

**Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации
Российской академии наук**

НОВЫЕ НЕЙРОТЕХНОЛОГИИ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ В РЕАЛЬНОМ ВРЕМЕНИ

В.Ю.ОСИПОВ, д.т.н, профессор

2015 г.

АНАЛИЗ ТЕКУЩЕГО СОСТОЯНИЯ исследований в области нейротехнологий интеллектуальной обработки информации

Тенденции



□ **Решаемые задачи:** распознавание ситуаций, образов, постановка диагнозов, обработка речи, прогнозирование событий, интеллектуальное управление различными объектами, фильтрация и сжатие сигналов, другие.

Особенности известных нейросетевых решений

- Известны различные математические модели искусственных нейронных сетей, отличающихся структурными особенностями, условиями управления параметрами, правилами взаимодействия элементов, моделями самих нейронов, синапсов и другими факторами (*Osowski (2000), Galushkin (2007, 2014), Haykin (2008), Amari (2013), Palm (2013), Grossberg (2013, 2014), Kohonen (2013), Haikonen (2007, 2012) и др.*).
- Большинство из известных РНС не ориентированы на обработку сигналов в реальном времени.
- В последние годы повышенное внимание уделяется исследованиям импульсных рекуррентных нейронных сетей и различных видов их пластичности (синаптической, внутренней, гомеостатической).
- Исследуют возможности реализации нейронных сетей в виде программных моделей, а также путем создания цифровых и аналоговых нейрочипов. Активизированы работы по созданию аналоговых электрических моделей нейронных сетей с применением мемристоров.
- В целом существующий уровень развития нейротехнологий **не позволяет** решать полноценные интеллектуальные задачи, выходящие далеко за пределы распознавания образов.

Недостатки известных нейронных сетей применительно к интеллектуальной обработке сигналов в реальном времени

Общие недостатки нейросетевых подходов:

- существенно ограниченные возможности по запоминанию структурно-сложных сигналов, их распознаванию и воспроизведению в исходной форме;
- решение только узкого спектра задач одной и той же нейронной сетью;
- отсутствие возможностей наделения нейросетевых машин осознанным восприятием внешнего мира и осознанного активного взаимодействия с ним.

Наибольшими возможностями по интеллектуальной обработке информации обладают рекуррентные нейронные сети. Однако известным рекуррентным сетям характерны также недостатки:

- быстрое размывание сигналов;
- низкий уровень устойчивости;
- сложность установления однозначного соответствия между входом и выходом сети;
- не высокие возможности по распознаванию и запоминанию структурно-сложных динамических сигналов.

Обусловленность несовершенства известных нейротехнологий

- ❑ Одной из причин такого состояния выступает невысокая адекватность применяемых моделей биологическим нейронным сетям.
- ❑ Широко известным РНС свойственно чисто ассоциативное обращение к памяти, что явно не достаточно для реализации ими глубокой интеллектуальной обработки информации.
- ❑ Помимо ассоциативного обращения к памяти по всем объективным признакам в РНС должна существовать дополнительная пространственная адресация. Только в последние годы на это стали обращать внимание.
- ❑ Многие аспекты, связанные с такими новыми РНС с ассоциативно-пространственной адресации памяти, применительно к интеллектуальной обработке сигналов в реальном времени, не исследованы.
- ❑ Необходима разработка новых нейротехнологий для глубокой интеллектуальной обработки информации в реальном времени.

ПРЕДЛАГАЕМЫЕ НОВЫЕ НЕЙРОТЕХНОЛОГИИ интеллектуальной обработки информации в реальном времени

Принципы интеллектуальной обработки информации в РНС с АПАП

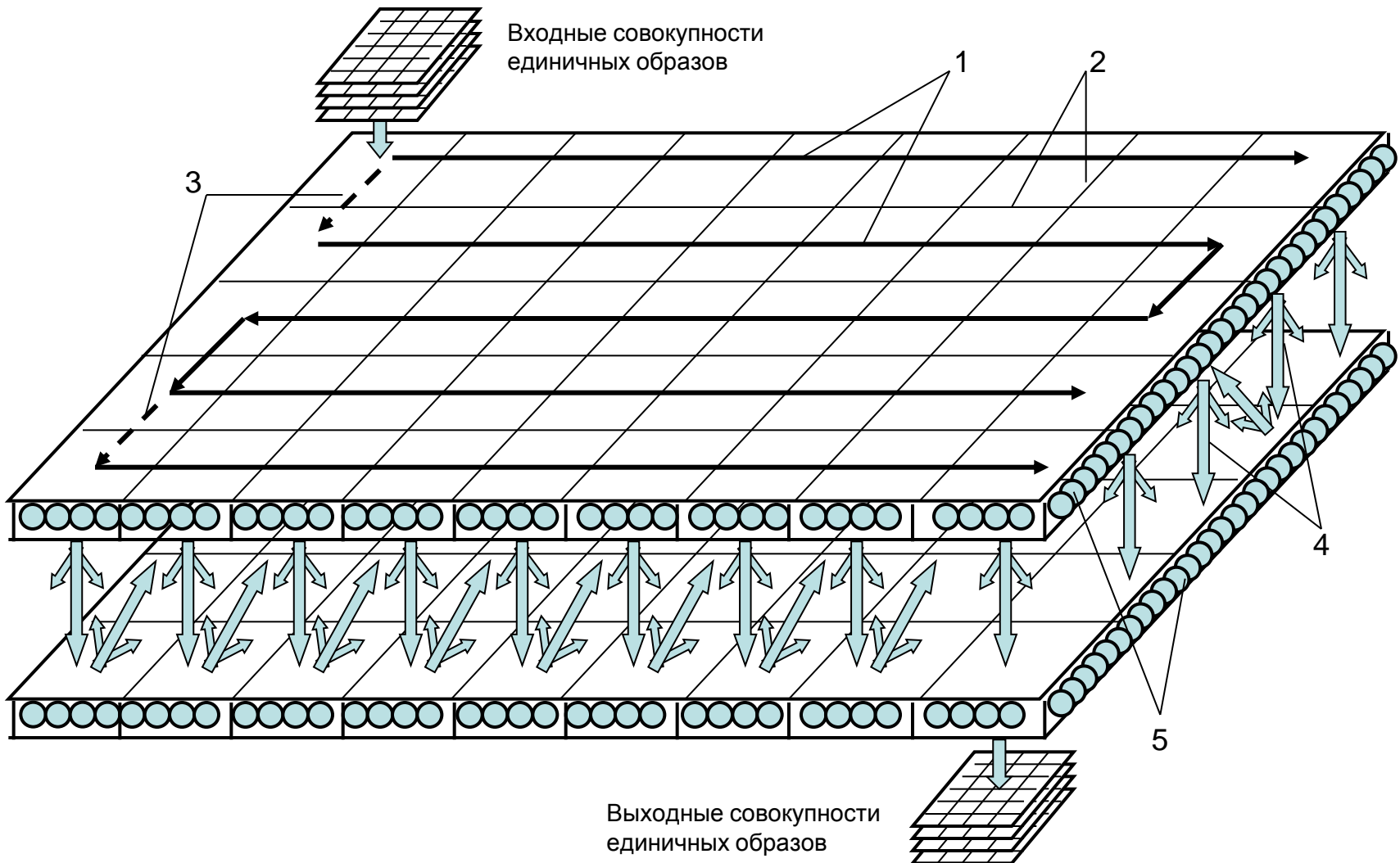
1. Рекуррентная нейронная сеть (РНС) должна быть способна управлять датчиками информации.
2. Сигналы, подаваемые в РНС, должны быть разложены на пространственно-частотные составляющие в базисе, согласованном с входным слоем сети.
3. Каждую составляющую сигнала перед подачей в сеть необходимо преобразовать в последовательность единичных образов (импульсов) с частотой повторения как предварительно заданной функцией от амплитуды составляющей.
4. Обратные связи в РНС должны замыкать контуры с временем задержки сигналов, меньшим времени невосприимчивости нейронов после возбуждения.
5. Каждый сигнал в РНС должен представляться в виде последовательных совокупностей единичных образов (СЕО) в соответствии с предварительно заданными правилами его распознавания с учетом обратных результатов обработки.

