

Модель наноразмерного искусственного нейрона «integrate-and-fire»

М. Куренков, Ю. Матвеев, Д. Негров и А. Зенкевич

Московский физико-технический институт (государственный университет)

Как известно, решение задач, связанных с обработкой некорректных и зашумленных данных классическими цифровыми вычислительными машинами фон Неймана менее эффективно по сравнению с биологическими аналогами. Причина заключается в том, что мозг устроен принципиально иначе по сравнению с компьютером, что позволяет реализовать высокую степень параллелизма, энергоэффективность, адаптивность и возможность самообучения биологических нейронных сетей. Очевидные преимущества живого мозга мотивировали развитие искусственных нейронных сетей, которые пытаются имитировать архитектуру биологических систем. До недавнего времени «узким местом» было отсутствие компактных и энергоэффективных устройств, имитирующих функциональность биологических синапсов и нейронов.

В данной работе проведено моделирование работы простого двухтерминального устройства – искусственного нейрона, обладающего функционалом «интегрировать-и-сработать» по принципу действия биологического нейрона: накапливать входной сигнал, и при превышении им определённого порога выдавать токовый сигнал во внешнюю цепь.

Предлагаемый нейрон представляет собой пятислойную структуру, в которой имеется «плавающий» электрод - не имеющий электрического контакта с внешней цепью слой металла (Рис.1). Этот слой окружён сверхтонким туннельным диэлектриком- с одной стороны, и слой диэлектрика с сильно нелинейной ВАХ- с другой стороны (Рис. 2). При приложении электрического напряжения на структуру «плавающий электрод» заряжается через туннельный слой диэлектрика, и при достижении определенного заряда напряженность поля на слое нелинейного диэлектрика приводит к изменению его проводимости, что ведет к разрядке «плавающего» электрода во внешнюю цепь, т.е. на выходе формируется импульс тока – искомый «спайк». При отсутствии же внешнего напряжения на устройстве сохраненный заряд стекает через туннельный диэлектрик, обеспечивая механизм «забывания». Таким образом, если два входных импульса приходят с небольшой скважностью, то может образоваться спайк, однако, если они приходят через достаточно большое время – спайка не возникнет.

Моделирование поведения предлагаемого нейрона осуществлялось следующим образом. Связь между напряженностью в слоях двух диэлектриков, а также зарядом в «плавающем» электроде находится из закона Гаусса. Таким образом, получаем систему уравнений

$$\begin{aligned} q &= \epsilon_0 (E_1 \epsilon_1 - E_2 \epsilon_2) \\ U &= E_1 * w + E_2 * d \\ q'(t) &= j_2 - j_1 \end{aligned}$$

где q – заряд на «плавающем» электроде, E_1, j_1 - напряженность и ток через туннельный диэлектрик, E_2, j_2 - напряженность и ток через нелинейный диэлектрик, а w и d – соответственно толщина слоев нелинейного и туннельного диэлектриков.

Далее воспользовавшись ВАХ нелинейного диэлектрика, и, считая ВАХ туннельного диэлектрика линейным, можно получить дифференциальное уравнение на напряженность поля в нелинейном диэлектрике от времени:

$$-\frac{\epsilon_0 \epsilon_2 j_2'(t)}{G} + j_1(t) + \epsilon_0 \epsilon_1 y'(t) = j_2(t)$$

где G – проводимость туннельного диэлектрика, $y(t)$ - напряженность в нелинейном диэлектрике.

Решение этого уравнения для линейных участков ВАХ нелинейного диэлектрика (G_1 – проводимость этого участка):

$$y(t) = e^{-\frac{G_1 t}{\epsilon_0 \epsilon_1}} \int_0^t \frac{e^{\frac{G_1 t}{\epsilon_0 \epsilon_1}} (G j_2(t) + \epsilon \epsilon_2 j_2'(t))}{G \epsilon_0 \epsilon_1} dt + c_1 e^{-\frac{G_1 t}{\epsilon_0 \epsilon_1}}$$

Общее решение получаем сшивкой решений для разных линейных участков.

С использованием полученного решения нами был промоделирован отклик предлагаемого нейрона на различные входные импульсы тока. На Рис. 3 представлен случай, когда входной ток мал

и расстояние между импульсами велико - в итоге нейрон успевает «забыть» о первом импульсе до прихода второго, и в итоге нет генерации выходных «спайков». На Рис. 4 показан случай, когда расстояние между входными импульсами меньше, и как видно, возникает «спайк» во время второго импульса - т.е. к моменту начала второго импульса «нейрон» еще не успел «забыть» о первом. На Рис. 5 входные импульсы достаточно велики, и поэтому «спайки» появляется уже в первом импульсе. Также на Рис. 6 представлен случай постоянного входного тока - как предельного случая очень длинного входного спайка. Как видно, в ответ на такой стимул «нейрон» начинает генерировать серию выходных «спайков».

