

## Model neuronu s možností samoorganizace\*

JIŘÍ MACKŮ, PAVEL NÁDVORNÍK, TIBOR VESELÝ

Je navržen elektronický model neuronu, jehož vlastnosti vystihují věrněji dnes předpokládané vlastnosti skutečného neuronu, než modely dosud popsané. Nejdůležitější vlastností nového modelu jsou jeho autoorganizační schopnosti, umožněné jeho pamětí, které ovlivňují podle zpracovávaných signálů jeho práh a dovoluují samovolnou reorganizaci sítě z původní monistické na dualistickou.

### ÚVOD

Snahy po modelování vlastností nervové soustavy směřovaly doposud především k hledání vhodných zapojení známých elementárních prvků a nikoliv k vývoji prvků nových vlastností. Tato cesta je pochopitelným důsledkem výzkumných metod v oboru samočinných počítačů, kde se kvalitativních změn zařízení dosahuje převážně jen kvantitativním zmnožením elementárních funkcí stroje, a to buď jejich řazením paralelním, tj. zvýšením počtu prvků, nebo sériovým, umožněným zrychlením činnosti. Tato cesta však může vésti k realizaci dokonalejší samoorganizující se soustavy jedině při dosažení značné složitosti zařízení, které se pak vždy bude funkčně i strukturálně zcela lišit od nervové soustavy a nemůže tedy sloužit jako její model.

Správnější cestou při modelování činnosti nervové soustavy za účelem zkoumání jejích vlastností, a nikoliv pro pouhé napodobování jejího chování, je patrně sestavování sítě z prvků, jejichž vlastnosti se podobají vlastnostem prvků nervové soustavy, neuronů, více než jednoduché spínací prvky s proměnnou vstupní citlivostí, které dnes většinou slouží jako modely neuronu. Pokus o jejich vývoj je předmětem naší práce.

\* Předneseno na semináři hlavní problémové komise pro kybernetiku v biologii a lékařství při ministerstvu zdravotnictví, konaném v Praze ve dnech 22. a 23. dubna 1965.

Z podrobnějšího neurofyziologického rozboru vlastností neuronu se jeví pravděpodobným, že většina hlavních funkcí neuronu, jako prvku pro zpracování informace, je řešena analogově a číslíkový kód je využíván v nervové soustavě pouze pro dálkový přenos signálu [1]. Logické funkce se na analogovém principu realizují především v synapsích a v těle neuronu, kde dochází po číslíco-analogovém převodu spojeném s časovou sumací, k rozlišení vstupního signálu podle jeho účinku na excitační nebo inhibiční, a k uplatňování váhy a prostorové sumace signálů. V síti, mající schopnosti autoorganizace, která je především předmětem zájmu neurokybernetiky, pak musí být prvky s paměťovými schopnostmi. Paměť, která podle zpracovávaných informací mění propustnost sítě, se přisuzuje dnes rovněž synaptickým vstupům neuronu [2]. Synapsi je proto nutno modelovat podstatně jiným způsobem než doposud, neboť pro znázornění všech uvedených vlastností je třeba aktivních prvků se složitějšími vlastnostmi, než mají dnešní modely pokoušející se většinou funkce synapse vystihnout jen jednoduchým integračním RC obvodem. Tento obvod ovšem všechny potřebné úkony nemůže plnit, zvláště pokud jde o schopnost samoorganizace.

Model neuronu s aktivními prvky vhodných vlastností ve funkci synapsi a synaptickou pamětí, která podle zpracovávaných signálů postupně zvyšuje propustnost prvku, se svými vlastnostmi může dobře blížit skutečnému neuronu. Zásadní potíž nastane teprve při pokusu sestavit z těchto prvků výchozí difúzní síť, kdy je třeba volit poměr počtu excitačních a inhibičních synapsí a jejich vzájemné propojení. Tím je nutno predeterminovat uspořádání sítě, které nutně ovlivní její zásadní vlastnosti, a to bez ohledu na další autoorganizační proces. Tomuto nedostatku by bylo možno se vyhnout volbou synapsí jednotných vlastností, např. monistického charakteru podle Vvedenského, kdy každá synapse při nízkých intenzitách podnětů působí excitačně, při vyšších tlumivě [3]. Nedostatkem této koncepce však je, že monisticky organizovanou síť připouštějí neurofyziologové pouze u primitivních forem, kdežto vývojově dokonalejší sítě jsou patrně vždy dualistické [4].

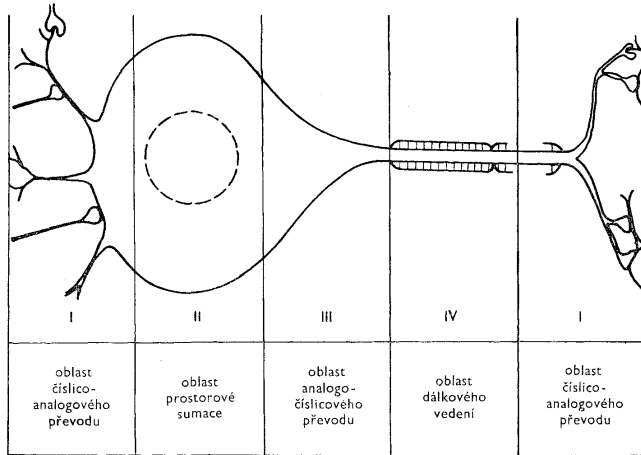
V této fázi se nabízí jako výhodné takové řešení modelu neuronu, aby součástí jeho samoorganizačních schopností byl přechod z povahy monistické na dualistickou. Původně monistická difúzní síť sestavená z takto řešených prvků se pak vývojem může změnit na dualistickou, organizující se zcela samovolně podle intenzit podnětů. Byl učiněn pokus nalézt přenosové charakteristiky prvku, který by měl naznačené vlastnosti, a realizovat jeho elektronický model.

#### REALIZACE ZÁKLADNÍCH OBVODŮ NAVRŽENÉHO MODELU

Celý model je rozdělen na funkční části, shodné s funkčními oblastmi skutečného neuronu (obr. 1). Jsou to číslíco-analogový převodník, v neuronu realizovaný v synapsích (I), část, ve které probíhá podobně jako v těle nervové buňky a v dendritech

prostorová sumace signálů (II), dále část s funkcí analogo-číslicového převodu, který v neuronu probíhá v iniciálním segmentu (III), a konečně část převádějící signál k dalšímu neuronu, analogickou axonu neuronu (IV).

Tento poslední díl nebyl zvláště modelován neboť časové zpoždění, které je patrně jediným účinkem axonu na signál, nebylo považováno pro zpracování informace

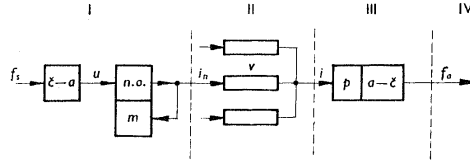


Obr. 1. Schéma hlavních funkčních dílů neuronu z hlediska zpracování informace.

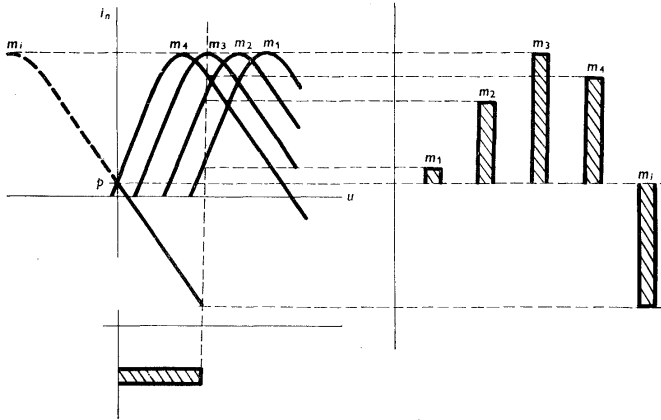
v této fázi za významné. Pro vykonání ostatních funkcí je v modelu určeno několik zvláštních prvků (obr. 2): ve vstupní části I je to číslico-analogový převodník  $\check{c}-a$  a nelineární obvod  $n. o.$  s pamětí  $m$ ; dále díl II, ve kterém dochází podle vah v jednotlivých „synapsích“ ke sčítání jejich účinků, a konečně v části III analogo-číslicový převodník  $a-\check{c}$  s danou vstupní citlivostí  $p$ , určenou hodnotou prahového vstupního signálu, od které k převodu dochází.

Pozornost byla zaměřena především ke vstupní části modelu, která musí přiváděnou informaci v impulsním kmitočtovém kódu  $f_s$  převést na analogový signál  $u$ , a smysl i citlivost tohoto převodu samočinně nastavit podle časové sumy dříve zpracovávaných signálů. Těchto vlastností lze dosáhnout, jestliže si přenos  $i_n = f(u)$  části  $n. o.$  v modelu představíme podle zvonové křivky ( $m$  v obr. 3) [5]. Vzrůstající intenzita vstupního signálu vyvolává po dosažení prahové hodnoty na výstupu nejprve vrůst výstupní veličiny, při vyšších hodnotách její pokles a přechod hodnoty na inverzní. Model má tedy v tomto prvotním stavu v podstatě vlastnosti monistického prvku podle Vvedenského [3].

Aby přenos prvku mohl určovat autoregulační schopnosti, není poloha přenosové charakteristiky konstantní. Účinkem sumy výstupních signálů  $i_n$  ukládaných s urč-



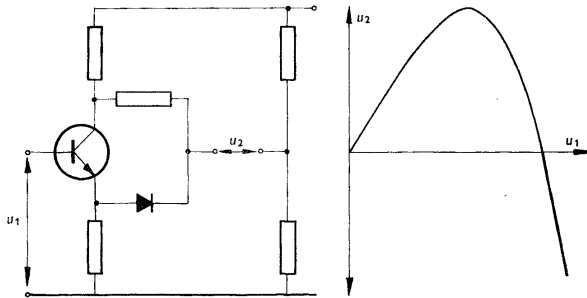
**Obr. 2.** Blokové schéma částí modelu neuronu. I — model synapse, II — model oblasti prostorové sumace, III — model analogo-číslicového převodníku, IV — vedení výstupního signálu;  $\zeta-a$  vlastní číslico-analogový převodník,  $n.o.$  — nelineární obvod vytvářející tvar přenosové charakteristiky,  $m$  — paměťový prvek,  $v$  — prvky pro nastavení váhy jednotlivých synapsí,  $a-\zeta$  analogo-číslicový převodník s prahovou citlivostí  $p$ ;  $f_s, f_a$  — vstupní a výstupní kmitočtové modulovaný impulsní signál,  $u$  — analogový signál na vstupu,  $i$  — analogový signál po zpracování modelem.



**Obr. 3.** Přenosové charakteristiky vstupního dílu  $i = f(u)$  pro různé stavy paměti  $m_1$  až  $m_4$  (excitační stavy) a  $m_i$  (inhibiční stav). Naznačen je přenos vstupního signálu  $u$  na výstup  $i_m$ , jak se uplatňuje na vstupu  $a-\zeta$  převodníku s prahem  $p$ .

tou časovou konstantou v paměti  $m$ , se charakteristika posouvá po vodorovné ose k počátku. Tím se zmenšuje práh vstupního signálu, od kterého výstupní veličina začíná dále působit, až v poloze  $m_4$  je práh nulový a citlivost prvku maximální, neboť každý vstupní signál vyvolá reakci. Vymizení vstupního signálu má za následek

pozvolný návrat paměti i přenosu prvku do výchozího stavu. Posune-li se však v důsledku intenzivního a dlouhodobého signálu přenosová charakteristika za polohu  $m_4$ , uplatní se kladná zpětná vazba, ve které je paměťový prvek zapojen, a přenosová křivka se samovolně posune do polohy  $m_5$ , kdy vstupní signál vyvolává na výstupu ihned inverzní, tlumivý signál. Přehledně je důsledek postupně se měnící charakteristiky vstupního prvku na přenos celého modelu synapse naznačen v pravé části



Obr. 4. Podstata zapojení obvodu pro vytváření potřebného přenosu a jeho charakteristika.

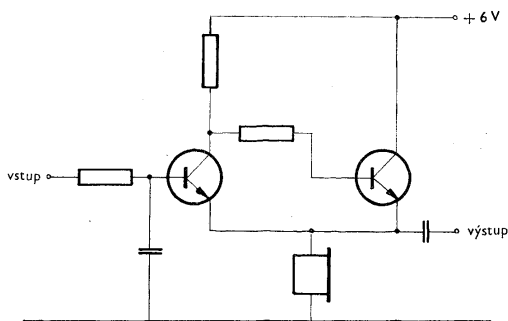
obr. 3. Vstupní skokový signál  $u$  se pro různé stavy paměti  $m$  projeví na výstupu reakcemi  $i_n$  různé amplitudy.

Při návrhu modelu podle naznačených předpokladů se vycházelo z požadavku co největší jednoduchosti s ohledem na potřebu velkého počtu prvků při sestavování rozsáhlejší sítě. Model byl řešen s polovodičovými součástkami, které jsou k těmto účelům nevhodnější. Vstupní číslico-analogový převodník (č-a obr. 2) je řešen, podobně jako u jiných biologických modelů neuronu, jako integrační RC obvod, který je pro lepší využití vstupního kmitočtově modulovaného impulsního signálu konstruován jako diodový integrátor.

Hlavním problémem bylo nalézt obvod, který by umožnil dosáhnout potřebný průběh přenosu vstupního dílu (*n. o.* v obr. 2). K tomuto účelu bylo využito můstkového zapojení s nelineárním prvkem, v jehož funkci se nejlépe osvědčil selenový usměrňovač v propustném směru. Princip zapojení obvodu je v obr. 4. Mezi emitorem a kolektorem symetricky zapojeného a v klidovém stavu otevřeného tranzistoru není žádné napětí a výstupní napětí  $u_2$  proti středu odporového děliče je rovno nule. Pokles vstupního napětí  $u_1$  signálem z integrátoru způsobuje postupné zavírání tranzistoru a symetrický růst kladného a záporného napětí na jeho elektrodách proti potenciálu na středu děliče. Při malých napětích mezi emitorem a kolektorem tranzistoru je v důsledku nelineární charakteristiky odpor usměrňovače veliký a na výstupu

stoupá kladné napětí proudem přes odpor. Při vyšších napětích se odpor usměrňovače zmenší a výstupní napětí prudce klesá až do záporných hodnot. Vhodným předpětím báze tranzistoru lze tuto závislost po ose  $u_1$  libovolně posouvat a dosáhnout žádaného výchozího stavu přenosového prvku.

Hlavní význam tohoto prvku jako stavební jednotky samoorganizující se soustavy se může uplatnit až při použití paměti ( $m$  v obr. 2), která bude vyvolávat v závislosti

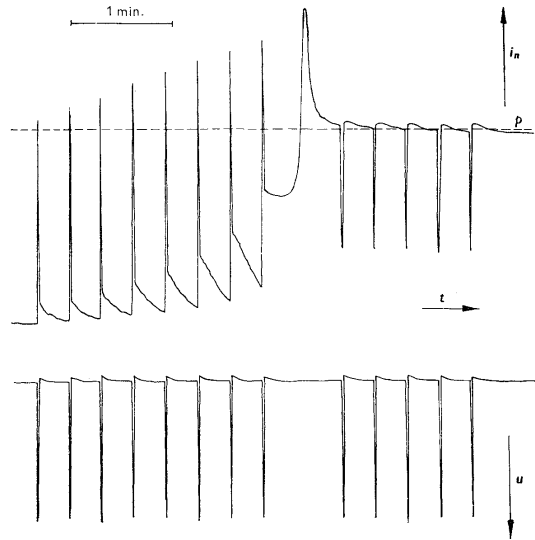


Obr. 5. Schéma převodníku pro přeměnu analogového signálu ve formě stejnosměrného proudu na kmitočet výstupních impulsů konstantní amplitudy.

na změně intenzit předchozích signálů potřebný posun přenosové charakteristiky, způsobující v první fázi zvyšování citlivosti, v druhé fázi přechod k tlumení. V daném obvodu tuto funkci integračního paměťového prvku vykoná odpor zapojený do odporového děliče určujícího předpětí tranzistoru, jehož hodnota se bude měnit úměrně časovému integrálu výstupních pamětí  $u_2$ . Z řady prvků, které byly pro tento účel uvažovány nebo zkoušeny se zatím nejlépe osvědčil nepřímo žhavený perličkový termistor, jehož vyhřívací proud je úměrný napětí  $u_2$ . Tento prvek má pro zapojení do daného obvodu vhodné hodnoty odporů a dostatečnou citlivost. Má v komerční úpravě (45NR11) průběh mizení uložené informace exponenciálního tvaru s časovou konstantou v řádu minut; převedení prvku do inhibičního stavu je ovšem trvalé, neboť se obvod v důsledku kladné zpětné vazby v tomto druhém stabilním stavu sám udržuje.

Další díly modelu byly řešeny již obvyklým způsobem. Oblast prostorové sumace (II v obr. 2) je modelována odporovým součtovým obvodem, u kterého proměnné odpory nastavují váhu jednotlivých synapsí. Velmi jednoduše lze řešit analogo-číslicový převodník ( $a-\epsilon$  v obr. 2) jako Schmittův obvod se dvěma tranzistory a kapacitním vstupem (obr. 5). V klidu je první tranzistor uzavřen, druhý otevřen. Přivedeme-li na vstup kladné napětí, přesahující úbytek na společném emitorovém odporu, otevře

se první tranzistor, dojde k překlopení obvodu a vstupní kondenzátor se vybije. Tím se opět skokově obnoví klidový stav a na výstupu se objeví záporný impuls. Jako společného emitorového odporu je použito miniaturního sluchátka pro nedoslýchavé, které jednak indikuje akusticky reakce prvku, jednak v důsledku induktivní-



**Obr. 6.** Časový průběh výstupního signálu modelu synapse ( $i_n$ ) v závislosti na vstupních periodických podnětech ( $u$ ), zaznamenaný čarovým zapisovačem. Každý podnět  $u$ , měřený na výstupu  $\varepsilon$ - $\alpha$  převodníku, odpovídá asi 200 vstupních budících impulsů o kmitočtu 200 Hz.

ho charakteru své impedance zvyšuje amplitudu výstupních impulsů nad hodnotu napětí zdroje.

#### EXPERIMENTÁLNÍ OVĚŘENÍ

Základní funkce modelu jako autoorganizačního prvku byla ověřena měřením časového průběhu výstupního „synaptického“ signálu  $i_n$  v závislosti na periodických vstupních „podnětech“  $f_s$ . Charakteristický výsledek podobného měření zaznamenaného čarovým zapisovačem je v obr. 6. V dolní části obrázku je průběh budícího signálu  $u$ , vytvářeného impulsním průběhem  $f_s$  200 Hz, přiváděným periodicky na

vstup integračního obvodu v intervalech 20 s, vždy po dobu 1 s. V horní části zaznamenaný odpovídající průběh na výstupu „synapse“ ukazuje, jak postupně se plnicí paměť zvyšuje amplitudu signálu  $i_n$  nad prahovou hodnotu (čárkovaná příčka označená  $p$ ). Prvních sedm podnětů vyvolalo zvýšení citlivosti převodu, které je reverzibilní. Osmým podnětem se již prvek převedl do stavu, ze kterého samovolně přechází do druhé stabilní polohy, ve které další podněty již trvale vyvolávají obrácenou reakci (inhibiční působení).

Z uvedených obvodů byl dosud sestaven model jednoho neuronu se třemi synapsi a jedním  $a-\epsilon$  převodníkem, na kterém jsou prováděna další základní měření. Model má všechny předpokládané vlastnosti a lze s ním podle nastavení vah synapsí, stavu jejich paměti a hodnoty prahu  $a-\epsilon$  převodníku realizovat všechny základní logické operace. Autoorganizační schopnost byla ověřena nejen na „synapsích“ (obr. 6), ale též na celém modelu, kdy však je grafický zápis chování modelu obtížný, neboť kmitočty vstupních a výstupních signálů jsou desítky až sta hertzů, kdežto změny probíhají v intervalech minut.

Lze tedy předpokládat, že také síť sestavená z uvedených prvků, která bude moci být pokusně ověřena až bude k dispozici větší počet prvků, bude vykazovat požadované chování, že se totiž původní monistická síť po určité době změní v dualistickou, kdy cesty zpracovávající signály středních intenzit zvýší svou propustnost, a převodní prvky, na jejichž některém vstupu budou působit intenzivní signály, budou cestu všem signálům uzavírat. Otázkou ovšem zůstává, jak dalece je tato naznačená představa o přetváření vlastností synapse v důsledku zpracovávaných signálů při fylogenetickém nebo ontogenetickém vývoji nervové soustavy přijatelná pro současný stav neurofyzologie.

(Došlo dne 29. dubna 1965.)

#### LITERATURA

- [1] Tasaki J.: Handbook of Physiology. Washington 1959, str. 75—121.
- [2] Eccles J. C.: The Physiology of Synapses. Springer, Berlin 1964.
- [3] Macků J., Nádvořník P.: Elektronický model neuronu podle N. I. Vvedenského. Kybernetika 1 (1965) 56—61.
- [4] Bureš J.: osobní sdělení 1964.
- [5] Macků J., Nádvořník P., Veselý C.: Modelování neuronu. Slaboproudý obzor, v tisku.



---

## Model of Neuron with the Possibility of Self-Organizing

JIŘÍ MACKŮ, PAVEL NÁDVORNÍK, CTIBOR VESELÝ

The models of a neuron described so far do not illustrate sufficiently close its true behavior, especially the possibility of self-organizing, first of all because they do not justice to the properties of synapses. The proposed model tries to eliminate this shortcoming by a completely new approach to solving the model of synapsis which has, in its primary state, transmission properties corresponding to a monistic element of the nervous system after Vvedenskij. However in consequence of information concerning the intensity and duration of the signals processed and stored in the memory, this model of synapsis increases its liminal sensitiveness or even reaches an inhibitory character of activity. The net consisting of the neuron model with the proposed design of synapses is able of selforganizing because after a definite period it acquires a dualistic character, and the paths processing signals of medium intensity increase their permeability while the transmission elements close in the presence of intensive signals.

*Inž. Jiří Macků, CSc., Doc. Dr. Pavel Nádvorník, CSc., Dr. Ctibor Veselý, CSc., lékařská fakulta KU, Šimkova 870, Hradec Králové.*