Принципы интеллектуальной обработки информации в РНС с АПАП (продолжение)

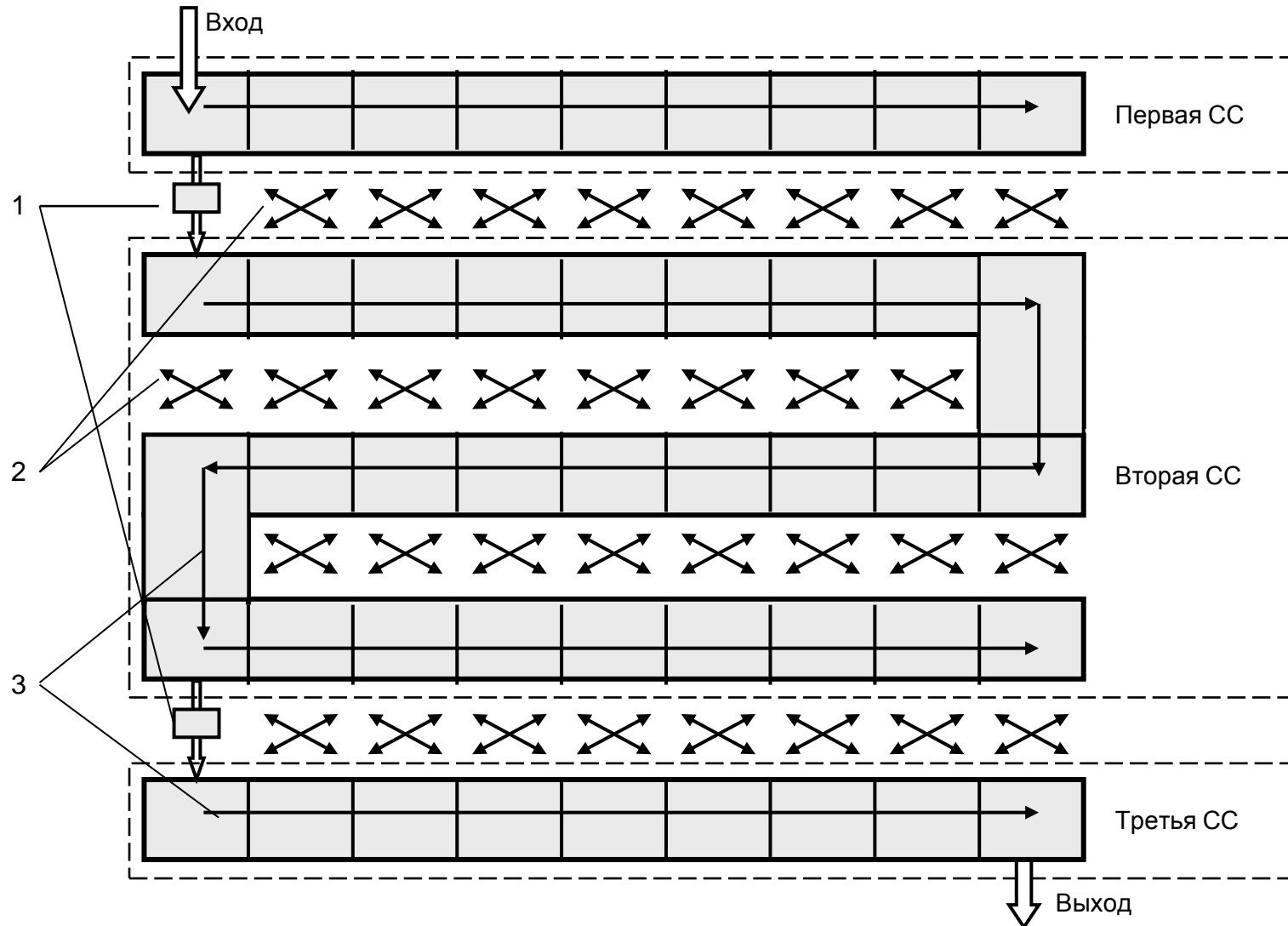
6. В РНС должны быть предусмотрены формирование и обработка копий входных сигналов, разделение ее в общем случае на три сигнальные системы.
7. При передаче и приеме совокупностей расходящихся и сходящихся единичных образов (ЕО) в РНС над ними должны осуществляться пространственно-энергетические преобразования в зависимости от текущих состояний слоев.
8. При обработке сигналов в РНС должна обеспечиваться приоритетность коротких связей между нейронами.
9. Основные ассоциативные взаимодействия в РНС должны осуществляться между ЕО различных совокупностей при встречном продвижении их вдоль слоев.
10. Результаты обработки сигналов должны запоминаться на элементах РНС, а устаревшая информация стираться с них с учетом текущих состояний слоев.
11. Должно обеспечиваться устойчивое функционирование РНС при обработке различных потоков сигналов.
12. В качестве основных результатов обработки должны использоваться последовательные СЕО на выходном слое сети после обратного преобразования в соответствующие им исходные сигналы.

Архитектура РНС АПАП

Структура слоев рекуррентной нейронной сети с тремя сигнальными системами



Структура рекуррентной нейронной сети с тремя сигнальными системами на уровне нейросетевых каналов продвижения совокупностей единичных образов



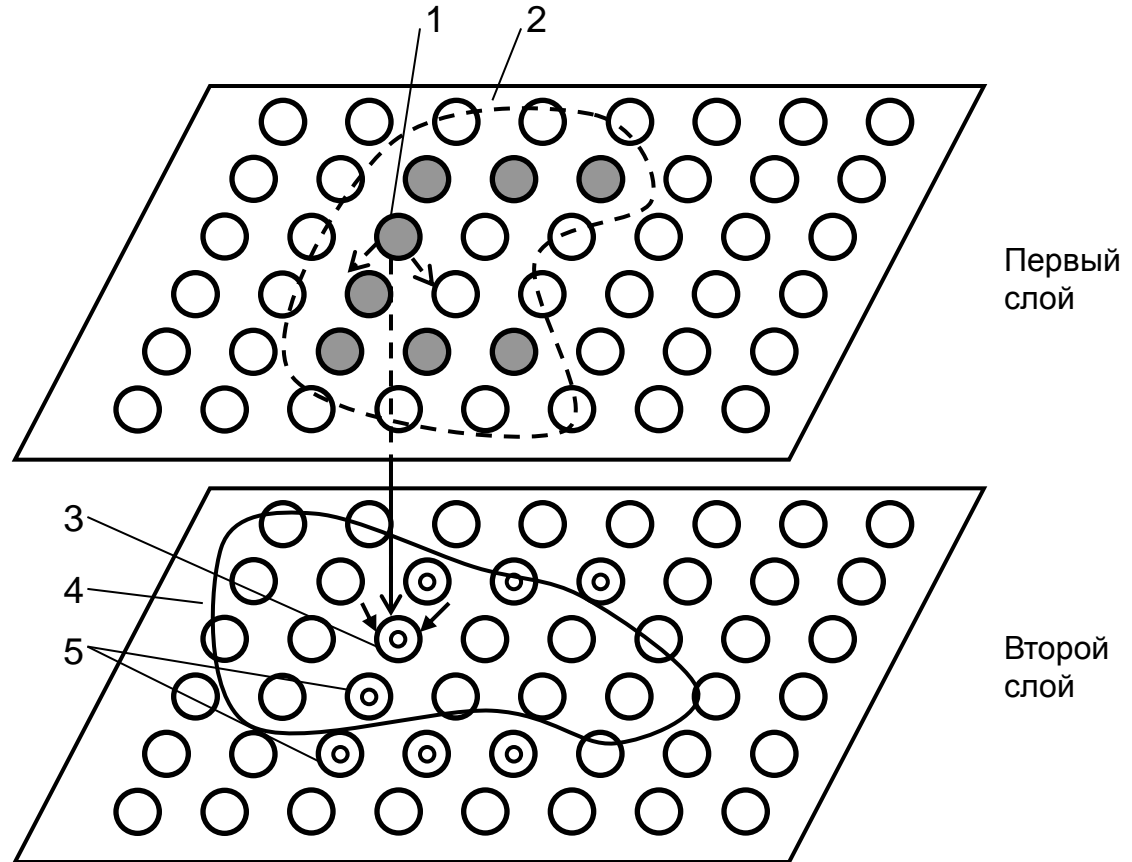
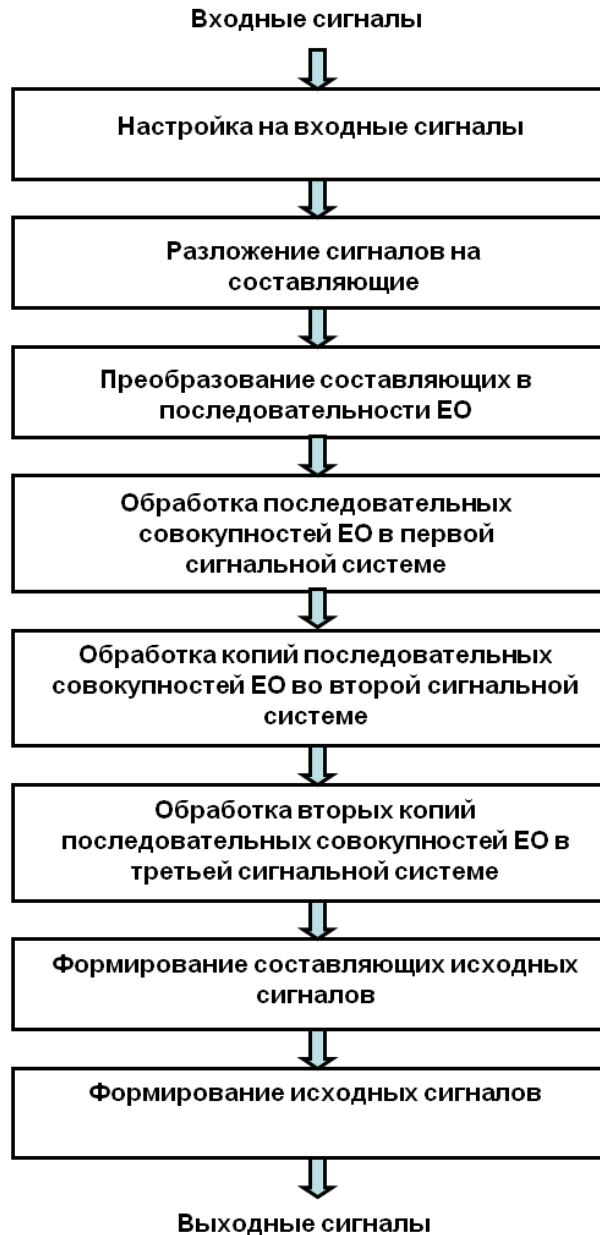
Функциональные особенности сигнальных систем РНС

□ Первая сигнальная система отвечает за формирование "условно-рефлекторных" связей и реакций по результатам воздействий входных сигналов. Она обрабатывает оригинальные входные сигналы.

