

МОДЕЛИРОВАНИЕ БИОЛОГИЧЕСКОЙ ПАМЯТИ

Э. В. Утеуш

Харьковский институт радиоэлектроники

Запоминающие устройства современной вычислительной техники имеют важное значение для создания кибернетических комплексов. Однако подлинно кибернетический характер имеет память в сложных системах [1]. Применительно к памяти основные кибернетические свойства выражаются в наличии иерархии подсистем или видов памяти. Каждая такая подсистема имеет свою цель функционирования и подчиняется общей цели функционирования всей системы. К другой важной группе признаков для системы памяти можно отнести адаптивное регулирование, большое число связей между видами памяти и разветвленную информационную сеть.

Наибольшее число кибернетических свойств имеет система биологической памяти. В терминах больших (сложных) систем она характеризуется как регулярная система, в которой с точки зрения динамики процессов имеют место только стационарные или регулярные процессы. Они протекают более или менее ритмично в течение любого промежутка времени.

Изучение памяти как сложной системы удобно начинать с разработки математических моделей. При построении таких моделей на первый план выступают функциональные характеристики — обобщенные критерии. Определение обобщенных критериев или показателей системы памяти во многом зависит от моделирования. В общем случае при исследовании сложных систем математические модели строят для процессов, для информационных связей в системе и для среды, влияющей на систему [2].

Математическое моделирование памяти существенно не отличается от моделирования регулярных сложных систем. В небольшом числе случаев оно предусматривает использование теории следящих систем. Аналитическое описание, очевидно, может представлять систему уравнений, описывающих движение системы. Однако лишь для некоторых процессов памяти на ограниченном числе уровней возможно аналитическое описание. Такое же значение для описания процессов памяти имеют и модели в виде графов, характеризующих последовательность операций и взаимосвязи между ними.

Нередко при изучении памяти важную роль играют информационные связи в системе. Модели данного (второго) типа строятся с учетом характера сигнала.

Для изучения структуры таких моделей совсем не важны конкретная физическая природа и назначение сигналов, и только при схемной реализации моделей физический характер сигналов имеет особый смысл.

Так, при электрической энергии сигналов строят электрические модели. В структурно-функциональном отношении сигнал в модели характеризует такие свойства [2]: ограниченную длительность; ограниченную мгновенную мощность; сосредоточение основной доли энергии в конечной полосе частот, способность переносить информацию. В соответствии с классификацией сигналов [2], сигналы биологической памяти предположительно относятся к 1-му классу, в котором сообщения представляются отдельными символами из некоторого множества. Сигналы этого класса обладают наибольшей помехоустойчивостью. Высокая целесообразность и преимущества сигналов этого класса существенно упрощают задачи исследования памяти. Вместе с тем импульсный характер сигналов в биологической памяти позволяет отметить значительное число степеней свободы при формировании сообщения. В соответствии с информацией в импульсном сигнале могут изменяться амплитуда, длительность паузы между импульсами, частота и число импульсов, сочетание импульсов с различными признаками. Однако несмотря на простоту сигналов 1-го класса, в моделях биологической памяти в принципе можно использовать также сигналы 2-го и 3-го классов.

Исследование информационных связей биологической памяти наиболее полно осуществляется с помощью структурно-функциональных моделей, где каждый элемент предназначен для выполнения одной определенной операции с сигналом. Например, функцию хранения сигналов могут выполнять элементы памяти, регистры, устройства временной задержки и т. д. Кроме того, необходимы логические элементы, устройства для распределения сигналов по различным направлениям, схемы сравнения и т. д.

Иногда бывает удобно представлять соответствующие информационные связи в системах памяти в виде матриц. Элементы этих матриц обозначают соответствующие связи.

Математические модели третьего типа предназначены для изучения степени влияния среды и установления статических или детерминированных закономерностей этого влияния. В результате исследования моделей в данном случае устанавливаются критерии эффективности функционирования среды.

Математические модели в применении к биологической памяти предусматривают известную идеализацию оригинала. Однако часто анализ поведения модели и сравнение ее с системой позволяют сделать ряд ценных выводов о самой системе. Вместе с тем, построение математических моделей памяти затруднено, так как биологическая память представляет собой кибернетическую систему и при моделировании тех или иных особенностей или видов памяти невозможно учесть влияние всех или части подсистем иерархической структуры памяти.

Особую трудность представляет моделирование вероятностных характеристик памяти, которые определяют сложное поведение биологических объектов. Вероятностные свойства памяти изучают на кибернетических моделях, в результате чего получают представление о некоторых особенностях структуры и функций памяти.

В данной работе сделана попытка применить математическое и кибернетическое моделирование для изучения природы биологической памяти.

