

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего профессионального образования  
«Иркутский государственный университет»

**Н. К. Душутин, С. Н. Ушакова, Ю. В. Ярюкевич**

# **ИЗ ИСТОРИИ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ**

*Учебное пособие*



ББК 32.97гя73  
УДК 681.3(091)(075.8)  
Д86

*Печатается по решению методической комиссии  
физического факультета ИГУ*

Рецензенты:

**Щербаченко Л. А.**, д-р техн. наук, проф. ИГУ  
**Гафнер А. Е.**, канд. физ.-мат. наук, доц. ВС ГАО

**Душутин Н. К.**

**Д86** Из истории вычислительной техники : учеб. пособие /  
Н. К. Душутин, С. Н. Ушакова, Ю. В. Ясюкевич – Иркутск :  
Изд-во ИГУ, 2011. – 275 с.

ISBN 978-5-9624-0557-5

Рассмотрены основные типы компьютеров разных поколений и история их создания. Описываются физические принципы действия транзистора и других элементов ЭВМ, математическое и программное обеспечение, основы теории алгоритмов, конечные автоматы и вейвлет-анализ. Излагается история отечественной вычислительной техники и ее связь с оборонными проектами, а также исследования по квантовой информатике и искусственноому интеллекту.

Пособие адресовано студентам, магистрантам и аспирантам, преподавателям вузов и школ, учащимся старших классов.

Библиогр. 44 наз. Ил. 30. Табл. 4.

# ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>Введение .....</b>	<b>5</b>
<b>Глава 1. Вычислительная техника .....</b>	<b>8</b>
1.1. Ранние приспособления и устройства для счета .....	8
1.2. Начало эры программирования.....	10
1.3. Компьютеры с архитектурой фон Неймана.....	31
1.4. Компьютеры пятого поколения. ....	48
1.5. IBM .....	60
1.6. Нанотехнологии в вычислительной технике .....	63
<b>Глава 2. Полупроводниковая электроника: транзистор и другие элементы ЭВМ .....</b>	<b>67</b>
2.1. Полупроводниковая электроника .....	67
2.2. p-n-переход – основа для полупроводниковой электроники.....	69
2.3. Транзистор .....	75
2.3.1. <i>Принцип действия биполярного транзистора</i> .....	95
2.3.2. <i>Полевой транзистор</i> .....	97
2.3.3. <i>Гетероструктуры</i> .....	100
2.3.4. <i>p-n-p-n-приборы</i> .....	109
2.3.5. <i>Сверхвысокочастотные приборы</i> .....	109
2.4. Использование полупроводниковых приборов .....	110
2.5. Фотонные кристаллы .....	112
2.6. Гигантское магнетосопротивление.....	117
<b>Глава 3. Некоторые математические аспекты .....</b>	<b>124</b>
3.1. Теория алгоритмов .....	124
3.2. Теория автоматов .....	128
3.3. Вейвлет-анализ .....	142
3.3.1. <i>Основы теории вейвлет-преобразования</i> .....	145
3.3.2. <i>Вейвлеты и многомасштабный анализ</i> .....	145
3.3.3. <i>Ортогональное вейвлет-преобразование</i> .....	147
3.3.4. <i>Дискретное вейвлет-преобразование и другие направления вейвлет-анализа</i> .....	148
3.4. Математическое обеспечение ЭВМ .....	149
3.5. Программирование.....	155

<b>Глава 4. Отечественные ЭВМ в оборонных проектах ...</b>	<b>159</b>
4.1. Научный подвиг С. А. Лебедева .....	164
4.2. ФГУП «Институт точной механики и вычислительной техники им. С. А. Лебедева Российской академии наук».....	177
4.3. Работы в области микроэлектронных технологий .....	188
4.4. Отечественный атомный проект .....	198
4.5. Создание системы противоракетной обороны и суперЭВМ.....	213
4.6. ПРО и современное состояние вычислительных средств .....	222
<b>Глава 5. Квантовый компьютер. Искусственный интеллект .....</b>	<b>224</b>
5.1. Квантовые вычисления .....	229
5.2. Квантовая информатика.....	234
5.3. Квантовая криптография .....	245
5.4. Искусственный интеллект .....	247
5.4.1. <i>Подходы к изучению</i> .....	249
5.4.2. <i>Направление исследований</i> .....	251
5.4.3. <i>Современное положение дел</i> .....	253
5.4.4. <i>Философия искусственного интеллекта</i> .....	254
5.4.5. <i>Перспективные технологии</i> .....	257
5.4.6. <i>Искусственный интеллект в Стране восходящего             солнца</i> .....	261
5.4.7. <i>Военные технологии</i> .....	261
<b>Заключение .....</b>	<b>272</b>
<b>Литература .....</b>	<b>273</b>

# Введение

Компьютер (англ. *computer* – «вычислитель») – машина для проведения вычислений. При помощи вычислений компьютер способен обрабатывать информацию по заранее определенному алгоритму. Кроме того, большинство компьютеров способны сохранять информацию и осуществлять поиск информации, выводить информацию на различные виды устройств выдачи информации. Свое название компьютеры получили по своей основной функции – проведению вычислений. Однако в настоящее время полагают, что основная функция компьютеров – обработка информации и управление. Выполнение поставленных перед ним задач компьютер может обеспечивать при помощи перемещения каких-либо механических частей, движения потоков электронов, фотонов, квантовых частиц или за счет использования эффектов от любых других хорошо изученных физических явлений.

Наибольшее распространение среди компьютеров получили так называемые электронно-вычислительные машины, ЭВМ. Собственно, для подавляющего большинства людей, слова «электронно-вычислительные машины» и «компьютеры» стали словами-синонимами, хотя на самом деле это не так. Наиболее распространенный тип компьютеров – электронный персональный компьютер.

Архитектура компьютеров может непосредственно моделировать решаемую проблему, максимально близко (в смысле математического описания) отражая исследуемые физические явления. Так, электронные потоки могут использоваться в качестве моделей потоков воды при моделировании дамб или плотин. Подобным образом сконструированные аналоговые компьютеры были обычны в 60-х гг. в., однако сегодня стали достаточно редким явлением.

В большинстве современных компьютеров проблема сначала описывается в математических терминах, при этом вся необходимая информация представляется в двоичной форме (в виде единиц и нулей), после чего действия по ее обработке сводятся к применению простой алгебры логики. Поскольку практически вся математика может быть сведена к выполнению булевых операций, достаточно быстрый электронный компьютер может быть применим для решения большинства математических за-

дач (а также и большинства задач по обработке информации, которые могут быть легко сведены к математическим).

Было обнаружено, что компьютеры все-таки могут решить не любую математическую задачу. Впервые задачи, которые не могут быть решены при помощи компьютеров, были описаны английским математиком Алланом Тьюрингом.

Первые компьютеры создавались исключительно для вычислений (что отражено в названиях «компьютер» и «ЭВМ»). Даже самые примитивные компьютеры в этой области во много раз превосходят людей (если не считать некоторых уникальных людей-счетчиков). Не случайно первым высокоуровневым языком программирования был Фортран, предназначенный исключительно для выполнения расчетов.

Вторым крупным применением были базы данных. Прежде всего, они были нужны правительствам и банкам. Базы данных требуют уже более сложных компьютеров с развитыми системами ввода-вывода и хранения информации. Для этих целей был разработан язык Кобол. Позже появились СУБД со своими собственными языками программирования.

Третьим применением было управление всевозможными устройствами. Здесь развитие шло от узкоспециализированных устройств (часто аналоговых) к постепенному внедрению стандартных компьютерных систем, на которых запускаются управляющие программы. Кроме того, все большая часть техники начинает включать в себя управляющий компьютер.

Наконец, **компьютеры** развились настолько, что **компьютер** стал главным информационным инструментом как в офисе, так и дома. То есть теперь почти любая работа с информацией осуществляется через компьютер – будь то набор текста или просмотр фильмов. Это относится и к хранению информации, и к ее пересылке по каналам связи.

Наиболее сложным и слаборазвитым применением компьютеров является искусственный интеллект – применение компьютеров для решения таких задач, где нет четко определенного более или менее простого алгоритма. Примеры таких задач – игры, машинный перевод текста, экспертные системы.

В данном пособии мы постарались, хотя, может быть, излишне кратко, отразить все эти моменты. Основным особенностям различных типов и поколений компьютеров посвящена первая глава. Во второй главе обсуждаются физические прин-

ципы действия транзистора и других элементов ЭВМ. В третьей главе рассмотрены математическое и программное обеспечение, основы теории алгоритмов, конечные автоматы и вейвлет-анализ. В четвертой главе излагается история отечественной вычислительной техники, тесно связанная с оборонными исследованиями, ставшая открытой только в последнее время. В последней главе освещены исследования по квантовой информатике и искусственному интеллекту.

Надеемся, что данное пособие окажется полезным студентам, магистрантам и аспирантам, преподавателям вузов и школ, учащимся старших классов. Предназначено широкому кругу читателей, интересующихся данными проблемами.

# Глава 1. ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА

*«У меня позади длинная и печальная история», – сказала Мышь, поворачиваясь к Алисе со вздохом. «Конечно, хвост длинный, но почему ты называешь его печальным?»*

*Льюис Кэрролл*

**Вычислительная техника** является важнейшим компонентом процесса вычислений и обработки данных. Первыми приспособлениями для вычислений были, вероятно, всем известные счетные палочки, которые и сегодня используются в начальных классах многих школ для обучения счету. Развиваясь, эти приспособления становились более сложными, например, такими как финикийские глиняные фигурки, также предназначаемые для наглядного представления количества считаемых предметов, однако для удобства помещаемые при этом в специальные контейнеры. Такими приспособлениями, похоже, пользовались торговцы и счетоводы того времени.

Постепенно из простейших приспособлений для счета рождались все более и более сложные устройства: абак, логарифмическая линейка, механический арифмометр, электронный компьютер. Несмотря на простоту ранних вычислительных устройств, опытный счетовод может получить результат при помощи простых счет даже быстрее, чем нерасторопный владелец современного калькулятора. Естественно, сама по себе, производительность и скорость счета современных вычислительных устройств давно уже превосходят возможности самого выдающегося расчетчика-человека.

## 1.1. Ранние приспособления и устройства для счета

Когда людям надоело вести счет при помощи загибания пальцев, они изобрели абак.

Человечество научилось пользоваться простейшими счетными приспособлениями тысячи лет назад. Наиболее востребованной оказалась необходимость определять количество предметов, используемых в меновой торговле. Одним из самых простых решений было использование весового эквивалента меняемого предмета, что не требовало точного пересчета количества его составляющих. Для этих целей использовались простейшие балансирные весы, которые стали, таким образом, одним из первых устройств для количественного определения массы.

Принцип эквивалентности широко использовался и в другом, знакомым для многих, простейшем счетном устройстве – абаке, или счетах. Количество подсчитываемых предметов соответствовало числу передвинутых костяшек этого инструмента.

Сравнительно сложным приспособлением для счета могли быть четки, применяемые в практике многих религий. Верующий как на счетах отсчитывал на зернах четок число произнесенных молитв, а при проходе полного круга четок передвигал на отдельном хвостике особые зерна-счетчики, означающие число отсчитанных кругов.

Звездочки и шестеренки были сердцем механических устройств для счета. С изобретением зубчатых колес появились и гораздо более сложные устройства выполнения расчетов. Антический механизм, обнаруженный в начале XX в., который был найден на месте крушения античного судна, затонувшего примерно в 65 (по другим источникам в 80 или даже 87) году до нашей эры, даже умел моделировать движение планет. Предположительно его использовали для календарных вычислений в религиозных целях, предсказания солнечных и лунных затмений, определения времени посева и сбора урожая и т. п. Вычисления выполнялись за счет соединения более 30 бронзовых колес и нескольких циферблотов; для вычисления лунных фаз использовалась дифференциальная передача, изобретение которой исследователи долгое время относили не ранее чем к XVI в. Впрочем, с уходом античности навыки создания таких устройств были позабыты; потребовалось около полутора тысяч лет, чтобы люди вновь научились создавать похожие по сложности механизмы.

*«Считывающие часы» Вильгельма Шикарда*

В 1623 г. Вильгельм Шикард придумал «Считывающие часы» – первый механический калькулятор, умевший выполнять четыре арифметических действия. Считывающими часами устройство было названо потому, что как и в настоящих часах работа механизма была основана на использовании звездочек и шестеренок. Практическое использование этого изобретение нашло в руках друга Шикарда, философа и астронома Иоганна Кеплера.

За этим последовали машины Блеза Паскаля («Паскалина», 1642 г.) и Готфрида Вильгельма Лейбница. Примерно в 1820 г. Чарльз Томас (Charles Xavier Thomas) создал первый удачный, серийно выпускаемый механический калькулятор – Арифометр Томаса, который мог складывать, вычитать, умножать и делить. Его устройство было основано на работе Лейбница. Подобные механические калькуляторы, считающие десятичные числа, использовались до 1970-х гг.

Лейбниц также описал двоичную систему счисления, центральный ингредиент всех современных компьютеров. Однако вплоть до 1940-х гг., многие последующие разработки, включая машины Чарльза Бэббиджа и даже ЭНИАК 1945 г., были основаны на более сложной в реализации десятичной системе.

Джон Непер заметил, что умножение и деление чисел может быть выполнено сложением и вычитанием логарифмов этих чисел. Действительные числа могут быть представлены интервалами длины на линейке, и это легло в основу вычислений с помощью логарифмической линейки, что позволило выполнять умножение и деление намного быстрее. Логарифмические линейки использовались несколькими поколениями инженеров и научных работников вплоть до появления карманных калькуляторов. Инженеры программы «Аполлон» отправили человека на Луну, выполнив на логарифмических линейках все вычисления, многие из которых требовали точности в 3–4 знака.

Для составления первых логарифмических таблиц Неперу понадобилось выполнить множество операций умножения, зато его таблицы в последующем облегчили проведение любых вычислений и расчетов во всем мире.

## 1.2. Начало эры программирования

### *Появление перфокарт*

В 1801 г. Жозеф Мари Жаккар разработал ткацкий станок, в котором вышиваемый узор определялся перфокартами. Серия карт могла быть заменена, и смена узора не требовала изменений в механике станка. Это было важной вехой в истории программирования.

В 1838 г. Чарльз Бэббидж перешел от разработки «разностной машины» к проектированию более сложной аналитической машины, принципы программирования которой напрямую восходят к перфокартам Жаккара.

В 1890 г. Бюро переписи США использовало перфокарты и механизмы сортировки, разработанные Германом Холлеритом, чтобы обработать поток данных десятилетней переписи, переданный ей под мандат в соответствии с Конституцией. Компания Холлерита в конечном счете стала ядром корпорации IBM. Эта корпорация развила технологию перфокарт в мощный инструмент для деловой обработки данных и выпустила обширную линию специализированного оборудования для их записи. К 1950 г. технология IBM стала вездесущей в промышленности и

правительстве. Предупреждение, напечатанное на большинстве карт, «не сворачивать, не скручивать и не рвать», стало девизом послевоенной эры.

Во многих компьютерных решениях перфокарты использовались до (и после) конца 1970-х. Например, студенты инженерных и научных специальностей во многих университетах во всем мире могли отправить их программные команды в локальный компьютерный центр в форме набора карт, одна карта на программную строку, а затем должны были ждать очереди для обработки, компиляции и выполнения программы. Впоследствии после

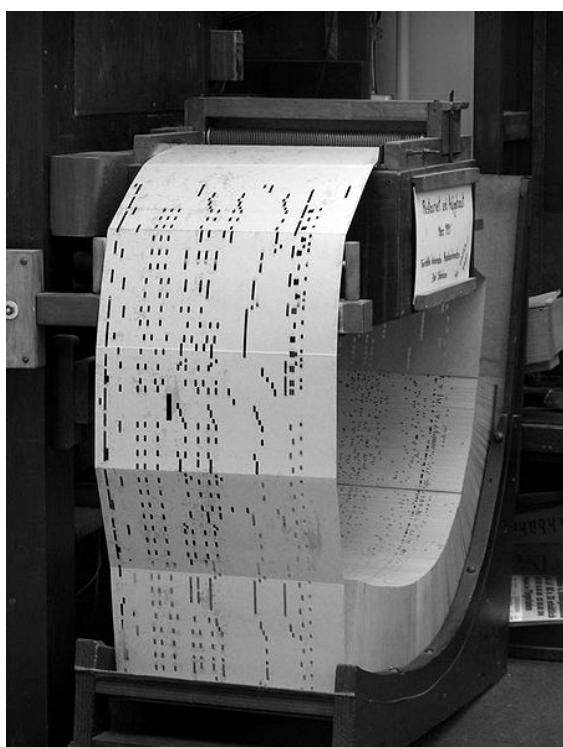


РИС. 1.1. ПЕРФОКАРТОЧНАЯ СИСТЕМА МУЗЫКАЛЬНОГО АВТОМАТА

распечатки любых результатов, отмеченных идентификатором заявителя, они помещались в выпускной лоток вне компьютерного центра. Во многих случаях эти результаты включали в себя исключительно распечатку сообщения об ошибке в синтаксисе программы, требуя другого цикла: «редактирование – компиляция – исполнение».

На рис. 1.1 представлена перфокарточная система музыкального автомата.

### ***1835–1900-е: первые программируемые машины***

Определяющая особенность «универсального компьютера» – это программируемость, что позволяет компьютеру эмулировать любую другую вычисляющую систему всего лишь заменой сохраненной последовательности инструкций.

В 1835 г. Чарльз Бэббидж описал свою аналитическую машину. Это был проект компьютера общего назначения, с применением перфокарт в качестве носителя входных данных и программы, а также парового двигателя в качестве источника энергии. Одной из ключевых идей было использование шестерней для выполнения математических функций (рис. 1.2).

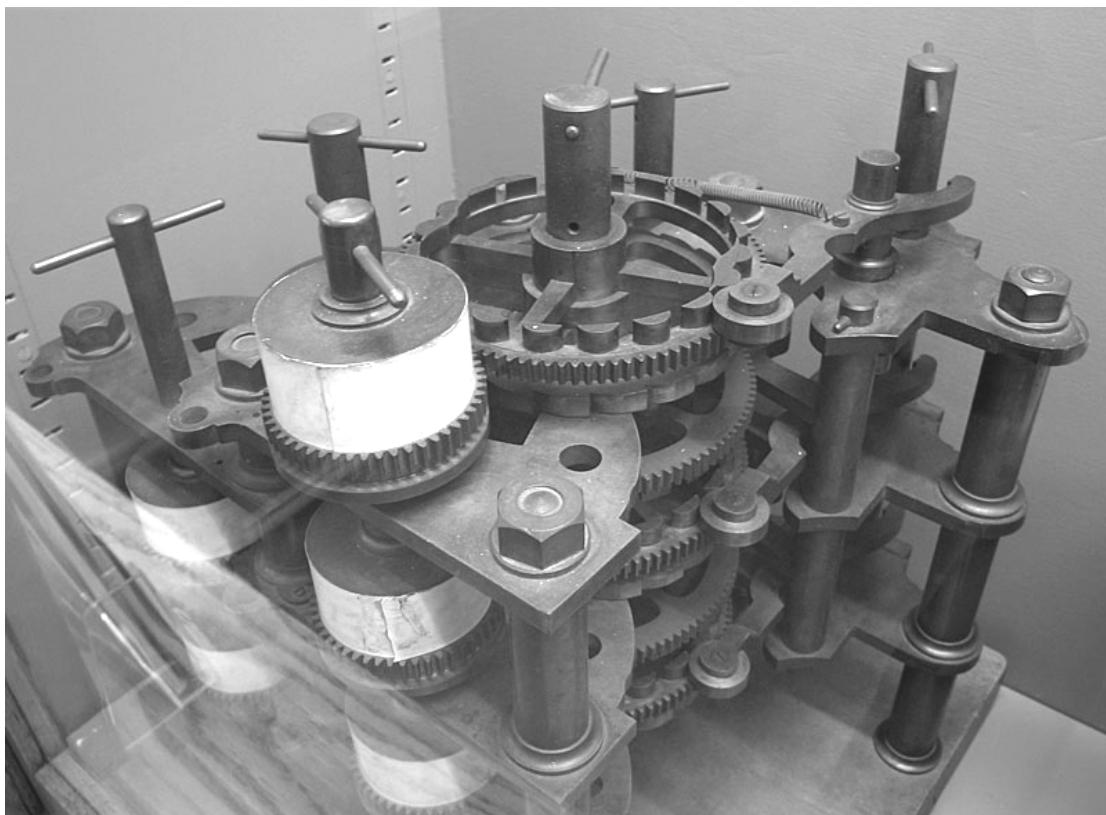


Рис. 1.2. Часть разностной машины Бэббиджа, собранная после его смерти сыном из частей, найденных в лаборатории

Его первоначальной идеей было использование перфокарт для машины, вычисляющей и печатающей логарифмические таблицы с большой точностью (т. е. для специализированной машины). В дальнейшем эти идеи были развиты до машины общего назначения – его «аналитической машины».

Хотя планы были озвучены и проект, по всей видимости, был реален или, по крайней мере, проверяем, при создании машины возникли определенные трудности. Бэббидж был человеком, с которым трудно было работать, он спорил с каждым, кто не отдавал дань уважения его идеям. Все части машины должны были создаваться вручную. Небольшие ошибки в каждой детали, для машины, состоящей из тысяч деталей, могли вылиться в значительные отклонения, поэтому при создании деталей требовалась точность, необычная для того времени. В результате, проект захлебнулся в разногласиях с исполнителем, создающим детали, и завершился с прекращением государственного финансирования.

Ада Лавлейс, дочь лорда Байрона, перевела и дополнила комментариями труд «Sketch of the Analytical Engine». Ее имя часто ассоциируют с именем Бэббиджа. Утверждается также, что она является первым программистом, хотя это утверждение и значение ее вклада в вычислительную математику некоторыми оспаривается.

Реконструкция 2-го варианта «Разностной машины» – раннего, более ограниченного проекта, действует в Лондонском музее науки с 1991 г. Она работает именно так, как было спроектировано Бэббиджем, лишь с небольшими тривиальными изменениями, и это доказывает, что Бэббидж в теории был прав. Для создания необходимых частей, музей применил машины с компьютерным управлением, придерживаясь допусков, которые мог достичь слесарь того времени. Ранее полагали, что технология того времени не позволяла создать детали с требуемой точностью, но это предположение оказалось неверным. Неудача Бэббиджа при конструировании машины, в основном, приписывается трудностям, не только политическим и финансовым, но также и его желанию создать очень изощренный и сложный компьютер.

По стопам Бэббиджа, хотя и не зная о его более ранних работах, шел П. Люгет (Percy Ludgate), бухгалтер из Дублина

(Ирландия). Он независимо спроектировал программируемый механический компьютер, который он описал в работе, изданной в 1909 г.

### **1930–1960-е: настольные калькуляторы**

К 1900 г. ранние механические калькуляторы, кассовые аппараты и счетные машины были перепроектированы с использованием электрических двигателей с представлением положения переменной как позиции шестерни. С 1930-х такие компании, как Friden, Marchant и Monroe начали выпускать настольные механические калькуляторы, которые могли складывать, вычитать, умножать и делить. Словом *computer* (буквально – «вычислитель») называлась должность – это были люди, которые использовали калькуляторы для выполнения математических вычислений. В ходе Манхэттенского проекта, будущий Нобелевский лауреат Ричард Фейнман был управляющим целой команды «вычислителей», многие из которых были женщинами-математиками, обрабатывающими дифференциальные уравнения, которые решались для военных нужд. А уже после окончания войны для реализации проекта водородной бомбы Станислав Мартин Улам был вынужден заниматься работой по переводу математических выражений в разрешимые приближения. (*Аналогичная ситуация имела место и в отечественном атомном и термоядерном проектах. Однако было ли создание бригад вычислителей практически полностью из женщин под руководством высококвалифицированного ученого основано только на данных разведки или для этого были другие соображения – определенно утверждать не могу. – Прим. Н. Д.*)

Первым полностью электронным настольным калькулятором был британский ANITA Mk.VII, который использовал дисплей на трубках «Nixie» и 177 миниатюрных тиатроновых трубок. В июне 1963 г. Friden представил EC-130 с четырьмя функциями. Он был полностью на транзисторах, имел 13-цифровое разрешение на 5-дюймовой электронно-лучевой трубке, и представлялся фирмой RPN на рынке калькуляторов по цене 2200 долл. В модель EC 132 были добавлены функция вычисления квадратного корня и обратные функции. В 1965 г. Wang Laboratories произвел LOCI-2, настольный калькулятор на транзисторах с 10 цифрами, который использовал дисплей на ЭЛТ Nixie и мог вычислять логарифмы.

Предвоенные годы ознаменовались появлением аналоговых вычислителей, а также первых электромеханических цифровых компьютеров.

### **Z-серия Конрада**

В 1936 г., работая в изоляции в нацистской Германии, Конрад Цузе (Zuse) начал работу над своим первым вычислителем серии Z, имеющим память и (пока ограниченную) возможность программирования. Созданная, в основном, на механической основе, но уже на базе двоичной логики, модель Z1 (рис. 1.3), завершенная в 1938 г., так и не заработала достаточно надежно, из-за недостаточной точности выполнения составных частей.

