

Медетов Б.Ж.* , Албанбай Н., Ниязалиев К.А.

Научно-исследовательский институт экспериментальной и теоретической физики,
Казахский национальный университет им. аль-Фараби, Казахстан, Алматы
*e-mail: bm02@mail.ru

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТАТИСТИКИ КОЛИЧЕСТВА БЕРСТОВ В КЛАСТЕРЕ АВТОКОЛЕБАТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

При исследовании кластера автоколебательных систем, состоящего из двух связанных нейронов ФитцХью – Нагумо, определены 4 режима генерации сигналов: «быстрый», «медленный», «bursting», «покой». Установлено, что качественный переход из одного режима в другой происходит не только в зависимости от заданных начальных условий и параметров системы, но так же из-за влияния шумов и флуктуаций. Кроме того найдено, что при определенном диапазоне интенсивности шума для одних и тех же значений параметров, количество берстов, генерируемых в режиме «bursting», является конечным и непостоянным. Для изучения закономерности распределения количества берстов собрана экспериментальная установка, с помощью которой в автоматическом режиме измерена соответствующая статистика. Автоматизация эксперимента выполнена средствами LabVIEW, а обработка данных и подсчет распределения количества берстов осуществлены по определенному алгоритму в среде Matlab. В результате установлено, что распределение количества берстов описывается экспоненциальной зависимостью.

Ключевые слова: берст, автоколебательная система, LabVIEW, нейрон, шум.

Medetov B.Zh.* , Albanbay N., Niyazaliyev K.A.

Institute of Experimental and Theoretical Physics, Al-Farabi Kazakh National University,
Kazakhstan, Almaty *e-mail: bm02@mail.ru

Experimental determination of the statistics of the number of bursts in a cluster of auto-oscillatory systems

In the study of a cluster of auto-oscillating systems consisting of two coupled FitzHugh-Nagumo neurons, four signal generation modes were defined: "fast", "slow", "bursting", "rest". It is established that the qualitative transition from one regime to another occurs not only in dependence on the given initial conditions and the parameters of the system, but also because of the influence of noise and fluctuations. In addition, it was found that for a certain range of noise intensity for the same parameter values, the number of bursts generated in bursting mode is finite and not constant. To study the regularity of the distribution of the number of bursts, an experimental setup has been assembled, with the help of which the corresponding statistics were measured automatically. The automation of the experiment was carried out by means of LabVIEW, and data processing and calculation of the distribution of the number of bursts were calculated according to a certain algorithm in the Matlab environment. As a result, it is established that the distribution of bursts is described by an exponential dependence.

Key words: burst, auto-oscillating system, LabVIEW, neural, noise.

Медетов Б.Ж. *, Албанбай Н., Ниязалиев Қ.А.

Эксперименттік және теориялық физика ғылыми-зерттеу институты,
 Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Қазақстан, Алматы
 *e-mail: bm02@mail.ru

Автотербелмелі жүйелер кластеріндегі берсттер санының статистикасын эксперименталды анықтау

Автотербелмелі жүйе ретінде алынған ФитцХью-Нагумо нейронның екі сызықты-теріс байланысынан құрылған автотербелмелі жүйелер кластерінде 4 түрлі сигнал генерациялау режимдері: «жылдам», «баяу», «bursting», «тыныштық» бар екені белгілі. Аталған режимдердің бір-біріне сапалық ауысуы тек параметрлердің мәніне ғана емес, сонымен қатар, шуылдың әсеріне де тәуелді екені анықталды. Осыған байланысты шуыл интенсивтілігінің белгілі бір диапазонында және параметрлердің бекітілген алғашқы мәндерінде «bursting» режимі генерациялайтын берсттер саны шекті және тұрақсыз екені эксперимент жүзінде анықталды. Берсттер санының таралу заңдылығын зерттеу үшін, сәйкесінше статистиканы автоматты түрде өлшеу үшін эксперименталды қондырғы жиналды. Эксперимент автоматтандырылуы LabVIEW көмегімен жасалса, ал мәліметтерді өңдеу және берсттер таралуы белгілі бір алгоритм бойынша Matlab ортасында есептелді. Нәтижесінде берсттердің таралуы экспоненциалды тәуелділікпен сипатталатыны анықталды.

Түйін сөздер: берст, автотербелмелі жүйе, LabVIEW, нейрон, шуыл.

