ТЕХНИКА молодежи

ИЮЛЬ 2005

Тормоза придумал трус!

С этим лозунгом лихачей редакция «ТМ» категорически не согласна и рассказывает о конструкциях современных мотоциклов, где комфорт и безопасность водителей являются одними из главных показателей качества (с. 2).

ISSN 0320-331X
05007
9 770320 331009

КОМПЬЮТЕР НА ПЕСКЕ

Виталий РЫППО

Все ли может ЭВМ? Сравнительно недавно вышли на русском языке две книги известного английского математика и астрофизика, заведующего кафедрой математики Оксфордского университета Роджера Пенроуза «Тени разума» и «Новый ум короля», где он, анализируя современное состояние науки, указывает границы применимости современных компьютерных технологий. Пенроуз считает, что «если мы согласимся с тем, что в нашей способности познавать – а следовательно, и в нашей сознательной деятельности в целом – есть нечто, выходящее за пределы чисто алгоритмических действий, то следующим шагом мы должны попытаться выяснить, в каких из наших физических действий может проявляться «существенно неалгоритмическое поведение». (В частности, предполагается, что изучение именно «физических действий» определенного вида способно помочь разгадать тайну происхождения сознания.) Он пытается доказать, что таким «неалгоритмическим действиям» трудно найти место в рамках общепринятых сегодня физических теорий. А значит, нужно искать соответствующее место, где в научной картине существует серьезный пробел. (Пенроуз, кстати, утверждает, что это «белое пятно» лежит где-то на границе между «субмикроскопическим» миром, в котором правит квантовая механика, и непосредственно воспринимаемым нами макромиром, подчиняющимся законам классической физики.) И основным инструментом поиска является моделирование исследуемых объектов, их взаимодействия и поведения.

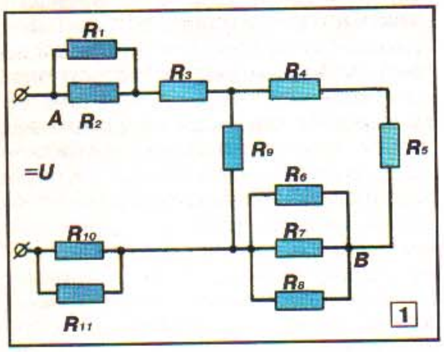

Рис. 1. Электрическая схема (последовательно-параллельная)

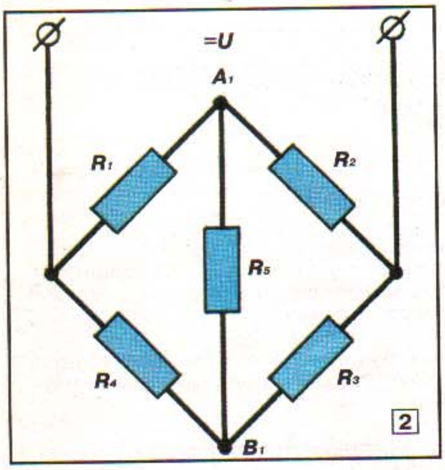

Рис. 2. Электрическая схема (мостиковая)

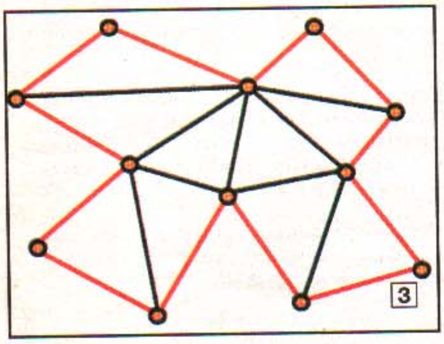

Рис. 3. Гамильтонов цикл (выделен красным)

В настоящее время в мире естественных наук существуют две группы ученых. Первая группа, и очень большая, считает, что для любых процессов, объектов, систем можно создать модель на ЭВМ, позволяющую достаточно точно прогнозировать их поведение (если не сейчас, то позже, когда повысится быстродействие ЭВМ и подрастет память). Во второй группе, весьма малочисленной, куда входит и Пенроуз, полагают, что существуют сложные процессы, объекты, системы, прогнозировать поведение которых невозможно, используя для моделирования компьютеры, построенные по известному ныне принципу.

