

NEWS

OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN

PHYSICO-MATHEMATICAL SERIES

ISSN 1991-346X

Volume 2, Number 300 (2015), 110 – 115

ELECTRONIC MODELS OF NEURAL NETWORK AT PROGRAMMABLE INTEGRATED CIRCUIT

Z. Zh. Zhanabaev, Ye. T. Kozhagulov, D. M. Zhexebay

Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan, e-mail: dauren_92_05@mail.ru

Keywords: neural networks (NN), Field Programmable Gate Array (FPGA), digital scheme, scale invariance.

Abstract. The work is dedicated to the integrated circuit engineering implementation of neural network MODELS with scale-invariant properties. Feature of these models is the analysis of discrete mappings containing fractional powers. We suggest an algorithm for raising to power of a physical value by use of field-programmable gate array (FPGA). A comparison of FPGA implementations with the numerical results is presented.

УДК 004.896

ЭЛЕКТРОННАЯ МОДЕЛЬ НЕЙРОННОЙ СЕТИ НА ПРОГРАММИРУЕМОЙ ИНТЕГРАЛЬНОЙ СХЕМЕ

З. Ж. Жанабаев, Е. Т. Кожажулов, Д. М. Жексебай

Казахский национальный университет им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан

Ключевые слова: нейронные сети, программируемые логические интегральные схемы (ПЛИС), цифровые схемы, масштабная инвариантность.

Аннотация. Работа посвящена интегральной схемотехнической реализации новых моделей нейронных сетей с масштабно-инвариантными свойствами. Спецификой таких моделей является необходимость анализа дискретных отображений, содержащих дробные степени. Предложен алгоритм возведения в дробную степень физической величины в программируемой логической интегральной схеме (FPGA). Приведено сопоставление реализаций FPGA с численными результатами.

Введение. Нейронные сети являются наиболее общим видом реализации интеллектуальных систем. Актуальной задачей является исследование моделей нейронных сетей с помощью современных цифровых приборов - программируемых логических интегральных схем (FPGA), что облегчает структурную реализацию и повышает вычислительную эффективность. Работы [1-7] посвящены моделированию динамики нейронов на основе цифровой техники FPGA. В работах [1-4] приводятся качественные и количественные сравнения FPGA с альтернативными вариантами (к примеру, «xc5v1x330t» в сравнении с Core2/3GHz и GT200/1.2GHz). В случае сложных задач наблюдается явное превосходство по времени и производительности. Так, в работе [5] сделан вывод о том, что реализация на Xilinx Virtex-5 FPGA демонстрирует скорость вычислений в 24,3 раза выше, чем соответствующее программное обеспечение. Ряд новых свойств колебаний нейронов, включая наличие их иерархических уровней, установлено в работе [8]. Например, в отличие от уравнений, использованных в недавних работах [6, 7] динамическая система, предложенная в [8], содержит дробные степени переменных. Как нам известно, варианты FPGA не включают операцию возведения в произвольную дробную степень. Целью работы является поиск возможностей интегрально-схемотехнической реализации масштабно инвариантной модели нейронных сетей, в которой учитывается дробная степень.

Теоретические основы и методика исследований. В качестве тестовых объектов исследований мы выбрали известные модели нейронных сетей [6, 7] (ФитцХью-Нагумо, Хиндмарш-Роуз) и масштабно-инвариантную модель нейронных сетей [8]. Аппаратная часть реализована на основе отладочной платы ANVYLFPGAс интегральной схемой фирмы XILINX семейства Spartan 6. Цифровой сигнал на выходе FPGA получен в виде восьми битного кода данных. Для получения численных и графических данных использовался программный пакет MATLAB Simulink.

Уравнения колебаний нейронов помодели ФитцХью-Нагумо [6] записываются в виде:

$$\begin{aligned} \dot{v} &= v - v^3/3 - w + I_{ext} \\ \tau \cdot \dot{w} &= v + a - b \cdot w, \end{aligned} \tag{1}$$

где v – является мембранным потенциалом; w – переменная восстановления; I_{ext} – величина тока стимула; параметры $a, b, \tau > 0$.

