

# Elektroencefalogram

Wiesław W. JĘDRZEJCZAK

Mózg człowieka składa się z  $10^{11}$  komórek, które porozumiewają się za pomocą impulsów elektrycznych. Przy zastosowaniu odpowiednio czulej aparatury zmiany potencjału elektrycznego można zmierzyć na powierzchni głowy. Zapis takich zmian w czasie nosi nazwę elektroencefalogramu (w skrócie EEG).

## Krótką historia EEG

Aktywność elektryczna mózgu została odkryta przez angielskiego lekarza Richarda Catona w latach siedemdziesiątych dziewiętnastego wieku. Dokonywał on pomiarów na odkrytym mózgu zwierząt. W swoich eksperymentach używał galwanometru i mierzył potencjał pomiędzy elektrodą leżącą na powierzchni kory mózgowej (zewnętrznej warstwie półkul mózgowych) a elektrodą umieszczoną na czaszce.

Duży wkład w poznanie EEG wnieśli również polscy naukowcy. W 1890 roku Adolf Beck opublikował wyniki swoich badań, w których wykrył zanik rytmicznej czynności w korze mózgowej pod wpływem bodźca świetlnego. Nauczyciel Becka z Uniwersytetu Jagiellońskiego w Krakowie, Napoleon Cybulski, wykonał jeden z pierwszych elektroencefalogramów, używając przystawki fotograficznej, podłączonej do galwanometru. Pokazał na nim zmiany, jakie pojawiały się w EEG psa w trakcie napadu padaczki wywołanego elektryczną stymulacją.

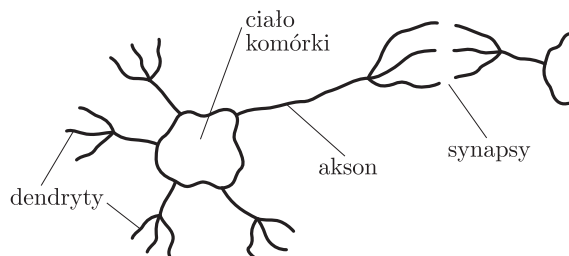
Pierwszy pomiar EEG u człowieka został wykonany przez Hansa Bergera na początku dwudziestego wieku. Początkowo Berger dokonywał pomiarów na pacjentach mających ubytki w kości czaszki na skutek ran wojennych (ofiarami pierwszej wojny światowej). Rozgłos przyniosło mu opublikowanie w 1929 roku wyników pięcioletnich badań prowadzonych w ścisłej tajemnicy. W pracy tej został po raz pierwszy opisany pomiar EEG człowieka poprzez nienaruszoną czaszkę. W swoich dalszych badaniach Berger scharakteryzował rytmy alfa i beta w EEG, opisał zmiany w EEG pod wpływem chorób, np. Alzheimera. To także on pierwszy użył terminu elektroencefalogram.

W kolejnych latach pomiary EEG zaczęto przeprowadzać, wykorzystując większą liczbę elektrod, czyli zapis czynności elektrycznej z różnych obszarów jednocześnie. Ulepszono także urządzenia pomiarowe, wyposażając je w rejestrację przebiegu badania na papierze.

## Budowa i działanie komórek nerwowych

Aby zrozumieć, dzięki czemu możliwe jest wykonywanie EEG, prześledzimy oddziaływania elektryczne od poziomu pojedynczej komórki nerwowej, aż do łącznej aktywności komórek składających się na korę mózgową.

