

УДК 004.383.8

В.Д. Дмитриенко, С.Ю. Леонов, Н.В. Мезенцев

Национальный технический университет "ХПИ", Харьков

НЕЙРОННЫЕ СЕТИ АРТ С НЕСКОЛЬКИМИ ПОЛЯМИ ОБРАБАТЫВАЮЩИХ НЕЙРОНОВ

На основе нейронной сети адаптивной резонансной теории (АРТ) разработана архитектура и алгоритмы функционирования стабильно-пластичной дискретной нейронной сети АРТ с несколькими полями. Новая нейронная сеть предназначена для ускорения процессов обнаружения сигналов, ведущих к рискам сбоев, при моделировании цифровых устройств.

Ключевые слова: нейронная сеть с несколькими полями, адаптивная резонансная теория (АРТ), моделирование цифровых устройств.

Введение

Постановка проблемы. Существующие вычислительные устройства характеризуются частотой работы в несколько гигагерц и большой степенью интеграции элементов. Это приводит к тому, что даже небольшие отклонения при переключательных процессах на входах и выходах элементов могут вызывать сбои в работе устройств. При исследовании переключательных процессов в вычислительных устройствах учитывается также влияние на их работоспособность всплесков и провалов напряжений логических сигналов. Процесс обнаружения и поиска неисправностей в них становится все более трудоемким и длительным как в статических, так и в динамических режимах. Исследование и поиск неисправностей может быть выполнен с использованием системы моделирования на основе K -значного дифференциального исчисления. Идентификация процессов, которые ведут к рискам сбоев, при этом выполняется нейронной сетью адаптивной резонансной теории (АРТ), которая последовательно анализирует сигналы на выходах элементов моделирующего устройства. Однако это требует больших временных затрат. Поэтому целесообразна разработка нейронной сети, позволяющей выполнять анализ сигналов параллельно на выходах нескольких элементов, что позволит повысить быстродействие системы моделирования.

Анализ литературы. Проектируемые в настоящее время вычислительные устройства имеют высокое быстродействие и высокую плотность упаковки отдельных компонентов [1 – 4]. В связи с этим при их проектировании нельзя не учитывать влияние этих элементов друг на друга [5]. Однако двоичные методы моделирования при таком проектировании не могут дать необходимой точности и качества анализа. Поэтому для исследования работоспособности проектируемых вычислительных

устройств и их внутренних узлов применяют различные методы многозначного моделирования [6 – 9]. В частности, используется объединение многозначного моделирования с описанием динамических процессов переключения сигналов и влияния паразитных связей. В цифровых устройствах оно может быть осуществлено на основе K -значного дифференциального исчисления [8]. Такой подход обусловил разработку нового класса математических моделей – K -значных дифференциальных и интегральных уравнений, которые дают более полные данные о работоспособности устройств на стадии их проектирования по сравнению с системами булевых уравнений и не требуют таких вычислительных затрат как системы непрерывных дифференциальных уравнений.

В системе моделирования на основе K -значного дифференциального исчисления [10] может применяться многозначный алфавит Фантози [11], который позволяет при моделировании дифференцировать статические и динамические риски сбоев.

На рис. 1 проиллюстрировано представление всех тринадцати видов сигналов в алфавите Фантози в K -значном виде при использовании $K = 7$.

В соответствии с приведенным рисунком сигнал "_0" соответствует статическому сигналу нулевого уровня, сигнал "_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 из нуля в единицу, "_H" – гладкий переход из единицы в ноль, "_I" – переходу из неопределенности в единицу, "_L" – динамическому риску сбоя из единицы в ноль, "_P" – статическому риску сбоя в ноль, "_O" – переходу из неопределенности в ноль, "_V" – статический риск сбоя в единицу, "_X" – неопределенности.

Для классификации сигналов, получаемых в алфавите Фантози, в работе [12] используются

нейронные сети. В частности, при моделировании многоразрядного сумматора применяются контролирующие модули M_{APT} на основе нейронных се-

тей АРТ-1 и АРТ-1К (рис. 2), с помощью которых контролируются сигналы на входах и выходах различных элементов сумматора.

