

Działanie prądu rażeniowego na układ nerwowy człowieka

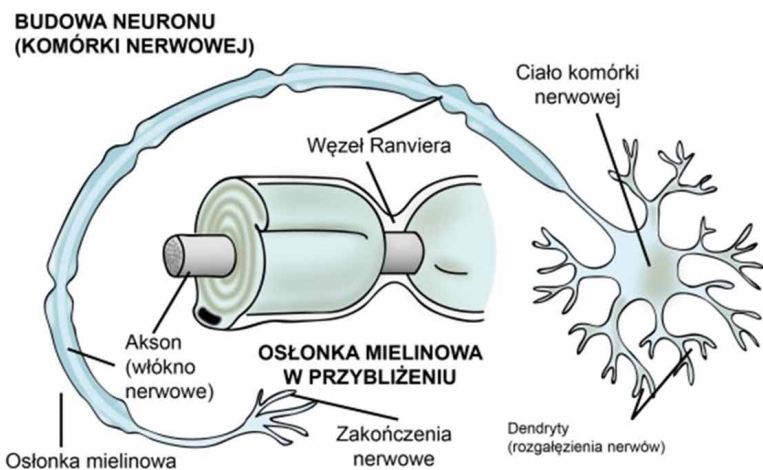
Stefan Gierlotka

Budowa i fizjologia układu nerwowego człowieka

Układ nerwowy człowieka składa się z układu ośrodkowego oraz układu obwodowego. Nadrzędną funkcję nad całością organizmu pełni ośrodkowy układ nerwowy stanowiący mózg i rdzeń kręgowy. Obwodowy układ nerwowy łączy układ ośrodkowy z narządami ustroju oraz receptorami. Pod względem czynnościowym układ nerwowy tworzą włókna nerwowe, które dzielimy na dośrodkowe i ośrodkowe. Włókna dośrodkowe (czuciowe) przekazują bodźce informacyjne z receptorów na powierzchni ciała i z narządów wewnętrznych do ośrodkowego układu nerwowego. Włókna ośrodkowe przewodzą impulsy z ośrodkowego układu nerwowego w odwrotnym kierunku, do efektorów narządów wykonawczych. Efektorami są mięśnie oraz gruczoły.

Budowę układu nerwowego człowieka stanowią komórki nerwowe, zwane neuronami. Neurony różnią się między sobą wymiarami oraz kształtem. U dorosłego człowieka najdłuższe, mające około 1,5 m, zaczynają się w receptorach palucha u nogi, a kończą w rdzeniu przedłużonym.

Neuron zbudowany jest z ciała komórki oraz odchodzących od niego wypustek aksonu i dendrytów. Podstawowym zadaniem neuronu jest odbieranie impulsów przez jego dendryty i przekazywanie ich do zakończeń aksonu. Istotną częścią neuronu jest akson, stanowiący drogę komunikacyjną między komórkami nerwowymi. Spełnia rolę przewodnika elektrycznego i jest otoczony warstwami izolacyjnymi. W zależności od rodzaju, włókna nerwowe są izolowane jedną lub dwiema warstwami osłonek biologicznych. Włókna ośrodkowego układu nerwowego posiadają osłonkę izolacyjną



Rys. 1. Budowa tkanki nerwowej i izolującej otoczki mielinowej

utworzoną przez tzw. komórki glejowe, zbudowane z dielektrycznej substancji tłuszczowo-białkowej, zwanej mieliną. Izolacyjne osłonki mielinowe są zbudowane ze związków glikolipidów i składają się z cukrów, galaktozy i lipidu oraz lecytyny. Włókna obwodowego układu nerwowego posiadają osłonkę izolacyjną utworzoną przez tzw. komórki Schwanna. Osłonka Schwanna, zbudowana z neurolemmocyty, spełnia funkcję ochronną dla aksonu. Jedynie zakończenia nerwów i receptory nie posiadają osłonek izolacyjnych.

Poszczególne komórki nerwowe nie są ze sobą zespolone, a jedynie stykają się ze sobą. Obszar styku pomiędzy neuronami, przez który przemieszczają się impulsy nerwowe, zwany jest synapsą.

Elektryczny przekaz informacji w układzie nerwowym

Zasadniczą czynnością neuronu jest przekazywanie zakodowanych informacji w postaci impulsów nerwowych. Włókna nerwowe są drogami

przewodnictwa jednokierunkowego. Aksony przewodzą impulsy nerwowe tylko w jednym kierunku: od ciała neuronu do zakończenia aksonu. W obrębie zakończeń aksonu następuje przekazanie impulsu nerwowego na inne komórki. Drugi rodzaj neuronów stanowią dendryty, które przewodzą impulsy nerwowe w kierunku do ciała komórki. Ciała neuronów są miejscami metabolizmu i syntezy składników komórkowych.