□ Вторая сигнальная система РНС реализует саму интеллектуальную обработку информации и оперирует копиями сигналов. Причем копии формируются с учетом текущих состояний слоев РНС, от которых зависят пространственные характеристики ассоциативных взаимодействий сигналов.

□ Третья сигнальная система РНС обеспечивает выдачу на эффекторы только "осознанных" воздействий, а не всех текущих результатов обработки информации во второй системе.

Структура процесса интеллектуальной обработки информации в РНС с тремя сигнальными системами



Примеры ориентации сглаженных форм поперечных сечений расходящихся и сходящихся единичных образов в РНС

$$w_{ij}(t) = k_{ij}(t) \cdot \beta_{ij}(t) \cdot \eta_{ij}(t),$$

$$k_{ij}(t) = \frac{1}{R_{ON}(1 - \exp(-A \cdot (q_{ij}(t - \Delta t) + q_{ij}(\Delta t)))) + R_{OFF} \exp(-A \cdot (q_{ij}(t - \Delta t) + q_{ij}(\Delta t)))}$$

$$q_{ij}(\Delta t) = \int_0^{\Delta t} (U_i(t) - U_{jR}(t)) w_{ij}(t) dt,$$

$$Q_i = \sum_{j=1}^n \int_0^{\Delta t} (U_i(t) - U_{jR}(t)) w_{ij}(t) dt. \quad Q_{j\Sigma}(\tau) = \sum_{i=1}^n \int_0^{\tau_c} (U_i(t) - U_{jR}(t)) w_{ij}(t) dt,$$

$$U_j(t) = f(Q_{j\Sigma}(t - \tau_c - \tau_d) \geq QR_j(t - \tau_c - \tau_d))$$

Функции ослабления $\beta_{ij}(t), \eta_{ij}(t)$

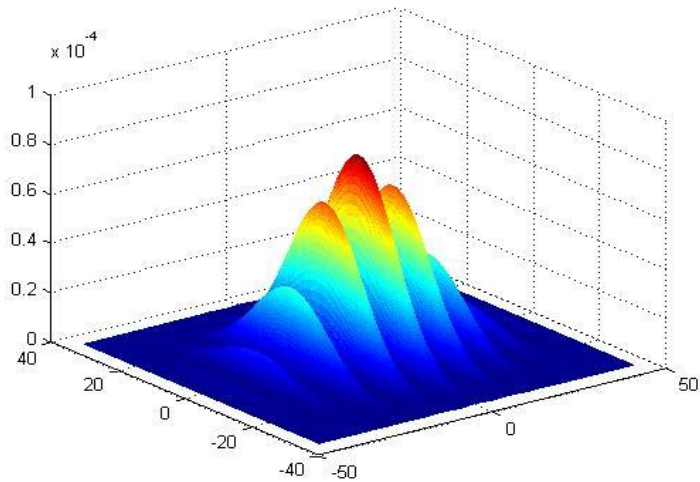
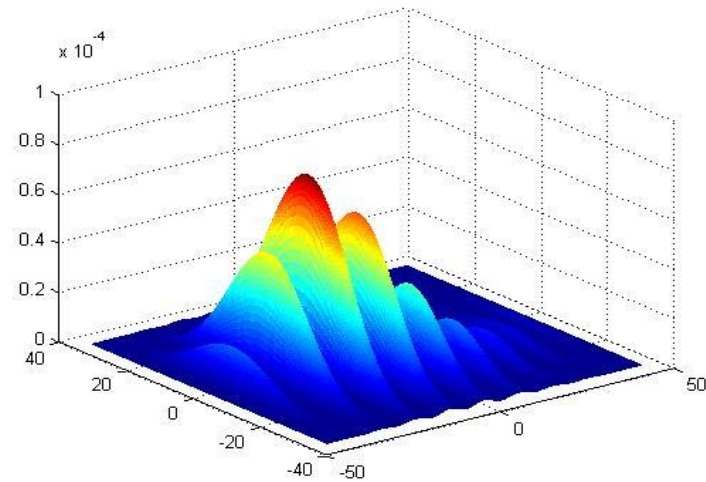
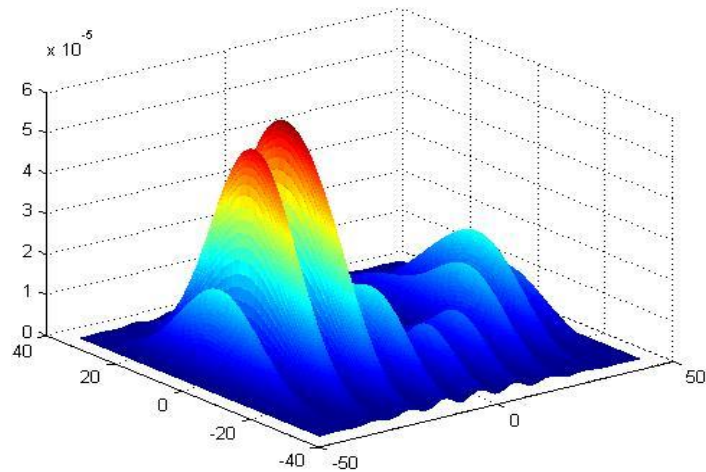
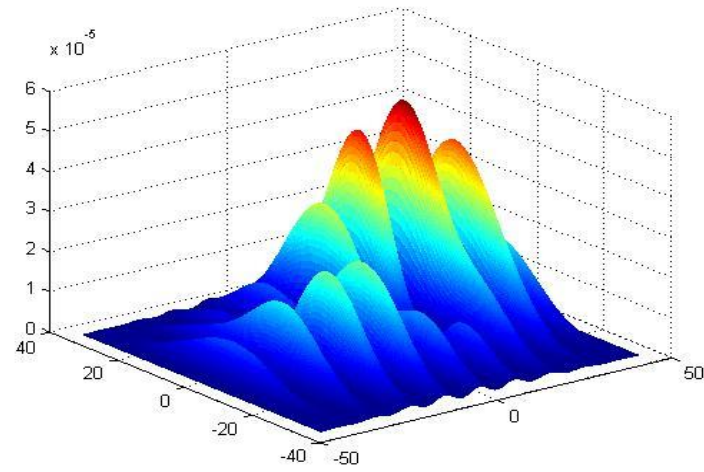
□ В качестве функций ослабления расходящихся и сходящихся единичных образов в ряде случаев могут выступать известные радиальные функции Гаусса, Габора, прямая и обратная мультиквадратичные, другие.

□ В частности, для расходящихся пучков единичных образов, передаваемых от слоя к слою в РНС, в ряде случаев применима модифицированная функция Габора, определенная только в положительной области.

$$\beta_{ij}(x_{ij}, y_{ij}) = \exp\left(-\frac{X_{ij}^2 + \gamma^2 Y_{ij}^2}{2\sigma^2}\right) \cos^2\left(\frac{2\pi}{\lambda} X_{ij}\right),$$

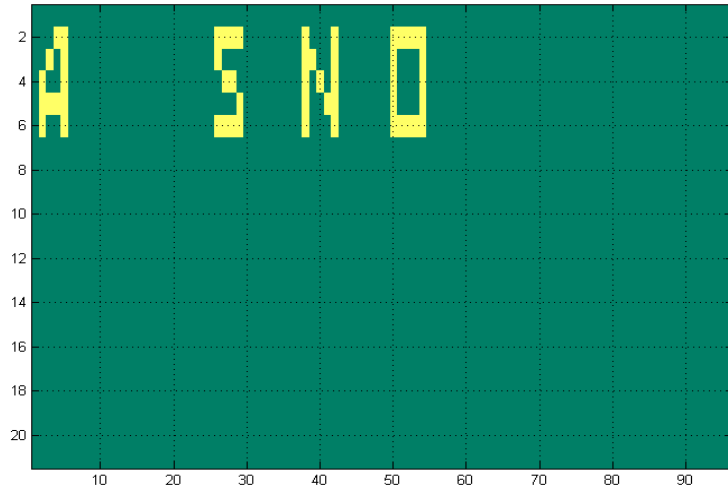
$$X_{ij} = x_{ij} \cos \varphi + y_{ij} \sin \varphi + c, \quad Y_{ij}(t) = -x_{ij} \sin \varphi + y_{ij} \cos \varphi + f.$$

Влияние текущих состояний слоев на функции ослабления

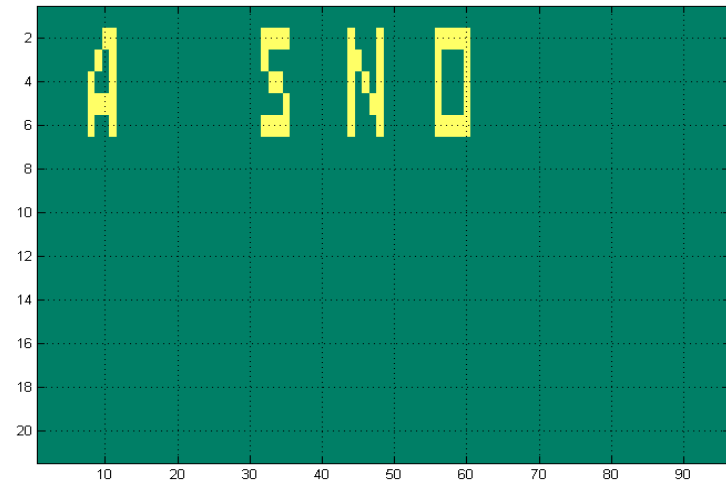
*a**b**c**d*

Примеры пространственного распределения относительных зарядов, переносимых токами в расходящемся пучке синаптических связей: *a* - распределение без учета индивидуальной разности потенциалов на синапсах; *b*, *c*, *d* - распределения с таким учетом.

