

УДК 004.383.8

В.Д. Дмитриенко, С.Ю. Леонов

Национальный технический университет «ХПИ», Харьков

РАЗРАБОТКА К-ЗНАЧНЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ АРТ С НЕСКОЛЬКИМИ ПОЛЯМИ ОБРАБАТЫВАЮЩИХ НЕЙРОНОВ

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

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

Введение

Постановка проблемы и анализ литературы.

При функционировании современных цифровых устройств даже небольшие отклонения при переключательных процессах на входах и выходах элементов могут вызывать сбои в их работе [1 – 4]. Кроме того, риски сбоев в таких устройствах могут возникать как из-за рассинхронизации последовательностей сигналов управления или передачи 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. Необходимо также при проектировании учитывать влияние отдельных элементов друг на друга [5]. Процесс обнаружения и поиска неисправностей 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 К-значного дифференциального исчисления [6], в которой для представления различных видов сигналов и сбоев применяется тринадцатизначный алфавит Фантози [7]. Идентификация процессов, которые ведут к рискам сбоев, при этом выполняется нейронной сетью адаптивной резонансной теории (АРТ-1К), которая последовательно анализирует сигналы на выходах элементов моделирующего устройства [8, 9].

Архитектура такой нейронной сети включает три группы нейронов: поле F_1 входных обрабатывающих нейронов, состоящее из двух слоев S- и Z-элементов, слой распознающих Y-нейронов и управляющие нейроны R, G_1 , G_2 (рис. 1).

Входной слой S-элементов воспринимает предъявляемые изображения и передает полученную информацию нейронам интерфейсного Z-слоя и управляющим нейронам R, G_1 , G_2 . Каждый элемент Z_i ($i = 1, \dots, n$) интерфейсного слоя связан с каждым элементом Y_j ($j = 1, \dots, m$) распознающего слоя Y двумя видами взвешенных связей. Сигналы из интерфейсного слоя в слой Y передаются идущими

снизу вверх связями с весами W_{ij}^1 , а из распознающего слоя в интерфейсный – связями с весами W_{ij}^2 , ($j = 1, \dots, m$, $i = 1, \dots, n$). Из-за наличия большого числа связей на рис. 1 приведено обозначение только одной пары связей с весами W_{ij}^1 , W_{ij}^2 , между интерфейсным и распознающим слоями элементов.

Слой Y является слоем конкурирующих или соревнующихся нейронов. В любое время каждый элемент Y_j ($j = 1, \dots, m$) распознающего слоя находится в одном из трех состояний:

- активен (выходной сигнал $U_{\text{вых } Y_j}$ нейрона Y_j равен d: $U_{\text{вых } Y_j} = d$ $d = 6$ для сети АРТ-1К, при значности входного алфавита $K = 7$;
- неактивен ($U_{\text{вых } Y_j} = 0$, но нейрон может участвовать в соревновании);
- заторможен ($U_{\text{вых } Y_j} = -1$ и нейрон не допущен к соревнованиям при предъявлении текущего входного изображения).

После предъявления входного изображения активным остается только один распознающий нейрон, все остальные Y-элементы имеют нулевые или отрицательные выходные сигналы. Выделенный распознающий нейрон в режиме обучения допускается к обучению входным изображением только в том случае, когда его весовой вектор связей из слоя Y в слой Z подобен входному вектору. Это решение принимается с помощью R-нейрона и специального параметра, получившего название параметра сходства, и сигналов, поступающих из входного и интерфейсного слоев элементов. Через вспомогательные элементы производится или обучение выделенного распознающего Y-элемента, или его затормаживание (сброс) с дальнейшим исключением из числа соревнующихся при повторных предъявлениях этого же входного изображения, когда из Y-слоя выделяются новые кандидаты для обучения входным изображением.

