6, 9].

W zakresie tej techniki pojawiły do rozwiązania dwa problemy metodologiczne:

1. Pierwszym zagadnieniem jest stworzenie nazewnictwa tej dużej ilości nowych elektrod, które by nawiązywało do nazw jakie były przyjęte dla pierwszych standardowych elektrod. Problem ten rozwiązali z powodzeniem Oostenweld i Pramstra [5, 6], którzy w 2001 r. zaprezentowali zasady rozmieszczania elektrod zgodnie z 5% odstępami między elektrodami (układ 5-5) - wraz z propozycją odpowiedniej nomenklatury dla tych elektrod. W układzie tym możliwe jest zdefiniowanie aż 346 elektrod.

2. Drugim problemem - znacznie poważniejszym - jest zagadnienie dokładnego lokalizowania elektrod, tj. określenie ich położenia - w koordynatach kartezjańskich (XYZ) lub biegunowych (kąty: theta  $\theta$  i phi  $\varphi$ ), czemu poświęcone jest niniejsze opracowanie.

### **Problemy z rozlokowywaniem elektrod**

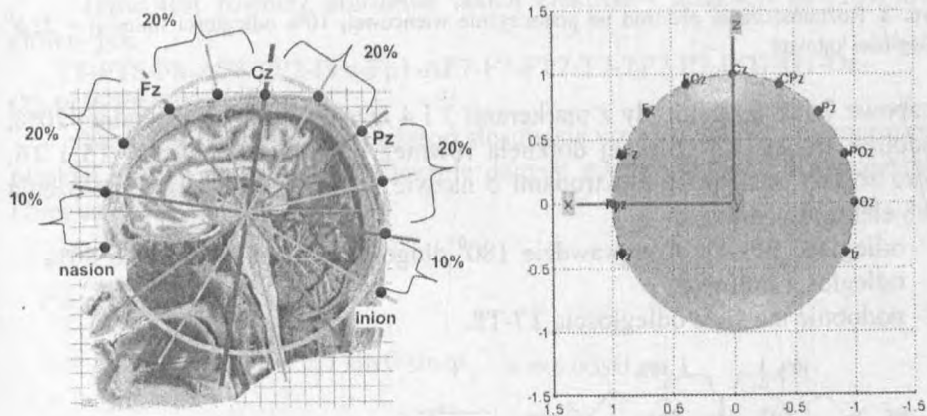
W przypadku badania rutynowego - wykorzystującego jedynie 19-21 elektrod, położenie elektrody wyznaczane jest metodą orientacyjną („na oko”) - zgodnie z zasadami układu 10-20. Doświadczony technik zakłada elektrody - umieszczając je pod gumowym czepkiem - może poprawić dokładność rozlokowywania elektrod przez posłużenie się przymiarem metrycznym. Przymiar pozwala na dokładne wymierzenie długości podstawowych odcinków, na których dokonuje się 10 i 20% podziałów.

Ze względu na dość duże średnice elektrody rejestrującej (10-15 mm) oraz w pewnym zakresie dalece orientacyjny charakter rutynowego badania EEG dokładność lokalizacji elektrod nie musi być szczególnie duża. 1-3 centymetrowe odchylenia położenia elektrody (położenie rzeczywiste) od położenia właściwego (idealnego) dla tejże elektrody nie wpływa w znaczny

sposób na rejestrowany sygnał EEG (nie prowadzi do jego znacznego zniekształcenia).

Sytuacja taka jest nie jednak do zaakceptowania w przypadku techniki hrEEG. Duża ilość elektrod stosowana jest w celu dokładnego zobrazowania czynności bioelektrycznej mózgu z precyzyjnym określeniem położenia ewentualnych nieprawidłowych generatorów mózgowych. Tym samym położenie elektrody musi być definiowane możliwie jak najdokładniej. I tu właśnie pojawiają się kolejne problemy.

Pewnym błędem - niejako „pierworodnym” - układu 10-20 jest fakt, iż punkty od których kreśli się linię strzałkową (Nz - nasion, Iz - inion) [Ryc. 1] oraz linię wieńcową (punkty przeduszne T9 i T10) [Ryc. 2] leżą nie na równiku głowy - tylko o 10% odległości liniowej poniżej.