Уравнения модели Хиндмарш-Роуз [7] имеют вид:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= y - a \cdot x^2 + b \cdot x^2 - z + I \\ \dot{y} &= c - d \cdot x^2 - y \\ \dot{z} &= r \cdot [s \cdot (x - x_R) - z], \end{aligned} \tag{2}$$

где I имитирует входной мембранный ток для биологических нейронов; b позволяет переключаться между берстовыми и спайковыми поведениями и контролировать частоту спайков; r контролирует скорость изменения медленной переменной z (т.е., эффективность медленных каналов в обмене ионами); параметры a, b, c, d контролируют скорость изменения переменной x и y ; s регулирует адаптацию; x_R устанавливает потенциал покоя системы.

Вначале мы получили экспериментальные результаты на основе FPGA для системы уравнений (1), (2) и они были сопоставлены с численными реализациями этих динамических систем. Получено удовлетворительное совпадение.

Уравнения масштабной инвариантной модели нейронных сетей включают в себя основные свойства нейрона[8]. Мы рассмотрим только три варианта моделирования нейронных сетей. В первомвариантевнешнее поле влияет на каждый исследуемый объект как модуляционно-периодический сигнал:

$$\dot{V}_k = \dots \text{EMBED Equation.3} \dots \tag{3}$$

где V_k – потенциал действия нейронов, V_0 - пороговые потенциалы возбуждения, k – порядковый номер нейрона. Внешнее поле принято в виде модуляционно – периодического сигнала:

$$F(t) = A(1 + B \sin(\Omega t)), \tag{4}$$

где A, B, Ω - амплитуда, коэффициент (глубизна), частота модуляции нейронных колебаний. Дробные числа $\gamma_k = D_k - d_k$, где D_k, d_k - фрактальные и топологические размерности описания геометрии нейрона с номером k .

Во втором варианте потенциал действия нейрона зависит только от соседнего нейрона, а модуляционно-периодическое внешнее поле будет влиять лишь на первый нейрон ($V^{(1)} = F, k \geq 2$):

$$\dots \text{EMBED Equation.3} \dots \tag{5}$$

Третий вариант учитывает многослойность нейронных сетей в виде иерархической структуры порядка n :

$$V_n = f \left(\dots f \left(\frac{V_0}{n}, V_n \right) \dots \right), \quad f(V_0, V) = V_0 \left(\left| 1 - \frac{F(t)}{V} \right| \right)^{\gamma}, n = 1, 2, \dots, \tag{6}$$

где число скобок равно n , $V_{n,i+1}$ находится по формуле (3).

Блок схема структурно-схемотехнической реализации уравнений (3) показана на рисунке (1). Модель состоит из трех взаимосвязанных нейронов (выделенных пунктиром), которым подается внешнее поле модуляционно–периодического характера.