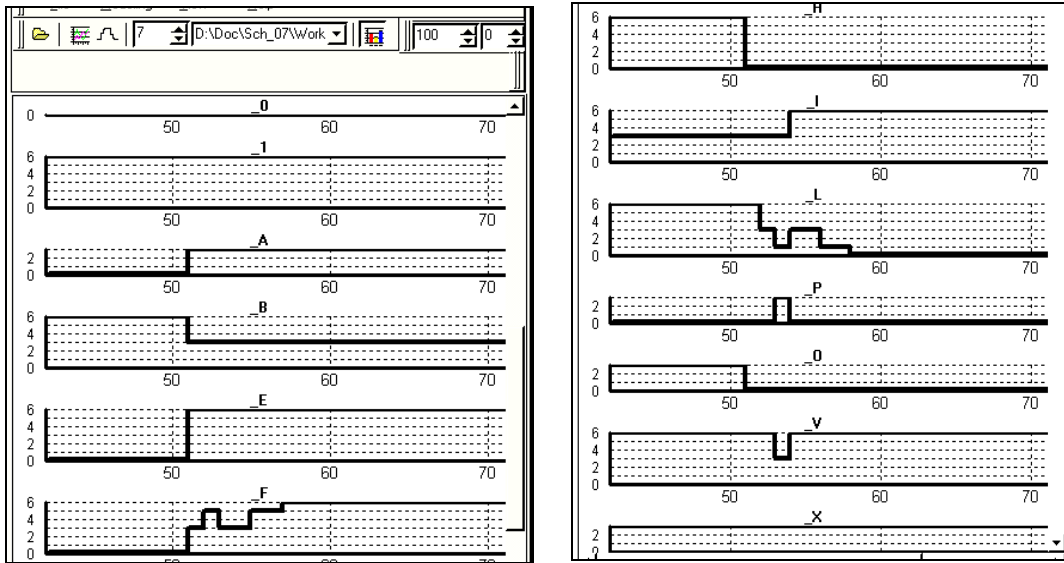


Рис. 1. Представление тринадцати видов сбоев в К-значном виде при использовании семизначного алфавита

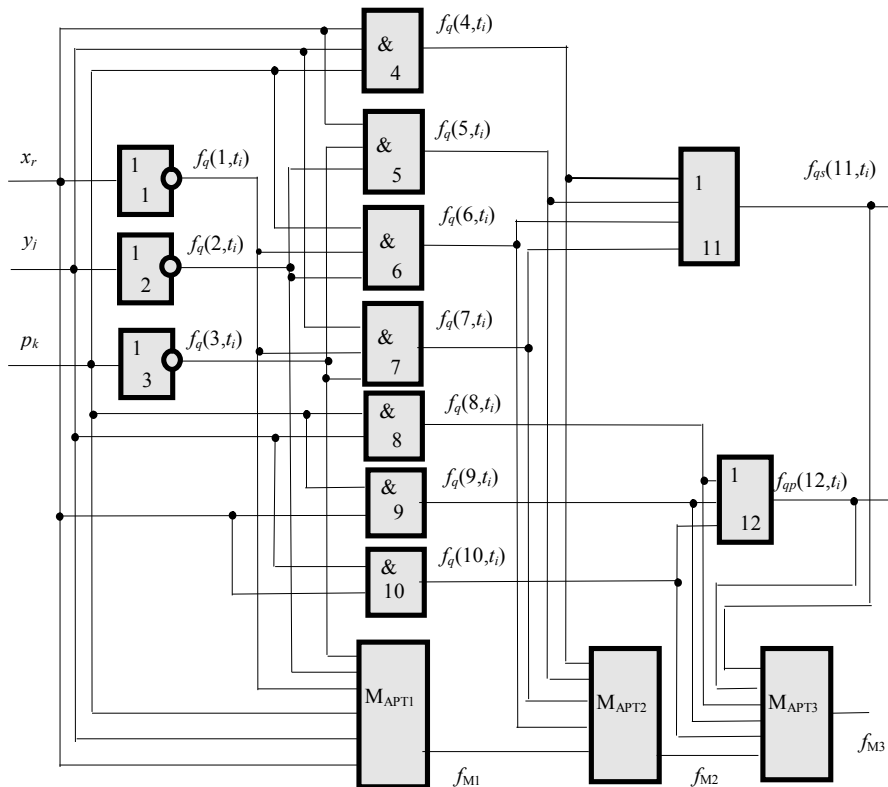


Рис. 2. Сумматор с контролирующими модулями на основе нейронных сетей

Нейронные сети АРТ-1 [13] рассчитаны на работу с бинарными входными изображениями или векторами. Их общая архитектура приведена на рис. 3 и отличается от базовой архитектуры сетей АРТ наличием дополнительных связей и элементов G_1 и G_2 , обеспечивающих управление процессом