Введение

В качестве автоколебательной системы рассмотрена модель нейрона ФитцХью-Нагумо [1-10], а кластер автоколебательных систем образовывается линейно-отрицательной связью между нейронами. В результате теоретических, численных и экспериментальных исследований динамики рассматриваемой системы нейронов, определены 4 режима генерации сигналов: «быстрый», «медленный», «bursting» [11-12], «покой». Численные исследования показывают, что установление различных режимов генерации сигналов рассматриваемым кластером довольно сильно зависит от точности интегрирования уравнений [13-16], описывающих динамику системы. Физическим объяснением такого поведения системы может служить влияние флуктуаций и шумов на автоколебательную систему. Для подтверждения данного предположения в систему дифференциальных уравнений были внесены стохастические члены $\xi_1(t)$ и $\xi_2(t)$, моделирующие гауссовский белый шум [17]. В таком случае, математическую модель нейронов ФитцХью-Нагумо, входящих в состав рассматриваемого кластера, можно представить в следующем виде:

$$\frac{dx_1}{dt} = x_1 - x_1^3/3 - y_1 + \gamma_1 x_2 + \sqrt{2T}\xi_1(t),$$

$$\frac{dy_1}{dt} = \varepsilon_1(x_1 + a_1),$$

$$\frac{dx_2}{dt} = x_2 - x_2^3/3 - y_2 + \gamma_2 x_1 + \sqrt{2T}\xi_2(t), \quad (1.1),$$

$$\frac{dy_2}{dt} = \varepsilon_2(x_2 + a_2),$$

где стохастические члены $\xi_i(t)$, $i = 1, 2$ моделируются гауссовским белым шумом $\langle \xi_i(t_1)\xi_j(t_2) \rangle = \delta_{i,j}\delta(t_1 - t_2)$, и характеризуются параметром T , означающим интенсивность шума. Решение системы дифференциальных уравнений (1.1) применили метод Хойна. В ходе исследования задавались различные уровни шума. При отсутствии шума решения соответствовали режимам с заданными параметрами, но при увеличении уровня шума система переходит в режим «bursting». Также стоит отметить, что экспериментальные исследования, проведенные на аналоговой электронной схеме, показали, что при заданных параметрах системы из-за шумов и флуктуаций генерируется режим «bursting».

Во всех автоколебательных системах имеет место воздействие шумов и флуктуаций. Стоит заметить, что в зависимости от динамики системы влияние шумов и флуктуаций на систему могут быть различны. Теоретические исследования показали, что при различных реализациях шума, при переходе системы из режима «bursting» в другой режим генерируются разное количество берстов (рисунок 1). Также стоит отметить, что аналогичные результаты были получены схемотехническим и реальным физическим экспериментами [18-20].

Поскольку, при определенном диапазоне интенсивности шума для одних и тех же значений параметров, количество берстов, генерируемых в режиме «bursting», является конечным

и не постоянным, был проведен эксперимент для определения зависимости распределения количества берстов для разных уровней реализации шума.

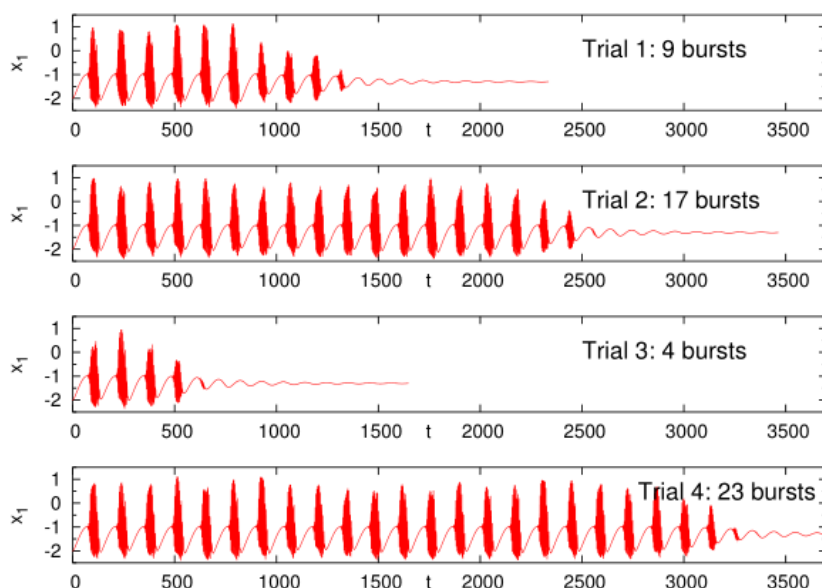


Рисунок 1 – Количество берстов для каждой реализации шума

Эксперимент

Как известно, для представления зависимости распределения величин требуются сбор, измерение и анализ массовых статистических данных. Поскольку для сбора данных наше исследование требовало реального физического эксперимента, автоматизация эксперимента проводилась при помощи LabVIEW, а анализ большого объема данных проводился в пакете прикладных программ Matlab.

