ОБ ОДНОМ ПЕРСПЕКТИВНОМ НАПРАВЛЕНИИ В ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКЕ

В. П. Белявский, Ю. А. Василенко, Н. Я. Какурин

Научно-технические достижения последних лет во многом обусловлены развитием вычислительной техники, техники связи, методов обработки информации. Эти направления обеспечили создание сложных технических систем. Однако с ростом сложности решаемых задач и повышением требований к качеству систем возникло противоречие между показателями, определяющими целесообразность построения систем с вычислительными комплексами.

Одним из таких показателей является надежность функционирования. Обеспечение должного уровня надежности при возросшей сложности требует снижения интенсивности отказов отдельных элементов системы на два порядка, что технологически неприемлемо и экономически невыгодно. Поэтому возникает необходимость в разработке новых принципов и методов построения схем, сохраняющих надежность работы при сравнительно низкой надежности элементов системы, разбросе значений их параметров или даже выходе из строя некоторого количества элементов.

Современные вычислительные системы теряют свою работоспособность почти из-за любой неисправности. Значительное повышение сложности систем, может привести к тому, что неисправности станут более вероятными, а чрезмерная миниатюризация только затруднит ремонт или сделает его вообще невозможным. В обоих случаях издержки, связанные с исправлением неисправностей, возрастают. Естественно, что проектировщика интересует вопрос о том, когда издержки, связанные с неисправностями, делают проектируемую систему нецелесообразной.

Как известно, наиболее надежными являются биологические системы.

Надежность этих систем представляет собой результат длительного эволюционного процесса в условиях изменчивой внешней среды.

Наблюдая в природе разнообразные высокоорганизованные системы, их приспособляемость к изменяющейся среде, развитие и самовоспроизведение, мы приходим к мысли, что в основе их лежит единый механизм, обусловливающий способность этих систем не растрачивать свою упорядоченность, т. е. обеспечивать выполнение функций системы. Такие системы — самоорганизующиеся. Подобными системами являются и кибернетические.

Кибернетическая система характеризуется следующими особенностями:

1) она чрезвычайно сложна — до такой степени, что структура ее в деталях не поддается определению;

2) она чрезвычайно вероятностна — до такой степени, что, будучи сложной по строению, становится неделимой и каждая траектория ее движения равновероятна;

3) она обладает самоорганизацией — коренным свойством, проявляющимся в ней изнутри.

По Павлову, функция управления наряду с наиболее сложными формами аналитико-синтетической переработки всей получаемой организмом информации есть высшее проявление рефлекторной деятельности (высшей нервной деятельности).

Совершенные принципы самоорганизации механизмов переработки информации сформировались в природе в результате многих миллионов лет конкурентной борьбы и естественного отбора, в ходе длительного процесса эволюции.

Конструкция мозга как органа рефлекторного отражения окружающей среды и организатора поведения все больше и больше привлекает к себе внимание исследователей. Дальнейший прогресс наших знаний в этой области, несомненно, связан с систематическим накоплением фактического материала, с установлением подробностей строения мозгового вещества и взаимосвязей между отдельными его элементами.

Головной мозг и нервная деятельность животных и человека могут служить примером блестящего решения надежности в живой природе. Несмотря на то, что многие стороны функционирования и структурной организации нервной системы еще не исследованы, хорошо известна удивительная эффективность ее работы. По мнению некоторых специалистов, при самых благоприятных условиях существования организма, каждый час безвозвратно погибает около тысячи нейронов [1]. Подавляющее большинство ученых считает, что нейроны — единственный вид клеток, которые совершенно не размножаются делением. Однако, несмотря на это, мозг обеспечивает жизнедеятельность организма в течение многих десятков лет, а в ряде случаев даже восстанавливает нарушенные функции. В ходе эволюции животного мира нервная система развивалась как орган, обеспечивающий наиболее совершенную форму приспособления к условиям окружающей среды посредством сигнальной деятельности.

В отличие от растений, реагирующих изменениями своей жизнедеятельности лишь на непосредственное внешнее воздействие, животное способно реагировать на сигналы от раздражителей, т. е. воспринимать и перерабатывать в ответные действия содержащуюся в этих сигналах информацию.

