

12  
©1992 г.

## ОБУЧАЕМАЯ СЕТЬ НА НАКОПИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТАХ.

*А.А.Кальнин, Б.М.Тотев*

Принцип дополнительности положен в основу создания физической сети с эмпирическим обучением условной ответной реакции. На простом примере сети с естественным перетеканием электрических зарядов между емкостными элементами при их фрагментарном подключении к источникам информационных сигналов продемонстрирован эффект авторегулирования вкладов элементов в результирующий сигнал ответной реакции. Рассмотрены также важнейшие функциональные возможности подобных сетей.

### Три класса обучаемых сетей

Сети с обучением, являясь альтернативой схемам с программированием, дают явное преимущество при их использовании в системах распознавания образов и адаптивного управления [1]. Смягчается проблема описания объектов, что особенно важно при неполноте данных, наличии нехарактерных признаков зашумленности параметров, характеризующих состояние объектов. Появляются значительные конструктивно-технологические степени свободы в создании сетей. Вместо "жестких" межэлементных связей и функционально однозначных реакций элементов, составляющих схему, становятся допустимыми случайность связей и многовариантность откликов элементов на внешние стимулы. Платой за эти преимущества является элементная избыточность и необходимость многократных демонстраций сочетаний внешних стимулов и желаемых ответных реакций для образования адаптивного информационного поля связностей элементов сети.

По характеру технической реализации адаптивной процедуры регулирования весовых межэлементных отношений можно разделить сети на три основных класса.

1. Сети с вычислительной имитацией эволюционного процесса образования информационного поля весовых отношений. Различные стратегии могут быть положены в основу адаптационного алгоритма. Наиболее употребительными являются метод проб и ошибок (стратегия Дарвина) и метод выравнивания потенциала (стратегия Больцмана) [2], а также смешанные стратегии [3]. В любом случае вычислительная имитация эволюционного процесса требует контроля микроскопического состояния

системы, так как вычислительная процедура принципиально адресная. Это в свою очередь требует большого объема памяти; коррекция весов оказывается последовательной, требующей большого вычислительного времени, в то время как сама сеть действует параллельно. Сеть Хопфилда [4], допускающая асинхронную фрагментарную корректировку весов, не снимает эту проблему.

2. Сети с автоматической корректировкой весовых отношений. Основу невычислительной сети составляет элемент с градуируемым значением физического параметра, например проводимости. Для этой цели могут быть применены сервопотенциометр, МДП транзистор, гальванорезистор (мемистор) и т.п. [5]. Коррекция значений физического параметра производится под влиянием сигнала ошибки, распространяющегося по цепи отрицательной обратной связи и действующего чаще всего на специальный электрод управления, которым снабжен адаптивный элемент. Достоинством сетевых систем этого класса является параллельность коррекции и изначально верное ее направление.

3. Сети с физической адаптацией. Сети этого класса также составлены из элементов с градуируемым значением физического параметра, однако образование информационного поля весовых отношений происходит вследствие естественной физической эволюции состояния системы. Внешние силы (физические, термодинамические), в том числе информационные сигналы, побуждают потоки масс (зарядов), приводящие к перераспределению весовых отношений. Плодотворным примером тому является сеть с перетеканием электрических зарядов, предложенная Кохоненном [5]. Авторегулирование весовых отношений (вкладов элементов в выходной сигнал реакции) достигается вследствие кратковременного подключения емкостных элементов через резисторы к источникам эталонных ответных сигналов, в заданных ключевых условиях. Опрос системы также производится кратковременным воссозданием ключевых условий, чтобы не вызвать выравнивания потенциалов на элементах сети.

Следует заметить однако, что предельная физическая эволюция связана с установлением динамического равновесия сил, действующих в эволюционном процессе. В связи с этим более эффективными с точки зрения адаптивных возможностей будут системы, действующие на принципе дополнительности (сил, потоков, геометрических форм). Вложение есть основа процедуры распознавания.

Целью настоящего исследования является введение простейшей обобщенной структуры физической сети с эмпирическим обучением, действие которой основано на принципе дополнительности. По соображениям методической ясности действие сети иллюстрируется на примере перетекания электрических зарядов между емкостными элементами.