Описание экспериментальной установки.

На рисунке 2 приведена блок-схема работы автоматизирующей программы, которая описана на специальном графическом языке данной системы. Экспериментальные измерения производятся в цикле, количество итераций которого задается с помощью элемента «Cycle count» (см. рис.2). Далее в цикле исполняются команды, вписанные в прямоугольную область. У этой области на левом верхнем углу имеется обозначение в виде буквы «N». Из рисунка 2 видно, что в рамку, означающей тело цикла, вписана еще одна прямоугольная область, которая в свою очередь состоит из двух

отсеков. В первом отсеке имеются всего два элемента: 1) NI ELVISmx Digital Writer и 2) Таймер. Первый элемент со стороны программы отправляет в экспериментальную установку логический ноль, что соответствует низкому значению напряжения. Это сообщение переводит аналоговую схему в режим «задания начальных условий». Время нахождения аналоговой схемы в этом режиме определяется значением таймера, в данном случае оно равно 1 сек (единица измерения таймера – миллисекунды). В режиме задания начальных условий установка не выполняет интегрирования, а происходит только подзарядка конденсатора аналогового интегратора до нужного уровня напряжения, соответствующего начальной условию.

На следующем этапе в теле цикла выполняются операции, указанные во втором отсеке, в котором расположены три элемента: 1) NI ELVISmx Digital Writer; 2) DAQ Assistant и 3) Write to Measurement File. Первый элемент сообщает экспериментальной установке логическую единицу, в результате чего аналоговая схема переводится в режим интегрирования. И

тут же одновременно с этим начнет свою работу DAQ Assistant, который собирает в буфере компьютера (в оперативной памяти) значения сигнала, получаемого из экспери-

ментальной установки. Наконец, третий элемент, который называется «Write to Measurement File», выполняет запись массива значений сигнала в файл.

