

### УДК 681.3

*В.Д. ДМИТРИЕНКО*, д.т.н., проф. НТУ "ХПИ", г. Харьков,  
*Т.В. ГЛАДКИХ*, к.т.н., доц. НТУ "ХПИ", г. Харьков,  
*С.Ю. ЛЕОНОВ*, к.т.н., доц. НТУ "ХПИ", г. Харьков

## **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НЕЙРОННОЙ СЕТИ НА ОСНОВЕ К-ЗНАЧНЫХ НЕЙРОНОВ ДЛЯ РАСПОЗНАВАНИЯ РИСКОВ СБОЕВ**

Выполнена разработка модуля, позволяющего с помощью  $K$ -значной нейронной сети автоматизировать диагностику проектируемых сложных вычислительных устройств, имеющих повышенное быстродействие. Этот модуль работает совместно с системой моделирования на основе  $K$ -значного дифференциального исчисления и получает из нее  $K$ -значные сигналы. Ил.: 4. Табл.: 1. Библиогр.: 8 назв.

**Ключевые слова:**  $K$ -значная нейронная сеть, система моделирования на основе  $K$ -значного дифференциального исчисления,  $K$ -значные сигналы, риски сбоев.

**Постановка проблемы.** В современных вычислительных устройствах с большой плотностью размещения компонентов очень часто возникают ситуации, когда при функционировании компонент возникают риски сбоев на их выходах. Риски сбоев могут возникать как из-за рассинхронизации последовательностей сигналов управления или данных, так и из-за "плавающих" задержек в отдельных составляющих СБИС. Работа СБИС в этом случае очень трудно поддается диагностике, поскольку такие сбои носят нерегулярный характер.

Большое преимущество при проектировании современных устройств повышенной степени интеграции может дать использование системы моделирования на основе  $K$ -значного дифференциального исчисления [1]. Она позволяет представлять логические сигналы квантованными в  $K$ -значном алфавите, что значительно повышает точность моделирования при проектировании сложных устройств и увеличивает возможность выявления сбоев и рисков сбоев, обусловленных рассогласованием временных параметров сигналов и несоответствием амплитуд входных и выходных сигналов отдельных составляющих.

Для увеличения возможностей при проектировании современных устройств, заложенных в системе на основе  $K$ -значного дифференциального исчисления для выявления возможных сбойных ситуаций, предлагается использовать эту систему совместно с  $K$ -значными нейронными сетями, которые позволят автоматизировать диагностику рисков сбоев в проектируемых устройствах.

**Анализ литературы.** Работы по использованию дифференциального исчисления, вначале булевого, при моделировании

цифровых вычислительных устройств, начались еще в 80-х годах в работах Д. Бохмана и Х. Постхофа [2 – 4] в Германии. В дальнейшем вместо булевого дифференциального исчисления для моделирования вычислительных устройств было разработано  $K$ -значное дифференциальное исчисление [5] и на его основе создана система автоматизированного проектирования [6], использующая моделирование цифровых устройств в  $K$ -значном алфавите. Эта система для автоматизации диагностирования была дополнена  $K$ -значной нейронной сетью, работающей по правилу Хебба [7] и позволяющей автоматизировано выявлять риски сбоев в 13-значном алгоритме Фантози [8]. В статье рассматривается разработка  $K$ -значной нейронной сети, позволяющей выявлять риски сбоев, обусловленные "плавающими" задержками и разбросом временных параметров на выходе отдельных логических элементов в 13-значном алфавите Фантози. Однако полученную нейронную сеть не удавалось обучать распознавать сигналы из алфавита Фантози при больших интервалах задержек сигналов друг относительно друга. В связи с этим необходимы дальнейшие исследования для расширения возможностей диагностирования устройств, имеющих сложную структуру элементов с различной технологией изготовления и большим разбросом параметров задержек.

**Цель статьи** – разработка модуля, представляющего собой  $K$  значную нейронную сеть, и позволяющего автоматизировать выполнение диагностики сбойных ситуаций при проектировании сложных быстродействующих вычислительных устройств, проектируемых с помощью системы моделирования на основе  $K$ -значного дифференциального исчисления.