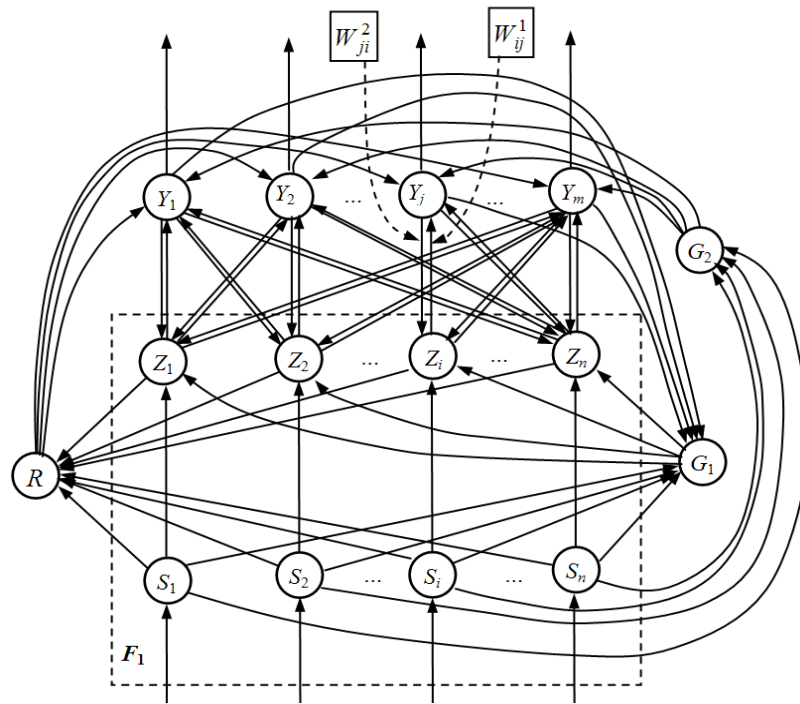


Рис. 1. Архитектура нейронной сети ART-1K

Большинство связей, приведенных на рис. 1, являются 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 и от Y-нейронов к элементу G₁, от R-нейрона к нейрону победителю в распознающем слое (при затормаживании распознающего нейрона). Все связи сети ART-1K передают K-значные сигналы из алфавита M = {0, 1, 2, ..., K - 1}.

Каждый элемент в интерфейсном или Y-слое сети ART-1K 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 возбуждающих сигналов. Поскольку каждый из рассматриваемых нейронов имеет три возможных источника сигналов, то условие возбуждения этих нейронов получило название "правила два из трех".

В режиме обучения в исходном состоянии нейроны R, G₁, G₂ и входного слоя S имеют нулевые выходные сигналы. При подаче на входы S-элементов K-значных компонент предъявляемого изображения часть из них, получивших ненулевые входные сигналы, переходит в возбужденное состояние (U_{вых} > 0). Возбуждающие сигналы с выходов этих нейронов переводят в состояние "6" нейро-

ны G₁, G₂, а также поступают на входы соответствующих нейронов интерфейсного слоя. Нейроны интерфейсного слоя, получившие сигналы от нейронов входного слоя и элемента G₁, по правилу два из трех переходят в активное состояние и посылают свои возбуждающие 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

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

и удовлетворяют условию $0 < U_{\text{вых}Y_j} \leq 6$.

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 (U_{выхY} = 0), а победивший нейрон – в состояние с максимальным выходным сигналом U_{выхY} = 6. Сигнал победившего Y-нейрона затормаживает управляющий нейрон G₁, а также поступает по связям с весами W_{ij}² на входы нейронов 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 сигналы и от элемента входного слоя, и от победившего Y_j -нейрона распознающего слоя. Тормозящие 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.

Режим распознавания нейронной сети отличается от режима обучения тем, что при наличии новой информации на входе нейронной сети ее обучение не происходит. Применение нейронных сетей АРТ для диагностики или контроля цифровых устройств требует больших временных затрат из-за большого числа контролируемых элементов. Для повышения быстродействия подобных сетей необходима разработка

нейронной сети, позволяющей выполнять анализ сигналов параллельно на выходах нескольких элементов [9].