обучения. Из-за большого числа связей здесь приведено обозначение только одной пары весов (W_{ij}^1, W_{ji}^2) связей между интерфейсными и распознающими нейронами. Эти веса будут неоднократно использоваться в дальнейшем описании функционирования сети. Большинство связей, приведенных

на рис. 3, являються возбуждающими: от входного слоя S-элементов к нейронам R, G₁, G₂ и Z-слоя, от нейронов G₁, G₂ соответственно к нейронам слоев Z и Y. Тормозящие сигналы передают только множества связей от интерфейсных элементов к R-нейрону, от R-нейрона к Y-элементам и от Y-нейронов к элементу G₁. Все связи нейронов сети АРТ-1 передают только бинарные сигналы 0 или 1. Нейроны слоев S- и Z-элементов образуют поле F₁ обрабатывающих нейронов.

Каждый элемент в интерфейсном или Y-слое сети АРТ-1 имеет три источника входных сигналов.

Произвольный интерфейсный элемент Z_i (i = 1, ..., n) может получать сигналы от элемента S_i входного слоя, от элементов Y-слоя и от нейрона G₁. Аналогично элемент Y_j (j = 1, ..., m) может получить сигналы от интерфейсных элементов, нейронов R и G₂. Для перевода нейронов интерфейсного или распознающего слоев в активное состояние необходимо наличие двух источников входных единичных возбуждающих сигналов. Поскольку каждый из рассматриваемых нейронов имеет три возможных источника сигналов, то условие возбуждения этих нейронов получило название "правила два из трех".

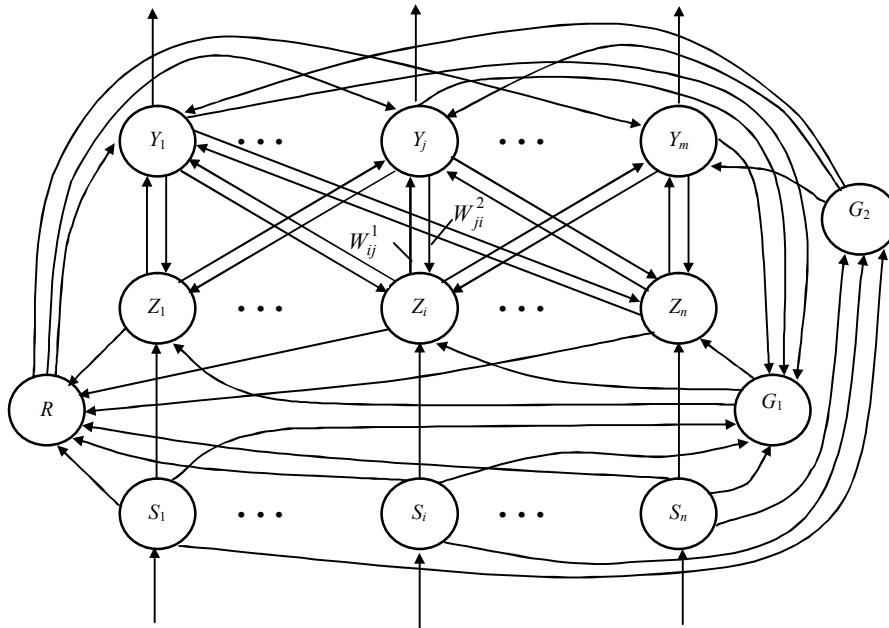


Рис. 3. Архитектура сети АРТ-1

В исходном состоянии все нейроны сети имеют нулевые выходные сигналы. При подаче на входы S-элементов бинарных компонент предъявляемого изображения часть из них, получивших единичные входные сигналы, переходит в возбужденное состояние ($U_{\text{вх}} = 1$).

