

---

# НАУЧНЫЕ СООБЩЕНИЯ И ПУБЛИКАЦИИ

---

## Основные черты кибернетики\*

Академик С. Л. СОБОЛЕВ, А. И. КИТОВ, А. А. ЛЯПУНОВ

### 1. Общенаучное значение кибернетики

Кибернетикой называется новое научное направление, возникшее в последние годы и представляющее собой совокупность теорий, гипотез и точек зрения, относящихся к общим вопросам управления и связи в автоматических машинах и живых организмах.

Это направление в науке усиленно развивается и еще не представляет собой достаточно стройной и цельной научной дисциплины. В настоящее время в кибернетике определились три основных раздела, каждый из которых имеет большое самостоятельное значение:

1. Теория информации, в основном статистическая теория обработки и передачи сообщений.

2. Теория автоматических быстродействующих электронных счетных машин как теория самоорганизующихся логических процессов, подобных процессам человеческого мышления.

3. Теория систем автоматического управления, главным образом теория обратной связи, включающая в себя изучение с функциональной точки зрения процессов работы нервной системы, органов чувств и других органов живых организмов.

### Математический аппарат кибернетики

\* При составлении данной статьи были приняты во внимание обсуждения докладов о кибернетике, прочитанных авторами в Энергетическом институте АН СССР, в семинаре по машинной математике механико-математического факультета и на биологическом факультете Московского университета, в математическом Институте имени Стеклова, в Институте точной механики и вычислительной техники АН СССР, а также замечания проф. С. А. Яновской, проф. А. А. Фельдбаума, С. А. Яблонского, М. М. Бахметьева, И. А. Полетаева, М. Г. Гаазе-Рапопорта, Л. В. Крушинского, О. Б. Лупанова и других. Пользуемся случаем выразить признательность всем принимавшим участие в обсуждении.

весьма широк: сюда относятся, например, теория вероятностей, в частности теория случайных процессов, функциональный анализ, теория функций, математическая логика.

Значительное место в кибернетике занимает учение об информации. Информацией называются сведения о результатах каких-либо событий, которые заранее не были известны. Существенно при этом то, что фактически поступившие данные являются всегда одним из определенного числа возможных вариантов сообщений.

Понятию информации кибернетика придает очень широкий смысл, включая в него как всевозможные внешние данные, которые могут восприниматься или передаваться какой-либо определенной системой, так и данные, которые могут вырабатываться внутри системы. В последнем случае система будет служить источником сообщений.

Информацией могут являться, например, воздействия внешней среды на организм животного и человека; знания и сведения, получаемые человеком в процессе обучения; сообщения, предназначенные для передачи с помощью какой-либо линии связи; исходные промежуточные и окончательные данные в вычислительных машинах и т. п.

Новая точка зрения возникла недавно на основании изучения процессов в автоматических устройствах. И это не случайно. Автоматические устройства достаточно просты для того, чтобы не затемнять сути процессов обилием деталей, и, с другой стороны, сам характер функций, выполняемых ими, требует нового подхода. Энергетическая характеристика их работы, конечно, важна сама по себе, совершенно не касается сути выполняемых ими функций. Для того же, чтобы понять сущность их работы, нужно прежде всего исходить из понятия информации (сведений) о движении объектов.

Подобно тому, как введение понятия

энергии позволило рассматривать все явления природы с единой точки зрения и отбросило целый ряд ложных теорий (теория флогистона, вечных двигателей и др.), так и введение понятия информации, единой меры количества информации позволяет подойти с единой общей точки зрения к изучению самых различных процессов взаимодействия тел в природе.

Рассматривая информацию, передаваемую воздействием, необходимо подчеркнуть, что ее характер зависит как от воздействия, так и от воспринимающего это воздействие тела. Воздействие от источника к воспринимающему воздействию телу в общем происходит не непосредственно, но через целый ряд опосредствующих эту связь частных воздействий. (Информация при этом каждый раз перерабатывается.) Совокупность средств, позволяющих воздействию достигнуть воспринимающего тела, называется каналом передачи информации, или, короче, каналом связи.

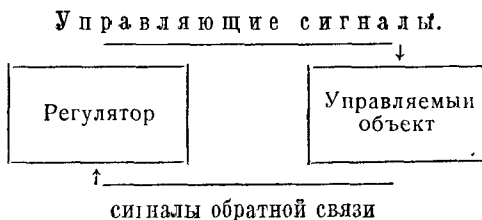
Общим для всех видов информации является то, что сведения или сообщения всегда задаются в виде какой-либо временной последовательности, то есть в виде функции времени.

Количество переданной информации и тем более эффект воздействия информации на получателя не определяется количеством энергии, затраченной на передачу информации. Например, при помощи телефонного разговора можно остановить завод, вызвать пожарную команду, поздравить с праздником. Нервные импульсы, идущие от органов чувств к головному мозгу, могут нести с собой ощущения тепла или холода, удовольствия или опасности.

Сущность принципа управления заключается в том, что движение и действие больших масс или передача и преобразование больших количеств энергии направляются, контролируются при помощи небольших масс и небольших количеств энергии, несущих информацию. Этот принцип управления лежит в основе организации и действия любых управляемых систем: автоматических машин или живых организмов. Поэтому теория информации, изучающая законы передачи и преобразования информации (сигналов), является основой кибернетики, изучающей общие принципы управления и связей в автоматических машинах и живых организмах.

Любая автоматически управляемая система состоит из двух основных частей: управляемого объекта и системы управления (регулятора) — и характеризуется наличием замкнутой цепи передачи информации (рис. 1).

От регулятора к объекту информация передается в виде сигналов управления; в управляемом объекте под воздействием



управляющих сигналов осуществляется преобразование больших количеств энергии (сравнительно с энергией сигналов) в работу. Цепь передачи информации замыкается сигналами обратной связи, представляющими собой информацию о действительном состоянии управляемого объекта, поступающую от объекта в регулятор. Назначение любого регулятора заключается в преобразовании информации, характеризующей действительное состояние объекта, в информацию управления, то есть информацию, которая должна определять будущее поведение объекта. Таким образом, регулятор представляет собой устройство преобразования информации. Законы преобразования информации определяются принципами действия и конструкцией регулятора.