Таким образом для диагностики статических и динамических рисков сбоев в вычислительной аппаратуре целесообразным становится разработка и применение K-значных нейронных сетей АРТ повышенного быстродействия с несколькими полями распознающих K-значных нейронов, работающих на основе алфавита Фантози [10].

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

Основная часть

На рис. 2 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-1К и выполняет аналогичные функции.

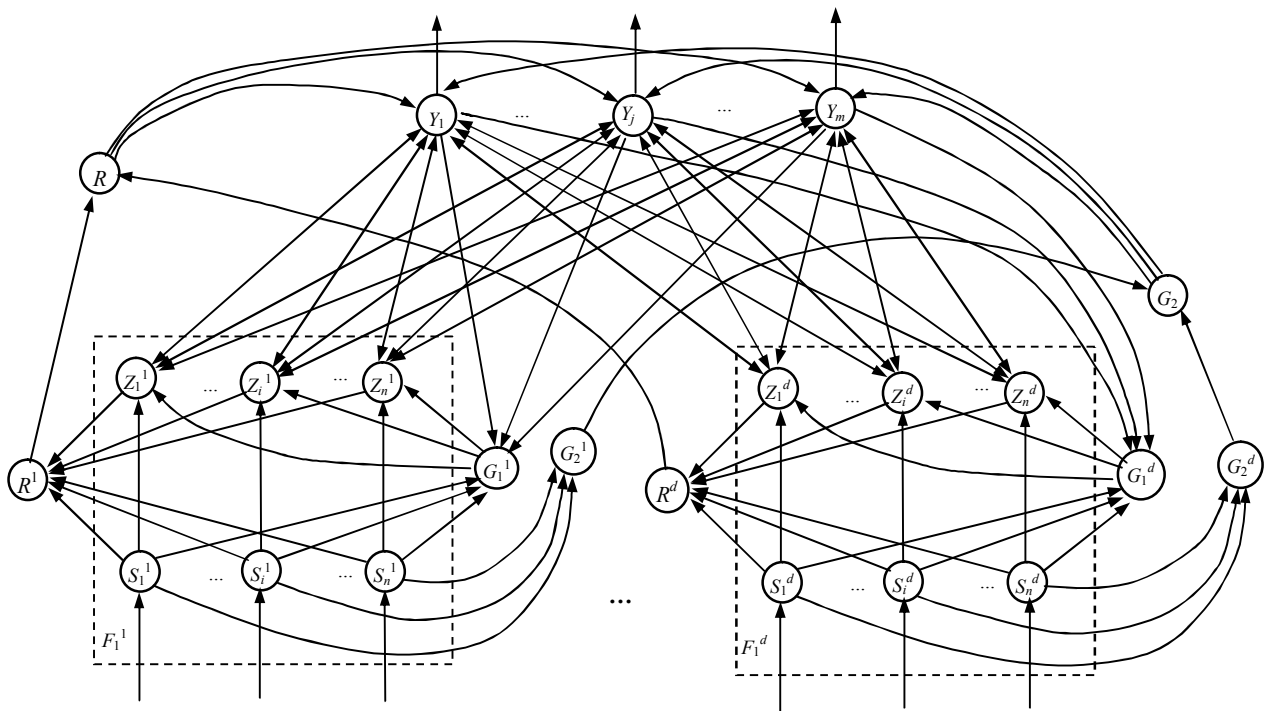


Рис. 2. K-значная дискретная нейронная сеть АРТ-1КП с d параллельно работающими полями обрабатывающих K-значных нейронов

Каждое поле F_1^q ($q = \overline{1, d}$) содержит слой S^q входных нейронов S_i^q ($i = \overline{1, n_q}$) и слой Z^q интерфейсных нейронов Z_i^q ($i = \overline{1, n_q}$), где n_q – число входных и интерфейсных нейронов в поле F_1^q . Каждый элемент Z_i^q ($q = \overline{1, d}$, $i = \overline{1, n_q}$) интерфейсного слоя нейронов связан связями с весами W_{ij}^{q1} , W_{ji}^{q2} ($q = \overline{1, d}$, $i = \overline{1, n_q}$, $j = \overline{1, m}$) 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 посылать возбуждающие сигналы на входы интерфейсных нейронов всех d полей F_1^q . Веса связей каждого поля в режиме обучения вычисляются отдельно.