Возбуждающие сигналы с выходов этих нейронов переводят в состояние "1" нейроны G₁, G₂ и R, а также поступают на входы соответствующих нейронов интерфейсного слоя. Нейроны интерфейсного слоя, получившие единичные сигналы от нейронов входного слоя и элемента G₁, по правилу два из трех переходят в активное состояние и посылают свои возбуждающие единичные сигналы по связям с весами W_{ij}^1 (i = 1, ..., n, j = 1, ..., m) на входы нейронов Y_j распознающего слоя. Нейроны распознающего слоя переходят в активное состояние по правилу два из трех, получая возбуждающие сигналы не только от элементов интерфейсного слоя, но и от элемента G₂.

Выходные сигналы активных Y-нейронов определяются соотношением

$$U_{\text{вых}Y_j} = U_{\text{вх}Y_j} = \sum_{i=1}^n W_{ij}^1 U_{\text{вх}Z_i}, \quad j = 1, \dots, m,$$

и удовлетворяют условию

$$0 < U_{\text{вых}Y_j} < 1.$$

Затем в Y-слое нейронов происходит латеральный процесс выделения единственного элемента J с наибольшим выходным сигналом. Все нейроны Y-слоя, кроме победившего Y_j, переводятся в неактивное состояние "0" ($U_{\text{вых}Y} = 0$), а победивший нейрон – в состояние с единичным выходным сигналом. Единичный сигнал победившего Y-нейрона затормаживает управляющий нейрон G₁, а также поступает по связям с весами W_{ji}^2 на входы элементов интерфейсного слоя. Поскольку элементы интерфейсного слоя подчиняются правилу два из трех, то при отсутствии возбуждающего сигнала от нейрона G₁ в активном состоянии останутся только те интерфейсные элементы, которые получают единичные сигналы и от элемента входного слоя, и от победившего Y_j-нейрона распознающего слоя. Тор-

мозащие сигналы активных элементов интерфейсного слоя поступают на входы R-элемента, который получает и возбуждающие сигналы от нейронов входного слоя. В зависимости от соотношения величин возбуждающих и тормозящих сигналов определяется выходной сигнал управляющего элемента R. При нулевом выходном сигнале R-элемента в сети наступает резонанс и происходит обучение весов связей победившего Y-нейрона, а при единичном выходном сигнале – победивший Y-нейрон затормаживается ($U_{\text{вых}Y_j} = -1$) и фактически лишается возможности участвовать в соревнованиях при предъявлении текущего изображения. Затем в Y-слое производится выбор нового победившего нейрона. Если входное изображение недостаточно подобно ни одному из запомненных, то все распределенные Y-нейроны в конце концов оказываются заторможенными, а победителем становится нераспределенный Y-элемент, который и запоминает в своих весах новое изображение.

Поскольку сеть АРТ-1 (рис. 2) имеет одно поле чувствительных элементов, то контроль сигналов выполняется последовательно, что увеличивает время моделирования.

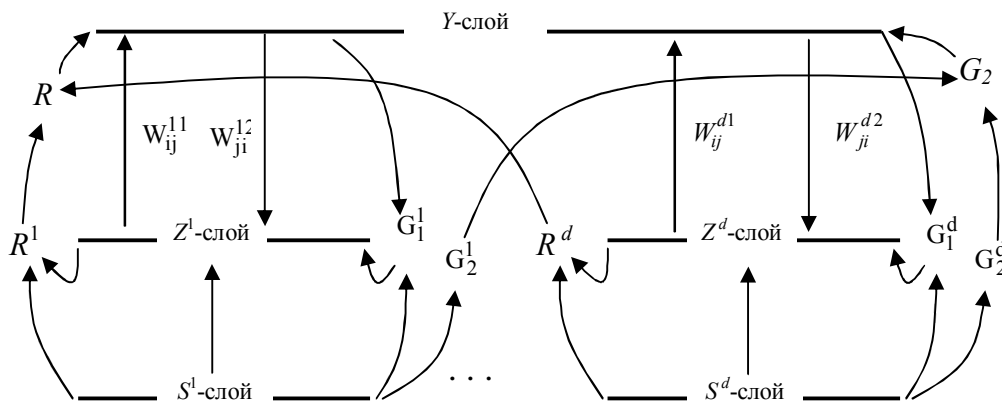


Рис. 4. Дискретная нейронная сеть АРТ с d параллельно работающими полями обрабатывающих нейронов

Каждое поле F_1^q ($q = \overline{1, d}$) содержит слой S^q входных нейронов

$$S_i^q \quad (i = \overline{1, n_q})$$

и слой Z^q интерфейсных нейронов

$$Z_i^q \quad (i = \overline{1, n_q}),$$

где n_q – число входных и интерфейсных нейронов в поле F_1^q .

