

Глава 16. Предыстория развития вычислительной техники

Вселенная не слишком велика для человека; она не превосходит ни умственные возможности человека, ни возможности человеческого духа.

Жорж Леметр

Моя цель проста: полностью разобраться в устройстве Вселенной и понять, почему она такая и зачем она существует.

Стивен Хокинг

Необходимость производить различные вычисления является неотъемлемой частью развития любой цивилизации, это неразрывно связано с практической деятельностью человека. Сначала для производства вычислений человечество использовало различные достаточно простые приспособления. Некоторые из них, например, деревянные счёты, изобретённые около 1500 лет назад (потомки ещё более древнего абака), использовались ещё в 60-х годах прошлого века.

В эпоху промышленных революций появилась потребность производить большие объёмы вычислений. Неудивительно, что идея как-то автоматизировать процесс вычислений занимала многих видных учёных того времени.

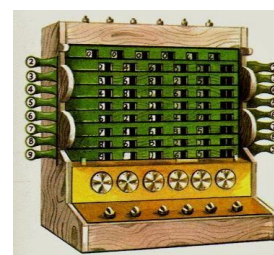


Счёты



Вильгельм Шиккард
(1592-1635)

Сначала появились чисто механические счётные устройства, автоматизирующие проведение человеком основных арифметических операций. Эти устройства чаще всего называли арифмометрами, сначала они приводились в действие руками человека-вычислителя, а в первой половине 20 века – с помощью электродвигателя. Следует отметить, что уже на эскизах знаменитого Леонардо да Винчи было изображено некое счётное устройство (вероятно, схема механического 13-разрядного сумматора). Этот эскиз сделан примерно в 1500 году, но нет никаких сведений о попытке построить это



Арифмометр В. Шиккарда
(копия)

устройство.¹



Блез Паскаль
(1623-1662)

Первым механическим вычислительным устройством, по-видимому, следует считать машину Вильгельма Шиккарда (W. Schickard), построенную в 1623 году в городе Тюбингене (Германия). Сохранились достаточно подробные чертежи этого устройства. Арифмометр должен был производить операции сложения и вычитания над 6-ти разрядными целыми числами. Любопытно отметить, что для операции вычитания у Шиккарда, как и в современных компьютерах использовалось сложение с дополнительным кодом вычитаемого. Современники Шиккарда практически ничего не знали об этом арифмометре.



Арифмометр Паскаля, 1645 г.

Принято считать, что один из первых сохранившихся до наших дней арифмометров, создал в 1642 году известный учёный Блез Паскаль (Blaise Pascal). Арифмометр Паскаля был более примитивным, чем у Шиккарда, он мог только складывать 5-ти (позднее 8-ми) разрядные целые числа. И, наконец, в 1673 году знаменитый математик Готтфрид Вильгельм фон Лейбниц (Gottfried Leibniz) построил арифмометр, который выполнял уже все четыре операции над целыми числами.



Готтфрид Лейбниц
(1646-1716)

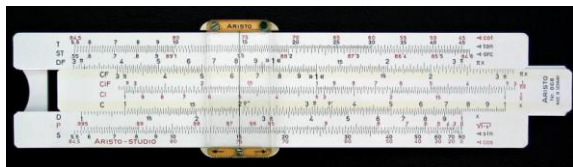


Арифмометр Г. Лейбница, 1673 г.

В составе этих первых счётных машин была механическая память на неболь-

¹ Фирма IBM (в основном в рекламных целях) воспроизвела это устройство в металле, оказавшееся вполне работоспособным.

ших зубчатых колёсиках для хранения нескольких обрабатываемых десятичных чисел. Памяти для хранения алгоритма вычислений в этих машинах не было, и этот алгоритм находился либо в уме человека, либо на бумаге или на другом носителе, с которым работал человек-вычислитель. Фактическим исполнителем алгоритма являлся человек, приводивший в действие механизм такой машины.



Логарифмическая линейка

ного корня, синуса, возведение в вещественную степень и т.д. Единственным недостатком было то, что, как *аналоговое* вычислительное устройство, она давала небольшую точность вычислений (2-3 значащие десятичные цифры).



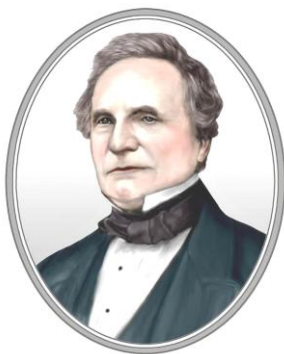
Арифмометр Феликс, 1960 г.

Использование арифмометров значительно облегчало проведение большого объёма вычислений, однако логика расчётов полностью определялась человеком-вычислителем. Принято говорить, что это *автоматизированное* проведение расчётов. В то же время весьма привлекательной была идея построить *автоматическое* вычислительное устройство, которое бы проводило процесс вычислений "само по себе", без прямого участия человека. Роль же человека должна сводиться к составлению некоторого чёткого набора правил (программы вычислений), по которым должно работать такое автоматическое счётное устройство.

16.1. Первые вычислительные машины

Чтобы понять какую либо науку, необходимо знать историю этой науки.