**Построение математической модели.** Предложена  $K$ -значная нейронная сеть, позволяющая выявлять риски сбоев в 13-значном алфавите Фантози для  $K$ -значных логических сигналов. На рис. 1 проиллюстрированы все тринадцать видов сигналов, полученных в системе моделирования на основе  $K$ -значного дифференциального исчисления при  $K = 7$ .

В соответствии с рисунком имеем тринадцать видов сигналов: сигнал вида " $_0$ " соответствует статическому сигналу нулевого уровня, значение " $_1$ " – значению уровня статической "единицы". Далее " $_A$ " соответствует переходу из нуля в неопределенность, " $_B$ " – переходу из единицы в неопределенность, " $_E$ " – гладкому переходу из нуля в единицу, " $_F$ " – динамическому риску сбоя при переключении из нуля в единицу, " $_H$ " – гладкому переходу из единицы в нуль, " $_I$ " – переходу из неопределенности в единицу, " $_L$ " – динамическому риску сбоя при

переключении из единицы в нуль, " $_P$ " – статическому риску сбоя в нуль, " $_O$ " – переходу из неопределенности в нуль, " $_V$ " – статическому риску сбоя в единицу, " $_X$ " – неопределенности.

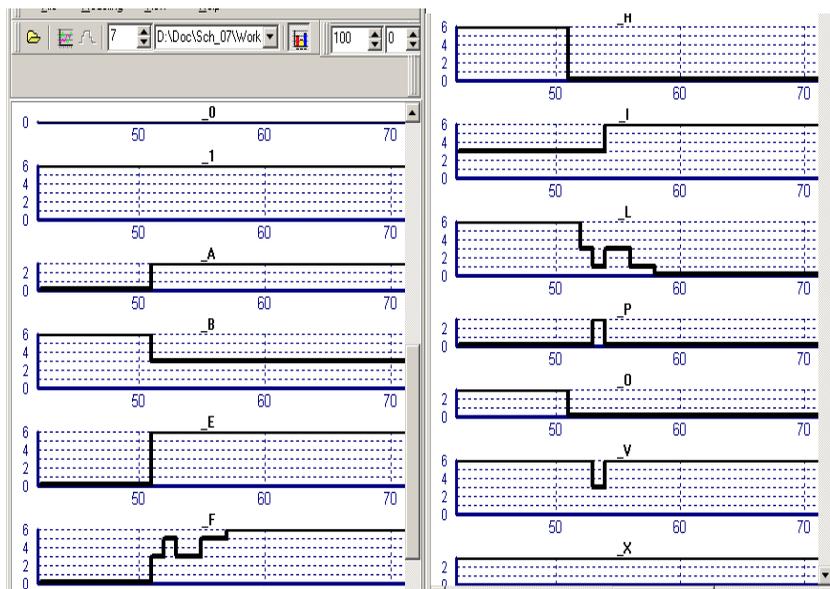


Рис. 1. Представление тринадцати видов сигналов в  $K$ -значном виде при использовании семизначного алфавита

При  $K$ -значном представлении сигналов цифровых устройств получим следующие 13 видов сигналов и сбоев: сигнал вида " $_0_K$ " – соответствует статическому бинарному сигналу нулевого уровня, значение " $_K - 1$ " – значению уровня статической бинарной "единицы", " $_{(K-1)/2}$ " – значению неопределенности " $_X_K$ " при бинарном представлении сигналов, " $_A_K$ " – соответствует переходу из нуля в неопределенность " $_{(K-1)/2}$ ", " $_B_K$ " – переходу из " $_{(K-1)}$ " в неопределенность " $_{(K-1)/2}$ ", " $_E_K$ " – переходу из нуля в " $_{(K-1)}$ ", " $_F_K$ " – динамическому риску сбоя при переключении из нуля в " $_{(K-1)}$ ", " $_H_K$ " – нормальному переходу из  $(K-1)$  в нуль, " $_I_K$ " – переходу из неопределенности " $_{(K-1)/2}$ " в  $(K-1)$ , " $_L_K$ " – динамическому риску сбоя при переключении из  $(K-1)$  в нуль, " $_P_K$ " – статическому риску сбоя в нуль, " $_O_K$ " – переходу из неопределенности " $_{(K-1)/2}$ " в нуль, " $_V_K$ " – статическому риску сбоя в  $(K-1)$ .