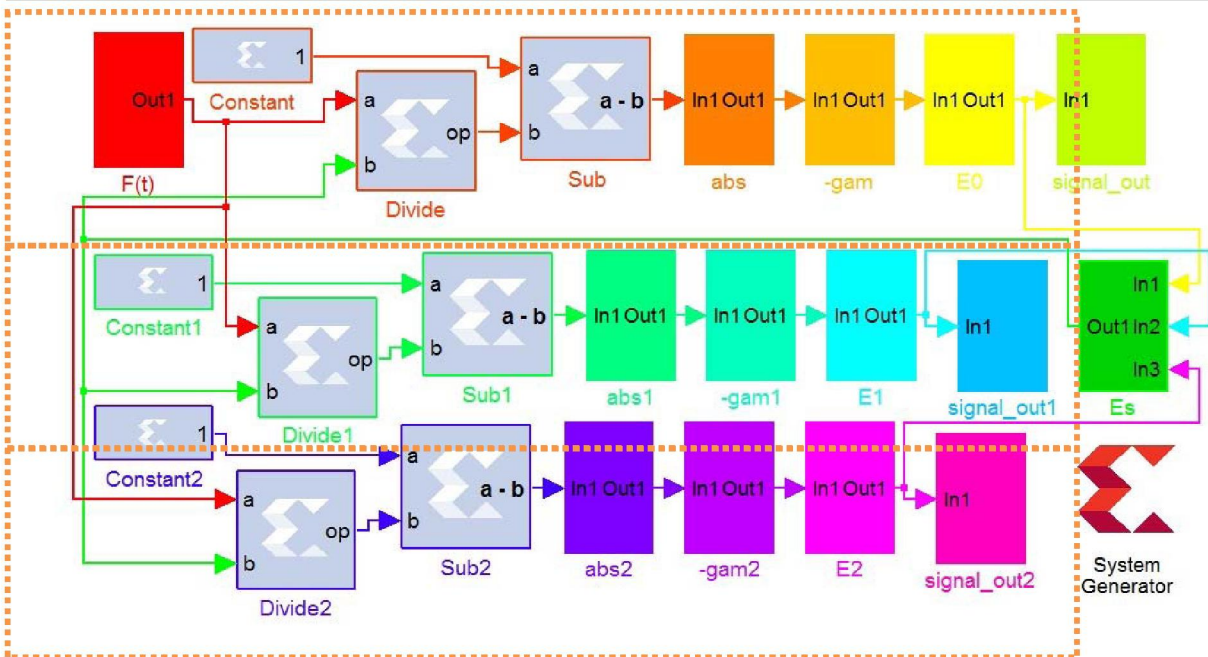


Рисунок 1 – Структурная схема реализации на FPGA масштабно-инвариантной модели нейронных сетей по системе уравнений (3)

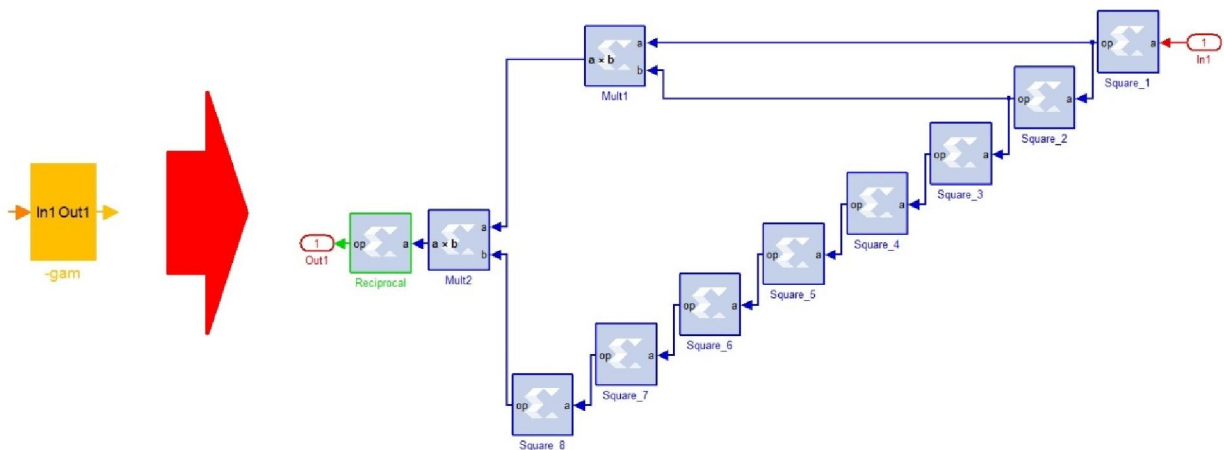


Рисунок 2 – Структурная схема блока вычисления произвольной дробной степени

На рисунке 2 показана структурная схема возведения сигнала в произвольную дробную степень на цифровых логических элементах. В устройствах FPGA нет готовых блоков возведения в произвольную дробную степень, предусмотрено только извлечение корня. Алгоритм вычисления на FPGA дробной степени γ запишем следующим образом:

$$\gamma = \sum_{k=1}^m a_k \cdot (2)^{-k} \quad (7)$$

где k – номер итерации, a_k – имеет значения $\{0,1\}$. Зная последовательность нужных нам элементов a_k , можно получить любые дробные степени сигнала x с желаемой точностью:

$$x^\gamma = \prod_k x^{\gamma_k} = \prod_{k=1}^m x^{a_k \cdot (2)^{-k}} \quad (8)$$

Для выявления типов физических явлений достаточно использовать значения γ с точностью до 1%. Так, в работе [9] показано, что хаотические процессы с скейлинговыми закономерностями, какими являются нейронные колебания в определенных интервалах параметров, классифицируются значениями γ : $\gamma_1 = 0.567, 1 - \gamma_1$; $\gamma_2 = 0.806, 1 - \gamma_2$; $\gamma_3 = 0.618, 1 - \gamma_3$.