В простейшем случае регулятор может быть просто линейным преобразователем, в котором сигнал обратной связи, показывающий отклонение регулируемого объекта от требуемого положения, — сигнал ошибки — линейно преобразуется в управляющий сигнал. Сложнейший пример системы управления представляют нервные системы животных и человека. Решающее значение и для этих систем имеет принцип обратной связи. При выполнении какого-либо действия управляющие сигналы в виде нервных импульсов передаются от головного мозга к исполнительным органам и вызывают в конечном счете мышечное движение. Линию обратной связи представляют сигналы от органов чувств, а также кинестетические мышечные сигналы положений, передаваемые в головной мозг и характеризующие фактическое положение исполнительных органов.

Установлено (см. П. Гуляев «Что такое биофизика». Журнал «Наука и жизнь» № 1 за 1955 год), что процессы, происходящие в замкнутых цепях обратной связи живых организмов, поддаются математическому описанию и по своим характеристикам приближаются к процессам, происходящим в сложных нелинейных системах автоматического регулирования механических устройств.

Помимо многочисленных и сложных замкнутых цепей обратной связи, предназначенных для движения и действия организмов во внешнем мире, в любом живом организме имеется большое количество

сложных и разнообразных внутренних цепей обратной связи, предназначенных для поддержания нормальных условий жизнедеятельности организмов (регулирование температуры, химического состава, кровяного давления и т. д.). Эта система внутреннего регулирования в живых организмах называется гомеостатом.

Основной характеристикой любого регулятора как устройства переработки информации является закон преобразования информации, реализуемый регулятором.

Эти законы в различных регуляторах могут значительно отличаться друг от друга: от линейного преобразования в простейших механических системах до сложнейших законов мышления человека.

Одной из главных задач кибернетики является изучение принципов построения и действия различных регуляторов и создание общей теории управления, то есть общей теории преобразования информации в регуляторах. Математической основой для создания такой теории преобразования информации служит математическая логика — наука, изучающая методами математики связи между посылками и следствиями. По существу математическая логика дает теоретическое обоснование и методов преобразования информации, что обуславливает тесную связь математической логики с кибернетикой.

На базе математической логики появились и бурно развиваются в настоящее время многочисленные частные приложения этой науки к различным системам обработки информации: теория релейно-контактных схем, теория синтеза электронных вычислительных и управляющих схем, теория программирования для электронных автоматических счетных машин и др.

Основная задача, которую приходится решать при разработке схемы того или иного устройства обработки информации, заключается в следующем: задан определенный набор возможных входных информации и функция, определяющая зависимость выходной информации от входной, то есть задан объем информации, подлежащей обработке, и закон ее переработки. Требуется построить оптимальную схему, которая обеспечила бы реализацию этой зависимости, то есть переработку заданного количества информации.

Можно представить такой характер решения этой задачи, когда для реализации каждой зависимости, то есть для передачи каждого возможного варианта информации, строится отдельная схема. Это наиболее простой и наименее выгодный путь решения. Задача теории заключается в том, чтобы путем комбинации таких отдельных цепей обеспечить передачу заданного количества информации при помощи мини-

мального количества физических элементов, потребных для построения схем. При этом необходимо добиться надежности и помехоустойчивости работы систем.

Однако при практическом инженерном решении этих задач не представляется возможным реализовать полностью оптимальные варианты. Необходимо учитывать целесообразность построения машин из определенного количества стандартных узлов и деталей, не слишком увеличивая количество различных вариантов схем в погоне за оптимальностью.

Возникает задача компромисса между требованиями оптимального решения и возможностями практического осуществления схем, задача оценки качества схем и узлов, получающихся из имеющихся стандартных деталей, с точки зрения того, в какой мере эти схемы приближаются к оптимальному решению или каким образом использовать имеющиеся стандартные узлы и блоки для того, чтобы как можно ближе подойти к оптимальному варианту.

Аналогичное положение имеет место и при составлении программ для решения математических задач на быстродействующих счетных машинах. Составление программы заключается в определении последовательности операций, выполняемых машиной, которая даст решение задачи. Подробнее этот вопрос будет пояснен ниже.

Требование оптимального программирования с точки зрения минимального времени работы машины практически не выполняется, так как это связано со слишком большой работой по составлению каждой программы. Поэтому удовлетворяются вариантами программ, которые не слишком отходят от оптимальных вариантов, но образуются более или менее стандартными, известными приемами.

Рассмотренные задачи представляют собой частные случаи общей задачи, решаемой статистической теорией информации, — задачи об оптимальном способе передачи и преобразования информации.

Теория информации устанавливает возможность единым способом представлять любую информацию, независимо от ее конкретной физической природы (в том числе и информацию, заданную непрерывными функциями), в виде совокупности отдельных двоичных элементов — так называемых квантов информации, то есть элементов, каждый из которых может иметь только одно из двух возможных значений: «да» или «нет».

Теория информации изучает два основных вопроса: а) вопрос об измерении количества информации; б) вопрос о качестве информации, или ее достоверности. С первым связаны вопросы пропускной способности и емкости различных систем, перс-

рабатывающих информацию; со вторым — вопросы надежности и помехоустойчивости этих систем.

Количество информации, представленное каким-либо источником или переданное за определенное время по какому-либо каналу, измеряется логарифмом общего числа ( $n$ ) различных возможных равновероятных вариантов информации, которые могли быть представлены данным источником или переданы за данное время.

$$I = \log_a n \quad (1)$$

Логарифмическая мера принята, исходя из условий обеспечения пропорциональности между количеством информации, которое может быть передано за какой-либо отрезок времени, и величиной этого отрезка и между количеством информации, которое может быть запасено в какой-либо системе, и количеством физических элементов (например, реле), потребных для построения этой системы. Выбор основания логарифмов определяется выбором единицы измерения количества информации. При основании, равном двум, за единицу количества информации принимается наиболее простое, элементарное сообщение о результате выбора одной из двух равновероятных возможностей «да» или «нет». Для обозначения этой единицы количества информации введено специальное название «бид» (от начальных букв термина «binary digit», что означает двоичная цифра).