Входные каналы биологической памяти являются «узким» местом системы, имея ограниченную пропускную способность. Распределение информации в объеме памяти, очевидно, может осуществляться двумя методами: либо с помощью механизмов случайного поиска, либо путем детерминированной последовательной пересылки информации из одного

или в векторной форме

$$\frac{dY}{dt} = (X + \bar{X})Y. \quad (5)$$

Известно, что устойчивое решение системы вида (4) возможно только в начале координат, т. е. при

$$y_1 = y_2 = \dots = y_n = 0.$$

Кроме того, область существования решения ограничена n -мерным гиперкубом

$$-a_i \leq y_i \leq a_i; \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (6)$$

с центром в начале координат.

Устойчивость системы определяют значения собственных чисел матрицы $X + \bar{X}$, которые являются корнями следующего алгебраического уравнения n -го порядка:

$$\begin{vmatrix} x_{11} + \bar{x}_{11} - \lambda & x_{12} + \bar{x}_{12} & \dots & x_{1n} + \bar{x}_{1n} \\ x_{21} + \bar{x}_{21} & x_{22} + \bar{x}_{22} - \lambda & \dots & x_{2n} + \bar{x}_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{n1} + \bar{x}_{n1} & x_{n2} + \bar{x}_{n2} & \dots & x_{nn} + \bar{x}_{nn} - \lambda \end{vmatrix} = 0.$$

Система (4) устойчива лишь при условии, что собственные числа имеют отрицательную действительную часть.

Идея работы гомеостата Эшби состоит в подборе соответствующей матрицы управления X , которая в сумме с матрицей помех \bar{X} обеспечивает необходимые значения собственных значений. В гомеостате фиксируется момент появления неустойчивости и затем случайно — путем проб и ошибок подбирается матрица управления X .

Критерием неустойчивости системы является выражение

$$Q = \max |y_i| - q, \quad (7)$$

$$i = 1, 2, 3, \dots, n,$$

где $q > 0$ — некоторое достаточно малое число.

В соответствии с выражением (7) алгоритм работы гомеостата Эшби записывают в виде

$$X_{i+1} = \begin{cases} E, & \text{если } Q(X_i) > 0, \\ X_i, & \text{если } Q(X_i) < 0, \end{cases} \quad (8)$$

где E — случайная матрица, параметры которой являются случайными независимыми числами. Согласно (8) гомеостат сохраняет свое предыдущее состояние, если система устойчива.

Матрицу E обычно получают, пользуясь генератором шума. Для гомеостатических механизмов биологической памяти в качестве такой матрицы может выбираться в соответствии с основной целью функционирования памяти некоторое подмножество из множества состояний памяти $(n + k)$ -го уровня. Это означает, что при появлении в системе равновесия, в $(n + k)$ -м уровне будет найдено такое подмножество $\{X^*\}$ из множества всех возможных состояний $\{X\}$. При этом критерий устойчивости регулируемой системы $Q(X) \leq Q^*$, где Q^* — некоторый заданный уровень.

Когда это равенство не выполняется, БУ — блок управления отдает команду ГСВ — генератору случайной выборки (рис. 1) на производство очередной случайной выборки элемента X из источника состояний —

$(n + k)$ -го уровня памяти. При поддержании системы в таком состоянии, когда $Q(X) \leq Q^*$, ГСВ фиксирует в системе искомое состояние X^* . В результате задача решена, и затем информация в n -м уровне памяти, характеризуемая матрицей X , может быть стерта и заменена информацией в $(n + k)$ -м уровне памяти. Это позволяет предположить, что в результате информация n -го уровня будет не просто переписана в один из массивов памяти $(n + k)$ -го уровня, а заменена информацией, ранее

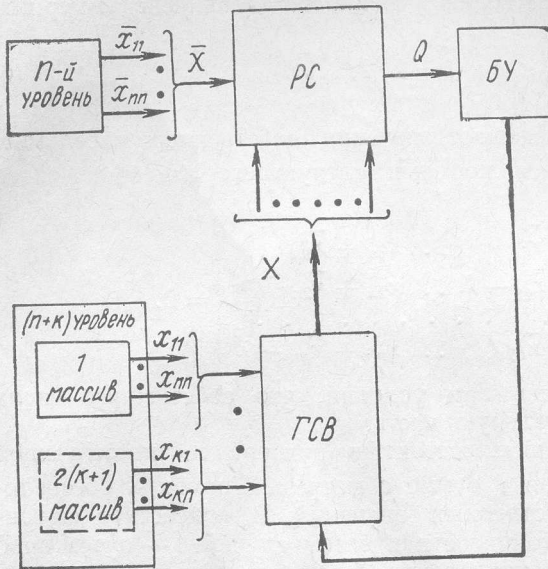


Рис. 1. Блок-схема управления гомеостатическими механизмами биологической памяти

мом осуществления слепого поиска. Другой метод слепого поиска заключается в просмотривании точек допустимой области изменения параметров управляющей матрицы, одной за другой в определенном порядке, и в отборе тех значений входов, при которых функция качества Q удовлетворяет критерию отбора. Недостаток данного метода — значительное время, затрачиваемое на поиск. Оно равно

$$T_q = \tau p^q, \quad (9)$$

где τ — время определения одного значения Q , p — число значений, принимаемых каждой из переменных в процессе сканирования, q — число переменных. Как видно, T_q резко возрастает с увеличением q .

