

Akční a sumační potenciály

Akční potenciál

Jako akční potenciál (či **nervový impuls**) označujeme lokální, krátkodobou, výraznou změnu membránového potenciálu, která se šíří po cytoplazmatické membráně buňky jedním směrem. O akčním potenciálu hovoříme nejčastěji v souvislosti s membránou nervových a svalových buněk. Rychlá změna membránového potenciálu (řádově 100 mV) je umožněna tzv. klidovým potenciálem přítomným na membráně v klidu, rozdílem koncentrací iontů především Na^+ , K^+ a Cl^- uvnitř a vně buňky a přítomností četných napěťově ovládaných kanálků pro ionty Na^+ a K^+ . Akční potenciál má význam především v neuronech pro šíření informací po axonech na velké vzdálenosti a ve svalových buňkách a vláknech k ovládnutí napěťově řízených Ca^{2+} kanálků a umožnění svalového stahu.

Napěťově ovládané iontové kanály

Iontové kanály jsou penetrující membránové proteiny umožňující průchod nabitých částic (většinou iontů Na^+ , K^+ , nebo Ca^{2+}) skrze buněčnou membránu. Konkrétně napěťově ovládané iontové kanály reagují velmi citlivě na změny membránového potenciálu a při jeho snížení či depolarizaci velice rychle mění svou konformaci. Tímto mechanismem mohou během zlomků milisekund změnit svou propustnost pro ionty o několik řádů. Iontové kanály jsou velice selektivní zprostředkovatelé transmembránového transportu. Pravděpodobnost, že by specifickým iontovým kanálem prošel kation jiného prvku, se blíží nule. Natriové kanály velice rychle reagují již na relativně slabší pokles záporného náboje (membránový potenciál okolo -55 mV) na vnitřní straně membrány. Kaliové kanály reagují až na velmi pozitivní náboj uvnitř buňky a otevírají se i zavírají pomaleji. To má velký význam při repolarizaci membrány, kdy natriové kanály jsou již zavřeny, avšak kaliové stále propouštějí draselné kationty ven z buňky po koncentračním spádu. Je důležité si uvědomit, že difuze kladně nabitých iontů po koncentračním spádu je pasivní děj a nevyžaduje tedy dodání energie v podobě ATP ani přenašečové proteiny.

Membránový a klidový potenciál

Jedná se o rozdíl elektrického napětí na vnitřní a vnější straně cytoplazmatické membrány buňky za fyziologických klidových podmínek. Je dán rozdílnou koncentrací iontů různých prvků vně a uvnitř buňky. Veliké rozdíly nacházíme v koncentracích iontů Na^+ , K^+ , Cl^- a především Ca^{2+} , dále pak v koncentracích záporně nabitých bílkovin, viz tabulka.

Iont	Intracelulární koncentrace [mmol/l]	Extracelulární koncentrace [mmol/l]
Na^+	12	145
K^+	155	4
Ca^{2+}	10^{-8} až 10^{-7}	2
Cl^-	4	120
HCO_3^-	8	107
Bílkoviny (A^-)	120	0

Membránový potenciál můžeme tedy chápat jako rovnovážný vztah koncentrací nabitých iontů uvnitř a vně buňky. Rozdíly koncentrací jsou způsobeny především rozdílnou propustností membrány pro různé ionty. Například pro K^+ i Na^+ existují iontové kanály, které jsou však za klidových podmínek uzavřeny, velké bílkovinné a záporně nabitě molekuly nejsou schopny za fyziologických podmínek procházet pasivně membránou i přes přitažlivé síly působící na ně díky jejich elektrickému náboji z vnějšku buňky. Z aktivních mechanismů udržujících koncentrační spád iontů hraje asi nejvýznamnější roli transmembránový přenašeč Na^+/K^+ ATP-áza přenášející za spotřeby ATP **3 ionty Na^+** do extracelulárního prostoru výměnou za **2 ionty K^+** transportované do buňky. Klidový membránový potenciál většiny buněk v těle se pohybuje v rozmezí -30 až -90 mV, přičemž vnitřní povrch cytoplazmatické membrány nese záporný náboj, vnější povrch pak náboj kladný. Veliké úsilí na udržení tohoto membránového potenciálu kolem -70 až -90 mV vynakládají především neurony a elementy svalové tkáně.