Наиболее простым частным случаем определения количества информации является случай, когда отдельные возможные варианты сообщения имеют одинаковую вероятность.

В связи с массовым характером информации вводится в рассмотрение ее статистическая структура. Отдельные варианты возможных данных, например, отдельные сообщения в теории связи, рассматриваются не как заданные функции времени, а как совокупность различных возможных вариантов, определенных вместе с вероятностями их появления.

В общем случае отдельные варианты данных имеют различную вероятность, и количество информации в сообщении зависит от распределения этих вероятностей.

Математическое определение понятия количества информации получается в этом случае следующим образом. В теории вероятностей полной системой событий называют такую группу событий  $A_1, A_2, \dots, A_n$ , в которой при каждом испытании обязательно наступает одно и только одно из этих событий. Например, выпадение 1, 2, 3, 4, 5 или 6 при бросании игральной кости; выпадение герба или надписи при бросании монеты. В последнем случае имеется простая альтернатива, то есть пара противоположных событий.

Конечной схемой называется полная система событий  $A_1, A_2, \dots, A_n$ , заданная вместе с их вероятностями:  $P_1, P_2, \dots, P_n$

$$A = \left( \begin{matrix} A_1 A_2 \dots A_n \\ P_1 P_2 \dots P_n \end{matrix} \right), \quad (2)$$

где:

$$\sum_{k=1}^n P_k = 1 \text{ и } P_k \geq 0$$

Всякой конечной схеме свойственна некоторая неопределенность, то есть известны только вероятности возможных событий, но какое событие произойдет в действительности, является неопределенным.

Теория информации вводит следующую характеристику для оценки степени неопределенности любой конечной схемы событий:

$$H(P_1 P_2 \dots P_n) = - \sum_{k=1}^n P_k \cdot \log P_k, \quad (3)$$

где логарифмы могут браться при произвольном, но всегда одном и том же основании и где при  $P_k = 0$  принимается  $P_k \log P_k = 0$ . Величина  $H$  носит название энтропии данной конечной схемы событий (см. К. Шэннон «Математическая теория связи». Сборник переводов «Передача электрических сигналов при наличии помех». М. 1953; А. Я. Хинчин «Понятие энтропии в теории вероятностей». Журнал «Успехи математических наук». Т. 3. 1953). Она обладает следующими свойствами:

1. Величина  $H(P_1 P_2 \dots P_n)$  непрерывна относительно  $P_k$ .

2. Величина  $H(P_1 P_2 \dots P_n) = 0$  в том и только в том случае, когда из чисел  $P_1 P_2 \dots P_n$  одно какое-либо равно единице, а остальные равны нулю, то есть энтропия равна нулю, когда отсутствует какая-либо неопределенность в конечной схеме.

3. Величина  $H(P_1 P_2 \dots P_n)$  имеет максимальное значение, когда все  $P_k$  равны между собой, то есть когда конечная схема имеет наибольшую неопределенность. В этом случае, как нетрудно видеть,

$$H(P_1 P_2 \dots P_n) = - \sum_{k=1}^n P_k \cdot \log_a P_k = \log_a n \quad (4)$$

Кроме того, энтропия обладает свойством аддитивности, то есть энтропия двух независимых конечных схем равна сумме энтропий этих конечных схем.

Таким образом, видно, что выбранное выражение энтропии достаточно удобно и полно характеризует степень неопределенности той или иной конечной схемы событий.

В теории информации доказывается, что единственной формой, удовлетворяющей трем указанным свойствам, является принятая форма для выражения энтропии

$$H = - \sum_{k=1}^n p_k \log_a p_k$$

Данные о результатах испытания, возможные исходы которого определялись заданной конечной схемой А, представляют собой некоторую информацию, снимающую ту неопределенность, которая была до испытания. Причем, естественно, чем больше была неопределенность конечной схемы, тем большее количество информации мы получаем в результате проведения испытания и снятия этой неопределенности. Так как характеристикой степени неопределенности любой конечной схемы является энтропия этой конечной схемы, то количество информации, даваемое испытанием, целесообразно измерять той же величиной.

Таким образом, в общем случае количество информации какой-либо системы, имеющей различные вероятности возможных исходов, определяется энтропией конечной схемы, характеризующей поведение этой системы.

Так как за единицу количества информации принят наиболее простой и единый вид информации, а именно сообщение о результате выбора между двумя одинаково вероятными вариантами, то и основание логарифмов в выражении для энтропии принимается равным двум.

Как видно из (4), в случае конечной схемы с равновероятными событиями формула (1) получается как частный случай из (3).

Теория информации дает весьма общий метод оценки качества информации, ее надежности. Любая информация рассматривается как результат воздействия двух процессов: закономерного процесса, предназначенного для передачи требуемой информации, и случайного процесса, вызванного действием помехи. Такой подход к оценке качества работы различных систем является общим для ряда наук: радиотехники, теории автоматического регулирования, теории связи, теории математических машин и др.

Теория информации предлагает оценивать качество информации не по отношению уровней полезного сигнала к помехе, а статистическим методом — по вероятности получения правильной информации.

Теория информации изучает зависимость между количеством и качеством информации; исследует методы преобразования информации с целью обеспечения макси-

мальной эффективности работы различных систем переработки информации и выяснения оптимальных принципов построения таких систем.

Большое значение, например, в теории информации имеет положение о том, что количество информации может быть увеличено за счет ухудшения качества, и, наоборот, качество информации может быть улучшено за счет уменьшения количества передаваемой информации.