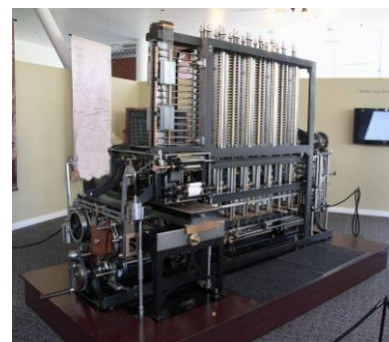
Огюст Конт



Чарльз Бэббидж (1791-1871)

Как свидетельствует в своей автобиографической книге выдающийся английский математик и инженер Чарльз Бэббидж (Charles Babbage),¹ идея создать вычислительную машину (автомат) для расчёта математических таблиц возникла у него в 1812 году.² В то время он был студентом Тринити-колледжа и стал членом "Аналитического общества" (в дальнейшем преобразованное в Кембриджское философское общество). Общество ставило своей задачей возродить математическую славу Англии с помощью идей знаменитого математика Г. Лейбница. С этого момента идея о создании вычислительной машины уже не оставляла учёного. Она стала главным предметом его научных изысканий на протяжении более 50 лет.

Приблизительно через 10 лет Бэббидж изготовил действующую модель машины, которая позволяла вычислять с точностью до 8 десятичных знаков значения полиномов второй степени с некоторым постоянным шагом. Эту машину Бэббидж назвал "разностной машиной" (Difference Engine), так как встроенный в машину алгоритм использовал для вычисления значения многочленов второй степени их постоянные вторые разности. Действующая модель этого вычислителя содержала 96 зубчатых колёс. Отметим, что в отличие от уже известных в то время счётных машин (арифмометров) Б. Паскаля и Г. Лейбница, машина Ч. Бэббиджа должна была производить вычисления в *автоматическом режиме*, не требуя вмешательства человека при переходе от вычисленного к следующему значению полинома. Это был первый шаг к основополагающим принципам автоматической работы и программного управления вычислительной машины.



Разностная машина Ч. Бэббиджа 1822 год (реконструкция)

¹ Между прочим, с 1832 года иностранный член-корреспондент Императорской Академии наук в Санкт-Петербурге.

² Вообще говоря, идея разностной машины была высказана еще в 1788 году в книге немецкого инженера Иоганна Гельфриха фон Мюллера (Johann Helfrich von Müller), но, по-видимому, Бэббидж об этом не знал.

Вдохновлённый успехом, в 1812 году Бэббидж предлагает проект разностной машины, которая должна вычислять уже значения полиномов 7-й степени с точностью до 20 значащих цифр и сразу печатать результаты вычислений на бумаге. Это было достаточно для создания астрономических таблиц и таблиц баллистических траекторий для морской артиллерийской стрельбы, поэтому работа над созданием такой машины субсидировалась английским Казначейством. Этот проект, однако, так и не был завершён¹ не только из-за отсутствия достаточных средств (в 1834 году финансирование было прекращено), но и главным образом потому, что Бэббиджем овладела новая идея создания "Аналитической машины" (Analytical Engine).

16.1.1. Аналитическая машина

Природа научных знаний такова, что малопонятные и совершенно бесполезные приобретения сегодняшнего дня становятся популярной пищей для будущих поколений.

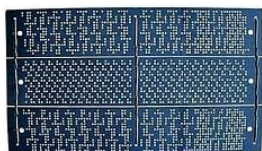
Чарльз Бэббидж

Эта машина, говоря современным языком, должна была быть универсальной вычислительной машиной, способной в автоматическом режиме выполнять составленный для неё алгоритм.

Аналитическая машина должна была состоять из следующих узлов:

- устройства для хранения чисел на зубчатых колёсиках и системы, способной считывать эти числа и передавать их в другие узлы машины. Бэббидж называл его "склад" (store), в современной терминологии это оперативная память ЭВМ;
- устройства, способного выполнять арифметические операции над хранящимися в нём числами, Бэббидж называл его "мельницей" (the mill) для чисел, в современной терминологии это арифметическое устройство с числовыми регистрами.²
- устройства, управляющего последовательными действиями остальных устройств машины (это устройство управления цифровых ЭВМ);
- устройства для ввода чисел в память и печати результатов (устройства ввода/вывода).

Последовательность выполняемых операций и последовательность передач чисел из памяти в



Перфокарты Жаккарда

"мельницу" и обратно (в нашем понимании это программа) должна была храниться на так называемых перфорированных картах Жаккар(д)а.³ Различались карты операций для управления работой "мельницы", и управляющие карты, задающие операции обмена между "мельницей" и



Перфокарты Бэббиджа

"складом". Предусматривались и цифровые карты, для операций ввода/вывода. На таких же картах предполагалось набивать и исходные данные. Карты программы могли двигаться под считывающим устройством взад и вперёд, в зависимости от знака числа, полученного "мельницей" при выполнении очередной операции. Это гениальное изобретение позволяло выполнять операции, которые на современном языке называются условными переходами. Именно это открывает возможность использовать такие машины как устройства именно *автоматической* обработки данных. Бэббидж не только высказал этот принцип, но и понял его огромное значение.


Бэббидж предполагал и повторное использование наборов карт, в нашем понимании стандартных подпрограмм: "За исключением цифровых карт все карты, однажды использованные и изготовленные для одной задачи, могут быть использованы для решения тех же задач с другими данными, поэтому


¹ Более простой вариант "Разностной машины" реализовал в 1837 году швед Георг Шутц (Per Georg Scheutz). Первый вариант этой машины он построил при поддержке Шведской академии наук в 1843 году, а несколько улучшенную модель, размером с концертный рояль, в 1853 году.

² Удивительно, но рассматривался и вариант машины с двумя "мельницами", работающими параллельно, это почти двухядерная (точнее, SIMD) аналитическая машина 😊.

³ Эти металлические карты Жозеф Мари Жаккар(д) (Joseph Marie Jacquard, 1752-1834), изобрёл и применил в 1801 году для управления ткацким станком, способным производить ткани со сложным узорчатым рисунком (вплоть до портретов и пейзажей). Можно сказать, что на этих картах хранилась "программа" получения ткани с заданным рисунком.

нет необходимости готовить их во второй раз – они могут быть тщательно сохранены для будущего использования. Каждая формула требует своего массива карт, и со временем машина будет иметь собственную библиотеку".

Предполагалось, что память аналитической машины должна хранить порядка 1000 50-ти разрядных десятичных чисел, чтобы обеспечить возможность производить точные и сложные вычисления. Во время конструирования машины Бэббидж рассмотрел возможность её работы в системах счисления с основаниями 2, 3, 4, 5, 10 и 100. Основания меньше 10 были отброшены, так как требовали слишком много деталей в конструкции машины, а основание 100 сильно замедляло выполнение арифметических операций. Как и в современных ЭВМ, промежуточные результаты вычислений могли иметь повышенную (до 80 знаков) точность. Любопытно, что операция вычитания выполнялась как операция сложения с (десятичным) дополнением вычитаемого . Как и в "настоящих" ЭВМ операция умножения делалась как *параллельное* сложение частичных произведений и занимала всего в несколько раз больше времени, чем сложение. Агалогично, предполагалась достаточно быстрая операция деления.

По проекту машина должна была иметь размеры 30x10x4,5 метра, передавать 50-разрядные числа из памяти в "мельницу" за 2,5 секунды, складывать эти числа за 3 секунды, умножать – примерно за 2 минуты, а делить (100-значное число на 50-значное, Intel – плагиатор ) – за 4 минуты. Для ускорения операции сложения Бэббидж предложил специальную схему с так называемым сквозным переносом, что намного ускоряло сложение, именно эта схема использовалась затем в первых "настоящих" ЭВМ.

Планы и чертежи аналитической машины были доведены Бэббиджем до уровня инженерного проекта. Многие решения, предложенные Бэббиджем, реализованы и в современных компьютерах. Это, например способность считывать из памяти, как без разрушения, так и с очисткой данных, разделение на уровне машинного языка потока команд на арифметические, управляющие "мельницей", и команды обмена данными между памятью и арифметическим устройством¹ и др.

Аналитическая машина должна была состоять примерно из 50000 деталей, поэтому проверить правильность логики работы аналитической машины по её чертежам было практически невозможно. Для того, чтобы описывать сложные логические связи между различными узлами аналитической машины, Бэббидж придумал некоторый почти формальный язык, который позволял компактно записывать эти взаимосвязи. Этот язык широко использовался при описании работы машины, правда, в его основе лежали чисто механические понятия, такие, как "храповик", "зубчатая рейка", "колесо с цифрами" и т.д.

Чтобы заставить работать аналитическую машину, для неё было необходимо составить программу – последовательность команд, управляющих работой арифметического устройства, команд обмена данными между этим устройством и памятью, а также команд, управляющих движением карт с записанной программой под действием результатов выполнения арифметических операций (в современной терминологии это условные операторы и циклы).

Эта машина должна была приводиться в движение паровым двигателем, осуществлять ввод с перфокарт и вывод на печатающее устройство. Сейчас мы понимаем, что технология того времени в принципе не позволяла изготовить с необходимой точностью столь сложное механическое устройство, которым являлась аналитическая машина. Сопоставимые по сложности электромеханические вычислительные машины (релейные ЭВМ) были созданы спустя только 100 лет.

Можно, однако, сказать, что "виртуально" аналитическая машина всё же существовала, так как была достаточно строго описана с привлечением, как чертежей, так и формальных средств. Кроме того, Бэббидж был профессором на кафедре математики Кембриджского университета (до него эту должность занимал сам И. Ньютон!) и читал лекции по этой машине студентам.

Одной из знакомых Бэббиджа была единственная дочь поэта Байрона леди Августа (Огаста) Ада графиня Лавлейс (Ada Lovelace), обладавшая хорошими математическими способностями, и, главное, большим кругозором. Она заинтересовалась аналитической машиной и взяла на себя труд исследовать возможности этой машины для выполнения сложных вычислений. В современной терминологии леди Лавлейс разработала алгоритмы (например, вычисления чисел Бернулли с вложенными циклами

¹ Этот принцип построения системы команд используется в современных компьютерах с так называемой RISC архитектурой, где команды обмена числами между памятью и арифметическим устройством отделены от команд, задающих операции над числами уже в самом арифметическом устройстве, что важно для ЭВМ с высокоразвитым параллелизмом.

ми) и записала их в виде программ для аналитической машины Бэббиджа. По-существу, она доказала универсальный характер этого вычислителя, что даёт основание считать эту выдающуюся женщину первым в мире "настоящим" программистом. Именно она ввела в употребление такие чисто программистские термины, как "команда (инструкция)", "рабочая ячейка", "цикл", "подпрограмма", "условная передача управления" и другие.¹ [см. сноску в конце главы].

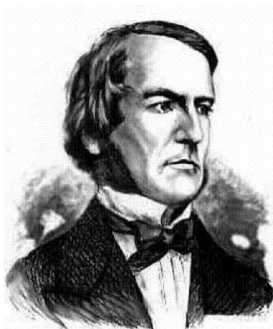


Августа Ада Лавлейс
(1815-1852)

В примечании к своему переводу статьи об аналитической машине¹ (на английский язык) Ада Лавлейс писала: "Аналитическая машина не претендует на то, чтобы создавать что-то действительно новое. Она способна выполнить всё, что мы сможем приказать ей. Она может произвести анализ, но не способна предугадать ни истинность высказываний, ни взаимосвязь между ними. Она способна помогать нам, делая доступнее то, что нам уже известно. Изначально эффект от её использования будет получен преимущественно в этой области, однако весьма вероятно, что она окажет косвенное и взаимное влияние на саму науку".

Размышляя об областях применения таких машин, Ада Лавлейс поняла, что машина может обрабатывать не только числа. Она писала: "Суть и предназначение машины изменятся от того, какую информацию мы в неё вложим. Машина сможет писать музыку, рисовать картины и покажет науке такие пути, которые мы никогда и нигде не видели". Кажется, что эти слова написаны о современном состоянии вычислительной техники! Сам Бэббидж называл её "Повелительницей чисел" (The Enchantress of Numbers). Заслуги Ады Лавлейс не были забыты, и уже во второй половине XX века её именем был назван язык программирования высокого уровня Ада (последняя версия этого языка создана в 2012 году).

Общественность того времени не смогла увидеть в работах Ч. Бэббиджа принципиально важного шага в развитии методов интеллектуального труда и усмотрела лишь непреодолимые технические трудности на пути реализации аналитической машины. Полностью труды Бэббиджа были опубликованы в 1888 году уже после смерти, и его имя и идеи, значительно опередившие своё время, были прочно забыты более чем на полвека.



Джордж Буль (1815-1864)

Когда говорят о людях, заложивших основы вычислительной техники, обязательно упоминают имя математика и логика Джорджа Буля (George Boole, 1815-1864). Он не изобретал вычислительных машин, но его труды в области математической логики служат основой для разработки сложных логических устройств, в том числе и вычислительной техники. В 1854 году Дж. Буль опубликовал книгу "Исследование законов мышления".² В этой книге он развил алгебру высказываний, получившей затем название *булевой алгебры*.

Идеи Дж. Буля получили признание только в начале 20 века, когда стала развиваться теория так называемых релейно-контактных схем и практика конструирования сложных дискретных автоматов. Булева алгебра оказала огромное влияние на развитие вычислительной техники. Эта алгебра является инструментом разработки сложных схем, служит для оптимизации числа логических элементов, из которых строятся современные вычислительные машины. Она же является основой общепринятой двоичной системы счисления, лежащей в основе современных ЭВМ.³ Для современников Дж. Буля его работы, однако, не получили должного признания.

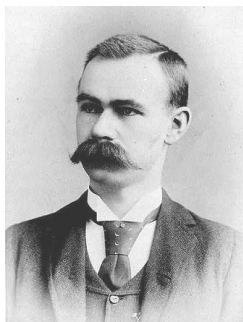
На рубеже 20 века технология уже позволяла с достаточной точностью создавать весьма сложные механические устройства обработки данных. Это явилось основой для так называемой счётно-перфорационной техники, которая была непосредственной предшественницей современных вычислительных машин. Большой вклад в развитие этой техники внёс американский предприниматель и учёный-статистик Герман Холлерит (Холлериз) (Herman Hollerith), который занимался обработкой данных

¹ Статью "Очерк Аналитической машины, изобретенной Чарльзом Бэббиджем" написал (на итальянском языке) Луиджи Федерико граф Менабреа (1809–1806), военный инженер, впоследствии генерал армии Гарибальди и премьер-министр Италии. Примечания, сделанные Адой Лавлейс, значительно превосходят объём самой статьи. Сами примечания были подписаны только инициалами A.A.L.

² В те времена книгам любили давать длинные названия, так что полное название книги "Исследование законов мышления, на которых основываются математические теории логики и вероятностей" (An Investigation of the Laws of Thought, on Which Are Founded the Mathematical Theories of Logic and Probabilities).

³ Впервые двоичную систему счисления описал в 1705 году немецкий математик Г. Лейбниц.

переписи населения США 1890 года. Он изобрёл и построил табулятор – машину, автоматизирующую обработку большого объёма статистических данных, а также создал дешёвый и надёжный носитель информации – картонную перфокарту.¹ В строке перфокарты помещалось 80 символов, это число затем стало стандартом для ширины текста в алфавитно-цифровых дисплеях и некоторых языках программирования. Эта машина явилась прообразом более поздних так называемых счётно-перфорационных устройств.



Герман Холлерит
(1860-1929)



Табулятор Холлерита, 1889 г.

Вдохновлённый этим успехом, Холлерит основал в 1896 году фирму по выпуску счётно-перфорационных машин и перфокарт для них. Его табуляторы использовались при переписи населения в Австро-Венгрии, Канаде и России. В дальнейшем эта фирма в 1924 году была преобразована в компанию IBM, которая и поныне является крупным производителем электронного оборудования.

16.1.2. Первые электронные вычислительные машины

...всякая цивилизация включает и то, к чему общество стремилось, и то, чего никто не замыслил.

Станислав Лем
«Сумма технологий»



Джон Атанасов (1903-1995)

И, наконец, в конце 30-х годов 20 века появляются проекты первых *электронных* вычислительных машин. В 1937 году в университете штата Айова профессор Джон Винсент Атанасов (John Vincent Atanasoff), американец болгарского происхождения, начал работу по созданию электронной вычислительной машины, предназначенной для решения сложных задач математической физики. Проект этой ЭВМ известен под названием ABC (компьютер Атанасова-Бери). Атанасовым были разработаны и запатентованы первые электронные схемы, которые применялись при создании различных устройств ЭВМ. По-видимому, Атанасов был одним из первых, кто обратил внимание на удобство использования в схемах ЭВМ двоичной системы счисления. Машина

Атанасова-Бери должна была иметь устройство ввода/вывода, которое преобразовывало десятичные данные в двоичное представление и обратно, а также арифметическое устройство, содержащее порядка 300 электронных ламп, для выполнения операций над числами уже в двоичной системе счисления. В этой машине ещё не было в привычном для нас виде ни памяти, ни программы. По сравнению с проектом аналитической машины Бэббиджа это, несомненно, был шаг назад. Начавшаяся вторая мировая война не позволила Атанасову и его сотрудникам полностью завершить проект этой вычислительной машины, а после войны работа уже не возобновилась.