Каждый из этих сигналов может появляться на выходах элементов и устройств в интервале времени [1, 15] нс, что обусловлено разбросом времени задержки  $t_3$  отдельных логических элементов, составляющих структуру СБИС. Некоторые из сигналов приведены в табл.

Таблица

Десять видов сигналов при  $K=7$ .

$t$	<u>E</u>		<u>A</u>		<u>H</u>		<u>B</u>		<u>I</u>		<u>O</u>		<u>P</u>		<u>V</u>		<u>F</u>		<u>L</u>	
1	0	0	0	0	6	6	6	6	2	2	2	2	0	0	6	6	0	0	6	6
2	0	0	0	0	6	6	6	6	2	2	2	2	0	0	6	6	0	0	6	6
3	0	0	0	0	6	6	6	6	2	2	2	2	0	0	6	6	0	0	6	6
4	0	0	0	0	6	6	6	6	2	2	2	2	0	0	6	6	3	0	4	6
5	3	0	3	0	3	6	3	6	3	2	2	2	2	0	4	6	3	3	3	4
6	5	0	4	0	1	6	2	6	5	2	1	2	3	0	3	6	1	3	3	3
7	5	0	4	0	1	6	2	6	5	2	1	2	3	0	3	6	2	1	5	3
8	6	0	4	0	0	6	2	6	6	2	0	2	0	0	6	6	5	2	4	5
9	6	3	4	3	0	3	2	3	6	3	0	2	0	2	6	4	6	5	1	4
10	6	5	4	4	0	1	2	2	6	5	0	1	0	3	6	3	6	6	0	1
11	6	5	4	4	0	1	2	2	6	5	0	1	0	3	6	3	6	6	0	0
12	6	6	4	4	0	0	2	2	6	6	0	0	0	0	6	6	6	6	0	0
13	6	6	4	4	0	0	2	2	6	6	0	0	0	0	6	6	6	6	0	0
14	6	6	4	4	0	0	2	2	6	6	0	0	0	0	6	6	6	6	0	0
15	6	6	4	4	0	0	2	2	6	6	0	0	0	0	6	6	6	6	0	0

В первом столбце таблицы находятся значения моментов времени, в пределах которого плавают задержки выходных сигналов. Далее в таблице приведены пары десяти различных 7-значных сигналов из алфавита Фантози, смещенных один относительно другого из-за наличия различных задержек на выходе микросхемы. Эти задержки находятся в пределах максимальной задержки выходного сигнала данной микросхемы. В частности, во втором и третьем столбцах таблицы приведены два сигнала, соответствующие переходу из нуля в логическую единицу при  $K=7$ . В четвертом и пятом столбцах таблицы приведены сигналы, соответствующие переходу из нуля в неопределенность, и т.д.

На рис. 2 приведена архитектура нейронной сети, распознающей сигналы из алфавита Фантози.  $S$ - и  $R$ -нейроны имеют  $K$ -значную функцию активации:

$$f_{actR} = \begin{cases} 0, & \text{если } U_{\text{вх}} \leq 0, \\ U_{\text{вх}}, & \text{если } U_{\text{вх}} \in \{1, 2, \dots, K-1\}, \\ K-1, & \text{если } U_{\text{вх}} \geq K-1. \end{cases}$$

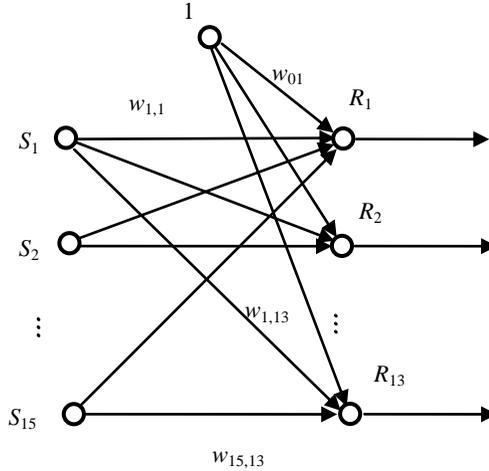


Рис. 2.  $K$ -значная нейронная сеть

На входные нейроны сети  $S_1, S_2, \dots, S_{15}$  подаются квантованные по времени и амплитуде сигналы с выходов отдельных элементов из системы моделирования на основе  $K$ -значного дифференциального исчисления. Выходные сигналы  $S$ -нейронов повторяют их входные сигналы:

$$U_{\text{вых}Sj} = U_{\text{вх}Sj}, \quad j = \overline{1, 15}.$$

Вектор выходных сигналов  $S$ -нейронов поступает на входы выходного слоя нейронной сети, состоящей из тринадцати  $K$ -значных нейронов (рис. 2).