Числа γ_1, γ_2 являются, соответственно, нормированными неподвижными значениями информации и энтропии – критериями самоорганизации. Известное число Фибоначчи (γ_3) является «золотым сечением» динамической меры, оно следует из теории для γ_1, γ_2 .

Из таблицы 1 видно, что для описания различных типов нейронных колебаний (сигналов нейронных сетей) достаточно использовать 9 итераций в формуле (8).

Таблица 1 – Значения γ согласно формуле (8) для $m = 9$

$m \backslash \gamma$	γ_1	$1 - \gamma_1$	γ_2	$1 - \gamma_2$	γ_3	$1 - \gamma_3$
9	0,567±0.001	0.433±0.001	0.806±0.001	0.194±0.001	0.618±0.001	0.382±0.001

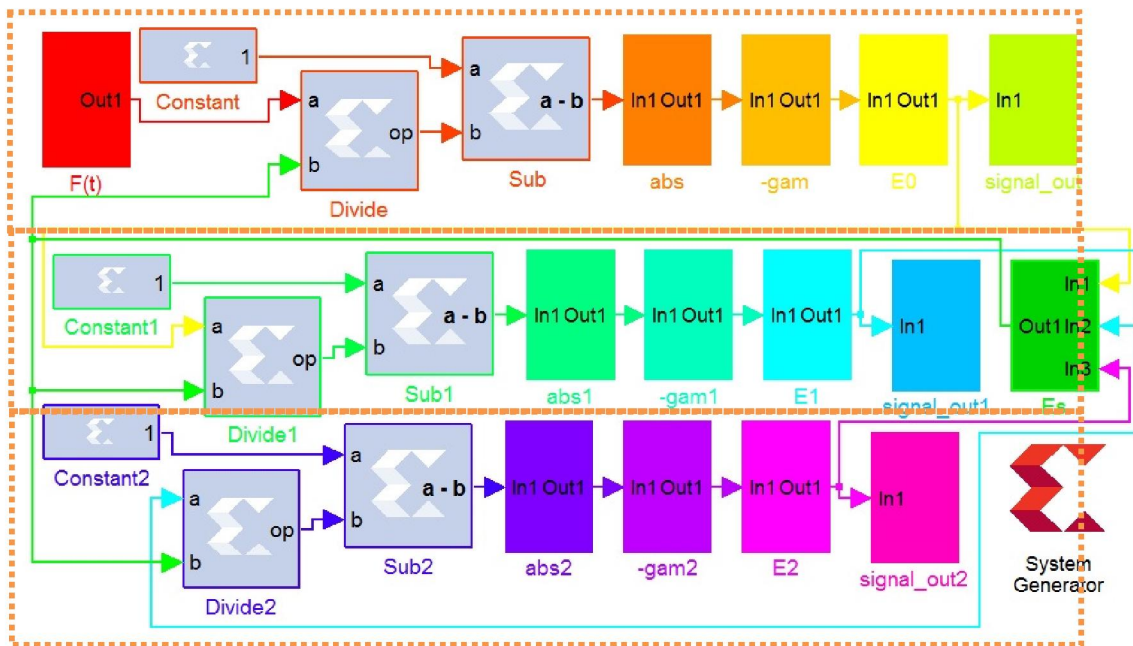
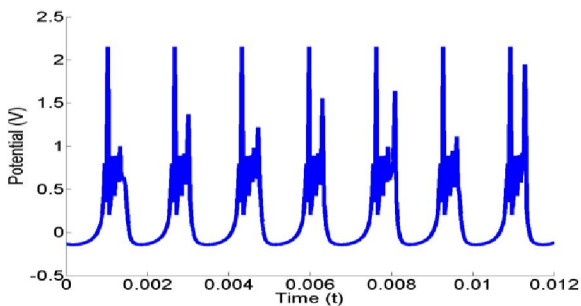
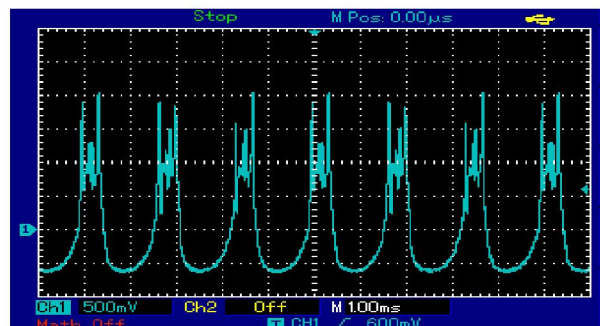