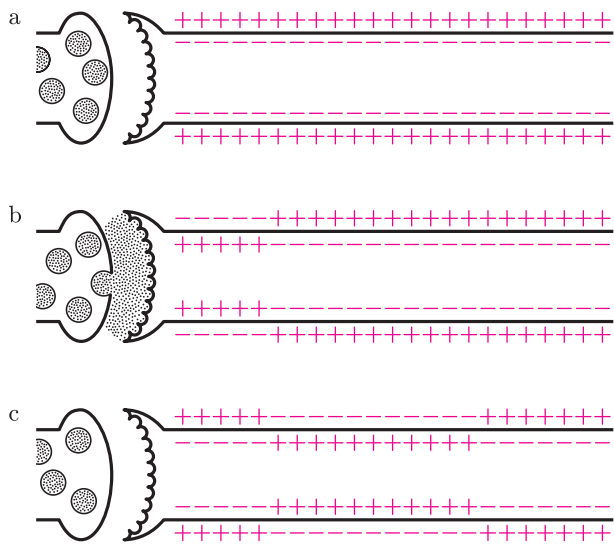
Podstawową jednostką układu nerwowego jest komórka nerwowa – neuron (rys. 1), która zdolna jest do wytwarzania i przewodzenia impulsów elektrycznych.



Rys. 1. Schemat budowy komórki nerwowej – neuronu.

Neuron składa się z ciała komórki oraz charakterystycznych wypustek: aksonu i dendrytów. Akson jest z reguły dłuższy i przewodzi impulsy z ciała komórki

do zakończeń nerwowych. Dendryty są dużo krótsze, a impulsy biegną w nich w kierunku ciała komórki. Impulsy przekazywane są pomiędzy neuronami za pomocą synaps, na drodze elektrycznej lub chemicznej. Wnętrze komórki nerwowej w stanie spoczynku jest naładowane ujemnie względem środowiska zewnątrzkomórkowego, na skutek aktywnego transportu jonów (rys. 2a). Skutkiem tego w poprzek błony komórkowej występuje różnica potencjałów – około 80 mV. W stanie pobudzenia natomiast fragment błony komórkowej ulega tzw. depolaryzacji – wnętrze komórki jest wtedy naładowane dodatnio względem środowiska zewnątrzkomórkowego. W przypadku gdy synapsa dendrytu odbiera pobudzenie z innej komórki, generowany jest tzw. **potencjał postsynaptyczny** (rys. 2b) o amplitudzie około 10 mV i trwający około 15 ms. Ze względu na dość długi czas trwania potencjały postsynaptyczne, zarówno te następujące po sobie, jak i pochodzące od różnych komórek, mogą się sumować. Rozróżniane są dwa rodzaje potencjału postsynaptycznego: pobudzający i hamujący. Ma to duże znaczenie ze względu na fakt, że reakcja neuronu na dochodzące pobudzenie jest reakcją progową. Dopiero sumaryczne pobudzenie postsynaptyczne, przekraczające pewną graniczną wartość, powoduje wygenerowanie tzw. **potencjału czynnościowego**. Ma on amplitudę rzędu kilkudziesięciu mV i czas trwania około 1 ms. Potencjał czynnościowy jest przemieszczającą się wzdłuż aksonu strefą, w której błona neuronu ulega chwilowej depolaryzacji (rys. 2c). Po dojściu potencjału do synapsy (chemicznej), będącej zakończeniem aksonu, dochodzi do wydzielania substancji chemicznej do szczeliny synaptycznej (rys. 2b). Substancja ta, działając następnie na błonę dendrytu kolejnej komórki nerwowej, może spowodować powstanie potencjału postsynaptycznego.



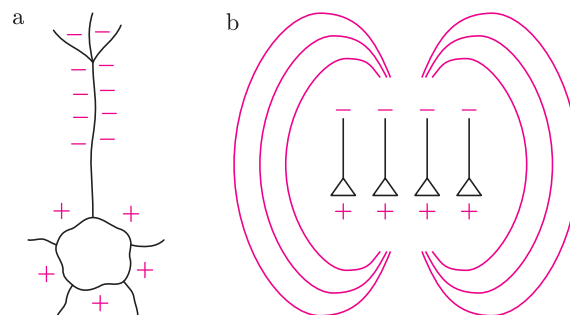
Rys. 2. Pobudzenie neuronu.  
 a) Polaryzacja neuronu w stanie spoczynku.  
 b) Substancja chemiczna wydzielana przez synapsę jednego neuronu pobudza synapsę dendrytu kolejnej komórki nerwowej. Jony dodatnie napływają do wnętrza neuronu – neuron ulega depolaryzacji.  
 c) Pobudzenie rozchodzi się wzdłuż neuronu. Aktywny transport jonów przywraca potencjał komórki do stanu wyjściowego.