Значения входных сигналов  $R$ -нейронов вычисляются по формуле

$$U_{\text{вх}Rj} = \sum_{i=1}^{15} U_{\text{вых}Si} w_{ij} + w_{0j}, \quad j = \overline{1, 13},$$

где  $w_{ij}$  – вес связи между  $i$ -м входным и  $j$ -м выходным нейронами сети ( $i = 1, 15, j = 1, 13$ );  $w_{0j}$  – вес связи смещения  $j$ -го нейрона,  $j = 1, 13$ .

Выходные сигналы  $R$ -нейронов рассчитываются с учетом  $K$ -значной функции активации и определяются выражением

$$U_{\text{вых}Rj} = f_{\text{act}R}(U_{\text{вх}Rj}).$$

При обучении нейронной сети выходные сигналы  $R$ -нейронов определялись следующим образом:

$$U_{\text{вых}Rj} = \begin{cases} K-1, & \text{если вектор входных сигналов} \\ & S_1, \dots, S_{15} \text{ соответствует } j\text{-му сигналу} \\ & \text{алфавита Фантози,} \\ 0, & \text{в противном случае, } j = \overline{1, 13}. \end{cases}$$

Обучение нейронной сети осуществлялось с помощью эвристического алгоритма, выполняющего коррекцию весов связей и смещений при наличии ошибок на выходе нейронной сети:

$$Err_j = \text{sign}(U_{\text{вых}Rj}^{\text{зад}} - U_{\text{вых}Rj}),$$

где  $U_{\text{вых}Rj}$  – значение сигнала на выходе нейрона  $R_j$ ;  $U_{\text{вых}Rj}^{\text{зад}}$  – требуемое значение выходного сигнала.

Наличие ненулевой ошибки требует коррекции весов связей и смещения:

$$w_{ij}^{\text{new}} = w_{ij}^{\text{old}} + \Delta w_{ij}, \quad b_j^{\text{new}} = b_j^{\text{old}} + \Delta b_j,$$

где  $\Delta w_{ij} = Err_j \times S_i \eta$ ,  $\Delta b_j = Err_j \times (K-1) \eta$ , где  $\eta$  – постоянный коэффициент, который при  $K = 7$  может принимать значения из множества  $(\frac{1}{6}, \frac{1}{3}, \frac{1}{2}, 1)$ .

Коррекция выполняется до тех пор, пока реакция нейронной сети на входную комбинацию не будет соответствовать требуемой.

Результат тестирования нейронной сети приведен на рис. 3. На рисунке приведено 20 входных сигналов из 10 классов рисков сбоя. Каждый класс риска сбоя представлен двумя сигналами, сдвинутыми друг относительно друга из-за наличия плавающей задержки в элементах.

В частности, первыми приведены реакции нейронной сети на два сигнала из класса " $E_K$ ", причем второй сигнал сдвинут относительно первого на 4 нс. При этом при обучении нейронной сети каждому сигналу этого класса риска сбоев соответствовала значение "6" на выходе первого  $R$ -нейрона и нулевых сигналов на выходе остальных нейронов во всем диапазоне плавающих задержек сигналов.