Таким образом, проведенное моделирование продемонстрировало, что предлагаемая реализация искусственного нейрона позволяет полностью имитировать функционал «интегрировать-и-сработать» биологического нейрона.



Рис. 1 Схема искусственного нейрона

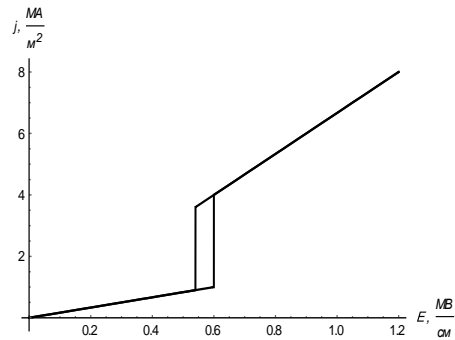


Рис. 2 ВАХ нелинейного диэлектрика

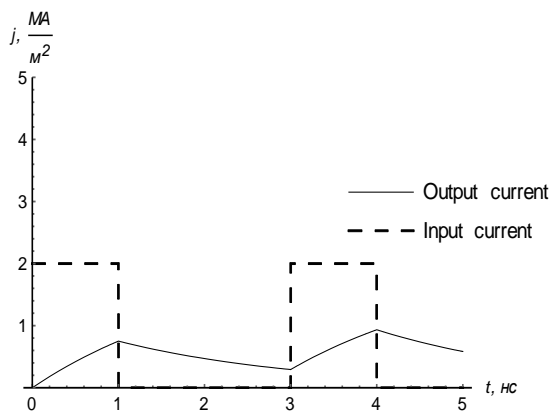


Рис. 3 График входного и выходного тока в случае малого тока

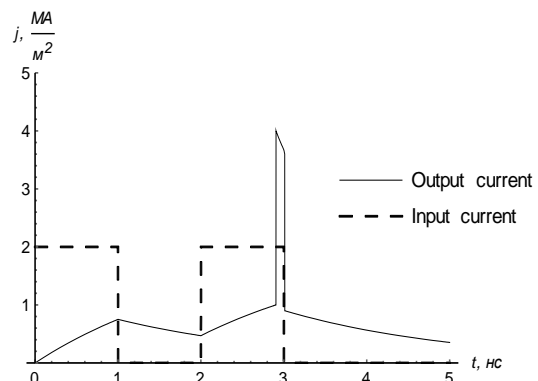


Рис. 4 График входного и выходного тока в случае близкого расположения малых входных импульсов

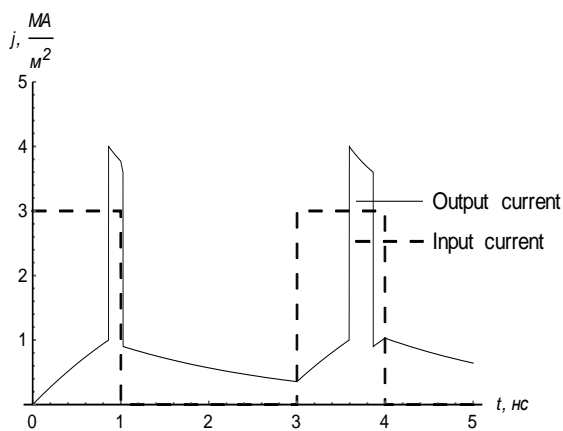


Рис. 5 График входного и выходного тока в случае большого тока

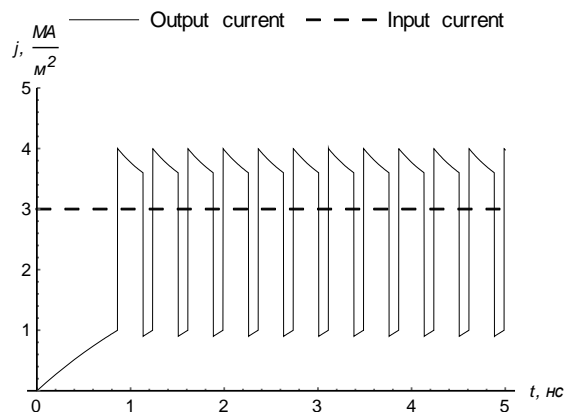


Рис. 6 График входного и выходного тока в случае постоянного входного тока