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-1К, наличие сигналов из двух источников.

В режиме распознавания 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 ($U_{\text{вых}} = K - 1$). Возбуждающие сигналы с выходов S -нейронов каждого входного слоя S^q переводят в состояние "б" (при использовании семизначного алфавита) 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 положительные 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 эле-

ментов 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:

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

и удовлетворяют условию

$$U_{\text{вых}} Y_j > 0.$$

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 выходным сигналом $U_{\text{вых}} = 6$. 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 положительные 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, свидетельствующие о

том, что на выходе сети присутствует известная комбинация входных сигналов. Если сеть использовать только для контроля сигналов, не несущих рисков сбоя, то контролируемое устройство функционирует правильно, в противном случае – один или большее число контролируемых сигналов несут с себе риски сбоя. Если сеть используется для диагностики, то 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 сигнал, которым возбуждается управляющий нейрон R . 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, выходной сигнал которого ($U_{\text{вых}} = 6$) будет указывать на появление на входе нейронной сети одного или нескольких новых сигналов, ведущих к сбоям или к рискам сбоя.

Выводы

На основе K -значной дискретной нейронной сети адаптивной резонансной теории АРТ-1К разработана архитектура и алгоритмы функционирования стабильно-пластичной дискретной нейронной сети АРТ-1КП с несколькими полями входных нейронов, которая выполняет одновременный контроль до d K -значных сигналов, что существенно уменьшает время моделирования цифровых устройств. Перспективной дальнейших исследований является разработка непрерывных и K -значных нейронных сетей АРТ, имеющих иерархическую архитектуру, которая по-

зволяет 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. Автоматизированное проектирование наносистем / А.И. Власов, Л.А. Зинченко, В.В. Макаручук, И.А. Родионов. – М.: 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. 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.
7. 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.
8. Леонов С.Ю. K -значная нейронная сеть АРТ для анализа работоспособности вычислительных устройств / С.Ю. Леонов. – Вестник НТУ "ХПИ". Серия "Информатика и моделирование". – Х.: НТУ "ХПИ", 2013. – Вып. 39. – С. 115–128.
9. Дмитриенко В.Д. Использование нейронной сети на основе K -значных нейронов для распознавания рисков сбоя / В.Д. Дмитриенко, С.Ю. Леонов, Т.В. Гладких. – Вестник НТУ "ХПИ". Серия "Информатика и моделирование". – Х.: НТУ "ХПИ", 2011. – Вып. 36. – С. 52–60.
10. Леонов С.Ю. Теория автоматизированного проектирования электронных устройств на основе K -значного моделирования: дис. докт. техн. наук: 05.13.05 / С.Ю. Леонов. – Харьков, 2014. – 364 с.

Поступила в редколлегию 27.02.2015

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

РОЗРОБКА К-ЗНАЧНИХ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ АРТ З ДЕКІЛЬКОМА ПОЛЯМИ ОБРОБНИХ НЕЙРОНІВ

В.Д. Дмитрієнко, С.Ю. Леонов

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

Ключові слова: адаптивна резонансна теорія (АРТ), нейронна мережа АРТ з декількома полями.

DEVELOPMENT OF K-MARKING OF NEURON NETWORKS ART WITH A FEW FIELDS OF PROCESSING NEURONS

V.D. Dmitrienko, S.Yu. Leonov

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

Keywords: adaptive resonance theory (ART), ART neural network with several fields.