

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕЛЕГРАФНОГО УРАВНЕНИЯ ДЛЯ ОПИСАНИЯ РАСПРОСТРАНЕНИЯ НЕРВНОГО ИМПУЛЬСА ПО АКСОНУ ДВИГАТЕЛЬНОГО НЕЙРОНА

Студентка гр.113715 А.И. Бобровская,  
канд. физ.-мат. наук, доцент Ю.А. Бумай

*Белорусский национальный технический университет*

Целью данной работы являлся вывод уравнения для описания распространения потенциала действия (нервного импульса) по аксону двигательного нейрона к мышечному волокну.

Большая часть поверхности аксона покрыта миелиновой оболочка аксона. Миелин играет роль изолятора аксона от внешней среды. Через 1-2 мм оболочка прерывается перехватами Ранвье (~ 1 мкм), в области которых аксон контактирует с внешней средой. Нервный импульс распространяется по аксону за счёт перезарядок ёмкости мембраны в области перехватов Ранвье, причем основную роль в данном процессе играют микротоки между возбуждёнными и невозбуждёнными участками мембраны. Процесс распространения нервного импульса аналогичен распространению электрического сигнала по двухпроводной линии (или коаксиальному кабелю), представляющей собой линию с распределёнными R, C, G, L параметрами и в одномерном случае описывается телеграфным уравнением следующего вида [1]:

$$\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} = LC \frac{\partial^2 U}{\partial t^2} + LG \cdot \frac{\partial U}{\partial t} + RC \cdot \frac{\partial U}{\partial t} + RGU. \quad (1)$$

В случае распространения возбуждения по аксону R представляет собой сопротивление его внутренней среды – аксоплазмы, C – ёмкость биомембраны, G – проводимость биомембраны (в поперечном направлении). Все величины в уравнении (1) рассчитываются на единицу длины аксона, т.е. для  $l = 1$ . В человеческом организме отсутствуют структуры обладающие индуктивностью, поэтому  $L = 0$ . Определим величины R, C, G для аксона:

$$R = \rho_a \frac{1}{S} = \rho_a \frac{1}{\pi r^2}, \quad (2)$$

где  $\rho_a$  – удельное сопротивление аксоплазмы, S – площадь поперечного сечения аксона, r – его радиус. Ёмкость биомембраны C определим через известную из опыта ёмкость на единицу площади  $C_m$ :

$$C = C_m \cdot 2\pi r l = C_m \cdot 2\pi r. \quad (3)$$

Вычислим поперечную проводимость биомембраны  $G$  :

$$G = \left(\rho_m \frac{h_m}{2\pi r}\right)^{-1} = \frac{2\pi r}{\rho_m h_m}, \quad (4)$$

где  $\rho_m$  – удельное сопротивление,  $h_m$  – толщина биомембраны.

Перепишем (1), с учётом (2) – (4):

$$\frac{\partial U}{\partial t} = \frac{r}{2\rho_a C_m} \cdot \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} - \frac{1}{\rho_m h_m C_m} \cdot U. \quad (5)$$

Полученное уравнение (5), описывающее распространения нервного импульса (потенциала действия  $U$ ) по аксону, является уравнением типа диффузии. Из данного уравнения видно, что скорость распространения нервного импульса тем выше, чем выше присутствующий в формуле коэффициент диффузии  $D = r/(2\rho_a C_m)$ , т.е. чем больше радиус аксона, тем меньше внутреннее сопротивление  $\rho_a$ , и меньше ёмкость мембраны  $C_m$ . Уменьшение ёмкости мембраны может быть достигнуто при миелинизации нервных волокон. Известно, что скорость распространения нервного импульса в волокнах с миелином составляет 10–100 м/с, В то время как без миелина – 1–10 м/с.

Отметим также, что уравнение (5) удовлетворительно описывает общие закономерности, касающиеся скорости прохождения нервного импульса, но не учитывает его затухание за счёт потерь энергии на активном сопротивлении аксоплазмы и биомембраны. Кроме того, скорость диффузии уменьшается с расстоянием. В реальном случае при прохождении нервного импульса такого не происходит, так как биологическая среда является не диссипативной (теряющей энергию) а активной средой. В такой среде происходит компенсации потерь энергии за счет распределенных в ней источников энергии. Волны в активной среде являются незатухающими и называются автоволнами.

Таким образом, в данной работе получены уравнения для распространения потенциала действия (нервного импульса) по аксону двигательного нейрона.

#### *Использованные источники*

1. Манаев, Е.И. Основы радиоэлектроники / Е.И. Манаев. – М.: Радио и связь, 1990. – 512 с.