Рекурсивные функции. Начиная с незапамятных времен и по нынешний день, исследованы сотни различных функций. Многие из них оказались важными и полезными при формальной записи законов физики и механики. Но оказалось, что наиболее «съедобны» для компьютеров и хорошо ими «перевариваются» рекурсивные функции. Так вот, ученые из первой группы считают, что все процессы, системы, объекты могут быть представлены в виде совокупности рекурсивных функций, а следовательно, исследованы с помощью ЭВМ. Строгих доказательств этому нет, но в общем договорились так считать по умолчанию.

Ученые второй группы позволили себе с этим не согласиться и считают, что существуют физические, организационные системы (объекты, процессы), которые не могут быть адекватно представлены рекурсивными функциями, а следовательно, изучаться с помощью ЭВМ в полном объеме. По их мнению, для решения подобных задач должны быть созданы компьютеры или какие-то другие средства моделирования, работающие на иных физических принципах.

Сложность и вычислимость. Р. Пенроуз считает, что существуют математические, физические и другие системы, поведение которых невозможно исследовать либо из-за сложности их построения, либо из-за невозможности вычисления траекторий движения отдельных объектов, их составляющих.

Большинство читателей изучали электричество в школе, в частности закон Ома, поэтому им будет понятен следующий пример. На рис. 1 и 2 представлены две электрические схемы. Спросим у читателей, какая схема проще и на какой из них легче найти напряжение между точками А и В или A_1 и B_1? Очевидно, что сложность схемы на рис.2 выше, и для нахождения разности потенциалов между точками A_1 и B_1 закона Ома недостаточно, необходимо

