

СТОХАСТИЧЕСКИЙ РЕЗОНАНС В ОПТОЭЛЕКТРОННОМ ИСКУССТВЕННОМ ИМПУЛЬСНОМ НЕЙРОНЕ

Н. В. Лахмитский, В. Н. Чижевский*, С. Я. Килин

УДК 539.126.4; 621.375.826

Институт физики НАН Беларуси, Минск, Беларусь; e-mail: vnc@dragon.bas-net.by

(Поступила 16 августа 2023)

Представлены результаты экспериментального исследования явления стохастического резонанса в оптоэлектронном искусственном импульсном нейроне (ИИН) на основе детектора одиночных фотонов и лазера с вертикальным резонатором. ИИН возбуждается периодическим сигналом и шумом. Показано, что при определенном значении шума происходит существенное усиление периодического сигнала и увеличение отношения сигнал/шум. Исследовано влияние амплитуды и частоты периодического сигнала на проявление стохастического резонанса в ИИН.

Ключевые слова: стохастический резонанс, оптоэлектронный искусственный нейрон, лазер с вертикальным резонатором, детектор одиночных фотонов.

The paper presents the results of an experimental study of the phenomenon of stochastic resonance in an optoelectronic artificial spiking neuron (ASN) based on a single photon detector and a vertical-cavity surface-emitting laser. ASN is excited by a periodic signal and noise. It is shown that at the certain value of the noise intensity, a significant amplification of the periodic signal and an increase in the signal-to-noise ratio are observed. The effect of the amplitude and the frequency of a periodic signal on the manifestation of a stochastic resonance in an ASN has been studied.

Keywords: stochastic resonance, optoelectronic artificial spiking neuron, vertical-cavity surface-emitting laser, single photon detector.

Введение. Шум играет важную роль в поведении нелинейных динамических систем. Один из примеров — явление стохастического резонанса (СР), в котором отклик бистабильной системы или системы с пороговой нелинейностью может быть значительно усилен на частоте воздействия периодического сигнала добавлением некоторого количества шума [1]. Явление наблюдалось в различных областях физики, химии, биологии [2—4] и имеет большое значение для практических приложений.

В данной работе представлены результаты экспериментального исследования СР в оптоэлектронном искусственном импульсном нейроне (ИИН) на основе однофотонного лавинного фотодиода, работающего в режиме Гейгера, и импульсного лазера с вертикальным резонатором (ЛВР) [5]. Данный тип ИИН хорошо имитирует основные свойства биологических нейронов: наличие порога и рефрактерного периода, нечувствительность к действию силы стимула выше пороговой, зависимость скорости возбуждения нейрона от силы стимула. Демонстрируется, что слабый подпороговый низкочастотный периодический сигнал может быть значительно усилен добавлением широкополосного шума с нормальным распределением. Одновременно наблюдается значительный рост отношения сигнал/шум (ОСШ). Без добавления шума слабый подпороговый низкочастотный периодический сигнал не вызывает никакого отклика в ИИН. В работе также исследована эволюция плотности вероятности функции распределения межимпульсных интервалов (МИИ) на выходе ИИН при действии периодического сигнала и шума. Наряду со стандартными показателями СР в виде амплитуды отклика и ОСШ на частоте периодического сигнала для характеристики СР использована площадь под первым периодом в функции плотности вероятности МИИ.

STOCHASTIC RESONANCE IN OPTOELECTRONIC ARTIFICIAL SPIKING NEURON
M. V. Lakhmitski, V. N. Chizhevsky*, S. Ya. Kilin (B. I. Stepanov Institute of Physics of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus; e-mail: vnc@dragon.bas-net.by)

Эксперимент. Исследования проведены с оптоэлектронным ИИН, предложенным в [5]. Искусственный нейрон состоит из детектора одиночных фотонов (ДОФ), ЛВР, генерирующего вблизи 850 нм, и переменного аттенюатора. Температура лазерного диода поддерживалась с точностью до 0.1 °C с помощью термоконтроллера. На диод подавался периодический сигнал прямоугольной формы от генератора сигналов произвольной формы с частотами f_m от 100 кГц до 20 МГц и амплитудами $A_0 = 0.25$ —1.50 В, что меньше порога генерации ЛВР. Во всех случаях период сигнала превышал “мертвое” время детектора одиночных фотонов ≈ 45 нс. Использован коммерческий детектор одиночных фотонов (id100-SMF20, idQuantique), работающий в автономном режиме с активной схемой гашения, интегрированной с лавинным диодом, со скоростью темновых отсчетов 30 Гц. Длительность выходного импульса детектора ~ 10 нс, амплитуда 2 В.