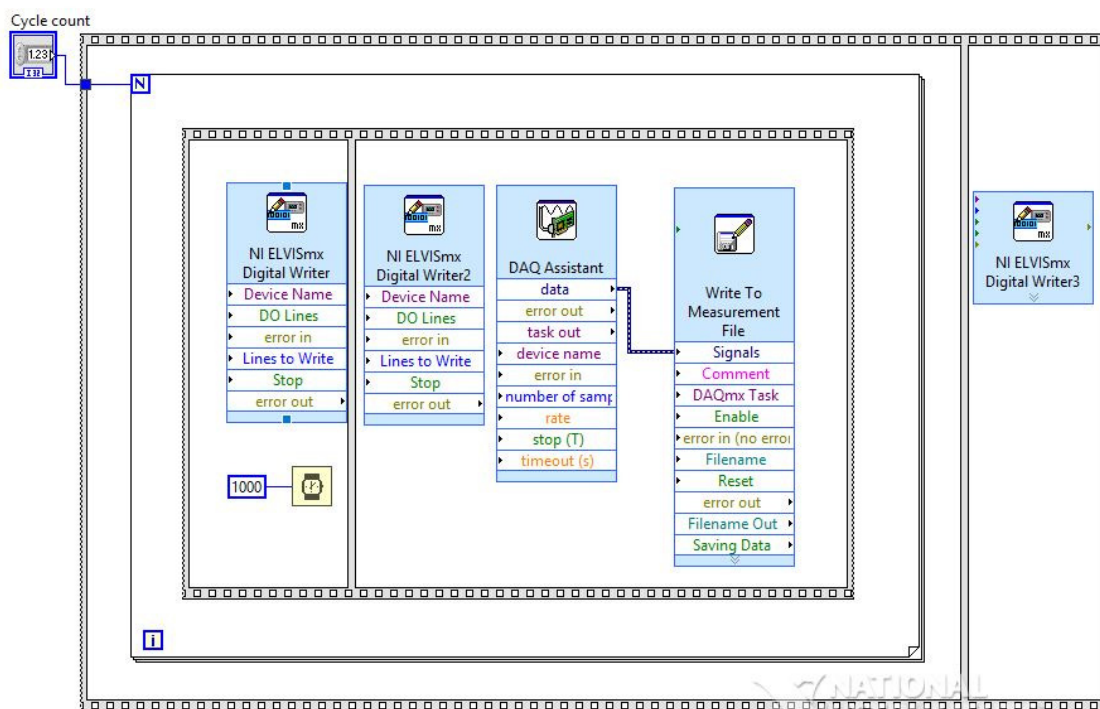


Рисунок 2 – Блок-схема программы, разработанной в среде LabVIEW, предназначенная для автоматизации эксперимента

На завершающей стадии, как видим из рисунка 2, расположен один единственный элемент – NI ELVISmx Digital Writer3. Данный элемент посылает логический ноль на специальный вход платформы «NI ELVIS II+», который сигнализирует о необходимости остановки всех процессов. Т.е. таким образом автоматически «завершаем» работу установки.

Условие записи сигналов следующее: 1. Частота дискретизации – 500 Гц. Такая частота установлена по двум соображениям – умень-

шить объем данных, но при этом обеспечить выполнение условий теоремы Котельникова-Найквиста (теоремы о дискретизации); 2. Длительность записи сигналов от одного сеанса 10 сек; 3. Количество повторений эксперимента – 3000. Таким образом, на выходе получаем 3000 файлов, содержащие экспериментальные значения, соответствующие каждому конкретному экспериментальному измерению. На рисунке 3, показан пример временной реализации, где можно увидеть берсты, получаемые из эксперимента.

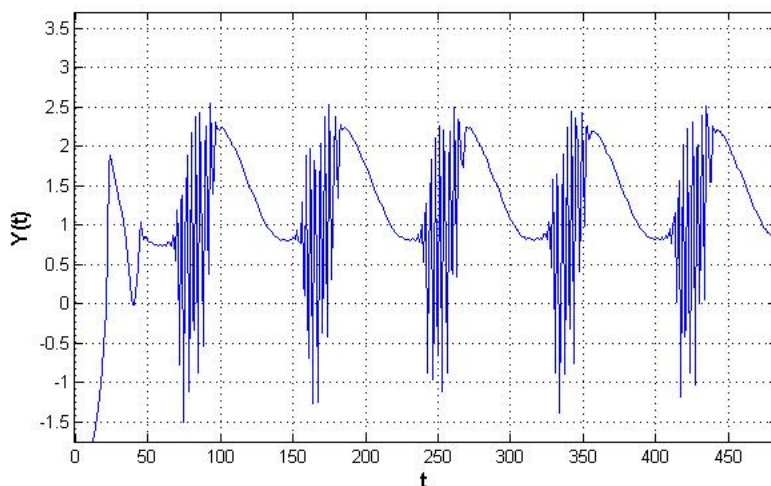


Рисунок 3 – Пример берстов, полученных из эксперимента

Алгоритм подсчета количества берстов

Подсчет количества берстов осуществляется по следующему алгоритму:

1. Сначала вручную определяем примерную длительность одного берста. В наших экспериментах она приблизительно равна 60 мс. (На рисунке 4 показан фрагмент сигнала, соответствующий только одному берсту).

2. Весь временной ряд делим на одинаковые фрагменты с длительностью равной 60 мс. И следующие этапы 3 и 4 выполняем в цикле, количество итераций которого соответствует количеству полученных фрагментов.

3. Для каждого фрагмента сигнала вычисляем спектральную мощность через Фурье преобразования. При этом характерный спектр фрагментов, соответствующих берсту, выглядит так, как показано на рисунке 5. А характерный

спектр фрагментов, соответствующих промежуточным между берстами сегментам, выглядит как на рисунке 6. Как видим из этих рисунков, у берстов основная энергия сосредоточена на частотах в окрестности 150 Гц. А для неберстовых фрагментов основная доля энергии приходится на очень низкое значение частоты.

4. Анализируя распределение энергии фрагмента сигнала по частотам, принимается решение о соответствии данного фрагмента либо к берсту, либо к межберстовому сегменту. Если фрагмент распознан как берст, то счетчик берстов увеличиваем. В противном случае увеличиваем счетчик неберстов. Цикл может быть прерван, если счетчик неберстов окажется больше 10, что сигнализирует о том, что генерация берство закончена.