Рисунок 3 – Структурная схема цифровой реализации масштабно-инвариантной модели нейронных сетей согласно формуле (5)

Результаты численного и схмотехнического моделирования. Численные и схмотехнические реализации уравнений (4) приведены ниже.



(a)



(b)

Рисунок 4 – Численная реализация (a) и экспериментальный результат (b) для уравнений (3) при $A = 0.8, B = 0.4, \Omega = 800\pi, V_0 = 0.1, k = 3, \gamma = 0.567$

Рисунок 4 показывает возможность достаточно точной реализации цифровой техникой FPGA динамической системы (3). Количество осцилляций и амплитуда пиков совпадают в цифровой и схемотехнической реализациях. Здесь и далее приведены значения напряжения в милливольтгах, время – в миллисекундах.

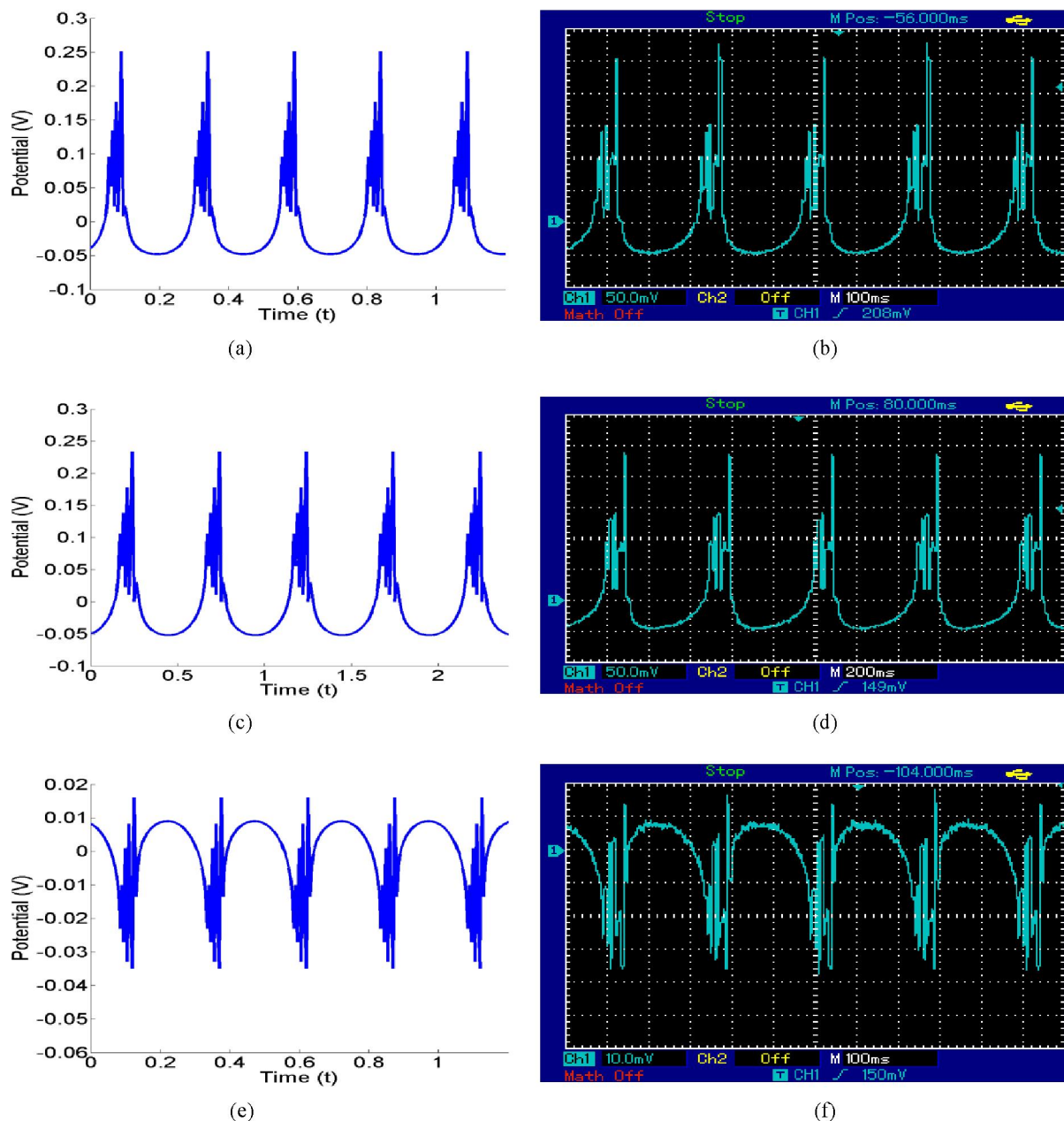


Рисунок 5 – Численные реализации (a,c,e) и экспериментальные результаты (b,d,f) масштабно-инвариантной модели нейронных сетей согласно уравнениям (5) $A = 0.8, B = 0.4, \Omega = 8\pi, \gamma = 0.5, V_0 = 0.1, k = 3$