Говард Эйкен
(1900-1973)

В 1937 году Говард Эйкен (Howard Hathaway Aiken) из Гарвардского университета США предложил проект большой релейной вычислительной машины. Основными элементами этой машины были электромеханические реле, которые при включении и выключении электрического тока могли быстро (за сотые доли секунды) замыкать и размыкать свои электрические контакты. Обработываемые числа хранились в этой машине на 72 регистрах-сумматорах, кроме того, были предусмотрены 60 тумблерных (полностью механических) регистров для хранения констант. Программа для этой машины набиралась на специальных коммутационных досках путём механического замыкания определённых контактов. Это была

¹ Вероятно, впервые картонные перфокарты для обработки данных предложил использовать коллежский советник (позже действительный статский советник, соответствует военному званию генерал-майора) Семён Николаевич Корсаков, который работал начальником статистического управления Санкт-Петербурга. В 1832 году он издаёт книгу "Начертание нового способа исследования при помощи машин, сравнивающих идеи", в которой описывается, наверное, первая автоматизированная система информационного поиска. Сам Корсаков использовал эту машину для работы с базой данных по гомеопатической фармакологии. Работу Корсакова высоко оценивал Ч. Бэббидж.

большая электромеханическая машина, потреблявшая мощность, эквивалентную 5 лошадиным силам 😊.



Релейная ЭВМ MARK-1, 1941 год

Машина была построена фирмой IBM, названа Mark-I и подарена Гарвардскому университету. Как видим, у этой машины тоже не было памяти в привычном для нас виде, а программа должна была составляться не программистами, а скорее инженерами-электронщиками. Эта машина, однако, оказалась своеобразной вехой в истории вычислительной техники, она доказала возможность строить устройства, состоящие из тысяч и десятков тысяч логических элементов. По современным понятиям это была очень медленная машина. Несмотря на то, что отдельное реле переключалось за сотую долю секунды, операция умножения выполнялась за 3 секунды. Эта машина оказалась очень надёжной и проработала целых 16 лет!



Конрад Цузе (1910-1995)

Говоря о предыстории развития вычислительной техники, нельзя не упомянуть и немецкого инженера и изобретателя Конрада Цузе (Konrad Ernst Otto Zuse). Похоже, что он ничего не знал о работах Ч. Бэббиджа и Дж. Буля и всё начал "с нуля". Первую вычислительную машину на электромеханических реле он построил в 1938 году и назвал Z1.¹ Вероятно, эта первая машина, которую в современной терминологии можно назвать компьютером. Это была трёхадресная ЭВМ, работающая в двоичной системе счисления, с памятью всего в 64-х 22-разрядных чисел, представленных в формате с плавающей запятой. Ввод производился с перфокарт. Вскоре была создана и усовершенствованная машина Z2.²

Примерно в 1941 им была построена релейная вычислительная машина Z3, близкая по возможностям к машине Mark-I, но значительно легче и дешевле. В 1945 году построена более совершенная машина Z4, выполненная по заказу немецкого Института аэродинамических исследований. Машина Z4 работала в двоичной системе счисления на тактовой частоте 40 герц и имела механическую память для хранения 1024 32-разрядных чисел с плавающей запятой. Формат представления чисел был очень близок к современному стандарту (знак числа, двоичный показатель порядка и мантисса с опущенной первой единицей). В машине были предусмотрены условные переходы, подпрограммы и даже обработка исключений!³



ЭВМ Z4 Конрада Цузе, музей Мюнхена

Ввод данных производился с клавиатуры, причём было предусмотрено автоматическое преобразование чисел из десятичной системы счисления в двоичную систему. Ввод программы производился с перфоленки, в качестве которой использовалась целлулоидная киноплёнка, вывод производился на электрическую пишущую машинку "Мерседес". Интересно, что задолго до изобретения конвейера, эта машина заранее считывала в буфер две команды, следующие за текущей выполняемой командой. Время выполнения операции сложения составляло около 0.4 секунды, умножение выполнялось за 4-5 секунд. Z4 была первой *проданной* ЭВМ в мире. К 1967 году фирма Zuse KG продала более 250 компьютеров, затем эту форму купила компания Siemens AG.

В 1946 году К. Цузе опубликовал описание прототипа первого языка программирования высокого уровня Планкалкюль (Plankalkül – Исчисление планов). В этом языке были такие основополагающие понятия, как функции, стандартные типы данных, массивы, цикл и даже исключения, а вот оператора **goto** не было (!), что соответствует современным принципам структурного программирования. Писалось о попытках программирования на этом языке шахматных задач. В идеологическом плане этот язык можно считать предтечей одного из первых языков программирования высокого уровня Алгола-60.

¹ В 1980 году правительство Германии выделило К. Цузе 800 тыс. марок, и он воссоздал машину Z1, которая теперь находится в музее вычислительной техники в городе Падеборне.

² Фирма Карла Цузе выпускала и военные варианты этих машин под названиями S1 и S2. Машина S1 использовалась для расчёта профиля крыла "летающий торпед" ФАУ, обстреливающих Лондон, а S2 – для управления этими ракетами.

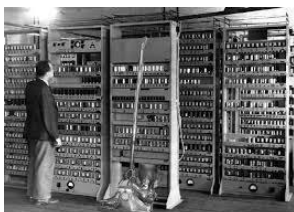
³ О машинах К. Цузе из-за секретности стало известно только после войны, поэтому они и оказали такое малое влияние на начальный период развития мировой вычислительной техники.



Компьютер ENIAC, 1945 г.

Первая по настоящему *электронная* вычислительная машина была построена только в 1945 году Джоном Проспером Эккертом (John Presper Eckert) и Джоном Моучли (John Mouchly) – сотрудниками Пенсильванского университета США. Эта ламповая ЭВМ была названа ENIAC (Electronic Numerical Integrator And Calculator), в её работе был использован принцип автоматического программного управления (попросту говоря, она могла выполнять то, что мы сейчас называем условными переходами). Машина имела память на 20-ть 10-разрядных десятичных чисел, можно сказать, что на логическом уровне она эквивалентна аналитической машине

Ч. Бэббиджа. Машина ENIAC занимала большой зал, весила около 35 тонн и потребляла 160 кВт электроэнергии, в ней использовались около 18000 электронных ламп, 72000 диодов и 1500 электромагнитных реле. ENIAC работал в 1000 раз быстрее, чем машина Mark-I. С помощью этой ЭВМ математик Джон Ренч в 1949 году за 70 часов работы получил 2037 десятичных знаков числа π . Этот результат был превзойдён на более совершенном компьютере лишь в 1954 году. Любопытно отметить, что именно создатели этой ЭВМ стали использовать термин "программировать" (to program), раньше говорили "настраивать" (to set up) машину для решения конкретной задачи. Программа для этой машины не вводилась извне, а набиралась штеккерными соединениями на большой панели.



Компьютер EDSAC, 1949 г.

Первая "настоящая" ЭВМ с именем EDSAC (Electronic Delay Storage Automatic Calculator) уже обладала такими свойствами современных компьютеров, как возможность хранить программу вместе с данными, чёткое разделение функций между узлами компьютера, двоичной системой счисления и т.д. Машина была построена в Англии в 1949 году Морисом Уилксом (Moris Wilkes)

при участии хорошо знакомого Вам А. Тьюринга. Машина весила "всего" около 8 тонн, потребляла 12 кВт, содержала около 3000 ламп и 12000 диодов. Машина имела память 1024 35-разрядных слова. Операция сложения выполнялась примерно за 0.8 секунд, а умножения за 2.9 секунды. Ввод и вывод производился на телеграфную перфоленку. Определяющее влияние на архитектуру этой ЭВМ оказали идеи выдающегося математика Джона фон Неймана. Интересно отметить, что на этой ЭВМ в 1951 году вычислено самое большое на то время 79-значное простое число и была реализована первая в истории компьютерная игра (крестики-нолики). Вывод производился на дисплее размером 35x16 точек на электронно-лучевой трубке.¹



Крестики-нолики на дисплее ЭВМ EDSAC, 1952 г.



С.А. Лебедев (1902-1974)

В 1947 году в Киеве началась разработка малой электронной счётной машины (МЭСМ), которая вступила в эксплуатацию в 1951 году. Эта машина была разработана под руководством академика Сергея Алексеевича Лебедева, который в дальнейшем в 1954 году возглавил московский Институт Точной Механики и Вычислительной техники (ИТМиВТ). С именем академика С.А. Лебедева связан значительный этап развития отечественной вычислительной техники. Достаточно упомянуть, что он, независимо от фон Неймана, сформулировал очень похожие принципы конструирования ЭВМ. К сожалению, из-за секретности, эти работы С.А. Лебедева не были опубликованы в открытых изданиях и не стали достоянием широкой общественности.

В Америке первые *серийные* ЭВМ Evinac стали выпускаться в 1951 году. В этом же году фирма IBM стала выпускать свои серийные ЭВМ IBM-701.



ЭВМ Стрела, МГУ, 1953 г.

В Советском Союзе в 1952-53 годах также появились первые серийные отечественные ЭВМ БЭСМ-1, Стрела и М-2. Так, ЭВМ Стрела содержала 6200 электронных ламп и 60000 полупроводниковых диодов, работала со скоростью 2000 операций в секунду, ввод производился с перфокарт (по 12 43-разрядных слов на перфокарте). Эта трехадресная машина имела оперативную память в 2048 43-разрядных слов (каждое слово команда или

¹ Отметим, что первый "настоящий" 12-ти дюймовый компьютерный монитор для ЭВМ IBM-2250 появился только в 1964 году, он имел разрешение 1024x1024 пикселей.

число), из них 256 ПЗУ. Язык машины содержал 64 команды. Внешняя память была на двух магнитных лентах по 2^{20} машинных слов. Машина занимала площадь 300 кв.м. и потребляла 150 кВт (из них половину на вентиляцию и охлаждение).

Именно на Стреле рассчитывались траектории полёта первых спутников и первого космонавта Юрия Гагарина. Эти ЭВМ стояли и в центрах Советского Союза по разработке ядерного оружия "Арзамас-16" и "Челябинск-70". Заметим, что Стрела с серийным №4 (см. фото) была установлена в Научно-исследовательском вычислительном центре МГУ на Ленинских Горах.

Таким образом, в начале 50-х годов 20 века начался бурный этап развития вычислительной техники. Так, если в 1953 году во всём мире насчитывалось только несколько десятков ЭВМ, то уже к 1965 году их было около 40 тысяч [3].

16.2. Теоретические основания информатики

Отыщи всему начало, и ты многое поймёшь.

Козьма Прутков

Информатика – не более наука о компьютерах, чем астрономия – наука о телескопах.

Эдгар Дейкстра

Стремительное развитие вычислительной техники в значительной степени опиралось на серьёзные результаты, полученные в начале 20 века при исследовании в таких областях, как основания математики и математическая логика. Возросшая роль математики как инструмента исследования в самых различных областях науки и техники потребовала разобраться в таких абстрактных вопросах, что означает делать правильные логические умозаключения, какое отношение к реальной действительности имеют такие основополагающие понятия математики, как бесконечность, существование и не существование какого-либо объекта, бесконечно малая величина и т.д. Несмотря на кажущуюся философскую отвлечённость попыток обосновать правильность рассуждений и выводов, все они лежат в самом основании нашего построения научной картины мира.

Необходимо было тщательно изучить фундамент математики, на котором стоят здания многих других наук: физики, механики, астрономии и т.д., а, как известно, любой изъян в фундаменте грозит обрушить всё здание. Новые открытия в физике на рубеже 19-го и 20-го столетия, появление таких наук, как теория относительности и квантовая физика, поколебали привычные представления, не укладывались в прежние объяснения и часто противоречили здравому смыслу. Это потребовало заново исследовать вопрос о том, как создаются и формируются наши основополагающие представления и понятия, и почему одни выводы мы считаем правильными, истинными, а другие – ложными. Нужно было выработать новые понятия о самых фундаментальных свойствах нашего логического мышления. Ибо, как сказал знаменитый в определённых кругах Козьма Прутков: "Многие вещи нам непонятны не потому, что наши понятия слабы; но потому, что сии вещи не входят в круг наших понятий".

Именно в это время сформировалась ветвь математики, которая получила название математической логики. Эта наука стала изучать проблему построения выводов с абстрактных (формальных) позиций. Как выяснилось, можно по разному строить строгие правила вывода и тем самым создавать разные формальные системы "рассуждений" или, как говорят, создавать различные *исчисления*.

Рассмотрим, какое отношение всё это имеет к вычислительной науке. Как известно, главной задачей вычислительной техники является то, что носит общее название "обработка данных". Это означает, что существует некоторая задача (проблема), которая требует, чтобы по известным входным данным был получен некоторый результат. Как это сделать?

Оказалось, что существуют, по крайней мере, два принципиально разные пути решения задач (обработки данных). Первый путь опирается на возможность для некоторых задач разработать алгоритм их решения. Главным свойством алгоритма является его дискретность: он состоит из отдельных шагов, выполнение которых и приводит, в конце концов, к решению поставленной задачи. Алгоритм реализует принцип логического (пошагового) решения задачи. Второй способ решения проблем опирается на принципы так называемого интуитивного мышления, решение задачи происходит не в про-

цессе выполнения шагов некоторого алгоритма, а сразу "за один шаг". При этом для решения задачи строится её модель и исследуется поведение этой модели для конкретных входных данных.¹

Человек при решении задач может использовать оба этих принципа обработки данных. Рассмотрим шуточный пример, призванный проиллюстрировать эти принципа обработки данных человеком. Вот сыщик майор Пронин движется по улице и видит, как идущий впереди субъект прихрамывает на правую ногу, всё время оглядывается через левое плечо, а при разговоре со встречными шепелявит и морщит лоб. Кроме того, на левой руке у него татуировка "Не забуду мать родную". Эге, да это же рецидивист Иванов по кличке "Ржавый"! Пронин определил преступника, выполняя по шагам алгоритм опознания по словесному портрету. А вот идёт по улице студент Петров, бросает мимолётный взгляд в толпу и говорит: "Эге, да это бежит мой приятель Коляка!". Для узнавания приятеля Петрову не понадобилось выполнять никакого алгоритма, он выполнил узнавание интуитивно, "за один шаг". Некоторое время считалось, что такой алгоритм всё-таки существует, но выполняется на подсознательном уровне, однако дальнейшие психологические исследования не подтвердили это предположение. По современным представлениям, у человека за эти два способа обработки данных ответственны два разных полушария головного мозга.²

В начальный период развития вычислительной техники строились компьютеры, которые реализовывали оба эти принципа обработки данных. Вычислительные машины, которые работают по логическому принципу, называются цифровыми (или дискретными) компьютерами. Машины, реализующие интуитивный принцип обработки данных называются аналоговыми (или непрерывными) ЭВМ. У аналоговых компьютеров нет программ в привычном для нас смысле, их работа основана на принципе моделирования решаемой задачи, а все участвующие в решении задачи величины представляются в виде непрерывно меняющихся значений каких-либо физических величин (длин, давлений, электрических напряжений и т.д.).

Можно сказать, что при решении задач на цифровой ЭВМ мы строим алгоритм, который отображает задачу на жёстко заданную структуру компьютера, то есть записывает весь алгоритм в виде действий, которые может выполнить цифровой компьютер. В конечном счете, необходимо записать весь алгоритм на языке машины. А вот при решении задачи на аналоговой ЭВМ она сама, в процессе её "программирования" (настройки) меняет свою структуру, чтобы соответствовать решаемой задаче.

Очень скоро аналоговые ЭВМ проиграли в конкурентной борьбе цифровым компьютерам, так как у них был один существенный недостаток. При выдаче результатов решения задачи в числовом виде они обеспечивали малую точность – две-три значащих десятичных цифры, что, конечно, было совершенно неприемлемо для большинства научных расчётов. В настоящее время аналоговые компьютеры практически не производятся.³

Итак, вернёмся к цифровым компьютерам, в основе работы которых лежит выполнение алгоритма решения задачи. Понятно, что возникла настоятельная необходимость уточнить понятие алгоритма и исследовать его свойства.



А.Тьюринг (1912-1954)

На интуитивном уровне все мы достаточно хорошо понимаем, что такое алгоритм. Это набор (последовательность) шагов (предписаний), выполняя которые мы можем решить поставленную задачу. Однако придать понятию алгоритма чёткое формальное определение, чтобы приблизить его к привычным для нас строгим математическим понятиям, оказалось не так просто. Одним из первых попытку формализовать понятие алгоритма предпринял в 1936 году английский математик Алан Тьюринг (Alan Mathison Turing).