Potencjał mierzony na zewnątrz pojedynczej komórki nerwowej jest bardzo mały (około kilku  $\mu\text{V}$ ) i zanika bardzo szybko, proporcjonalnie do kwadratu odległości. Dlatego też nie można zmierzyć potencjału pojedynczego neuronu z powierzchni głowy.

W rzeczywistości **to, co mierzy się na powierzchni głowy, to sumaryczna aktywność dużych grup neuronów.**

Przez wiele lat uważano, że za aktywność mierzoną na powierzchni głowy odpowiedzialne są potencjały o największej amplitudzie, czyli potencjały czynnościowe. Okazało się jednakże, że ich czas trwania jest zbyt krótki, aby potencjały sąsiednich komórek mogły się sumować. Warunek ten spełniają potencjały synaptyczne, ponieważ mimo mniejszej amplitudy mają znacznie dłuższy czas trwania.

Kora mózgowa w dużej mierze zbudowana jest z neuronów piramidowych (nazwa pochodzi od kształtu ciała komórki), które są ułożone prostopadle do jej powierzchni i równolegle względem siebie. W stanie pobudzenia pojedynczy neuron możemy w przybliżeniu traktować jako dipol elektryczny (rys. 3a). Zatem warstwę równoległe ułożonych neuronów piramidowych możemy sobie wyobrazić jako warstwę dipolową, a generowany potencjał jako potencjał pochodzący od warstwy dipolowej (rys. 3b). Pozostałe komórki nie są ułożone w żaden specyficzny sposób, a prądy przez nie generowane znoszą się, dlatego ich wkład do EEG jest niewielki. A zatem **potencjały mierzone na powierzchni głowy to rezultat prądów płynących w środowisku zewnątrzkomórkowym pod wpływem sumarycznej aktywności postsynaptycznej neuronów piramidowych.**



Rys. 3.  
 a) Pobudzony neuron można w przybliżeniu traktować jako dipol.  
 b) Warstwę równoległe ułożonych neuronów piramidowych możemy sobie wyobrazić jako warstwę dipolową, a generowany potencjał jako potencjał pochodzący od warstwy dipolowej.

Pofałdowanie kory mózgowej utrudnia pomiar. Badanie z powierzchni głowy obszarów kory znajdujących się w brzdach jest bardzo utrudnione.

Nie można także zapomnieć o tym, że pomiędzy korą a elektrodą są jeszcze tkanki, takie jak płyn mózgowy, czaszka i skóra. Powodują one osłabienie i rozproszenie sygnału w stosunku do tego, co można by zmierzyć bezpośrednio na powierzchni kory.

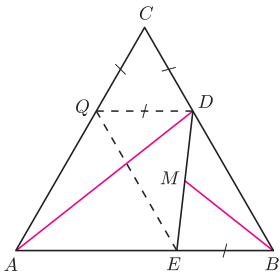


**Rozwiązanie zadania M 1094.**  
Niech  $f(0) = a$ . Wstawiając  $x = 0$  do danego równania, otrzymujemy  $f(a) = \frac{1}{2}a$ . Wstawiając z kolei  $x = a$ , dostajemy  $f(\frac{1}{2}a) = \frac{1}{2}a$ . Wstawiając wreszcie  $x = \frac{1}{2}a$  do wyjściowego równania, uzyskujemy  $2a = a + \frac{1}{2}a$ , skąd  $a = 0$ .