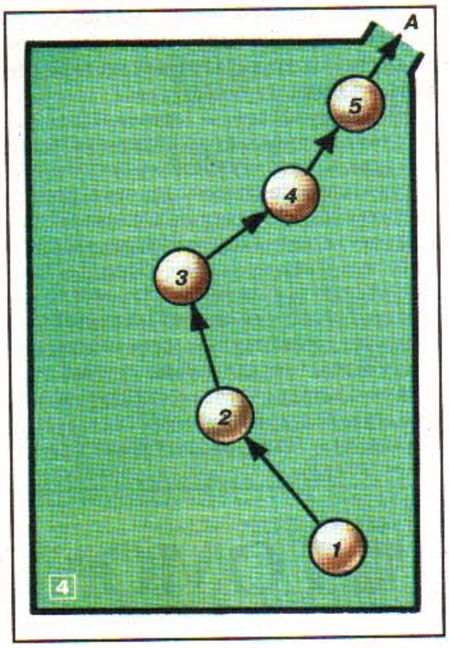

Рис. 4. Бильярдный стол с шарами

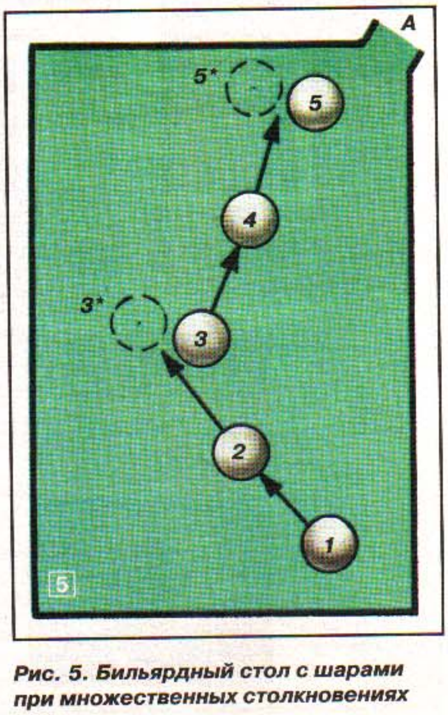

Рис. 5. Бильярдный стол с шарами при множественных столкновениях

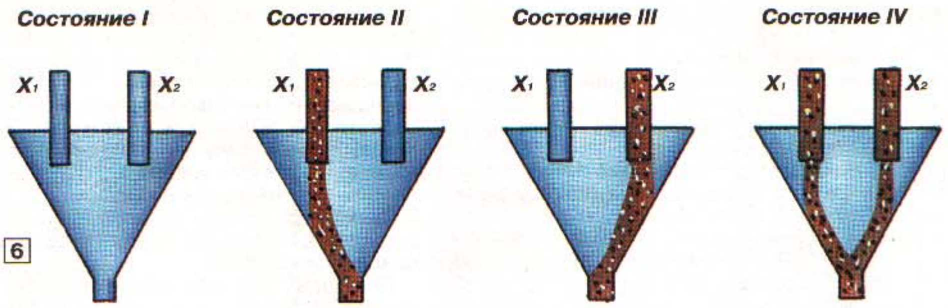

Рис. 6. Логический элемент ИЛИ

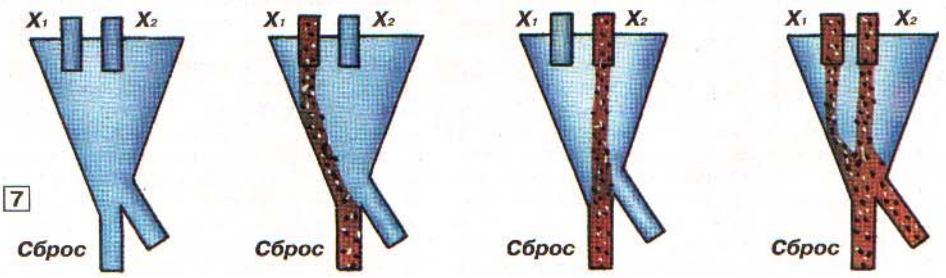

Рис. 7. Логический элемент И

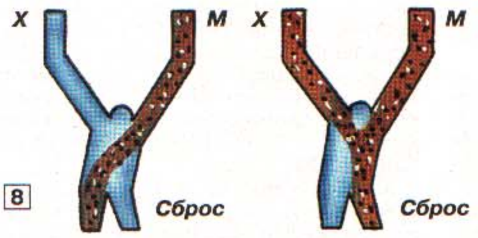

Рис. 8. Логический элемент НЕ

Таблица истинности

X_1	0	1	0	1
X_2	0	0	1	1
Y	0	1	1	1

X_1	0	1	0	1
X_2	0	0	1	1
Y	0	0	0	1

X	0	1
Y	0	0

знание метода контурных токов («правило Кирхгофа»), который в школе может и не изучаться. Теперь представим, что не пять сопротивлений, а несколько их сотен соединены в виде мостиков и звездочек различной конфигурации. В принципе, понятно, как решать и эту задачу, но, ввиду сложности схемы, за приемлемое время это сделать будет очень непросто.

В книге «Новый ум короля» Пенроуз ссылается на знаменитую задачу коммивояжера, поставленную еще в 1934 г., и которая является одной из важнейших в теории графов. В своей области (дискретных оптимизационных задач) задача коммивояжера служит своеобразным полигоном, на котором испытываются все новые методы.

Коммивояжер (бродячий торговец) должен выйти из первого города, посетить по разу в произвольном порядке города 2,3,4...n и вернуться в первый город. Расстояния между всеми городами известны. В каком порядке следует обходить города, чтобы замкнутый путь коммивояжера был кратчайшим? В терминах теории графов: найти в графе гамильтонов цикл минимальной длины (рис. 3).

С проблемами, подобными той, с которой столкнулся коммивояжер, мы встречаемся в реальной жизни довольно часто. А вместе с тем, несмотря на внешне кажущуюся простоту, эта задача относится к классу NP-сложных, точное решение которых, в общем случае, может быть получено только за экспоненциальное время. Уже при числе городов в несколько сотен решение такой задачи на самой современной ЭВМ методом полного перебора может затянуться на годы. Применение методов сокращенного перебора, типа «ветвей и границ», помогает в решении отдельных задач, но принципиально картины не меняет.