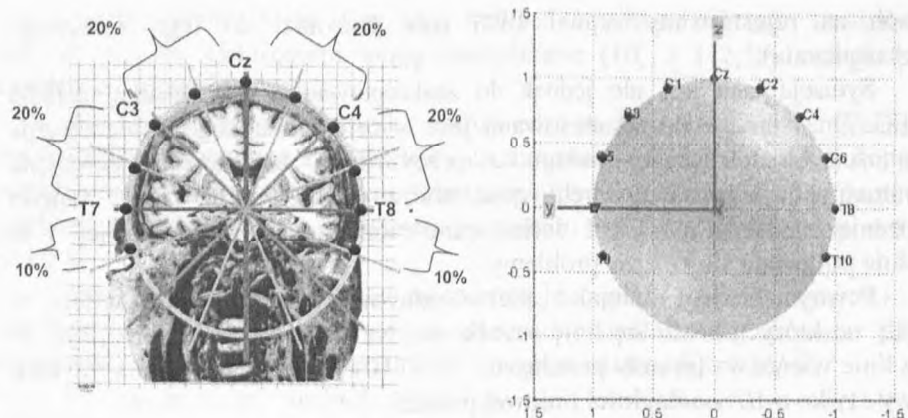


**Ryc. 1.** Rozmieszczenie elektrod na płaszczyźnie strzałkowej; 10% odległości liniowej =  $22,5^{\circ}$  odległości kątowej

Trzeba jednak pamiętać, że

- odległość Nz-Iz to 100% długości liniowej, lecz tak naprawdę to aż  $225^{\circ}$  odległości kątowej;
- podobnie rzecz ma się z odległością T9-T10.

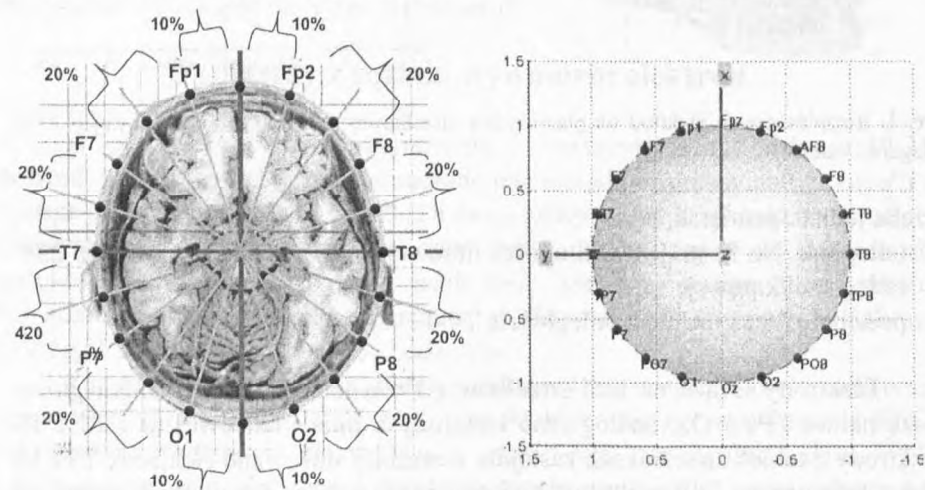
Elektrody leżące na linii strzałkowej i równocześnie na równiku głowy noszą nazwę FPz i Oz; analogiczne elektrody z linii wieńcowej to - T7 i T8 (elektrody o takich znacznikach zastąpiły wcześniej stosowane elektrody T3 i T4 - gdyż leżą one na linii parasagitalnej oddalonej o 40% odległości liniowej od linii strzałkowej X i wszystkie elektrody leżące na tej linii muszą mieć markery



Ryc. 2. Rozmieszczenie elektrod na płaszczyźnie wieńcowej; 10% odległości liniowej = 22,5<sup>o</sup> odległości kątowej

liczbowe 7 lub 8; elektrody z markerami 3 i 4 leżą na linii parasagitalnej 20%; podobna zmiana do opisaną dotknęła również pierwotne elektrody T5 i T6, które zostały zastąpione elektrodami o nazwie P7 i P8) [Ryc. 3]. Z położenia tych elektrod wynika, iż

- odległość FPz-Oz to wprawdzie 180<sup>o</sup> długości kątowej, lecz tylko 80% odległości liniowej;
- podobnie ma się z odległością T7-T8.