Przewodzenie impulsów nerwowych przez neurony związane jest z procesami elektrochemicznymi przebiegającymi w ich błonie komórkowej. Bodziec zewnętrzny działający na błonę komórkową neuronu powoduje zwiększenie jej przenikliwości i przemieszczenie się jonów. Do wnętrza neuronów napływają jony sodowe Na^+ , co powoduje wyrównanie ładunków elektrycznych pomiędzy wnętrzem i otoczeniem, czyli depolaryzację błony komórkowej. Podczas depolaryzacji potencjał czynnościowy przemieszcza się wzdłuż błony komórkowej neuronu jako fala depolaryzacyjna,

stanowiąc impuls nerwowy. Prędkość przewodzenia impulsów nerwowych we włóknach nerwowych człowieka (według badań Krauzego M.) wynosi 120 m/s (432 km/godz.) [4].

Przewodzące sygnały włókna nerwowe są izolowane otoczką mielinową, która zapobiega kontaktowaniu się potencjału elektrycznego błony aksonu z otaczającym ją przewodzącym środowiskiem wewnątrzustrojowym. Otoczkę charakteryzuje znaczna wartość rezystancji elektrycznej. Zależnie od stosowanych przez różnych badaczy metod pomiarowych podawana jest w literaturze różna wartość rezystancji otoczki mielinowej od 100 MΩ do 200 MΩ [4].

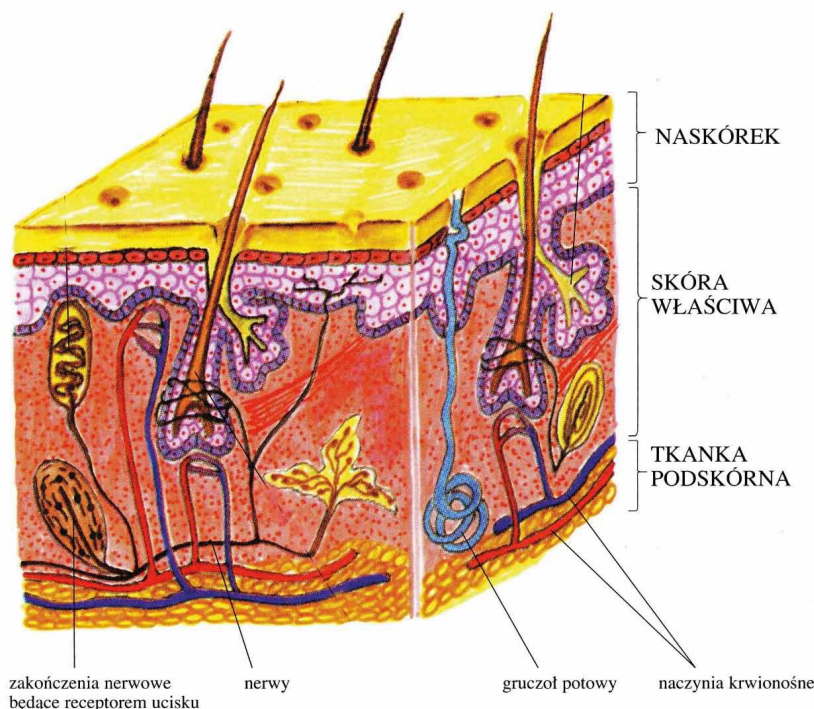
Unerwienie skóry jako miejsca dotyku napięcia rażeniowego

Unerwienie skóry stanowią włókna czuciowe nerwów mózgowo-rdzeniowych, oddziałujące na wydzielanie gruczołów potowych i stan napięcia naczyń krwionośnych w skórze. Narządy czuciowe są rozmieszczone na powierzchni ciała nierównomiernie – gęściej lub rzadziej. Szczególnie mocno unerwione są wrażliwe opuszki palców, a mniej unerwione są odcinki kończyn i grzbiet człowieka. Receptorami czucia są wolne zakończenia nerwowe umiejscowione w warstwie brodawkowej i siateczkowej skóry. Odczuwanie dotyku jest wynikiem podrażnienia zakończeń nerwowych w skórze, czyli receptorów czuciowych (wrażliwe na ból, wibrację, ciepło, zimno i elektryzację).

Odbieranie bodźców zewnętrznych przez receptory skórne i adekwatne reagowanie na nie stanowi czynność odruchową, będącą funkcją ośrodkowego układu nerwowego. Odruch jest odpowiedzią efektora wywołaną przez bodziec działający na receptor. Odpowiedź na bodziec jest odruchem bezwarunkowym. Tak też się dzieje podczas rażenia, przez dotyk powierzchnią skóry do elektrody pod niebezpiecznym napięciem. Rażony odczuwa drętwienie, czyli reakcję odruchową ośrodkowego układu nerwowego.