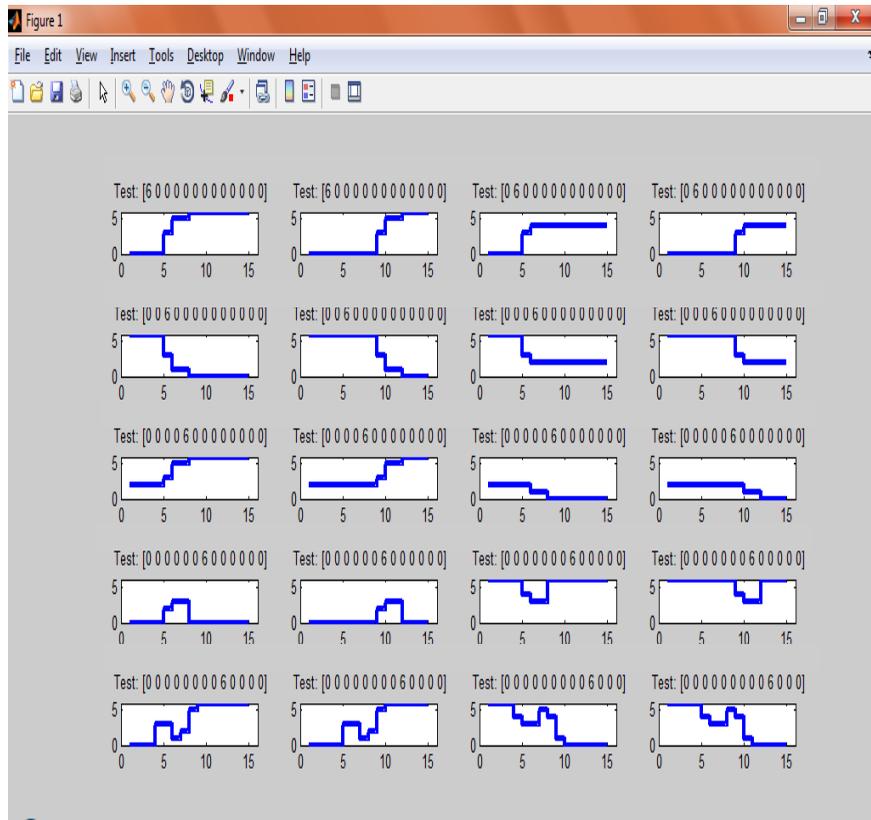


Рис. 3. Результат тестирования  $K$ -значной нейронной сети

Это соответствует выходным сигналам нейронов сети, приведенным над изображением первых двух сигналов. Аналогично представлены сигналы других рисков сбоев:  $A_K$ ,  $H_K$ , ...,  $L_K$ , и соответствующие им выходные сигналы нейронной сети.

На рис. 4 приведены веса связей сети после ее обучения.

X 1	-6	-38	-8	-12	22	-8	-6	24	-24	6	0	0	0
X 2	-6	-38	-8	-12	22	-8	-6	24	-24	6	0	0	0
X 3	-6	-38	-8	-12	22	-8	-6	24	-24	6	0	0	0
X 4	-15	-188	44	244	105	0	-6	-19	32	-16	0	0	0
X 5	-36	78	28	-312	-380	19	0	-34	66	-18	0	0	0
X 6	-2	-147	25	285	250	-23	3	18	-13	-10	0	0	0
X 7	-5	19	-27	29	125	-31	3	-33	-61	12	0	0	0
X 8	23	80	-11	-55	-123	25	-6	30	-3	22	0	0	0
X 9	5	-2	-5	-112	-70	2	-2	-16	21	0	0	0	0
X 10	2	-39	-12	70	79	-35	0	-8	1	-13	0	0	0
X 11	2	-39	-3	85	79	-6	0	5	4	-17	0	0	0
X 12	4	8	-36	-16	-2	-6	-6	8	-6	-12	0	0	0
X 13	4	8	-36	-16	-2	-6	-6	8	-6	-12	0	0	0
X 14	4	8	-36	-16	-2	-6	-6	8	-6	-12	0	0	0
X 15	4	8	-36	-16	-2	-6	-6	8	-6	-12	0	0	0
В	-102	198	-168	-768	-558	114	18	-288	-66	-18	0	0	0
	Y 1	Y 2	Y 3	Y 4	Y 5	Y 6	Y 7	Y 8	Y 9	Y 10	Y 11	Y 12	Y 13

Рис. 4. Значения весов связей  $w_{ij}, w_{0j} (i = \overline{1, 15}, j = \overline{1, 13})$  после обучения  $K$ -значной нейронной сети

Настройка разработанной  $K$ -значной нейронной сети выполнялась около 46 с при  $\eta = 1$ .