Przypuśćmy teraz, że  $f(b) = 0$ . Wstawiając  $x = b$  do danego równania, mamy  $4f(0) = b$ , a skoro  $f(0) = 0$ , więc  $b = 0$ .



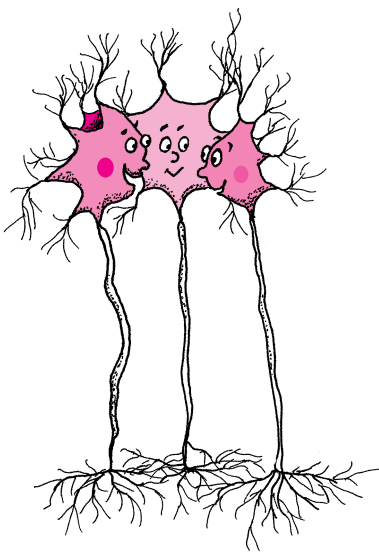
**Rozwiązanie zadania M 1095.**  
Niech  $Q$  będzie takim punktem leżącym na boku  $AC$ , że trójkąt  $CDQ$  jest równoboczny.



Wówczas czworokąt  $BDQE$  jest równoległobokiem. Zatem

$$BM = \frac{1}{2}BQ = \frac{1}{2}AD,$$

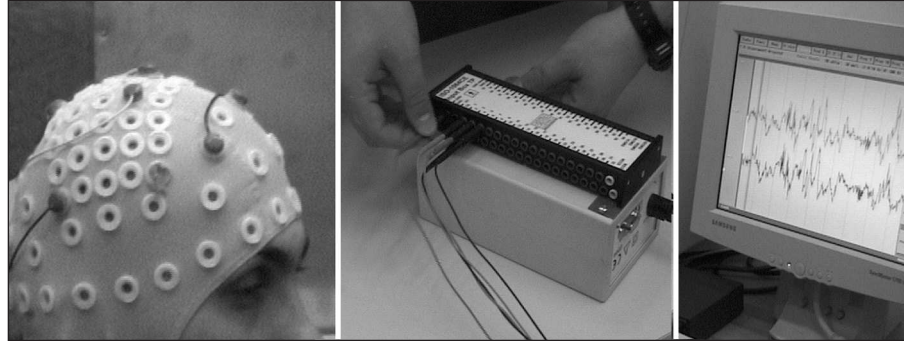
czego należało dowieść.



## Elektroencefalogram

Nazwa elektroencefalogram zawiera greckie słowo *enkephalo* – mózg.

Do pomiaru EEG (zdj. 4) wykorzystuje się wyspecjalizowane urządzenia w postaci wielokanałowych mikrowoltomierzy. Przez wiele lat EEG było zapisywane na papierze. Od czasu rozpowszechnienia komputerów dane przetwarzane są z postaci analogowej na cyfrową, a następnie zapisywane na dyskach komputerowych i przeglądane na ekranie monitora. Zapis cyfrowy umożliwił także rozwój różnych metod analizy korzystających z algorytmów numerycznych.



Rys. 4. Pomiar EEG. Pacjent ma założony specjalny czepek zapewniający stabilne umocowanie elektrod. Przestrzeń pomiędzy elektrodami i głową jest dodatkowo wypełniona przewodzącą pastą. Elektrody są podłączone do wielokanałowego mikrowoltomierza. Mierzone sygnały są obrazowane i zapisywane za pomocą komputera.

### Pomiar

Potencjał generowany przez prądy powstające w wyniku działalności kory jest zbyt niski, aby możliwe było zmierzenie potencjału w wybranym miejscu na głowie. Pomiar zostałby zdominowany przez znacznie silniejszy sygnał elektryczny pochodzący od serca. Dlatego dokonuje się pomiarów różnicy potencjału pomiędzy elektrodami umieszczonymi na głowie.