Метод слепого поиска, как известно, неэффективен при решении задач многопараметрической оптимизации. Однако для описанной модели на улучшение сходимости метода случайного поиска оказывают большое влияние процессы самообучения в системе, а также циклические процессы в модели и центральной нервной системе.

Анализ модели (рис. 1) показывает, что с увеличением числа параметров n в информации n -го уровня памяти уменьшается число массивов, на которые разбивается $(n + k)$ -й уровень памяти. Из модели следует, что деление информации в уровнях памяти старшего ранга на отдельные порции (шаги) преимущественно представляет собой функцию гомеостатических механизмов. В то же время деление информации на порции в памяти низшего ранга является проявлением циклическости

хранившейся в этом уровне. Информацию в данном массиве характеризует подмножество X .

Следующее предположение заключается в том, что данный массив памяти $(n + k)$ -го уровня памяти не участвует в последующем цикле детерминированной переписи информации в память более старшего ранга. Таким образом образуется «застойная» информация. Предлагаемый механизм хорошо объясняет роль повторений при запоминании или влияние циклических процессов и, кроме того, ряд феноменов памяти [1].

Следует отметить, что механизм случайного поиска является частным прие-

действия механизмов детерминированной переписи информации из подчиненных видов памяти при условии, что для этих уровней не используется механизм случайного поиска.

При наличии в памяти n -го уровня ряда параллельных каналов, определяемых числом m , время случайного поиска существенно зависит

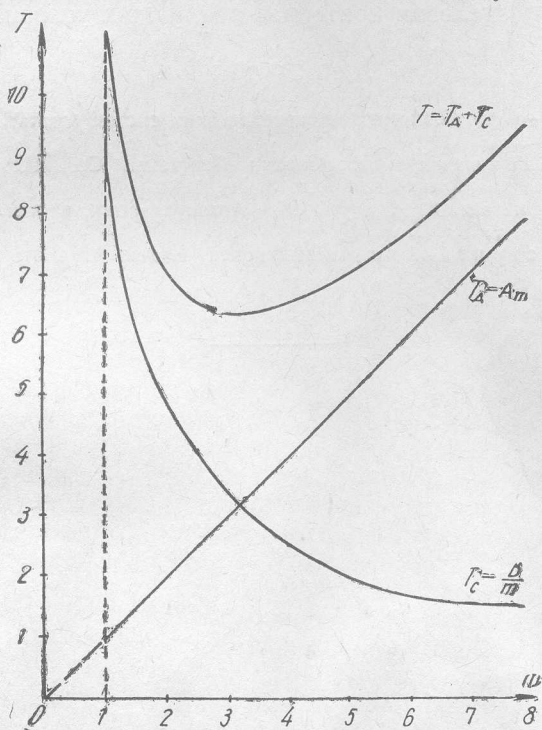


Рис. 2. Зависимости времени пересылки информации в памяти от числа признаков в информации

от m , так как с увеличением этой величины уменьшается число возможных состояний в памяти старшего уровня. Тогда можно предположить, что время на перепись информации в памяти находится в обратной зависимости от числа признаков m , т. е.

$$T_c = \frac{B}{m}, \quad (10)$$

где B — величина, инвариантная m .

Следовательно, выражение получено при условии, что в функцию гомеостатических механизмов памяти входит также деление информации в памяти старшего уровня на число массивов, пропорциональное $\frac{1}{m}$. Очевидно, что с увеличением числа признаков m слепой поиск может быть закончен значительно быстрее, и только после неудавшегося поиска информация в старшие уровни памяти будет пересылаться с помощью механизмов детерминированной «переписи», в соответствии с выражением (1).

Общее время пересылки информации T будет равно

т. е.
$$T = T_d + T_c, \quad (11)$$

$$T = Am + \frac{B}{m}. \quad (12)$$

Зависимость T от m представлена на рис. 2. Представляет интерес решение при $\frac{dT}{dm} = 0$, когда $T = T_{\min}$. Очевидно, что условие $T = T_{\min}$ определяет оптимальную деятельность.

Таким образом, установление численных значений A и B чрезвычайно важно при определении критериев наилучших условий функционирования памяти.

ЛИТЕРАТУРА

1. Э. В. Утеуш. О памяти кибернетических систем (статья в настоящем сборнике).
2. Д. М. Беркович и др. Сложные системы. Сб. «Автоматизация производства и промышленная электроника», т. 3, М., 1964.
3. Н. А. Железнов. Сигнал. Сб. «Автоматизация производства и промышленная электроника», т. 3, М., 1964.
4. Л. А. Растрингис. Случайный поиск, Изд-во АН Латвийской ССР, Рига, 1965.