

Винахід відноситься до галузі електричного моделювання електрофізіологічних процесів і може бути використаний в біофізичних і біокібернетичних дослідженнях нейронів та нейронних мереж.

Відомі пристрої для моделювання нейрона, які містять елементи дискретної та аналогової техніки і мають за мету підвищення точності і завадостійкості при моделюванні різних функціональних властивостей нейрона. Наприклад, відомий пристрій для моделювання нейрона (Авт. св. СССР №647698, кл. G06G7/60, 1979), який містить джерела входних імпульсів, суматор, вихід якого через послідовно з'єднані схему порівняння і перетворювач напруги в частоту підімкнений до блоку формувача вихідних імпульсів, перетворювачі частоти в напругу, що містять послідовно з'єднані мультівібратор, інтегратор та узгоджувачий елемент, входи збудження та гальмування.

Проте в цьому пристрої, внаслідок стандартизації входних імпульсів за формою, тривалістю та амплітудою, не враховується відомий електрофізіологічний взаємозв'язок між мінімальною величиною амплітуди та тривалістю входного прямокутного імпульсу струму, що здатний викликати збудження нейрона.

Найбільш близьким до пристрою, що пропонується, є пристрій для моделювання нейрона (Авт. св. СССР №694873, кл. G06G7/60, 1979), який містить групу каналів сигналів збудження, групу каналів сигналів гальмування та одновібратор, вихід якого є виходом пристрою. Канали сигналів збудження та гальмування містять дві групи входних одновібраторів, дві групи керованих генераторів та два суматори. Крім того, пристрій містить реверсивний лічильник, лічильник, генератор вихідних імпульсів.

Проте в цьому пристрої має місце неадекватне природному нейрону перетворення сигналів збудження і гальмування, обумовлене тим, що наявні у пристрої входні одновібратори стандартизують входні імпульси за тривалістю. В результаті цієї стандартизації механізм збудження нейрона не відповідає відомій гіперболічній залежності між амплітудним значенням і та тривалістю  $\tau$  входного прямокутного імпульсу струму, що викликає порогове збудження (співвідношення "сила-тривалість" (Антомонов Ю.Г. Моделирование биологических систем: Справ. - К.: Наук. думка, 1977. - С.132):

$$I = I_0 (\tau_0 / \tau + 1), \quad (1)$$

де  $I_0$  (реобаза) та  $\tau_0$  (хронаксія) - сталі для даного типу нейрона.

Крім того, у пристрої прототипі відсутній функціональний зв'язок між умовою виникнення імпульсу на виході вихідного одновібратора та енергією імпульсів збудження та гальмування на вході пристрою. Причиною цього є наявність у пристрої-прототипі входного одновібратора, який стандартизує входні імпульси за тривалістю, та відсутність блоків, які забезпечували б перетворення енергії входного сигналу в амплітуду вихідного, а також відсутність порогового елемента. Однак відомо, що процес збудження - нейрона є процесом енергетичним за своєю природою, тобто визначальна роль в механізмі збудження нейрона належить енергії, величина якої повинна перевищувати енергетичний поріг збудження. Значення енергетичного порогу пристрою для моделювання нейрона не повинно залежати від параметрів входних прямокутних імпульсів збудження при виконанні співвідношення (1). В основу винаходу поставлено задачу створення такого пристрою для моделювання нейрона, в якому нове виконання каналів сигналів збудження і гальмування та введення нових блоків забезпечує виконання співвідношення "сила-тривалість" для амплітудного значення та тривалості входного прямокутного імпульсу струму, що викликає порогове збудження, а також забезпечує таке функціональне перетворення цих імпульсів, при якому значення порогової енергії збудження є постійним, що адекватно відображає перетворення сигналів збудження і гальмування в природному нейроні.