Помимо широких научных обобщений и выработки нового, единого подхода к исследованию различных процессов взаимодействия тел, теория информации указывает и важные в практическом отношении пути развития техники связи. Чрезвычайно большое значение, например, имеют в настоящее время разработанные на основе теории информации методы приема слабых сигналов при наличии помех, значительно превышающих по своей мощности уровень принимаемых сигналов. Многообещающим является путь, указываемый теорией информации, повышения эффективности и надежности линий связи за счет перехода от приема отдельных, единичных сигналов к приему и анализу совокупностей этих сигналов и даже к приему сразу целых сообщений. Однако этот путь в настоящее время встречает еще серьезные практические трудности, связанные главным образом с необходимостью иметь в аппаратуре связи достаточно емкие и быстродействующие запоминающие устройства.

В учении об информации кибернетика объединяет общие элементы различных областей науки: теории связи, теории фильтров и упреждения, теории следящих систем, теории автоматического регулирования с обратной связью, теории электронных счетных машин, физиологии и др., рассматривая различные объекты этих наук с единой точки зрения как системы обработки и передачи информации.

Несомненно, что создание общей теории автоматически управляемых систем и процессов, выяснение общих закономерностей управления и связи в различных организованных системах, в том числе и в живых организмах, будет иметь первостепенное значение для дальнейшего успешного развития комплекса наук. В постановке вопроса о создании общей теории управления и связи, обобщающей достижения и методы различных частных областей науки, заключается основное значение и ценность нового научного направления — кибернетики.

Объективными причинами, обусловившими возникновение в настоящее время такого направления в науке, как кибернетика, явились большие достижения в развитии целого комплекса теоретических

дисциплин, таких, как теория автоматического регулирования и колебаний, теория электронных счетных машин, теория связи и другие, и высокий уровень развития средств и методов автоматизации, обеспечивший широкие практические возможности создания различных автоматических устройств.

Следует подчеркнуть большое методологическое значение вопроса, поставленного кибернетикой, о необходимости обобщения, объединения в широком плане результатов и достижений различных областей науки, развивающихся в известном смысле изолированно друг от друга, например, таких областей, как физиология и автоматика, теория связи и статистическая механика.

Эта изолированность, разобщенность отдельных областей науки, обусловленная в первую очередь различием в конкретных физических объектах исследования, проявляется в различных методах исследования, в терминологии, чем создаются до некоторой степени искусственные перегородки между отдельными областями науки.

На определенных этапах развития науки взаимное проникновение различных наук, обмен достижениями, опытом и их обобщение являются неизбежными, и это должно способствовать подъему науки на новую, более высокую ступень.

Высказываются мнения о необходимости ограничить рамки новой теории в основной области теории связи на том основании, что широкие обобщения могут привести в настоящее время к вредной путанице. Такой подход не может быть признан правильным. Уже сейчас определен ряд понятий (в чем немалую роль сыграла кибернетика), имеющих общетеоретическое значение. Сюда прежде всего следует отнести принцип обратной связи, играющий основную роль в теории автоматического регулирования и колебаний и имеющий большое значение для физиологии.

Общетеоретическое значение имеет идея рассмотрения статистической природы взаимодействия информации и системы. Например, понятие энтропии в теории вероятностей имеет общетеоретическое значение, а его частные приложения относятся как к области статистической термодинамики, так и к области теории связи, а возможно, и к другим областям. Эти общие закономерности имеют объективный характер, и наука не может их игнорировать.

Новое научное направление еще находится в стадии становления, еще не определены четко даже рамки новой теории; новые данные поступают непрерывным потоком. Ценность новой теории в широком обобщении достижений различных частных

наук, в выработке общих принципов и методов. Задача состоит в том, чтобы обеспечить успешное развитие новой научной дисциплины в нашей стране.

## 2. Электронные счетные машины и нервная система

Наряду с исследованием и физическим моделированием процессов, происходящих в живых существах, кибернетика занимается созданием более совершенных и сложных автоматов, способных выполнять отдельные функции, свойственные человеческому мышлению в его простейших формах.

Следует заметить, что методы моделирования, методы аналогий постоянно применялись в научных исследованиях как в области биологических наук, так и в точных науках и в технике. В настоящее время благодаря развитию науки и техники появилась возможность глубже применить этот метод аналогий, глубже и полнее изучить законы деятельности нервной системы, мозга и других органов человека с помощью сложных электронных машин и приборов и, с другой стороны, использовать принципы и закономерности жизнедеятельности живых организмов для создания более совершенных автоматических устройств.

То, что кибернетика ставит перед собой такие задачи, является, несомненно, положительной стороной этого направления, имеющей большое научное и прикладное значение. Кибернетика отмечает общую аналогию между принципом работы нервной системы и принципом работы автоматической счетной машины, заключающуюся в наличии самоорганизующихся процессов счета и логического мышления.

Основные принципы работы электронных счетных машин заключаются в следующем.

Машина может выполнять несколько определенных элементарных операций: сложение двух чисел, вычитание, умножение, деление, сравнение чисел по величине, сравнение чисел с учетом знаков и некоторые другие. Каждая такая операция выполняется машиной под воздействием одной определенной команды, определяющей, какую операцию и над какими числами должна выполнить машина и куда должен быть помещен результат операции.

Последовательность таких команд составляет программу работы машины. Программа должна быть составлена человеком-математиком заранее и задана в машину перед решением задачи, после чего все решение задачи выполняется машиной автоматически, без участия человека. Для введения в машину каждая команда про-

граммы кодируется в виде условного числа, которое машиной в процессе решения задачи соответствующим образом расшифровывается, и необходимая команда выполняется.

Автоматическая счетная машина обладает способностью хранить — запоминать большое количество чисел (сотни тысяч чисел), выдавать автоматически в процессе решения необходимые для операции числа и снова записывать полученные результаты операций. Условные числа, обозначающие программу, хранятся в машине в тех же запоминающих устройствах, что и обычные числа.