Fáze akčního potenciálu

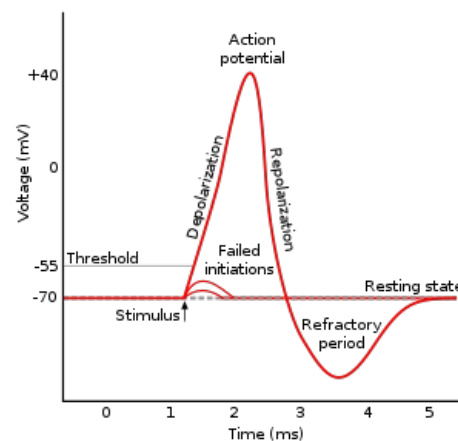
1. Stimulace a vznik akčního potenciálu (depolarizace membrány)

Pro vznik akčního potenciálu musí být splněno několik podmínek. Především musí stoupnout membránový potenciál ze standardních cca -75 mV na hodnotu kolem -55 mV, aby procento otevřených napěťově ovládaných natriových kanálů vytvořilo dostatečný tok kationtů do buňky. Splnění této podmínky závisí na počtu a síle pozitivních a negativních stimulací na synapsích s jinými neurony a na sčítání těchto stimulů na specializované části axonu označované jako iniciální segment. Délka ani síla stimulace nemá vliv na následnou amplitudu akčního potenciálu, avšak má vliv na latenci mezi přijmutím stimulu a vznikem akčního potenciálu a četnost vzniku akčního potenciálů (delší a silnější stimulace vyvolá větší počet četněji a rychleji vznikajících akčních potenciálů). Vznik akčního potenciálu tedy probíhá podle doktríny "**vše nebo nic**" – neexistuje podnět, který by vyvolal poloviční nebo dvojnásobný akční potenciál. Zadruhé musí existovat jistá prodleva mezi touto stimulací a posledním vznikem akčního potenciálu. Pokud jsou obě tyto

podmínky splněny, dochází ke vzniku akčního potenciálu. Tomuto jevu se v angličtině říká "fire", v češtině někdy "odpal" neuronu. Pokles potenciálu způsobí otevírání více natriových kanálů, což způsobí silnější depolarizaci membrány a to opět otevírání více kanálů pro sodné ionty. Ve výsledku se membrána stává výrazně propustnou pro sodné ionty, což má za následek jejich rychlou difuzi do intracelulárního prostoru a velice rychlý růst membránového potenciálu. Zároveň se při silné depolarizaci začnou otevírat napětově ovládané kaliové kanály, draslík tedy začíná již v této fázi proudit ven z buňky a obnovovat tak původní membránový potenciál. Obrovské kvantum otevřených natriových kanálů však tento efekt převáží. V závěru této fáze začíná rychlost depolarizace klesat, protože koncentrace sodných kationtů v blízkosti vnitřního a vnějšího povrchu membrány jsou již téměř vyrovnány a pomalu začíná být signifikantní prostup draslíku ven z buňky díky zvyšujícímu se počtu otevřených kaliových kanálů. Doba od začátku stimulu po vznik silného akčního potenciálu (tedy doba první fáze) může být velice variabilní a závisí na mnoha faktorech (intenzita stimulu, druh buňky produkující akční potenciál, teplota, koncentrace iontů v intracelulárním a extracelulárním prostoru atd.). Obvykle je však menší než 1 ms.