Поставлена задача вирішується тим, що в пристрій для моделювання нейрона, що містить групу каналів сигналів збудження, групу каналів сигналів гальмування та одновібратор, вихід якого є виходом пристрою, згідно з винаходом, додатково введені послідовно з'єднані суматор та пороговий елемент у вигляді схеми порівняння на більше, а кожний з каналів сигналів збудження та гальмування виконаний у вигляді перетворювача струму в напругу, вихід якого з'єднаний з входом смугопропускного фільтра, вихід якого під'єднаний до двох входів аналогового перемножувача, вихід якого з'єднаний з входом інтегратора зі скиданням, при цьому входи скидання всіх, інтеграторів зі скиданням об'єднані і під'єднані до виходу одновібратора, вхід якого під'єднаний до виходу порогового елемента, виходи інтеграторів зі скиданням каналів збудження під'єднані до прямих входів суматора, інвертуючі входи якого під'єднані до виходів інтеграторів зі скиданням каналів гальмування, входи перетворювачів струму в напругу каналів сигналів збудження та гальмування є входами пристрою, відповідно, для сигналів збудження та гальмування.

Вирішення поставленої задачі новим виконанням каналів сигналів збудження і гальмування та введенням нових блоків визначається наступним.

Величина напруги  $u(t)$  сигналу, що поступає на смугопропускний фільтр після перетворювача струму  $I(t)$  в напругу, дорівнює:

$$u(t) = I(t)R, \quad (2)$$

де  $R$  - коефіцієнт перетворення перетворювача.

Для прямокутного імпульсу-струму амплітудою  $i$  та тривалістю  $\tau$ , які зв'язані між собою співвідношенням (1), спектральна густина енергії прямокутного імпульсу  $u(t)$  на вході смугопропускного фільтра дорівнює:

$$W_1(\omega) = 4I_0^2 R^2 (\tau_0 / \tau + 1)^2 / \omega^2 \sin^2(\omega \tau / 2). \quad (3)$$

Енергетичний спектр сигналу на виході фільтра

$$W_2(\omega) = K(\omega) W_1(\omega), \quad (4)$$

де  $K(\omega)$  - частотний коефіцієнт передачі фільтра за потужністю.

Тоді питома енергія сигналу на виході фільтра

$$E = 4I_0^2 R^2 (\tau_0 / \tau + 1)^2 / \pi \int_0^{\infty} K(\omega) /$$

$$/ \omega^2 \sin^2(\omega \tau / 2) d\omega. \quad (5)$$

Коефіцієнт  $K(\omega)$  повинен забезпечувати стаке значення  $E$  для імпульсів порогового збудження. Звідси отримується інтегральне рівняння для визначення  $K(\omega)$ :

$$\int_0^{\infty} (K(\omega) / \omega^2) \cos(\omega \tau) d\omega = T - E \pi \tau^2 / (2 I_0^2 R^2 (\tau + \tau_0)^2) \quad (6)$$

$$\text{де } T = \int_0^{\infty} (K(\omega) / \omega^2) d\omega.$$

Ліва частина співвідношення (6) представляє собою косинус-перетворення Фур'є. Оскільки для перетворення Фур'є справедливе співвідношення:

$$\lim_{\omega \rightarrow \infty} \int_0^{\infty} (K(\omega) / \omega^2) \cos(\omega \tau) d\omega = 0, \quad (7)$$

$$\text{то } T = E \pi / (2 I_0^2 R^2).$$

Функція  $K(\omega)/\omega^2$  визначається формулою зворотного перетворення Фур'є

$$K(\omega) / \omega^2 = E \tau_0 / (I_0^2 R^2) \int_0^{\infty} (2\tau + \tau_0) /$$

$$/ (\tau + \tau_0)^2 \cos(\omega \tau) d\tau. \quad (8)$$

В результаті коефіцієнт передачі  $K(\omega)$  фільтра за потужністю, який забезпечує, вирішення поставленої задачі, виражається формулою

$$K(\omega) = C x^2 [2g(x) - 1 + xf(x)], \quad (9)$$

де  $C = E / (I_0^2 R^2 \tau_0)$  – сталий коефіцієнт, який характеризує конкретний вид нейрона;

$$x = \omega \tau_0; \quad g(x) = -cl(x) \cos x - sl(x) \sin x;$$

$$f(x) = cl(x) \sin x - sl(x) \cos x;$$

$$cl(x) = - \int_x^{\infty} (\cos t) / t dt; \quad sl(x) = - \int_x^{\infty} (\sin t) / t dt$$