Wyróżnia się dwa standardowe sposoby pomiaru: pomiędzy dwiema elektrodami umieszczonymi nad korą mózgową (w obszarze zainteresowania), tzw. odniesienia bipolarne, lub pomiędzy elektrodą umieszczoną nad korą a elektrodą odniesienia umieszczoną w miejscu bliskim, pozbawionym wpływu potencjałów generowanych przez mięśnie i mózg, np. na koniuszku ucha (monopolarne). W ten sposób wpływ czynności elektrycznej serca na obie elektrody jest zbliżony, a ponieważ mierzymy różnicę potencjałów, to wszystko, co zmierzyłyby naraz obie elektrody, zostanie zniwelowane.

Najpopularniejszym sposobem umieszczenia elektrod jest obecnie tzw. standard 10–20, w którym 20 elektrod jest rozmieszczonych w miarę równomiernie (w odstępach około 5 cm) nad korą mózgową. Dodatkowe informacje zapewniają elektrody umieszczone w okolicy mięśni szyi (mierząc elektromiogram – czynność elektryczną mięśni), w pobliżu serca (czyli pomiar elektrokardiogramu – EKG), oraz w pobliżu gałek ocznych, które mają nierównomiernie rozmieszczony ładunek elektryczny i ich ruch powoduje zmiany potencjału (elektrookulogram).

Aby wyeliminować zewnętrzne zakłócenia, pomiary EEG często wykonuje się w pomieszczeniach ekranowanych (tzw. klatkach Faradaya).

Jak wygląda pomiar EEG, Czytelnik może zobaczyć w krótkim filmie umieszczonym w Internecie pod adresem: <http://wigner.fuw.edu.pl/~wjedr/peeg.html>.

### Najważniejsze rytmy

Sygnał EEG jest z reguły bardzo złożony i składa się z wielu fal o różnej częstotliwości. Podczas badań EEG sklasyfikowano kilka głównych rytmów, które w zależności od stanu kory mózgowej zwiększają bądź zmniejszają swoją amplitudę (tabela na następnej stronie).



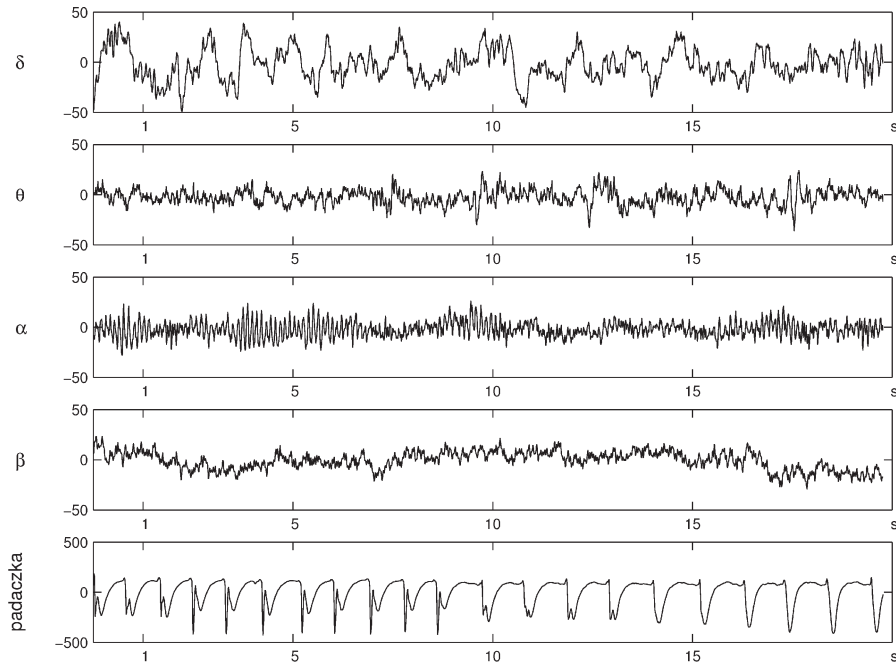
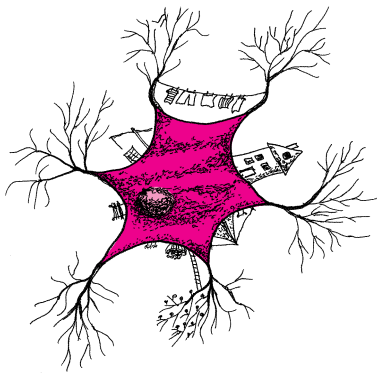
### Rozwiązanie zadania F 642.

