

## Нервный импульс как уединенная волна (солитон)

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
г. Минск, Республика Беларусь

Атрашкова Г.В

Давыдов М.В. – к. т. н., доцент

Создание и изучение моделей человеческого тела невозможно без понимания процессов, происходящих в нем. В данной работе рассмотрен один важнейших, можно сказать, базовых процессов - передача нервного импульса - с точки зрения теории колебаний и волн. Нервный импульс представлен как частицеподобная уединенная волна, солитон.

В 1868 г. Молодой немецкий физиолог Юлий Бернштейн сумел определить форму нервного импульса. Она оказалась колокообразной. Впоследствии выяснилось, что этот «колокол» движется всегда с одной и той же скоростью и имеет приблизительно одну и ту же форму независимо от силы раздражения, породившего импульс.

Если раздражение очень сильное, то выпускается подряд целая «очередь» импульсов. Если оно очень слабое, то импульс по нерву вообще не пойдет. Минимальная сила раздражения называется «пороговой».

Каждый импульс переносит одну единицу информации, и нашим «приемным устройствам» достаточно только считать, сколько таких «элементарных частиц» информации поступило и за какое время.

Следует заметить, что нервный импульс распространяется совсем не так, как ток по проводам, так как нервное волокно очень плохой проводник. Простейшее волокно состоит из сердцевинки, заключенной в мембрану и погруженной в наружную плазму (рис. 1). Внутренняя и наружная плазмы отличаются по составу: снаружи плазма содержит избыток ионов натрия ( $\text{Na}^+$ ) и хлора ( $\text{Cl}^-$ ). Внутри больше ионов калия ( $\text{K}^+$ ) и отрицательно заряженных органических молекул. Мембрана проницаема для ионов  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{K}^+$ , но не пропускает органические молекулы. В спокойном состоянии все процессы уравновешены так, что внутренняя часть волокна содержит избыток отрицательных ионов. При воздействии раздражителя мембрана начинает пропускать внутрь ионы  $\text{Na}^+$  и в месте раздражения напряжение быстро меняется на противоположное и становится равным  $\Phi_{\text{max}}$ . В этот процесс вовлекаются соседние, невозбужденные участки мембраны, на которых потенциал равен  $\Phi_0$ . Под действием разности потенциалов между возбужденным и невозбужденным участками нервного волокна на наружной стороне мембраны возникают локальные токи. Эти токи приводят к образованию и дальнейшему распространению импульса напряжения, который называется потенциалом действия (рис. 2). После прохождения импульса восстанавливается прежнее состояние клетки благодаря тому, что слегка измененные после генерации каждого потенциала действия концентрационные градиенты  $\text{Na}^+$  и  $\text{K}^+$  восстанавливаются за счет работы  $\text{Na}^+$  -  $\text{K}^+$ -насоса.

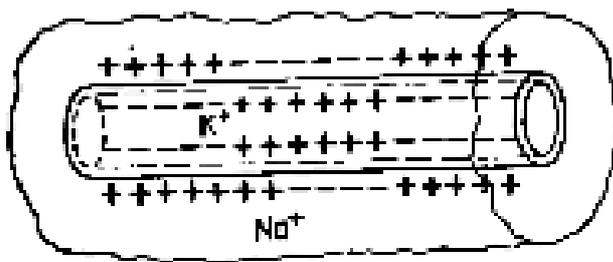


Рис. 1 – строение нервного волокна

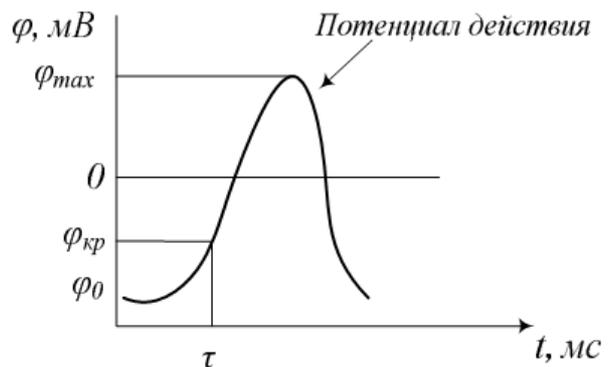


Рис. 2 - Развитие потенциала действия

Импульс может образовываться и распространяться только потому, что в этом устройстве есть нелинейный элемент, который подавляет малые отклонения от нормального состояния и усиливает большие. Если бы нелинейный элемент отсутствовал, то передний фронт импульса (АВ на рисунке 3) начал бы расплываться. Этот произошло бы из-за диффузии ионов через мембрану. Если равновесие нарушено, то диффузия быстро выравнивает концентрации. При этом фронт импульса становится все более пологим, его высота уменьшается, и в конце концов он исчезает. Нелинейная зависимость проницаемости мембраны от величины импульса приводит к тому, что более высокая часть импульса поднимается, а более низкая опускается. Если нелинейность полностью уравновешивает диффузию, фронт импульса может полностью сдвинуться вперед, не изменяя формы (А'В'). Так образуется уединенная волна нервного импульса. Такие волны в физике называют «солитонами».

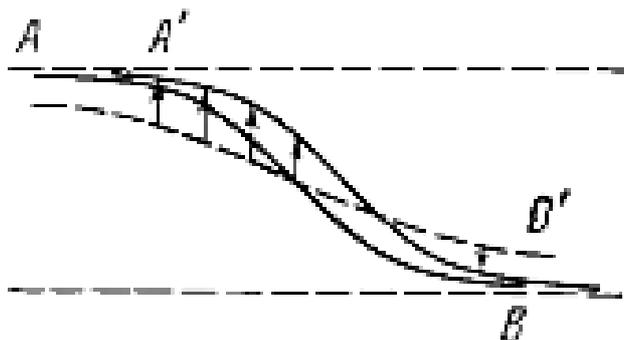


Рис. 3 – изменение переднего фронта импульса

Солитон — структурно устойчивая уединённая волна, распространяющаяся в нелинейной среде. Солитоны ведут себя подобно частицам (частицеподобная волна): при взаимодействии друг с другом или с некоторыми другими возмущениями они не разрушаются, а двигаются, сохраняя свою структуру неизменной. Структура солитонов поддерживается за счёт баланса между действием нелинейности среды и дисперсии.

В нерве для поддержания движения импульса необходимо все время добавлять немного энергии, но эта энергия мала, утомить нерв довольно трудно. Из-за такой «самоорганизованности» импульса, а именно - действия  $\text{Na}^+$  -  $\text{K}^+$ -насоса, эти добавки не искажают форму и не изменяют скорость импульса.

Таким образом, нервный импульс - это особая волна, подобная частице. После раздражения нервного волокна уже ничто не способно изменить возникший импульс, и он неизменным дойдет до наших "приемных устройств". Моделирование этого процесса необходимо при изучении таких методов лечения и диагностики как электростимуляция, электроэнцефалография, электрокардиография и другие.

Список использованных источников:

1. Филиппов А.Т. Многоликий солитон // Издание второе. Переработанное и дополненное – Москва, 1990. – 288 с.
2. Медицинская и биологическая физика // Учебное пособие для студентов специальности «Медицинская электроника» дневной и заочной форм обучения – Минск 2006. - 220 с.