Примеры смены состояний слоев РНС



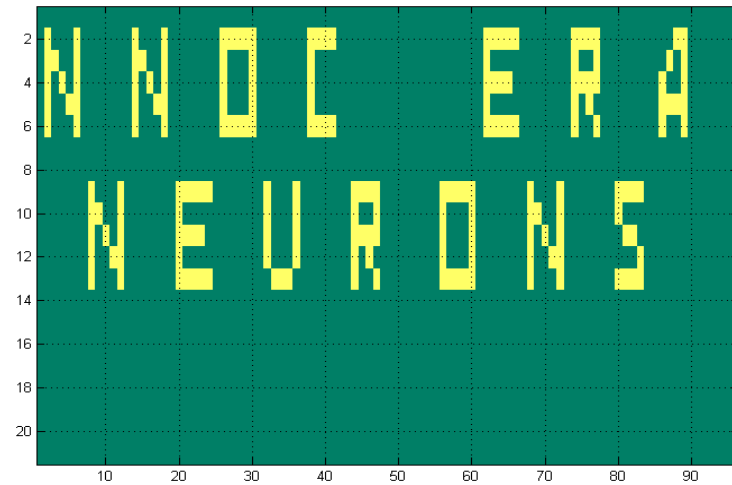
a



b



c



d

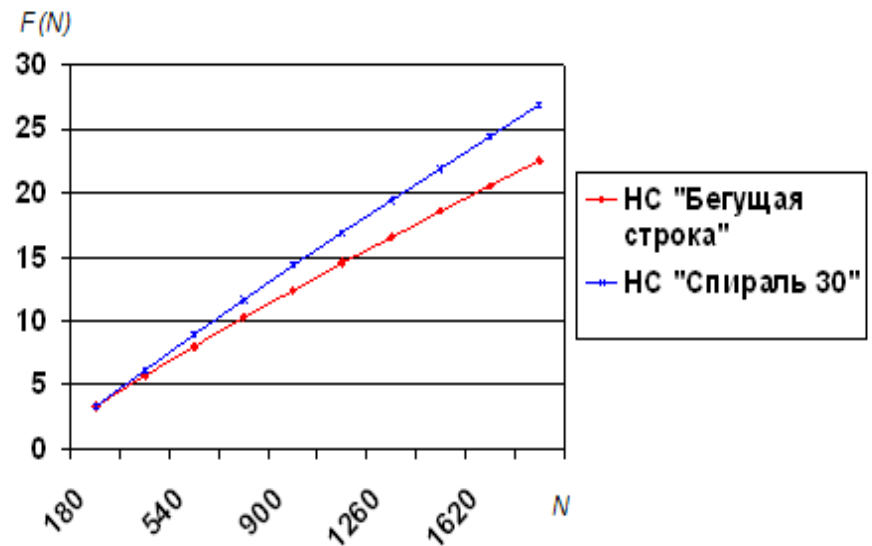
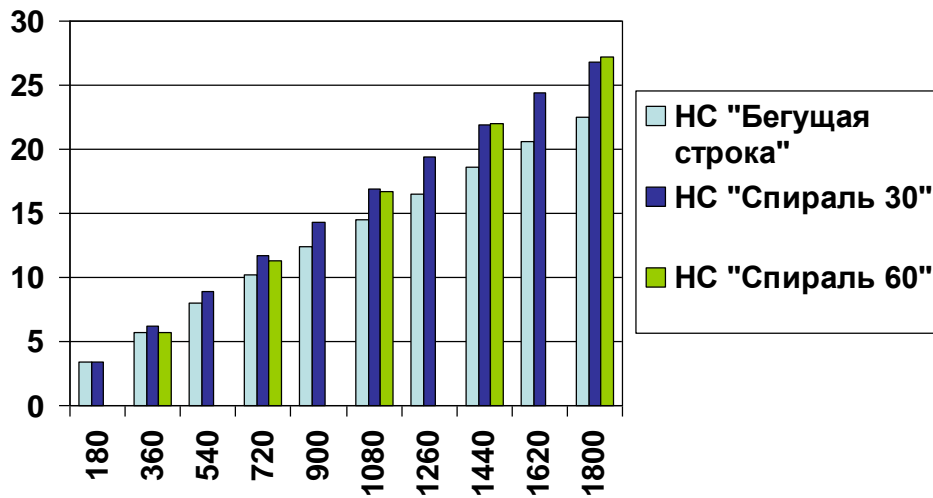
Состояния первого слоя сети при обработке сигналов: a, b, c – следующие друг за другом состояния, отражающие продвижение CEO вдоль слоев; d – результат извлечения из памяти РНС CEO, дополняющих слово «нейрон».

ЦЕЛЕСООБРАЗНЫЕ ЛОГИЧЕСКИЕ СТРУКТУРЫ РНС

Варианты и их обоснование

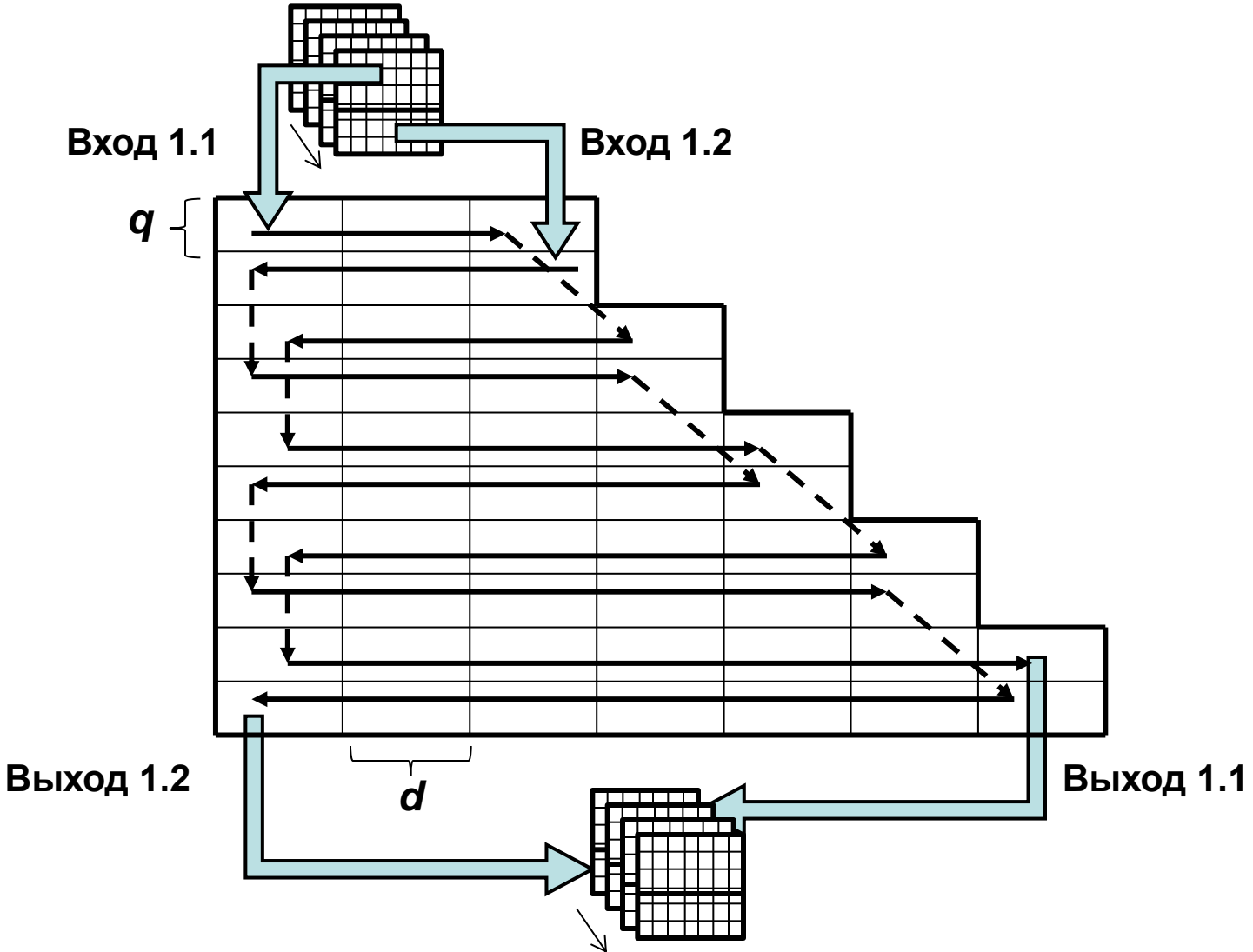
Название структуры	Число нейронов в каждом слое, N								
	360	540	720	900	1080	1260	1440	1620	1800
«Бегущая строка»	60×6	90×6	120×6	150×6	180×6	210×6	240×6	270×6	300×6
	10×1	15×1	20×1	25×1	30×1	35×1	40×1	45×1	50×1
«Спираль 30»	30×12	30×18	30×24	30×30	30×36	30×42	30×48	30×54	30×60
	5×2	5×3	5×4	5×5	5×6	5×7	5×8	5×9	5×10
«Спираль 60»	60×6	–	60×12	–	60×18	–	60×24	–	60×30
	10×1	–	10×2	–	10×3	–	10×4	–	10×5

$$\bar{F}(S_o) = \max_{z \in \Omega} \frac{1}{N^2} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \beta_{ij}(r_{ij}(S_z)) \cdot t_{ij}(S_z)$$

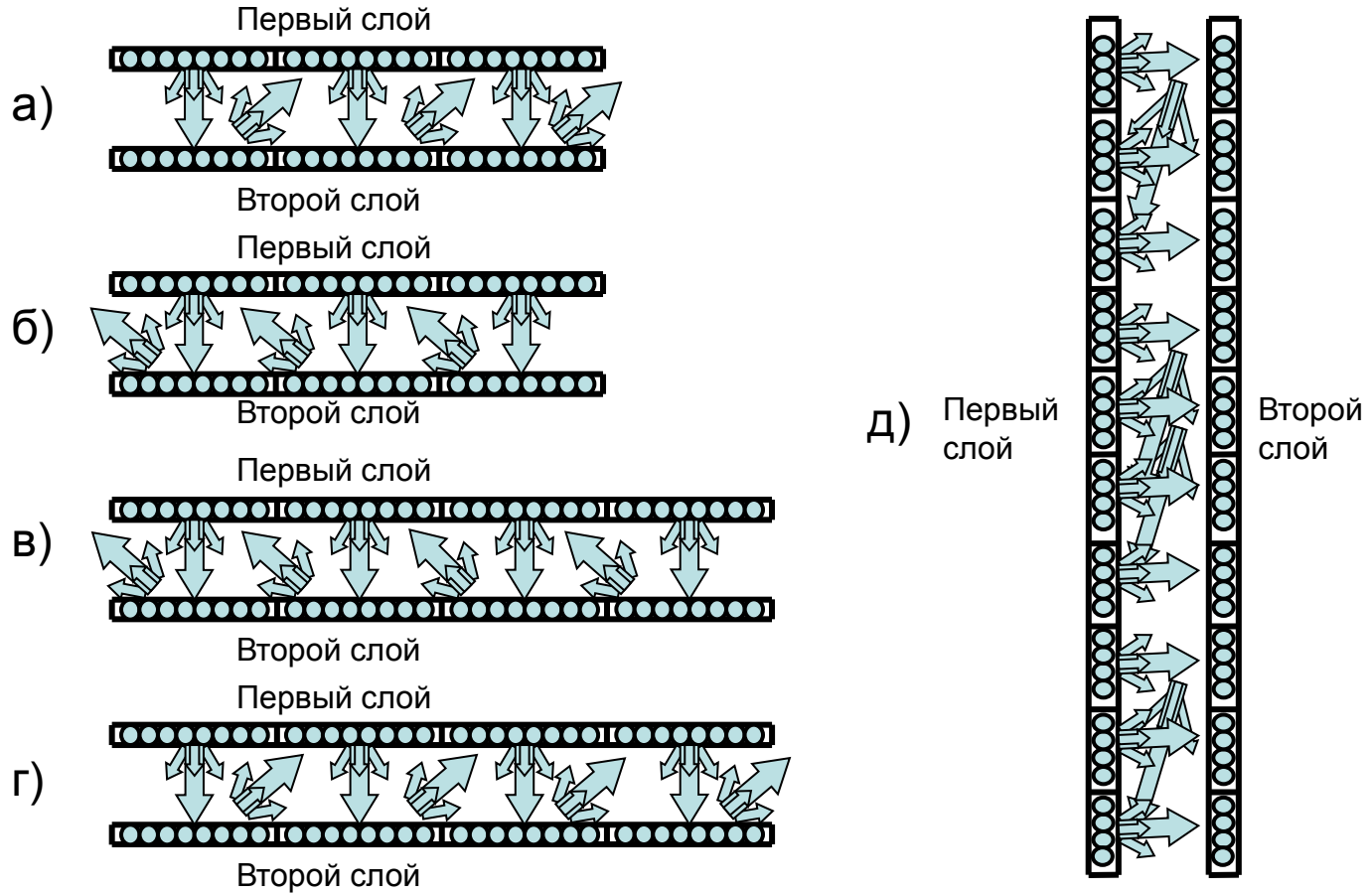


РНС со структурой слоев в виде двойной спирали

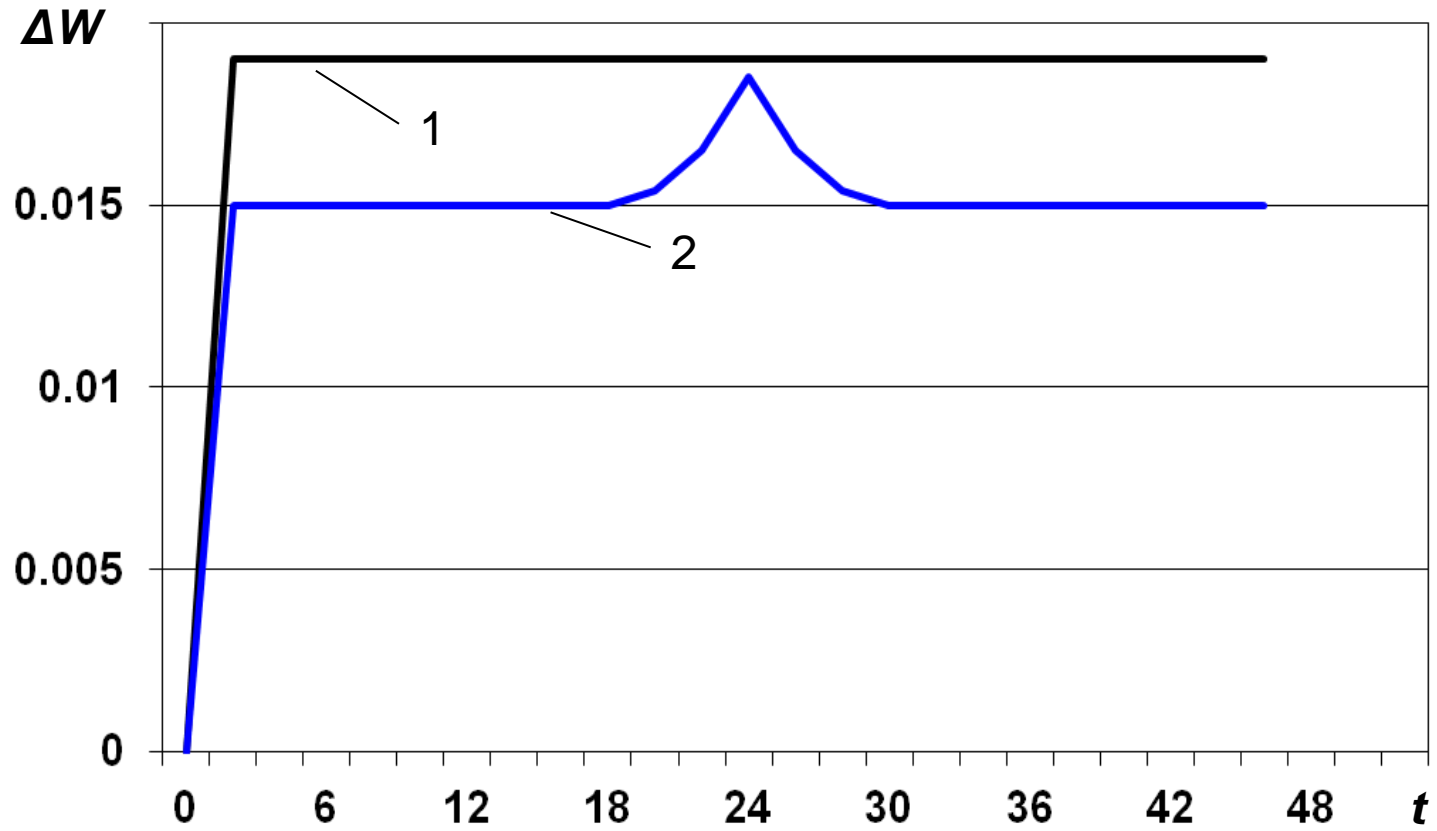
Продольная структура



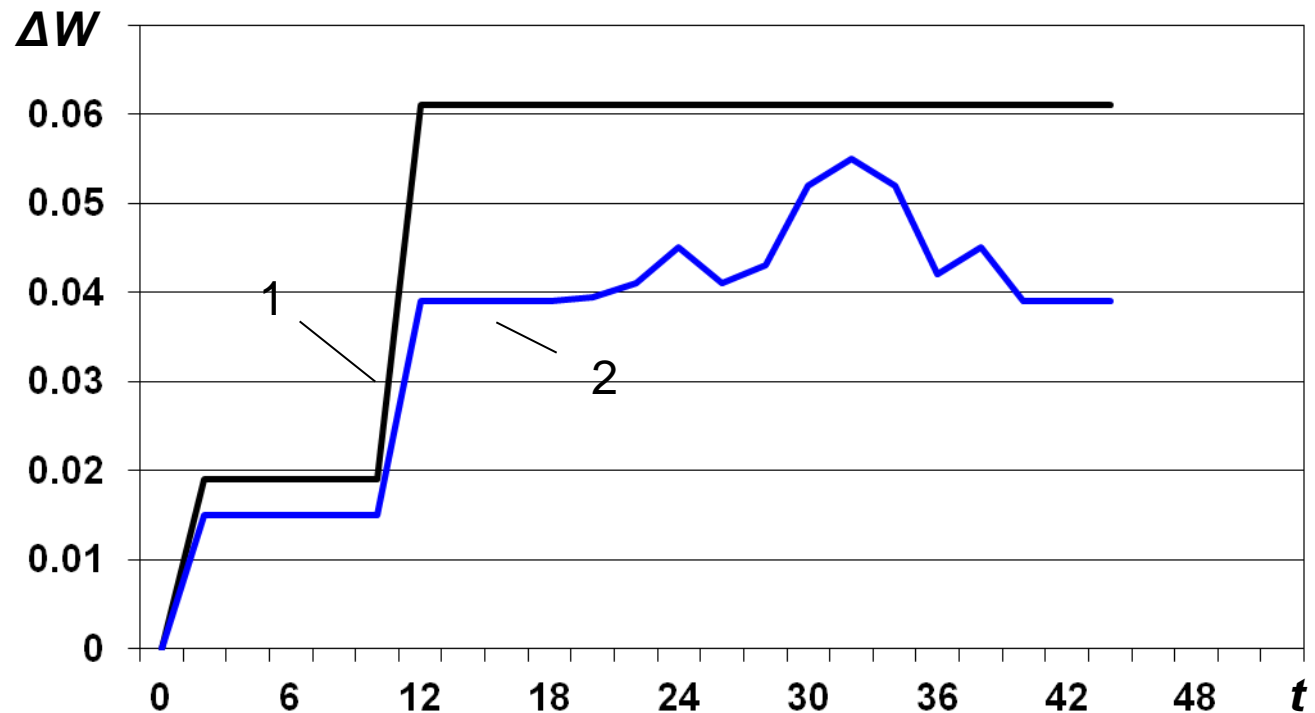
Поперечная структура РНС в виде двойной спирали



Результаты обработки одной совокупности единичных образов известным подходом (кривая 1) и предлагаемым методом (кривая 2)

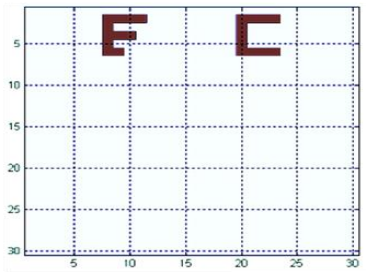
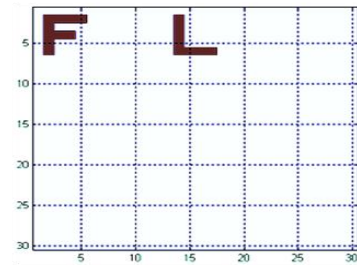
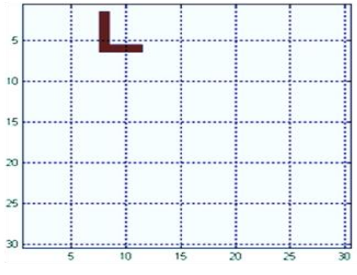
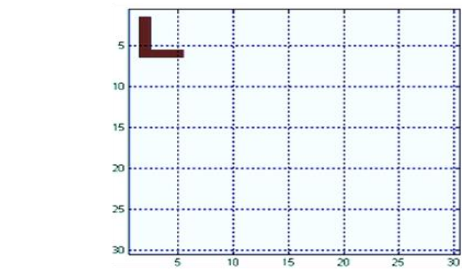
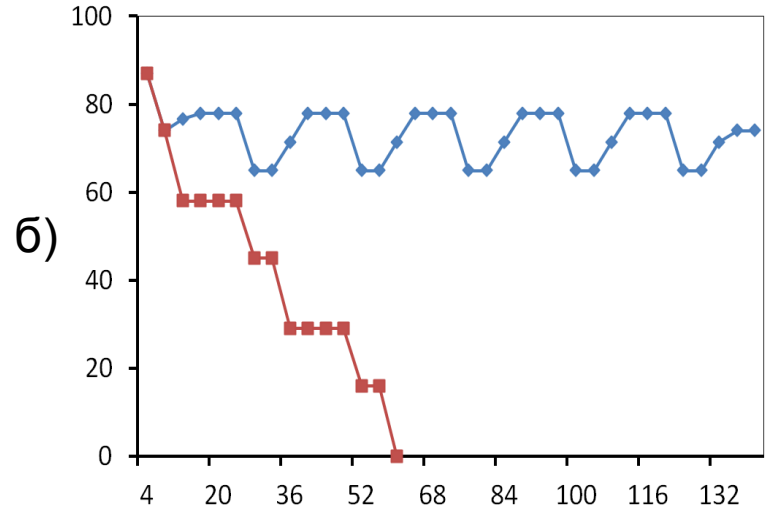
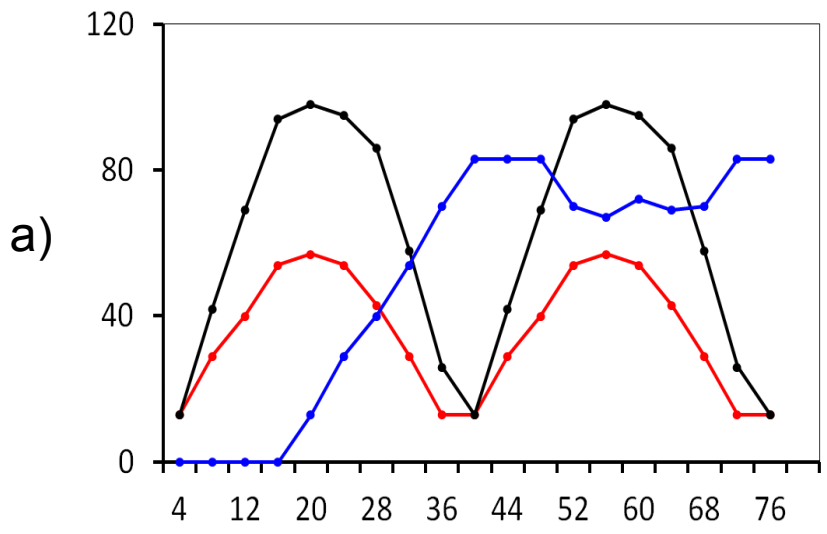


Результаты обработки двух последовательных совокупностей единичных образов известным подходом (кривая 1) и предлагаемым методом (кривая 2)

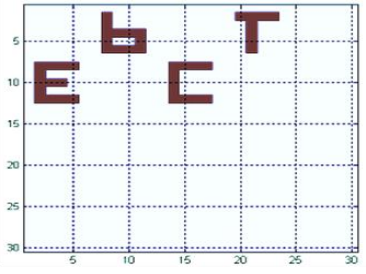
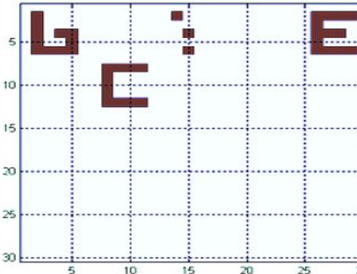
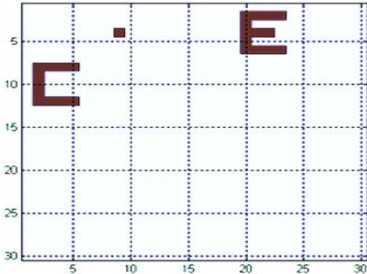
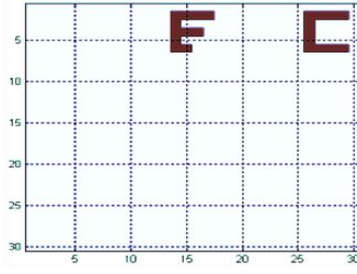


УСТОЙЧИВОСТЬ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ РНС

Примеры загрузки оперативной памяти РНС



в)