Другой тип колебаний, описываемых уравнениями (5), также адекватно реализуется предлагаемой нами цифровой техникой (рисунок 5).

Реализация трехслойной нейронной сети, описываемой формулой (6), показано на рисунке 6. Сеть имеет три слоя по три нейрона на каждом слое. Такого рода задачи моделирования многослойных нейронных сетей требуют большой объем памяти FPGA. Так, использованная нами интегральная схема семейства Spartan 6 позволяет реализовать только иерархические уровни порядка $n=3$ и дробность степени в вариациях $m = 1,2$.

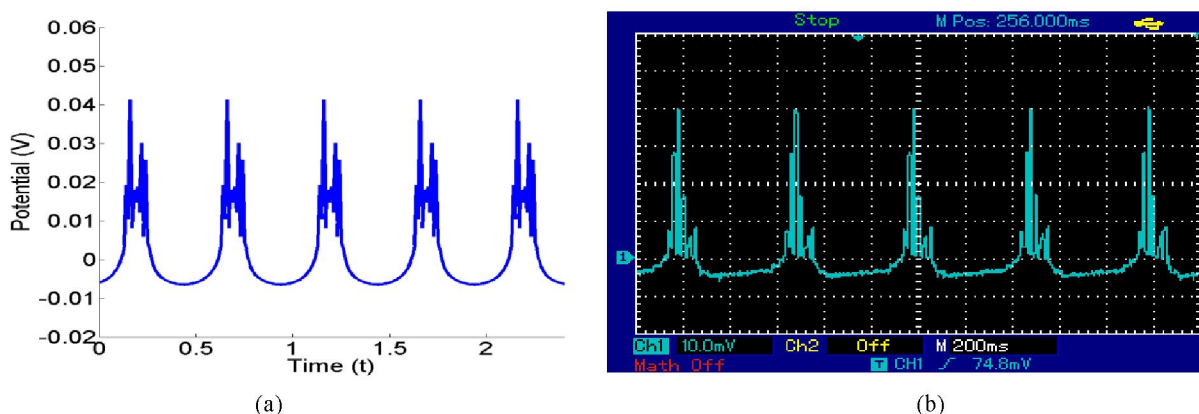


Рисунок 6. Численная реализация (а) и экспериментальный результат (б) по иерархической модели нейронных сетей (уравнения (6)) при $A = 0.45$, $B = 0.5$, $\Omega = 4\pi$, $\gamma = 0.5$, $V_0 = 0.1$, $k = 3$, $n = 3$

Заклучение. В работе приведены результаты электронно-цифровой реализации разных моделей динамики нейронов. Предлагаемая цифровая техника может генерировать различные по структуре сигналы нейронной сети: спайки, пачечные всплески, берсты.

