

Реализация логических операций на искусственной оптоэлектронной импульсной нейронной сети

В. Н. Чижевский, Н. В. Лахмицкий, Л. И. Ридико, С. Я. Килин

*Институт физики им. Б. И. Степанова НАН Беларуси, Минск, Беларусь,
e-mail: vnc@dragon.bas-net.by*

Представлены экспериментальные результаты, демонстрирующие реализацию логических операций «НЕ», «И», «ИЛИ», «НЕ-И», «НЕ-ИЛИ», «Исключающее ИЛИ» и «Исключающее ИЛИ-с инверсией» в детерминированном режиме работы оптоэлектронной импульсной нейронной сети, образованной вертикально-излучающими лазерами и детекторами одиночных фотонов. Показана возможность реализации стохастических арифметических операций при работе искусственных импульсных нейронов в режиме вероятностного отклика.

Ключевые слова: искусственный импульсный нейрон, вертикально-излучающий лазер, детектор одиночных фотонов, искусственная импульсная нейронная сеть, логические операции.

Implementation of logic gates in the artificial optoelectronic spiking neural network

V. N. Chizhevsky, N. V Lahmitskii, L. I. Ridico, S. Y. Kilin

*B. I. Stepanov Institute of physics of the NAS of Belarus, Minsk, Belarus,
e-mail: vnc@dragon.bas-net.by*

The paper presents experimental results demonstrating the implementation of the logical operations "NOT", "AND", "OR", "NAND", "NOR", "XOR", and "XNOR" in the deterministic operating mode of optoelectronic spiking neural network formed by vertical-cavity emitting lasers and single-photon detectors. The feasibility of implementing stochastic arithmetic operations when artificial spiking neurons operate in probabilistic response mode is also demonstrated.

Keywords: artificial spiking neuron, vertical-cavity laser, single-photon detector, artificial spiking neural network, logical operations.

Введение

Логические операции играют фундаментальную роль в обработке информации и вычислениях, являясь основой для построения сложных цифровых систем и алгоритмов. В контексте использования искусственных импульсных нейронных сетей (ИмНС) реализация логических функций приобретает особый смысл, так как эти сети моделируют биологические процессы нейронной активности с использованием спайков – импульсов, передающих информацию во времени. Реализация логических операций в ИмНС позволяет создавать энергоэффективные и биологически правдоподобные вычислительные блоки, которые могут работать асинхронно и обладают высокой скоростью обработки [1–4].

В работе [5] был предложен искусственный импульсный нейрон на основе вертикально-излучающего лазера (ВИЛ) и лавинного детектора одиночных фотонов, который позволяет реализовать основные динамические свойства биологи-

ческих нейронов. На основе использования предложенных оптоэлектронных искусственных импульсных нейронов, была разработана и изготовлена ИмНС, которая позволила реализовать набор бинарных логических операций “НЕ (NOT)”, “ИЛИ (OR)”, “И (AND)”, “ИЛИ-НЕ (NOR)”, “НЕ-И (NAND)”, “Исключающее ИЛИ (XOR)”, “Исключающее ИЛИ с инверсией (XNOR)” в детерминированном режиме работы искусственных нейронов. Кроме того, демонстрируется также реализация операций инверсии, сложения и умножения вероятностей при работе ИИН в стохастическом режиме.

1. Схема эксперимента

Реализация логических операций была проведена на компактной ИмНС, которая включает в себя 5 искусственных импульсных нейронов (ИИН), состоящих из полупроводниковых вертикально-излучающих лазеров (ВИЛ), работающих в режиме импульсной генерации в области длин волн 850 нм, и однофотонных лавинных фотодиодов (id101, idQuantique) с встроенным элементом Пельтье и терморезистором. В каждом ИИН предусмотрена возможность механического контролируемого ослабления оптических импульсов от ВИЛ до необходимого числа фотонов. Длительность импульсов излучения ВИЛ могла варьироваться от 5 нс до десятков микросекунд. Температура ОЛФД, входящих в ИИН, регулировалась в диапазоне от -10°C до $+20^{\circ}\text{C}$, регулируя частоту темновых импульсов.