Еще одним препятствием успешного использования ЭВМ является проблема вычислимости в физических процессах. Пенроуз иллюстрирует эту проблему примером из «ньютонианского бильярдного мира». На рис. 4 показан бильярдный стол с пятью шарами. Задача состоит в том, чтобы забить шар 5 в лузу А путем последовательного соударения всех шаров. Пользуясь механикой Ньютона, в принципе, можно вычислить траектории шаров 1,2,3,4, чтобы загнать шар 5 в лузу А. Желающие могут попробовать решить эту задачу на реальном бильярдном столе. Но усложним несколько эту задачу и предположим, что шары 1,2,3,4,5 будут иметь множественные столкновения (см. рис. 5). Шар 2 сталкивается не только с шаром 3, но и с шаром 3*, а шар 4 не только с шаром 5, но и шаром 5*. Задача вычисления траекторий шаров становится еще более трудной. Пенроуз высказывает предположение, что для бильярдной модели, в которой имеют место множественные столкновения, проблема вычислимости может сделать невозможным алгоритмическое описание поведения подобной системы, а следовательно, и невозможным моделирование ее поведения на ЭВМ.

Предполагается, что для исследования объектов, систем, процессов, описание которых алгоритмически невозможно, должны существовать модели, построенные на иных физических принципах.

Элементы автоматики на потоках сыпучей среды. В настоящей статье рассматриваются элементы автоматики на управляемых потоках сыпучей среды. Особенностью названных элементов является то, что отдельные частицы сыпучей среды в них совершают множественные столкновения, а сами элементы можно объединять в устойчивые динамические сети, подобные графу коммивояжера. Характерным является тот факт, что на сыпучую среду не распространяются законы о сообщающихся сосудах и о равном давлении на стенки сосуда, как в жидкостях и газах, а также закон о выравнивании энергетических потенциалов (в отличие от пневмо-, гидро-, электросетей, где при соединении двух любых точек трубопроводом или, соответственно, электропроводом, энергетические потенциалы этих точек выравниваются (соответственно, давление и разность потенциалов). Но если построить сеть, в которой рабочим телом будет являться сыпучая среда, то при соединении двух точек сети выравнивания энергетических потенциалов не происходит. Но, несмотря на такие «нетрадиционные» свойства, оказалось возможным создание элементов автоматики, рабочим телом в которых является сыпучая среда (подобная той, что используется в песочных часах)[1].

Прежде чем познакомиться с указанными устройствами поближе, сделаем небольшой экскурс в историю математики. Представим знаменитого английского математика Джорджа Буля, который не только отец Этель Лилиан Войнич, но и создатель знаменитой булевой алгебры. В его алгебре переменные и функция принимают только значения, равные 0 или 1. При переборе всех возможных вариантов булевых функций $Y = (X_1, X_2)$, общее их количество оказывается равным 16. Их изучение позволило определить функционально полные

[1]. Подробное описание элементов автоматики на управляемых потоках сыпучей среды можно найти в А.С. СССР № 1126803, 1126729, 1578384, 1661803, авт. Рыппо В.Л.