Материальным субстратом сигнальной деятельности являются следующие три основных элемента, соединенные между собой в определенном порядке по ходу рефлекторной дуги:

1) рецепторы — клетки органов чувств, воспринимающие раздражения и трансформирующие их в ответные реакции в виде нервных импульсов;

2) нейроны — нервные клетки с их отростками, осуществляющие разнообразные переключения нервных импульсов на пути их передачи от начального звена рефлекторной дуги к конечному ее звену;

3) эффекторы — клетки мышц и желез — элементы, посредством которых реализуются рефлекторные ответы организма на раздражения.

Основные единицы построения нервной системы — нейроны — возникают и развиваются как специальный аппарат связи между рецепторами и эффекторами. Именно нейроны ответственны за определение сигнального значения раздражителя и за выработку биологически целесообразных приспособительных реакций.

Вся центральная нервная система человека содержит около 10^{10} нейронов, причем половина этого количества приходится на головной мозг. В процессе эволюции происходила все большая дифференциация нервных клеток. В результате у живых организмов выделилось определенное количество нейронов, которые специально информируют орга-

низм обо всех изменениях, происходящих во внешней среде. Дифференцирование типов нейронов, усложнение аппарата рецепции сигналов — таков переход от элементарно-чувствительного отражения качеств и интенсивностей раздражителей к отражению образов вещей и явлений, т. е. к воспроизведению более сложных мозговых моделей. В основе строения нервной системы лежит один общий принцип, имеющий универсальное значение. В соответствии с ним любой нейрон как элементарная единица переключательного устройства является точкой схождения и расхождения переключаемых в ней импульсов, т. е. представляет собой прибор, осуществляющий на клеточном нервном уровне определенную форму анализа, синтеза и отбора проходящего сквозь него сигнала.

Всякая открытая кибернетическая система в процессе нормального функционирования получает информацию из внешней среды и преобразует ее по тому или иному алгоритму. Существует ряд методов анализа кибернетических систем, каждый из которых преследует вполне конкретную цель.

Наиболее общим из методов является структурный анализ, который позволяет дать самую обобщенную характеристику системы — определить ее структуру. Структура представляет собой некоторое множество элементов, упорядоченное вполне определенным образом. Элементы ее — это единичные неделимые компоненты системы. Независимо от степени сложности структуры (среда, иерархия, система или одиночный объект) каждый входящий в нее элемент может быть проанализирован, хотя и под другим углом зрения, относительно другого вида отображения. При структурном анализе технических систем в качестве элементов принимаются те или иные единичные функциональные узлы. Биологические системы, в частности центральная нервная система, функционально и структурно организованы значительно сложнее любой из созданных человеком систем. Многое в работе нервной системы животного и человека остается неизвестным. Но многочисленные и достоверные факты нейрофизиологии, морфологии и других наук, изучающих нервную систему человека, дают все основания считать, что в основе структурной организации нервных систем лежит вполне определенная упорядоченность единичных нервных клеток (нейронов).

Знание структуры и функций центральной нервной системы может существенно помочь при синтезе технических кибернетических систем. Однако до тех пор, пока не известны принципы работы элементов нервной системы, невозможно проанализировать структуру нервной системы. Наоборот, зная вполне определенно, какова структура биологического нейрона и структура функциональных связей нейронов в нервной системе, можно сделать вывод о целесообразности использования нейроноподобных элементов для синтеза тех или иных кибернетических устройств.

Решение этой проблемы связано с развитием бионики, использующей знание элементов и систем живой природы для решения инженерных задач. От анализа биологических систем через математическую формализацию к синтезу новых, значительно более совершенных, технических систем переработки информации — таковы принципы бионики.

Сейчас намечаются три направления развития в бионике:

1) биологическая бионика, изучающая физические процессы в биологических системах;

2) теоретическая бионика, изучающая построение математических моделей биологических систем;

3) техническая бионика, применяющая сведения, полученные пер-

выми двумя направлениями, для решения конкретных технических задач.

Важнейшими задачами технической бионики являются анализ, формализация и синтез биологических принципов надежности, открывающих новые возможности построения сложных кибернетических систем. Теория формальных нейронов (сетей) является развитой отраслью бионики, имеющей самостоятельное значение. Понятно, что первым этапом на пути построения такой теории явилось изучение одиночных элементов — нейронов (сначала биологических, затем формальных).