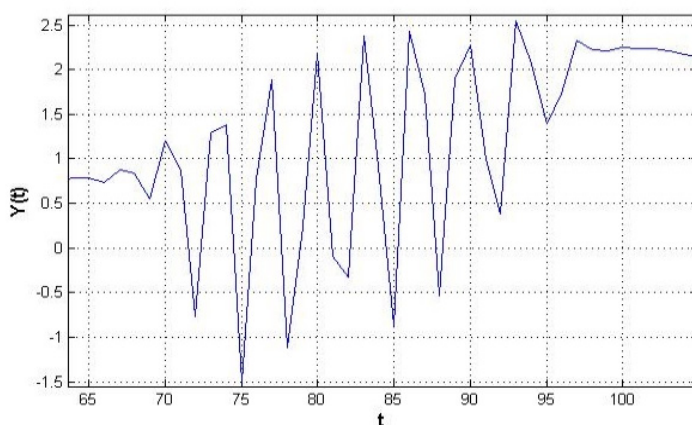


Рисунок 4 – Фрагмент сигнала, соответствующий одному берсту

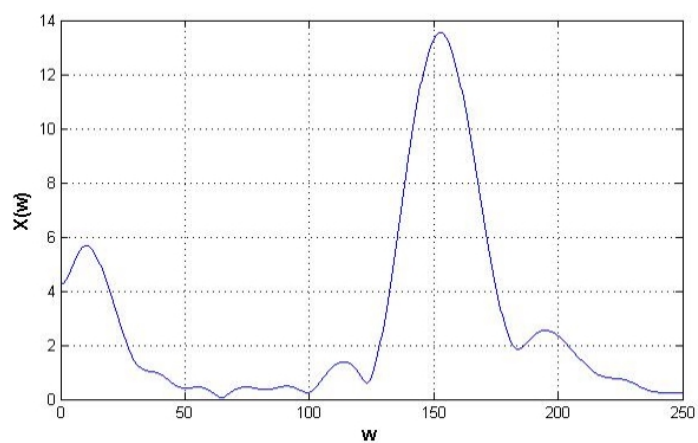


Рисунок 5 – Спектр мощности, соответствующий берсту

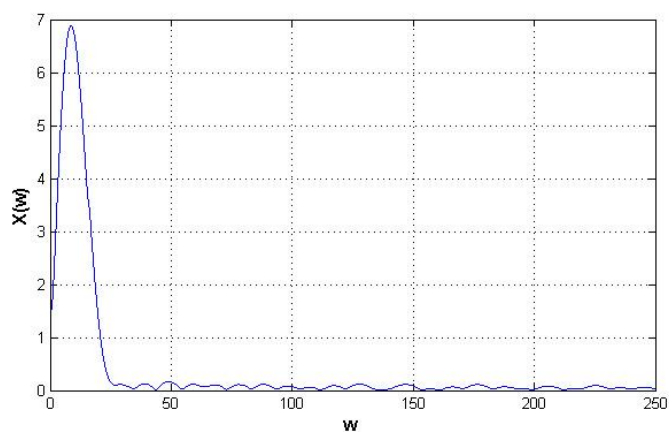


Рисунок 6 – Спектр мощности соответствующий неберстам

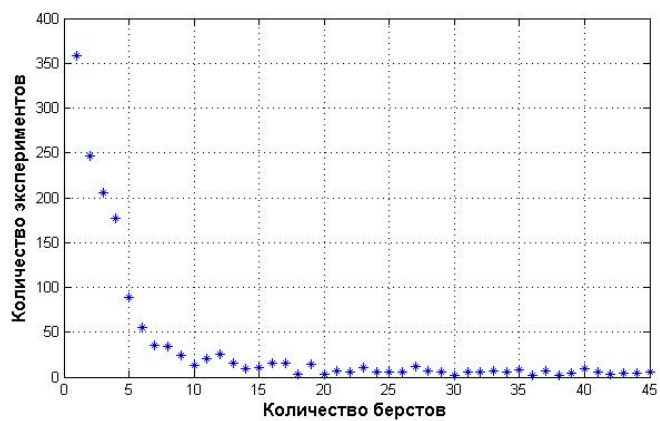


Рисунок 7 – Распределение количества берстов до затухания

Заключение

В результате данных исследований определено, что качественный переход между режимами происходит из-за шумов и флуктуаций. Так же было замечено, что каждая реализация шума по разному влияют на скорость перехода в другой режим. Данная особенность проявляется разным количеством берстов, распределение

которых описывается экспоненциальной зависимостью (рисунок 7).