Для наблюдения СР в ток накачки лазера добавлен шум с нормальным распределением, полосой 20 МГц и варьируемой дисперсией. Управляющим параметром является амплитуда шумового сигнала U_N . Оба сигнала — периодический и шумовой — контролировались с компьютера. Временные характеристики отклика с ИИН регистрировались USB-осциллографом с частотой дискретизации до 500 МГц и входной полосой пропускания 250 МГц. Эффективность детектирования на рабочей длине волн лазера 850 нм составляла ≈ 0.03 , что гарантировало вероятностный характер срабатывания ИИН на действие периодических сигналов лазерного излучения при слабых световых потоках.

Для количественного описания СР использованы амплитуда отклика на частоте периодического сигнала и ОСШ на той же частоте. ОСШ — одна из основных характеристик при обнаружении слабых сигналов, от которой во многом зависит достоверность результата измерения характеристик сигнала. Амплитуда отклика R определялась как высота пика на частоте модуляции f_m в Фурье-спектрах временных рядов. ОСШ рассчитывалось как $SNR = 20\log_{10}[R(f_m)/R_N(f_m)]$, где $R(f_m)$ — отклик на частоте; $R_N(f_m)$ — интерполированный уровень шума.

Результаты и их обсуждение. Характер временного отклика ИИН на действие лазерного импульса большой длительности (больше “мертвого” времени ДОФ) зависит от его амплитуды. При слабой амплитуде импульса отклик ИИН представляет собой серию коротких импульсов, распределенных случайным образом в течение времени действия импульсов возбуждения. С увеличением амплитуды импульса возбуждения отклик ИИН имеет тенденцию к периодическому характеру с периодом, определяемым “мертвым” временем ДОФ [5].

На рис. 1 показана временная динамика ИИН при фиксированной амплитуде периодического сигнала $A_0 = 0.75$ В и различных амплитудах шумового сигнала, подаваемого на лазерный диод. Амплитуда периодического сигнала A_0 значительно меньше порога генерации ≈ 1.845 В. В отсутствие шумового сигнала в отклике ИИН наблюдаются очень редкие одиночные импульсы, соответствующие главным образом темновым импульсам ДОФ. При добавлении к току накачки шумовой компоненты с амплитудой $U_N = 0.6$ В в отклике ИИН появляется периодическая компонента с нерегулярными импульсами в пределах полупериодов сигнала (рис. 1, а). Дальнейшее увеличение амплитуды U_N приводит к периодическому появлению “пачек” импульсов со случайным распределением импульсов внутри каждого полупериода модуляции (рис. 1, б и в). При достаточно большой амплитуде $U_N = 2.5$ В видимая периодическая компонента практически исчезает (рис. 1, г).

На рис. 2 представлены зависимости отклика R и SNR от амплитуды добавленного шума U_N при различных амплитудах входного сигнала A_0 для двух сильно различающихся частот входного сигнала (100 кГц и 20 МГц). Сравнение рис. 2, а и б демонстрирует значительный рост отклика с увеличением амплитуды шума, при этом форма кривых имеет характерный для СР вид. С увеличением амплитуды периодического сигнала A_0 наблюдаются возрастание отклика и сдвиг оптимального значения шума, при котором достигается максимум отклика. Кроме того, незначительно снижается амплитуда отклика R при увеличении частоты модуляции до 20 МГц. Как видно на рис. 2, в и г, добавление шума приводит к значительному росту SNR для обеих частот модуляции, при этом максимум SNR наблюдается на переднем фронте изменения отклика R . Оптимальное значение шума, при котором достигается максимум SNR , с увеличением амплитуды сигнала смещается в область меньших значений.

На рис. 3 показаны зависимости максимальных значений отклика S_{max} и SNR_{max} от амплитуды входного сигнала A_0 для ряда частот модуляции f_m . Видно, что S_{max} почти линейно зависит от амплитуды сигнала A_0 и практически не зависит от частоты модуляции f_m вплоть до 10 МГц (рис. 3, а). В то же время SNR_{max} в большей степени зависит от частоты модуляции (рис. 3, б): начиная с $f_m = 5$ МГц происходит значительное снижение SNR_{max} для всех амплитуд сигнала A_0 . Эти результаты