Ryc. 3. Rozmieszczenie elektrod na płaszczyźnie poprzecznej/równikowej; 10% odległości liniowej = 18<sup>o</sup> odległości kątowej

Z powyższego wynika, że odległość kątowa  $90^{\circ}$  (kąć prosty) jest na płaszczyźnie strzałkowej i wieńcowej (osie X i Y) dzielona na 4 części, a odległość liniowa 10% odpowiada tu  $22,5^{\circ}$ .

Inaczej jest jednak w przypadku elektrod leżących na płaszczyźnie poprzecznej (tu: równiku głowy). W tym przypadku odległość T7-T8 odpowiadająca  $180^{\circ}$  odległości kątowej dzielimy nie na 8 lecz na 10 części (10 x 10% długości linowej), a tym samym odległość liniowa 10% odpowiada na równiku głowy  $18,0^{\circ}$  długości kątowej.

Łatwo jest zrozumieć i wyliczyć położenie elektrod leżących na głównych płaszczyznach XY:

Nz-FPz-AFz-Fz-FCz-Cz-CPz-Pz-POz-Oz-Iz, i

T9-T7-C5-C3-C1-Cz-C2-C4-C6-T8-T10.

Jasne jest również położenie takich elektrod - leżących na „równiku” głowy- jak:

T8-FT8-F8-AF8-FP2-FPz-Fp1-AF7-F7-FT7-T7-TP7-P7-PO7-O1-Oz-O2-PO6-P8-TP8,

Do wyliczeń położenia elektrod stosuje się wzory z zakresu trygonometrii płaskiej - pozwalające na przeliczanie danych między układem kartezjańskim i biegunowym:

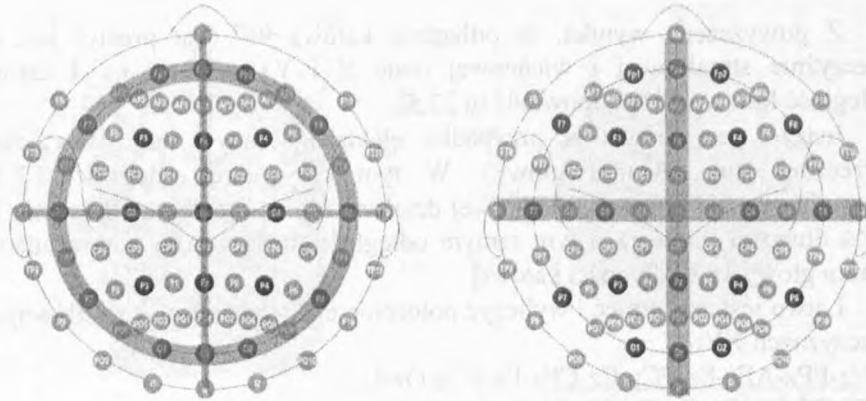
$$r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2},$$

$$x = r \sin \theta \cos \varphi, \quad y = r \sin \theta \sin \varphi, \quad z = r \cos \theta,$$

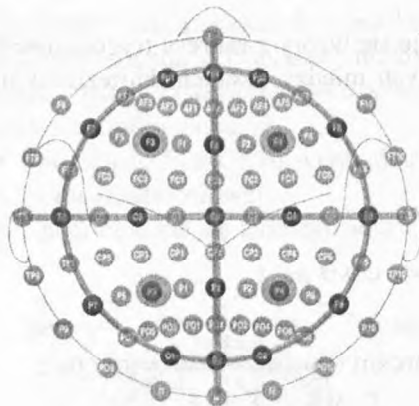
$$\varphi = \arctan \frac{y}{x}, \quad \theta = \arctan \frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{z} = \arcsin \frac{z}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}} = \arccos \frac{z}{r}$$

Nierówność odległości kątowych na trzech podstawowych osiach-płaszczyznach powoduje już znaczne utrudnienia w rozlokowaniu elektrod nie leżących już poza głównymi osiami XYZ [Ryc. 4; Ryc. 5]. Do ich wyliczenia trzeba posłużyć się równaniami różniczkowymi i całkowaniem.

I tak elektroda F3 ma znajdować się w połowie odległości między elektrodami Fz (leżącej na linii strzałkowej X) i F7 (leżącej na równiku głowy). Gdyby odległości kątowe na każdej osi były sobie równe - wtedy wymienione trzy elektrody położone byłyby na płaszczyźnie równoległej do płaszczyzny wieńcowej. W rzeczywistości leżą jednak na płaszczyźnie nachylonej do płaszczyzny wieńcowej i wyliczenie położenia elektrody F3 nie jest już takie proste. Podobnie się ma sprawa z elektrodami „lustrzanymi” F4, P3 i P4 [Ryc. 6].