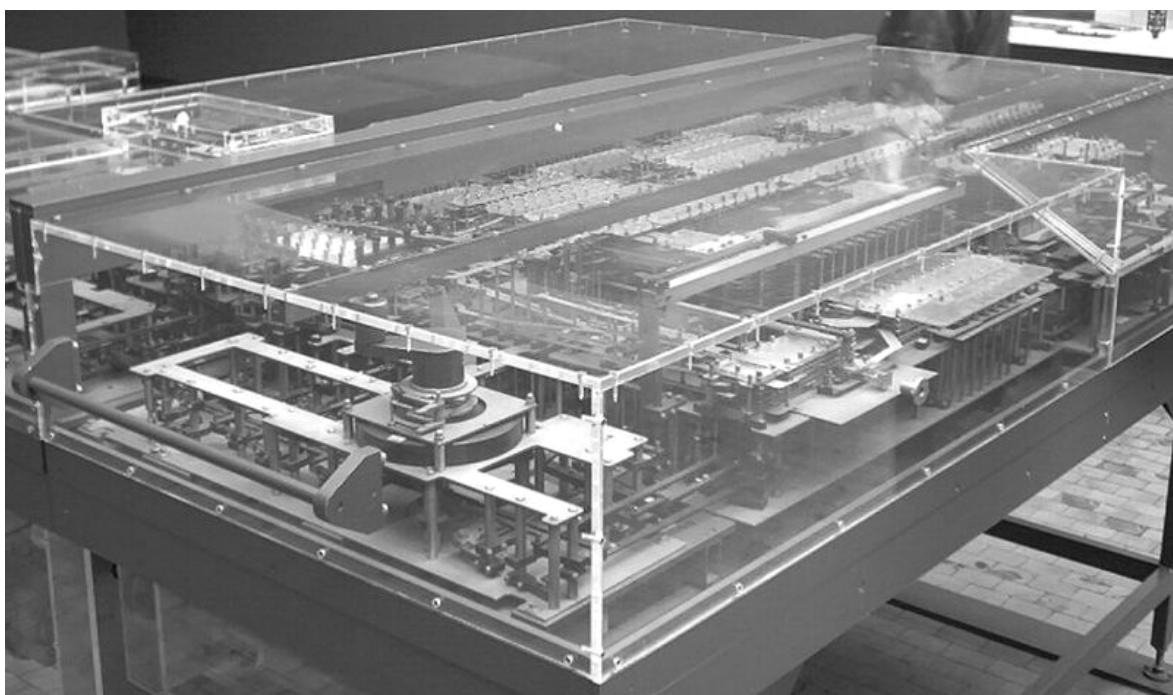


Рис. 1.3. Репродукция компьютера Цузе Z1  
в Музее техники, Берлин

Следующая машина Цузе – Z3 была завершена в 1941 г. Она была построена на телефонных реле и работала вполне удовлетворительно. Тем самым, Z3 стала первым работающим компьютером, управляемым программой. Во многих отношениях Z3 была подобна современным машинам, в ней впервые был представлен ряд новшеств, таких как арифметика с плавающей запятой. Замена сложной в реализации десятичной системы на двоичную, сделала машины Цузе более простыми и, а значит, более надежными. Считается, что это одна из причин того, что Цузе преуспел там, где Бэббидж потерпел неудачу.

Программы для Z3 хранились на перфорированной пленке. Условные переходы отсутствовали, но позже в 1990-х было теоретически доказано, что Z3 является универсальным компьюте-

ром (если игнорировать ограничения на размер физической памяти). В двух патентах 1936 г. Конрад Цузе упоминал, что машинные команды могут храниться в той же памяти, что и данные – предугадав тем самым то, что позже стало известно как архитектура фон Неймана и было впервые реализовано только в 1949 г. в британском EDSAC.

### ***Британский «Колосс»***

Во время Второй мировой войны, Великобритания достигла определенных успехов во взломе зашифрованных немецких переговоров. Код немецкой шифровальной машины «Энigma» был подвергнут анализу с помощью электромеханических машин, которые носили название «бомбы». Такая «бомба», разработанная Аланом Тьюрингом (Alan Turing) и Гордоном Уэлшманом (Gordon Welchman), исключала ряд вариантов путем логического вывода, реализованного электрически. Большинство вариантов приводило к противоречию, несколько оставшихся уже можно было протестировать вручную.

Немцы также разработали серию телеграфных шифровальных систем, несколько отличавшихся от «Энгмы». Машина Lorenz SZ 40/42 использовалась для армейской связи высокого уровня. Первые перехваты передач с таких машин были зафиксированы в 1941 г. Для взлома этого кода, в обстановке секретности, была создана машина «Колосс» (Colossus). Спецификацию разработали профессор Макс Ньюман (Max Newman) и его коллеги; сборка Colossus Mk I выполнялась в исследовательской лаборатории Почтового департамента Лондона и заняла 11 месяцев, работу выполнили Томми Флауэрс (Tommy Flowers) и др.

«Колосс» (рис. 1.4) стал первым полностью электронным вычислительным устройством. В нем использовалось большое количество электровакуумных ламп, ввод информации выполнялся с перфоленты. «Колосс» можно было настроить на выполнение различных операций булевой логики, но он не являлся тьюринг-полной машиной. Помимо Colossus Mk I, было собрано еще девять моделей Mk II. Информация о существовании этой машины держалась в секрете до 1970-х гг. Уинстон Черчилль лично подписал приказ о разрушении машины на части, не превышающие размером человеческой руки. Из-за своей секретности, «Колосс» не упомянут во многих трудах по истории компьютеров.

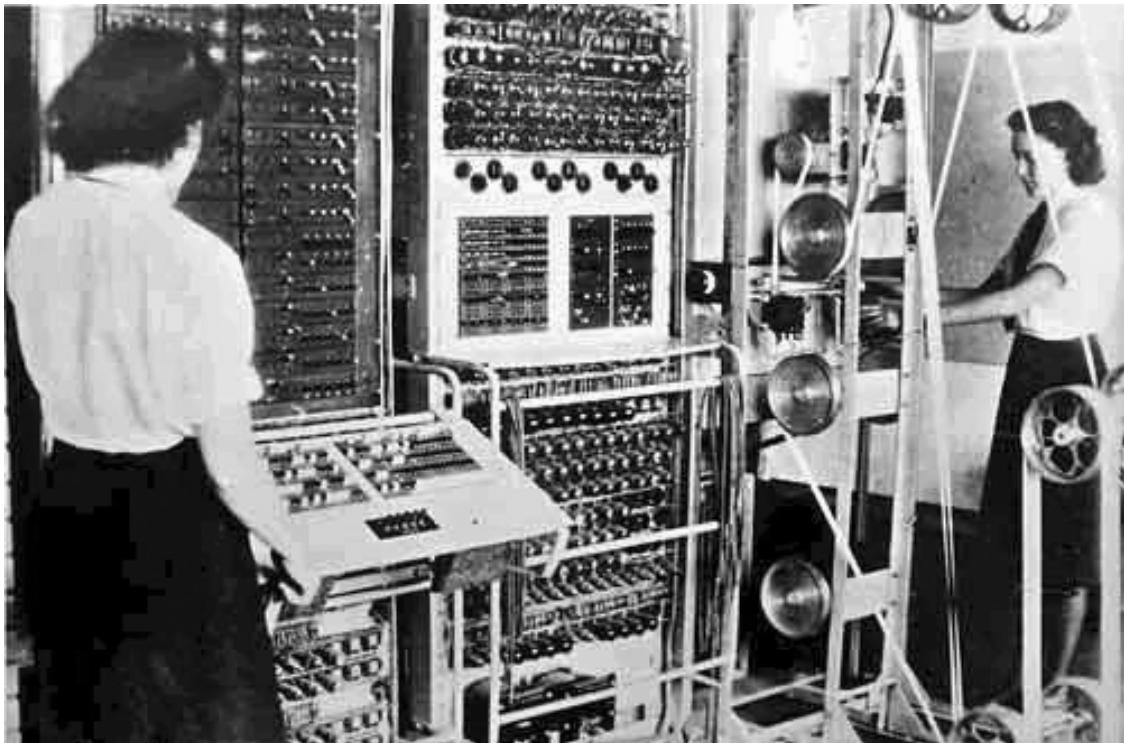


Рис. 1.4. Британский Colossus

Наиболее значительный вклад в создание основ вычислительной техники внесли три совершенно разных по стилю жизни человека: Норберт Винер, Аллан Тьюринг и Джон фон Нейман.



**Норберт Винер** (26 ноября 1894 г. – 18 марта 1964 г.) завершил свой первый фундаментальный труд «Кибернетику» в возрасте 54 лет. Подобная выдержка замечательным образом характеризует вечно сомневающегося во всем большого ученого. Думаю, читатель сумеет по достоинству оценить степень «выстраданности» материалов, преподнесенных в самой известной книге Винера, если вспомнит первые главы биографии «отца кибернетики». Наследие Винера незримо работает на каждого, кто садится за компьютер. АО «Бог и Голем» – на подъеме, и творение пока не бунтует против своего создателя и партнера.

Миллионам программистов и сотням миллионов пользователей Интернета известно слово «кибернетика», и они что-то слыхали о Норберте Винере: «то ли он компьютер изобрел, то ли Сеть придумал – короче, один из предшественников Билла Гейтса». На самом деле, вычислительные машины изобрели без Винера, Интернет появился, когда его уже не было на свете, а что касается магнатов бизнеса, то винеровские книги полны саркастических замечаний в их адрес.

Несомненно, вселенской славе Норберта Винера немало способствовали его наружность и личный стиль.

Про президента Гардинга говорили, что родная Республиканская партия выдвинула столь непримечательную персону за одно то, что «он обладал внешностью президента Соединенных Штатов». Изобре-

татель кибернетики был примечателен очень многим, но то, что он вдобавок ко всему этому обладал еще и внешностью великого ученого, отрицать не рискнет никто.

Винер идеально попадал в образ классического профессора из анекдота: бородка клинышком, очки с толстыми стеклами, невероятная неуклюжесть и неловкость, путаная и бессвязная речь. Отпечаток некоторых из этих качеств лежит даже на его трудах, включая и легендарную книгу «Кибернетика или управление и связь в животном и машине» (1948).

Лекции он якобы читал так. Подходил к доске, что-то писал на ней мелом и тут же, недовольно бормоча под нос: «Неверно, неверно», – стирал. Потом писал и стирал снова и снова. Через два часа произносил: «Теперь, пожалуй, все», и, не глядя на слушателей, выбегал из аудитории.

А вот самый расхожий из винеровских анекдотов. На дорожке между административным корпусом и столовой Винер встречает молодого сотрудника. Слово за слово, беседа затянулась. В конце концов Винер спрашивает: «Послушайте, а куда я шел – из столовой или в сторону столовой? В сторону столовой? А, так я, оказывается, еще не обедал!»

Многочисленность баек такого рода – верный признак популярности их героя среди учеников и коллег. Несмотря на чудаковатый, а попросту – несносный нрав, в котором сам Винер охотно и даже с некоторым самодовольствием признавался, число специалистов из разных областей знания, с которыми он не только дружил, но и выполнял совместные работы, впечатляет.

Еще больше впечатляет география этих совместных трудов. Норберт Винер подолгу работал в Англии и в Германии, в Китае и в Мексике. К началу 20-х гг., совсем еще молоденьким доктором наук, абсолютно неизвестным широкой публике, он был уже своим человеком в главных научных центрах Европы – ничуть не меньше, чем в родном Массачусетском технологическом институте.

Винер был учеником и другом британского философа Бертрана Рассела и создателя математического аппарата теории относительности Давида Гильberta, он близко сотрудничал с корифеем квантовой механики Максом Борном и мексиканским кардиологом Артуро Розенблютом. Легендарный в Америке Вэнивар Буш, строитель мостов между наукой, большим бизнесом и государством, один из отцов американского ВПК, конструктор и организатор производства быстродействующих вычислительных машин, тоже еще с 20-х гг. был приятелем и покровителем Норберта Винера.

Позднее, уже после Второй мировой войны, когда Винер решил сформулировать принципы кибернетики (в приблизительном переводе с греческого: навигация, управление) – научной дисциплины совсем новой и ни на какую другую в отдельности не похожей, то глу-

бокое знакомство с самыми разными сферами знаний оказалось ему неоценимую услугу.

Настолько же неоценимой была и услуга мирового научного сообщества. Оно давно знало Винера, уважало его, и странноватый математический трактат с амбициозными экскурсами в философию, биологию и социологию не показался коллегам выходкой дилетанта и не был проигнорирован, что вполне могло бы случиться, окажись его автором человек со стороны.

Дружное одобрение авторитетных ученых сразу же привлекло к «Кибернетике» внимание широких масс научной молодежи и почти сразу же – просто широких масс. Разумеется, рядовые люди таких книг не читают. Общественное мнение откликается на интеллектуальные озарения знатоков лишь тогда, когда готово услышать от них некие важные для себя вещи.

На рубеже 50-х гг. прошлого века такая готовность была налицо. Притом Винер сумел не только вызвать к себе общественный интерес, но и надолго удержаться в его фокусе. Корневая причина того, что его мысли так пришлись ко времени, не только в том, что он был ярким и успешным ученым, весьма ценимым людьми своего круга, но также и в том, что по рождению и воспитанию Норберт Винер не был и не мог быть человеком, сосредоточенным только на науке.

Примерно так («Экс-чудо», в смысле: бывший вундеркинд) называется один из томов винеровских мемуаров. Интеллектуальная жизнь чрезвычайно высокого накала была обеспечена ему на самом старте биографии. И даже еще раньше.

В конце позапрошлого века состоятельная еврейская семья, в которой ему суждено было родиться, переселилась из г. Белостока (Российская империя) в Соединенные Штаты. Ее глава, весьма известный уже филолог Лео Винер, будущий отец Норберта, стал профессором на кафедре славянских языков Гарвардского университета. Родившийся уже на новой родине в 1894, Норберт Винер, кажется, толком не говорил по-русски, хотя его отец, свободно владевший несколькими десятками языков, помимо прочих своих трудов, перевел с русского на английский двадцатичетырехтомное собрание сочинений Льва Толстого.

Норберта ждала малоприятная судьба вундеркинда. Буквально с колыбели его обучали чтению, прививали вкус к знаниям и требовали невероятных успехов. Вкус привили, и успехи были очевидны, но расплачиваться за них пришлось одиночеством: он учился в школе второй ступени – ребенком среди подростков, потом в университете – подростком среди взрослых. В 18 лет Винер защитил докторскую диссертацию в Гарварде.

Любопытно, что переход к размеренной профессиональной карьере наш герой совершил лишь семь лет спустя после этого знаменательного достижения, когда в 1919 г. устроился на кафедру математики Массачусетского технологического института (МТИ), где

(с перерывами на многочисленные зарубежные поездки) проработал всю оставшуюся жизнь, немало способствуя превращению довольно скромного поначалу высшего учебного заведения в гордость Америки и кузницу нобелевских лауреатов.

А между 1912 и 1919 г. Норберт Винер, как он потом выразился, «вкусил радость свободного труда». Он позанимался философией науки у Рассела в Кембридже, математикой – у Гильберта в Геттингене, с любопытством понаблюдал за работой Резерфорда, основателя ядерной физики. Затем вернулся на родину и неохотно провел недолгое время в элитном Колумбийском университете, показавшемся ему после Европы весьма провинциальным («бесконечные претензии, которые я предъявлял всем и каждому по поводу того, что со мной недостаточно считаются, и неумение играть в бридж сделали меня притчей во языцах всего общежития»).

Потом он несколько раз пробовал себя как преподаватель, работал на заводах «Дженерал электрик», немножко послужил в армии Соединенных Штатов («необходимость жить в бараках приводила меня в отчаяние»), прочувствовал даже вкус журналистского куска хлеба («несколько месяцев перебивался литературной поденщиной для газет») и только после этого стал тем профессором Винером из МТИ, в качестве которого и вошел в историю.

Дарвинизм, захвативший его воображение еще в раннем детстве, и бульварная литература ужасов, которой он увлекался подростком, философские аспекты теории относительности в рафинированном изложении Бертрана Рассела и тонкости составления таблиц стрельб, освоенные на артиллерийском полигоне, математические озарения, посещавшие его в обществе геттингенских светил, и киношки с немыми фильмами, где он отыхал душой от общества коллег, играющих в бридж, – все это со временем пошло в дело, стало материалом, из которого Винер потом вылепил «Кибернетику» и книги, ставшие ее продолжением.

Сами по себе счетные машины не были ни новинкой, ни экзотикой даже на заре научной карьеры Норберта Винера. Это и давным-давно вошедшие у нас в быт счеты, и вошедший менее давно, но зато во всем мире, арифмометр. Не говоря уже о не вошедшей в быт, но очень привлекавшей специалистов механической вычислительной машине Чарлза Бэббеджа, английского изобретателя-самородка XIX в.

Накануне Второй мировой войны в Америке уже появились быстродействующие (по тогдашним понятиям) цифровые вычислительные машины, использующие двоичную систему счисления.

Норберт Винер пришел к мысли, что именно такие машины – самый подходящий инструмент для быстрого решения дифференциальных уравнений в частных производных, которыми он занимался. Именно к таким уравнениям сводятся очень многие практические задачи. Первый шаг к кибернетике был сделан.

Вторым шагом стали изыскания Винера в военные годы. Он занимался разработкой систем управления стрельбой зенитной артиллерии, придумывая математические модели, которые выдавали прогноз будущего положения вражеского самолета, основываясь на наблюдениях за траекторией его полета в прошлом. Задачи такого рода стали затем типовыми для вычислительной техники.

Решая с группой коллег и сотрудников проблемы прогнозирования и связи, Винер нашел, что создаваемая им машинная система моделирует (для отдельно взятых ситуаций, конечно) ход мыслей человека.

Третьим шагом на пути к кибернетике стали совещания, устроенные Винером в Принстоне, куда он созывал нейрофизиологов, связистов и специалистов по компьютерной технике. Он убедил собравшихся, что нервная система человека является аналогом вычислительной машины и «специалисты в этих различных областях очень быстро начали говорить на одном языке».

Словарь этого языка – нарождающегося языка программистов – составился из терминов, позаимствованных из самых разных сфер знания. Именно тогда, к примеру, сугубо «человеческое» слово «память» стало применяться к машинным ресурсам хранения информации.

И, наконец, четвертым шагом стало написание «исчерпывающей книги», адресованной широкому кругу просвещенных людей. Эту мысль подал Винеру один из его приятелей, когда он в 1946 по какому-то делу заехал в Париж. Вскоре после этого книга была написана во время одной из длительных научных командировок Винера в Мексику.

Ключевая мысль «Кибернетики»: возможность передавать и получать информацию вовсе не является привилегией людей. Поэтому нет непреодолимой границы между естественным человеческим разумом и искусственным разумом машины.

«Когда «Кибернетика» стала научным бестселлером, все были поражены, и я не меньше других», – вспоминал потом Винер.

Вполне могло получиться так, что Норберт Винер не съездил бы вовремя в Париж, не получил бы столь удачного совета и не написал бы «Кибернетику». Сама по себе эта книга не содержала каких-либо новых открытий. Компьютерная техника стремительно развивалась без всяких подсказок. Что бы, собственно, изменилось, если бы и книга «Кибернетика» не вышла, и слова такого никто бы не придумал?

Есть такое выражение: «Книга, сделавшая эпоху». И к нашему, и к большинству других подобных случаев куда лучше подходит – «эпоха, сделавшая книгу». Эпоха буквально требовала «Кибернетику».

Немного спустя после Второй мировой войны – сначала по западную, а еще через несколько лет и по восточную сторону железно-

го занавеса – невероятно укрепилась вера в быстрое и простое решение всех человеческих проблем через развитие науки и техники. Отнюдь не только коммунисты и социалисты загорелись мыслью, что и само общество, и его развитие поддаются некоему «научному» моделированию.

В один могучий порыв сливались и обожествление чудотворцев-технократов, и взлет научно-фантастической беллетристики, и экзальтированный интерес к освоению космоса, и возвращение забытой с 20-х гг. романтической моды на великих ученых. В подобной атмосфере общественное мнение никак не могло пройти мимо такой жемчужины, как «искусственный разум».

Человек, который свел воедино разрозненные и не до конца осмыслиенные даже специалистами находки, придумал эффектное загадочное название и, поднявшись над научной прозой, провозгласил великую цель, просто не мог не стать суперзвездой («Чем-то вроде фигуры общественного значения», – тактично констатировал Норберт Винер). По своим научным достижениям Винер был одним из нескольких (возможно, трех-четырех) ученых, которые заслуживали занять это место. У одного из них, Андрея Колмогорова (достижениям которого сам Винер вполне отдавал должное), возможности в советской стране написать книгу с таким замахом, естественно, не было, даже если предположить, что было желание. Что же касается остальных «конкурентов» нашего героя, то он выделялся куда более широким, чем они, социальным и гуманитарным кругозором и, разумеется, страстью популяризатора. Поэтому следует признать, что мировая слава Норберту Винеру досталась по заслугам.

Разумеется, в конце 40-х «Кибернетику» в СССР прокляли, а с Винера сорвали маску – не помним уж какую. Но всего десять лет спустя у нас была опубликована сначала эта книга, а затем и прочие винеровские сочинения.

А летом 1960-го заморского гостя с распростертыми объятиями принимала в редакции журнала «Вопросы философии» сборная команда ученых и партийных пропагандистов во главе с «философом», академиком Митиным, истинным бичом и гонителем генетики и всех прочих лженаук.

Кажется, ни одна из научных дисциплин, предававшихся у нас анафеме, не была реабилитирована с такой расторопностью.

Что и понятно. Редко какие идеи были такозвучны советскому общественному порыву 50–60-х гг., как идеи «искусственного разума», «автоматизированных систем управления» и т. п. Вера в науку, технику, социальное программирование с помощью «не знающих ошибок» машин охватила буквально всех – от партократов хрущевского поколения до продвинутой молодежи.

Разница с Западом состояла в том, что эти идеи приобрели у нас еще более наивный и прямолинейный вид, чем у себя на родине. Выдвинулась целая плеяда не ведающих сомнений интеллектуалов-

энтузиастов (их западных собратьев озадаченный Винер называл «машинопоклонниками»).

«Творец и робот» – под таким целомудренным названием вышла в СССР последняя книга Норберта Винера «Акционерное общество «Бог и Голем»», написанная в 1963 г. – меньше чем за год до его смерти (Голем – глиняный истукан, созданный и оживленный Львом Бен Бецалелем, придворным алхимиком императора Рудольфа II).

В своем итоговом сочинении Винер уже не столько отстаивал идеи искусственного разума, сколько предупреждал о бедах, которые он может принести. Точнее, о бедах, которые способны принести упования на то, что этот разум решит те человеческие проблемы, с которыми люди не справились самостоятельно.

«Как же нам быть, если мы передадим решение важнейших вопросов в руки неумолимого чародея или, если угодно, неумолимой кибернетической машины, которой мы должны задавать вопросы правильно и, так сказать, наперед, еще не разобравшись полностью в существе того процесса, который вырабатывает ответы?.. Нет, будущее оставляет мало надежд для тех, кто ожидает, что наши новые механические рабы создадут для нас мир, в котором мы будем освобождены от необходимости мыслить. Помочь они нам могут, но при условии, что наши честь и разум будут удовлетворять требованиям самой высокой морали...»

Принято говорить, что взгляды Норберта Винера были «эклектичны», т. е. представляли некую случайную мешанину. Это не совсем так. Взгляды Винера – это взгляды эпохи, освоенные и переосмысленные либерально мыслящим, критически настроенным и широко образованным человеком. Если там и есть мешаница, то это мешаница времени. Он отдавал дань модным идеям века, да и сам оказался в числе их «авторов», но уж никогда не доводил их до абсурда.

Как и большинство американцев его круга, к тому же будучи обремененным воспоминаниями о детстве, проведенном в атмосфере отцовского диктата, Винер обращался к услугам психоаналитиков-фрейдистов. И хотя получил некоторое облегчение, скептически отмечал, что «ответы, которые они предлагали на все общечеловеческие и на мои личные вопросы, казались мне слишком бойкими и приходились как-то уж очень кстати».

Несомненно, его увлекала драматическая философия экзистенциалистов, очень популярных в левых интеллектуальных кругах на послевоенном Западе («я никогда не считал удовлетворенность и даже счастье самыми большими человеческими ценностями»). Но слишком уж упиваться беспросветностью было не в его стиле: «Никакое поражение не может лишить нас успеха, заключающегося в том, что в течение некоторого времени мы пребывали в этом мире, которому, кажется, нет до нас никакого дела».

Не в его стиле было и упиваться оптимизмом. Он не раз предупреждал «машинопоклонников», что моделировать с помощью ма-

шин экономические и социальные процессы – дело трудное и рискованное. Но все-таки саму мысль о таком моделировании не отвергал – это было бы уж чересчур вопреки духу того времени.

Следуя духу времени, он уделил массу внимания теме, которая тогда всех захватила, – перспективам бунта машин против людей. На рубеже 50–60-х было принято считать, что вычислительные машины вот-вот превратятся в человекоподобных существ («роботов»), которые, конечно, немедленно придушат своих создателей (идея, равно как и само название восходит к пьесе Карела Чапека «R. U. R.», написанной в 1920 г.).

Винер соглашался, что возможно и такое, но дальновидно добавлял, что не менее реальная угроза – это ошибки самих людей при обращении с машинами, например постановка перед ними непосильных задач. Эту часть советов отца кибернетики его последователи тогда проигнорировали.

Через девять лет после смерти Норберта Винера сторонники победившего в Чили военного режима начали свою экономическую реформу с того, что вдребезги разбили только что смонтированную огромную вычислительную машину, с помощью которой экономисты-социалисты собирались планировать и моделировать чилийскую экономику. Время кибернетических грез закончилось.

Каков же компьютерный мир после кибернетики? Хотя работы в том виде, в котором их ждали полвека назад, нынче встречаются, в основном, как детские игрушки, а к моделированию экономики и социальной жизни сейчас подходят куда осторожнее, чем 30–40 лет назад, но нынешний мир – подлинный мир компьютеров. Без них немыслимы ни техника, ни наука, ни новейшее искусство, ни просто быт современного человека.

Интернет – это не столько диалог с неким искусственным разумом, сколько небывалое доселе средство коммуникации, вход в несметное множество искусственных миров, сотворенных людьми с помощью компьютеров. Происходит не борьба людей и машин, о которой некогда с таким азартом рассуждали, а объединение тех и других во всемирную суперсистему. Много ли в этом от Норберта Винера и от его кибернетики? Не столь уж мало.

Уже в конце 40-х, имея дело с машинами без экрана, клавиатуры и мыши, участники организованного Винером семинара в МТИ пришли к чрезвычайно перспективной мысли, что вычислительная машина – это не только инструмент расчетов или прообраз искусственного разума, но и средство коммуникации.

Там же родилась идея интерактивности, без которой немыслим Интернет, – то есть такого режима, в котором человек и компьютер находятся в состоянии постоянного обмена информацией. Для решения этой проблемы придумали алфавитно-цифровую клавиатуру. То, что нынче самоочевидно, было тогда невероятным прорывом вперед.

Среди тех, кто собирался в те дни в МТИ пообщаться с Винером и друг с другом, были и будущие создатели первых проектов Сети, реализованных уже после его смерти.

Винер – культовая фигура – понемногу забывается. Наследие Винера-ученого незримо работает на каждого, кто сегодня садится за компьютер. АО «Бог и Голем» – на подъеме, и творение пока не бунтует против своего создателя и партнера.



Отец информатики и первый «хакер» **Алан Матисон Тьюринг** родился 23 июня 1912 г. в одной из лондонских гостиниц. Сегодня на ней висит мемориальная доска: «Здесь родился Алан Тьюринг, пионер кибернетики и взломщик кодов». Спустя год после родов мать Тьюринга вернулась в Индию, оставив Алана на попечение друга семьи, отставного полковника. Позже мальчика отдали в частный интернат. С раннего детства он увлекался наукой (в основном, химией, физикой и математикой). В 1935 г., будучи студентом Кембриджского королевского колледжа, Алан Тьюринг начинает в плотную заниматься созданием «мыслящей машины» – теоретического прообраза современного компьютера. Главную роль в развитии кибернетики и теории ЭВМ обычно отводят американскому профессору Норберту Винеру (Wiener). Значение же вклада Алана Тьюринга приижается, что обусловлено его скандальным концом.

В 1939 г. британское военное ведомство поставило перед Тьюрингом задачу разгадать секрет «Энигмы» – специального устройства, использовавшегося для шифровки радиограмм в германском военно-морском флоте и в «люфтваффе». Британская разведка раздобыла это устройство, но расшифровывать перехваченные радиограммы немцев не удавалось. Тьюрингу была предоставлена свобода действий. Он пригласил в свой отдел «Британской школы кодов и шифров» нескольких друзей-шахматистов. У него работал, например, Гарри Голомбек, ставший впоследствии известным судьей ФИДЕ и судивший финальный матч на звание чемпиона мира между Фишером и Спасским.

27-летнего Тьюринга и его коллег охватил настоящий спортивный азарт. Немцы считали «Энигму» неприступной. Сложность дешифровки усугублялась тем, что в закодированном слове получалось больше букв, чем в оригинале. Тем не менее, Тьюринг уже через полгода разработал устройство, названное им «Бомбой», которое позволяло читать практически все сообщения «люфтваффе». А спустя еще год был «взломан» и более сложный вариант «Энигмы», использовавшийся нацистскими подводниками. Это во многом предопределило успех британского флота.

Заслуги Алана Тьюринга были по достоинству оценены: после разгрома Германии он получил орден, был включен в научную группу, занимавшуюся созданием британской электронно-вычислительной машины. В 1951 г. в Манчестере начал работать один из первых в мире компьютеров. Тьюринг занимался разработкой программного обеспечения для него. Тогда он написал и первую шахматную программу для ЭВМ. Это был только алгоритм, потому что компьютера, способного выполнить эту программу, еще не существовало.

Шахматы были не единственным хобби этого человека. Он занимался бегом, кроссом по пересеченной местности. В 1947 г. на Всеанглийском марафоне занял почетное пятое место. Кроме работы в уни-

верситете, Тьюринг продолжал сотрудничать и с Департаментом кодов. Только теперь в центре его внимания были уже шифры советских резидентов в Англии. В 1951 г. он был избран членом королевского научного общества.

Жизнь Тьюринга сломал случай... Все рухнуло буквально в один день. В 1952 г. квартиру Тьюринга обокрали. В ходе расследования выяснилось, что это сделал один из друзей его сексуального партнера. Ученый никогда, в общем-то, не скрывал своей «нетрадиционной сексуальной ориентации», но и вызывающие себя не вел. Однако скандал с кражей получил широкую огласку, и в результате обвинение в «непристойном поведении» было выдвинуто против самого Тьюринга. 31 марта 1953 г. состоялся суд. Приговор предполагал выбор: либо тюремное заключение, либо инъекции женского гормона эстрогена (способ химической кастрации). Он выбрал последнее. Из Департамента кодов его уволили. Лишили допуска к секретным материалам. Правда, коллектив преподавателей Манчестерского университета взял Тьюринга на поруки, но он и в университете почти не появлялся.

8 июня 1954 г. Алан Мэтисон Тьюринг был найден мертвым в своем доме. Он покончил жизнь самоубийством, отравившись цианистым калием. Раствор цианида Тьюринг впрыснул в яблоко. Надкусив его, он скончался. Говорят, именно этот плод, найденный затем на ночном столике Алана, и стал эмблемой знаменитой компьютерной фирмы «Эппл». Впрочем, яблоко – это еще и библейский символ познания и греха...



**Джон фон Нейман** (28 декабря 1903 г. – 8 февраля 1957 г.) – американский математик. Внес большой вклад в создание первых ЭВМ и разработку методов их применения.

Родом из Венгрии, сын преуспевающего будапештского банкира, фон Нейман был продуктом той интеллектуальной среды, из которой вышли такие выдающиеся физики, как Эдвард Теллер, Лео Сциллард, Денис Габор и Юджин Вигнер. Джон выделялся среди них своими феноменальными способностями. В 6 лет он перебрасывался с отцом остротами на древнегреческом, а в 8 освоил основы высшей математики. В возрасте 20–30 лет, занимаясь преподавательской работой в Германии, он внес значительный вклад в развитие квантовой механики – краеугольного камня современной физики, и разработал теорию игр – метод анализа взаимоотношений между людьми, который нашел широкое применение в различных областях, от экономики до военной стратегии. На протяжении всей жизни он любил поражать друзей и учеников своей способностью производить в уме сложные вычисления. Он делал это быстрее всех, вооруженных бумагой, карандашом и справочниками. Когда же фон Нейману приходилось писать на доске, он заполнял ее формулами, а потом стирал их настолько быстро, что однажды кто-то из его коллег, понаблюдав за очередным

объяснением, пошутил: «Понятно. Это доказательство методом стирания».

Юджин Вигнер, школьный товарищ фон Неймана, лауреат Нобелевской премии, говорил, что его ум – это «совершенный инструмент, шестеренки которого подогнаны друг к другу с точностью до тысячных долей сантиметра». Это интеллектуальное совершенство было сдобрено изрядной долей добродушной и весьма привлекательной эксцентричности. В поездках он порой так глубоко задумывался о математических проблемах, что забывал, куда и зачем должен ехать, и тогда приходилось звонить на работу за уточнениями.

Фон Нейман настолько легко и непринужденно чувствовал себя в любой обстановке, без всяких усилий переключаясь от математических теорий к компонентам вычислительной техники, что некоторые коллеги считали его «ученым среди ученых», своего рода «новым человеком», что, собственно, и означала его фамилия в переводе с немецкого. Теллер как-то в шутку сказал, что он «один из немногих математиков, способных снизойти до уровня физика». Сам же фон Нейман не без юмора объяснял свою мобильность тем, что он родом из Будапешта: «Только человек, родившийся в Будапеште, может, войдя во вращающиеся двери после вас, выйти из них первым».

Интерес фон Неймана к компьютерам в какой-то степени связан с его участием в сверхсекретном Манхэттенском проекте по созданию атомной бомбы, который разрабатывался в Лос-Аламосе, штат Нью-Мексико. Тогда фон Нейман математически доказал осуществимость «имплозии» – взрывного способа детонации атомной бомбы. Позже он стал участником работ по водородной бомбе, создание которой требовало еще более сложных расчетов.

Однако фон Нейман понимал, что компьютер – это больше, чем простой калькулятор, что – по крайней мере, потенциально – он представляет собой универсальный инструмент для научных исследований. В июле 1954 г., меньше чем через год после того, как он присоединился к группе Моучли и Эккерта, фон Нейман подготовил отчет на 101 странице, в котором обощил планы работы над машиной EDVAC. Этот отчет, озаглавленный «Предварительный доклад о машине EDVAC» представлял собой прекрасное описание не только самой машины, но и ее логических свойств. Присутствовавший на докладе военный представитель Голдстейн размножил доклад и разослал ученым как США, так и Великобритании.

Благодаря этому «Предварительный доклад» фон Неймана стал первой работой по цифровым электронным компьютерам, с которым познакомились широкие круги научной общественности. Доклад передавали из рук в руки, из лаборатории в лабораторию, из университета в университет, из одной страны в другую. Эта работа обратила на себя особое внимание, поскольку фон Нейман пользовался широкой известностью в ученом мире. С того момента компьютер был признан объектом, представлявшим научный интерес. В самом деле, и по сей день ученые иногда называют компьютер «машиной фон Неймана».

Читатели «Предварительного доклада» были склонны полагать, что все содержащиеся в нем идеи, в частности, принципиально важное решение хранить программы в памяти компьютера, исходили от самого фон Неймана. Мало кто знал, что Моучли и Эккерт говорили о программах, записанных в памяти, по крайней мере, за полгода до появления фон Неймана в их рабочей группе; большинству неведомо было и то, что Алан Тьюринг, описывая свою гипотетическую универсальную машину, еще в 1936 г. наделил ее внутренней памятью. Не исключено, что фон Нейман читал классическую работу Тьюринга незадолго до войны.

Увидев, сколько шума наделал фон Нейман и его «Предварительный доклад», Моучли и Эккерт были глубоко возмущены. В свое время по соображениям секретности они не смогли опубликовать никаких сообщений о своем изобретении. И вдруг Голдстейн, нарушив секретность, предоставил трибуну человеку, который только-только присоединился к проекту. Споры о том, кому должны принадлежать авторские права на EDVAC и ENIAC, привели в конце концов к распаду рабочей группы.

В дальнейшем фон Нейман работал в Принстонском институте перспективных исследований, принимал участие в разработке нескольких компьютеров новейшей конструкции. Среди них была, в частности, машина, которая использовалась для решения задач, связанных с созданием водородной бомбы. Фон Нейман остроумно окрестил ее «Маньяк» (MANIAC, аббревиатура от Mathematical Analyzer, Numerator, Integrator and Computer – математический анализатор, счетчик, интегратор и компьютер). Фон Нейман был также членом комиссии по атомной энергии и председателем консультативного комитета BBC США по баллистическим ракетам.

Умер фон Нейман в возрасте 54 лет от саркомы.

## ЭНИАК

Американский ENIAC (рис. 1.5), который часто называют первым электронным компьютером общего назначения, публично доказал применимость электроники для масштабных вычислений. Это стало ключевым моментом в разработке вычислительных машин, прежде всего из-за огромного прироста в скорости вычислений, но также и по причине появившихся возможностей для миниатюризации. Созданная под руководством Джона Моучли (John Mauchly) и Дж. Преспера Эккерта (J. Presper Eckert) эта машина была в 1000 раз быстрее, чем все другие машины того времени. Разработка ЭНИАК продлилась с 1943 до 1945 г. и была запущена 14 февраля. (*Так что этот день принадлежит не только влюбленным, но и компьютерщикам.*) В то время, когда был предложен данный проект, многие исследователи были убеждены, что среди тысяч хрупких элек-

тровакуумных ламп многие будут сгорать настолько часто, что ЭНИАК будет слишком много времени простоять в ремонте, и тем самым, будет практически бесполезен. Тем не менее, на реальной машине удавалось выполнять несколько тысяч операций в секунду в течение нескольких часов, до очередного сбоя из-за сгоревшей лампы. ЭНИАК выполнял баллистические расчеты и потреблял мощность в 160 кВт.

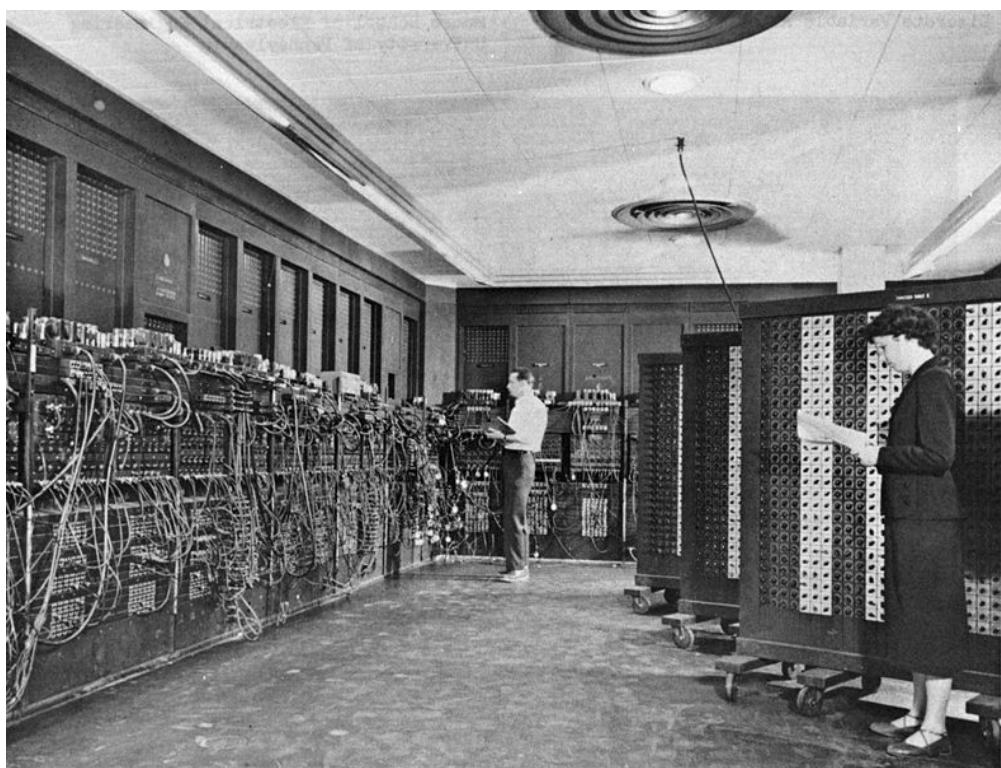


Рис. 1.5. ЭНИАК

ЭНИАК, безусловно, удовлетворяет требованию полноты по Тьюрингу. Но «программа» для этой машины определялась состоянием соединительных кабелей и переключателей – огромное отличие от машин с хранимой программой, появившихся позже. Тем не менее, в то время, вычисления, выполняемые без помощи человека, рассматривались как достаточно большое достижение, и целью программы было тогда решение только одной единственной задачи. (Улучшения, которые были завершены в 1948 г., дали возможность исполнения программы, записанной в специальной памяти, что сделало программирование более систематичным, менее «одноразовым» достижением.)

Переработав идеи Эккерта и Мочли, а также, оценив ограничения ЭНИАК, Джон фон Нейман написал широко цитируемый отчет, описывающий проект компьютера (EDVAC), в котором и программа, и данные хранятся в единой универсальной

памяти. Принципы построения этой машины стали известны под названием «архитектура фон Неймана» и послужили основой для разработки первых по-настоящему гибких, универсальных цифровых компьютеров.

### 1.3. Компьютеры с архитектурой фон Неймана

#### *Первое поколение*

Первой работающей машиной с архитектурой фон Неймана стал манчестерский «Baby» – Small-Scale Experimental Machine, созданный в Манчестерском университете в 1948 г.; в 1949 г. за ним последовал компьютер Манчестерский Марк I, который уже был полной системой, с трубками Уильямса и магнитным барабаном в качестве памяти, а также с индексными регистрами. Другим претендентом на звание «первый цифровой компьютер с хранимой программой» стал EDSAC, разработанный и сконструированный в Кембриджском университете. Заработавший менее чем через год после «Baby», он уже мог использоваться для решения реальных проблем. На самом деле, EDSAC был создан на основе архитектуры компьютера EDVAC, наследника ENIAC. В отличие от ENIAC, использовавшего параллельную обработку, EDVAC располагал единственным обрабатывающим блоком. Такое решение было проще и надежнее, поэтому такой вариант становился первым реализованным после каждой очередной волны миниатюризации. Многие считают, что Манчестерский Марк I (EDSAC, EDVAC) стал «Евой», от которой ведут свою архитектуру почти все современные компьютеры.

Первый универсальный программируемый компьютер в континентальной Европе был создан командой ученых под руководством Сергея Алексеевича Лебедева из Киевского института электротехники (СССР, Украина). ЭВМ МЭСМ (Малая электронная счетная машина) заработала в 1950 г. Она содержала около 6000 электровакуумных ламп и потребляла 15 кВт. Машина могла выполнять около 3000 операций в секунду. Другой машиной того времени была австралийская CSIRAC, которая выполнила свою первую тестовую программу в 1949 г.

В октябре 1947 г. директора компании Lyons & Company, британской компании, владеющей сетью магазинов и ресторанов, решили принять активное участие в развитии коммерческой разработки компьютеров. Компьютер LEO I начал работать

в 1951 г. и впервые в мире стал регулярно использоваться для рутинной офисной работы.

Машина Манчестерского университета стала прототипом для Ferranti Mark I. Первая такая машина была доставлена в университет в феврале 1951 г., и, по крайней мере, девять других были проданы между 1951 и 1957 гг.

В июне 1951 г. UNIVAC 1 был установлен в Бюро переписи населения США. Машина была разработана в компании Remington Rand, которая, в конечном итоге, продала 46 таких машин по цене более чем в 1 млн долл. за каждую. UNIVAC был первым массово производимым компьютером; все его предшественники изготавливались в единичном экземпляре. Компьютер состоял из 5200 электровакуумных ламп и потреблял 125 кВт энергии. Использовались ртутные линии задержки, хранящие 1000 слов памяти, каждое по 11 десятичных цифр плюс знак (72-битные слова). В отличие от машин IBM, оснащаемых устройством ввода с перфокарт, UNIVAC использовал ввод с металлизированной магнитной ленты стиля 1930-х, благодаря чему обеспечивалась совместимость с некоторыми существующими коммерческими системами хранения данных. Другими компьютерами того времени использовался высокоскоростной ввод с перфоленты и ввод/вывод с использованием более современных магнитных лент.

Первой советской серийной ЭВМ стала «Стрела», производимая с 1953 г. на Московском заводе счетно-аналитических машин. «Стрела» относится к классу больших универсальных ЭВМ (Мейнфрейм) с трехадресной системой команд. ЭВМ имела быстродействие 2000–3000 операций в секунду. В качестве внешней памяти использовались два накопителя на магнитной ленте емкостью 200 000 слов, объем оперативной памяти – 2048 ячеек по 43 разряда. Компьютер состоял из 6200 ламп, 60 000 полупроводниковых диодов и потреблял 150 кВт энергии.

В 1955 г. Морис Уилкс изобретает микропрограммирование, принцип, который позднее широко используется в микропроцессорах самых различных компьютеров. Микропрограммирование позволяет определять или расширять базовый набор команд с помощью встроенных программ (которые носят названия микропрограмма или firmware).

В 1956 г. IBM впервые продает устройство для хранения информации на магнитных дисках – RAMAC (Random Access

Method of Accounting and Control). Оно использует 50 металлических дисков диаметром 24 дюйма, по 100 дорожек с каждой стороны. Устройство хранило до 5 Мб данных и стоило по 10 000 долл. за 1 Мб. (В 2006 г. подобные устройства хранения данных – жесткие диски – стоят менее 0,001 долл. за Мб, в 2011 г. – менее 0,0001 долл. за 1 Мб.)

### **1950-е – начало 1960-х: второе поколение**

Следующим крупным шагом в истории компьютерной техники, стало изобретение транзистора в 1947 г. Они стали заменой хрупким и энергоемким лампам. О компьютерах на транзисторах обычно говорят как о «втором поколении», которое доминировало в 1950-х и начале 1960-х. Благодаря транзисторам и печатным платам, было достигнуто значительное уменьшение размеров (рис. 1.6) и объемов потребляемой энергии, а также повышение надежности. Например, IBM 1620 на транзисторах, ставшая заменой IBM 650 на лампах, была размером с офисный стол. Однако компьютеры второго поколения по-прежнему были довольно дороги и поэтому использовались только университетами, правительствами, крупными корпорациями.

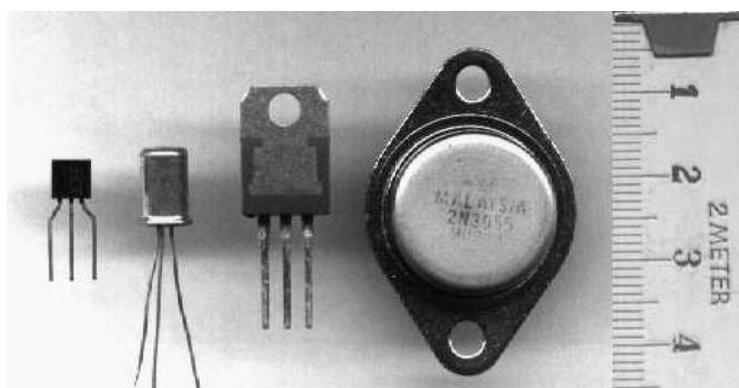


Рис. 1.6. Различные транзисторы в масштабе



Типичной в этом смысле является история Вычислительного центра Иркутского госуниверситета. Центр был создан в 1959 г. в числе первых пяти центров в вузах страны. Большую роль в его организации сыграл профессор И. А. Парфянович, бывший тогда деканом физико-математического факультета.

В некотором роде предтечей Вычислительного центра в Иркутском госуниверситете являлась научно-исследовательская лаборатория математических приборов, выросшая на основе научно-исследовательских и конструкторских работ проводившихся в университете с 1949 г. Возглавлял лабораторию Заслуженный изобрета-

тель РФ, канд. физ.-мат. наук А. Б. Штыкан. Абрам Борисович при Сталине был репрессирован и только благодаря личному поручительству профессоров И. А. Парфяновича и В. В. Васильева он был принят на работу в ИГУ и допущен к спецтематике. В 1958 г. в составе лаборатории

было

4 сотрудника и на ее нужды было ассигновано 2 тыс. руб. из госбюджета, в 1965 г. финансирование составляло 34 тыс. руб. госбюджета и 40 тыс. руб. хоздоговоров, при штате 9 единиц. Лаборатория разрабатывала новые математические приборы и методику их применения для нужд конструкторских бюро Министерства авиапромышленности, а также графические методы решения дифференциальных и интегральных уравнений. Здесь впервые в СССР были созданы опытные партии математических приборов, по многим показателям превосходившие зарубежные образцы. В 1965 г. сотрудники лаборатории А. Б. Штыкан,

В. Е. Войцеховский, В. С. Петрушин были награждены медалями ВДНХ СССР, а университет был удостоен двух дипломов. Лаборатория прекратила свое существование вскоре после ухода на покой А. Б. Штыкан.

Первым начальником Вычислительного центра стал выпускник физмата В. И. Бурков, в 1962 г. его сменил другой выпускник физмата В. Б. Манцивода, бессменно руководивший ВЦ вплоть до его ликвидации. В момент создания центра на нем работало шесть человек (В. И. Бурков, В. С. Сухарев, Ю. Е. Катышевцев). Технической базой являлась ЭВМ «Урал-1», объем научных исследований составлял 17 тыс. руб. Вычислительный центр университета быстро развивался. К 1968 г. на ВЦ работало уже 89 сотрудников, стоимость материальной базы составляла 620 тыс. руб., а объем хоздоговорных НИР 200 тыс. руб. В 1978 г. объем НИР Вычислительного центра достигал 870 тыс. руб. В его состав входило 5 лабораторий: исследования систем управления, экономико-математических исследований, дифференциальных уравнений, автоматизации программирования, математической статистики и теории вероятностей, а также 3 отдела и 5 групп, объединяющих 254 штатных сотрудника. Вычислительный центр был оснащен пятью ЭВМ: БЭСМ-4, М-222, ОДРА-1304, Минск-32, НАИРИ-С и АВМ МЛ-18. Стоимость материальной базы составляла 2,2 млн руб. Коллектив ВЦ вел исследования в области решения дифференциальных уравнений, физики ионосферы и распространения радиоволн, оптимального управления и создания автоматизированных систем управления промышленностью и строительством. Результаты его исследований широко использовались для решения различных научных и технических задач. Сотрудниками ВЦ была создана методика комплексной обработки экспериментальных данных и составления геологических карт с помощью ЭВМ, построена автоматическая система управления промышленным предприятием, по алгоритмам и программам, разработанным на ВЦ, регулярно проводи-

лись расчеты сетевых графиков для строительных организаций Иркутской и Читинской областей, Бурятской АССР. На ВЦ проводились учебная и производственная практики студентов университета, института народного хозяйства, политехнического и педагогического институтов.

К ноябрю 1991 г. на ВЦ имелись две машины общего пользования ЕС-1061 и ЕС-1046 и обслуживались 173 персональных компьютера различных марок; на базе этой техники было создано 5 дисплейных классов. На Вычислительный центр возлагались задачи формирования технической политики по оснащению учебного процесса и научной работы средствами вычислительной техники, организации обслуживания и ремонта ЭВМ, оказание методической помощи в установке и эксплуатации программного обеспечения вычислительной техники.

С наступлением эры персональных компьютеров большие ЭВМ стали исчезать и Вычислительный центр университета утратил свое значение, сохранившись лишь номинально. Большая часть функций ВЦ перешла к Центру новых информационных технологий.

В Иркутском научном центре СО АН СССР Вычислительный центр был организован в 1980 г. Его директорами были: В. М. Матросов, академик, лауреат Государственной премии (1980–91 гг.), С. Н. Васильев, академик, лауреат Государственной премии (1991–2006 гг.), И. В. Бычков, член-корреспондент РАН (с 2006 г.).

Вычислительный центр активно развивался и был преобразован в Институт динамики систем и теории управления СО РАН.

Основные научные направления ИДСТУ:

- научные основы теории и методов управления;
- математические методы и информационные технологии исследования динамических систем.

Учеными института созданы научные школы, снискавшие мировую известность своими работами в области теории устойчивости, логико-динамических систем и интеллектного управления, дифференциальных включений, алгебро-дифференциальных систем, математической теории систем нелинейных интегро-дифференциальных уравнений.

На базе теории многозначных отображений разработаны методы нелинейного анализа сложных динамических систем, в том числе в функциональных пространствах, применяющиеся в вариационном исчислении, механике, управлении.

Созданы и внедрены методы математического моделирования, оптимального и адаптивного управления, многокритериального принятия решений, автоматического доказательства и синтеза теорем, методы создания новых информационных технологий.

Разработаны интеллектуализированные инструментальные и прикладные программные системы, в том числе: методо- и проблемноориентированные пакеты программ для анализа математических

моделей систем технической, технологической, организационной, социально-эколого-экономической природы; пакеты программ для построения и идентификации моделей, синтеза параметров и управлений; оболочки экспертных систем; инструментальная среда организации распределенных вычислений; корпоративная гибридная интеллектная геоинформационная система.

Разработаны современные информационные технологии для создания систем поддержки принятия решений, в том числе в органах государственной власти и местного самоуправления.

Институт выступает Центром коллективного пользования вычислительных, информационных и коммуникационных ресурсов в ИНЦ СО РАН и шире, выполняя функции разработки, эксплуатации, администрирования и развития информационных и телекоммуникационных ресурсов, функции Суперкомпьютерного центра, а также Иркутского ГИС-центра СО РАН.

«Сетунь» была первым компьютером на основе троичной логики, разработанным в 1958 г. в Советском Союзе.

В 1959 г. на основе транзисторов IBM выпустила мейнфрейм IBM 7090 и машину среднего класса IBM 1401. Последняя использовала перфокарточный ввод и стала самым популярным компьютером общего назначения того времени: было выпущено 12 тыс. экземпляров этой машины. В ней использовалась память на 4000 символов (позже увеличенная до 16 000 символов). Многие аспекты этого проекта были основаны на желании заменить перфокарточные машины, которые широко использовались начиная с 1920-х до самого начала 1970-х гг.

В 1960 г. IBM выпустила транзисторную IBM 1620, изначально только перфоленточную, но вскоре обновленную до перфокарт. Модель стала популярна в качестве научного компьютера, было выпущено около 2000 экземпляров. В машине использовалась память на магнитных сердечниках объемом до 60 000 десятичных цифр.

В том же 1960 г. DEC выпустила свою первую модель – PDP-1, предназначенную для использования техническим персоналом в лабораториях и для исследований.

В 1961 г. Burroughs Corporation выпустила B5000, первый двухпроцессорный компьютер с виртуальной памятью. Другими уникальными особенностями были стековая архитектура, адресация на основе дескрипторов, и отсутствие программирования напрямую на языке ассемблера.

Первыми советскими серийными полупроводниковыми ЭВМ стали «Снег» и «Весна», выпускаемые с 1964 по 1972 г. Пиковая производительность ЭВМ «Снег» составила 300 000 операций в секунду. Машины изготавливались на базе транзисторов с тактовой частотой 5 МГц. Всего было выпущено 39 ЭВМ.

Наилучшей отечественной ЭВМ 2-го поколения считается БЭСМ-6, созданная в 1966 г. В архитектуре БЭСМ-6 впервые был широко использован принцип совмещения выполнения команд (до 14 одноадресных машинных команд могли находиться на разных стадиях выполнения). Механизмы прерывания, защиты памяти и другие новаторские решения позволили использовать БЭСМ-6 в мультипрограммном режиме и режиме разделения времени. ЭВМ имела 128 Кб оперативной памяти на ферритовых сердечниках и внешнюю память на магнитных барабанах и ленте. БЭСМ-6 работала с тактовой частотой 10 МГц и рекордной для того времени производительностью – около 1 млн операций в секунду. Всего было выпущено 355 ЭВМ.

### *Третье и четвертое поколение*

Бурный рост использования компьютеров начался с так называемым «третьим поколением» вычислительных машин. Начало этому положило изобретение интегральных схем (рис. 1.7), которые независимо друг от друга изобрели Джек Килби и Роберт Нойс. Позже это привело к изобретению микропроцессора Тэдом Хоффом (компания Intel).

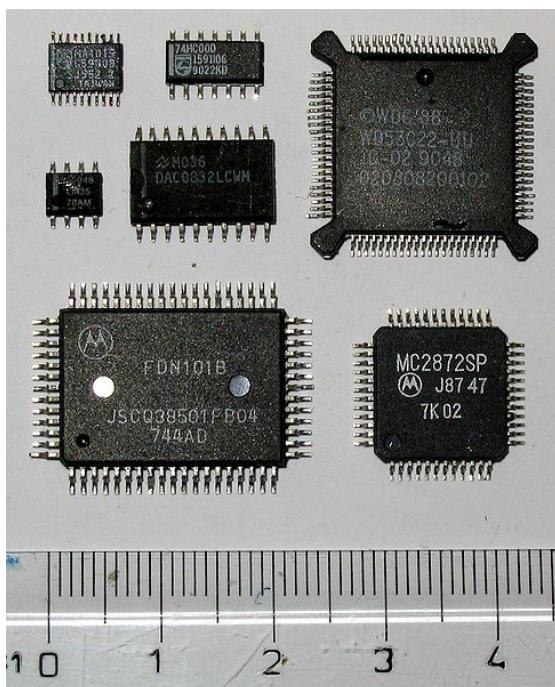


Рис. 1.7. Интегральные микросхемы, содержащие многие сотни миллионов транзисторов

В течение 1960-х гг. наблюдалось определенное перекрытие технологий 2-го и 3-го поколений. В конце 1975 г., в Sperry Univac продолжалось производство машин 2-го поколения, таких как UNIVAC 494.

Появление микропроцессоров привело к разработке **микрокомпьютеров** – небольших недорогих компьютеров, которыми могли владеть небольшие компании или отдельные люди. Микрокомпьютеры, представители четвертого поколения, первые из которых появился в 1970-х, стали повсеместным явлением в 1980-х и позже. Стив Возняк, один из основателей Apple Computer, стал известен как разработчик первого массового домашнего компьютера, а позже – первого персонального компьютера. Компьютеры на основе микрокомпьютерной архитектуры, с возможностями, добавленными от их больших собратьев, сейчас доминируют в большинстве сегментов рынка.

**Персональный компьютер** – компьютер (вычислительная машина) предназначенный для личного использования, цена, размеры и возможности которого удовлетворяют запросы большого количества людей.

В активное употребление термин был введен в конце 1970-х гг. компанией Apple Computer для своего компьютера Apple II и впоследствии перенесен на компьютеры IBM PC. Некоторое время персональным компьютером называли любую машину, использующую процессоры Intel и работающую под управлением операционных систем DOS, OS/2 и первых версий Microsoft Windows. С появлением других процессоров, поддерживающих работу перечисленных программ, таких как AMD, Cyrix (ныне VIA), название стало иметь более широкую трактовку. Курьезным фактом стало отрицание принадлежности к классу персональных компьютеров вычислительных машин Amiga и Macintosh, долгое время использовавших альтернативную компьютерную архитектуру.

В Советском Союзе вычислительные машины, предназначенные для личного использования, носили официальное название персональных электронных вычислительных машин (ПЭВМ). В терминологии, принятой в российских стандартах,

это словосочетание и сегодня указывается вместо используемого де-факто названия «Централизованные вычисления».

До появления первых персональных компьютеров приобретение и использование вычислительных машин обходились очень дорого, что исключало их владение частными лицами. Компьютеры можно было найти в больших корпорациях, университетах, исследовательских центрах, государственных учреждениях и, конечно же, у военных.

### ***Конструкторы и самодельные компьютеры***

Создание персональных компьютеров стало возможным в семидесятых годах, когда любители стали собирать свои собственные компьютеры иногда лишь для того, чтобы в принципе иметь возможность похвастаться таким необычным предметом. Ранние персональные компьютеры почти не имели практического применения и распространялись очень медленно.

Родившись в качестве жаргонизма, синонима названия микрокомпьютер, наименование персональный компьютер постепенно меняло свое значение. Так, первое поколение персональных компьютеров можно было приобрести только в виде комплекта деталей, а иногда даже просто обычновенной инструкции для сборки. Сама сборка, программирование и наладка системы требовали определенного опыта, навыка работы с машинными кодами или ассемблером. Чуть позднее, когда подобные устройства стали привычны и начали продаваться готовыми, вместе с некоторым набором адаптированных программ, в обиход вошло название домашний компьютер.

### ***Первые фирменные домашние ПК***

Домашние компьютеры стали более удобными и требовали от своих пользователей уже гораздо меньшего количества технических навыков. В августе 1981 г. IBM выпустила компьютерную систему IBM PC (фирменный номер модели IBM 5150), положившую начало эпохе современных персональных компьютеров.

Уже через 4 года, 23 июля 1985 г. появился первый в мире мультимедийный персональный компьютер Amiga (Amiga 1000) и персональный компьютер Apple Macintosh. Персональные компьютеры Amiga, наряду с макинтошами, оставались самыми популярными и продаваемыми машинами для домашнего ис-

пользования (IBM PC доминировали в сфере копторских компьютеров, и здесь их продажи были несравненно выше) вплоть до 1995 г.

В 1995 г. произошло два ключевых события в истории ПК: банкротство корпорации Commodore и появление Microsoft Windows 95, приблизившей PC-совместимые компьютеры к тем возможностям, которые существовали на Commodore Amiga и Apple Macintosh. Сегодня возможности мультимедиа доступны в каждом доме и на любой аппаратной платформе.

Как правило, один экземпляр персонального компьютера используется только одним, или, в крайнем случае, несколькими пользователями (например, в семье). В соответствии со своим назначением, он обеспечивает работу наиболее часто используемых приложений, таких как текстовые процессоры, веб-браузеры, почтовые программы, мессенджеры, мультимедийные программы, компьютерные игры, графические редакторы, среды разработки программного обеспечения и т. п. Для упрощения взаимодействия с людьми подобные программы оснащаются удобным графическим интерфейсом.

По данным аналитической компании IDC, в 2005 г. мировые поставки персональных компьютеров составили 202,7 млн штук (рост на 15,8 % по сравнению с 2004 г.).

В 2007 г., по данным IDC, продажи персональных компьютеров в мире составили 269 млн штук (рост по сравнению с предыдущим годом на 14,3 %). Лидером по продажам ПК стала компания Hewlett-Packard (около 18,2 % всех поставок).

За 25 лет истории персональных компьютеров произошли следующие ключевые изменения в их архитектуре: появление extended memory (более 1 Мб); переход с 16-битных на 32-битные процессоры; замена шины ISA на шину PCI; внедрение шины AGP; появление стандарта ATX; переход с шины AGP (и PCI) на PCI-Express; внедрение многоядерных процессоров; переход с 32-битных на 64-битные процессоры.

**Мобильные (носимые) ПК**  
Ноутбуки «Компактные компьютеры» (рис. 1.8), содер-



Рис. 1.8. IBM THINKPAD R51

жащие все необходимые компоненты (в том числе монитор) в одном небольшом корпусе, как правило, складывающемся в виде книжки. Приспособлены для работы в дороге, на небольшом свободном пространстве. Для достижения малых размеров в них применяются специальные технологии: специально разработанные специализированные микросхемы (ASIC), ОЗУ и жесткие диски уменьшенных габаритов, компактная клавиатура, не содержащая цифрового поля, внешние блоки питания, минимум гнезд расширения.

Как правило, содержат развитые средства подключения к проводным и беспроводным сетям, встроенное мультимедийное оборудование (динамики, часто микрофон и веб-камеру). Вычислительная мощность обычно раза в два уступает настольным ПК при сравнимой цене, однако, объем памяти и накопителей может быть меньше. Очень компактные модели не содержат CD/DVD-накопителя.

Посредством специальных доков ноутбуки могут превращаться в настольные ПК: вставляя ноутбук в такой док, пользователь подключает к вычислительным устройствам ноутбука внешний большой экран, полноразмерную клавиатуру, мышь, динамики и порты подключения.

### ***Планшетные ПК***

Аналогичны ноутбукам, но содержат чувствительный к нажатию экран и не содержат механической клавиатуры (рис. 1.9). Ввод текста и управление осуществляются через экранный интерфейс, часто доработанный специально для удобного управления пальцами. Некоторые модели могут распознавать рукописный текст, написанный на экране.



Рис. 1.9. Планшетный ноутбук Toshiba 3500

Чаще всего корпус не раскрывается, как у ноутбуков, а экран расположен на внешней стороне верхней поверхности. Бывают и комбинированные модели, у которых корпус может поворачиваться на оси и раскрываться, предоставляя доступ к расположенной внутри клавиатуре.

Вычислительная мощь уступает настольным ПК, так как для длительной работы без внешнего источника питания приходится использовать энергосберегающие процессоры, накопители и экран.

### **Карманные ПК (PDA)**

КПК – сверхпортативные устройства, умещающиеся в кармане (рис. 1.10). Управление ими, как правило, происходит с помощью небольшого по размерам и разрешению экрана, чувствительного к нажатию пальца или специального пера (стилуса), а клавиатура и мышь отсутствуют. Некоторые модели, впрочем, содержат миниатюрную фиксированную или выдвигающуюся из корпуса клавиатуру.



Рис. 1.10. Карманные ПК. Используются сверхэкономичные процессоры и флэш-накопители небольшого объема, поэтому их вычислительная мощь несопоставима с настольными ПК. Тем не менее, они содержат все признаки персонального компьютера: процессор, накопитель, оперативную память, монитор, операционную систему, прикладное ПО и даже игры.

Все более популярными становятся КПК, содержащие функции мобильного телефона (коммуникаторы). Встроенный коммуникационный модуль позволяет не только совершать звонки, но и подключаться к Интернету в любой точке, где есть сотовая связь совместимого формата (GSM/GPRS, CDMA).

### **Нестандартные конструкции ПК**

#### **Баребоны (Barebone) –**

компьютеры, строящиеся пользователем для выполнения определенных задач (обычно в качестве мультимедийной станции). В продажу поступают в виде так называемых «скелетных» баз в составе корпуса, материнской платы и системы охлаждения. Материнская плата,

разрешение экрана невелико, как правило 320x400 (экран может использоваться и боком, тогда разрешение становится 400x320), в некоторых моделях – 640x480 (так называемое VGA-разрешение).

В таких устройствах используются сверхэкономичные процессоры и флэш-накопители небольшого объема, поэтому их вычислительная мощь несопоставима с настольными ПК. Тем не менее, они содержат все признаки персонального компьютера: процессор, накопитель, оперативную память, монитор, операционную систему, прикладное ПО и даже игры.



Рис. 1.11. Компьютер формата BAREBONE

как правило, оснащена встроенной звуковой и видеокартой. Выбор конфигурации и соответственно комплектующих в виде дисковых накопителей, памяти и периферии, а также других устройств (тв-тюнера, дополнительной видеокарты и т. п.) ложится на пользователя. Как правило, «баребоны» имеют меньшую высоту корпуса (рис. 1.11) и, как следствие, уменьшенный внутренний объем, а также усовершенствованную систему охлаждения, отличающуюся низкими показателями производимого шума.

Ряд компаний производит **защищенные ПК** – компьютеры, обладающие устойчивостью к агрессивным средам: сильной вибрации, ударам, большой запыленности, влажности – условиям, в которых обычные ПК быстро бы вышли из строя. Как правило, устойчивые ПК выпускаются в формате ноутбуков, более тяжелых и больших по размерам, чем обычные. Их стоимость также значительно выше.

**Промышленные ПК** предназначены для решения задач промышленной автоматизации. Отличаются стойкостью к различным внешним воздействиям, увеличенным жизненным циклом изделия, возможностью подключения к промышленным сетям (PROFINet, PROFIBUS).

Для использования в жилых комнатах используются конструкции ПК, производящие минимум шума или работающие совершенно бесшумно – так называемые **тихие ПК**. Такие модели можно оставлять включенными постоянно, что дает ряд преимуществ: отсутствует период загрузки, компьютер всегда готов к работе и может постоянно отслеживать новую почту или мгновенные сообщения для пользователя. На рис. 1.12 представлен бесшумный компьютер Zonbu. В целом, постоянно включенный ПК может выполнять ряд особых задач: быть мультимедийной станцией (воспроизводить видео-, аудиозаписи, интернет-радио); работать как видеомагнитофон: записывать передачи телевидения или радио для последующего просмотра или прослушивания в удобное время; служить P2P-клиентом (обмениваться файлами в автоматическом режиме с другими компьютерами) служить домашним или даже интернет-сервером;

следить за температурой или присутствием с помощью соответствующих датчиков или фото-, видеокамеры (web-камеры).



Рис. 1.12. БЕСШУМНЫЙ КОМПЬЮТЕР

Чтобы сделать ПК тихим, используется несколько технологий: жидкостное охлаждение; малошумные вентиляторы с лопастями специальной формы; процессоры, не требующие активного охлаждения (ввиду их маломощности это не всегда приемлемое решение); малошумные жесткие диски, а также

установка их на шумопоглощающие крепления; замена жестких дисков на флэш-память или удаленные дисковые массивы.

Большинство современных персональных компьютеров способны снижать потребляемую мощность и уровень шума в моменты низкой нагрузки, но для постоянной тихой работы не обойтись без применения специальных технологий, указанных выше.

Некоторые компании предлагают ПК значительно меньше по размерам, чем стандартные (**Компактные ПК**). Такие модели занимают меньше места в рабочей или домашней обстановке, легче вписываются в интерьер, зачастую красивее по дизайну и тише обычных ПК. Собрать компактную модель по силам и обыкновенному пользователю, если подобрать специальные модели корпуса и материнской платы, однако стоимость такого ПК будет выше, чем обычного. В то же время компании, занимающиеся этим профессионально, нередко достигают выигрыша в цене и удобстве эксплуатации.

Одними из первых компактных компьютеров были модели Apple Macintosh в 1984 г., которые представляли собой моноблок: системные компоненты в одном корпусе с монитором. Значительно позже идея была продолжена в моделях eMac и iMac. Аналогичные по формату компьютеры пытались выпускать и другие компании (напр., eMachines), но без особого успеха.

Параллельно технологии миниатюризации отрабатывались на тонких клиентах, которые обычно невелики по размерам и весу.

Развитие GNU/Linux и другого ПО с открытым кодом придало компактным моделям новое дыхание, и сейчас многие фирмы предлагают компактные ПК (Linutop) или целые комплексы на их основе (Zonbu).

Вершины миниатюризации достигла компания Apple со своей моделью Mac mini (рис. 1.13). Этот чрезвычайно компактный компьютер (по размерам как небольшая но толстая книга) обладает тем не менее адекватной вычислительной мощностью (процессор Intel Core Duo) и работает совершенно бесшумно.



Рис. 1.13. Mac mini

Существует несколько конкурирующих между собой проектов компактных и очень дешевых в производстве персональных компьютеров, предназначенных для развивающихся стран: OLPC, VIA

pc-1 Initiative, Intel Classmate PC, ASUS Eee PC и др. Однако ущербление и миниатюризация достигнуты дорогой ценой: их вычислительная мощность несопоставима с мощностью полноценного ПК.

Технологии, уменьшающие габариты ПК: материнская плата уменьшенного формата (micro-ATX и др.); корпус маленького формата; DVD- и CD-накопители со щелевой загрузкой; меньшее количество отсеков для жестких дисков и DVD/CD, зачастую всего один; меньше коннекторов USB, аудио- и т. д.; внешние блоки питания.

### Хакинтоши

Хакинтош (англ. *hackintosh*, от слов «хакер» и «макинтош») – это ПК, собранный любителем и поддерживающим работу с операционной системой Mac OS, во взломанном для запуска на PC варианте, называемой OSx86, т. е. более дешевый аналог компьютера Apple (рис. 1.14). Так как современные версии этой системы рассчитаны на процессор Intel и



Рис. 1.14. Хакинтоши

другие стандартные компоненты, возникает теоретическая возможность запускать ее на любых ПК. В реальности поддерживается только узкий набор аппаратуры, который встречается в настоящих макинтошах, поэтому «хакинтош» должен состоять исключительно из таких деталей. Кроме того, коммерчески поставляемая система защищена от работы на чужой аппаратуре, так что в «хакинтоше» применяют старую служебную версию без этой защиты, либо взломанную более свежую версию. В зависимости от точности подбора аппаратуры такой компьютер может работать как довольно устойчиво, так и неприемлемо. Например, типичная конфигурация мощного хакинтоша: ASUS P5B/Core 2 Duo 2.4 Ghz/2x1024 mb/GeForce 7900GS TOP 256mb/DVD-RW SATA NEC/HITACHI 320GB SATA. Встречаются устойчиво работающие конфигурации на базе процессоров AMD, но обычно на платформе AMD удается добиться устойчивой работы только версии Mac OS X 10.4.x. Версия 10.5.x (Leopard) пока что стабильно работает только на Intel (Core 2 Duo) платформе.

Сама компания Apple категорически против постройки и эксплуатации таких устройств, и ей удалось с помощью предупреждений и угроз возбудить судебное преследование закрыть несколько подобных сайтов.

Ведущей компанией в мире в области программного обеспечения в настоящее время является корпорация Microsoft, основанная У. Гейтсом в 1975 г.



**Гейтс (Gates) Уильям** (Билл) Генри III (родился 28 октября 1955 г., Сиэтл, штат Вашингтон), американский предприниматель и изобретатель в области электронно-вычислительной техники, председатель и CEO ведущей компании в мире в области программного обеспечения Microsoft.

Родился в семье видного адвоката. Уже в средней школе проявил незаурядные математические способности. Будучи учеником старших классов, создал свою первую компанию Traf-O-Data, занимавшуюся продажей программ для определения интенсивности дорожного движения.

В 1975 г., бросив Гарвардский университет, где он готовился стать правоведом, как его отец, Гейтс совместно со своим школьным товарищем Полом Алленом основал компанию Microsoft. Первой задачей новой фирмы стала адаптация языка Бейсик для использования в одном из первых коммерческих микрокомпьютеров – «Альтаире» Эдварда Робертса.

В 1980 г. Microsoft разработала операционную систему MS-DOS (Microsoft Disk Operation System) для первого IBM PC, ставшую к середине 1980-х гг. основной операционной системой на американском рынке микрокомпьютеров. Затем Гейтс приступил к разработке прикладных программ – электронных таблиц Excel и текстового редактора Word, и к концу 1980-х Microsoft стала лидером и в этой области.

В 1986 г., выпустив акции компании в свободную продажу, Гейтс в возрасте 31 года стал миллиардером. В 1990 г. компания представила оболочку Windows 3.0, в которой вербальные команды были заменены на пиктограммы, выбираемые с помощью «мыши», что значительно облегчило пользование компьютером. В начале 1990-х гг. «Окна» продавались в количестве 1 млн копий в месяц. К концу 1990-х гг. около 90% всех персональных компьютеров в мире были оснащены программным обеспечением Microsoft.

О работоспособности Билла Гейтса, а также его уникальном качестве эффективно включиться в работу на любом ее этапе ходят легенды. Безусловно, Гейтс принадлежит к когорте самых незаурядных бизнесменов новой генерации. В 1995 г. он выпустил книгу «Дорога в будущее», которая стала бестселлером. В 1997–2007 гг. возглавлял список самых богатых людей в мире.

## 1.4. Компьютеры пятого поколения

**Компьютеры пятого поколения** – широкомасштабная правительственная программа в Японии по развитию компьютерной индустрии и искусственного интеллекта, предпринятая в 1980-е гг. Целью программы было создание «эпохального компьютера» с производительностью суперкомпьютера и мощными функциями искусственного интеллекта. Начало разработок – 1982, конец разработок – 1992, стоимость разработок – 57 млрд иен (порядка 500 млн долл.).

### *Возникновение проекта*

К моменту начала проекта Япония не являлась лидером в области компьютерных технологий, хотя достигла большого успеха в реализации компьютеров и приборов, беря за основу американские или английские разработки. Министерство международной торговли и промышленности Японии решило форсировать прорыв Японии в лидеры, и с 70-х гг. министерство стало строить прогнозы о будущем компьютеров, поручив Японскому центру развития обработки информации указать несколько наиболее перспективных направлений для будущих

разработок, а в 1979 был предложен трехлетний контракт для более глубоких исследований, подключая промышленные и академические организации. Именно в это время и появился термин «компьютеры пятого поколения».

Этот термин должен был подчеркнуть, что Япония планирует совершить новый качественный скачок в развитии вычислительной техники. Первым поколением считались ламповые компьютеры, вторым – транзисторные, третьим – компьютеры на интегральных схемах, а четвертым – с использованием микропроцессоров. В то время как предыдущие поколения совершенствовались за счет увеличения количества элементов на единицу площади (миниатюризации), компьютеры пятого поколения должны были для достижения сверхпроизводительности интегрировать огромное количество процессоров.

### ***Задачи исследования***

Главные направления исследований были следующими:

- технологии логических заключений (inference) для обработки знаний;
- технологии для работы со сверхбольшими базами данных и базами знаний;
- рабочие станции с высокой производительностью;
- компьютерные технологии с распределенными функциями;
- суперкомпьютеры для научных вычислений.

Речь шла о компьютере с параллельными процессорами, работающим с данными, хранящимися в обширной базе данных, а не в файловой системе. При этом доступ к данным должен был осуществляться с помощью языка логического программирования. Предполагалось, что прототип машины будет обладать производительностью между 100 млн и 1 млрд LIPS, где LIPS – это логическое заключение в секунду. К тому времени типовые рабочие станции были способны на производительность около 100 тыс. LIPS.

Ход разработок представлялся так, что компьютерный интеллект, набирая мощность, начинает изменять сам себя, и целью было создать такую компьютерную среду, которая сама начнет производить следующую, причем принципы, на которых будет построен окончательный компьютер, были заранее неизвестны, эти принципы предстояло выработать в процессе эксплуатации начальных компьютеров.

Далее, для резкого увеличения производительности, предлагалось постепенно заменять программные решения аппаратными, поэтому не делалось резкого разделения между задачами для программной и аппаратной базы.

Ождалось добиться существенного прорыва в области решения прикладных задач искусственного интеллекта. В частности, должны были быть решены следующие задачи:

- печатная машинка, работающая под диктовку, которая сразу устранила бы проблему ввода иероглифического текста, которая в то время стояла в Японии очень остро;
- автоматический портативный переводчик с языка на язык (разумеется, непосредственно с голоса), который сразу бы устранил языковый барьер японских предпринимателей на международной арене;
- автоматическое реферирование статей, поиск смысла и категоризация;
- другие задачи распознавания образов – поиск характерных признаков, дешифровка, анализ дефектов и т. п.

От суперкомпьютеров ожидалось эффективное решение задач массивного моделирования, в первую очередь в аэро- и гидродинамике.

Эту программу предполагалось реализовать за 10 лет, три года для начальных исследований и разработок, четыре года для построения отдельных подсистем, и последние четыре года для завершения всей прототипной системы. В 1982 г. правительство Японии решило дополнительно поддержать проект, и основало Институт компьютерной технологии нового поколения (ICOT), объединив для этого инвестиции различных японских компьютерных фирм.

Вера в будущее параллельных вычислений была в то время настолько глубокой, что проект «компьютеров пятого поколения» был принят в компьютерном мире очень серьезно. После того, как Япония в 70-е гг. заняла передовые позиции в бытовой электронике, и в 80-е стала выходить в лидеры в автомобильной промышленности, японцы приобрели репутацию непобедимых. Проекты в области параллельной обработки данных тут же начали разрабатывать в США – в Корпорации по микроэлектронике и компьютерной технологии (МСС), в Великобритании – в фирме Олви (Alvey), и в Европе в рамках Европейской Стrатегической программы исследований в области информационных технологий (ESPRIT).

### ***Параллельный суперкомпьютер МАРС в СССР***

В СССР также начались исследования параллельных архитектур программирования, для этого в 1985 г. было создано ВНТК СТАРТ, которому за три года удалось создать процессор «Кронос» и прототипный мультипроцессорный компьютер МАРС.

В отличие от японцев, задача интеграции огромного числа процессоров и реализация распределенных баз знаний на базе языков типа Пролог не ставилась, речь шла об архитектуре, поддерживающей язык высокого уровня типа Модула-2 и параллельные вычисления. Поэтому проект нельзя назвать пятым поколением в японской терминологии.

В 1988 г. проект был успешно завершен, но не был востребован и не получил продолжения по причине Перестройки и невыгодной для отечественной компьютерной индустрии рыночной ситуации. «Успех» заключался в частичной реализации прототипной архитектуры (в основном, аппаратных средств), однако подобный японскому «большой скачок» в области программирования, баз данных и искусственного интеллекта в рамках этого проекта даже не планировался.

Последующие десять лет проект «компьютеров пятого поколения» стал испытывать ряд трудностей разного типа.

Первая проблема заключалась в том, что язык Пролог, выбранный за основу проекта, не поддерживал параллельных вычислений, и пришлось разрабатывать собственный язык, способный работать в мультипроцессорной среде. Это оказалось трудным – было предложено несколько языков, каждый из которых обладал собственными ограничениями.

Другая проблема возникла с производительностью процессоров. Оказалось, что технологии 80-х гг. быстро перескочили те барьеры, которые перед началом проекта считались «очевидными» и непреодолимыми. А запараллеливание многих процессоров не вызывало ожидаемого резкого скачка производительности. Получилось так, что рабочие станции, созданные в рамках проекта успешно достигли и даже превзошли требуемые мощности, но к этому времени появились коммерческие компьютеры, которые были еще мощнее.

Помимо этого, проект «Компьютеры пятого поколения» оказался ошибочным с точки зрения технологии производства программного обеспечения. Еще в период разработки этого про-

екта фирма Apple разработала графический интерфейс (GUI). А позднее появился Интернет, и возникла новая концепция распределения и хранения данных, при этом интернетовские поисковые машины привели к новому качеству хранения и доступа разнородной информации. Надежды на развитие логического программирования, питаемые в проекте «Компьютеры пятого поколения», оказались иллюзорными, преимущественно по причине ограниченности ресурсов и ненадежности технологий.

Идея саморазвития системы, по которой система сама должна менять свои внутренние правила и параметры, оказалась непродуктивной – система, переходя через определенную точку, скатывалась в состояние потери надежности и утраты цельности, резко «глупела» и становилась неадекватной.

Идея широкомасштабной замены программных средств аппаратными оказалась в корне неверной, развитие компьютерной индустрии пошло по противоположному пути, совершенствуя программные средства при более простых, но стандартных аппаратных. Проект был ограничен категориями мышления 1970-х гг. и не смог провести четкого разграничения функций программной и аппаратной части компьютеров.

С любых точек зрения проект можно считать абсолютным провалом. За десять лет на разработки было истрачено более 50 млрд иен, и программа завершилась, не достигнув цели. Рабочие станции так и не вышли на рынок, потому что однопроцессорные системы других фирм превосходили их по параметрам, программные системы так и не заработали, появление Интернета сделало все идеи проекта безнадежно устаревшими.

Неудачи проекта объясняются сочетанием целого ряда объективных и субъективных факторов:

- ошибочная оценка тенденций развития компьютеров – перспективы развития аппаратных средств были катастрофически недооценены, а перспективы искусственного интеллекта были волонтаристски переоценены, многие из планируемых задач искусственного интеллекта так и не нашли эффективного коммерческого решения до сих пор, в то время как мощность компьютеров несизмеримо выросла;
- ошибочная стратегия, связанная с разделением задач, решаемых программно и аппаратно, проявившееся в стремлении к постепенной замене программных средств аппаратными, что привело к излишнему усложнению аппаратных средств;

- отсутствие опыта и глубинного понимания специфики задач искусственного интеллекта с надеждой на то, что авось увеличение производительности и неведомые базовые принципы системы приведут к ее самоорганизации;
- трудности, выявившиеся по мере исследования реального ускорения, которое получает система логического программирования при запараллеливании процессоров. Проблема состоит в том, что в многопроцессорной системе резко увеличиваются затраты на коммуникацию между отдельными процессорами, которые практически нивелируют выгоду от параллелизации операций, отчего с какого-то момента добавление новых процессоров почти не улучшает производительности системы;
- ошибочный выбор языков типа Лисп и Пролог для создания базы знаний и манипулирования данными. В 1980-е гг. эти системы программирования пользовались популярностью для САПР и экспертных систем, однако эксплуатация показала, что приложения оказываются малонадежными и плохо отлаживаемыми по сравнению с системами, разработанными обычными технологиями, отчего от этих идей пришлось отказаться. Кроме того, трудность вызвала реализация «параллельного Пролога», которая так и не была успешно решена;
- низкий общий уровень технологии программирования того времени и диалоговых средств (что ярко выявилось в 1990-е гг.);
- чрезмерная рекламная кампания проекта «национального престижа» в сочетании с волюнтаризмом и некомпетентностью высших должностных лиц, не позволяющая адекватно оценивать состояние проекта в процессе его реализации.

Сегодня практически каждая отрасль промышленности требует серьезных вычислительных мощностей для внедрения новых технологических процессов, обновления производства и снижения рисков. Поэтому высокопроизводительные вычислительные системы становятся все более востребованными как на Западе, так и в России.

Что же заставляет различные отрасли и компании прибегать к услугам сложных вычислительных комплексов, которые называют также **суперкомьютерами** или системами для высокопроизводительных вычислений? Дело в том, что в современном мире компании вынуждены постоянно усложнять производственные модели продуктов, чтобы повысить надежность изделий, точность изготовления, а также снизить риски и избежать брака.

И в нашей стране компании начинают экономить на издержках, выводить на рынок более совершенные продукты, внедряя в производство сложные вычислительные системы, и, видимо, этот путь является сегодня неизбежным. Ведь любая более сложная, более совершенная модель требует большей мощности для обсчета, и, кроме этого, большего пространства для хранения как промежуточной информации, так и результата. Таким образом, развитие любой индустрии, будь то геодезия или фармакология, связано с необходимостью применения сложных вычислительных систем – суперкомпьютеров. Если же рассуждать честно, само понятие «суперкомпьютер» расплывчено настолько, насколько это вообще возможно. Некоторые считают, что суперкомпьютер – это система, которая входит в рейтинг самых мощных компьютеров Top500, который обновляется два раза в год. Что же, эта точка зрения имеет право на существование, но тогда по последним релизам рейтинга Top5 в СНГ всего 4 суперкомпьютера. Существуют и другие мнения, например специалисты ИПС РАН предлагают также учитывать некоторые модели суперкомпьютеров, которые отстают от нижнего предела Top500 не более чем в несколько раз. Представители некоторых других компаний считают, что суперкомпьютер – это просто любая единая вычислительная система, которая как минимум на порядок более производительна, чем все остальные установки на предприятии, т. е. для каждой компании критерий суперкомпьютера будет своим. Четвертый интересный подход к вопросу определения этого термина состоит в том, чтобы отождествить понятие суперкомпьютера и системы для промышленных расчетов. В этом случае любая система, производящая вычисления для инженерных пакетов и других специально созданных моделей, например для прогноза погоды, может считаться суперкомпьютером. В общем, если речь идет о суперкомпьютере, имейте в виду, что это понятие может эксплуатироваться как угодно. Мы же в нашем материале рассмотрим тенденции развития отрасли высокопроизводительных вычислительных систем на примере реальных установок крупнейших российских и зарубежных компаний.

Мировой рейтинг суперкомпьютеров *Top500* включает всего 4 системы в нашей стране. Производительность в Top500 рассчитывается по скорости решения огромных систем линейных уравнений. В этом teste (он называется LinPack) компьютер по-

лучает задачу из тысяч уравнений с таким же количеством переменных.

Самая мощная вычислительная система из четырех «победителей» находится в межведомственном суперкомпьютерном центре (МСЦ) и содержит в себе 924 процессора PowerPC 2200 МГц, упакованных в блейд-серверы IBM eSeries и соединенных интерконнектом Myrinet. Этот кластер работает под управлением ОС Linux и, согласно рейтингу, занимает 56-е место в мире по результатам теста LinPack. Кстати, этот суперкомпьютер поставлен в Россию компанией IBM, что позволило реализовать обновление установленного в МСЦ прежнего суперкомпьютера: во-первых, тем самым увеличили общее количество процессоров и, во-вторых, заменили их более производительными моделями. Вообще говоря, суперкомпьютер IBM в межведомственном центре уже достаточно давно играет важную политическую роль для России, и, что интересно, с 210-го места по итогам прошлогоднего рейтинга, благодаря модернизации, он переместился в первую сотню. Что касается производительности, этот компьютер демонстрирует 5355 Гфлоп/с (или триллионов операций с плавающей запятой в секунду), не считая пиковых нагрузок.

Как ни странно, второй по скорости решения линейных уравнений суперкомпьютер, отнесенный к нашему региону, расположен в Белоруссии. Он создан в рамках суперкомпьютерной программы союзного государства – СКИФ. Кстати, в международных рейтингах компьютеры СКИФ называют *self-made* (самодельными). Эта инсталляция носит название СКИФ К-1000 и построена в Объединенном институте проблем информатики НАН Белоруссии на базе двухпроцессорных серверов, использующих чипы AMD Opteron 248. Интересно, что этот суперкомпьютер для передачи данных использует один из самых перспективных на сегодня интерконнектов InfiniBand, поддерживая также Gigabit Ethernet как транспортную сеть. Однако на суперкомпьютерной программе СКИФ мы остановимся чуть позже, а пока отметим производительность белорусской установки, составляющую 2032 Гфлоп/с. Этот компьютер, кстати говоря, уже второй раз попадает в список Top500, правда, в предыдущем релизе рейтинга он занимал 99-е место, попав тем самым в сотню самых производительных суперкомпьютеров, а теперь занимает 174-е место.

Третий и четвертый по мощности суперкомпьютеры в России, согласно рейтингу Top500, находятся в последней сотне и занимают 405-е и 474-е место соответственно. Мы упоминаем их вместе, так как они оба поставлены в этом году одной и той же компанией. Более производительный из «братьев» находится все в том же межведомственном суперкомпьютерном центре. Он представляет собой кластерную платформу HP CR6000 на базе процессоров Itanium 2 с частотой 1,5 ГГц, содержащую в общей сложности 256 процессоров на 128 узлах, соединенных в кластер интерконнектом Myrinet. Производительность этой системы равна 1536 Гфлоп/с.

Второй суперкомпьютер (рис. 1.15) от Hewlett-Packard основан на фирменной разработке компании – платформе SuperDome. Этот вычислительный комплекс применяется уже для реальных приложений одной из крупнейших структур России – Сбербанка. Суперкомпьютер работает под специализированной операционной системой HP-UX и для соединения 608 процессоров HP PA-RISC 875 с частотой 875 МГц использует фирменную технологию HP HyperPlex. Эта технология, можно сказать, объединяет процессоры на базе одного коммутатора, в результате чего они работают уже не как кластер, а скорее как



Рис. 1.15. Суперкомпьютер

многопроцессорный сервер. Пожалуй, это преимущество и оказалось критическим для громоздких учетных и аналитических систем финансовой структуры, которые вряд ли хорошо поддаются распараллеливанию и для большей эффективности должны выполняться в едином информационном пространстве. Тем не менее, что касается теста LinPack – решения системы линейных уравнений, этот суперкомпьютер показывает производительность в 1203 Гфлоп/с. Вот и все, что есть в нашем регионе из суперкомпьютеров, если верить только рейтингу Top500.

Российская компания «Т-Платформы», МСЦ Российской Академии наук и Научно-исследовательский вычислительный центр (НИВЦ) МГУ им. М. В. Ломоносова создали рейтинг самых мощных суперкомпьютеров России и СНГ **Top50**, который обновляется каждые полгода и основывается на все том же тесте LinPack, отражающем скорость решения громоздкой системы линейных уравнений. Этот рейтинг содержит 50 самых производительных (с точки зрения решения линейных уравнений) систем в России и помогает оценить развитие отрасли высокопроизводительных вычислений в нашей стране.

Ознакомиться с этим рейтингом детально можно на сайте [www.supercomputers.ru](http://www.supercomputers.ru). Но уже при первом рассмотрении Top50 можно выявить те тенденции, которые напрямую свидетельствуют о развитии НРС в России. Например, интересным фактом является то, что компания HP, поставляющая сегодня в Россию наибольшее количество высокопроизводительных систем, делает всего 22 % инсталляций, в то время как российский производитель «Т-Платформы» выполняет 20 %. Конечно, в финансовом отношении эти показатели несопоставимы (учитывая разницу в расценках указанных выше компаний). Но количественный фактор свидетельствует в пользу того, что наша страна может собирать суперкомпьютеры самостоятельно. Последняя редакция Top50 показала, что количество суперкомпьютеров, использующихся в финансовом секторе, выросло с 18 % до 30 %, а применительно к промышленным предприятиям этот показатель изменился с 34 % до 44 %, что говорит о хорошей динамике в освоении высоких технологий российскими компаниями.

В свете всего сказанного выше важным событием этой осени стала поставка компанией КРОК суперкомпьютера для НПО Сатурн, который сегодня представляет собой одну из самых производительных инсталляций в России. Согласно данным все

того же рейтинга Top50, этот суперкомпьютер, расположенный в Рыбинске, является четвертым по мощности в СНГ и при этом оказывается самым мощным среди инсталляций для промышленных нужд. Производительность кластера IBM eServer Cluster 1350, который включает 64 двухпроцессорных сервера IBM eServer xSeries 336 на основе 64-разрядных процессоров Intel Xeon и два 4-процессорных сервера IBM eServer xSeries 455 на основе процессоров Intel Itanium 2, соединенных InfiniBand 10 Gigabit, составила 768 Гфлоп/с согласно тесту LinPack. В рамках проекта идея и архитектура инсталляции были предложены самими специалистами НПО «Сатурн», а реализовала их компания КРОК.

Как вы понимаете, примечательным здесь является не только живой интерес отечественного предприятия, занимающегося разработкой авиационных двигателей, но и выполнение столь масштабного проекта российским интегратором. Быть может, такая практика сообщит суперкомпьютерной индустрии нашей страны дополнительный импульс. TopCrunch – моделирование аварии. Однако, как мы уже говорили, есть и другие системы оценки суперкомпьютеров, например, по работе с реальными приложениями, такими как LS-Dyna 3 Vehicle Collision – столкновение трех машин. Надо сказать, что используемый в тесте TopCrunch программный пакет LS-Dyna применяется для реальных инженерных расчетов такими компаниями, как Audi AG, и потому достоин достаточно пристального внимания. Именно поэтому интересен тот факт, что российско-белорусский суперкомпьютер СКИФ показал в прошлом году на этом тесте первое место в мире при загрузке на 35 процессорах. Теперь же он занимает шестое место среди конфигураций с количеством процессоров меньше 40 и 41-е место в общем зачете за последние два года. Поскольку результат работы LS-Dyna на этом кластере при использовании большего количества процессоров пока не доказан, то говорить о преимуществах продуктов СКИФ в этом году пока не приходится. Но достаточно высокие показатели при проведении этого теста представляют нам высокопроизводительные вычисления несколько с другой стороны. Ведь, в конечном счете, суперкомпьютерные системы создаются не только для участия в рейтинге и престижа, но и для решения реальных задач.

### ***Суперкомпьютерная программа СКИФ***

В действительности, именно рассматривая применение высокопроизводительных вычислительных систем в промышленности и науке, очень интересной выглядит СКИФ – суперкомпьютерная программа союзного государства, которая поддерживается как Министерством промышленности, науки и технологий Российской Федерации, так и Национальной Академией наук Белоруссии, в партнерстве с российским Институтом программных систем (ИПС) РАН и многими другими компаниями, со списком которых можно ознакомиться на сайте проекта <http://skif.bas-net.by/>. Идея этой программы состоит в том, чтобы создать унифицированный дизайн установок, пригодных для развития промышленности в странах СНГ. Надо сказать, что разработчикам это удалось, и сегодня, кроме СКИФ К-1000, существуют также типизированные кластеры СКИФ К-500, обладающие более чем терафлопной производительностью по стандартному тесту LinPack. Более мелкие инсталляции отточенной конфигурации СКИФа уже сегодня применяются на некоторых предприятиях российской промышленности, так сказать, демонстрируя реализацию самой программы.

Интересно также, что российские разработчики серьезно поработали над архитектурой СКИФа. Сегодня любая установка СКИФ представляет собой мощный кластер на процессорах AMD Opteron, который состоит из двухпроцессорных узлов. Для управления системой используется специализированная разработка ИПС РАН – сервисная сеть. Она позволяет контролировать включение и работу узлов, не задействуя ни коммутационную, ни транспортную сети. Кроме этого, с системами СКИФ ИПС РАН поставляются специальные программные разработки, в том числе специализированную версию ОС Linux. В любом случае российско-белорусские кластеры отличаются достаточно высокой производительностью и управляемостью и, при этом, относительно небольшой ценой (по сравнению с продуктами компаний А-бренд).

Что же, как мы видим, системы суперкомпьютерных вычислений в России продолжают развиваться, и, что примечательно, специалисты нашей страны оказались достаточно амбициозны, чтобы создать собственный рейтинг и отслеживать развитие отрасли в целом, а не только 4–5 лучших систем, играющих в мировом масштабе.

## 1.5. IBM

Крупнейшим мировым производителем компьютеров, компьютерных устройств и программного обеспечения в течении большого числа лет является американская корпорация **IBM (International Business Machines, IBM)**.

Компания, которая известна сейчас под именем IBM, была основана 15 июня 1911 г. и называлась С-T-R (Computing-Tabulating-Recording). Она включила в себя Computing Scale Company of America, Tabulating Machine Company (ТМС – бывшая компания Германа Холлерита) и International Time Recording Company. В мае 1914 г. генеральным управляющим компаний С-T-R стал Томас Уотсон (Thomas Watson, 17.02.1874 – 19.06.1956).

Распространенное прозвище компании – Big Blue, что можно перевести с английского как «большой синий» или «голубой гигант». Существует несколько версий относительно этого прозвища. По одной из них название произошло от мэйнфреймов, поставляемых компанией в 1950–1960-х гг. Эти мэйнфреймы были размером с комнату и имели голубую окраску. По другой теории прозвище просто ссылается на логотип компании. Еще одна версия утверждает, что это название идет от бывшего дресс-кода компании, который требовал от многих своих работников ношения рубашек и костюмов голубого цвета. Также есть версия, что название появилось после показа по американскому ТВ в начале 1980-х гг. ролика, рекламирующего персональные компьютеры, которые по сюжету были проворнее и побеждали гиганта, одетого в голубые одежды.

В 1896 г. на территории США проходила перепись населения. Для обработки ее результатов впервые был применен «электрический табулятор», изобретенный Германом Холлеритом. Благодаря ему, данные переписи удалось обработать всего за 3 месяца, вместо ожидаемых 24. Воодушевленный успехом изобретатель открывает в 1896 г. компанию Tabulating Machine Company.

В годы Великой депрессии «удержаться на плаву» IBM помогли только многомиллионные доходы. Несмотря на кризис, президент компании Томас Уотсон продолжает финансировать исследования и выплачивать рабочим зарплату. Выйти из кризиса IBM помогли крупные заказы правительства США в 1935–1936 гг. В годы Второй мировой войны компания производила

стрелковое оружие (M1 Carbine и Browning Automatic Rifle). 1950-е гг. – проекты для BBC и авиалиний.

В 1943 г. началась история компьютеров IBM – был создан «Марк I» весом около 4,5 т. Но уже в 1952-м появляется «IBM 701», первый большой компьютер на лампах. В 1956 г. сын Томаса Уотсона, Томас Уотсон-младший, сменил отца на посту главы IBM, ознаменовав начало эры компьютеров для жизни. Под его руководством доходы компании выросли до 8 млрд долл., а число сотрудников – до 270 тыс. человек.

В 1959 г. появились первые компьютеры IBM на транзисторах, достигшие такого уровня надежности и быстродействия, при котором BBC США сочли возможным использовать их в системе раннего оповещения ПВО. Чуть раньше, в 1957 г., IBM ввела в обиход язык FORTRAN («FORmula TRANslation»), применявшийся для научных вычислений и ставший одним из основных источников «ошибки 2000 г.».

В 1971 г. компания представила гибкий диск, который стал стандартом для хранения данных.

В 1972 г. был представлен обновленный логотип (буквы из синих полосок) компании, используемый до настоящего времени. Над логотипом работал дизайнер Пол Рэнд (Paul Rand).

1981 г. прочно вошел в историю человечества как год появления **персонального компьютера «IBM PC»**. 64 килобайт оперативной памяти и одного или двух флоппи-дисководов вполне хватало, чтобы исполнять операционную систему DOS, предложенную небольшой компанией Microsoft, и некоторое количество приложений.

Примечательно, что этой машине руководство компании поначалу совершенно не придавало значения: разработкой занималась группа всего в 4 человека (под руководством Филиппа Дональда Эстриджа). И – что имело самые заметные последствия – вопреки своим жестким принципам охраны интеллектуальной собственности, IBM не запатентовала ни DOS (с интерпретатором языка BASIC), ни еще одно революционное изобретение разработчиков: BIOS. В результате более прозорливые сторонние разработчики, пользуясь опубликованными спецификациями, наделали клонов IBM PC, и значительная доля этого быстро растущего рынка была для IBM потеряна.

В 1986 г. IBM уступила 1-е место по продажам на ею же самой порожденном рынке персональных компьютеров.

В 1990-х в бизнесе IBM все отчетливее прослеживалось стремление сместить фокус бизнеса в сторону поставки услуг, в первую очередь консалтинга. Наиболее ярко это проявилось в 2002 г., когда «голубой гигант» приобрел консалтинговое подразделение аудиторской компании PricewaterhouseCoopers за 3,5 млрд долл. В настоящее время этот бизнес, влившийся в подразделение IBM Global Services, является самым доходным в структуре IBM, приносящим больше половины дохода компании.

В 2009 г. в IBM насчитывалось более 398 тыс. сотрудников в 170 странах. Общий оборот составил ~ 100 млрд долл.

Ключевыми подразделениями IBM являются;

- IBM Global Services (IGS, консалтинговое отделение), принесло компании 47,357 млрд долларов дохода из 91,134 млрд всего в 2005 г.;
- Systems and Technology Group (STG, отделение по производству оборудования), принесло компании 23,857 млрд долларов дохода из 91,134 млрд всего в 2005 г.
- Software Group (отделение по разработке ПО), принесло компании 15,753 млрд долл. дохода из 91,134 млрд всего в 2005 г.

**IBM разрабатывает программное обеспечение:** операционные системы OS/400, z/OS, PC-DOS, OS/2 и AIX, а также активно поддерживает GNU/Linux; файловые системы GPFS, HPFS, CFS, JFS, JFS2; система управления базами данных DB2; Lotus Notes/Domino; офисный пакет Lotus SmartSuite; средства моделирования IBM Rational; IBM WebSphere; системы управления системами Tivoli; серию компиляторов и сред разработки VisualAge (например, VisualAge C++, VisualAge Smalltalk и т. д.), а также активно поддерживает Eclipse, преемник этих сред.

Внутренняя корпоративная компьютерная сеть IBM признана одной из лучших в 2006 г. агентством Nielsen Norman Group.

IBM производит компьютеры и устройства: серверы hi-end класса; сети хранения данных; специализированные суперкомпьютеры: Deep Blue, Blue Gene и т. д. мейнфреймы IBM System/360/370/390, Mainframe servers: zSeries

Научные и технические разработки IBM составляют архитектуры центральных процессоров для трех игровых приставок нового (2006) поколения: Sony PlayStation 3 (Cell), Nintendo Wii (Broadway) и Microsoft Xbox 360 (трехъядерный PowerPC).

В России IBM в 2006 г. открыла исследовательскую лабораторию, которая станет использовать опыт российских инжене-

ров для разработки технологий майнфреймов (высокопроизводительных компьютеров). Также проводится проект «Технологическая школа IBM».

Конкуренция с IBM и желание ее превзойти послужило для многих начинающих компаний мощным толчком для собственного развития. В разное время с IBM конкурировали еще только начинавшие компании DEC, Intel, Microsoft, Compaq и некоторые другие.

Влияние IBM на развитие российских информационных технологий:

- ЕС ЭВМ напрямую и творчески скопированы с компьютеров IBM/360;
- ЕС ПЭВМ – аналоги персональных компьютеров IBM;
- Операционные системы ЕС ЭВМ были как минимум совместимыми с соответствующими операционными системами IBM.

Значительные разработки IBM в отрасли информационных технологий:

- Марк I (компьютер) (1943) – первый американский компьютер;
- первый коммерческий жесткий диск (1956);
- IBM/360 (1964) – принято считать основателем целого класса компьютеров – «майнфреймы»;
- SQL;
- IBM PC – персональный компьютер, архитектура которого стала стандартом де-факто для отрасли на 80-е и 90-е гг. XX в. и первое десятилетие XXI в. Открытая архитектура IBM PC во многом способствовала огромному успеху IBM PC, массовому выпуску PC-совместимых клонов множеством компаний и в конечном итоге наступлению эры персональных компьютеров и компьютерной революции.

## 1.6. Нанотехнологии в вычислительной технике

В ожесточенной войне за лидерство в нанотехнологиях и создании **нанокомпьютеров** наша страна пока что хранит строгий недальновидный нейтралитет. Успехи отечественных нанотехнологов выглядят более чем скромно по сравнению с достижениями их коллег из Японии, США, Франции, Англии. Нельзя сказать, чтобы отставание было полным и по всем фронтам, но по части массового производства чего-либо с размерами меньше 120 нм оно абсолютно объективно, и заграница нам в переходе

на технологию 95 нм и, тем более 65 нм, помогать не собирается. С уникальными изделиями ситуация несколько лучше. Сделать нечто совсем маленькое с помощью сфокусированного ионного пучка или иглы атомно-силового микроскопа сегодня не проблема. Тем более, что существует отечественное производство разного рода сканирующих зондовых микроскопов и прочих устройств для работы с наноразмерными объектами. Проблема сделать так, чтобы это миниатюрное изделие можно было воспроизвести в количестве сотен миллионов работоспособных экземпляров. Как известно технология начинается тогда, когда на выходе получаешь миллиард транзисторов и все они работают. Современный процессор Пентиум, изготовленный по 65 нм технологии, как раз и является таким высокотехнологичным продуктом, в котором хрупкое и уникальное стало массовым и надежным.

Соглашаясь с тем, что переход на 45 нм технологию произойдет еще не скоро, все разработчики упорно исследуют структуры с характерными размерами порядка 10 нм. В Японии с 1987 г. изучают одноэлектронные транзисторы и преуспели в их изучении настолько, что начали изготавливать логические элементы и бистабильные туннельные структуры с рабочей областью размером в несколько нанометров. Однако кремниевые «проводы», идущие к квантовой точке, пока еще имеют значительную толщину, и все устройство оказывается существенно больше типичного транзистора, используемого в процессорах AMD или Intel. Однако исследования продолжаются.

**Нанотехнологии** могут использоваться не только в производстве электронного оборудования. В перспективе предполагается их применение в следующих сферах деятельности:

- **медицина.** Создание молекулярных роботов-врачей, которые «жили» бы внутри человеческого организма, устранивая все возникающие повреждения, или предотвращали бы возникновение таковых, включая повреждения генетические. Прогнозируемый срок реализации – первая половина нынешнего века;
- **геронтология.** Достижение личного бессмертия людей за счет внедрения в организм молекулярных роботов, предотвращающих старение клеток, а также обеспечивающих перестройку и «облагораживание» тканей человеческого организма. Оживление и излечение тех безнадежно больных людей, которые были заморожены методами крионики. Прогнозируемый срок реализации – последняя четверть нынешнего века;

- промышленность. Замена традиционных методов производства сборкой молекулярными роботами предметов потребления непосредственно из атомов и молекул. Вплоть до персональных синтезаторов и копирующих устройств, позволяющих изготовить любой предмет. Первые практические результаты могут быть получены в ближайшие 10–20 лет;
- сельское хозяйство. Замена «естественных машин» для производства пищи (растений и животных) их искусственными аналогами – комплексами из молекулярных роботов. Они будут воспроизводить те же химические процессы, что происходят в живом организме, однако более коротким и эффективным путем. Например, из цепочки « почва – углекислый газ – фотосинтез – трава – корова – молоко» будут удалены все лишние звенья. Останутся « почва – углекислый газ – молоко (творог, масло, мясо, все что угодно)». Подобное «сельское хозяйство» не будет зависеть от погодных условий и не будет нуждаться в тяжелом физическом труде. А производительности его будет достаточно чтобы решить продовольственную проблему раз и навсегда. По разным оценкам, первые такие комплексы могут созданы во второй – четвертой четвертях нынешнего столетия;
- биология. Станет возможным внедрение в живой организм на уровне атомов. Последствия могут быть самыми различными – от восстановления вымерших видов до создания новых типов живых существ, а также биороботов. Прогнозируемый срок реализации – середина столетия;
- экология. Полное устранение вредного влияния деятельности человека на окружающую среду. Во-первых, за счет насыщения экосферы молекулярными роботами-санитарами, превращающими отходы деятельности человека в исходное сырье, а, во-вторых, за счет перевода промышленности и сельского хозяйства на безотходные нанотехнологические методы. Прогнозируемый срок реализации – середина столетия;
- освоение космоса. По-видимому, освоению космоса человеком будет предшествовать освоение его нанороботами. Огромная армия молекулярных роботов может быть также выпущена в околоземное космическое пространство и подготовит его для заселения человеком, сделав пригодными для обитания Луну, ближайшие планеты, астероиды, соорудит из подручных материалов (метеоритов, комет) космические станции. Это будет намного дешевле и безопаснее существующих ныне методов;

■ кибернетика и вычислительная техника. Произойдет переход от ныне существующих планарных структур к объемным микросхемам, размеры активных элементов уменьшатся до размеров молекул. Рабочие частоты компьютеров достигнут тера-герцевых величин. Получат распространение схемные решения на нейроноподобных элементах. Появится быстродействующая долговременная память на белковоподобных молекулах, емкость которой будет измеряться терабайтами. Станет возможным переселение человеческого интеллекта в компьютер. Прогнозируемый срок реализации – ближайшие 15–30 лет.

За счет внедрения логических наноэлементов во все атрибуты окружающей среды она станет «разумной» и исключительно комфортной для человека. Однако ожидать реализации подобной ситуации, по-видимому, следует не ранее следующего века.

# Глава 2. ПОЛУПРОВОДНИКОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА: ТРАНЗИСТОР И ДРУГИЕ ЭЛЕМЕНТЫ ЭВМ

*Humpty Dampty sat on a wall; Humpty Dampty had a great fall.  
All the King's horses and all the King's men  
couldn't put Humpty Dampty in his place again.*

*Lewis Carroll*

## 2.1. Полупроводниковая электроника

Полупроводниковая электроника радикально отлична от вакуумной. Действие электронных ламп основано на управлении током электронов, идущих от нагреваемого электрода (катода) к собирающему электроду (аноду). Катод нагревается отдельным нагревательным элементом. Для работы такого устройства требуется значительное количество электроэнергии.

В полупроводниках не нужно подводить энергию к нагревателю, чтобы получить свободные электроны, а собирающие электроды могут работать при весьма низких напряжениях.

Сопротивление полупроводников можно контролируемо изменять. Это осуществляется путем легирования полупроводника другими химическими элементами. Более того, выбирая тот или иной материал для легирования, можно задавать нужный вид носителей электрического заряда (положительные или отрицательные). Поясним эту мысль.

Все химические элементы, встречающиеся в природе, можно расположить в последовательный ряд по числу положительных зарядов, начиная с водорода, имеющего один положительный заряд в ядре атома (заряд одного протона), и кончая ураном с 92 протонами. Положительный заряд ядра компенсируется оболочками окружающих его электронов. Электроны внутренних оболочек довольно прочно связаны с ядром. Электроны же наружной оболочки связаны слабее; в качестве валентных электронов они могут участвовать в химических процессах, а в каче-

стве электронов проводимости – переносить электрический заряд (электрический ток в металлах есть поток электронов). В таких металлах, как медь, электроны внешних оболочек практически свободны и под влиянием очень слабого электрического поля способны переносить колоссальные токи. Внешние электроны в диэлектриках связаныочно, поэтому диэлектрики практически не проводят электричества. Полупроводники – это промежуточный случай. Согласно распределению Больцмана, число  $N$  частиц с энергией  $E$  дается соотношением:

$$N = A \exp[-E/kT],$$

где  $A$  – константа, характеризующая материал,  $k$  – постоянная Больцмана ( $8,6 \cdot 10^{-5}$  эВ/К), а  $T$  – абсолютная температура в кельвинах (К). Отсюда видно, что чем прочнее связь и ниже температура, тем меньше освобождается электронов. Если в кремний, который четырехвалентен, ввести фосфор, сурьму или мышьяк, каждый атом которых имеет пять валентных электронов, то один электрон легирующей примеси будет лишним. Этот избыточный электрон связан слабо и легко может действовать как электрон проводимости. Если же в кремний ввести бор, галлий или алюминий, каждый атом которых имеет три валентных электрона, то для образования всех связей будет недоставать одного электрона. В этом случае перенос тока определяется электронными вакансиями, или «дырками». На самом деле электроны под влиянием электрического поля перескакивают от одной вакантной связи к другой, что можно рассматривать как перемещение дырок в противоположном направлении. Электрический ток при этом направлен так же, как и в случае электронов, но по величине он меньше (у электронных «дырок» противоположный знак заряда и меньшая подвижность). В соответствии с соотношением  $n = N^2$  можно произвольно изменять число электронов  $n$  или дырок  $p$  в единице объема полупроводника, задавая нужное число избыточных доноров или акцепторов электронов. Полупроводники, в которых электронов больше, чем дырок, называются полупроводниками  $n$ -типа, а полупроводники, в которых больше дырок, – полупроводниками  $p$ -типа. Те носители, которых больше, называются основными носителями, а которых меньше – неосновными. Граница, отделяющая в кристалле область  $p$ -типа от области  $n$ -типа, называется  $p-n$ -переходом.

**Полупроводниковые электронные компоненты** изготавливаются, в основном, из полупроводниковых материалов. К числу таких компонентов относятся транзисторы, интегральные схемы, оптоэлектронные приборы, сверхвысокочастотные (СВЧ) приборы и выпрямители.

Полупроводник – это материал, который проводит электричество лучше, чем такой диэлектрик, как каучук, но не так хорошо, как хороший проводник, например медь. В отличие от металлов, электропроводность полупроводников с повышением температуры возрастает. К наилучшим полупроводниковым материалам относятся кремний (Si) и германий (Ge); в числе других можно назвать соединения галлия (Ga), мышьяка (As), фосфора (P) и индия (In). Кремний находит широкое применение в транзисторах, выпрямителях и интегральных схемах. Арсенид галлия (GaAs) обычно используют в СВЧ и оптоэлектронных приборах, а также в интегральных схемах. Полупроводник представляет собой, по существу, диэлектрик, пока в него не введено малое и тщательно дозированное количество некоторого подходящего материала. Например, такой материал, как фосфор, делает кремний проводящим, добавляя в него избыточные электроны (т. е. действуя как «донаор»). Кремний, легированный подобным образом, становится кремнием n-типа. Легирование таким материалом, как бор, превращает кремний в материал p-типа: бор (акцептор) отбирает у кремния часть электронов, создавая в нем «дырки», которые могут заполняться электронами расположенных поблизости атомов и повышать тем самым проводимость легированного материала. (Потоки электронов в одном направлении и дырок в противоположном образуют ток.) Электроны и дырки, обеспечивающие таким образом проводимость, называются носителями заряда.

## **2.2. p-n-переход – основа для полупроводниковой электроники**

**p-n-переходы.** Твердотельные электронные приборы представляют собой, как правило, многослойную структуру (сэндвич), одна часть которой выполнена из полупроводника p-типа, а другая – из полупроводника n-типа. Отличительным свойством полупроводниковых кристаллов является наличие в них

свободных носителей зарядов обоих знаков. Отрицательные заряды – это электроны, освободившиеся с внешних оболочек атомов кристаллической решетки, а положительные – так называемые дырки. Дырки – это вакантные места, остающиеся в электронных оболочках после ухода из них электронов. При переходе на такое вакантное место электрона из оболочки соседнего атома дырка перемещается к этому атому и таким образом может двигаться по всему кристаллу, как свободная клетка при игре в пятнашки. Поэтому можно рассматривать дырку как положительно заряженную свободную частицу.

Пограничная область между материалами р-типа и н-типа называется р-п-переходом. Переход образуется положительно заряженными атомами донорной примеси с н-стороны и отрицательно заряженными атомами акцепторной примеси с р-стороны. Электрическое поле, создаваемое этими ионами, предотвращает диффузию электронов в р-область и дырок в н-область.

Если р-область р-п-перехода соединить с положительным выводом какого-либо источника напряжения (например, батареи), а н-область – с отрицательным выводом, то электроны и дырки смогут диффундировать через переход. В результате из р-области в направлении н-области потечет существенный ток. В таком случае говорят, что переход смещен в прямом направлении. При обратном смещении, когда описанные выше подсоединения имеют противоположную полярность, от области н-типа к области р-типа потечет лишь предельно малый обратный ток.

**Диоды с р-п-переходом.** Диоды – это устройства, которые проводят электрический ток только в одном направлении. Следовательно, р-п-переходы идеально подходят для их использования в диодных выпрямителях, преобразующих переменный ток в постоянный.

Когда напряжение обратного смещения на диоде с р-п-переходом увеличивается до критического значения, называемого напряжением пробоя, электрическое поле в области перехода создает электроны и дырки в результате соударений носителей заряда, обладающих высокой энергией, с атомами полупроводников. В ходе этого процесса, называемого ионизацией, образуется «лавина» новых носителей, вследствие чего обратный ток при напряжении пробоя существенно возрастает.

Диодные выпрямители обычно работают при обратных напряжениях ниже напряжения пробоя. Однако резкое и значительное нарастание обратного тока, происходящее при достижении напряжения пробоя, можно использовать для стабилизации напряжения или для фиксации опорного уровня напряжения. Диоды, предназначенные для таких применений, называются полупроводниковыми стабилитронами. Емкость, зависящая от приложенного напряжения, соответствует обратно смещенному р-п-переходу. Такую управляемую напряжением емкость можно применять, например, в настраиваемых контурах. Диоды, в которых используются такие переходы, называют варикапами.

Резкие р-п-переходы, имеющие очень малую толщину и сильно легированные с обеих сторон, находят применение в туннельных диодах, т. е. диодах, в которых электроны могут «туннелировать» сквозь переход. Теория туннельного эффекта применительно к альфа-распаду ядер была разработана в 1928 г. Г. А. Гамовым. А ее приложение к электронике Лео Эсаки и создание в 1957 г. туннельного диода принесло ему Нобелевскую премию 1973 г. (С Л. Эсаки Нобелевскую премию разделили Б. Джозефсон и А. Живер за исследование туннельных эффектов в сверхпроводниках). Туннелирование – это квантовомеханический процесс, позволяющий некоторым электронам проходить сквозь потенциальный барьер. Как при обратном, так и при прямом смещении туннельный диод пропускает ток при очень низком напряжении. Но при некотором критическом значении напряжения прямого смещения эффект туннелирования уменьшается, и, в конечном счете, преобладающим становится прямой ток от р-области к п-области. Ток, обусловленный туннелированием, продолжает уменьшаться, пока напряжение повышается от критического уровня до некоторого более высокого значения. В этом диапазоне напряжений, где происходит уменьшение туннелирования, возникает отрицательное сопротивление, которое можно использовать в различных типах переключателей, автогенераторов, усилителей и других электронных устройств.

р-п-переход может также находить применение в структуре фотодиода или солнечного элемента (фотоэлектрического перехода). Когда свет, который состоит из фотонов, освещает р-п-переход, атомы полупроводника поглощают фотоны, в результате чего образуются дополнительные пары электронов и дырок.

Поскольку эти дополнительные носители собираются в области перехода, от n-области в p-область течет избыточный ток. Величина этого обратного тока пропорциональна скорости, с которой генерируются дополнительные носители, а эта скорость, в свою очередь, зависит от интенсивности падающего света.

В фотодиодах этот обратный ток при фиксированном напряжении обратного смещения зависит от интенсивности освещения. Поэтому фотодиоды часто используют в фотометрах и системах распознавания символов.

Полученную от p-n-перехода энергию солнечные элементы передают в подключенную к ним внешнюю нагрузку. Солнечные элементы, преобразующие солнечный свет в электричество, находят широкое применение в качестве источников электропитания для искусственных спутников Земли и в некоторых применениях на Земле.

Во многих полупроводниковых материалах, таких, как арсенид галлия (GaAs), фосфид галлия (GaP) и фосфид индия (InP), электроны и дырки рекомбинируют друг с другом в области p-n-перехода, смещенного в прямом направлении, излучая свет. Длина волны излучения зависит от используемого материала; обычно спектр излучения находится в пределах от инфракрасного (как в случае GaAs) до зеленого (как для GaP) участков. При надлежащем выборе материалов можно изготовить такие светоизлучающие диоды (СИД), которые будут давать излучение практически любого цвета (длины волны). Такие светодиоды применяют в цифровых наручных часах и в индикаторах электронных калькуляторов. Инфракрасные светодиоды могут использоваться в оптических системах связи, в которых световые сигналы, посылаемые по волоконно-оптическим кабелям, детектируются фотодиодами. Оптоэлектронные системы такого рода могут быть весьма эффективными, если используются светодиоды лазерного типа, а фотоприемники работают в лавинном режиме с обратным смещением.

p-n-переходы используются также в транзисторах и более сложных транзисторных структурах – интегральных схемах, изобретенных в конце 50-х гг. Дж. Килби и независимо Р. Нойсом. Изобретение микросхем началось с изучения свойств тонких оксидных пленок, проявляющихся в эффекте плохой электропроводности при небольших электрических напряжениях. Проблема заключалась в том, что в месте соприкосновения двух металлов не

происходило электрического контакта или он имел полярные свойства. Глубокие изучения этого феномена привели к изобретению диодов, а позже транзисторов и интегральных микросхем.

В 1958 г. двое ученых, живущих в совершенно разных местах, изобрели практически идентичную модель интегральной схемы. Один из них, Джек Килби, работал на Texas Instruments, другой, Роберт Нойс, был одним из основателей небольшой компании по производству полупроводников Fairchild Semiconductor. Обоих объединил вопрос: «Как в минимум места вместить максимум компонентов?». Транзисторы, резисторы, конденсаторы и другие детали в то время размещались на пластинах отдельно, и ученые решили попробовать их объединить на одном монолитном кристалле из полупроводникового материала. Только Килби воспользовался германием, а Нойс предпочел кремний. В 1959 г. они отдельно друг от друга получили патенты на свои изобретения – началось противостояние двух компаний, которое закончилось мирным договором и созданием совместной лицензии на производство чипов. После того как в 1961 г. Fairchild Semiconductor Corporation пустила интегральные схемы в свободную продажу, их сразу стали использовать в производстве калькуляторов и компьютеров вместо отдельных транзисторов, что позволило значительно уменьшить размер и увеличить производительность.



**Килби Джек Сен-Клер** (Kilby Jack Saint Clair) (08.11.1923 – 26.07.2005), американский физик и инженер. Родился в Джефферсон-Сити (штат Канзас). В 1947 г. Килби окончил Иллинойсский университет и поступил на фирму по производству электронных компонентов в Милуоки. Одновременно окончил вечерний факультет в Висконсинском университете и получил степень магистра. В 1958 г. переехал в Даллас (штат Техас) и начал работать в компании «Тексас инструментс», где работал до середины 1980-х годов, а затем остался членом совета директоров.

Пытаясь уменьшить размеры транзистора, Килби выдвинул идею интегральной схемы – множества транзисторов и необходимых элементов электрической цепи на одной подложке, в одном кристалле. Эта идея оказалась революционной. В 1958 г. создал первую интегральную микросхему на основе германия (запатентована в 1959 г.). Последние научные исследования посвящены цифровой обработке сигналов.

В 1966 г. Франклиновский институт наградил Килби медалью Баллантайна, в том же году он получил премию Сарнова, в 1969 г. был награжден Национальной медалью за научные достижения, в 1973 г. получил премию Зворыкина Национальной инженерной академии, в 1978 г. – премию Брунетти Американского института инженеров-электриков (IEEE), в 1982 г. его имя было занесено в Национальный зал славы для изобретателей, в 1983 г. он получил медаль Холли, в 1986 г. – почетную медаль IEEE, в 1990 г. – Национальную медаль по технологии, в 1993 г. – престижную премию Киото по технологии. В 2000 г. Килби был удостоен Нобелевской премии по физике совместно с Ж. И. Алфёровым и Г. Крёмером.



**Нойс Роберт** (Noyce Robert Norton) (12 декабря 1927, Берлингтон, шт. Айова – 3 июня 1990, Остин, шт. Техас), американский инженер, изобретатель (1959) интегральной схемы, системы взаимосвязанных транзисторов на единой кремниевой пластинке, основатель (1968, совместно с Г. Муром) корпорации Intel.

В 1949 г. Нойс окончил Гриннелл-колледж в Айове со степенью бакалавра, а в 1953 г. стал доктором философии Массачусетского технологического института. В 1956–57 гг. работал в полупроводниковой лаборатории изобретателя транзисторов Уильяма Шокли, а затем вместе с семьёй коллегами уволился и основал одну из первых электронных фирм по производству кремниевых полупроводников – Fairchild Semiconductor (Фэрчайлд Семикондактор), которая дала название Силиконовой долине в Северной Калифорнии. Одновременно, но независимо друг от друга Нойс и Килби изобрели интегральную микросхему.

В 1968 г. Нойс и его давний коллега Гордон Мур основали корпорацию Intel. Спустя два года они создали 1103-ю запоминающую микросхему из кремния и поликремния, которая заменила собой прежние малоэффективные керамические сердечники в запоминающих устройствах компьютеров. В 1971 Intel представила микропроцессор, объединяющий в одной микросхеме функции запоминающего устройства и процессора. Вскоре корпорация Intel стала лидером по производству микропроцессоров. В 1988 г. Нойс стал президентом корпорации Sematech, исследовательского консорциума, совместно финансируемого промышленным капиталом и правительством США с целью развития передовых технологий в американской полупроводниковой промышленности.

Компанию основали Роберт Нойс и Гордон Мур в 1968 г. после того, как ушли из компании Fairchild Semiconductor. К ним вскоре присоединился Энди Гроув. После долгих размышлений основатели назвали компанию Intel (от слов «интегрированная электроника»). Бизнес-план компании был распечатан на печатной машинке Робертом

Нойсом и занимал всего одну страницу. Представив его финансисту, который ранее помог создать Fairchild, Intel получила стартовый кредит в 2,5 долл. млн

Успех к компании пришел в 1971, когда Intel начал сотрудничество с японской компанией Busicom. Intel получил заказ на двенадцать специализированных микросхем, но по предложению инженера Тэда Хоффа компания разработала один универсальный микропроцессор Intel 4004. Производительность этого процессора была сравнима с производительностью мощнейших компьютеров того времени. Следующим был разработан Intel 8008. В 1990-е компания стала крупнейшим производителем процессоров для персональных компьютеров. Серии процессоров Pentium и Celeron до сих пор являются самыми распространенными. Intel внесла огромный вклад в развитие компьютерной техники. Достаточно сказать, что спецификации на все порты, шины, системы команд написала Intel или компании, работающие совместно с ней. Например, такой тип памяти, как DDR стал известен благодаря ей (скорее, вопреки), хотя долгое время компания продвигала другой тип памяти – RAMBUS RAM (RDRAM)

3 июня 1990 г. Роберт Нойс скоропостижно скончался в своем рабочем кабинете.

## 2.3. Транзистор

Транзистор представляет собой полупроводниковый прибор, предназначенный для усиления электрического тока и управления им. С помощью современных технологий изготовить транзистор гораздо проще, чем вакуумный триод. Транзистор можно сделать очень маленьким, а значит, быстрым в работе и потребляющим малую мощность. Из-за этих преимуществ современные компьютеры производятся на транзисторах, а не на лампах. Изобретение интегральных микросхем, способных объединить на одном кристалле миллионы транзисторов, прочно закрепило их преимущество перед лампами.

Транзисторы выпускаются в виде дискретных компонентов в индивидуальных корпусах или в виде активных элементов так называемых интегральных схем, где их размеры не превышают 0,025 мм. В связи с тем, что транзисторы очень легко приспособливать к различным условиям применения, они почти полностью заменили электронные лампы. На основе транзисторов и их применений выросла широкая отрасль промышленности – полупроводниковая электроника. Одно из первых промышленных применений транзистор нашел на телефонных коммутаци-

онных станциях. Первым товаром широкого потребления на транзисторах были слуховые аппараты, появившиеся в продаже в 1952 г. Сегодня транзисторы и многотранзисторные интегральные схемы используются в радиоприемниках, телевизорах, магнитофонах, детских игрушках, карманных калькуляторах, системах пожарной и охранной сигнализации, игровых телеприставках и регуляторах всех видов – от регуляторов света до регуляторов мощности на локомотивах и в тяжелой промышленности. В настоящее время «транзисторизованы» системы впрыска топлива и зажигания, системы регулирования и управления, фотоаппараты и цифровые часы. Наибольшие изменения транзистор произвел, пожалуй, в системах обработки данных и системах связи – от телефонных подстанций до больших ЭВМ и центральных АТС. Космические полеты были бы практически невозможны без транзисторов. В области обороны и военного дела без транзисторов не могут обходиться компьютеры, системы передачи цифровых данных, системы управления и наведения, взрыватели, радиолокационные системы, системы связи и разнообразное другое оборудование. В современных системах наземного и воздушного наблюдения, в ракетных войсках – всюду применяются полупроводниковые компоненты. Перечень видов применения транзисторов почти бесконечен и продолжает увеличиваться.

В 1954 г. было произведено немногим более 1 млн транзисторов. Сейчас эту цифру невозможно даже указать. Первоначально транзисторы стоили очень дорого. Сегодня транзисторные устройства для обработки сигнала можно купить за несколько центов.

Объем исследований по физике твердого тела нарастал с 1930-х гг., а в 1948 г. было сообщено об изобретении транзистора. За созданием транзистора последовал необычайный расцвет науки и техники. Был дан толчок исследованиям в области выращивания кристаллов, диффузии в твердом теле, физики поверхности и во многих других областях. Были разработаны разные типы транзисторов, среди которых можно назвать точечный германиевый и кремниевый с выращенными переходами, полевой транзистор (ПТ) и транзистор со структурой металл – оксид – полупроводник (МОП-транзистор). Были созданы также устройства на основе интерметаллических соединений элементов третьего и пятого столбцов периодической системы Менделеева.

ва, примером которых может служить арсенид галлия. Наиболее распространены планарные кремниевые, полевые и кремниевые МОП-транзисторы. Широко применяются также такие разновидности транзистора, как триодные тиристоры и симисторы, которые играют важную роль в технике коммутации и регулировании сильных токов. Транзистор был разработан в Лаборатории Белл Телефон Дж Бардином, У. Браттейном и У. Шоккли.



Американский физик и инженер-электрик **Джон Бардин** (23.05.1908 – 30.01.1998) родился в г. Мэдисон (штат Висконсин) в семье Чарлза Р. Бардина, профессора анатомии и декана медицинской школы при Висконсинском университете, и Элси (в девичестве Хармер) Бардин. После смерти матери мальчика в 1920 г. его отец женился на Рут Хеймс. У Бардина есть два брата, сестра и сводная сестра.

Бардин посещал начальную школу в Мэдисоне, перескочив через четвертый, пятый и шестой классы, затем поступил в университетскую среднюю школу, перешел из нее в мэдисонскую центральную среднюю школу, которую и окончил в 1923 г. Несмотря на врожденный порок – трепет руки, он в молодости был чемпионом по плаванию и умелым игроком в бильярд.

В Висконсинском университете Бардин получил степень бакалавра по электротехнике в 1928 г., изучив в качестве непрофилирующих дисциплин физику и математику. Еще студентом старших курсов он работал в инженерном отделе «Вестерн электрик компани» (этот отдел позднее вошел в систему лабораторий компании «Белл»). В 1929 г. он получил степень магистра по электротехнике в Висконсинском университете, проведя исследование по прикладной геофизике и излучению антенн. В следующем году он последовал за одним из своих руководителей, американским геофизиком Лео Дж. Питерсон, в Питсбург (штат Пенсильвания), где в компании «Галф ризерч» они разработали новую методику, позволявшую, анализируя карты гравитационной и магнитной напряженностей, определять вероятное расположение нефтяных месторождений.

В 1933 г. Бардин поступил в Принстонский университет, где изучал математику и физику под руководством Эугена П. Вигнера (впоследствии Нобелевского лауреата). Он сосредоточил свое внимание на применении квантовой теории к физике твердого тела. К тому времени квантовая механика довольно успешно описывала поведение индивидуальных атомов и частиц внутри атома. Твердые тела подчиняются тем же самым квантовомеханическим законам, но, поскольку макроскопическое тело состоит из большого числа атомов, задача анализа его свойств значительно сложнее. Докторскую степень Бардин получил в Принстоне в 1936 г. за диссертацию, посвященную силам притяжения, удерживающим электроны внутри металла. За год

до окончания своей диссертации он принял предложение стать на год после защиты временным научным сотрудником Гарвардского университета, каковым и оставался до 1938 г. В Гарварде Бардин работал с Джоном Г. Ван Флеком и П. У. Бриджменом (будущими Нобелевскими лауреатами) над проблемами атомной связи и электрической проводимости в металлах.

Когда оговоренный срок закончился, Бардин стал ассистент-профессором в Миннесотском университете, где он продолжил свои исследования поведения электронов в металлах. Между 1941 и 1945 гг. он служил гражданским физиком военно-морской артиллерийской лаборатории в Вашингтоне (округ Колумбия), изучая магнитные поля кораблей – важный по тем временам вопрос, учитывая его приложения к торпедному делу и тралению мин.

В 1945 г. Бардин перешел в компанию «Белл Телефон», где, работая совместно с Уильямом Шокли и Уолтером Браттейном, ему удалось создать полупроводниковые приборы, которые могли как выпрямлять, так и усиливать электрические сигналы. В процессе этой работы Шокли пытался построить то, что теперь называется полевым транзистором. В таком приборе электрическое поле, индуцированное напряжением, приложенным к полупроводнику, должно было влиять на движение электронов внутри материала. Шокли надеялся использовать электрическое поле, чтобы управлять свободными электронами в одном из участков полупроводника и тем самым модулировать ток, текущий через прибор. Кроме того, транзистор должен был обладать потенциальной возможностью стать усилителем, поскольку небольшой сигнал (приложенное напряжение) мог вызвать большие изменения тока, текущего через полупроводник.

Все попытки построить прибор, следуя этому плану, закончились неудачей. Тогда Бардин выдвинул предположение, что внешнее напряжение не создает внутри полупроводника желаемого поля из-за слоя электронов, находящихся на его поверхности. В процессе дальнейших исследований выяснилось, что свойства прибора зависят от освещенности, температуры, поверхности и изменяются при контакте с жидкостями или напылении на полупроводник металлической пленки. В 1947 г., как только группа по-настоящему разбралась в поверхностных свойствах полупроводников, Бардин и Браттейн построили первые работающие транзисторы.

Одним из первых был создан точечно-контактный транзистор, сделанный из одного куска германия. Точечными контактами были два тонких «усика» из металла, названных эмиттером и коллектором и прикрепленных к верхней части германиевого блока; третий контакт, названный базой, был связан с нижней частью блока. Для управления током между эмиттером и коллектором использовался небольшой ток, текущий между эмиттером и базой. Эта идея заменила собой первоначальную идею управления с помощью внешнего электрического поля. В более позднем варианте, названном плоско-

стным триодом, точечные контакты были удалены, а эмиттер и коллектор были образованы из полупроводниковых материалов, в которые вкраплены небольшие количества специальных примесей. Полевые транзисторы не находили практического применения, пока германий не был заменен кремнием в качестве основного материала.

Подобно радиолампе, транзистор позволяет с помощью небольшого сигнала (напряжение для лампы, ток для транзистора) в одном контуре управлять относительно большим током в другом контуре. Благодаря небольшим размерам, простоте структуры, низким энергетическим потребностям и малой стоимости транзисторы быстро вытеснили электронные лампы во всех радиотехнических приборах, за исключением устройств высокой мощности, используемых, например, в радиовещании или промышленных радиочастотных нагревательных установках. В настоящее время во всех высокоскоростных радиотехнических устройствах, а также во многих мощных высокочастотных установках, где можно обойтись без электронных ламп, обычно используются биполярные транзисторы. Усовершенствование технологии сделало возможным создание многих транзисторов из крохотных кусочков кремния, способных выполнять более сложные функции. Число транзисторов в одном подобном кусочке возросло с десяти до миллиона, в частности, благодаря уменьшению размеров соединений и самих транзисторов до величины от половины микрона до нескольких микрон. Такие кусочки позволяют строить современные компьютеры, средства связи и управления, причем технология продолжает быстро развиваться.

В 1956 г. Бардин разделил Нобелевскую премию с Шокли и Браттейном «за исследования полупроводников и открытие транзисторного эффекта». «Транзистор во многом превосходит радиолампы», – отметил Е. Г. Рудберг, член Шведской королевской академии наук, при презентации лауреатов. Указав, что транзисторы значительно меньше электронных ламп и в отличие от последних не нуждаются в электрическом токе для накала нити, Рудберг добавил, что «для акустических приборов, вычислительных машин, телефонных станций и многоного другого требуется именно такое устройство».

В 1951 г. Бардин покинул компанию «Белл» и принял предложение занять одновременно два поста: профессора электротехники и профессора физики в Иллинойском университете. Здесь у него возобновился серьезный интерес к теме, которой он занимался в аспирантские годы и которая была прервана Второй мировой войной и не возобновлялась им до 1950 г., – проблеме сверхпроводимости и свойств материи при сверхнизких температурах.

Сверхпроводимость была открыта в 1911 г. голландским физиком Хейке Камерлинг-Оннесом, который обнаружил, что некоторые металлы совершенно теряют сопротивление к электрическому току при температурах, на несколько градусов превышающих абсолютный нуль.

В металлах многие электроны настолько слабо связаны со своими атомами, что электрическое поле, возникающее благодаря приложенному внешнему напряжению, заставляет их перемещаться в направлении поля. Однако электроны также совершают колебания в случайных направлениях из-за наличия тепла. Это рассеянное движение служит причиной противодействия (сопротивления) потоку электронов под влиянием поля. Когда в результате охлаждения тепловое движение уменьшается, то сопротивление тоже уменьшается. При абсолютном нуле, когда тепловое движение совсем прекращается, можно ожидать, что сопротивление совсем исчезнет. Однако абсолютный нуль практически недостижим. Удивительно в сверхпроводимости то, что сопротивление исчезает при температуре, несколько превышающей абсолютный нуль, когда еще имеется тепловое движение. Никакого удовлетворительного объяснения этому найти тогда не удалось.

Оказалось, что сверхпроводники обладают еще одной необычной особенностью, открытой в 1933 г. немецким физиком Вальтером Мейснером. Он обнаружил, что сверхпроводники являются также идеальными диамагнетиками, т. е. препятствуют проникновению внутрь металла магнитного поля. Парамагнитные материалы, среди которых находятся обычные магнитные металлы, более или менее поддаются намагничиванию со стороны близко расположенного магнита. Поскольку магнитное поле магнита индуцирует поле противоположной направленности в парамагнитном теле, это тело притягивается к магниту. Но так как диамагнитное тело противодействует магнитному полю, это тело и магнит взаимно отталкиваются, независимо от того, какой именно полюс магнита мы подносим к нему. Магнит, помещенный над сверхпроводником, будет покоиться «на подушке магнитного отталкивания». Однако если внешнее магнитное поле достаточно велико, то оно врывается внутрь сверхпроводника, сверхпроводник теряет свои свойства и ведет себя подобно обычному металлу. В 1935 г. немецкие физики братья Фриц и Гейнц Лондоны выдвинули предположение, что диамагнетизм является фундаментальным свойством сверхпроводников и что сверхпроводимость, возможно, представляет собой некий квантовый эффект, проявляющийся каким-то образом во всем теле.

Признаки того, что Лондоны были на верном пути, появились в 1950 г. Несколько американских физиков обнаружили, что различные изотопы одного и того же металла становятся сверхпроводящими при различных температурах и что критическая температура обратно пропорциональна атомной массе. Изотопы представляют собой формы элемента, имеющие одинаковое число протонов в своих ядрах (и, следовательно, одинаковое число окружающих ядро электронов) и химически подобны друг другу, но их ядра содержат различное число нейтронов и, следовательно, обладают различными массами. Бардин знал, что единственное влияние различных атомных масс на свойства твердого тела проявляется в различиях при распространении колеба-

ний внутри тела. Поэтому он предположил, что в сверхпроводимости металла участвует взаимодействие между подвижными электронами (которые относительно свободны, так что могут двигаться, образуя электрический ток) и колебаниями атомов металла и что в результате этого взаимодействия создается связь электронов друг с другом.

К исследованиям Бардина позднее присоединились два его студента по Иллинойскому университету – Леон Н. Купер, который вел исследовательскую работу после защиты докторской диссертации, и Дж. Роберт Шриффер, аспирант. В 1956 г. Купер показал, что электрон (который несет отрицательный заряд), движущийся сквозь регулярную структуру (решетку) металлического кристалла, притягивает ближайшие положительно заряженные атомы, слегка деформируя решетку и создавая кратковременное увеличение концентрации положительного заряда. Эта концентрация положительного заряда, в свою очередь, притягивает второй электрон, и два электрона образуют пару, связанную друг с другом благодаря искажению кристаллической решетки. Таким путем многие электроны в металле объединяются по два, образуя куперовские пары.

Бардин и Шриффер попытались с помощью концепции Купера объяснить поведение обширной популяции свободных электронов в сверхпроводящем металле, но их постигла неудача. Когда Бардин в 1956 г. отправился в Стокгольм получать Нобелевскую премию, Шриффер уже готов был признать поражение, но напутствие Бардина запало ему в душу, и ему удалось-таки развить статистические методы, необходимые для решения данной проблемы.

После этого Бардину, Куперу и Шрифферу удалось показать, что куперовские пары, взаимодействуя между собой, заставляют многие свободные электроны в сверхпроводнике двигаться в унисон, единым потоком. Как и догадывался Ф. Лондон, сверхпроводящие электроны образуют единое квантовое состояние, охватывающее все металлическое тело. Критическая температура, при которой возникает сверхпроводимость, определяет ту степень уменьшения температурных колебаний, когда влияние куперовских пар на корреляцию движения свободных электронов становится доминирующим. Поскольку возникновение сопротивления при отклонении даже одного электрона от общего потока с необходимостью повлияет на другие электроны, участвующие в сверхпроводимости, и тем самым нарушит единство квантового состояния, такое возмущение весьма мало вероятно. Поэтому сверхпроводящие электроны перемещаются коллективно, без потери энергии.

Достижение Бардина, Купера и Шриффера было названо одним из наиболее важных в теоретической физике с момента создания квантовой теории. В 1958 г. они с помощью своей теории предсказали сверхтекучесть у жидкого гелия-3 вблизи абсолютного нуля, что и подтвердилось экспериментально. Сверхтекучесть наблюдалась ранее

у гелия-4 (наиболее распространенный изотоп), и считалось, что она невозможна у изотопов с нечетным числом нуклонов.

Бардин, Купер и Шриффер разделили в 1972 г. Нобелевскую премию по физике «за совместное создание теории сверхпроводимости, обычно называемой БКШ-теорией». Стиг Лундквист, член Шведской королевской академии наук, при презентации лауреатов отметил полноту объяснения ими сверхпроводимости и добавил: «Ваша теория предсказала новые эффекты и весьма стимулировала дальнейшие разработки в теоретических и экспериментальных исследованиях». Он также указал на то, что «дальнейшее развитие... подтвердило огромное значение и ценность идей, заложенных в этой фундаментальной работе 1957 г.».

БКШ-теория привела к далеко идущим последствиям в технологии и теории. Создание материалов, которые становились сверхпроводниками при более высоких температурах или выдерживали сильные магнитные поля, позволило сконструировать исключительно мощные электромагниты небольших размеров, потребляющие мало энергии. Магнитное поле, создаваемое электромагнитом, прямо связано с током в его обмотках. Для обычного проводника наличие сопротивления служит серьезным ограничением, поскольку выделяемое тепло пропорционально сопротивлению и квадрату силы тока. Дело не только в том, что на тепловые потери расходуется дорогостоящая энергия, но при этом также изнашивается материал. Сверхпроводящие магниты используются при исследованиях управляемого термоядерного синтеза, в магнитной гидродинамике, в ускорителях частиц высокой энергии, в поездах, движущихся без трения на магнитной подушке над рельсами, в биологических и физических исследованиях взаимодействия атомов и электронов с сильными магнитными полями и при конструировании компактных мощных электрических генераторов. Датчики, основанные на эффектах Джозефсона, способны определять малейшие изменения магнитной активности в живых организмах и помогают обнаруживать месторождения полезных ископаемых и нефти по их магнитным свойствам.

В 1959 г. Бардин начал работать в Центре фундаментальных исследований Иллинойского университета, продолжая свои изыскания в области физики твердого тела и физики низких температур. В 1975 г. он стал почетным профессором в отставке.

Бардин в 1938 г. женился на Джейн Максвелл; у них два сына и дочь. В свободное время он путешествует и играет в гольф.

Среди многочисленных наград Бардина – медаль Стюарта Баллантайна Франклиновского института (1952), премия Джона Скотта (1955), премия по физике твердого тела Оливера Бакли Американского физического общества (1954), Национальная медаль «За научные достижения» Национального научного фонда (1965), почетная медаль Института инженеров по электротехнике и электронике (1971); президентская медаль Свободы правительства Соединенных Штатов

(1977). В течение многих лет Бардин был соиздателем журнала «Physical Review». Он член американской Национальной академии наук и Американской академии наук и искусств, а также был избран членом Американского физического общества.



Американский физик **Уолтер Хаузер Браттейн** (10.02.1902 – 13.10.1987) родился в г. Амой (Сямынь) на юго-востоке Китая. Сын Росса Р. Браттейна, учителя частной школы для китайских детей, и Оттилии (Хаузер) Браттейн, он был старшим из пятерых детей. В раннем детстве Браттейна семья вернулась в штат Вашингтон, где выросли старшие Браттейны, и обосновалась в Тонаскете. Его отец приобрел участок земли, стал владельцем скотоводческого ранчо и мельницы. Мальчик посещал школу в Тонаскете, затем поступил в Уайтмен-колледж в Балла Валла, выбрав в качестве профилирующих предметов математику и физику. Он стал бакалавром в 1924 г., получил степень магистра по физике в Орегонском университете в 1926 г. и защитил докторскую диссертацию по физике в Миннесотском университете в 1929 г. Хотя Браттейну нравилась жизнь на ранчо, на лоне природы, фермерский труд он ненавидел. «Хождение в пыли за тремя лошадьми и бороной вот что сделало из меня физика», – скажет он впоследствии.

В рамках своей докторской программы Браттейн провел 1928/29 академический год в Национальном бюро стандартов США, где работал над увеличением точности измерений времени и частоты колебаний, а также помогал разрабатывать портативный генератор с температурной регулировкой. В 1929 г. он поступил в лаборатории «Белл телефон» в качестве физика-исследователя и работал здесь до выхода в отставку в 1967 г., после чего вернулся в Уайтмен-колледж, чтобы преподавать физику и заниматься изучением живых клеток.

Первые 7 лет в лабораториях «Белл» Браттейн изучал такие явления, как влияние адсорбционных пленок на эмиссию электронов горячими поверхностями, электронные столкновения в парах ртути, занимался магнитометрами, инфракрасными явлениями и эталонами частоты. В то время главным электронным усилительным устройством была трехэлектродная вакуумная лампа (триод), изобретенная Ли де Форестом в 1907 г. Еще в конце XIX в. Томас Эдисон, занимаясь проблемами электрического освещения, обнаружил, что между раскаленной нитью и вторым электродом, если их поместить в герметическую колбу, откачать воздух и подсоединить батарею, возникает электрический ток. Так родилась двухэлектродная лампа (диод). Позднее физики показали, что нить испускает электроны, которые несут отрицательный заряд и притягиваются положительным электродом. Поскольку диоды проводят ток только в одном направлении, они стали использоваться как выпрямители, превращающие переменный, меняющий направление ток в постоянный ток, текущий только в

одном направлении. Де Форест вставил проволочную сетку (решетку) между излучателем электронов (катодом) и положительным электродом (анодом). Небольшое изменение напряжения на сетке ведет к большим изменениям тока, текущего сквозь сетку между катодом и анодом, тем самым позволяя усиливать сигнал, приложенный к сетке. Высокая температура, необходимая для эмиссии электронов, сокращает срок жизни катода и портит электронную лампу. Браттейн обнаружил, что некоторые тонкие катодные покрытия  $\text{BaO}$   $\text{SrO}$ ,  $\text{BaO}$   $\text{SrO}$   $\text{CuO}$  (так называемые оксидные катоды) обеспечивают удовлетворительную эмиссию при меньших температурах, усиливая эффект и продлевая срок жизни лампы.

Когда в 1936 г. в лабораторию «Белл» пришел Уильям Шокли, он быстро включился в исследования свойств полупроводников. Его целью было заменить вакуумные электронные лампы приборами из твердых материалов, которые были бы меньше размером, менее хрупкими и энергетически более эффективными. Электропроводность полупроводников занимает промежуточное положение между электропроводностью проводников (главным образом металлов) и изоляторов и сильно меняется при наличии даже небольших количеств примесей. В первых радиоприемниках использовался контакт между витком тонкой проволоки (усиком) и куском минерала галенита (полупроводником) для детектирования принятых антенной радиоволн. Исследуя полупроводники, Браттейн и Шокли искали материал, который мог бы как детектировать, так и усиливать сигналы. Их исследования были прерваны войной. С 1942 по 1945 г. они перешли в отдел военных исследований при Колумбийском университете, где занимались применением научных разработок в противолодочной обороне. Шокли отошел от данных исследований несколько раньше Браттейна, и стал работать над радаром.

Когда после войны Браттейн и Шокли вернулись в лаборатории «Белл», к ним присоединился физик-теоретик Джон Бардин. В этом содружестве Браттейн выполнял роль экспериментатора, который определял свойства и поведение исследуемых материалов и приборов. Шокли выдвинул теоретическое предположение, что воздействуя на ток электрическим полем от приложенного напряжения, можно получить усилитель с полевым воздействием. Это поле должно действовать аналогично тому, которое возникает на сетке триодного усилителя. Группа создала много приборов, чтобы проверить теорию Шокли, но все без практических результатов.

Тут Бардину пришла в голову мысль, что поле не может проникнуть внутрь полупроводника из-за слоя электронов, расположенных на его поверхности. Это вызвало интенсивные исследования поверхностных эффектов. Поверхности полупроводников были подвергнуты воздействию света, тепла, холода, они смачивались жидкостями (изолирующими и проводящими) и покрывались металлическими пленками. В 1947 г., когда группа глубоко разбралась в поведении и

свойствах поверхности полупроводников, Браттейн и Бардин сконструировали прибор, в котором впервые проявилось то, что позднее стало известно как транзисторный эффект. Этот прибор, названный точечно-контактным транзистором, состоял из кристалла германия, содержащего небольшую концентрацию примесей. С одной стороны кристалла располагались два контакта из золотой фольги, с другой стороны был третий контакт. Положительное напряжение прикладывалось между первым золотым контактом (эмиттером) и третьим контактом (базой), а отрицательное напряжение – между вторым золотым контактом (коллектором) и базой. Сигнал, поступающий на эмиттер, оказывал влияние на ток в контуре коллектор – база. Хотя этот прибор усиливал сигнал, как и было задумано, но принцип его работы не находил удовлетворительного объяснения, что вызвало новый тур исследований.

Хотя теория полупроводников во многом уже была разработана с помощью квантовой механики, предсказания этой теории еще не нашли адекватного количественного подтверждения в эксперименте. Атомы в кристаллах держатся вместе с помощью электронов, наиболее слабо связанных со своими ядрами. В совершенном кристалле связи, как принято говорить, «насыщены» или «заполнены». Электроны трудно оторвать, они с трудом перемещаются, что приводит к очень высокому электрическому сопротивлению. Такой кристалл представляет собой изолятор. Однако вкрапления чужеродных атомов, которые не вполне подходят к данной структуре, приводят либо к появлению избыточных электронов, способных участвовать в электрическом токе, либо к дефициту электронов, известному как «дырки». Во внешнем поле дырки движутся, как если бы они были положительно заряженными электронами, хотя и с другой скоростью. Фактически дырки представляют собой места, покинутые электронами, и, следовательно, все выглядит так, как если бы дырки двигались в обратном направлении, в то время как электроны двигаются в прямом направлении, заполняя ранее пустые места и образуя новые дырки там, откуда они ушли. Оказалось, что для объяснения действия транзистора нужно учитывать комплексное взаимодействие примесей разных видов и концентраций, локальный характер контактов между различными материалами и вклад, который дают в ток как электроны, так и дырки. Важная роль дырок не была в должной мере предугадана заранее.