Сначала он ограничил входные и выходные данные алгоритма только словами в некотором алфавите. Правила работы определялись как записанные в специальном виде последовательность действий по обработке символов для некоторого абстрактного вычислителя, который стали называть машиной Тьюринга. Эта машина (исполнитель алгоритма) устроена так просто и выполняемые ей действия (шаги алгоритма) настолько элементарны, что не должны вызывать у людей неоднозначного толкования. В то

¹ Для продвинутых читателей можно отметить ещё два способа решения задач: квантовые вычисления и самопостроение решения (например, самоорганизация живых организмов по информации из ДНК).

² Не стоит стараться запоминать, за что именно отвечает левое, а за что правое полушарие, так как у левшей всё обстоит наоборот 😊.

³ На смену аналоговым ЭВМ пришли так называемые нейрокомпьютеры, в которых модель решаемой задачи строится в сети искусственных нейронов [см. раздел 15.2].

же время этот исполнитель в некотором смысле универсален, так как для него был сформулирован так называемый тезис Тьюринга.

Этот тезис провозглашает, что для любого алгоритма обработки слов в некотором алфавите можно построить машину Тьюринга, которая делает то же самое (более точно, имеет ту же область применимости, и для любого слова из этой области даёт тот же результат). Ясно, что строго доказать этот тезис невозможно, так как в нём присутствует неформализованное понятие "любой алгоритм". Единственное, что остаётся, это придумать такой другой формальный исполнитель алгоритмов, который может решать задачи, недоступные машине Тьюринга.

Вообще говоря, строго доказано, что существуют задачи, для которых невозможно построить машину Тьюринга, это так называемые алгоритмически неразрешимые задачи (проблемы). Более того, в некотором смысле для программистов складывается совсем уж безрадостная ситуация, так как практически все задачи алгоритмически неразрешимы (они образуют множество мощности континуум, в то время как алгоритмически разрешимые задачи – всего лишь счётное множество). Некоторым утешением для программистов может являться тот факт, что все алгоритмически неразрешимые задачи в некотором смысле не представляют практического интереса, хотя здесь и можно вспомнить басню про лису и виноград.

В последующие годы были предприняты многочисленные попытки создать формальный исполнитель алгоритмов, который был бы более мощный, чем машина Тьюринга. Сначала хотели модифицировать машину Тьюринга, придав ей более универсальный характер. Это были всевозможные машины, которые имели много читающих и пишущих головок, много лент с данными и много таблиц. Или же, например, можно было заменить ленту на бесконечную плоскость, разбитую на квадратики с буквами и т.д. Однако была достаточно быстро построена так называемая универсальная машина Тьюринга, которая моделировала работу других исполнителей алгоритмов, и, таким образом, была доказана эквивалентность этих алгоритмических систем. Универсальная машина Тьюринга "справляется" даже с такими экзотическими исполнителями, как самомодифицирующаяся, недетерминированная и квантовая модификации машины Тьюринга.¹



А.А. Марков (1903-79)

Интересную формализацию понятия алгоритма сделал в 1954 году отечественный математик А.А. Марков (младший). Его исполнитель алгоритмов базировался на совершенно других элементарных действиях по преобразованию слов, и совсем не походил на машину Тьюринга. В отличие от Тьюринга, Марков был "чистым" математиком. Ему были чужды такие "механические" понятия, как читающая и пишущая головка, что-то, похожее на телеграфную ленту, переключатель состояний, как в радиоприёмнике и т.д. Можно сказать, что его машина описана на чисто математическом языке.

А.А. Марков тоже высказал свой принцип, который гласит, что любой алгоритм обработки слов в некотором алфавите может быть нормализован, т.е. записан как алгоритм для его исполнителя. Разработанная Марковым формализация стала называться Нормальными алгоритмами Маркова (НАМ). Как Вы можете догадаться, вскоре была доказана теорема об эквивалентности машины Тьюринга и Нормальных алгоритмов Маркова.

Идеи Тьюринга, теория нормальных алгоритмов Маркова, работы Поста и других математиков представляют тот фундамент, на котором строится современная теория алгоритмов, теоретическое программирование, и другие научные направления, имеющие отношение к разработке и использованию компьютеров.

ⁱ Применительно к машине Бэббиджа тогда для программ использовали термин "диаграммы вычислений" (Diagramm for the Computation). Ниже приведена такая диаграмма для цикла вычисления чисел Бернулли. Любопытно, что в опубликованной Адой Лавлейс программе вычисления чисел Бернулли была найдена ошибка: в четвёртой команде вместо операции $v5/v4$ надо использовать $v4/v5$.

¹ Квантовая машина Тьюринга может использоваться в качестве формального описания (правда, очень неудобного) квантовой ЭВМ.

В своих "Примечаниях" Ада Лавлейс чётко описала сущность выполнения "диаграммы вычислений" (в ее понимании вычислительного процесса):

Глубокое понимание универсальности Аналитической машины выражают такие цитаты:

"Многие люди, недостаточно знакомые с математическими исследованиями, полагают, что, поскольку машины – выдавать результаты в числовой форме, характер ее процессов должен быть соответственно арифметическим или числовым, а не алгебраическим и аналитическим. Это ошибка. Машина может упорядочить и комбинировать числовые величины точно так же, как если бы они были буквами или другими символами более общей природы".

"Можно сказать, что аналитическая машина ткёт алгебраические узоры, подобно тому, как станок Жаккара ткёт цветы и листья".