Каждый элемент

$$Z_i^q \quad (q = \overline{1, d}, \quad i = \overline{1, n_q})$$

интерфейсного слоя нейронов связан связями с весами

Для ускорения процесса контроля предлагается дискретная нейронная сеть с несколькими полями чувствительных элементов, позволяющих контролировать сигналы цифровых устройств параллельно.

Целью статьи является разработка на основе дискретной нейронной сети АРТ-1 новой дискретной сети с параллельно работающими полями обрабатывающих нейронов.

Основная часть

На рис. 4 приведена архитектура предлагаемой нейронной сети, содержащей d параллельно работающих полей F_1^q ($q = \overline{1, d}$) входных обрабатывающих нейронов и d групп управляющих нейронов: $R^1, G_1^1, G_2^1, \dots, R^d, G_1^d, G_2^d$.

Выходы всех нейронов R^q, G_2^q ($q = \overline{1, d}$) поступают соответственно на входы управляющих нейронов R, G_2 , которые выдают возбуждающие сигналы только при наличии единичных возбуждающих сигналов на всех своих входах. Любое поле F_1^q аналогично полю F_1 дискретной нейронной сети АРТ-1 и выполняет аналогичные функции.

$$W_{ij}^{q1}, W_{ji}^{q2} \quad (q = \overline{1, d}, \quad i = \overline{1, n_q}, \quad j = \overline{1, m})$$

с распознающими нейронами Y-слоя.

Таким образом, каждый Y-элемент в этой сети имеет

$$N_d = \sum_{q=1}^d n_q$$

связей, которые могут передавать на их входы возбуждающие сигналы от интерфейсных нейронов d параллельно работающих полей F_1^q обрабатывающих нейронов.

С помощью такого же числа N_d связей каждый распознающий нейрон из Y-слоя может посы-

лять возбуждающие сигналы на входы интерфейсных нейронов всех d полей F_1^q .

Y-нейроны в этой сети имеют три источника входных сигналов: от d слоев интерфейсных элементов и от управляющих нейронов G_2 и R . Для перевода нейронов распознающего слоя Y в активное состояние необходимо, как и в случае сети АРТ-1, наличие сигналов из двух источников.

В исходном состоянии нейроны $R^q, G_1^q, G_2^q, R, G_2$ и входных слоев S^q ($q = \overline{1, d}$) имеют нулевые выходные сигналы. При подаче на входы S -элементов всех полей F_1^q входных обрабатывающих нейронов бинарных компонент предъявляемых изображений часть из них, получивших единичные входные сигналы, переходит в возбужденное состояние ($U_{\text{вых}} = 1$). Возбуждающие сигналы с выходов S -нейронов каждого входного слоя S^q переводят в состояние "1" нейроны R^q, G_1^q, G_2^q ($q = \overline{1, d}$), а также поступают на входы соответствующих Z -нейронов d интерфейсных слоев. Нейроны интерфейсного слоя Z^q ($q = \overline{1, d}$), получившие единичные сигналы от нейронов входного слоя и элемента G_1^q , по правилу два из трех переходят в активное состояние и посылают свои возбуждающие сигналы на входы соответствующих нейронов Y -слоя. Нейроны Y -слоя переходят в активное состояние по правилу два из трех, получая возбуждающие сигналы не только от элементов интерфейсного слоя, но и от управляющего элемента G_2 , который возбужден только в том случае, когда получает возбуждающие сигналы от всех нейронов G_2^q ($q = \overline{1, d}$) параллельно работающих полей F_1^q входных обрабатывающих нейронов. Выходные сигналы активных Y -нейронов определяются соотношениями:

$$U_{\text{вых}Y_j} = \sum_{q=1}^d \sum_{i=1}^{n_q} W_{ij}^{q1} U_{\text{вых}Z_i}, \quad j = \overline{1, m},$$