Podczas kondensacji i krystalizacji woda oddaje ciepło utajone przemiany. Należy więc oczekiwać, że powietrze po przekroczeniu wysokości kondensacji będzie cieplejsze niż w poprzednim zadaniu, a więc po utracie całej wilgoci będzie miało na danej wysokości mniejszą gęstość niż powietrze suche od początku. To zaś oznacza, że wysokość, na którą się wzniesie, będzie większa.

$\delta$	0,5–4 Hz – głęboki sen
$\theta$	4–8 Hz – u dzieci, w stanach omdlenia, u zwierząt (gryzoni)
$\alpha$	8–13 Hz – w stanie relaksu przy zamkniętych oczach
$\beta$	13–35 Hz – koncentracja uwagi
$\gamma$	około 45 Hz – analiza informacji (słabo widoczne w EEG z powierzchni głowy)

Podstawowe rytmy występujące w EEG to:  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\delta$  i  $\theta$ .

Co można wyczytać z EEG? Najbardziej znany efekt związany z EEG to odkryte przez Bergera tzw. blokowanie alfa. Gdy człowiek przebywa w stanie relaksu i ma zamknięte oczy, rytm EEG, w obszarze kory wzrokowej, zmienia się z bardzo chaotycznego w wyraźne fale o częstotliwości 8–13 Hz – tzw. fale alfa (rys. 5). Efekt ten związany jest z tym, że kora mózgowa przestaje analizować informacje związane z postrzeganiem. Neurony są wprowadzane w rodzaj jałowego biegu i działają synchronicznie. W efekcie znacznie zwiększa się amplituda fal alfa.



Rys. 5

Jeśli na skutek dysfunkcji neurony zaczną spontanicznie generować impulsy elektryczne, które poprzez synapsy pobudzą pozostałe neurony kory, może nastąpić napad padaczki. Następuje wtedy tak duża synchronizacja wysyłania impulsów, że może dojść do całkowitego zaniku innych rodzajów aktywności i EEG zmienia się bardzo wyraźnie (rys. 5).

### Zastosowania

Wśród metod obrazowania budowy i czynności mózgu pomiar EEG wyróżnia się tym, że jest to metoda nieinwazyjna i nieobciążająca pacjenta żadnym promieniowaniem. Oferuje także największą dostępną rozdzielczość czasową przy badaniach mózgu. Pomiar EEG wykorzystywane są do badania uszkodzeń mechanicznych mózgu (guzów i krwinków), chorób psychicznych, epilepsji, chorób metabolicznych i niektórych wirusowych (np. Creutzfeldta–Jakoba). Jeśli zaś chodzi o czytanie myśli za pomocą EEG, to na razie możliwe jest jedynie badanie wrażeń związanych z prostymi czynnościami motorycznymi. Niektórym naukowcom udało się za pomocą EEG stwierdzić, czy pacjent dopiero wyobraża sobie, czy już naprawdę grozi palcem badającemu.

### Bibliografia

- [1] Gloor P., *Neuronal generators and the problem of localization in electroencephalography: application of volume conductor theory to electroencephalography*, Journal of Clinical Neurophysiology, 2(4):327-354 (1985).
- [2] Niedermeyer E., Lopes da Silva F., *Electroencephalography: Basic Principles, Clinical Applications and Related Fields*, Williams & Wilkins 1999.
- [3] Shepherd G. M., *Neurobiology*, Oxford University Press; 3rd edition (1994).

Autor jest pracownikiem Wydziału Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego.