

Общие проблемы развития науки и техники

ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАЗВИТИЯ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ

И. А. АПОКИН

В числе крупнейших задач научно-технического прогресса и экономического развития СССР в 80-е годы, поставленных XXVI съездом КПСС, видное место занимают разработка и внедрение автоматов. «Поистине революционные возможности,— отмечал Л. И. Брежнев,— открывают создание и внедрение миниатюрных электронных управляющих машин, промышленных роботов. Они должны получить самое широкое применение» [1, с. 44]. Количество электронных автоматов, которое будет создано и применено на практике в 80-е годы, по-видимому, значительно превысит производство автоматов за всю историю человечества. Широкие масштабы распространения автоматов, естественно, повышают внимание к истории, закономерностям и перспективам их развития. В нашу задачу входит выявление общих закономерностей развития автоматов. Общие закономерности могут быть условно разделены на «внутренние» (логика развития автоматов) и «внешние» (социально-экономические условия, определяющие уровень потребностей общества в автоматической технике).

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕРМИНА «АВТОМАТ»

В настоящее время понятие «автомат» употребляется по отношению к широкому кругу технических средств, включая автоматические регуляторы и сложные управляющие системы, станки-автоматы и заводские автоматические линии, промышленные роботы и ЭВМ. Термин «автомат» происходит от греческого *αὐτομάτος*, т. е. «самодействующий», «самодвижущийся», «самопроизвольный». Первое использование понятия «автомат» в научной работе относится к концу III в. до н. э. («Свод механики» Филона Византийского содержал не дошедшую до нас 6-ю книгу «О построении автоматов»). Герон Александрийский (около 120 г. до н. э.) использует термин «автомат» для обозначения движущихся фигур и некоторых других компонентов автоматических театров, сравнительно широко распространенных в эллинистический период. С течением времени содержание понятия «автомат» менялось (с точки зрения отнесения к автоматам тех или иных технических устройств), однако основной смысл оставался неизменным: под автоматом обычно понималось техническое средство, выполняющее свою функцию без непосредственного участия человека.

Более строгие (математические) определения автоматов, предложенные в XX в., связаны с формированием специальных научных дисциплин, посвященных их изучению, в том числе теории автоматического управления и теории автоматов. Предметом исследований теории автоматического управления являются математические модели технических систем, состоящие в принципе из двух компонентов: объекта управления и управляющего устройства. Поскольку реальный автомат обычно является либо управляющим устройством, либо его составной частью (например, микропроцессор в составе управляющей системы), для анализа и синтеза автоматов может использоваться математический аппа-

рат теории автоматического управления. Основное внимание теории сосредоточено на исследовании процессов управления в системах с обратной связью. С других позиций изучение автоматов (а также экономических, биологических и других систем) имеет место в теории автоматов. В рамках этой теории термин «автомат» используется для обозначения математической модели абстрактного или реально существующего устройства, перерабатывающего цифровую информацию дискретными временными тактами. Как в теории автоматического управления, так и в теории автоматов разработан также ряд определений отдельных типов автоматов.

КРИТЕРИИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВНУТРЕННЕЙ ЛОГИКИ РАЗВИТИЯ АВТОМАТОВ

Критерии, характеризующие широкий спектр технических средств, объединяемых понятием «автомат», неизбежно носят достаточно общий характер. Частично они могут быть использованы для изучения развития других технических устройств. Ниже предлагаются и рассматриваются следующие четыре критерия: 1) скорость информационных процессов, т. е. передачи, преобразования и обработки информации; 2) уровень сложности автоматов (с позиций общей теории систем); 3) уровень сложности задач, решаемых автоматом, интерпретируемый как уровень сложности соответствующих решающих алгоритмов; 4) уровень адаптации автомата, т. е. приспособления к окружающей среде в процессе работы.

1. *Скорость информационных процессов.* Функционирование любого автомата может быть описано на уровне информационных процессов, т. е. с позиций передачи, преобразования и обработки информации. Как показывает развитие автоматики, возможности практического применения автоматов во многом определяются их быстродействием, которое в первую очередь зависит от скорости информационных процессов. Последняя в свою очередь зависит от типа используемых элементов (электронных, механических, электромеханических и т. д.), определяющих тот или иной способ представления информации: в виде импульсов тока и уровней напряжения (ЭВМ и другие электронные автоматы), перепадов давления воздуха (пневмоавтоматика), перемещения в пространстве взаимосвязанных механических деталей (часы, арифмометры) и пр. Нетрудно заметить связь между типами используемых элементов (определяющих способ представления информации) и формами движения материи (на основе которых реализуются информационные процессы). Так, в автоматах на механических элементах передача информации реализуется на основе макромеханической формы движения, в электронных автоматах — на базе электромагнитной формы движения и т. д.

Анализ информационных процессов в автоматах приводит к следующей цепочке причинно-следственных связей: форма движения материи (используемая для реализации информационных процессов) — тот или иной тип применяемых элементов (например, электромагнитная форма движения материи реализуется в электронных лампах, полупроводниках, оптико-электронных схемах и т. д.) — скорость информационных процессов (определяемая типом используемых элементов, а также технологией их изготовления) — быстродействие автомата (зависящее также от его структуры, количества элементов и некоторых других характеристик) — возможности применения автоматов для решения тех или иных классов задач.

Качественные изменения скорости информационных процессов в автоматах связаны с переходом от использования макромеханической формы движения материи к электромагнитной. Макропериодизация истории автоматов по этому признаку позволяет выделить три периода:

1) до конца XIX в., когда в управляющих устройствах использовалась макромеханическая форма движения материи; 2) с конца XIX и до середины XX вв., когда широко применялись релейно-контактные схемы, т. е. имело место сочетание макромеханической формы движения с электромагнитной; 3) с середины XX в., когда ведущей становится электромагнитная форма движения.

Переход от одного периода к другому характеризуется резким повышением возможностей автоматов. Так, производительность цифровых вычислительных устройств на контактных реле приблизительно на два порядка величины превышала производительность механических арифмометров, а у первых ЭВМ она была примерно на три порядка величины выше, чем у электромеханических машин. В дальнейшем, в 50—70-е годы производительность ЭВМ выросла еще на три-четыре порядка величины. В каждом из периодов в качестве ведущего или одного из ведущих факторов совершенствования характеристик автоматов выступает технология их изготовления. Приведем только один пример: благодаря совершенствованию технологии электронных схем плотность их компоновки за последние 35 лет возросла приблизительно в миллион раз, что оказало огромное влияние на уровень и масштабы применения электронных автоматов.

2. *Уровень сложности системы.* Переход к использованию электромагнитной формы движения материи создает возможность существенного повышения уровня сложности автоматов, при оценке которой обычно учитывается количество элементов и связей между ними. Увеличение числа элементов, используемых в автоматах, позволяет реализовать более сложные функции. На определенной стадии увеличение числа элементов приводит к глубоким качественным изменениям. Применительно к автоматам этот вопрос впервые был рассмотрен в 1951 г. Дж. фон Нейманом (в связи с его теорией самовоспроизводящихся автоматов) [2]. В 1959 г. Ф. Розенблатт сформулировал тезис о повышении способности к самоорганизации системы типа персептрон по мере увеличения числа ее элементов (вторая теорема Ф. Розенблатта) [3]. В 1965 г. Г. Н. Поваров впервые рассмотрел вопрос о стадиях развития техники в зависимости от уровня сложности технических средств [4]. В настоящее время наиболее сложные автоматы (например, мощные вычислительные системы) содержат порядка 10^6 элементов (логических элементов и триггеров, выполненных на больших интегральных схемах), что по классификации Г. Н. Поварова приблизительно соответствует стадии больших или сложных систем (с количеством элементов 10^4 — 10^7 и недетерминированным, стохастическим порядком взаимодействия между элементами). В сложных механических управляющих устройствах использовалось несколько десятков элементов, а в наиболее сложных электромеханических — порядка тысячи элементов.

3. *Сложность решающего алгоритма.* Поскольку каждый автомат конструируется для решения определенной задачи или задач некоторого класса, анализ развития автоматов может быть проведен на основе изменения сложности решающих алгоритмов. Результаты, полученные в 60-е годы в работах А. А. Маркова, А. Н. Колмогорова и ряда других математиков, позволили найти подходы к определению сложности алгоритма и установить соотношение между различными мерами сложности (число внутренних состояний машины Тьюринга, длина нормального алгорифма Маркова и пр.) [5, 6]. До середины XX в. для автоматов была характерна весьма малая длина управляющего алгоритма. Создание ЭВМ с хранимой программой (1949) коренным образом меняет ситуацию. Во-первых, наличие внутренней памяти и рост ее емкости позволяют записывать все более длинные программы. Во-вторых, что не менее важно, машинные программы имеют сложную структуру (наличие циклов и подпрограмм), что позволяет реализовать существенно

более сложный алгоритм по сравнению с неразветвленной, «одномерной» программой той же длины. В-третьих, благодаря использованию электронных элементов многократно возрастает скорость обработки информации в соответствии с программой, или, иными словами, сложность решающего алгоритма в пересчете на время его реализации. Сложность решающего алгоритма непосредственно связана с используемой формой движения материи и системной сложностью вычислительного устройства автомата.

4. *Уровень адаптации.* С развитием автоматов повышается уровень их приспособления к изменениям характеристик окружающей среды и объектов управления. Можно выделить два макропериода — обычных (неадаптивных) систем автоматического управления (до середины XX в.) и адаптивных систем (со второй половины XX в.).

Первые достаточно сложные автоматы, созданные в античности, могут быть классифицированы как разомкнутые (т. е. без обратной связи) системы управления, причем, как правило, с управлением по задающему воздействию, т. е. только по поступающим командам без какого-либо контроля их исполнения. В работах Герона Александрийского описываются автоматические театры со сложной последовательностью движения фигур (в том числе за счет кулачковых программных устройств), торговые автоматы, мало отличающиеся по конструкции от современных, сложные автоматические игрушки (например, композиция поющих птиц с использованием пневмогидравлического механизма) и др. В античное время было создано также первое устройство, использующее принцип регулирования по возмущению — саморегулирующаяся лампа (около 230 г. до н. э.), в которой выдвижение фитиля осуществлялось по мере выгорания масла, а чувствительным элементом служил поплавковый механизм. В новое время идея регулирования по возмущению была впервые предложена Понселе в 1829 г., а первый работоспособный регулятор с привлечением принципа регулирования по возмущению изобретен В. Н. Чиколевым в 1869 г.

Первым шагом на пути адаптации автоматов явилось применение обратной связи, т. е. создание систем с управлением по отклонению регулируемой величины. Первое сообщение об использовании обратной связи относится к 1588 г. (потрясок водяной мельницы, описанный А. Рамелли). В 1657 г. обратная связь была применена Х. Гюйгенсом в стационарных часах. В 1765 г. И. И. Ползунов изобрел автоматический регулятор уровня воды в котле паровой машины. Начало широкого применения обратной связи в производственной технике связано с распространением паровых машин с центробежным регулятором, изобретенным Д. Уаттом (1784).

Первыми автоматами, которые могут быть отнесены к адаптивным, явились системы экстремального управления. Такие системы автоматически отыскивают и поддерживают режим работы, характеризующийся экстремальным значением целевой функции (КПД, энергозатраты и пр.). Первые исследования в области экстремальных систем были выполнены Г. Штейном и М. Лебланом (1922), Ю. С. Хлебцевичем (1940) и В. В. Казакевичем (1947), их систематическое изучение связано с работами Ч. Дрейпера и В. Ли (1951, 1952), а начало широкого применения относится к 60-м годам. Системы экстремального управления относятся к классу самонастраивающихся систем, т. е. с адаптацией посредством изменения значений параметров управляющего устройства. Существенно более высокий уровень адаптации имеют самообучающиеся системы, характеризующиеся самоусовершенствованием алгоритма работы и критерия качества управления. Самообучающиеся системы являются предметом интенсивных исследований, однако их эффективная реализация и начало широкого применения прогнозируются на конец XX в.

Хотя простейшие варианты адаптивных систем могут быть реализованы без использования ЭВМ, системы с более высоким уровнем адаптации требуют весьма эффективных средств обработки информации. Это обстоятельство определяет тесную связь повышения уровня адаптации с усложнением управляющих устройств и решающих алгоритмов.

ПОТРЕБНОСТИ ОБЩЕСТВА В РАЗВИТИИ АВТОМАТОВ

Рост потребностей общества в автоматах непосредственно связан с общим развитием производительных сил. Могут быть выделены два переломных момента в истории автоматов, связанные с резким возрастанием потребностей общества в автоматической технике.

Первый из них обусловлен формированием машинно-фабричного капиталистического производства в ходе промышленной революции конца XVIII — начала XIX в. Начиная с античности, когда были созданы первые сравнительно сложные автоматы, и до конца XVIII в. автоматы прошли длительный путь технического совершенствования. Как отмечалось, в античный период были изобретены такие элементы автоматики, как кулачковое программное устройство и поплавковый механизм. В средние века изобретается и совершенствуется часовой механизм. Значительное влияние на развитие автоматов оказали эпоха Возрождения и особенно революция в естествознании. В этот период возникает идея механической счетной машины (рисунок Леонардо да Винчи в «Мадридском кодексе»), впервые реализованная в машинах В. Шиккарда (1623) и Б. Паскаля (1642). Первый проект маятниковых часов предлагает Галилей (1641). Изобретения и теоретические исследования Гюйгенса позволяют создать точные маятниковые часы — стационарные (1657) и переносные (1675). На основе часовых механизмов и кулачковых программных устройств в XVIII в. был создан ряд получивших широкую известность антропоморфных автоматов (андроидов). Тем не менее вплоть до промышленной революции автоматы представляют собой скорее экзотическую надстройку техники, чем ее необходимый элемент; они почти не применяются в производственных целях, что полностью объясняется отсутствием экономических потребностей в таком применении.

Положение коренным образом меняется в ходе промышленной революции. Экономические потребности в создании и совершенствовании машин обусловили потребность в устройствах, регулирующих их работу. В числе первых изобретений промышленной революции, оказавших глубокое влияние на последующее развитие автоматики, — центробежный регулятор Уатта и реализация программного управления с помощью перфокарт (ткацкий станок Ж. М. Жаккара, 1799). Начиная с промышленной революции, автоматы становятся необходимым и быстро развивающимся компонентом машинной техники.

Второй переломный момент в развитии автоматов связан с коренным преобразованием производительных сил в ходе НТР, в процессе которой резко возросла потребность в автоматах качественно нового типа — способных выполнять отдельные функции умственного труда (сложные научно-технические расчеты, логическую обработку информации и т. п.). Потребность в реализации функций умственного труда техническими средствами возникла сравнительно давно (в связи с выполнением трудоемких расчетов в астрономии и навигации), но только в ходе НТР в ряде областей человеческой деятельности потребности в быстроедействующим вычислительных и логических автоматах достигают критического уровня, т. е. от решений этой проблемы начинается существенно зависеть научно-технический и экономический прогресс.

В области научно-технических расчетов такая ситуация сложилась в конце 40-х — начале 50-х годов в связи с работами в области атомной

физики и аэродинамики. На рубеже 50-х и 60-х годов обнаружилась необходимость в машинной обработке больших массивов информации в сфере управления экономикой промышленно развитых стран. Это было обусловлено объективной сложностью управления экономикой в социалистических странах (ввиду роста масштабов экономики) и трудностями управления корпорациями в капиталистических странах (в связи с увеличением масштабов производства в рамках крупной фирмы), а также рядом других факторов, таких, как рост номенклатуры изделий, их конструктивной и технологической сложности, ускорение сменяемости выпускаемых изделий и т. д. Приблизительно в то же время возникла настоятельная необходимость обработки больших массивов информации, например в космических исследованиях, которые могли развиваться только в условиях быстрой наземной обработки большого объема телеметрических данных. В 60-е годы возникает необходимость управления аэрокосмическими аппаратами с помощью устройств, выполняющих сложные логические операции и имеющих достаточную емкость памяти. В 60-е годы становится очевидным, что проблема «информационного взрыва» также не может быть решена без автоматизированной обработки информации.

Ведущее техническое средство, с помощью которого в ходе НТР решаются данные проблемы, — цифровая ЭВМ, обычно используемая в рамках некоторой автоматической или автоматизированной (т. е. человеко-машинной) системы. Соответственно прогресс в области ЭВМ становится важным фактором роста потребностей в автоматах. Благодаря микроминиатюризации схем на полупроводниках (созданию больших интегральных схем) в 70-е годы получают развитие микро-ЭВМ, вычислительные возможности которых сопоставимы с машинами среднего класса 50-х и начала 60-х годов, а себестоимость в несколько тысяч раз меньше. В результате в настоящее время наблюдается существенное повышение потребностей в применении микро-ЭВМ в производственном оборудовании и бытовой аппаратуре. Одна из важнейших областей применения — робототехника, развитие которой нацелено на решение актуальной задачи исключения ручного труда в тех областях, которые невозможно автоматизировать с помощью других технических средств (сборка на конвейере, многие виды погрузочно-разгрузочных работ и т. д.).

Расширение масштабов применения автоматов в ходе НТР связано с глубокими социальными последствиями, в том числе с изменением места человека в трудовом процессе, обусловленном переходом от классической трехзвенной структуры машины (двигатель, передаточное звено, рабочая машина) к четырехзвенной (включающей также устройство управления). Социальные последствия автоматизации детально освещены в соответствующей литературе (см., например, [7—9]).

ПРОГРЕСС В ОБЛАСТИ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ В XX В.

На основе потребностей общества в применении автоматов и внутренней логики их технической эволюции представляется возможным достаточно четко определить то новое, что внес XX век в развитие автоматов, а также наметить некоторые важные перспективы. Качественные изменения в развитии автоматов имели место в конце XIX — начале XX в., в середине XX в. и, по-видимому, произойдут в конце XX — начале XXI в. Суть этих изменений в каждом из соответствующих периодов состоит в следующем.

Первая половина XX в. Возникает переход от механических конструкций управляющих устройств автоматов к электромеханическим. На один-два порядка величины возрастает количество элементов. В наиболее сложных электромеханических счетно-решающих устройствах

конца 40-х годов их число достигает нескольких тысяч. Повышается сложность алгоритмов решаемых задач. Однако в большинстве случаев управляющий алгоритм реализуется в самой конструкции автомата, что затрудняет его переналадку на решение другой задачи. В тех же случаях, когда используется программное управление (с помощью кулачковых механизмов, перфокарт, перфолент и пр.), применяются, как правило, неразветвленные программы. Усложняется структура управляющих устройств, в том числе за счет использования нескольких контуров обратной связи и сочетания регулирования по отклонению с регулированием по возмущению. Однако в целом уровень адаптации остается невысоким, и практически все используемые автоматы относятся к классу неадаптивных систем. Расширяется область применения автоматов, которая в начале рассматриваемого периода охватывает в основном теплотехнику и электротехнику, а в конце — сравнительно широкий спектр областей (промышленная автоматика, контрольно-измерительная техника, научное приборостроение и пр.). В конце XIX — начале XX в. формируется наука о регуляторах — теория автоматического регулирования, постепенно перерастающая (по мере обнаружения и анализа общности процессов регулирования в различных областях техники) в теорию автоматического управления.