Все процессы управления и регулирования, происходящие в живом организме, связаны с функционированием взаимодействующих нейронов нервной системы. Именно в этом смысле нейрон является элементом сложно организованной динамической нервной системы. В зависимости от функционирования специальных механизмов нейрон получает через нервные окончания возбуждающие и тормозящие воздействия. Некоторые авторы [2] отмечают также наличие еще одного типа волокон, которые оканчиваются не на соме, а на возбуждающем пресинаптическом волокне, образуя аксо-аксомальные синапсы.

В активированном состоянии эти волокна предотвращают прохождение возбуждения по пресинаптическому волокну, на котором они оканчиваются.

Установлено, что в нейроне происходит как временное, так и пространственное суммирование синаптических сигналов. Под временным суммированием понимается следующее: поступающие на вход нейрона отдельные синаптические раздражители имеют подпороговую величину и каждый из них в отдельности не может возбудить нейрон. Если же эти подпороговые раздражители следуют один за другим через достаточно короткие промежутки времени, то происходит их временное суммирование, и нейрон возбуждается. Роль предыдущих раздражителей в суммарном эффекте возбуждения нейрона тем меньше, чем больше времени прошло после их появления. Это затухание следов действия предыдущих раздражителей происходит приблизительно по экспоненциальному закону.

Пространственное суммирование заключается в том, что подпороговые раздражители поступают на ту или иную пространственно разнесенную группу синапсов нейрона одновременно, и в зависимости от суммарного эффекта синаптических воздействий может произойти возбуждение нейрона. В том случае, когда в результате временного и пространственного суммирования подпороговых раздражителей суммарный сигнал превосходит пороговую величину, нейрон возбуждается и генерирует стандартный по форме нервный импульс, который распространяется вдоль аксона с конечной скоростью (без затухания). Это и соответствует возбуждению нервной клетки.

Наибольшая частота выходных импульсов в одиночном волокне не может превышать 100—1000 *гц* и зависит от типа нервной клетки.

Для данной нервной сети основные параметры одиночного нейроимпульса: амплитуда, длительность, крутизна фронтов — остаются постоянными, где бы этот импульс не действовал.

Единственной мерой степени возбуждения нейрона является количество импульсов возбуждения в серии и временные интервалы между ними. Можно предположить, что для передачи информации в нервной системе используется принцип частотно-импульсной модуляции.

Нейрон функционирует согласно закону «все или ничего», т. е. он может находиться в одном и только одном из двух состояний: а) возбужденное состояние; б) состояние покоя.

Таковы далеко не полные свойства биологического нейрона, являющегося элементарной частицей всей нервной системы.

За последнее время в литературе появилось большое количество статей, посвященных различным вопросам моделирования нейронов. Основной задачей такого моделирования является экспериментальное исследование оригиналов — биологических нервных клеток, каждая из которых представляет собой элемент нервной системы (биологический аспект моделирования нейронов).

Одно из преимуществ модели состоит в том, что она допускает исследование объекта в критических условиях, разрушение его и последующее восстановление. В конечном итоге моделирование биологических нейронов позволяет глубже познать различные стороны функционирования как отдельного нейрона, так и нейронных сетей различной сложности. Кроме биологического, существует математический аспект моделирования. На основе его ученые пытаются создать устройство, законы функционирования которого воспроизводили бы основные функциональные соотношения биологического нейрона. Так, первая известная модель формального нейрона была предложена У. С. Мак Каллоком и У. Питсом в 1943 г. [3]. Основная идея их работы, заключается в том, что любые информационные явления в нервных сетях можно представить и анализировать средствами математической логики. Эти авторы ввели следующие допущения:

1. Нейрон представляет собой многополюсник, имеющий n входов и один выход.

2. Входы нейрона (синапсы) по своему воздействию делятся на возбуждающие и тормозящие.

3. Активность нейрона удовлетворяет принципу «все или ничего».

4. Сигналы могут проходить через нейрон только в одном направлении.

5. С течением времени структура сети, в частности порог, не изменяется.

6. Единственным имеющим значение запаздыванием в нервной системе является синаптическая задержка между возбуждением входа и возбуждением выхода нейрона.

7. Синаптическая задержка — величина постоянная.

Приведенные представления несколько упрощены по сравнению с нейрофизиологическими данными, однако, по мнению авторов [7], согласуются с этими данными.

На основе модели, известной в литературе как «линейный пороговый элемент» было разработано значительное количество алгоритмов анализа и синтеза как отдельных элементов, так и сетей на них.