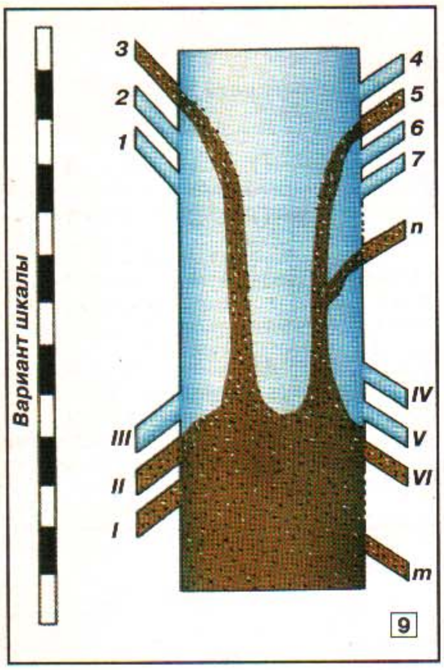

Рис. 9. Дискретно-аналоговый элемент ПАМЯТЬ

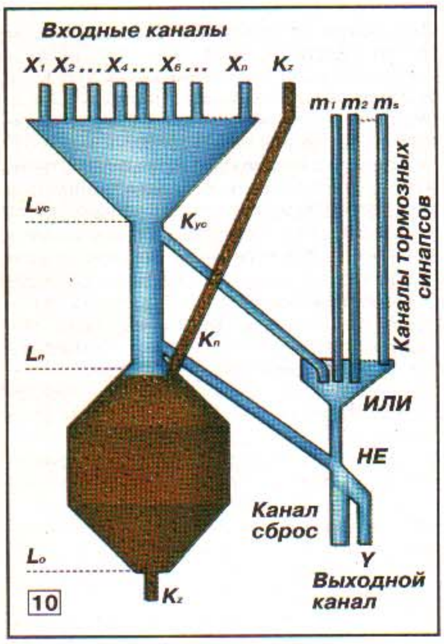

Рис. 10. Модель нейрона

наборы, то есть такие, с помощью которых можно представить все остальные. Самым удобным оказался набор из логических функций И, ИЛИ, НЕ.

Наглядная формальная запись логических функций выполняется в виде таблиц истинности, на основании которых строятся логические элементы, аппаратно реализуемые реле, транзисторами, ферритами, пневмоэлементами и т. д.

Рассмотрим, как будет выглядеть реализация логических элементов, если в них в качестве рабочего тела использовать потоки сыпучей среды. Такие устройства состоят из корпусов с камерами взаимодействия и каналов, соединенных с этими камерами. Наличие потока сыпучей среды в канале равнозначно символу 1 в булевой алгебре, а отсутствие потока – 0.

На рис.6, 7, 8 представлены логические элементы ИЛИ, И, НЕ на потоках сыпучей среды и их таблицы истинности. Входные каналы элементов ИЛИ и И соответствуют значениям аргументов X_1 и X_2, а выходной канал У значениям функции. Отрицание НЕ – функция одной переменной X, а M – это канал для поддержания массы сыпучей среды в камере.

По аналогии с «обычной» вычислительной техникой введем еще один элемент с рабочим телом в виде сыпучей среды. Это дискретно-аналоговый элемент ПАМЯТЬ, схематически изображенный на рис. 9. Элемент ПАМЯТЬ – протяженный сосуд со шкалой, подобранной для каждого элемента отдельно с целью отображения количественной характеристики (параметр, показатель, значение функции и т.д.) моделируемого объекта. Элемент ПАМЯТЬ имеет множество входов (1, 2, 3, ..., n) и множество выходов (I, II, III, ..., m), по которым сыпучая среда поступает в элемент и истекает из него. Изменение уровня сыпучей среды в элементе ПАМЯТЬ воспринимается как непрерывный сигнал. Порции сыпучей среды во входных и выходных каналах могут быть и дискретными, и аналоговыми сигналами в зависимости от динамического состояния элемента. Количество входных и выходных каналов регламентируется только площадью поверхности элемента ПАМЯТЬ и площадью поперечных сечений входных и выходных каналов.

Модель нейрона. Известно, что нейроны людей и животных также являются своеобразными дискретно-аналоговыми элементами, которым присущи многие свойства, например обучение, забывание, порог, усталость, действие тормозных синапсов, хорошо изученные физиологами. Покажем, каким образом эти свойства нейронов можно моделировать с помощью элемента ПАМЯТЬ и логических элементов на сыпучих средах.

На рис.10 представлена модель нейрона на потоках сыпучей среды, состоящая из дискретно-аналогового элемента ПАМЯТЬ (несколько видоизмененной конфигурации), логических элементов ИЛИ и НЕ, совокупности входных и выходных каналов. Входными каналами модели нейрона являются X_1, X_2,..., Xn. Порции сыпучей среды в этих каналах равнозначны стимулам, входным сигналам реального нейрона. Канал Y – выходной канал модели нейрона. Появление сыпучей среды в этом канале подобно возбуждению реального нейрона. Поток сыпучей среды появляется в канале Y, когда суммарное количество сыпучей среды, поступающей по входным каналам X_1, X_2,..., X_n, обеспечит поднятие уровня в элементе ПАМЯТЬ до входа в канал K_n (уровень L_n). Таким образом моделируется свойство реального нейрона – ПОРОГ. Если уровень сыпучей среды закрывает канал K_n, модель нейрона находится в возбужденном состоянии.