Технические характеристики ИмНС: полоса частот работы до 20 МГц; частота темновых импульсов не более 100 Гц при температуре – минус 10°C ; вероятность появления послеимпульсов - 0.03; мертвое время (рефракторный период) - 35 нс; длительность лазерных импульсов 5 нс – 100 мкс; длительность импульса на выходе нейрона – 15 нс; амплитуда выходного импульса с нейрона 3.3 В. В зависимости от амплитуды лазерных импульсов реализуется два режима работы: вероятностный и детерминированный. Программное обеспечение позволяет реализовать различные комбинации соединений искусственных нейронов, осуществлять управление весовыми коэффициентами (токами лазерных диодов), напряжением питания однофотонных лавинных фотодиодов, заданием температуры для системы охлаждения фотодиодов.

В ИмНС реализовано 4 логических входа и 4 логических выхода. Каждый ИИН имеет 4 входа и 1 выход, который может соединен с любым из 5 ИИН, либо сразу с группой нейронов. Импульсный ток накачки на каждом лазере задается весовыми коэффициентами $W_{i,j}$ ($i = 1, \dots, 5$; $j = 1, \dots, 4$). Коэффициент $W_{i,4}$ может принимать отрицательные значения. Задание весовых коэффициентов определяет амплитуду импульса тока накачки лазера в нейроне.

Реализация логических операций проводилась на экспериментальной установке, схематически изображенной на рис. 1. В общем случае, для реализации логических операций необходимо наличие 3-х сигналов. С персонального компьютера в генераторе ТТЛ-сигналов устанавливались последовательности паттернов, состоящие из 4-х коротких импульсов длительностью 10 нс и частотой 10 МГц, которые подавались на логические входы ИмНС. При этом, наличие импульса соответствует логической «1», отсутствие – «0». В этих обозначениях сигнал А – {1010}, В – {1100} и

сигнал синхронизации $S - \{1111\}$. Подобные сигналы используются для таблиц истинности логических операций.



Рис. 1. Схема измерений:

Генератор ТТЛ-сигналов – 4-х каналный генератор логических сигналов;
ИмНС – искусственная импульсная нейронная сеть; ОСЦ – 4-х каналный осциллоскоп MSO64-BW4; ПК – компьютер

2. Детерминированный режим работы ИмНС

Как уже отмечалось, оптоэлектронный ИИН в зависимости от амплитуды импульса тока подаваемого на ВИЛ может работать как в вероятностном, так и в детерминированном режиме. Это связано с тем, что используемые в ИИН лавинные фотодиоды имеют вероятность детектирования фотонов $\approx 0,03$ на длине волны генерации ВИЛ (850 нм). Поэтому, изменением амплитуды импульса тока накачки ВИЛ и механического аттенюатора, можно контролировать число фотонов, попадающих на лавинный фотодиод и, соответственно, вероятность срабатывания ИИН. Вначале, рассмотрим результаты реализации логических операций в детерминированном режиме работы. В этом случае, коэффициенты W_{ij} , либо их сумма (амплитуды импульсов тока накачки), устанавливались таким образом, чтобы вероятность срабатывания нейронов была равна 1.

На рис. 2, а представлены экспериментальные результаты, демонстрирующие реализацию бинарных логических операций «НЕ (NOT)», «ИЛИ (OR)», «И (AND)», «ИЛИ-НЕ (NOR)», «НЕ-И (NAND)», «Исключающее ИЛИ (XOR)», «Исключающее ИЛИ с инверсией (XNOR)». Верхний сигнал S – сигнал синхронизации, A и B – бинарные логические сигналы, подаваемые на нейроны. Для сопоставления в таблице представлена таблица истинности для реализованных логических операций.