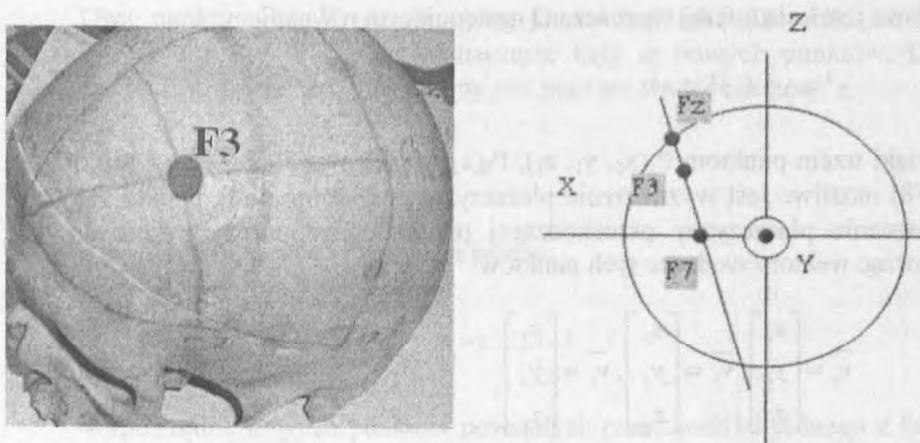


Ryc. 4. Elektrody z głównych płaszczyzn XYZ



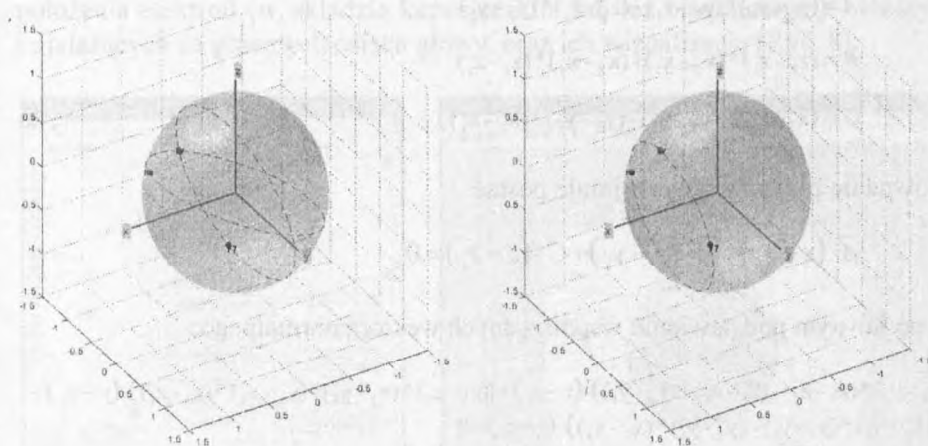
Ryc. 5. Elektrody spoza głównych płaszczyzn XYZ

Sama analiza problemu położenia elektrod leżących poza głównymi osiami XYZ ma dwa rozwiązania. Gdyby odległość między punktami Fz i F7 miała by być najkrótszą drogą między nimi - to łuk między tymi elektrodami byłby tzw. ortodromą (częścią okręgu wielkiego kuli - przechodzącego przez środek głowy-kuli). Założenie najkrótszej drogi między elektrodami prowadzioby do tego, iż elektroda F4 - „lustrzana” do elektrody F3 (względem osi X) musiałaby leżeć na innym okręgu wielkim - utworzonym przez elektrody



Ryc. 6. Położenie elektrody F3 leżącej poza głównymi osiami XYZ

Fz i F8 („lustrzana” do F7 względem płaszczyzny X). Bardziej właściwym - z fizjologicznego punktu widzenia - jest jednak sytuacja, gdy elektrody F3 i F4 leżą na okręgu utworzonym przez punkty F7-Fz-F8. Tym samym łuki F7-Fz i Fz-F8, na których dokonuje się podziału z ustaleniem punktów F3 i F4, nie są najkrótszą drogą między elektrodami (ryc. 7).