В следующий период времени входные сигналы отсутствуют, и сыпучая среда, истекая по каналам Y и K_z', снижает свой уровень. Если уровень ниже Ln, то сыпучая среда в канале Y отсутствует (возбуждение снято). По каналу K_z сыпучая среда подается постоянно. Площадь поперечного сечения K_z' незначительно больше, чем у K_z. Такая конструкция каналов обеспечивает медленное снижение уровня сыпучей среды в элементе ПАМЯТЬ. Данный процесс подобен свойству ЗАБЫВАНИЕ в реальном нейроне.

Теперь предположим, что уровень сыпучей среды устанавливается где-то между уровнями L_o и L_n. В следующие моменты времени по каналам X_1, X_2,..., Xn поступают порции сыпучей среды, которые поднимают уровень в элементе ПАМЯТЬ в направлении L_n. Такой процесс подобен свойству ОБУЧЕНИЕ в реальном нейроне. Когда уровень сыпучей среды окажется на предпороговом уровне L_n, малейшие порции сыпучей среды в каналах X_1, X_2,..., X_n переведут модель нейрона в возбужденное состояние, т.е. появится сыпучая среда в канале Y.

Допустим, что совокупность порций сыпучей среды во входных каналах была столь значительна, что уровень сыпучей среды миновал вход канала K_n и превысил уровень $L_{ус}$. В этом случае сыпучая среда попадает в канал $K_{ус}$, затем в элемент ИЛИ, после него в элемент НЕ, подавляя поток, идущий по каналу K_n, и блокируя канал Y. Подобное свойство реального нейрона называется УСТАЛОСТЬ.

Известно свойство реального нейрона – ДЕЙСТВИЕ ТОРМОЗНЫХ СИНАПСОВ. В реальном нейроне есть такие входные каналы, что появление сигнала в любом из них выдает запрет на возбуждение нейрона. Каналы тормозных синапсов m_1, m_2,..., m_s рассматриваемой модели нейрона так же, как и в предыдущем случае, соединены последовательно с логическими элементами ИЛИ и НЕ, потому появление сыпучей среды в любом из этих каналов сделает невозможным появление потока сыпучей среды в канале Y, что равнозначно моделированию функции ДЕЙСТВИЕ ТОРМОЗНЫХ СИНАПСОВ.

Модели нейронов на потоках сыпучей среды могут быть также представлены непланарными устойчивыми динамическими сетями и выступать в качестве моделей сложных физических и организационных систем.

Умозрительно представим сетку-авоську. Поместим в неё мяч и обнаружим, что каждый узел авоськи проецируется на поверхность мяча. Такая сеть является планарной, и именно сети такого типа чаще всего объединяют элементы систем автоматического управления, элементы вычислительных машин, элементы электрических, пневмо-и гидросетей. Теперь представим, что внутри авоськи связи между отдельными узлами проходят не только по поверхности мяча, но и напрямую. Такая сеть уже не будет планарной, и чаще всего в такие сети объединены элементы сложных систем живых организмов, например мозга.

Рассмотрим, каким образом модели нейронов на потоках сыпучей среды (элементы ПАМЯТЬ) могут объединяться в непланарную динамическую сеть. На рис. 11 представлены четыре элемента ПАМЯТЬ, связанных таким образом, что повышение уровня сыпучей среды в элементе ПАМЯТЬ 1 обеспечивает повышение уровня в элементе ПАМЯТЬ 2, а повышение уровня в элементе ПАМЯТЬ 3 к снижению уровня в элементе ПАМЯТЬ 4. Количество связей между элементами ПАМЯТЬ ограничивается только площадью поверхности самих элементов и диаметрами входных и выходных каналов[2].

Попытка алгоритмического описания непланарных сетей, состоящих из множества элементов ПАМЯТЬ, а следовательно, моделирование поведения таких сетей с помощью ЭВМ, будет неудачной

[2]. Более подробно см. в А.С. СССР № 4681474, авт. Рыппо В.Л.