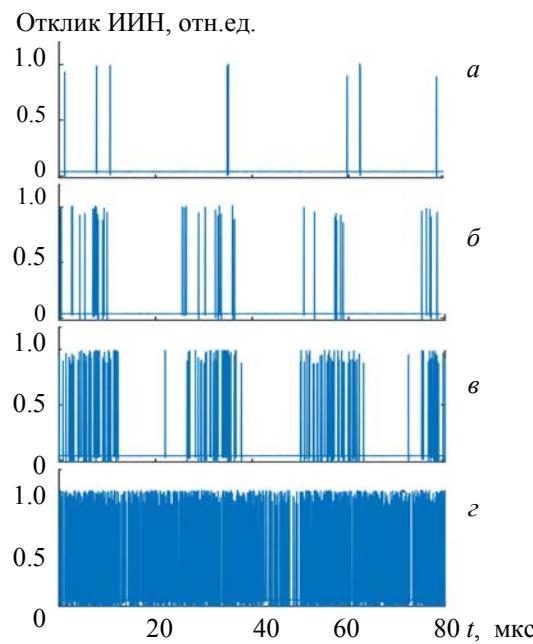


Рис. 1. Временные отклики ИИН на действие периодического сигнала при интенсивностях добавленного шума $U_N = 0.6$ (а), 0.7 (б), 1.0 (в) и 2.5 (г); $A_0 = 0.75$ В

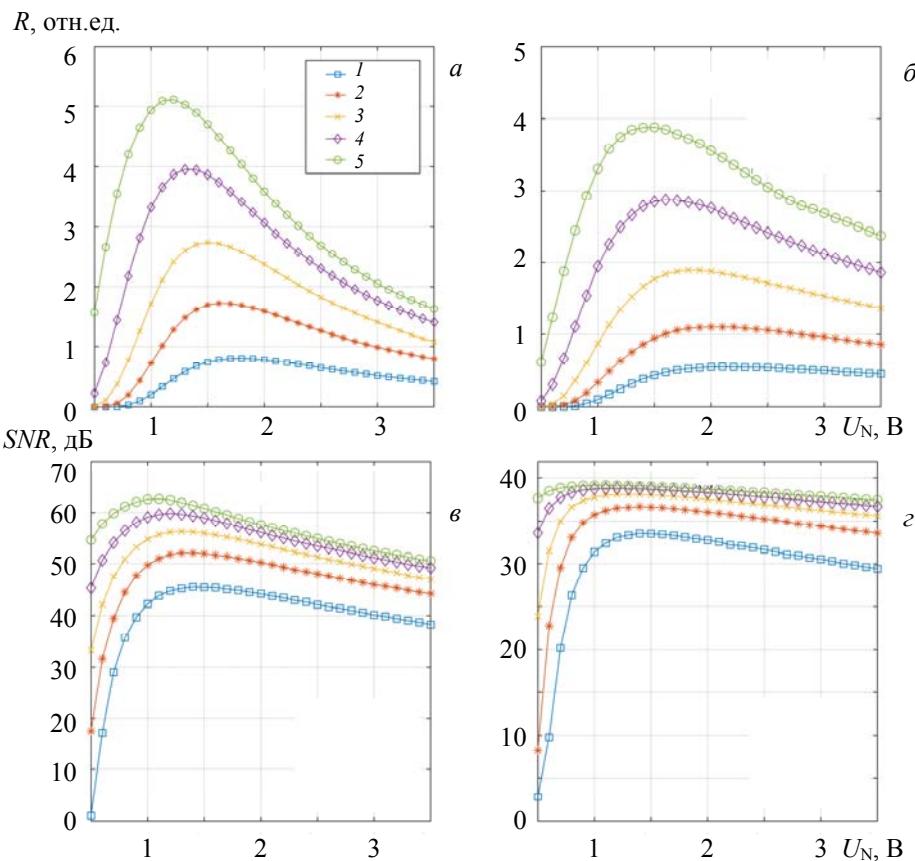


Рис. 2. Зависимости отклика R (а, б) и отношения сигнал/шум (SNR) (в, г) ИИН от интенсивности добавленного шума при амплитуде периодического сигнала $A_0 = 0.25$ (1), 0.50 (2), 0.75 (3), 1.00 (4) и 1.25 В (5); частота модуляции $f_m = 100$ кГц (а, в) и 20 МГц (б, г)