Очень важными с точки зрения принципа работы электронных счетных машин являются следующие две особенности:

1. Машина обладает способностью автоматически изменять ход вычислительного процесса в зависимости от получающихся текущих результатов вычислений. Обычно команды программы выполняются машиной в том порядке, как они записаны в программе. Однако часто и при ручных вычислениях необходимо изменять ход расчета (например, вид расчетной формулы, значение какой-нибудь константы и т. д.) в зависимости от того, какие результаты получаются в процессе вычислений. Это обеспечивается в машине введением специальных операций перехода, позволяющих выбирать различные пути дальнейших вычислений в зависимости от предыдущих результатов.

2. Так как программа работы машины, представленная в виде последовательности условных чисел, хранится в том же запоминающем устройстве машины, что и обычные числа, то машина может производить операции не только над обычными числами, представляющими величины, участвующие в решении задачи, но и над условными числами, представляющими команды программы. Это свойство машины служит для обеспечения возможности преобразования и многократного повторения всей программы или ее отдельных участков в процессе вычислений, что обеспечивает значительное уменьшение объема первоначально вводимой в машину программы и резко сокращает трудоемкость процесса составления программы.

Отмеченные две принципиальные особенности электронных счетных машин являются основными для осуществления полностью автоматического вычислительного процесса. Они позволяют машине оценивать по определенным критериям получающиеся в процессе вычислений результаты и самой вырабатывать себе программу дальнейшей работы, основываясь только на некоторых общих исходных принципах, заложенных в первоначально введенной в машину программе.

Эти особенности представляют собой основное и наиболее замечательное свойство современных электронных счетных машин, которое обеспечивает широкие возможности использования машин и для решения логических задач, моделирования логических схем и процессов, моделирования различных вероятностных процессов и других применений. Эти возможности сейчас еще далеко не все выяснены.

Таким образом, основным в принципе действий счетной машины является наличие всегда некоторого самоорганизующегося процесса, который определяется, с одной стороны, характером введенных исходных данных и исходными принципами первоначально введенной программы и, с другой стороны, логическими свойствами самой конструкции машины.

Теория таких самоорганизующихся процессов, в частности, процессов, подчиненных законам формальной логики, и составляет прежде всего ту часть теории электронных счетных машин, которой занимается кибернетика.

В этом отношении кибернетикой и проводится аналогия между работой счетной машины и работой человеческого мозга при решении логических задач.

Кибернетика отмечает не только аналогию между принципом работы нервной системы и принципом работы счетной машины, заключающуюся в наличии самоорганизующихся процессов счета и логического мышления, но и аналогию в самом механизме работы машины и нервной системы.

Весь процесс работы счетной машины при решении любой математической или логической задачи состоит из огромного числа последовательных двоичных выборов, причем возможности последующих выборов определяются результатами предыдущих выборов. Таким образом, работа счетной машины заключается в реализации длинной и непрерывной логической цепи, каждое звено которой может иметь только два значения: «да» или «нет».

Конкретные условия, имеющие место каждый раз в момент выполнения отдельного звена, обеспечивают всегда вполне определенный и однозначный выбор одного из двух состояний. Этот выбор определяется исходными данными задачи, программой решения и логическими принципами, заложенными в конструкцию машины.

Особенно наглядно такой характер работы вычислительных машин виден на примере машин, работающих по двоичной системе счисления.

В двоичной системе счисления в отличие от общепринятой десятичной системы счисления основанием системы является не число 10, а число 2. В двоичной си-

стеме счисления участвуют только две цифры — 0 и 1, и любое число представляется в виде суммы степеней двойки. Например,  $25 = 1 \cdot 2^4 + 1 \cdot 2^3 + 0 \cdot 2^2 + 0 \cdot 2^1 + 1 \cdot 2^0 = 11001$ .

Все действия в двоичной арифметике сводятся к ряду двоичных выборов.

Нетрудно видеть, что любые операции с числами, написанными по двоичной системе, представляют собою операции по нахождению отдельных цифр результата, то есть по нахождению величин, принимающих лишь два значения 1 или 0, в зависимости от значений всех цифр каждого из исходных данных.

Следовательно, получение результата сводится к вычислению нескольких функций, принимающих два значения, от аргументов, принимающих два значения. Можно доказать, что любая такая функция представляется в виде некоторого многочлена от своих аргументов, то есть выражения, состоящего из комбинаций этих аргументов, соединенных посредством сложения и умножения. Умножение таких чисел очевидно; что касается сложения, то его надо понимать условно, принимая  $1 + 1 = 0$ , то есть считая двойку эквивалентной нулю.

Вместо сложения арифметического можно ввести другое, «логическое» сложение, в котором  $1 + 1 = 1$ , и опять лишь комбинацией двух операций мы получим любую так называемую логическую функцию от многих переменных.

Это позволяет легко построить любую схему логической машины при помощи комбинаций двух простейших схем, осуществляющих порознь одна — сложение, а другая — умножение.

Логическая машина, таким образом, состоит из элементов, принимающих два положения.

Другими словами, устройство машины представляет собой совокупность реле с двумя состояниями: «включено» и «выключено». На каждой стадии вычислений каждое реле принимает определенное положение, продиктованное положениями группы или всех реле на предыдущей стадии операции.

Эти стадии операции могут быть определенно «синхронизированы» от центрального синхронизатора, или действие каждого реле может задерживаться до тех пор, пока все реле, которые должны были действовать ранее в этом процессе, не пройдут через все требуемые такты. Физически реле могут быть различными: механическими, электромеханическими, электрическими, электронными и др.

Известно, что нервная система животного содержит элементы, которые по своему действию соответствуют работе реле.

Это так называемые нейроны, или нервные клетки. Хотя строение нейронов и их свойства довольно сложны, они в обычном физиологическом состоянии работают в соответствии с принципом «да» или «нет». Нейроны или отдыхают или возбуждены, причем во время возбуждения они проходят ряд стадий, почти независимых от характера и интенсивности возбудителя. Сначала наступает активная фаза, передающаяся с одного конца нейрона на другой с определенной скоростью, затем следует рефракторный период, в течение которого нейрон невосбудим. В конце рефракторного периода нейрон остается неактивным, но уже может быть снова возбужден в активное состояние, то есть нейрон может рассматриваться как реле с двумя состояниями активности.