### **Эффект авторегулирования весовых отношений**

Рассмотрим цепь, состоящую из конденсаторов  $C_i$  и ключей, способных образовывать их связные группы (рис. 1,а). Любая ключевая комбинация не прерывает электрической связности входного  $A$  и выходного  $B$  электродов. Выделим также одно элементарное звено ветвления цепи (рис. 1,б) и рассмотрим процесс перетекания зарядов между конденсаторами звена при последовательных подключениях к источникам напряжения левой  $C_2$  и правой  $C_3$  ветвей, при этом один элемент  $C_1$  всегда является общим в подключениях.

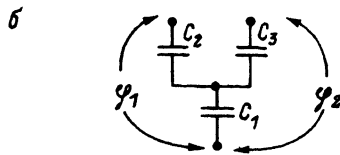
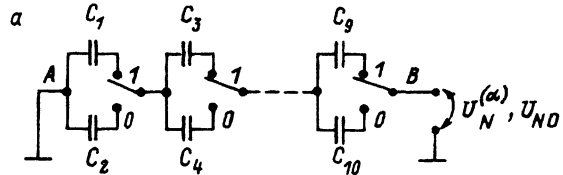


Рис. 1. Сеть с фрагментарным включением емкостных элементов (а) и элементарное звено ветвления с перетеканием зарядов (б).

Наша задача состоит в нахождении разности потенциалов на каждом элементе звена после очередного подключения. Рассмотрим два характерных случая подключения левой и правой ветвей на источники  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$ : с одинаковой полярностью (согласное действие внешних движущих сил) и противоположной полярностью (рассогласованное действие внешних сил).

В исходном состоянии заряд на конденсаторах отсутствует. Основываясь на законе Кирхгофа для напряжений в замкнутом контуре, можно найти общие формулы для изменения величины заряда на элементах после каждого подключения.

Обозначим через  $\Delta Q_{ij}^{(\alpha)}$  изменение заряда ( $i = 1, 2, 3$  — номер элемента конденсатора);  $j = 1, 2$  — соответственно левая и правая подключенные ветви;  $\alpha = 1, 2, \dots$  — номер цикла (цикл состоит из двух последовательных подключений левой и правой ветвей). Тогда изменения заряда для однополярного и разнополярного случаев после подключения левой ветви дается выражением в виде ряда

$$-\varphi_1 + \frac{1}{C_1} \sum_{\alpha=1}^k (\Delta Q_{11}^{(\alpha)} + \Delta Q_{12}^{(\alpha-1)}) + \frac{1}{C_2} \sum_{\alpha=1}^k \Delta Q_{21}^{(\alpha)} = 0,$$

$$\Delta Q_{11}^{(\alpha)} = \Delta Q_{21}^{(\alpha)}; \quad (1)$$

а после подключения правой ветви — выражением

$$\mp \varphi_2 + \frac{1}{C_1} \sum_{\alpha=1}^k (\Delta Q_{11}^{(\alpha)} + \Delta Q_{12}^{(\alpha)}) + \frac{1}{C_3} \sum_{\alpha=1}^k \Delta Q_{32}^{(\alpha)} = 0, \quad (2)$$

$$\Delta Q_{12}^{(\alpha)} = \Delta Q_{32}^{(\alpha)}.$$

Знак минус перед  $\varphi_2$  ставится в случае однополярных, а плюс — в случае разнополярных подключений.

Представляет интерес расчет предельных отношений при большом числе циклов подключений (предъявлений): расчет распределений зарядов (напряжений) и перетеканий зарядов.

Положим для простоты равенство емкостей  $C_1 = C_2 = C_3$  и равенство по абсолютному значению  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$ . Ряды (1, 2) являются сходящимися. Расчет финальных распределений зарядов и изменений зарядов на элементах при однополярных последовательных подключениях дает

$$Q_2^{(\infty)} = Q_3^{(\infty)},$$

$$Q_1^{(\infty)} = \frac{2}{3}Q_2^{(\infty)}, \quad \Delta Q_{ij}^{(\infty)} = 0. \quad (3)$$

В случае разнополярных последовательных подключений

$$Q_2^{(\infty)} = -Q_3^{(\infty)},$$

$$Q_1^{(\infty)} = 0, \quad \Delta Q_{ij}^{(\infty)} = 0. \quad (4)$$

Финалы эволюции в двух случаях оказываются качественно различными. В случае согласных полярностей при подключениях ветвей заряд преимущественно сосредоточивается на общем элементе  $C_1$ , в то время как в случае противоположных полярностей заряд постепенно с каждым циклом стекает с общего элемента  $C_1$ , находящегося в противоречивой зарядовой ситуации, и сосредоточивается в противоположных полярностях на элементах ветвления  $C_2$  и  $C_3$ .