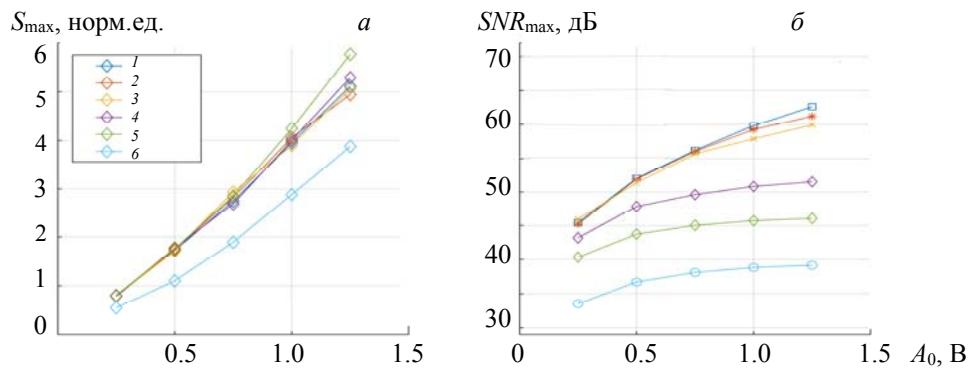


Рис. 3. Зависимости максимальных значений отклика S_{\max} (а) и отношения сигнал/шум (SNR_{\max}) (б) от амплитуды периодического сигнала A_0 при частотах модуляции $f_m = 0.1$ (1), 0.5 (2), 1.0 (3), 5.0 (4), 10.0 (5) и 20.0 МГц (6)

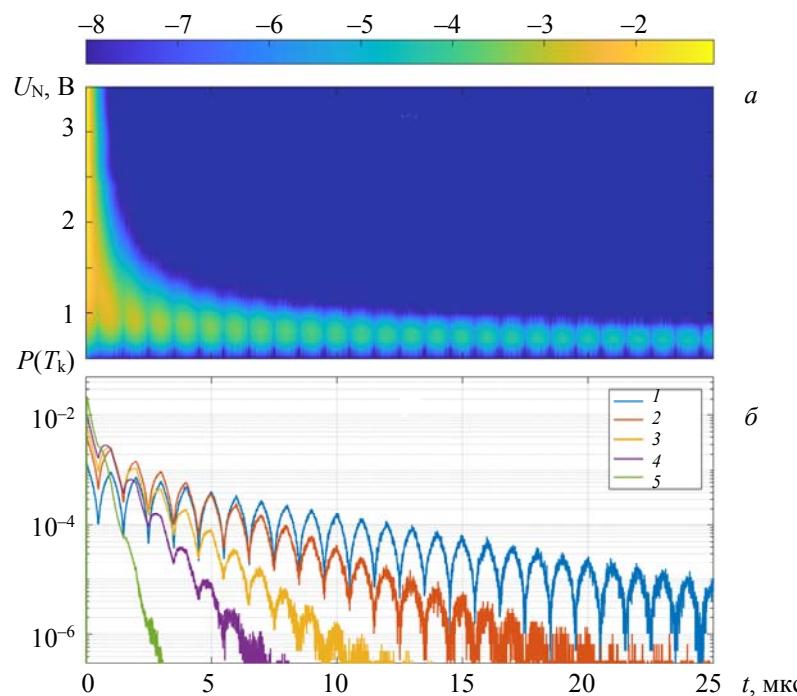


Рис. 4. Контурный график функции плотности вероятности $P(T_k)$ распределения МИИ T_k в зависимости от времени и интенсивности добавленного шума U_N (а) и функция плотности вероятности распределения T_k в зависимости от времени для $U_N = 0.8$ (1), 0.9 (2), 1.0 (3), 1.1 (4) и 1.4 В (5) (б); частота модуляции $f_m = 1$ МГц, амплитуда модуляции $A_0 = 0.5$ В

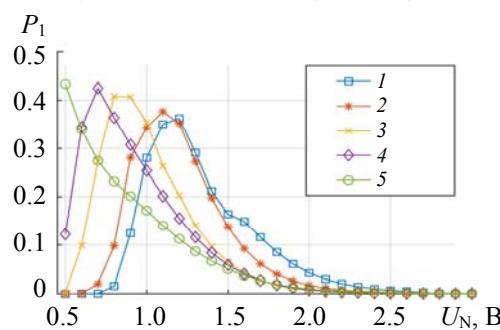


Рис. 5. Зависимость площади P_1 под первым пиком функции плотности вероятности МИИ от интенсивности добавленного шума U_N для амплитуды периодического сигнала $A_0 = 0.25$ (1), 0.50 (2), 0.75 (3), 1.00 (4) и 1.25 В (5)

демонстрируют возможность детектирования и усиления слабых подпороговых периодических сигналов с одновременным значительным ростом SNR .