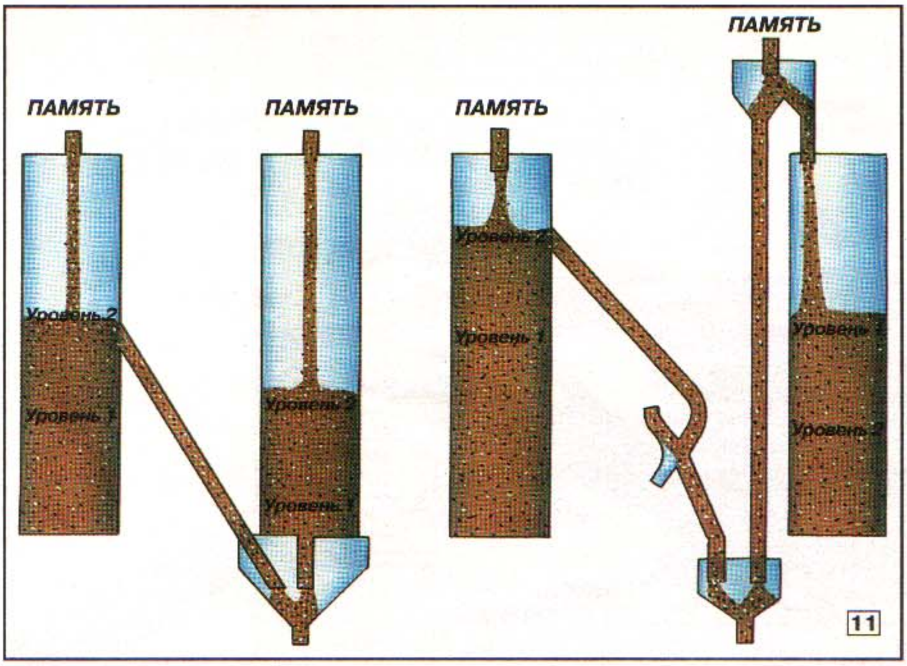

Рис. 11. Модель нейросети (два варианта соединения элементов ПАМЯТЬ)

из-за проблем вычислимости множественных столкновений частиц в отдельных элементах ПАМЯТЬ и сложности самих сетей, объединенных аналогично графу коммивояжера.

А вот особенности конструкции сетей на потоках сыпучей среды не только это позволяют, но и предполагают возможность построения на их основе гомеостатических моделей, подобных гомеостату Эшби[3]. Действительно, если резко повысить или понизить уровень сыпучей среды в одном элементе ПАМЯТЬ, входящем в непланарную сеть, то соседние элементы ПАМЯТЬ будут стремиться компенсировать это воздействие, что характерно для систем, обладающих гомеостазисом.

Сети элементов на сыпучих средах, в отличие от электронных логических сетей, сходны с реальной нервной сетью и по целому ряду других свойств. Так, кроме уже упомянутых свойств непланарности и гомеостазиса, эти сети объединяет смешанный характер сигналов – дискретно-аналоговый. Скорости распространения сигналов в них приблизительно одного порядка (от 1 до 150 м/с в нейросети и от 1 до десятков м/с в сети на сыпучей среде). Каждый отдельный элемент и в одной, и в другой сети способен реализовывать следующие функции: порог, усталость, рефрактерность, обучение, забывание, действие тормозных синапсов.

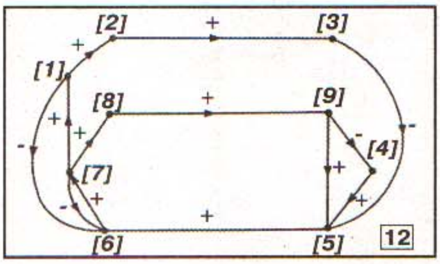

Рис. 12. Знаковый орграф для системы «Наука и общество»

А как утверждал Гегель: «В капле отражаются свойства океана».