и удовлетворяют условию

$$0 < U_{\text{вых}Y_j}.$$

Затем в слое Y нейронов происходит латеральный процесс выделения единственного элемента с наибольшим выходным сигналом. Все нейроны этих слоев, кроме победившего, переводятся в неактивное состояние "0" ($U_{\text{вых}} = 0$), а победивший нейрон – в состояние с единичным выходным сигналом. Единичный сигнал победившего нейрона затормаживает управляющие нейроны G_1^q ($q = \overline{1, d}$), а также поступает на входы элементов интерфейсных

слоев Z^q ($q = \overline{1, d}$). Поскольку элементы интерфейсных слоев подчиняются правилу два из трех, то при отсутствии возбуждающих сигналов от нейронов G_1^q ($q = \overline{1, d}$) в активном состоянии останутся только те интерфейсные элементы полей F_1^q , которые получают единичные сигналы и от элемента входного слоя, и от победившего нейрона распознающего слоя. Тормозящие сигналы активных элементов интерфейсного слоя поступают на входы соответствующих управляющих нейронов R^q ($q = \overline{1, d}$), которые получают и возбуждающие сигналы от нейронов входных слоев S^q ($q = \overline{1, d}$).

С помощью элементов R^q вычисляются значения параметров сходства p^q между компонентами входного изображения и изображения, хранящегося в весах связей победившего нейрона:

$$p^q = \frac{\|U_{\text{вых}Z^q}\|}{\|U_{\text{вых}S^q}\|} = \frac{\sum_{i=1}^n U_{\text{вых}Z_i^q}}{\sum_{i=1}^n U_{\text{вых}S_i^q}}, \quad q = \overline{1, d}.$$

Если вычисленные значения параметров сходства указывают на совпадение с наперед заданной точностью d компонент входного и хранящегося в памяти изображений, то в сети наступает резонанс. В этом случае на выходе нейронов R^q ($q = \overline{1, d}$) и R будут нулевые выходные сигналы. При величине хотя бы одного параметра сходства p^q ($q = \overline{1, d}$) меньше наперед заданного значения, на выходе соответствующего управляющего элемента R^q появляется единичный сигнал, которым возбуждается управляющий нейрон R . Единичным сигналом R -нейрона затормаживается победивший Y -нейрон ($U_{\text{вых}} = -1$) и фактически лишается возможности участвовать в соревнованиях при предъявлении текущего изображения. Затем в распознающем слое Y производится выбор нового победившего элемента. Если входное изображение недостаточно подобно ни одному из запомненных, то все распределенные Y -нейроны, в конце концов, оказываются заторможенными, а победителем становится нераспределенный Y -элемент, который и запоминает в своих весах новое изображение.

При необходимости нейронная сеть переводится из режима обучения с учителем в обычный режим функционирования дискретных сетей адаптивной резонансной теории.

В работе [12] одна сеть АРТ-1 контролирует от четырех до шести сигналов. Замена такой сети се-

тью с четырьмя-шестью полями входных нейронов при использовании тринадцатизначного алфавита Фантози для однозначного определения неправильного сигнала потребует от $13^4 = 28561$ до $13^6 = 4826809$ распознающих нейронов. Поэтому рациональнее контролировать только отсутствие сигналов, ведущих к рискам сбоев. В этом случае число требуемых выходных нейронов уменьшается до $4^4 = 256$ при четырех входных полях нейронов и до $4^6 = 4096$ нейронов при шести полях. В последнем случае число распознающих нейронов примерно в 316 раз больше по сравнению с нейронной сетью АРТ-1, однако это позволяет примерно в 6 раз повысить быстродействие при контроле цифровых схем в процессе моделирования.

Выводы

На основе дискретной нейронной сети адаптивной резонансной теории АРТ-1 разработана архитектура и алгоритмы функционирования стабильно-пластичной дискретной нейронной сети АРТ с несколькими полями входных нейронов, которая выполняет одновременный контроль до 6 сигналов, что существенно уменьшает время моделирования цифровых устройств.

Перспективой дальнейших исследований является разработка непрерывных и К-значных нейронных сетей АРТ, имеющих иерархическую архитектуру, которая позволит уменьшить общее число нейронов, используемых для контроля сигналов в процессе моделирования цифровых устройств.