$\tau_0$  – хронаксія з експериментальної електрофізіологічної залежності "сила - тривалість" збудження нейрона.

Частотна характеристика цього коефіцієнта передачі є характеристикою смугопропускного фільтра, у якого центральна частота та смуга пропускання визначаються лише хронаксією.

Таким чином, заявлюваний пристрій для моделювання нейрона забезпечує постійний максимальний рівень сигналу на вході порогового елемента для прямокутних імпульсів збудження, що задовольняють рівнянню "сила - тривалість".

На кресленні подана схема запропонованого пристрою для моделювання нейрона.

Пристрій містить групи 1, 2 із  $n$  каналів сигналів збудження і  $m$  каналів сигналів гальмування відповідно, послідовно з'єднані суматор 3, пороговий елемент 4 у вигляді схеми порівняння на більше та одиниць 5. Кожний з каналів сигналів збудження та гальмування виконаний у вигляді перетворювача струму в напругу 6, вихід якого з'єднаний з входом смугопропускного фільтра 7, вихід якого під'єднаний до двох входів аналогового перемножувача 8, вихід якого з'єднаний з входом інтегратора зі скиданням 9. Входи скидання інтеграторів 9<sub>1</sub> - 9<sub>n+m</sub> об'єднані і під'єднані до виходу одиниць 5, що є виходом пристрою, а виходи інтеграторів 9<sub>1</sub> - 9<sub>n</sub> каналів сигналів збудження та інтеграторів 9<sub>n+1</sub> - 9<sub>n+m</sub> каналів сигналів гальмування під'єднані, відповідно, до прямих та інвертуючих входів суматора 3. Входи перетворювачів 6<sub>1</sub> - 6<sub>n</sub> та 6<sub>n+1</sub> - 6<sub>n+m</sub> струму в напругу є, відповідно, входами пристрою для сигналів збудження та гальмування. Смугопропускний фільтр 7 задається коефіцієнтом передачі за потужністю, який виражається формулою (9).

Пристрій працює таким чином.

Імпульси збудження та гальмування поступають на відповідні входи груп каналів сигналів збудження 1 та гальмування 2, де поступають на входи перетворювачів струму в напругу 6<sub>1</sub> - 6<sub>n+m</sub>, з виходів яких поступають на входи смугопропускних фільтрів 7<sub>1</sub> - 7<sub>n+m</sub>. Після проходження аналогових перемножувачів 8<sub>1</sub> - 8<sub>n+m</sub> та інтеграторів зі скиданням 9<sub>1</sub> - 9<sub>n+m</sub> формуються сигнали, максимальне значення яких пропорційне питомій енергії імпульсів на виході фільтрів 7<sub>1</sub> - 7<sub>n+m</sub>. Амплітудно-частотні характеристики коефіцієнта передачі за потужністю фільтрів 7<sub>1</sub> - 7<sub>n+m</sub> такі, що для прямокутних імпульсів, параметри яких зв'язані залежністю "сила - тривалість", відповідне перетворення імпульсів забезпечує постійність енергії вихідного сигналу незалежно від тривалості вхідного.