За исключением нейронов, которые получают возбуждение от свободных концов, или нервных окончаний, каждый нейрон получает возбуждение от других нейронов в точках соединения, называемых синапсами. Число таких точек соединения у различных нейронов бывает различным: от нескольких единиц до многих сотен.

Переход данного нейрона в возбужденное состояние будет зависеть от сочетания входящих импульсов возбуждения от всех его синапсов и от того, в каком состоянии до этого находился данный нейрон. Если нейрон находится не в состоянии возбуждения и не в рефракторном состоянии и число синапсов от соседних нейронов, находящихся в возбужденном состоянии, в течение определенного, очень короткого периода времени совпадения превосходит определенный предел, тогда этот нейрон будет возбужден после известной синаптической задержки. Такая картина возбуждения нейрона является весьма упрощенной.

«Предел» может зависеть не просто от числа синапсов, но и от их «ожидания» и от их геометрического расположения. Кроме того, имеется доказательство того, что существуют синапсы различного характера, так называемые «синапсы запрещения», которые или абсолютно предотвращают возбуждение данного нейрона или поднимают предел его возбуждения обычными синапсами.

Однако ясно, что некоторые определенные комбинации импульсов от соседних нейронов, находящихся в возбужденном состоянии и имеющих синаптические связи с данным нейроном, будут приводить данный нейрон в возбужденное состояние, в то время как другие нейроны не будут влиять на его состояние.

Очень важной функцией нервной системы и вычислительных машин является память.



В вычислительных машинах имеется несколько видов памяти. Оперативная память обеспечивает быстрое запоминание и выдачу данных, необходимых в данный момент для использования в операции. После выполнения данной операции эта память может очищаться и подготавливаться тем самым к следующей операции. Оперативная память в машинах осуществляется с помощью электронных триггерных ячеек, электроннолучевых трубок или электроакустических линий задержки и других электронных или магнитных приборов.

Кроме того, имеется постоянная память для длительного запоминания в машине всех данных, которые потребуются в будущих операциях. Постоянная память осуществляется в машинах с помощью магнитной записи на ленту, барабан или перфокарт, с помощью перфолент, перфокарт, фотографии и других способов.

Заметим, что мозг в отношении функций памяти при нормальных условиях, конечно, не является полной аналогией вычислительной машины. Машина, например, решение каждой новой задачи может производить с полностью очищенной памятью, в то время как мозг всегда сохраняет в большей или меньшей степени предыдущую информацию.

Таким образом, работа нервной системы, процесс мышления, включает в себя огромное число элементарных актов отдельных нервных клеток-нейронов. Каждый элементарный акт реакции нейрона на раздражение, разряд нейрона, подобен элементарному акту работы счетной машины, имеющей возможность в каждом отдельном случае сделать выбор только одного из двух вариантов.

Качественное отличие процесса мышления человека от мышления животных обеспечивается наличием так называемой второй сигнальной системы, то есть системы, обусловленной развитием речи, языка человека. Человек широко использует слова в процессе мышления, воспринимает слова как факторы раздражения; при помощи слов осуществляются процессы анализа и синтеза, процессы абстрактного мышления.

Электронные счетные машины имеют некоторое весьма примитивное подобие языка — это их система команд, условных чисел, система адресов памяти и система различных сигналов, реализующих различные условные и безусловные переходы в программе, реализующих управленческие работы машины. Наличие такого «языка» машины и позволяет реализовать на машине некоторые логические процессы, свойственные человеческому мышлению.

В общем плане кибернетика рассматривает электронные счетные машины как системы обработки информации.

Для исследования эффективности и анализа целесообразных принципов работы, конструктивных форм электронных счетных машин кибернетика предлагает учитывать статистическую природу поступающей в машину и получающейся информации — математических задач, методов решения, исходных данных, результатов решений.

Это положение находит себе аналогию в принципах работы нервной системы и мозга животных и человека, которые осуществляют взаимодействие с внешней средой путем выработки условных рефлексов и процесса обучения, в конечном счете, путем статистического учета внешних воздействий.

Принципы работы электронных счетных машин вполне позволяют реализовать на этих машинах логические процессы, подобные процессу выработки условных рефлексов у животных и человека.

Для машины может быть составлена такая программа, которая будет обеспечивать определенный ответ машины при задании в машину некоторого определенного сигнала, причем в зависимости от того, как часто будет задаваться этот сигнал, машина будет отвечать более или менее надежно. Если сигнал не подается длительное время, то машина может забыть ответ.

Таким образом, вычислительная машина в работе представляет собой больше, чем просто группу взаимосвязанных реле и накопителей. Машина в действии включает в себя и содержимое своих накопителей, которое никогда полностью не стирается в процессе вычислений.

Интересно в этом отношении следующее высказывание Н. Винера: «Механический мозг не секретизирует мысль, как печень желчь, как писали об этом раньше, также он не выделяет ее в форме энергии, как выделяют свою энергию мускулы».

Информация есть информация, не материя и не энергия. Никакой материализм, который не допускает этого, не может существовать в настоящее время». Винер подчеркивает в этом высказывании, что «мыслительные» способности вычислительной машины не являются органическим свойством самой машины как конструкции, а определяются той информацией, в частности, программой, которая вводится в машину человеком.

Следует ясно представлять коренное, качественное отличие процессов мышления человека от работы счетной машины.

В связи с огромным количеством нервных клеток мозг человека включает в

себе такое большое количество различных элементарных связей, условно рефлекторных и безусловно рефлекторных сочетаний, которые порождают неповторимые и самые причудливые формы творчества и абстрактного мышления, неисчерпаемые по своему богатству вариантов, содержанию и глубине. И. П. Павлов писал, что человеческий мозг содержит такое большое количество элементарных связей, что человек в течение всей своей жизни использует едва ли половину этих возможностей.