Список литературы

1. Шахнов В.А. Наноразмерные структуры: классификация, формирование и исследование / В.А. Шахнов, Ю.В. Панфилов, А.И. Власов. – М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2008. – 100 с.
2. Немудров В. Системы-на-кристалле. Проектирование и развитие / В. Немудров, Г. Мартин. – М.: Техносфера, 2004. – 212 с.
3. Hall Stephen H. Advanced signal integrity for high-speed digital designs / Stephen H. Hall, Howard L. Heck. – A JOHN WILEY & SONS, INC., PUBLICATION, New Jersey, 2009. – 660 p.
4. Власов А.И. Автоматизированное проектирование наносистем / А.И. Власов, Л.А. Зинченко, В.В. Макаручук, И.А. Родионов. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. – 184 с.
5. Alejandro Duenas Jimenez. 2-D Electromagnetic Simulation of Passive Microstrip Circuits / Duenas Jimenez Alejandro. – Boca Raton: London, New York, 2009. – 274 p.
6. Дмитриенко В.Д. К-значное дифференциальное исчисление и моделирование цифровых устройств / В.Д. Дмитриенко, С.Ю. Леонов. – Харьков: Транспорт Украины, 1999. – 223 с.
7. Shinobu Nagayama Butler EVMDD-Based Analysis and Diagnosis Methods of Multi-State Systems with Multi-State Components / Nagayama Shinobu, Sasao Tsutomu, T. Jon // Multiple-Valued Logic and Soft Computing. – 2014. – Vol. 22. – № 1 – 2. – P. 59 – 78.
8. Леонов С.Ю. Автоматизация выявления рисков сбоев с помощью нейронной сети / С.Ю. Леонов, Т.В. Гладких // Вестник НТУ "ХПИ". Серия "Информатика и моделирование". – Вып. 31. – Харьков: НТУ "ХПИ", 2010. – С. 65 – 73.
9. Дмитриенко В.Д. Использование нейронной сети на основе К-значных нейронов для распознавания рисков сбоев / В.Д. Дмитриенко, С.Ю. Леонов, Т.В. Гладких. – Вестник НТУ "ХПИ". Серия "Информатика и моделирование". – Харьков: НТУ "ХПИ", 2011. – Вып. 36. – С. 52–60.
10. Гладких Т.В. Верификация динамических параметров электронных устройств на основе К-значного дифференциального исчисления: дис. канд. техн. наук: 05.13.05 / Т.В. Гладких. – Харьков, 2007. – 341 с.
11. 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..
12. Леонов С.Ю. Теория автоматизированного проектирования электронных устройств на основе К-значного моделирования: дис. докт. техн. наук: 05.13.05 / С.Ю. Леонов. – Харьков, 2014. – 364 с.
13. Носков В.И. Моделирование и оптимизация систем управления и контроля локомотивов / В.И. Носков, В.Д. Дмитриенко, Н.И. Заполовский, С.Ю. Леонов. – Научное издание – Харьков: ХФИ "Транспорт Украины", 2003. – 245 с.

Поступила в редколлегию 27.02.2015

Рецензент: д-р техн. наук проф. А.А. Серков, Национальный технический университет «ХПИ», Харьков.

НЕЙРОННІ МЕРЕЖІ АРТ З ДЕКІЛЬКОМА ПОЛЯМИ ОБРОБНИХ НЕЙРОНІВ

В.Д. Дмитрієнко, С.Ю. Леонов, М.В. Мезенцев

На основі нейронної мережі адаптивної резонансної теорії (АРТ) розроблена архітектура та алгоритми функціонування стабільно-пластичної дискретної нейронної мережі АРТ з декількома полями. Нова нейронна мережа призначена для прискорення процесів виявлення сигналів, провідних до ризиків збоїв, при моделюванні цифрових пристроїв.

Ключові слова: нейронна мережа з декількома полями, адаптивна резонансна теорія, моделювання цифрових пристроїв.

NEURAL NETWORKS ART WITH SEVERAL FIELDS BY NEURAL

V.D. Dmitrienko, S.Yu. Leonov, M.V. Mezencev

Based on neural network adaptive resonance theory (ART) architecture and algorithms developed stable operation of plastic-discrete neural network ART with several fields. A new neural network is designed to accelerate the processes of signal detection, leading to risk failure, in the simulation digital devices.

Keywords: neural network with multiple fields, adaptive resonance theory (ART), the simulation of digital devices.