а

б

в

г

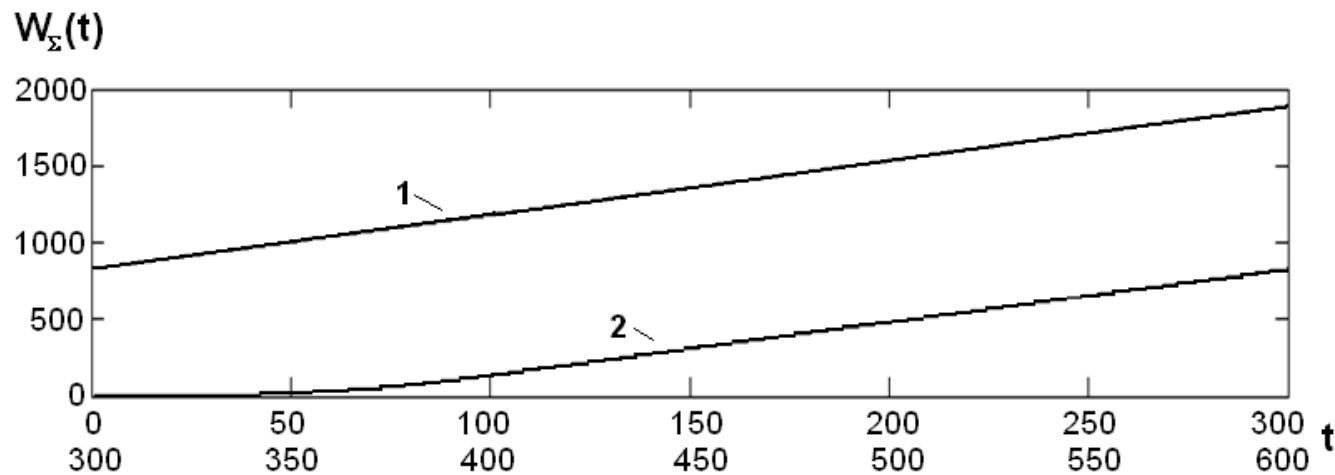
д

е

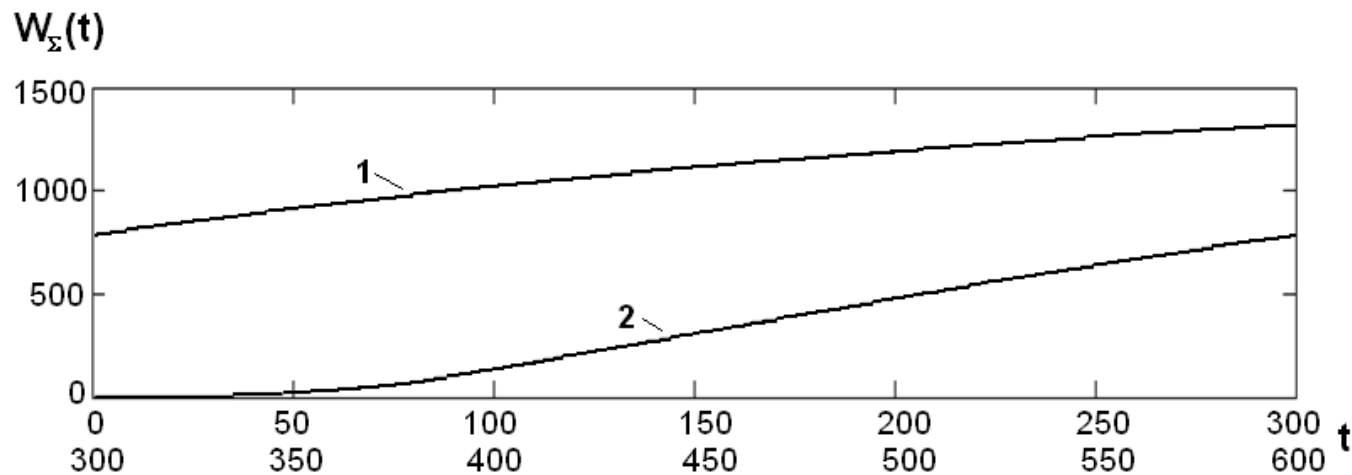
з

ж

а)



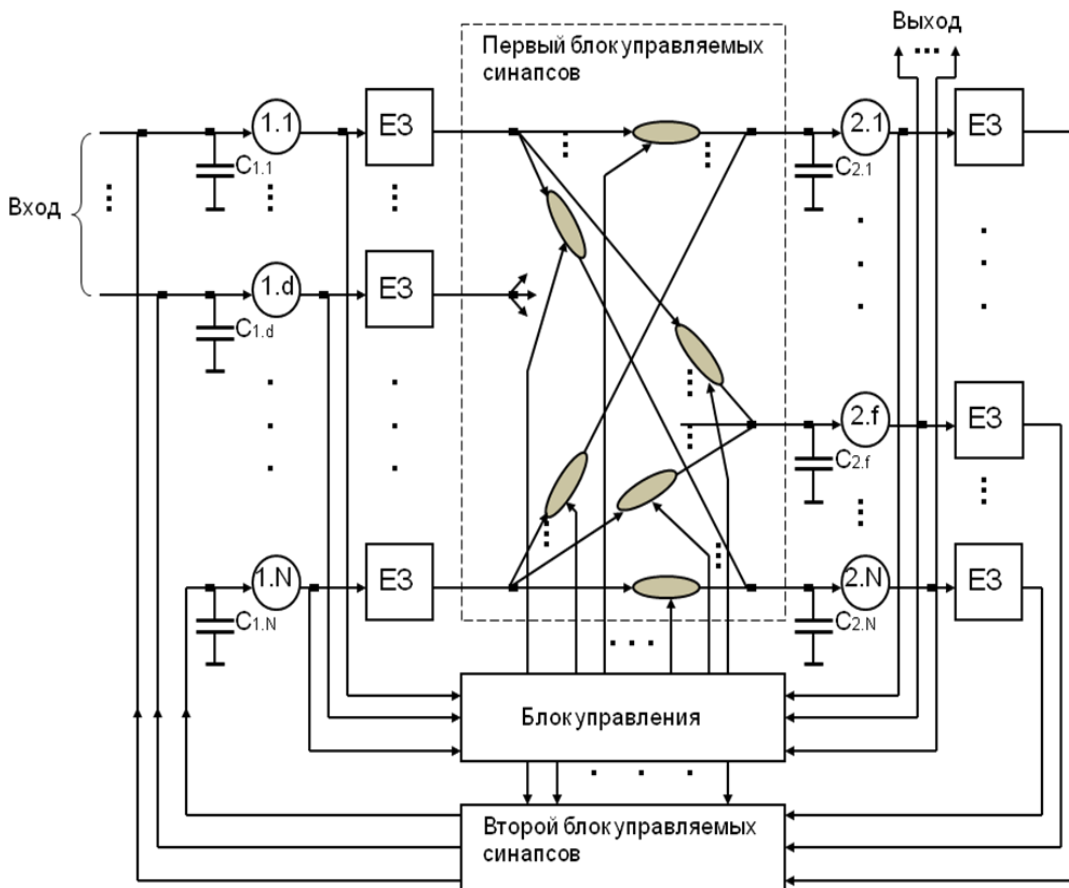
б)



Изменение суммарного веса синапсов сети во времени: а) без частичного стирания запомненных результатов распознавания; б) при наличии такого стирания. Кривые 1 – для $t = 300 \div 600$; 2 – для $t = 0 \div 300$.

Пределы памяти РНС

Структура РНС

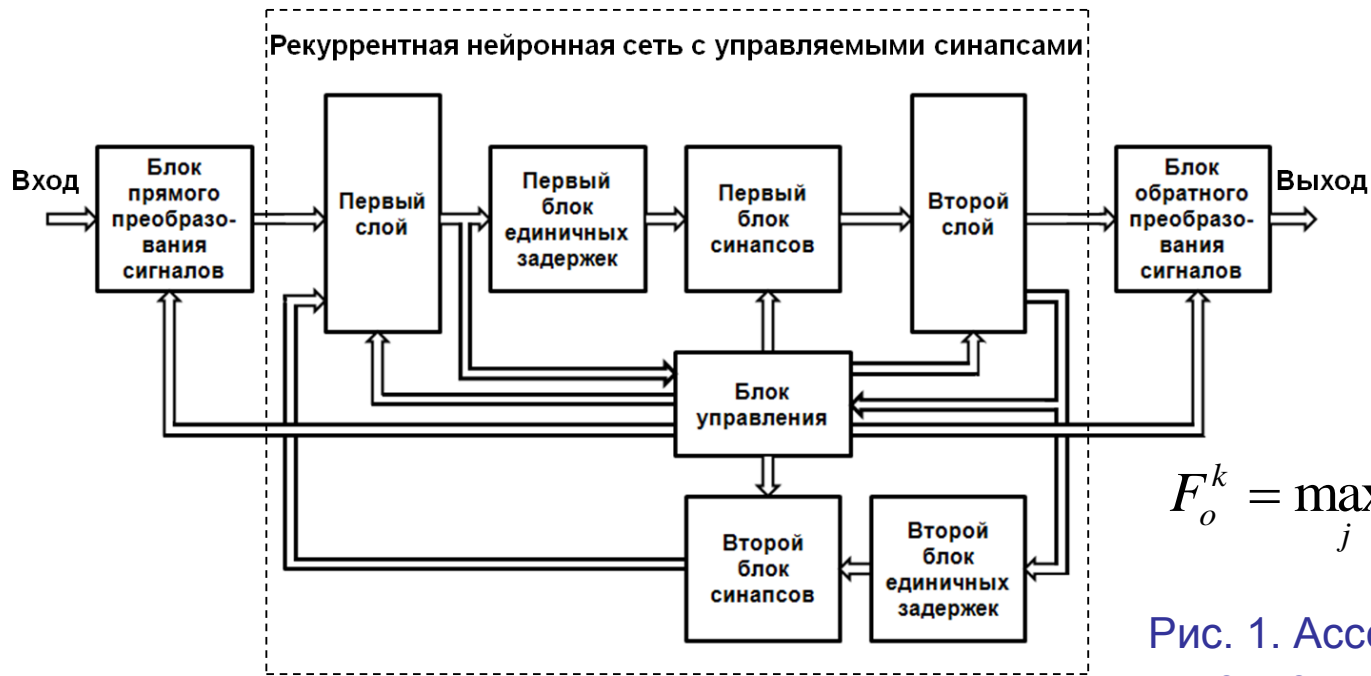


Максимальное число
единичных образов,
запоминаемых РНС:

$$L_{\max} = -\frac{N}{\gamma \Delta \bar{g}} \ln\left(1 - \frac{2W_{\max}}{N^2 \bar{\beta} \bar{\eta}}\right)$$