Таким образом, можно сделать важный для последующих построений вывод: при фрагментарном включении накопительных элементов под влиянием внешних упорядочивающих сил (в нашем случае напряжений) в циклических процессах эволюционный процесс идет в направлении перетекания зарядов (масс) с элементов, находящихся в ситуации рассогласованного действия сил на элементы с согласным действием сил или отсутствия противодействия. В результате возникает предельная эволюционная ситуация дополнения движущих сил, создающая адекватный сигнальный отклик системы в соответствующей ситуации связности элементов. Эволюционное перераспределение параметра накопления (зарядов) можно рассматривать как эффект авторегулирования вкладов элементов в результирующий сигнал отклика, который далее положен в основу процесса обучения.

### Эволюционный процесс и ассоциативная реакция

Процесс обучения был исследован на квазиодномерной зарядной цепи, представленной на рис. 1,а и состоящей из 5 ключей и 10 конденсаторов с малыми естественными утечками заряда. Ключевая комбинация составляла бинарный код (совокупность признаков “да-нет”). Каждой комбинации  $N$  (их всего 32) может быть приписан соответствующий сигнал отклика путем его демонстрации (подключением выводов  $A - B$  к источнику напряжения  $U_{NO}$  нужного значения и полярности). Условно примем за 0 подключение в цепь нижнего конденсатора, а за 1 — верхнего конденсатора. Таким образом, каждый разряд получаемого пятиразрядного двоичного числа можно интерпретировать как признак, а саму ключевую комбинацию как образ-стимул. При обучении на каждый образ-стимул

Рис. 2. Эволюционные изменения потенциала выходного электрода  $U_N^{(\alpha)}$  в зависимости от числа циклов демонстраций  $\alpha$  эталонных потенциальных реакций  $U_{NO}$ .

Видна сходимость потенциалов  $U_N^\alpha$  в каждой условной ключевой ситуации (от 10 000 до 00001) к соответствующим эталонным значениям  $V_{NO}$ . Ключевая комбинация 00001 была последней в каждом цикле демонстраций.

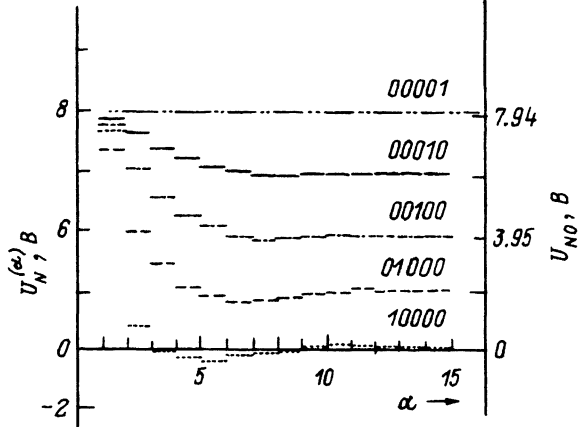


Таблица 1.

$u_i, \text{В}$	
верхний ряд	нижний ряд
1.83	2.80
0.75	1.93
0.28	0.96
1.22	-0.05
2.30	-1.01

“воспитывается” условная реакция отклика в виде потенциала  $U_{NO}$  на выходном электроде  $B$  (электрод  $A$  считается заземленным).

Типичная картина изменения потенциала на выходном электроде  $B$  после каждого цикла демонстраций (каждый цикл состоит из 5 демонстраций потенциалов  $U_{NO}$  в соответствующих ключевых комбинациях) приведена на рис. 2, а финальное распределение напряжений между емкостями дано ниже. Виден периодический с затуханием характер изменения потенциала отклика  $U_N^{(\alpha)}$  при увеличении числа циклов демонстраций  $\alpha$  с устремлением потенциала отклика к эталонным значениям выходных напряжений  $U_{NO}$ . При этом финальное (после 17 циклов) распределение напряжений  $u_i^{(17)}$  на элементах оказывается следующим (табл. 1).

Из таблицы видно, что естественная эволюция потенциалов электрической сети приводит к появлению напряжений различной полярности и различных абсолютных значений. Однако их алгебраическое сложение, соответствующее ключевой комбинации связности элементов, обозначенной на рис. 2, дает правильный потенциал на выходном электроде.