Reakcje układu nerwowego człowieka na bodźce elektryczne

Prąd elektryczny, przepływając przez organizm żywy, wywołuje w nim zmiany



Rys. 2. Zakończenia i włókna nerwowe w skórze człowieka

biologiczne, które nazywamy porażeniem elektrycznym. Uczucie rażenia ciała człowieka prądem elektrycznym przejawia przez pobudzenie jego receptorów skórnych. Zależnie od wartości natężenia prądu rażeniowego, pobudzającego receptory skórne układu nerwowego człowieka, zachodzą odpowiednie reakcje odruchowe.

Najmniejszą wartość prądu rażeniowego odczuwalną przez człowieka jako mrowienie nazywa się prądem percepcji lub prądem odczuwania. Wartość prądu percepcji u człowieka jest osobniczo zmienna i dla rażeń prądem przemiennym 50 Hz przyjmuje się 0,6 mA dla mężczyzn oraz 0,4 mA dla kobiet. Dla prądu stałego wartość prądu percepcji jest większa i przyjmuje się dla mężczyzn 2,5 mA a dla kobiet 1,5 mA.

W organizmie człowieka istnieją okolice o dużej czułości prądowej, do której zalicza się język, skroń, szyja. Język człowieka, zawsze wilgotny i mocno unerwiony, wyczuwa natężenie prądu o wartości od 0,005 mA.

Wartość natężenia prądu rażeniowego, przy którym reakcja efektora układu nerwowego powoduje skurcz mięśni, nazywa się prądem samouwolnienia. Po przekroczeniu tej wartości natężenia prądu na skutek skurczu mięśni rażony człowiek nie potrafi się samodzielnie oderwać od elektrody. Przyjmuje się dla częstotliwości 50 Hz wartość średnią prądu samouwolnienia 10 mA dla mężczyzn oraz 6 mA dla kobiet.

Wartości natężenia prądu powodujące takie same skutki patologiczne w organizmie człowieka są dla prądu stałego trzy

Tabela 1. Odczucia i reakcja rażenia prądem przemiennym (AC) 50 Hz i prądem stałym (DC)

Reakcja organizmu na prąd rażeniowy	Prąd rażeniowy (mA)	
	przemienny AC	stały DC
Próg odczuwania prądu przez kobiety	0,4	1,5
Próg odczuwania prądu przez mężczyzn	0,6	2,5
Wyczuwalność skurczów mięśni dłoni przez kobiety	1,0	3,5
Wyczuwalność skurczów mięśni dłoni przez mężczyzn	2,0	10
Cierpięcie i skurcz mięśni u kobiet	6	25
Cierpięcie i skurcz mięśni u mężczyzn	10	50

do cztery razy wyższe niż dla prądu przemiennego 50 Hz.

Prąd stały jest odczuwany przez człowieka tylko w chwili załączania i wyłączenia prądu rażeniowego. Zjawisko to występuje w odróżnieniu od prądu przemiennego, gdzie po przekroczeniu granicy prądu percepcji osoba rażona odczuwa elektryzację jako mrowienie czy też drętwienie. W przypadku przepływu przez ciało człowieka prądu stałego rażony doznaje skurczu mięśni, ale nie odczuwa bólu.

Zjawisko powyższe można wytłumaczyć tym, że podczas rażenia prądem przemiennym AC skórnych receptorów układu nerwowego następuje ich ciągła aktywizacja. Natomiast podczas rażenia skórnych receptorów układu nerwowego prądem stałym DC następuje ich polaryzacja i taki stan się utrzymuje w czasie trwania rażenia.

Podczas reakcji prądu rażeniowego na układ nerwowy człowieka najpierw następuje jego pobudzenie, a następnie porażenie. Porażony odczuwa w miejscu dotyku drętwienie i mrowienie oraz utratę uczucia bólu. Stan taki trwać może nawet kilkanaście minut od chwili rozłączenia prądu rażeniowego i jest związany ze spolaryzowaniem układu nerwowego. Z czasem ładunki neutralizują się, a napięcie polaryzacyjne zostaje rozładowane. Powraca wtedy czucie i ustaje drętwienie w okolicy miejsca dotyku do elektrody pod napięciem rażeniowym.

Skutki rażenia układu nerwowego mogą mieć różny stopień nasilenia, począwszy od krótkotrwałego zamroczenia aż do utraty przytomności oraz utraty uczucia bólu.

Podczas głębokich oparzeń ciała łukiem elektrycznym układ nerwowy rażonego ulega uszkodzeniu. W oparzeniach III i IV stopnia następuje uszkodzenie tkanki podskórnej oraz zakończeń nerwów czuciowych. Objawem uszkodzonych zakończeń nerwów czuciowych jest brak odczuwania bólu przez porażonych.