Предельное количество
информации, запоминаемое
на синапсах РНС:

$$C = -\frac{N^2}{2} \ln\left(1 - \frac{2W_{\max}}{N^2 \bar{\beta} \bar{\eta}}\right)$$



$$F_o^k = \max_j \sum_{r=1}^T F_{jr}^k (u_{ijr}^k; i = \overline{1, I})$$

Рис. 1. Ассоциативная интеллектуальная машина

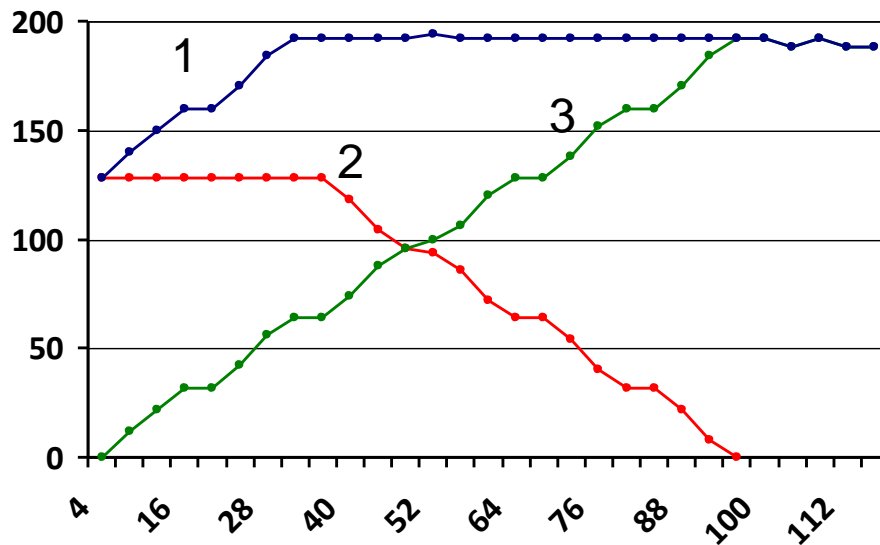
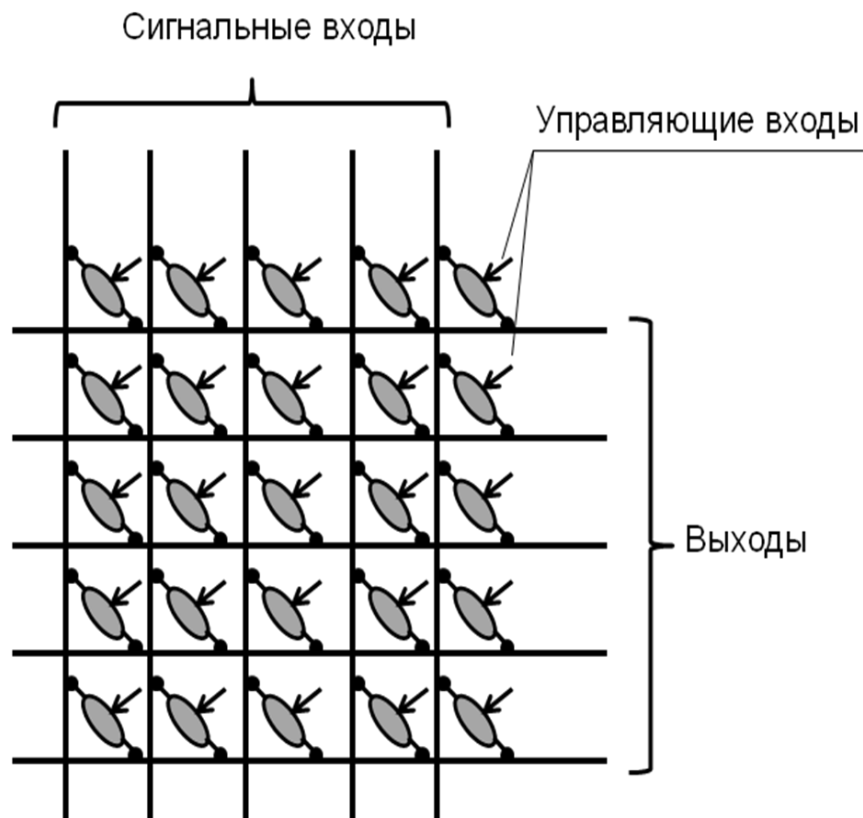


Рис.2. Число единичных образов в оперативной памяти сети: 1- всего; 2 - введенных через вход; 3 – ассоциативно вызванных из долговременной памяти.

ТЕХНОЛОГИИ РЕАЛИЗАЦИИ НЕЙРОСЕТЕВЫХ АССОЦИАТИВНЫХ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ МАШИН

Структурная схема блока управляемых синапсов



Предложения по реализации синапсов и нейронов, самих РНС и АИМ

- ❑ Искусственные синапсы могут быть реализованы на основе мемристоров.
- ❑ В качестве нейронов могут выступать специальные ждущие мультивибраторы.
- ❑ В целом перспективные РНС и АИМ могут быть реализованы в виде специальных аналоговых нейрочипов.

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО РАЗВИТИЮ НЕЙРОТЕХНОЛОГИЙ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ В РЕАЛЬНОМ ВРЕМЕНИ

1. Развитие теории и методов построения малогабаритных низко энергозатратных, устойчивых к мощным электромагнитным и радиационным воздействиям, аналоговых нейросетевых процессоров с ассоциативно-пространственной адресацией памяти.
2. Исследование процессов саморазвития нейросетевых ассоциативных интеллектуальных машин при обработке различной информации, формирование в них устойчивых интеллектуальных ядер.
3. Оптимизация структур перспективных аналоговых нейрочипов, снижение затрат на их создание, производство.

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО РАЗВИТИЮ НЕЙРОТЕХНОЛОГИЙ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ В РЕАЛЬНОМ ВРЕМЕНИ (продолжение)

4. Проведение поисковых исследований по созданию нейросетевых ассоциативных интеллектуальных машин, применительно к решению трудно-формализуемых прикладных задач:

❑ ассоциативный перевод речи с одного языка на другой в международных системах связи;

❑ ассоциативная высокоскоростная параллельная обработка больших данных различных форматов в глобальных сетях;

❑ нелинейное прогнозирование сложных трудно-формализуемых процессов без предварительного задания моделей их развития (предсказание чрезвычайных событий, катастроф, ураганов, землетрясений и т.п.);

❑ оперативное распознавание цветных динамических образов, ситуаций;

❑ ассоциативное слияние различных видов информации и обоснование трудно-формализуемых решений;

❑ ассоциативное управление автономными подводными и космическими роботами в условиях высокой неопределенности ситуаций;

❑ ассоциативная диагностика заболеваний;

❑ ассоциативная обработка сигналов в различных системах связи, радио- и гидролокации в условиях мешающих воздействий и др.

Список основных публикаций автора по теме доклада

1. Патенты на изобретения на способы интеллектуальной обработки информации в нейронных сетях: **RU 2514931** (2014); **RU 2502133** (2013); **RU 2483356** (2013); **RU 2446463** (2012); **RU 2427914** (2011); **RU 2413304** (2011).
2. Осипов В.Ю. Ассоциативная интеллектуальная машина с тремя сигнальными системами / Информационно-управляющие системы. № 5, 2014, С. 12 - 17.
3. Осипов В.Ю. Рекуррентная нейронная сеть со структурой слоев в виде двойной спирали / Информационные технологии, № 7, 2014, С. 56 - 60.
4. Развитие процессов обработки информации в ассоциативных интеллектуальных машинах / Мехатроника, автоматизация, управление, № 6, 2014, С. 8 - 13.
5. Осипов В.Ю. Пределы памяти рекуррентных нейронных сетей со стиранием устаревшей информации / Научный вестник НГТУ, том. 56, № 3, 2014, С. 115 - 122.
6. Осипов В.Ю. Рекуррентная нейронная сеть с двумя сигнальными системами / Информационно-управляющие системы, № 4, 2013, С. 8 - 15.
7. Осипов В.Ю. Метод управления синапсами рекуррентной нейронной сети / Информационные технологии, № 7, 2013, С. 61 - 66.
8. Осипов В.Ю. Оптимизация ассоциативных интеллектуальных систем / Мехатроника, автоматизация, управление, № 3, 2011, С. 35 - 39.
9. Осипов В.Ю. Устойчивость рекуррентных нейронных сетей с управляемыми синапсами / Информационные технологии, № 9, 2011, С. 69 -73.
10. Осипов В.Ю. Метод настройки ассоциативной интеллектуальной системы на входные сигналы / Информационные технологии, № 9, 2012, С.54 - 59.
11. Осипов В.Ю. Прямое и обратное преобразование сигналов в ассоциативных интеллектуальных машинах / Мехатроника, автоматизация, управление, № 7, 2010, С. 27 - 32.
12. Осипов В.Ю. Ассоциативная интеллектуальная машина / Информационные технологии и вычислительные системы, № 2, 2010, С. 59 - 67.
13. Осипов В.Ю. Аналоговые ассоциативные интеллектуальные системы / Труды СПИИРАН, Вып. 7(30), 2013, С. 141 - 155.
14. Осипов В.Ю. Рекуррентная нейронная сеть со спиральной структурой слоев / Информационно-управляющие системы, № 6, 2012, С. 28 - 32.