З виходів інтеграторів 9<sub>1</sub> - 9<sub>n+m</sub> сигнали поступають на відповідні входи суматора 3 - сигнали збудження на прями входи, а сигнали гальмування на інвертуючі входи суматора 3. З виходу суматора 3 сигнал поступає на пороговий елемент 4 у вигляді схеми порівняння на більше. Якщо цей сигнал перевищить заданий пороговий рівень збудження, на виході порогового елемента 4 з'явиться перепад напруги, який запустить одиниць 5, що сформує "імпульс збудження" - результат дії сигналів збудження та гальмування на вході пристрою. Цей вихідний імпульс скидає інтегратори 9<sub>1</sub> - 9<sub>n+m</sub> у початковий стан.

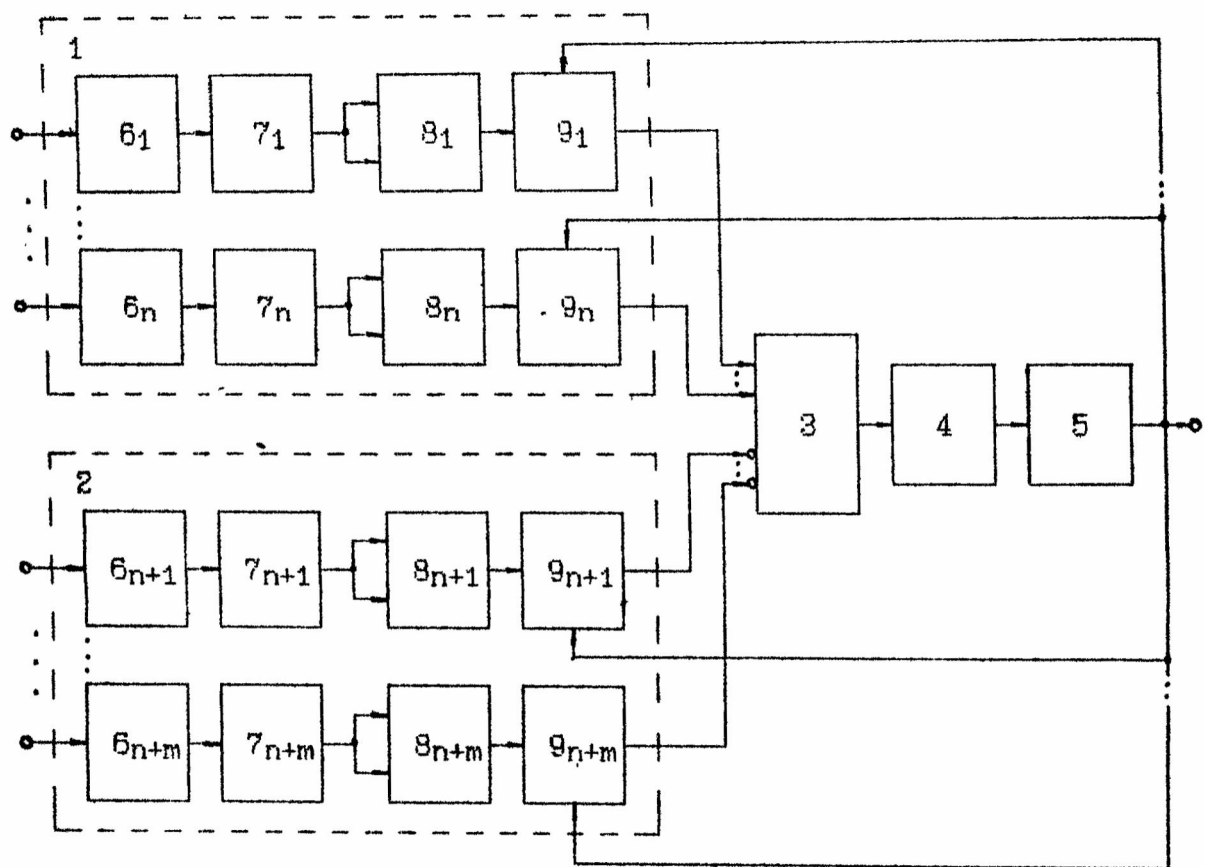


Fig.