На рис. 2, б–г показаны схемы соединений нейронов и весовые коэффициенты, необходимые для реализации ряда логических операций. Для реализации операций «НЕ», «И», «ИЛИ» достаточно одного ИИН и двух логических сигналов. При реализации операций «НЕ-И» и «НЕ-ИЛИ» необходимо использовать два ИИН и третий бинарный сигнал S , подаваемый на отрицательный логический вход ИИН2 (рис. 2, б). Для реализации «Исключающее ИЛИ (XOR)» необходимо использование 3-х ИИН, как показано на рис. 2, в, с соответствующей настройкой весовых коэффициентов. Для реализации «Исключающее ИЛИ с инверсией (XNOR)» предыдущая схема дополняется операцией «НЕ» (рис. 2, г).

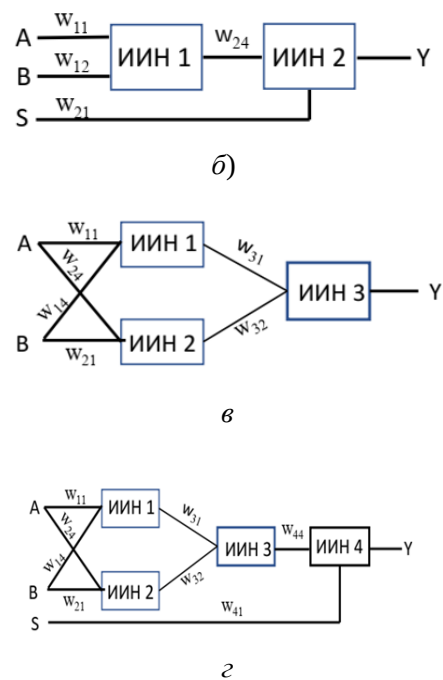
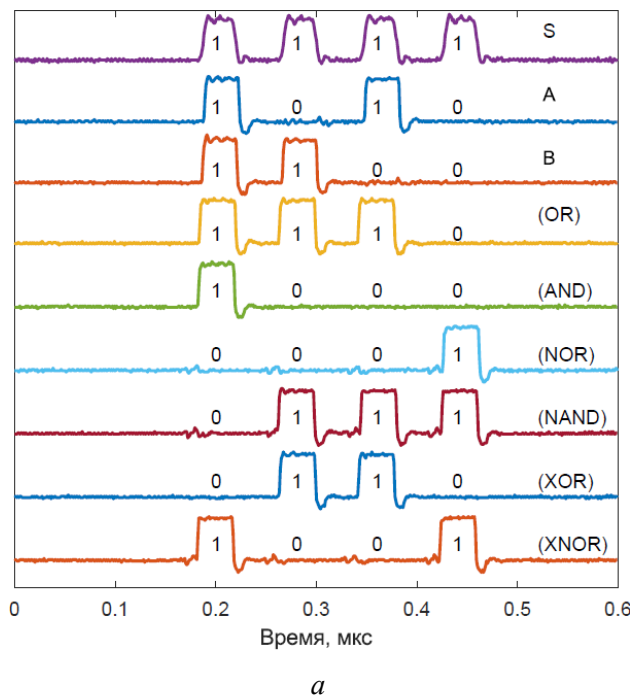


Рис. 2. Реализация логических операций на комплексе в детерминированном режиме работы. А и В – логические сигналы, S – сигнал синхронизации. Надписи над сигналами указывают вид логической операции

Таблица истинности шести видов двоичных логических операций.

A	B	P_{AND}	P_{OR}	P_{NAND}	P_{NOR}	P_{XOR}	P_{XNOR}
1	1	1	1	0	0	0	1
1	0	0	1	1	0	1	0
0	1	0	1	1	0	1	0
0	0	0	0	1	1	0	1

3. Стохастический режим работы ИмНС

Наряду с детерминированным режимом работы, т. е., когда вероятность срабатывания каждого нейрона на входной импульс равна единице ($P = 1$), ИмНС позволяет реализовать стохастический режим работы. Стохастические вычисления обрабатывают случайные потоки битов, называемые стохастическими числами, информационное содержание которых заключается в частоте единиц в последовательности отклика нейронов. В базовом униполярном формате поток битов X длины N имеет значение $P(X) = N_1/N$, где N_1 – это количество единиц, появляющихся в X . Например, число 0,5 может быть представлено в стохастических вычислениях потоком из 8 бит $\{0, 1, 1, 0, 1, 0, 0, 1\}$ таким образом, что вероятность нахождения 1 в бите равна 0,5.