**Выводы.** В статье продемонстрировано функционирование разработанного модуля, представляющего собой  $K$ -значную нейронную сеть и позволяющего автоматизировать выполнение диагностики сбойных ситуаций при проектировании сложных быстродействующих вычислительных устройств, проектируемых с помощью системы моделирования на основе  $K$ -значного дифференциального исчисления.

**Список литературы:** 1. *Гладких Т.В.* Верификация динамических параметров электронных устройств на основе  $K$ -значного дифференциального исчисления: дис. канд. техн. наук: 05.13.05 / *Т.В. Гладких*. – Харьков, 2007. – 341 с. 2. *Бохман Д.* Двоичные динамические системы / *Д. Бохман, Х. Постхоф*. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 400 с. 3. *Bochmann D.* Logikentwurf mit XBOOLE: Algorithmen und Programme / *D. Bochmann*. – Berlin: Verl. Technik, 1991. – 304 p. 4. *Bochmann D.* Modelle für ereignisdiskrete Systeme im Booleschen Differentialkalkül / *D. Bochmann* // Automatisierungstechnik. – 1997. – V. 45. – № 3. – P. 99 – 106. 5. *Dmitrienko V.D.* Research digital devices by means of modeling system on the basis of  $K$ -Value differential calculus / *V.D. Dmitrienko, S.Yu. Leonov, T.V. Gladkikh* // Radioelectronics & Informatics. – № 1. – 2008. – P. 63 – 69. 6. *Dmitrienko V.D.* System of  $K$ -Value simulation for research switching processes in digital devices calculus / *V.D. Dmitrienko, S.Yu. Leonov, T.V. Gladkikh* // Proceedings of IEEE East-West Design & Test Workshop (EWDWTW'06). – Sochi,

Russia, 2006. – P. 428 – 435. 7. Модуль автоматизации диагностики переключательных процессов с использованием  $K$ -значной нейронной сети / *Дмитриенко В.Д., Леонов С.Ю., Гладких Т.В., Пилипенко О.В.* // Междунар. сб. научн. трудов: Математическое и программное обеспечение систем в промышленной и социальной сферах. – Магнитогорск: ФГБОУ ВПО "МГТУ", 2011. – С. 35 – 42. 8. *Aktouf C.* A complete strategy for testing an on-chip multiprocessor architecture / *C. Aktouf* // IEEE Design & Test of Computers. – 2002. – Issue:1. – P. 18 – 28.

УДК 681.3

**Використання нейронної мережі на основі  $K$ -значних нейронів для розпізнавання ризиків збоїв** / В.Д. Дмитрієнко, Т.В. Гладких, С.Ю. Леонов // Вісник НТУ "ХПІ". Тематичний випуск: Інформатика і моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2011. – № 36. – С. 52 – 60.

Виконана розробка модуля, що дозволяє за допомогою  $K$ -значної нейронної мережі автоматизувати діагностику проектуємих складних обчислювальних пристроїв, що мають підвищену швидкодію. Цей модуль працює спільно з системою моделювання на основі  $K$ -значного диференційного числення і отримує з неї  $K$ -значні сигнали. Іл.: 4. Табл.: 1. Бібліогр.: 8 назв.

**Ключові слова:**  $K$ -значна нейронна мережа, система моделювання на основі  $K$ -значного диференційного числення,  $K$ -значні сигнали, ризики збоїв.

UDK 681.3

**Use of neuron network on basis of  $K$ -value neurons for recognition of risks failures** / *V.D. Dmitrienko, T.V. Gladkikh, S.Yu. Leonov* // Herald of the National Technical University "KhPI". Subject issue: Information Science and Modelling. – Kharkov: NTU "KhPI". – 2011. – № 36. – P. 52 – 60.

Executed development module, allowing by  $K$ -value of neuron network to automatize diagnostics of the designed difficult computing devices, having an enhanceable fast-acting. This module works jointly with the system of design on the basis of  $K$ -value differential calculation and gets from it  $K$ -value signals. Figs.: 4. Table.: 1. Refs.: 8 titles.

**Keywords:**  $K$ -value neuron network, design system on the basis of  $K$ -value of differential calculation,  $K$ -value signals, risks of failures.

*Поступила в редакцію 14.07.2011*