Ryc. 7. Alternatywne rozwiązania dotyczące kreślenia łuków łączących elektrodę Fz-F7 i Fz-F8: dwie ortodromy (lewo) lub jeden okrąg nie będący okręgiem wielkim (prawo)

Do wyliczeń położenia elektrod leżących poza osiami XYZ stosuje się następujące zasady:

Głowa jest kulą (sferą) wyznaczaną następującym równaniem:

$$x^2 + y^2 + z^2 = r^2$$

Dzięki trzem punktom  $P_1(x_1, y_1, z_1)$ ,  $P_2(x_2, y_2, z_2)$  oraz  $P_3(x_3, y_3, z_3)$  (np. F7, Fz i F8) możliwe jest wyznaczenie płaszczyzny, na której się te punkty znajdują. Równanie płaszczyzny przechodzącej przez podane punkty można uzyskać tworząc wektory wodzące tych punktów:

$$\vec{v}_1 = \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{bmatrix}, \vec{v}_2 = \begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \end{bmatrix}, \vec{v}_3 = \begin{bmatrix} x_3 \\ y_3 \\ z_3 \end{bmatrix},$$

a następnie wyznaczając wektor normalny płaszczyzny:

$$\vec{M} = \begin{bmatrix} A \\ B \\ C \end{bmatrix} = (\vec{v}_2 - \vec{v}_1) \times (\vec{v}_3 - \vec{v}_1)$$

W postaci jawnej współrzędne wektora normalnego wyglądają następująco:

$$A = (y_2 - y_1) \cdot (z_3 - z_1) - (z_2 - z_1) \cdot (y_3 - y_1)$$

$$B = (z_2 - z_1) \cdot (x_3 - x_1) - (x_2 - x_1) \cdot (z_3 - z_1)$$

$$C = (x_2 - x_1) \cdot (y_3 - y_1) - (y_2 - y_1) \cdot (x_3 - x_1),$$

a równanie płaszczyzny przyjmuje postać:

$$A \cdot (x - x_1) + B \cdot (y - y_1) + C \cdot (z - z_1) = 0,$$

co po jawnym podstawieniu współrzędnych wektora normalnego:

$$\begin{aligned} & ((y_2 - y_1) \cdot (z_3 - z_1) - (z_2 - z_1) \cdot (y_3 - y_1)) \cdot (x - x_1) + ((z_2 - z_1) \cdot (x_3 - x_1) - (x_2 - x_1) \cdot (z_3 - z_1)) \cdot (y - y_1) + \\ & + ((x_2 - x_1) \cdot (y_3 - y_1) - (y_2 - y_1) \cdot (x_3 - x_1)) \cdot (z - z_1) = 0 \end{aligned}$$

Część wspólna sfery i płaszczyzny w postaci jawnej ma jeszcze bardziej skomplikowaną postać (należy z równania płaszczyzny wyliczyć  $x$  i wstawić do równania sfery).



Dwa punkty  $P_j, P_k$  dzielą okrąg  $O$  na dwa łuki. Oba łuki można podzielić na  $n$  równych części wyznaczając kąty  $\varphi$  nowych punktów. Dla jednego z łuków podział ten wyznaczony jest poprzez wartości kątów:

$$\varphi_m^{j,k} = m \cdot \frac{\varphi_j - \varphi_k}{n} + \varphi_k \quad m=1, \dots, n-1$$

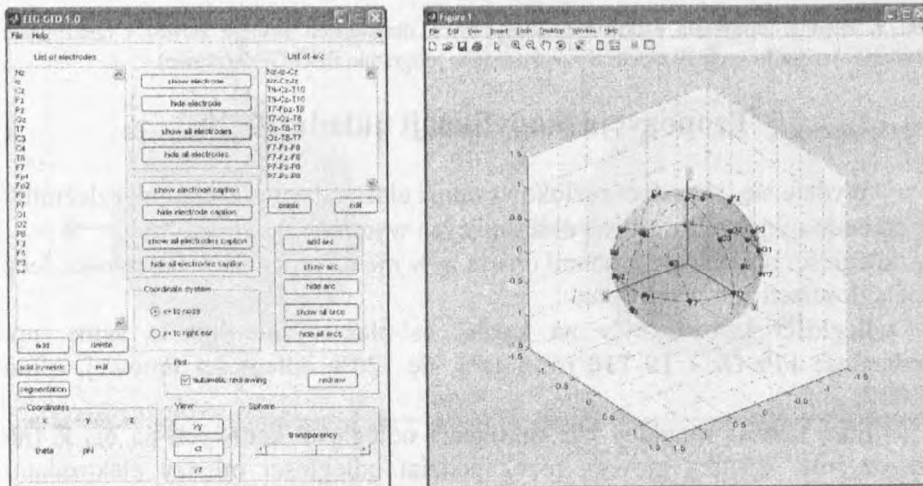
Podział drugiego łuku wyznaczony jest kątami:

$$\varphi_m^{j,k} = m \cdot \frac{2 \cdot \pi + \varphi_j - \varphi_k}{n} + \varphi_k \quad m=1, \dots, n-1$$

Współrzędne nowych punktów powstałych przez podział jednego z łuków w okręgu  $O$  wyznaczonego przez dwa punkty  $P_j, P_k$  są ostatecznie równe:

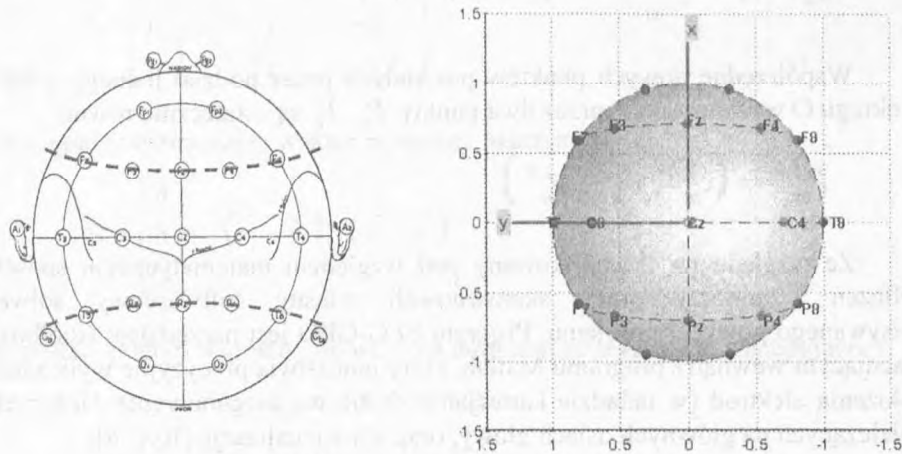
$$P_m^{j,k} = (x_m^{j,k}, y_m^{j,k}, z_m^{j,k})$$

Ze względu na skomplikowany pod względem matematycznym sposób obliczeń - autorzy pracy skonstruowali własny softwareowy solver opisywanego powyżej problemu. Program EEG-GEO jest narzędziem (toolbox) pracującym wewnątrz programu Matlab, który umożliwia precyzyjne wyliczenie położenia elektrod (w układzie kartezjańskim lub też biegunowym) - leżących i nieleżących na głównych osiach głowy, oraz ich wizualizację [Ryc. 8].



Ryc. 8. Okna własnego programu EEG-GEO do wyliczania położenia elektrod i ich wizualizacji

Przeprowadzona analiza wykazała, iż np. prezentowane powszechnie schematy rozlokowywania elektrod na powierzchni głowy - pochodzące jeszcze z czasów Jaspera - są błędne. Przy prezentacji z góry elektrody Fz i Pz leżą w połowie drogi między elektrodą Cz a biegunem czołowym (FPz) lub biegunem potylicznym (Oz). Rysunek ten nie uwzględnia jednak krzywizny głowy, co powoduje, iż w rzucie pionowym odcinek Cz-Fz nie jest równy (jest dłuższy) od Fz-FPz; tak samo i w tylnym łuku: Cz-Pz > Pz-Oz. Łuki tworzone przez elektrody F7-F3-Fz-F4-F8 oraz P7-P3-Pz-P4-P8 okazują się być z kolei wypukłe w kierunku od a nie do elektrody Cz. Podobnych obserwacji jest wiele.