Временные отклики ИИН имеют вид серии пакетов (“пачек”) импульсов, следующих с частотой периодического сигнала, при этом каждый пакет соответствует полупериоду прямоугольной модуляции (см. рис. 1). Из-за действия шумовой компоненты накачки и вероятностного характера срабатывания ИИН в каждой группе появление импульсов во времени является случайным процессом. Нами исследована эволюция МИИ в зависимости от амплитуды добавленного шума. МИИ широко используются в нейробиологии для характеристики изменчивости времени появления импульсов в нейронах при действии шума [6]. Для нахождения МИИ временные последовательности в отклике ИИН редуцировались к последовательности дельта-импульсов. В этом случае МИИ T_k соответствует интервалу времени между двумя последовательными дельта-импульсами.

На рис. 4 представлены результаты исследования МИИ, полученных при различных амплитудах шума U_N . Плотность вероятности $P(T_k)$ МИИ, полученная из гистограмм МИИ, показана на рис. 4, *a* в зависимости от амплитуды добавленного шума и времени. Распределение имеет мультимодальную структуру в диапазоне амплитуды шумов $U_N \sim [0.5; 1.2]$ В. На рис. 4, *b*, где функция $P(T_k)$ представлена для ряда амплитуд добавленного шума, видно, что максимумы появляются с периодом входного сигнала. При этом со временем происходит их экспоненциальное уменьшение. При достаточно сильном уровне шума ($U_N > \approx 1.4$ В) для определенной амплитуды периодического сигнала ($A_0 = 0.5$ В) мультимодальная структура практически исчезает. Функция $P(T_k)$ становится близкой к функции плотности вероятности пуассоновского процесса с “мертвым” временем, определяемым детектором одиночных фотонов.

Одним из показателей, широко используемых для характеристизации СР, является площадь под первым пиком P_1 функции плотности вероятности МИИ [7]. Площадь под первым пиком определим как сумму всех вероятностей в диапазоне $\Delta t \sim [T_m - T_m/2; T_m + T_m/2]$, $T_m = 1/f_m$ — период модуляции с центром T_m . На рис. 5 показаны зависимости P_1 от амплитуды шума для ряда амплитуд входного сигнала. Видно, что они проходят через максимум для A_0 от 0.25 до 1.00 В. Для более корректного определения P_1 необходимо вычитание фонового уровня шумовой составляющей в функции плотности вероятности $P(T_k)$, которая определяется в дополнительных измерениях без периодического сигнала [7]. Здесь такая процедура измерений не проводилась, тем не менее для ряда амплитуд входного сигнала и уровня шума величина P_1 может быть использована в качестве индикатора СР [7].

Заключение. Проведено исследование явления стохастического резонанса в оптоэлектронном искусственном импульсном нейроне на основе однофотонного лавинного диода и лазера с вертикальным резонатором. Явление стохастического резонанса проявляется в значительном усилении слабых подпороговых прямоугольных периодических сигналов с одновременным ростом отношения сигнал/шум при добавлении в ток накачки лазера дополнительной шумовой компоненты. При этом полоса усиления в искусственном импульсном нейроне, которая определяется “мертвым” временем детектора одиночных фотонов и достигает 20 МГц, может быть значительно увеличена при использовании детекторов с малыми значениями “мертвого” времени. Полученные результаты могут быть использованы в искусственных нейронных сетях на основе импульсных нейронов для управления и улучшения прохождения периодических сигналов. Предполагается, что найденные закономерности усиления периодических сигналов за счет явления стохастического резонанса могут наблюдаться в искусственных импульсных нейронах, основанных на других физических принципах [8, 9].

- [1] R. Benzi, A. Sutera, A. Vulpiani. *J. Phys. A Math. Theor.*, **14** (1999) L453—L457
- [2] L. Gammaiton, P. Hanggi, P. Jung, F. Marchesoni. *Rev. Mod. Phys.*, **70** (1999) 223—287
- [3] T. Wellens, V. Shatokhin, A. Buchleitner. *Rep. Prog. Phys.*, **67** (2004) 45—105
- [4] F. Moss, L. Ward, W. Sannita. *Clin Neurophysiol.*, **115** (2004) 267—281
- [5] V. N. Chizhevsky, V. A. Kulchitsky, S. Y. Kilin. *Appl. Phys. Lett.*, **119** (2021) 041107
- [6] W. Gerstner, W. M. Kistler, R. Naud, L. Paninski. *Neuronal Dynamics: from Single Neurons to Networks and Models of Cognition*, Cambridge University Press (2014)
- [7] M. H. Choi, R. F. Fox, P. Jung. *Phys. Rev. E*, **57** (1998) 6335
- [8] J. Zhu, T. Zhang, Y. Yang, R. Huang. *Appl. Phys. Rev.*, **7** (2020) 011312
- [9] L. E. Srouji, Y.-J. Lee, M. B. On, L. Zhang, S. J. B. Yoo. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **29** (2023) 600113