Вторая половина XX в. В середине XX в. происходят наиболее значительные изменения за всю историю автоматов. Технологической основой изменения является переход от электромеханических к электронным элементам, т. е. к использованию только электромагнитной формы движения материи. Резко возрастает как количество применяемых элементов, так и скорость их работы. В наиболее мощных вычислительных системах число элементов достигает 10^6 . ЭВМ широко используются в качестве устройств управления, причем благодаря наличию команды условного перехода процесс решения задачи не детерминирован (ход вычислений меняется в зависимости от промежуточных результатов), т. е. применяются разветвленные программы. Соответственно имеет место переход от преимущественного применения средств «жесткой» автоматизации к гибкому программному управлению. Благодаря росту емкости памяти ЭВМ и использованию разветвленных программ резко возрастает сложность решающих алгоритмов. Возможность обработки с помощью управляющих ЭВМ больших объемов информации создает объективные условия для построения развитых адаптивных систем. В рассматриваемый период широкое распространение получает относительно простая разновидность поисковых самонастраивающихся систем — системы экстремального управления. Сфера применения автоматов охватывает практически все области человеческой деятельности, однако с преимущественным использованием в производственной технике. Для развития техники в целом огромное значение имеет возможность высокоэффективной механизации умственного труда (в первую очередь логических функций) с помощью автоматов. Революционные изменения претерпевают научные основы автомататики. В середине XX в. формируется кибернетика, включающая в качестве составной части теорию автоматического управления.

Конец XX — начало XXI в. На основе существующих тенденций может быть предсказан следующий ход развития. Весьма вероятен переход от электронных к фотонным элементам, т. е. средствам квантовой электроники (с использованием лазерной техники, световодов, голографической памяти и пр.). Иными словами, весьма вероятен переход от «электрической» разновидности электромагнитной формы движения материи (носители взаимодействия — электроны) к «оптической» (носители взаимодействия — фотоны). Дальнейший рост сложности управляющих устройств и решающих алгоритмов позволит реализовать высшую форму адаптивных систем — самообучающиеся системы, системы с искус-

ственным интеллектом. Можно ожидать, что приблизительно такое же значение для развития техники, какое имело создание ЭВМ в середине XX в., будет иметь создание роботов третьего поколения (роботов с искусственным интеллектом) в конце XX в. Это позволит не только завершить автоматизацию производственной сферы, но и распространить ее на ряд областей непроизводственной сферы народного хозяйства. В области научных основ автоматики значительное развитие получит теория искусственного интеллекта. Однако вопрос, насколько высоким в рассматриваемый период будет уровень адаптации самообучающихся автоматов, уровень искусственного интеллекта, остается открытым и, по-видимому, не может быть решен априорно.

Литература

1. Материалы XXVI съезда КПСС. М.: Политиздат, 1981.
2. Нейман Дж. Общая и логическая теория автоматов.— В кн.: Тьюринг А. Может ли машина мыслить? М.: Физматгиз, 1960.
3. Розенблатт Ф. Принципы нейродинамики. М.: Мир, 1966.
4. Поваров Г. Н. To Daidálu pteró (К познанию научно-технического прогресса).— В кн.: Системные исследования. Ежегодник, 1971. М.: Наука, 1972.
5. Кузьмин В. А. Реализация функций алгебры логики автоматами, нормальными алгоритмами и машинами Тьюринга.— Пробл. кибернетики, 1965, вып. 13.
6. Колмогоров А. Н. Три подхода к определению понятия «количество информации».— Пробл. передачи информации, 1965, т. 1, вып. 1.
7. Данилин Г. Д. Автоматизация и ее социально-экономические последствия при капитализме. М.: Мысль, 1971.
8. Майзель И. А. Наука, автоматизация, общество. Л.: Наука, 1972.
9. Человек — Наука — Техника (Опыт марксистского анализа научно-технической революции). М.: Политиздат, 1973.

THE LAWS OF THE AUTOMATIC TECHNOLOGY DEVELOPMENT

I. A. APOKIN

The main laws of the automata construction are analysed beginning from the automata, created during the period of antiquity. The significance of the main parameters of the automatic is revealed. The author connects the history of the automata with social conditions. The paper characterizes the progress of automata technology in our century and proposes the forecast of the development of automata, which analyse information, to the beginning of the future centuries.