Благодарности

Авторы статьи выражают искреннюю благодарность за финансовую поддержку из средств гранта №3829/ГФ4 Министерства образования и науки Республики Казахстан.

Литература

- 1 Cronin J. *Mathematical aspects of Hodgkin-Huxley neural theory*. – Cambridge University Press, 1987. – 261 p.
- 2 Hodgkin A.L., Huxley A.F. A quantitative description of membrane current and its application to conduction and excitation in nerve // *J. Physiol.* -1952. – №117. -P.500-544.
- 3 FitzHugh R. Impulses and physiological states in theoretical models of nerve membrane // *Biophys. J.* – 1961. – №1. – P.445-466.
- 4 Pospischil M. et al. Minimal Hodgkin-Huxley type models for different classes of cortical and thalamic neurons. // *Biological cybernetics*. – 2008. – Vol. 99, № 4-5. – P.427–441.
- 5 Rabinovich M. et al. Dynamical principles in neuroscience // *Reviews of Modern Physics*. – 2006. – Vol. 78, № 4. – P.1213–1265.
- 6 Binczak S. et al. Experimental study of electrical FitzHugh-Nagumo neurons with modified excitability // *Neural Networks*. Elsevier. – 2006. – Vol. 19, № 5. – P.684–693.
- 7 Nagumo J., Arimoto S., Yoshizawa S. An active pulse transmission line simulating nerve axon // *Proc. IRE*. – 1962. – №50. – P.2061-2070.
- 8 Binczak S., Kazantsev V.B., Nekorkin V.I., Bilbault J.M. Experimental study of bifurcation in modified Fitzhugh-Nagumo cell // *Electron. Lett.* – 2003. – V.39. – P. 961-962.
- 9 Nagumo J., Arimoto S., Yoshizawa S. An active pulse transmission line simulating nerve axon // *Proc. IRE*. – 1962. – №50. – P.2061-2070.
- 10 Максимов А.Г., Некоркин В.И. Гетероклинические траектории и фронты сложной формы модели ФитцХью-Нагумо // *Математическое моделирование*. – 1990. – Т.2, №2. – С.129-142.
- 11 Nekorkin V.I., Kazantsev V.B., Velarde M.G. Spike-burst and other oscillations in a system composed of two coupled, drastically different elements // *The European Physical Journal B* – 2000. – Vol. 16, № 1. – P. 147–155.
- 12 Plant R.E. Bifurcation and resonance in a model for bursting nerve cells // *Journal of mathematical biology*. – 1981. – Vol. 11, № 1. – P. 15–32.
- 13 Жанабаев З.Ж., Закс М., Медетов Б.Ж. Генерация сигналов кластером связанных двух автоколебательных систем на границе потери устойчивости равновесия. Теория // *Журнал проблем эволюции открытых систем*. – Алматы, 2012. – Т.1, вып.14. – С.31-35.
- 14 Наурызбаева А.Ж., Медетов Б.Ж., Ыскак А.Е. Численное исследование двухчастотного режима генерации сигналов кластером автоколебательных систем // *Известия НАН РК, серия физическая*. – Алматы, 2013. – №2(288). – С. 134-137.
- 15 Medetov B., Weiss G., Zhanabaev Zh., Zaks M. Numerically induced bursting in a set of coupled neuronal oscillators // *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*. – 2015. – Vol 20, Issue 3. – P.1090-1098.
- 16 Патент РК №7-9-2929 Трехрежимный радиотехнический генератор сигналов на основе двух линейно – отрицательно связанных нейронов ФитцХью-Нагумо. Жанабаев З.Ж., Медетов Б.Ж., Албанбай Н., Кожагулов Е.Т. Оpubл.30.10.2014.
- 17 Койшигарин А.С., Медетов Б.Ж., Албанбай Н. Численное исследование влияния шума и флуктуаций на режимы генерации кластером автоколебательных систем. Теория. // *Журнал ПЭОС*. – 2015. – Т.1, – вып. 17.
- 18 Медетов Б.Ж., Наурызбаева А.Ж., Албанбай Н., Манапбаева А.Б. Экспериментальное измерение сигналов кластера связанных автоколебательных систем // *Журнал ПЭОС*. – 2013. – Т.1, вып. 15. – С. 17-23.
- 19 Наурызбаева А.Ж., Медетов Б.Ж., Есерханулы Е. Схемотехническое моделирование «двухчастотной» бифуркации Хопфа // *Известия НАН РК, серия физическая*. – 2013. – №2(288). – С. 142-145.
- 20 Медетов Б.Ж., Албанбай Н., Койшигарин А.С., Ниязалиев К.А. ФитцХью-Нагумо нейрондарынан құралған кластердің шуыл әсерінен «тыныштық» күйден «bursting» режиміне көшуін эксперименталдық зерттеу // *Сборник тезисов Междун. конф. молодых ученых «Фараби әлемі», 13-16 апреля, 2015, Алматы*. – 2015. – С.421.