Однако машина может иметь преимущества перед человеком в узкой специализации своей работы. Эти преимущества в неутомимости, безошибочности, безукоризненно точном следовании заложенным принципам работы, исходным аксиомам логических рассуждений при решении конкретных задач, поставленных человеком. Электронные счетные машины могут моделировать, реализовать лишь отдельные, узко направленные процессы мышления человека.

Таким образом, машины не заменяют и, безусловно, никогда не заменят человеческого мозга, подобно тому, как лопата или экскаватор не заменяют человеческих рук, а автомобили или самолеты не заменяют ног.

Электронные счетные машины представляют собой орудия человеческого мышления, подобно тому, как другие инструменты служат орудиями физического труда человека. Эти орудия расширяют возможности человеческого мозга, освобождают его от наиболее примитивных и однообразных форм мышления, как, например, при выполнении счетной работы, при проведении рассуждений и доказательств формальной логики, наконец, при выполнении различных экономико-статистических работ (например, составление расписаний поездов, планирование перевозок, снабжения, производства и т. п.). И как орудия человеческого труда — мышления — электронные счетные машины имеют безграничные перспективы развития. Все более сложные и новые процессы человеческого мышления будут реализовываться с помощью электронных счетных машин. Но замена мозга машинами, их равнозначность немыслима.

Качественно отличными являются структуры мозга и счетной машины. Мозг при общей строгой организации и специализации работы отдельных участков имеет локально случайное строение. Это значит, что при строгом распределении функций и связей между отдельными участками мозга в каждом отдельном участке могут изменяться как число нейронов, так и их взаимное расположение и связи, в известной мере случайно. В элек-

тронных счетных машинах в настоящее время исключается какая бы то ни была случайность в схемах соединений, составе элементов и их работе.

В связи с этим отличием в организации мозга и машины стоит существенное отличие и в другом — в надежности действия.

Мозг является исключительно надежно действующим органом. Выход из строя отдельных нервных клеток совершенно не сказывается на работоспособности мозга. В машине же выход из строя хотя бы одного элемента из сотни тысяч или нарушение хотя бы одного контакта из сотен тысяч контактов может полностью вывести машину из строя.

Далее, человеческий мозг сам в процессе творчества непрерывно развивается, и именно эта способность к бесконечному саморазвитию является основной отличительной чертой человеческого мозга, которая никогда в полной мере не будет воплощена в машине.

Так же практически недостижима в полной мере для машины и способность человеческого мозга к творчеству: широкой и гибкой классификации и поиску в памяти образов, установлению устойчивых обратных связей, анализу и синтезу понятий.

Человеческий мозг — творец всех самых сложных и совершенных машин, которые при всей сложности и совершенстве являются не более чем орудиями человеческого труда, как физического, так и умственного.

Таким образом, электронные счетные машины могут представить собой только чрезвычайно грубую, упрощенную схему процессов мышления. Эта схема аналогична только отдельным, узко направленным процессам мышления человека в его простейших формах, не содержащих элементов творчества.

Но, несмотря на наличие большой разницы между мозгом и счетной машиной, создание и применение электронных счетных машин для моделирования процессов высшей нервной деятельности должно иметь для физиологии величайшее значение. До настоящего времени физиология могла только наблюдать за работой мозга. Сейчас появилась возможность экспериментировать, создавать модели, пусть самых грубых, самых примитивных процессов мышления и, исследуя работу этих моделей, глубже познавать законы высшей нервной деятельности. Это означает дальнейшее развитие объективного метода изучения высшей нервной деятельности, предложенного И. П. Павловым.

Исследуя принцип работы нервной системы и электронных счетных машин, принципы действия обратной связи в ма-

пшинах и живых организмах, функции памяти в машинах и живых существах, кибернетика по-новому и обобщенно ставит вопрос об общем и различном в живом организме и машине.

Эта постановка проблемы при строгом и глубоком прослеживании может дать далеко идущие результаты в области психопатологии, невропатологии, физиологии нервной системы.

Следует отметить, что в печати уже были опубликованы сообщения о разработке некоторых электронных физиологических моделей. Разработаны, например, модели для изучения работы сердца и его болезней. Разработан электронный счетный прибор, обеспечивающий возможность чтения обычного печатного текста слепым. Этот прибор читает буквы и передает их в виде звуковых сигналов различного тона. Интересно, что после разработки этого прибора было обнаружено, что принципиальная схема прибора до некоторой степени напоминает совокупность связей в том участке коры головного мозга человека, который заведует зрительными восприятиями. Таким образом, методы электронного моделирования начинают практически применяться в физиологии. Задача состоит в том, чтобы, отбросив разговоры о «псевдонаучности» кибернетики, прикрывающие зачастую простое невежество в науке, исследовать пределы допустимости подобного моделирования, выявлять те ограничения в работе электронных счетных установок, которые являются наиболее существенными для правильного представления исследуемых процессов мышления, и ставить задачи конструкторам машин по созданию новых, более совершенных моделей.

### 3. Прикладное значение кибернетики

В настоящее время за границей уделяется большое внимание как теоретическим, так и экспериментальным исследованиям в области кибернетики. Практически разрабатываются и строятся сложные автоматы, выполняющие разнообразные логические функции, в частности, автоматы, способные учитывать сложную внешнюю обстановку и заложить свои действия.

Разработка таких автоматов стала возможной с применением в системах автоматизации электронных счетных машин с программным управлением. Применение электронных счетных машин для целей автоматического управления и регулирования знаменует собой новый этап в развитии автоматизации. До настоящего времени строились автоматы, зачастую весьма сложные, предназначенные для работы в определенных, заранее известных услови-

ях. Эти автоматы обладали постоянными параметрами и работали в соответствии с постоянными правилами и законами регулирования или управления.

Введение электронных счетных машин в системы управления позволяет осуществлять так называемое оптимальное регулирование, или регулирование с предварительной оценкой возможностей. При этом счетная машина в соответствии с поступающими в нее данными, характеризующими текущее состояние системы и внешнюю обстановку, просчитывает возможные варианты будущего поведения системы при различных способах регулирования с учетом будущих изменений внешних условий, полученных экстраполяцией.