Ryc. 9. Błędna topografia elektrod w klasycznych diagramach Jaspera (lewo) i rzeczywiste położenie standardowych 19 elektrod - wyliczone w programie EEG-GEO (prawo)

### Propozycja modyfikacji układu 10-20

Wydaje się, iż system rozlokowywania elektrod całkowicie niezależny byłby się od bezwzględnych wartości określających wymiary głowy, gdyby

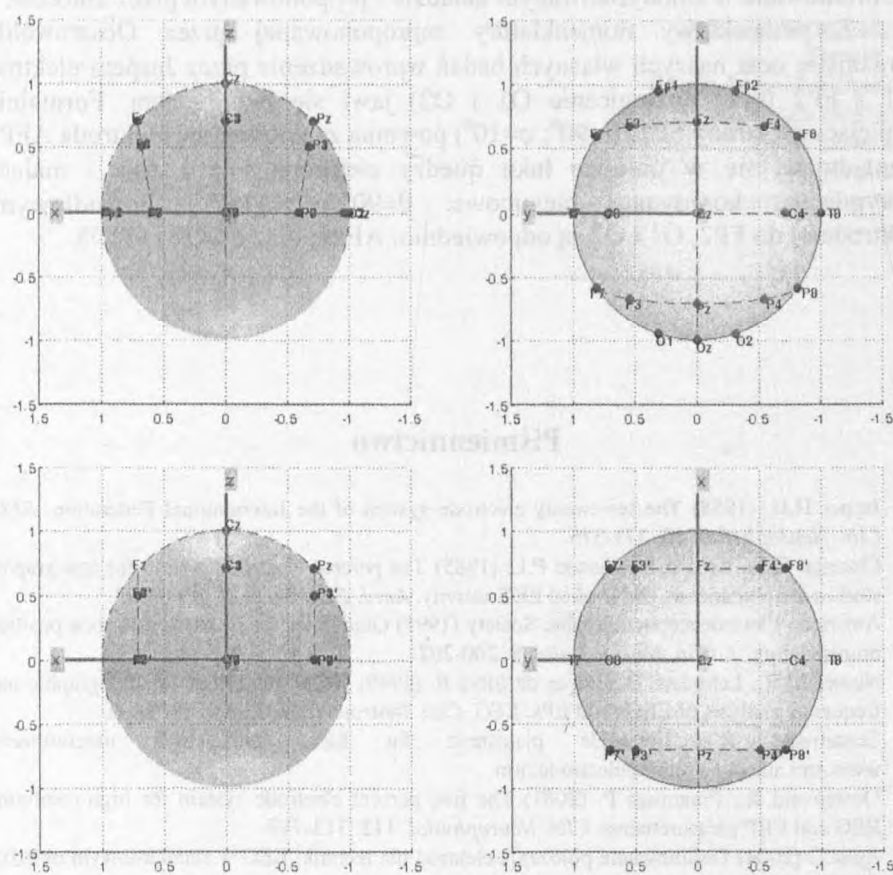
- odległości między elektrodami oparte były nie na procentach odległości, lecz odległościach kątowych, oraz
- odległości kątowe były na każdej osi-płaszczyźnie linii te same. np. odległość FPz-Oz i T9-T10 równałaby się 120% odległości liniowej, a nie 100%

Inną zmianą mogłaby być unifikacja odległości kątowych na osi Z (na płaszczyźnie równika głowy), przez podział odległości między elektrodami środkowo-skroniowymi (T7 i T8) - przez przód i tył głowy - nie na 10 lecz na 8 równych części, które będą odpowiadały odległości kątowej  $22,5^{\circ}$ . W obu

przypadkach trudno by jednak było utrzymać czy odwoływać się do terminologii układu 10-20.

Autorzy pracy pokusili się o przeprowadzenie analizy zmodyfikowanego układu rozlokowywania elektrod w sytuacji, gdy odległości kątowe na osi Z byłyby równe  $22,5^{\circ}$  [11]. Wyniki porównania do tradycyjnego układu 10-20 zostały zaprezentowane na rycinie 10. Z porównania wynika, iż np. takie elektrody jak F7-F3-Fz-F4-F8 czy P7-P3-Pz-P4-P8 znajdują się na płaszczyznach równoległych (a nie ukośnych) do płaszczyzny wieńcowej Y.

Położenie elektrod leżących poza głównymi osiami XYZ w układzie zmodyfikowanym może być wyliczane prościej - przy użyciu zwykłych równań geometrii planimetrycznej.



**Ryc. 10.** Schemat rozlokowania elektrod według układu 10-20 (rzęd górny) oraz według zmodyfikowanego układu, w którym odległości kątowe na wszystkich osiach są równe  $22,5^{\circ}$  (rzęd dolny); w lewej kolumnie - projekcja głowy z lewego boku, w prawej kolumnie - projekcja z góry.