Реализация операций с вероятностями проводилась на представленной ранее ИмНС. Исследовались возможности реализации операций с вероятностями: инверсии («НЕ»), сложение вероятностей («ИЛИ»), умножение вероятностей «И» и др. Для этого с генератора ТТЛ-сигналов подавались на логические входы нейронов ИмНС периодические сигналы, состоящие из $N=10000$ импульсов длительностью 15 нс и частотой 10 МГц. Наличие импульса на выходе соответствует «1»,

отсутствие – «0». Вероятность P определяется на выходе нейрона как отношение числа единиц в последовательности, деленного на общее число нулей и единиц, $P = N_1/N$. На рис. 3 схематически представлено соединение нейронов для реализации операции сложения вероятностей. Подбором весовых коэффициентов ИИН1 и ИИН2 настраиваются на вероятности срабатывания P_1 и P_2 , соответственно.

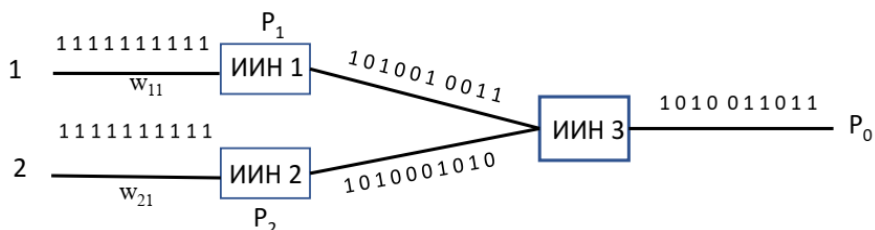


Рис.3. Соединение нейронов для реализации операции сложения вероятностей («ИЛИ»)

Сгенерированные случайные последовательности импульсов с ИИН1 и ИИН2 подаются на два входа ИИН3, где они суммируются, причем оба входа настроены на вероятность срабатывания $P = 1$. Когда два импульса с входов совпадают по времени, на выходе будет сформирован только один импульс вместо двух. Базовое исчисление вероятностей дает выражение для вероятности выходного импульса:

$$P_0 = P_1 + P_2 - P_1 * P_2, \quad (1)$$

Таким образом, на ИмНС реализуется операция суммирования вероятностей в соответствии с формулой (1). Алогичные исследования были проведены и для других стохастических логических операций.

4. Заключение

Продemonстрировано, что ИмНС на основе использования искусственных оптоэлектронных импульсных нейронов, образованных ВИЛ и однофотонными лавинными фотодиодами, позволяет реализовать набор логических операций как в детерминированном, так и в стохастическом режимах работы. Подобные логические вентили могут послужить строительными блоками при разработке импульсных нейронных сетей третьего поколения.

Библиографические ссылки

1. Nazari S. Spiking image processing unit based on neural analog of Boolean logic operations / S. Nazari, A. Keyanfar, M. M. Van Hulle // *Cognitive Neurodynamics*. 2023. Vol. 17, iss. 6. P. 1649–1660.
2. Hyper flexible neural networks rapidly switch between logic operations in a compact four neuron circuit / A. J. White [et al.] // *npj Unconventional Computing*. 2025. Vol. 2, iss. 1. P. 2.
3. Analog Implementation of a Spiking System for Performing Arithmetic Logic Operations on Mixed-Signal Neuromorphic Processors / A. Ayuso-Martinez. [et al.] // *Advanced Intelligent Systems*. 2025. Vol. 7, iss. 4. P. 2400524.
4. A Review of Computing with Spiking Neural Networks / J. Wu [et al.] // *Computers, Materials & Continua*. 2024. Vol. 78, Iss. 3. P.2909.
5. Chizhevsky V. N. Artificial spiking neuron based on a single-photon avalanche diode and a microcavity laser / V. N. Chizhevsky, V. A. Kulchitsky, S. Y. Kilin // *Appl. Phys. Lett.* 2021. Vol. 119, iss. 4. P. 041107.