Применения. Возникает законный вопрос, а где могут быть использованы элементы автоматики на потоках сыпучей среды? По мнению автора, областями применения устройств на потоках сыпучей среды являются: учебные устройства при изучении логических автоматов и дискретно-аналоговых сетей, развивающие игры и игрушки, автоматы, способные функционировать при высоких и низких температурах, а также в вакууме (при наличии гравитационного поля) без защитных экранов и использования системы термостатирования, при этом в вакууме не происходит утрата рабочего тела. Но наиболее важным направлением является изучение возможностей моделирования сложных физических и организационных систем, так как сети, построенные на основе элементов ПАМЯТЬ, структурно подобны знаково-функциональным графам и могут быть представлены в виде динамической модели.

Модель системы «Наука и общество». Автор одной из фундаментальных работ по методам моделирования Ф.С. Робертс[4] констатирует, что «при моделировании сложных систем исследователь сталкивается с необходимостью нахождения компромисса между точностью результатов моделирования и возможностью получения подробной информации, необходимой для построения модели. Знаковые ориентированные графы используются при разработке упрощенных математических моделей сложных систем и при анализе результатов, получаемых на основе минимальной информации. Нередко знаковый граф является наиболее детализированной моделью сложной системы, которую удается создать». Свои выводы Роберт иллюстрирует примером использования ориентированного графа при моделировании системы «Наука и общество». Воспользуемся и мы этим примером.

На рис. 12 представлен знаковый граф для системы «Наука и общество», взятый из книги Ф.С. Робертса, где введены следующие обозначения:

1 – число рабочих мест для научных работников;

2 – число слабо подготовленных исследователей;

3 – доля «плохой» научной продукции или вредные последствия использования результатов научно-технических исследований;

4 – внутренние и внешние угрозы обществу, для преодоления которых требуются достижения науки и техники;

5 – общественное мнение в пользу развития научных исследований;

6 – бюджетные ограничения;

7 – государственный бюджет научных исследований;

8 – число хорошо подготовленных исследователей;

9 – доля «добротной» научной продукции или положительные последствия использования достижений науки и техники.

Предположим, что преодолены все технические и технологические трудности по объединению элементов ПАМЯТЬ в устойчивую динамическую сеть. (Такая сеть устойчива, если уровни сыпучей среды изменяются только в пределах шкал, установленных на каждом элементе ПАМЯТЬ.) Тогда каждому узлу графа ставим в соответствие один элемент ПАМЯТЬ со шкалой, подобранной для отображения соответствующего из показателей 1–9. При этом, если над дугой графа стоит знак «+», то элементы объединяются подобно элементам ПАМЯТЬ 1 и 2, а если знак «–», то так, как элементы ПАМЯТЬ 3 и 4 (см. рис. 11). Каждая дуга знакового графа соответствует совокупности связей на динамической модели, использующей потоки сыпучей среды. На следующем этапе на шкалах элементов ПАМЯТЬ выставляются значения показателей 1– 9 графа, характерные для года n (на основании статистических данных). Принимается временной масштаб, например один час функционирования модели соответствует одному году развития реальной системы. После запуска модели, т.е. при ее нахождении в динамическом состоянии, добиваются такого положения, чтобы через час работы модели на шкалах отобразились показатели реальной системы, соответствующие году n+1. Этот этап называется этапом обучения системы. Далее добиваются такого положения, чтобы по завершении второго часа работы модели показатели на шкалах соответствовали году n+2 реальной системы, и т.д.

В результате мы получим «обученную» динамическую систему, которая будет способна на эволюционное изменение показателей по годам в соответствии с принятым масштабом времени и осуществление прогноза развития реальной системы. Или, другими словами, если модель правильно выдает показатели для ряда лет, включая текущий, то дальнейшее ее функционирование будет равнозначно составлению прогноза поведения реальной системы в будущем.

Подводя короткий итог изложенному, отметим, что исследования потоков сыпучей среды находятся на начальном этапе, и только дальнейшие исследования покажут, насколько эффективно устройства на подобных принципах смогут быть использованы в науке и технике.

Рисунки Михаила ШМИТОВА

ТМ

[3]. Эшби У.Р. Конструкция мозга. – М.: Изд. Иностранной литературы, 1962.

[4]. Робертс Ф.С. Дискретные математические модели с приложениями к социальным, биологическим и экономическим задачам. – М.: Наука, 1986.