W zmodyfikowanym układzie „gina” ponadto elektrody FP1 i FP2. Z analityczno-geometrycznego punktu widzenia ich istnienie również w oryginalnym układzie 10-20 jest dalece wątpliwe. Leżą one bowiem na płaszczyźnie równikowej Z - leżącej o 40% odległości liniowej od płaszczyzny strzałkowej X, na której elektrody noszą liczbowe markery 7 i 8. Tymczasem znaczniki liczbowe 1 i 2 dotyczą elektrod oddalonych o 10% odległości liniowej od płaszczyzny X. W sytuacji gdy elektroda FPz leży już na płaszczyźnie równikowej praktycznie nie jest możliwe wyznaczenie innych elektrod leżących na łuku łączącym linię strzałkową z linią poprzeczną, gdyż długość tego łuku równa jest zero. Podobne uwagi dotyczą również elektrod O1 i O2, które są wyeliminowane w zmodyfikowanym układzie - proponowanym przez autorów.

Z perspektywy nomenklatury zaproponowanej przez Oostenwelda i Praamstrę oraz naszych własnych badań wprowadzenie przez Jaspera elektrod FP1 i FP2 (oraz analogicznie O1 i O2) jawi się być błędem. Formalnie w miejscu elektrody FP1 ( $\theta=90^0$ ;  $\varphi=10^0$ ) powinna znajdować się elektroda AFP7 - znajdująca się w połowie łuku między elektrodą FPz i AFz i mająca skorygowane koordynaty biegunowe:  $\theta=90^0$ ;  $\varphi=11,25^0$ . Prawidłowymi elektrodami do FP2, O1 i O2 są odpowiednio: AFP8, oraz POO7 i POO8.

## Piśmiennictwo

1. Jasper H.H. (1958) The ten-twenty electrode system of the International Federation. *EEG. Clin. Neurophysiol.* 10: 371-375.
2. Chatrian G.E., Lettich E., Nelson P.L. (1985) Ten percent electrode system for topographic studies of spontaneous and evoked EEG activity. *Am J. EEG Technol.* 25: 83-92.
3. American Electroencephalographic Society (1991) Guidelines for standard electrode position nomenclature. *J. Clin. Neurophysiol.* 8: 200-202.
4. Nuwer M.R., Lehmann D., Lopes de Silva F. (1999) IFCN guidelines for topographic and frequency analysis of EEGs and EPs. *EEG. Clin. Neurophysiol.*, Suppl. 52: 15-20.
5. Oostenveld R.: Electrode placement for EEG and ERP measurement. [www.smi.auc.dk/~roberto/electrode.htm](http://www.smi.auc.dk/~roberto/electrode.htm)
6. Oostenveld R., Praamstra P. (2001) The five percent electrode system for high-resolution EEG and ERP measurements. *Clin. Neurophysiol.* 112: 713-719.
7. Zyss T. (2004) Definiowanie położenia elektrod dla techniki EEG w standardowym układzie 10-20. *XI Krajowa Konferencja „Komputerowe wspomaganie badań naukowych. XI KK KOWBAN '2004 - Materiały.* Wrocław - Polanica Zdrój, s. 81-86.

8. Zyss T. (2004) Rozszerzony układ 5-5 lokalizacji elektrod do EEG - podstawą techniki HR-EEG. *XI Krajowa Konferencja „Komputerowe wspomaganie badań naukowych. XI KK KOWBAN '2004 - Materiały*. Wrocław - Polanica Zdrój, s. 87-92.
9. Zyss T. (2004) Wprowadzenie do techniki EEG dużych rozdzielczości. *Przegląd Elektrotechniczny*, 12: 1205-1209.
10. Zyss T. (2005) „Geometria” elektrod EEG oraz ich digitalizacja. *XII Krajowa Konferencja „Komputerowe wspomaganie badań naukowych. XII KK KOWBAN '2005*. Wrocław - Polanica Zdrój, s. 283-288.
11. Zyss T., Stanisławczyk A., Sawicki B. (2006) Location of electrodes for recording of EEG signal: selected problems. *Journal of Technical Physics*, w druku

Adres do korespondencji:

**Tomasz Zyss**

Klinika Psychiatrii Dorosłych

Collegium Medium UJ

ul. Kopernika 21a

31-501 Kraków

e-mail: mzzyss@cyf-kr.edu.pl