Możliwość przenikania prądu rażeniowego z układu krwionośnego do układu nerwowego

Ponieważ rezystywność tkanki nerwowej jest kilka razy większa od rezystywności krwi, prąd rażeniowy w organizmie

człowieka zazwyczaj przepływa układem krwionośnym, a nie nerwowym. Według literatury rezystywność krwi człowieka wynosi około 150 Ωcm . Zmienność rezystywności krwi uwarunkowana jest między innymi hematokrytem. Wartość rezystywności tkanki nerwowej w literaturze z fizjologii medycznej zależy od autora jest różnie podawana – od 220 Ωcm do 800 Ωcm [1, 3, 4, 6].

Tkanka nerwowa zbudowana z neuronów jest izolowana od środowiska wewnątrzustrojowego przez otoczkę mielinową zbudowaną z komórek Schwanna. Duża wartość rezystancji izolacyjnej otoczki mielinowej stanowi dla prądu rażeniowego przeszkodę wnikań w jej struktury. Jedynie zakończenia nerwów i receptory czucia nie posiadają mielinowej otoczki izolacyjnej i przenikanie bodźców elektrycznych do struktury układu nerwowego jest możliwe.

Wykonane w ramach obserwacji zjawiska pomiary rezystancji wzdłużnej mielinowej warstwy izolacyjnej otaczającej włókno nerwowe wykazały wysoką wartość rezystancji zależną od napięcia pomiarowego. W zakresie zmian napięcia pomiarowego AC 50 Hz o wartości od 15 V do 120 V rezystancja wzdłużna zmieniała wartość od 6000 k Ωcm do 1200 k Ωcm . Badania przeprowadzono *in vitro*, na nerwie układu ośrodkowego, badając rezystancję wzdłużną otaczającej go izolacyjnej warstwy mielinowej.

Przy tak dużej wartości rezystancji izolacyjnej warstwy mielinowej otaczającej włókna układu nerwowego przepływający w organizmie rażonego prąd elektryczny wybierze drogę przepływu w układzie krwionośnym, a nie nerwowym. Jedynie receptory czuciowe, jako nieizolowane tkanką mielinową końcówki nerwów, mogą ulec elektryzacji w miejscu dotyku do elektrody będącej pod napięciem. Zjawisko takie jest odczuwane przez rażonego jako mrowienie, a przy wyższych natężeniach prądu jako drętwienie.

Wcześniejsze, przeprowadzane jeszcze w Związku Radzieckim, badania nad czynnością układu nerwowego wykazały dużą jego wrażliwość na rażenie prądem elektrycznym, o ile powierzchnia dotyku do elektrody zawiera miejsca i punkty zakwalifikowane do terapii akupunktury [6]. Wykorzystywane w medycynie


miejsca do terapii akupunktury posiadają gęsto skupione receptory i końcówki nerwowe.

Wnioski

1. Odbiór bodźców elektrycznych przez układ nerwowy człowieka jest możliwy wyłącznie przez jego zakończenia włókien nerwowych oraz przez receptory skórne.
2. Przenikanie prądu rażeniowego do układu nerwowego człowieka poza receptorami skórnymi uniemożliwia mielinowa otoczka izolująca przewodzące włókna nerwowe.
3. Przeprowadzone pomiary wykazały dużą wartość rezystancji otoczki mielinowej izolującej układ nerwowy od przewodzącego środowiska wewnątrzustrojowego.
4. Wysoka wartość rezystancji izolacji elektrycznej układu nerwowego od środowiska wewnątrzustrojowego powoduje, że w przypadku rażenia prąd wybiera drogę przepływu w układzie krwionośnym jako lepiej przewodzącym.

Literatura

- [1] GANONG W.: *Fizjologia*. PZWL, Warszawa 1994.
- [2] GIERLOTKA S.: *Elektropatologia porażen prądem elektrycznym oraz bezpieczeństwo przy urządzeniach elektrycznych*. Grupa MEDIUM, Warszawa 2015.
- [3] KARCZEWSKI W.: *Zjawiska elektryczne w organizmie*. PWN, Warszawa 1965.
- [4] KRAUSE M.: *Człowiek i jego układ nerwowy*. Wydawnictwo Naukowe Śląsk, Katowice 2002.
- [5] LIPPERT H.: *Anatomia. Tom I*. Wyd. Med. Urban & Partner, Wrocław 1998.
- [6] MANOJŁOW W.E.: *Osnovy elektrobezpasnosti*. Energoatomizdat, Leningrad 1991.
- [7] ZAWADZKI A.: *Medycyna ratunkowa i katastrof*. Wydawnictwo Lekarskie PZWL, Warszawa 2013.

 dr hab. inż. Stefan Gierlotka
Polski Komitet Bezpieczeństwa
w Elektryce SEP