References

- 1 J. Cronin, *Mathematical aspects of Hodgkin-Huxley neural theory* (Cambridge University Press, 1987). doi.org/10.1017/CBO9780511983955.
- 2 A.L. Hodgkin and A.F. Huxley, *J. Physiol* **117**, 500-544, (1952).

- 3 R. FitzHygh, *Biophys* **1**, 445-466, (1961).
- 4 M. Pospischil at al, *Biological cybernetics* **99**, № 4-5, 427–441, (2008).
- 5 M. Rabinovich at al. *Reviews of Modern Physics* **78**, 4, 1213–1265, (2006).
- 6 S. Binczak at al, *Neural Networks* **19**, 5, 684–693, (2006).
- 7 J. Nagumo, S. Arimoto, and S. Yoshizawa, *Proc. IRE* **50**, 2061-2070, (1962).
- 8 S. Binczak, V.B. Kazantsev, V.I. Nekorkin, and J.M. Bilbault, *Electron. Lett.* **39**, 961-962, (2003).
- 9 J. Nagumo, S. Arimoto and S. Yoshizawa, *Proc. IRE* **50**, 2061-2070, (1962).
- 10 A.G. Maksimov and V.I. Nekorkin, *Matematicheskoye modelirovaniye* **2**, 129-142, (1990). (in Russ).
- 11 V.I. Nekorkin, V.B. Kazantsev, and M.G. Velarde, *The European Physical Journal B* **16**, 1, 147–155, (2000).
- 12 R.E. Plant, *Journal of mathematical biology* **11**, 15–32, (1981).
- 13 Z.Zh. Zhanabayev, M. Zaks, and B.ZH. Medetov, *Zhurnal problem evolyutsii otkrytykh sistem* **1**, 31-35, (2012). (in Russ).
- 14 A.Zh. Naurzbayeva, B.ZH. Medetov, and A.Ye. Yskak, *Izvestiya NAN RK, seriya fizicheskaya* **2**(288), 134-137, (2013). (in Russ).
- 15 B. Medetov, G. Weiss, Zh. Zhanabaev and M. Zaks., *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation* **20**, 3, 1090-1098, (2015). doi.org/10.1016/j.cnsns.2014.07.004
- 16 Patent RK №7-9-2929ю Trekhrezhimnyy radiotekhnicheskiy generator signalov na osnove dvukh lineyno – otritsatel'no svyazannykh neyronov FittsKH'yu-Nagumo, Z.Zh. Zhanabayev, B.Zh. Medetov, N. Albanbay i Ye.T. Kozhagulov. Opubl.30.10.2014. (in Russ).
- 17 A.S. Koyshigarin, B.ZH. Medetov i N. Albanbay, *Zhurnal problem evolyutsii otkrytykh sistem* **17**, 1, (2015) (in Russ).
- 18 B.Zh. Medetov, A.Zh. Naurzbayeva, N. Albanbay, and A.B. Manapbayeva, *Zhurnal problem evolyutsii otkrytykh sistem* **1**, 15, 17-23, (2013). (in Russ).
- 19 A.Zh. Naurzbaeva, B.Zh. Medetov, and E. Yeserhanuly, *Izvestiya NAS RK, series physical* **2**, 288, 142-145, (2013). (in Russ).
- 20 B.ZH. Medetov, N. Albanbay, A.S. Koyshigarin, and K.A. Niyazaliyev, *Book abstract of the Intern. Conf. «Farabi alemi»*, (13-16 April, 2015, Almaty), 421. (in Russ).