Отметим один весьма примечательный факт: порог в модели Мак Каллока и Питтса 1943 г. принимается постоянным, следовательно предполагаются измененными функции, вычисляемые нейроном. Такое допущение соответствует идеальной надежности нейрона, что далеко от истины как для живых систем, так и для технических элементов.

Поэтому Мак Каллок переходит от модели 1943 г. к модели нейрона 1958 г. [4], учитывающей новейшие достижения нейрофизиологии. Теоретической основой такого перехода были идеи Дж. Неймана. Исходя из своего принципиально нового подхода к роли ошибки в синтезе автоматов, Нейман [5, 6] пришел к необходимости постановки трех задач: 1) синтеза сетей, дающих один и тот же выход при одновременном сдвиге порогов у нейронов, так что каждый элемент начинает вычислять некоторую новую функцию от входа (логически стабильные сети); 2) синтез сетей, более надежных, чем составляющие их элементы (логи-

чески надежные сети); 3) синтез нейронов, обеспечивающих при вычислении более высокую гибкость, чем любые до того используемые в системах элементы.

В новой модели Мак Каллока введены следующие допущения: 1) имеется запрещающее волокно (запрещает возбуждающее или тормозящее волокно); 2) порог нейрона может изменяться в некоторых определенных пределах.

Таким образом, если в первой модели одним из допущений теории являлось отсутствие ошибок в функционировании элемента (стабильный порог), то во второй модели ошибка считалась уже органическим свойством нейрона. Понятно, что второе допущение существенно увеличивает адекватность реального нейрона и технической модели.

В настоящее время И. Б. Гутчиным, А. С. Кузичевым [8] предложена обобщенная модель формального нейрона, суть которой сводится к следующему: наличие запрещающего волокна типа «запрет запрета»; возможность как разъединения, так и объединения волокон нейронов.

Авторы предположили наличие у формального нейрона запрещающих волокон типа «запрет запрета» произвольной глубины. Такое предположение может быть использовано при синтезе формальных нейронов [9]. По математическим моделям был построен ряд электронных моделей. Наиболее известные из них модель С. Клини [10], Д. Т. Калбертсона [11], Дж. Неймана [12], В. И. Варшавского [13].

Подводя итоги, можно с уверенностью сказать, что теория формальных нейронов как математический аппарат создания высоконадежных кибернетических систем займет достойное место среди наук, занимающихся вопросами надежности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Gilmore Ken. Bionic Computers. Electronic World, v. 69, N 3, 1963.
2. E. M. Gray. J. Anat., v. 97, N 1, 1963.
3. У. С. Мак-Каллок, У. Питтс. Логическое исчисление идей, относящихся к нервной деятельности. Сб. «Автоматы», Изд-во иностр. лит., 1956.
4. W. S. Mc Culloch. Agathe Tyche of nervous nets—the lucky reckoners. Mechanisation of Thought Process. Nat. Phys. Lab. Simposium, N 10, HMSO, London. 1959.
5. Дж. Нейман. Общая и логическая теория автоматов. В кн. А. Тьюринг, «Может ли машина мыслить?», Физматгиз, 1960.
6. Дж. Нейман. Вероятностная логика и синтез надежных автоматов из надежных компонент. Сб. «Автоматы», Изд-во иностр. лит., 1959.
7. С. И. Брайнес, А. В. Напалков, В. Б. Свечинский. Нейрокибернетика, Медгиз, 1962.
8. И. Б. Гутчин, А. С. Кузичев. Бионика и надежность изд-во «Наука», 1967.
9. В. П. Белявский и др. Анализ поведения формального нейрона (статья в настоящем сборнике).
10. С. К. Клини. Представление событий в нервных сетях и клеточных автоматах. Сб. «Автоматы», Изд-во иностр. лит. 1956.
11. Д. Т. Калбертсон. Некоторые неэкономические работы. Сб. «Автоматы», Изд-во иностр. лит., 1956.
12. Дж. Нейман. Некоторые универсальные элементы на конечных автоматах. Сб. «Автоматы», Изд-во иностр. лит., 1956.
13. В. И. Варшавский. Некоторые вопросы теории логических сетей, построенных из пороговых элементов. Сб. «Вопросы теории математических машин», вып. 2, Физматгиз, 1962.