Заметим также, что запись информации эталонных потенциалов отклика нелокализована. Она рассредоточена во всем множестве накопительных элементов. Доступ к ее содержимому параллелен и ассоциативен. Информационная среда не имеет функциональной обособленности элементов (пороговые, логические, запоминающие).

Таблица 2.

$u_i, В$	
верхний ряд	нижний ряд
0.69	0.69
1.43	0
1.43	0
0.70	0.70

Свойство накопительности означает не только адаптивное изменение значения градируемого физического параметра (напряжений, токов, модальностей согласованных движений), но и изменение меры “консервирования” адаптивного состояния (изменение емкости, области притяжения аттрактора). Это качество ярко проявляется в системах с иерархической эволюционной динамикой [6,7].

### Функциональные возможности сети

Обучение условной ответной реакции, которое показано на рис. 2, является функцией распознавания образов (классификационная функция). Не останавливаясь подробно на этом (в наших экспериментах мы задавали самые различные эталонные потенциалы отклика и во всех случаях достигалась правильная реакция сети), рассмотрим кратко наиболее важные особенности сети, определяющие ее функциональные возможности.

а) Селекция доминантных признаков. Известно, что особую трудность в вычислительных экспертных системах создает классификация в условиях случайных или несущественных с точки зрения пользователя классификационных признаков. Исследование показало, что сеть с накопительными элементами обладает способностью к селекции доминантных признаков. Для иллюстрации этого свойства в наборе из восьми ключевых образов-стимулов, принадлежащих одному классу, создали два доминантных признака (3-й и 4-й ключи были всегда в верхнем положении, остальные ключи при каждой демонстрации имели случайные положения). Каждой возникшей ключевой комбинации с доминантными и случайными признаками соответствовала одинаковая эталонная ответная реакция  $U_{NO} = 4.95 В$ .

Финальное распределение напряжений на элементах оказывается следующим (табл. 2).

Характерно, что только на 3-й и 4-й парах конденсаторов напряжения оказались различными и изменение позиций 3-го и 4-го ключей изменяет выходной потенциал. В то же время напряжения, накопленные в ходе эволюции на остальных элементах, оказались практически одинаковыми. Иными словами, система реагирует на отсутствие хотя бы одного доминантного признака, а к остальным она становится безразличной. Полезная информация извлекается из шума.

б) Детектирование новизны. Как видно из выражений (3), (4), по мере установления адаптивных отношений уменьшается межэлементное перетекание зарядов  $\Delta Q_{ij}^{(\alpha)}$  и в пределе происходит его полное прекращение.

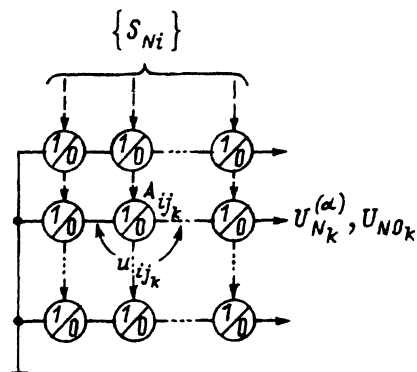


Рис. 3. Матрица с обучением с автокоррекцией весовых отношений.

Система как бы засыпает: нет движения зарядов. Однако если во множестве ключевых образов-стимулов, принадлежащих различным классам, в режиме обучения появится новый отличительный признак, то возникает всплеск адаптивных токов. Эти избыточные токи несут на себе информационную нагрузку и могут быть использованы для приведения в действие других анализирующих подсистем.

в) Инвариантное распознавание. Распознавание при повороте, сдвиге или масштабировании объекта — чрезвычайно важная способность биологических систем. Известны трудности в ее технической реализации. Способность к инвариантному распознаванию была опробована при имитации одномерного пространственного перемещения объекта. Для этого производили обучение условной реакции (выходной потенциал 4.95 В) при пространственном смещении смежной пары ключей, переводимых в нижнее положение (4 различных позиции). После обучения производили анализ выходного напряжения реакции  $U_N^\alpha$  при самых различных ключевых комбинациях. Но только смежная пара ключей (“подвижный” образ) в любой позиции приводила к воссозданию эталонного напряжения.