Более общие модели нейронных сетей рассмотрены использованием интегральной схемотехники FPGA в реальном времени. Нами показана возможность схемотехнического моделирования нейронных сетей, описываемых дробными степенями сигналов, разработана структурная схема блока вычисления дробной степени. Интегральная схемотехника является простым способом реализации сложных задач. При реализации нейродинамических моделей с помощью FPGA достигается эффективность по времени и простота, малогабаритность используемой техники. Такого рода реализации моделей нейронных сетей могут быть применены для создания искусственных нейронных сетей, отличающихся от существующих аналогов максимальной близостью к системе биологических нейронов, что является перспективной задачей в этом направлении.

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

- [1] Soleimani H., Ahmadi A., Bavandpour M. Biologically inspired spiking neurons: Piecewise linear models and digital implementation. *Circuits and Systems I: Regular Papers, IEEE Transactions on*, **2012**, 59, 2991-3004 (in Eng.).
- [2] Weinstein R. K., Lee R. H. Architectures for high-performance FPGA implementations of neural models. *Journal of Neural Engineering*, **2006**, 3, 21-34 (in Eng.).
- [3] Thomas D. B., Luk W. FPGA accelerated simulation of biologically plausible spiking neural networks. *Field Programmable Custom Computing Machines, FCCM'09. 17th IEEE Symposium on*, **2009**, 45-52 (in Eng.).
- [4] Cheung K., Schultz S. R., Luk W. A large-scale spiking neural network accelerator for FPGA systems. *Artificial Neural Networks and Machine Learning-ICANN 2012*, **2012**, 113-120 (in Eng.).
- [5] Wildie M. et al. Reconfigurable acceleration of neural models with gap junctions. *Field-Programmable Technology, 2009. FPT 2009. International Conference on*, **2009**, 439-442 (in Eng.).
- [6] Baladron J. et al. Mean-field description and propagation of chaos in networks of Hodgkin-Huxley and Fitz Hugh-Nagumo neurons. *The Journal of Mathematical Neuroscience*, **2012**, 2, 10 (in Eng.).
- [7] Storace M., Lino D., de Lange E. The Hindmarsh-Rose neuron model: bifurcation analysis and piecewise-linear approximations. *Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science*, **2008**, 18, 033128 (in Eng.).
- [8] Zhanabaev Z. Zh., Kozhagulov Y. T. A Generic Model for Scale-Invariant Neural Networks. *Journal of Neuroscience and Neuroengineering*, **2013**, 2, 267-271 (in Eng.).
- [9] Zhanabaev Z. Zh., Grevtseva T. Yu. Fractal properties of nanostructured semiconductors. *Physica B: Condensed Matter*, **2007**, 391, 12-17 (in Eng.).

ПРОГРАММАЛАНАТЫН ИНТЕГРАЛДЫ СХЕМАДА НЕЙРОНДЫҚ ТОРДЫҢ ЭЛЕКТРОНДЫ МОДЕЛІ

З. Ж. Жанабаев, Е. Т. Кожажулов, Д. М. Жексебай

Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан

Тірек сөздер: нейрондық торлар, программаланатын логикалық интегралдық схемалар (ПЛИС), цифрлы схемалар, масштабты инварианттылық.

Аннотация. Жұмыс масштабты-инвариантты қасиеті бар жаңа нейрондық тор модельдерін интегралдық схемотехникалық түрде жүзеге асыруға арналған. Осындай модельдердің ерекшелігі бөлшек дәрежесі бар, дискретті бейнелеуді талдау үшін қажет. Программаланатын логикалық интегралдық схемада (FPGA) физикалық шаманы бөлшек дәрежеге алу алгоритмі ұсынылды. Сандық нәтижелермен FPGA құрылысындағы реализацияға салыстырулар жүргізілгені көрсетілген.

Поступила 17.03.2015 г.