▪ 2. Vrchol a fáze repolarizace

Okamžiku, kdy jsou sodné kanály maximálně otevřeny, bylo přetransportováno maximum sodných kationtů a membránový potenciál dosáhl maximální hodnoty, označujeme jako tzv. "peak", což lze volně přeložit do češtiny jako "vrchol" depolarizace. V této fázi ovšem ten samý nárůst membránového potenciálu, který na počátku otevřel natriové kanály, je začne pomalu a relativně dlouhodobě uzavírat (inaktivace napětově ovládaných natriových kanálů). Naopak se velmi rychle zvyšuje počet otevřených kanálů pro transport K^+ , což způsobuje stále intenzivnější difuzi těchto kationtů ven z buňky. Kombinace uzavření natriových kanálů a otevření kaliových kanálů v důsledku způsobí rychlý pokles membránového potenciálu až k původní hodnotě kolem -70 mV.



Akční potenciál

▪ 3. Hyperpolarizace membrány

Velký nárůst membránového potenciálu v prvních dvou fázích otevřel obrovské množství kaliových kanálů. Problém je, že některé z těchto kanálů se nestihnou uzavřít okamžitě po dosažení klidového potenciálu. Obvykle tak nastává jev označovaný jako hyperpolarizace membrány, při kterém klesá membránový potenciál až k hodnotám okolo -100 mV. Jakmile se uzavřou všechny kaliové kanály, vrací se hodnota membránového potenciálu zpět na -70 až -90 mV.

▪ 4. Refrakterní fáze

Jako refrakterní fáze se označuje období, ve kterém nemůže dojít k opětovnému vzniku akčního potenciálu nezávisle na síle stimulace. Tento fenomén je způsoben inaktivací sodných kanálů během 2. fáze a trvá většinou pouze několik málo milisekund po vzniku akčního potenciálu. Tato vlastnost natriových kanálů má také velký význam pro šíření akčního potenciálu po axonu, protože zabraňuje šíření signálu v opačném směru, ke kterému by bez dlouhodobé inaktivace docházelo.

Během všech těchto fází zároveň probíhá obnovování vysoce rozdílných koncentrací kationtů v extracelulárním a intracelulárním prostoru. Na tomto ději má největší zásluhu tzv. Na^+/K^+ ATP-áza, přenášející za spotřeby ATP 3 ionty Na^+ do extracelulárního prostoru výměnou za 2 ionty K^+ transportované do buňky. Činnost tohoto enzymu není vyžadována nárazově, protože každé vytvoření akčního potenciálu znamená přesun asi jen 1/100000 kationtů.

Šíření akčního potenciálu

Hlavními limitujícími faktory pro šíření digitálního signálu (což akční potenciál ve své podstatě je) bývají rychlost šíření, maximální frekvence změn signálu za sekundu a ztráty síly a kvality signálu během cesty. Akční potenciál se šíří po axonu beze ztrát (bez dekrementu) díky neustálé aktivní amplifikaci. Maximální frekvence vyvolávání akčních potenciálů na axonu se pohybuje kolem 30-50 Hz, může však dosáhnout až 500 Hz. Rychlost šíření signálu po axonu je v lidském těle velmi variabilní a pohybuje se od 0,1 m/s do 120 m/s. Velký vliv na rychlost šíření má především myelinizace axonu.

▪ Saltatorní způsob šíření

Uplatňuje se pouze u myelinizovaných axonů. Signál se nešíří kontinuálně po membráně axonu, ale přeskakuje mezi jednotlivými Ranvierovými zářezy mezi Schwannovými buňkami. Tento způsob šíření signálu způsobuje kromě zvýšení rychlosti šíření signálu i výrazné snížení energetické náročnosti celého procesu, což je při spotřebě energie nervového systému člověka (cca 20 % celkového energetického výdeje) velice signifikantní.

Sumační potenciál

Samotný akční potenciál lze zkoumat jen v laboratorních podmínkách na preparátech in vitro, kde máme prostředky pro dostatečně jemné a přesné snímání signálu z intracelulárního prostoru jediné buňky. Další úroveň, akční potenciály motorické jednotky, můžeme zachytit při EMG vyšetření jemnou jehlovou elektrodou (snímá

signály z oblasti velké řádově zlomek mm³).

V běžné diagnostice sledujeme akční potenciály na úrovni tkání či orgánů a hovoříme o tzv. sumačním potenciálu. **Sumační potenciál vychází z celého orgánu, nikoli z 1 buňky jako potenciál akční.** Snímaný biosignál je váženým součtem akčních potenciálů od množství různých buněk, které se šíří extracelulárním prostorem – ten si v tomto případě můžeme představit jako množství elektrických rezistorů. Z takového modelu můžeme odvodit výsledný biosignál jako přibližný vážený aritmetický součet signálů jednotlivých buněk.

Princip váhování: Signál z bližších buněk bude zachycen s větší amplitudou v porovnání s utlumenými signály vzdálenějších buněk – existuje výrazná závislost váhy na vzdálenosti a signál se nešíří daleko, proto "near field". Naproti tomu signál EKG se šíří z myokardu do celého těla bez znatelného útlumu – jeho amplituda bude prakticky stejná, ať bude snímán např. z blízkosti ramene anebo zápěstí. V tomto případě jsou váhy vyrovnané a potenciály se šíří tělem na velkou vzdálenost bez znatelného útlumu, proto "far field". Výsledkem váhování potenciálů je, že naměřené hodnoty sumačních biosignálů nejsou řádově vyšší, než jsou amplitudy akčních potenciálů, které je působí.

Speciální příklad: Elektromyogram snímáný plošnou elektrodou je typickým sumačním potenciálem, kdy se překrývá množství signálů z velkého množství buněk. Jeho frekvenční spektrum je v oblasti stovek až tisíců Hz. Tak silný signál není možné přímo zapisovat na papír, a tak jej lékař sleduje na obrazovce nebo je možnost převést jej na akustický signál.

Využití sumačních potenciálů v medicíně

Elektrodiagnostika se zabývá registrací elektrických potenciálů vznikajících činnostmi excitabilních orgánů a tkání při diagnostických vyšetřeních. Záznam časových změn potenciálů můžeme sledovat nejen na membráně buněk (svalových, nervových), ale i na povrchu těla, a to buď v unipolárním nebo bipolárním uspořádání. Unipolární uspořádání – 1. elektroda přiložena k dané tkáni, 2. elektroda referenční o stálém potenciálu. Bipolární uspořádání – obě elektrody aktivní, přiloženy na různá místa téže tkáně.

Diagnostické metody využívající hodnocení sumačních potenciálů:

název vyšetření	zkratka	cíl vyšetření
elektrokardiografie	EKG	srdeční činnostní potenciály
elektroencefalografie	EEG	mozkové činnostní potenciály
elektrokortikografie	ECG	mozkové činnostní potenciály
elektromyografie	EMG	svalové činnostní potenciály
elektrogastrografie	EGG	potenciály hladké svaloviny žaludku
elektroretinografie	ERG	sítnicové činnostní potenciály
elektrohysterografie	EHG	děložní činnostní potenciály

Odkazy

Související články

- Biosignály z pohledu biofyziky
- Akční potenciál
- Iontové pumpy
- Membránový potenciál a jeho změny

Zdroj

- ALBERTS, BRAY, JOHNSON, LEWIS, RAFF, ROBERTS, WALTER,. *Essential Cell Biology*. 1. vydání. Garland Publishing, 1998. 630 s. ISBN 80-902906-0-4.
- NAVRÁTIL, Leoš, Jozef ROSINA a KOL.. *Medicínská biofyzika*. 1. vydání. Grada, 2005. 524 s. ISBN 80-247-1152-4.
- HEŘMAN, Petr. *Biosignály z pohledu biofyziky*. 1. vydání. Praha : Dúlos, 2006. 63 s. ISBN 80-902899-7-5.