### Матрица из накопительных элементов

Проведенное исследование показывает, что естественный эволюционный процесс перетекания зарядов между накопительными элементами при их фрагментарном подключении к источнику эталонных сигналов отклика создает эффект обучения. Вместо конденсаторов могут быть использованы микрообъемы вещества с ионным разделением или среды с многоустойчивостью электрических состояний [8]. Из отдельных строк (рис. 1, а) с квазиодномерным перетеканием зарядов может быть составлена матрица с обучением, схема которой приведена на рис. 3.

Матрица состоит из  $m$  строк с соответствующим числом выходных электродов. В каждой  $k$ -строке имеется  $n$  двухрезервуарных накопительных элементов  $A_{ij_k}$  ( $j = 1, 2$  — верхний, нижний резервуары,  $i$  — номер столбца). Выходное напряжение  $U_{N_k}^\alpha$  на  $k$ -строке после  $\alpha$ -предъявления  $N$ -ассоциативного сочетания образов является суммой напряжений на действующих резервуарах.

Сигнал ошибки  $\Delta U_{N_k}^{(\alpha+1)}$ , возникающий в  $(\alpha + 1)$ -демонстрации эталонных напряжений  $U_{NO_k}$ ,

$$\Delta U_{N_k}^{(\alpha+1)} = U_{N_k}^{(\alpha)} - U_{NO_k}. \quad (5)$$

При равных емкостях резервуаров автокоррекция во время  $(\alpha + 1)$ -демонстрации, обусловленная действием принципа дополнительности (в нашем случае закон Кирхгофа для напряжений), имеет значение

$$\Delta U_{N_{ijk}}^{(\alpha+1)} = -\Delta U_{N_k}^{(\alpha+1)} / n. \quad (6)$$

Новые значения парциальных напряжений на накопительных элементах, находящихся в  $j$ -состоянии после коррекции в  $k$ -строке,

$$U_{N_{ijk}}^{(\alpha+1)} = U_{N_{ijk}}^{(\alpha)} + \Delta U_{N_{ijk}}^{(\alpha+1)}. \quad (7)$$

Процедура коррекции является сходящейся, устремляющей выходные напряжения  $U_{N_k}^{(\alpha)}$  к соответствующим эталонным значениям  $U_{N_{00}}$ .

Вместо дискретного параметра входной символики  $1/0$  может быть введен параметр восприимчивости к заряджению  $\xi_i$  (активности накопительного элемента). Сумма восприимчивостей по строке нормирована единицей  $\sum_{i=1}^n \xi_{N_{ik}} = 1$ . В этом случае коррекция состояний на  $(\alpha + 1)$ -шаге пропорциональна восприимчивостям

$$\Delta U_{N_{ik}}^{(\alpha+1)} = \xi_{N_{ik}} \cdot \Delta U_{N_k}^{(\alpha+1)}. \quad (8)$$

Подобная система позволяет производить обучение с ассоциативным аналоговым преобразованием образов (изображений). Физическая реализация этого преобразования является предметом отдельного исследования.

Работа выполнялась по заказу Санкт-Петербургского Центра микро-технологии и диагностики. Директору Центра В.В.Луцинину авторы выражают свою глубокую благодарность.

### Список литературы

- [1] *Растргин Л.А.* Адаптация сложных систем. Рига: Зинатне, 1981. 375 с.
- [2] *Ebeling W.* // ZAMM. Z. Angew. Math. Mech. 1989. Vol. 69. N 5. P. 279-284.
- [3] *Boseniuk T., Ebeling W.* // Europhys. Lett. 1988. Vol. 6. N 2. P. 107-112.
- [4] *Sompolinsky H.* // Physics Today. 1988. N 12. P. 70.
- [5] *Kohonen T.* Self-organization and Associative Memory. Berlin; Heidelberg; New York; Tokyo: Springer Verlag, 1984. 255 p.
- [6] *Николис Дж.* Динамика иерархических систем. Эволюционное представление. М.: Мир, 1989. 486 с.
- [7] *Kalnin A.A.* // Rostocker Physikalische Manuskripte. 1985. Ht 8. P. 93-96.
- [8] *Кальнин А.А., Пецольт Й., Смирнова Н.А.* // Изв. ЛЭТИ. 1989. Вып. 414. С. 50-55.

С.-Петербургский государственный  
электротехнический университет

Поступило в Редакцию  
6 июля 1992 г.