Анализируя полученные решения на основе какого-нибудь критерия оптимального регулирования (например, по минимуму времени регулирования), счетная машина выбирает оптимальный вариант, учитывая при этом прошлое поведение системы. При необходимости такая система регулирования может изменять и параметры самой системы управления, обеспечивая оптимальный ход процесса регулирования. Разработка таких автоматов имеет большое экономическое и военное значение.

Особенно большое значение имеет проблема создания автоматических машин, выполняющих различные мыслительные функции человека.

Необходимым условием применения электронных счетных машин для механизации той или иной области умственной работы или для управления каким-либо процессом является математическая постановка задачи, наличие математического описания процесса или определенного логического алгоритма заданной работы. Несомненно, что такие невычислительные применения автоматических счетных машин имеют первостепенное значение и необычайно широкие перспективы развития как средств для расширения познавательных возможностей человеческого мозга, для вооружения человека еще более совершенными орудиями труда, как физического, так и умственного.

В качестве примеров кибернетической техники можно привести: автоматический перевод с одного языка на другой, осуществляемый с помощью электронной счетной машины; составление программ для вычислений на машинах с помощью самих машин; использование электронных счетных машин для проектирования сложных переключательных и управляющих схем, для управления автоматическими заводами, для планирования и управления железнодорожным и воздушным сообщением и т. п.; создание специальных автоматов

для регулирования уличного движения, для чтения слепым и др.

Следует отметить, что разработка вопросов применения электронных счетных машин в автоматике имеет большое экономическое и военное значение. Строя такие автоматы и исследуя их работу, можно изучить законы построения целого класса автоматических устройств, которые могут быть применены в промышленности и в военном деле. Например, в литературе (см. «Tele-Tech», 153, 12, № 8) приводится принципиальная схема полностью автоматизированного завода, который благодаря атомной силовой установке может длительное время работать самостоятельно, а также схема устройства автоматического управления стрельбой с самолета по летящей цели.

\* \* \*

Необходимо отметить, что до последнего времени в нашей популярной литературе имело место неправильное толкование кибернетики, замалчивание работ по кибернетике, игнорирование даже практических достижений в этой области. Кибернетику называли не иначе, как идеалистической лженаукой.

Однако не подлежит сомнению, что идея исследования и моделирования процессов, происходящих в нервной системе человека, с помощью автоматических электронных систем, сама по себе глубоко материалистична, и достижения в этой области могут только способствовать утверждению материалистического мировоззрения на базе новейших достижений современной техники.

Некоторые наши философы допустили серьезную ошибку: не разобравшись в существе вопросов, они стали отрицать значение нового направления в науке в основном из-за того, что вокруг этого направления была поднята за рубежом сенсационная шумиха, из-за того, что некоторые невежественные буржуазные журналисты занялись рекламой и дешевыми спекуляциями вокруг кибернетики, а реакционные деятели сделали все возможное, чтобы использовать новое направление в науке в своих классовых, реакционных интересах. Не исключена возможность, что усиленное реакционное, идеалистическое толкование кибернетики в популярной реакционной литературе было специально организовано с целью дезориентации советских ученых и инженеров, с тем, чтобы затормозить развитие нового важного научного направления в нашей стране.

Необходимо заметить, что автору кибернетики Н. Винеру необоснованно приписывались в нашей печати высказывания

о принципиальной враждебности автоматики человеку, о необходимости заменить рабочих машинами, а также о необходимости распространить положения кибернетики на изучение законов общественного развития и истории человеческого общества.

В действительности Н. Винер в своей книге «Кибернетика» (N. Wiener «Cybernetics». N. Y. 1948) говорит о том, что в условиях капиталистического общества, где все оценивается деньгами и господствует принцип купли-продажи, машины могут принести человеку не благо, а, наоборот, вред.

Далее, Винер пишет, что в условиях хаотичного капиталистического рынка развитие автоматики приведет к новой промышленной революции, которая сделает лишними людей со средними интеллектуальными возможностями и обречет их на вымирание. И здесь же Винер пишет, что выход заключается в создании другого общества, такого общества, где бы человеческая жизнь ценилась сама по себе, а не как объект купли-продажи.

И, наконец, Винер весьма осторожно подходит к вопросу о возможности применения кибернетики к исследованию общественных явлений, утверждая, что, хотя целый ряд общественных явлений и процессов может быть исследован и объяснен с точки зрения теории информации, в человеческом обществе, помимо статистических факторов, действуют еще другие силы, не поддающиеся математическому анализу, и периоды жизни общества, в которые сохраняется относительно постоянство условий, необходимое для применения статистических методов исследования, слишком коротки и редки, чтобы можно было ожидать успеха от применения математических методов к исследованию законов общественного развития в исторические периоды.

Следует заметить, что в книге Н. Винера «Кибернетика» содержится острая критика капиталистического общества, хотя автор и не указывает выхода из противоречий капитализма и не признает социальной революции.

Зарубежные реакционные философы и писатели стремятся использовать кибернетику, как и всякое новое научное направление, в своих классовых интересах. Усиленно рекламируя и зачастую преувеличивая высказывания отдельных ученых-кибернетиков о достижениях и перспективах развития автоматики, реакционные журналисты и писатели выполняют прямой заказ капиталистов внушить рядовым людям мысль об их неполноценности, о возможности замены рядовых работников механическими роботами и тем самым стре-

маться принизить активность трудящихся масс в борьбе против капиталистической эксплуатации.

Нам надлежит решительно разоблачать это проявление враждебной идеологии. Автоматика в социалистическом обществе служит для облегчения и повышения производительности труда человека.

Следует вести борьбу также и против вульгаризации метода аналогий в изучении процессов высшей нервной деятельности, отвергая упрощенную, механистическую трактовку этих вопросов, тщательно исследуя границы применимости электронных и механических моделей и схем для представления процессов мышления.