Шокли предсказал, что прибор можно улучшить, заменив металлополупроводниковые контакты более качественными контактами между различными типами полупроводников, в одном из которых доминируют избыточные электроны (n-тип), а в другом дырки (p-тип). Удачная модель, названная плоскостным транзистором, была сделана в 1950 г. Она состояла из тонкого слоя p-типа, расположенного – наподобие сандвича – между двумя слоями n-типа с металлическими контактами в каждом слое. Этот прибор работал именно так,

как и предсказывал Шокли. Плоскостные транзисторы стали широко использоваться вместо точечно-контактных типов, поскольку их было легче изготавливать и они лучше работали. Раннюю идею Шокли, транзистор с полевым воздействием, долго не удавалось осуществить, поскольку среди доступных материалов не было подходящих. Работающий полевой транзистор был построен на основе кристаллов кремния, когда методы выращивания и очистки кристаллов достаточно далеко продвинулись вперед.

Подобно электронной лампе, транзисторы позволяют небольшому току, текущему в одном контуре, контролировать гораздо больший ток, текущий в другом контуре. Транзисторы быстро вытеснили радиолампы всюду, за исключением тех случаев, где требуется управлять очень большой мощностью, как, например, в радиовещании или в промышленных нагревательных радиочастотных установках. Биполярные транзисторы обычно используются там, где требуется высокая скорость, так же как и в высокочастотных установках, где нет настоятельной необходимости применять электронные лампы. Полевые транзисторы – это основной тип транзисторов, используемых в электронных приборах. Его легче изготавливать, а энергии он потребляет даже меньше биполярного транзистора. Хотя часть транзисторов еще делаются из германия, большая часть их изготавливается из кремния, который более устойчив к воздействию высоких температур. С дальнейшим развитием технологии стало возможным располагать в одном кусочке кремния до миллиона транзисторов, и это число продолжает возрастать. Подобные кремниевые блоки служат основой для быстрого развития современных компьютеров, средств связи и управления.

Нобелевскую премию по физике за 1956 г. Браттейн разделил с Бардином и Шокли. Они были награждены «за исследования полупроводников и открытие транзисторного эффекта». В своей Нобелевской лекции «Поверхностные свойства полупроводников» (Surface Properties of Semiconductors) Браттейн подчеркнул важность поверхностей, «где происходит много, если не большинство, интересных и полезных явлений. В электронике с большинством, если не со всеми, элементов контура связаны неравновесные явления, происходящие на поверхностях».

Дальнейшие исследования Браттейна, посвященные свойствам полупроводников и их поверхностей, были чрезвычайно важны для полевых транзисторов, которые очень чувствительны к поверхностным дефектам, и для солнечных батарей, свойства которых определяются электрическими свойствами поверхности.

В 1935 г. Браттейн женился на Керен Джилмор, занимавшейся физической химией; у них был сын. В 1957 г. она умерла, а через год Браттейн женился на Эмме Джейн Кирш Миллер. Браттейн известен как человек прямой и искренний. Среди его увлечений – гольф, рыбная ловля и чтение книг.

Среди других наград Браттейна можно назвать медаль Стюарта Баллантайна Франклиновского института (1952), премию Джона Скотта г. Филадельфии (1955) и почетную награду выпускникам Орегонского университета (1976). Он обладает пятью почетными докторскими степенями, состоит членом Национальной академии наук и Почетного общества изобретателей, а также является членом Американской академии наук и искусств, Американской ассоциации содействия развитию науки и Американского физического общества.



Американский физик **Уильям Брэдфорд Шокли** (13.02.1910 – 12.08.1989) родился в Лондоне, в семье Уильяма Хиллмена Шокли, горного инженера, и Мэй (урожденной Брэдфорд) Шокли – федерального инспектора шахт. Когда мальчику исполнилось три года, семья возвратилась в Соединенные Штаты и поселилась в Пало-Альто (штат Калифорния), где Шокли получил начальное образование. Родители поощряли его интерес к физике, пробудившийся под влиянием соседа, преподававшего физику в Станфордском университете.

Окончив в 1927 г. среднюю школу в Голливуде, Шокли поступает в Калифорнийский университет в Лос-Анджелесе и через год переходит в Калифорнийский технологический институт, который заканчивает в 1932 г. со степенью бакалавра. На учительскую стипендию он обучается в аспирантуре Массачусетского технологического института (МТИ) и в 1936 г. защищает докторскую диссертацию на тему «Вычисление волновых функций для электронов в кристаллах хлорида натрия» («Calculations of Wave Functions for Electrons in Sodium Chloride Crystals»). Физику твердого тела Шокли изучает в МТИ, и его работа по кристаллам становится прочным фундаментом для последующей научной деятельности.

В 1936 г. он становится сотрудником лаборатории компании «Белл» в Мюррей-Хилле (штат Нью-Джерси), где работает с Клинтоном Дж. Дэвиссоном (Нобелевским лауреатом 1937 г.). Первым заданием Шокли было проектирование электронного умножителя – особого рода электронной лампы, действующей как усилитель. Затем он занимается исследованиями по физике твердого тела и в 1939 г. выдвигает план разработки твердотельных усилителей как альтернативы вакуумным электронным лампам. Его проект оказался неосуществимым из-за отсутствия в то время необходимых материалов, но основной замысел совпадал с общей направленностью всей деятельности лаборатории «Белл» – с развитием телефонной связи на основе не механических переключателей, а электронных устройств.

Во время Второй мировой войны Шокли работает над военными проектами, сначала над электронным оборудованием полевой радарной станции фирмы «Белл». С 1942 по 1944 г. он исполняет обязанности директора по науке группы по исследованию противолодочных операций, учрежденной Управлением военно-морского флота при

Колумбийском университете в Нью-Йорке, в 1944–45 гг. состоит консультантом при канцелярии военного министра. Новая область, получившая название «исследование операций», ставила перед собой чисто военные задачи, которые анализировала и решала научными методами, например разработку оптимальных схем сбрасывания глубинных бомб при охоте за подводными лодками или выбор оптимального времени и целей для бомбардировочной авиации.

В 1945 г. Шокли возвращается в лабораторию «Белл» в качестве директора программы научных исследований по физике твердого тела. В его группу входят теоретик Джон Бардин и экспериментатор Уолтер Браттейн. Группа возобновляет начатые перед войной исследования полупроводников. Полупроводники обладают электропроводностью, промежуточной между электропроводностью хороших проводников (к числу которых относится большинство металлов) и изоляторов. Электропроводность полупроводников сильно изменяется в зависимости от температуры, а также характера и концентрации примесей в материале. Полупроводники уже использовались в качестве выпрямителей – устройств, проводящих электрический ток только в одном направлении и способных поэтому превращать переменный ток в постоянный. В первых радиоприемниках в качестве детектора радиоволн, принимаемых антенной, использовался контакт между «кошачьим усом» (витком проволочки) и кристаллами галенита (полупроводникового минерала).

Со временем кристаллы были заменены электронными лампами, которые стали наиболее важными и распространенными электронными устройствами. Появление усилительных ламп открыло путь для роста электронной промышленности, но срок службы ламп был сравнительно коротким, для подогрева катодов требовался дополнительный расход энергии, хрупкие стеклянные баллоны занимали большой объем. Шокли и его группа надеялись преодолеть эти недостатки, изготавливая усилители из выпрямляющих ток полупроводников.

Хотя применение квантовой теории к физике твердого тела расширило знание свойств полупроводников, теория не была адекватно подтверждена экспериментами. Шокли намеревался моделировать основной принцип устройства электронной лампы, прикладывая электрическое поле поперек полупроводника с тем, чтобы управлять прохождением электрического тока. Хотя вычисления Шокли показывали, что такое поле должно приводить к усилению тока, получить практические результаты не удавалось. Бардин высказал предположение о том, что электроны оказываются запертными в поверхностном слое, который препятствует проникновению поля внутрь полупроводника. За этой удачной идеей последовала серия экспериментов по изучению поверхностных эффектов. Эти эксперименты помогли трем исследователям понять сложное поведение полупроводниковых устройств.

Было известно, что проводимость в полупроводниках осуществляется носителями заряда двух типов: электронами и «дырками». Электроны, участвующие в проводимости, – это избыточные электроны из числа тех, которые связывают атомы и твердый кристалл. Дырки соответствуют недостающим электронам. Так как электрон несет отрицательный заряд, незаполненное электронное состояние ведет себя как положительный заряд такой же величины. Дырки также обладают способностью двигаться, хотя и не с такой скоростью, как электроны, и в противоположном направлении. Когда соседний электрон перемещается «вперед», чтобы заполнить дырку, он оставляет позади себя новую дырку, поэтому создается впечатление, будто дырка движется назад. Группа Шокли установила, что вклад дырочного тока в полный ток обычно недооценивается. Вводимые в чистый кристалл примеси в виде атомов, нарушающих регулярную кристаллическую структуру, создают области с избыточным количеством электронов (n-тип) или дырок (p-тип).

В 1947 г. Бардин и Браттейн достигли первого успеха, построив полупроводниковый усилитель, или транзистор (от английских слов *transfer* плюс *resistor*, от лат. *resisto* – сопротивляюсь). Окончательный вариант прибора состоял из блока германия (полупроводника n-типа) с двумя близко расположенными точечными контактами («кошачьими усами») на одной грани на противоположной грани. К одному контакту (эмиттеру) приложено небольшое положительное напряжение относительно широкого электрода (базы) и большое отрицательное напряжение относительно второго контакта (коллектора). Сигнальное напряжение, подаваемое на эмиттер вместе с постоянным смещением, передается со значительным усилением в цепь коллектора. В основе действия транзистора лежит внедрение дырок в германий через контакт-эмиттер и их движения к контакт-коллектору, где дырки усиливают коллекторный ток. Последующие события развертывались стремительно, Шокли предложил заменить точечные контакты выпрямляющими переходами между областями p- и n-типа в том же кристалле. Такое устройство, получившее название плоскостного транзистора, было изготовлено в 1950 г. Оно состояло из тонкой p-области, заключенной между двумя n-областями (все области имеют отдельные внешние контакты). Плоскостной транзистор основательно потеснил транзистор с точечными контактами, так как производить плоскостной транзистор оказалось гораздо легче, а функционирует он надежнее. Усовершенствование методов выращивания, очистки и обработки кристаллов кремния позволило осуществить давнюю идею Шокли о создании транзистора на основе полевых эффектов. Ныне этот тип транзисторов наиболее широко используется в электронных устройствах. Современная промышленность в состоянии выпускать миниатюрные кремниевые кристаллы, в каждом из которых умещаются сотни тысяч транзисторов, и число это продолжает расти. Появление таких кристаллов стимулировало быстрое развитие

новейших компьютеров, портативных, умещающихся в руке калькуляторов, сложных средств связи, приборов управления, слуховых аппаратов, медицинских зондов и других электронных устройств.

В 1956 г. Шокли, Бардин и Браттейн были удостоены Нобелевской премии по физике «за исследования полупроводников и открытие транзисторного эффекта». На церемонии презентации Э. Г. Рудберг, член Шведской королевской академии наук, назвал их достижение «образцом предвидения, остроумия и настойчивости в достижении цели».

Шокли оставался сотрудником лаборатории «Белл» до 1955 г., в последний год был руководителем исследований по физике транзисторов. Он также занимал различные должности вне лаборатории – был приглашенным лектором в Принстонском университете (1946), советником по науке Политического комитета Объединенной комиссии по исследованиям и развитию (1947–1949) и членом научно-консультативного комитета армии США (1951–1963). В 1954–55 гг. Шокли был приглашенным профессором Калифорнийского технологического института и руководителем научных исследований группы оценки систем оружия министерства обороны США. С 1958 по 1962 г. он состоял также членом научно-консультативного комитета военно-воздушных сил США.

После ухода из лаборатории «Белл» Шокли создает полупроводниковую лабораторию Шокли (впоследствии транзисторную корпорацию Шокли, входящую в состав компании «Бекман инструментс») в Пало-Альто, занимавшуюся разработкой транзисторов и других полупроводниковых устройств. В 1968 г. фирма после двукратной смены хозяев прекратила свое существование.

В 1962 г. Шокли был назначен членом консультативного научного комитета по рабочей силе при президенте США. Он входил также в научно-консультативный комитет при НАСА (Национальное управление по аeronавтике и исследованию космического пространства). В 1963 г. Шокли был назначен первым профессором инженерных и прикладных наук Станфордского университета, где он преподавал до выхода в отставку (1975).

Преподавание в Станфорде стимулировало у Шокли интерес к проблеме совершенствования научного мышления. Его идеи относительно улучшения общества в конце концов вызвали споры среди ученых-генетиков. У Шокли сложилось убеждение, что человечеству угрожает своего рода «ухудшение породы», поскольку у людей с более низким коэффициентом умственного развития рождается больше детей, чем у людей с более высоким коэффициентом. Его высказывания, носившие сначала общий характер, вскоре стали все более приобретать расистский оттенок. Так, в 1970 г., выступая в американской Национальной академии наук, он заявил, что проведенные им исследования «неизбежно приводят к выводу о расово-генетической основе проблем негритянского населения Америки». За подобные взгляды

он был подвергнут резкой критике со стороны многих общественных деятелей и ученых, подчеркивавших, однако, что научная значимость достижений Шокли никак не может быть подорвана его суждениями о генетике.

Кроме работ по физике полупроводников и транзисторов, Шокли внес важный вклад в использование свойств магнитных материалов для банков памяти компьютеров и в развитие электромагнитной теории. В круг его интересов входили энергетические зоны в твердых телах, пластические свойства металлов, теория границ зерен (поверхностей, разделяющих крохотные кристаллики, образующие поликристаллическое тело), порядок и беспорядок в сплавах. Шокли получил более 90 патентов на изобретения.

В 1933 г. он женился на Джин Альберте Бейли. У них родились двое сыновей и дочь. В 1955 г. они развелись, и в том же году Шокли женится вторично, на Эмми Лэннинг, медицинской сестре по уходу за психическими больными. В молодые годы он был заядлым альпинистом. По словам его второй жены, Шокли относился к альпинизму не как к форме отдыха, а как к проблеме, которую требовалось решить, и тщательно тренировался, готовя себя к такому решению. В более зрелом возрасте он предпочитал заниматься парусным спортом, плаванием и нырянием за жемчугом.

Кроме Нобелевской премии, Шокли награжден правительством США медалью «За заслуги» (1946), удостоен премии Морриса Либмана Института радиоинженеров (1952), премии Оливера Бакли по физике твердого тела Американского физического общества (1953), премии Комстока американской Национальной академии наук (1954), медали Холли Американского общества инженеров-механиков (1963), почетной медали Института инженеров по электротехнике и электронике (1980). Он был членом американской Национальной академии наук, Американского физического общества, Американской академии наук и искусств, Института инженеров по электротехнике и электронике.

С изобретением транзистора наступил период миниатюризации радиоэлектронной аппаратуры на базе достижений быстро развивающейся полупроводниковой электроники. По сравнению с радиоэлектронной аппаратурой первого поколения (на электронных лампах) аналогичная по назначению радиоэлектронная аппаратура второго поколения (на полупроводниковых приборах, в том числе на транзистор) имеет в десятки и сотни раз меньшие габариты и массу, более высокую надежность и потребляет значительно меньшую электрическую мощность. Размеры полупроводникового элемента современного транзистор весьма малы: даже в самых мощных транзисторов площадь

кристалла не превышает нескольких квадратных миллиметров. Надежность работы транзистора (определяется по среднему статистическому времени наработки на один отказ) характеризуется значениями  $\sim 10^5$  ч, достигая в отдельных случаях  $10^6$  ч. В отличие от электронных ламп транзисторы могут работать при низких напряжениях источников питания (до нескольких десятых долей вольтов), потребляя при этом токи в несколько микроампер. Мощные транзисторы работают при напряжениях 10–30 В и токах до нескольких десятков а, отдавая в нагрузку мощность до 100 Вт и более. Верхний предел диапазона частот усиливаемых транзистором сигналов достигает 10 ГГц, что соответствует длине волны электромагнитных колебаний 3 см. По шумовым характеристикам в области низких частот транзисторы успешно конкурируют с малошумящими электрометрическими лампами. В области частот до 1 ГГц транзисторы обеспечивают значение коэффициента шума не выше 1,5–3,0 дБ. На более высоких частотах коэффициент шума возрастает, достигая 6–10 дБ на частотах 6–10 ГГц.

Транзистор является основным элементом современных микроэлектронных устройств. Успехи планарной технологии позволили создавать на одном кристалле полупроводника площадью 30–35  $\text{мм}^2$  электронные устройства, насчитывающие до нескольких десятков тысяч транзисторов. Такие устройства, получившие название интегральных микросхем (ИС), являются основой радиоэлектронной аппаратуры третьего поколения. Примером такой аппаратуры могут служить наручные электронные часы, содержащие от 600 до 1500 транзисторов, и карманные электронные вычислительные устройства (несколько тысяч транзисторов). Переход к использованию ИС определил новое направление в конструировании и производстве малогабаритной и надежной радиоэлектронной аппаратуры, получившее название микроэлектроники. Достоинства транзисторов в сочетании с достижениями технологии их производства позволяют создавать ЭВМ, насчитывающие до нескольких сотен тысяч элементов, размещать сложные электронные устройства на борту самолетов и космических летательных аппаратов, изготавливать малогабаритную радиоэлектронную аппаратуру для использования в самых различных областях промышленности, в медицине, быту и т. д. Наряду с достоинствами транзистор, как и другие полупроводниковые приборы, имеют ряд недостатков.

В первую очередь – ограниченный диапазон рабочих температур. Так, германиевые транзисторы работают при температурах не свыше 100 °С, кремниевые 200 °С. К недостаткам транзисторов относятся также существенные изменения их параметров с изменением рабочей температуры и довольно сильная чувствительность к ионизирующему излучениям.

Если реализуются планы американской компании Ball Semiconductor Inc (BSI, Dallas, Texas), полупроводниковому чипу придется потесниться. BSI полагает, что будущее принадлежит **сферическим кремниевым интегральным схемам**. Разработанная фирмой сферическая литография позволяет формировать схемы (например, процессора) не на привычном плоском кристалле, а на кремниевом шарике диаметром 1мм. Весь технологический цикл – от формирования кремниевых шариков до сборки схем, проводится в герметизированных кварцевых трубках. Шарики формируются из расплавленных поликремниевых гранул в процессе охлаждения трубки. При проведении операций литографии, травления, диффузии, металлизации шарики «всплывают» в трубке. BSI разработала систему зеркал с 45 гранями, позволяющую переносить рисунок на поверхность сферы. В разработке системы принимала участие фирма Canon.

«Мы, а также наши партнеры и заказчики, верим, что технология нашей фирмы изменит форму электронных изделий и откроет новые горизонты для полупроводниковой технологии», – говорит Акиза Ишикава (Akiza Ishikawa), нынешний президент Ball Semiconductor и бывший президент Texas Instrument Japan. По его мнению, изготовление ИС на шариках позволит сократить современные производственные расходы на 90 %. Производственная линия с полным циклом новой технологии обойдется в 100 млн долл. (для сравнения, современный завод с традиционной технологией обходится в 1 млрд долл.). Фирма уже получила от японских и азиатских инвесторов 52 млн долл. Новую технологию стала независимо осваивать и другая вновь созданная американская фирма Allen, расположенная в Техасе.

### 2.3.1. Принцип действия биполярного транзистора

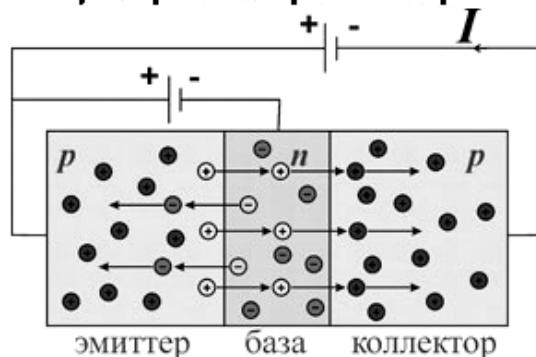
Биполярный транзистор – это полупроводниковый кристалл, разделенный на три части, которые называются эмиттером, базой и коллектором (рис. 2.1). В этих слоях за счет введе-

ния в эти области различных примесей соотношение свободных дырок и электронов различно. Причем области с преимущественно дырочной и преимущественно электронной проводимостью чередуются. Так для p-n-p-транзистора, в эмиттере и коллекторе дырок существенно больше, чем электронов (говорят, что эти области обладают проводимостью p-типа). В базе же, наоборот, больше электронов (проводимость n-типа).

Пусть как на коллектор, так и на базу транзистора подан отрицательный потенциал относительно эмиттера – на базу меньший, на коллектор больший (рис. 2.1, а). Тогда электрическое поле на контакте база–эмиттер направлено слева направо и способствует движению дырок из эмиттера в базу, а электронов, наоборот – из базы в эмиттер. Поле на контакте база–коллектор направлено также направо и препятствует переходу дырок из коллектора в базу и электронов из базы в коллектор. Однако дырки, попавшие в базу из эмиттера, под действием этого поля свободно проходят в коллектор. Обычно базу делают достаточно тонкой, поэтому в коллектор переходят практически все дырки из эмиттера, и в коллекторной цепи течет достаточно большой ток.

Теперь предположим, что потенциал базы относительно эмиттера стал положительным, а потенциал коллектора по-прежнему отрицателен (рис. 2.1, б). Тогда электрическое поле на контакте эмиттер–база направлено налево, а на контакте база–коллектор – направо. Таким образом, поле препятствует выходу электронов из базы в обе стороны, так же как и попаданию в нее дырок. Поэтому через контакты течет только ток, связанный с

### а) открытый транзистор



### б) закрытый транзистор

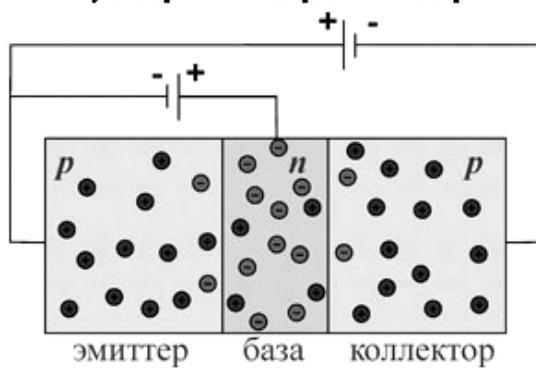


Рис. 2.1. ОТКРЫТЫЙ (А) И ЗАКРЫТЫЙ (Б) РМР-ТРАНЗИСТОР

движением неосновных зарядов – дырок в базе и электронов в эмиттере и коллекторе. Так как число таких зарядов весьма невелико по сравнению с основными, то и ток в этом случае пре-небрежимо мал.

Тем самым, варьируя напряжение между базой и эмиттером, можно изменять значение коллекторного тока от максимального до почти нулевого, т. е. «открывать» и «закрывать» транзистор. Это значит, что транзистор, как и вакуумный триод, может выполнять функцию «электронного вентиля».

В биполярном транзисторе носителями заряда служат как электроны, так и дырки. В нем имеются два близко расположенных и включенных навстречу друг другу перехода, которые образуют тем самым три отдельных слоя pnp- либо npn-структур. В pnp-транзисторе p-область, служащая слоем ввода, называется эмиттером; центральная n-область является базой; p-область, служащая выводом, называется коллектором. В npn-транзисторе p- и n-области меняются местами. В pnp-транзисторе дырки инжектируются через эмиттерный переход, смещенный в прямом направлении, и собираются на коллекторном переходе, смещенному в обратном направлении; в n-p-n-приборе то же самое происходит с электронами. Количество инжектируемых и собираемых носителей заряда можно менять путем изменения малого тока, подаваемого в область базы. В результате на  $R_h$  можно получать электрические сигналы, мощность которых будет во много раз превосходить мощность, затраченную в цепи ЭП. Подобные же физические процессы происходят и в транзисторе pnp-типа (рис. 2.1, б), но в нем электроны и дырки меняются полярно, а полярности приложенных напряжений должны быть изменены на обратные. Эмиттер в транзисторе может выполнять функции коллектора, а коллектор – эмиттера (в симметричных транзисторах), для этого достаточно изменить полярность соответствующих напряжений.

В соответствии с механизмом переноса не основных носителей через базу различают бездрейфовые транзисторы, в базе которых ускоряющее электрическое поле отсутствует и заряды переносятся от эмиттера к коллектору за счет диффузии, и дрейфовые транзисторы, в которых действуют одновременно два механизма переноса зарядов в базе: их диффузия и дрейф в электрическом поле. По электрическим характеристикам и областям применения различают транзисторы маломощные мало-

шумящие (используются во входных цепях радиоэлектронных усилительных устройств), импульсные (в импульсных электронных системах), мощные генераторные (в радиопередающих устройствах), ключевые (в системах автоматического регулирования в качестве электронных ключей), фототранзисторы (в устройствах, преобразующих световые сигналы в электрические с одновременным усилением последних) и специальные. Различают также низкочастотные транзисторы (в основном для работы в звуковом и ультразвуковом диапазонах частот), высокочастотные (до 300 МГц) и сверхвысокочастотные (свыше 300 МГц).

### 2.3.2. Полевой транзистор

Полевой транзистор (канальный транзистор) – полупроводниковый прибор, в котором ток изменяется в результате действия перпендикулярного току электрического поля, создаваемого входным сигналом. Протекание в полевом транзисторе рабочего тока обусловлено носителями заряда только одного знака (электронами или дырками), поэтому такие приборы называются униполярными (в отличие от биполярных). По физической структуре и механизму работы полевые транзисторы условно делят на 2 группы. Первую образуют полевые транзисторы с управляющим р-п-переходом или переходом металл – полупроводник, так называемым барьером Шотки, вторую – полевые транзисторы с управлением посредством изолированного электрода (затвора), так называемые транзисторы МДП (металл – диэлектрик – полупроводник). В последних в качестве диэлектрика используют окисел кремния (МОП-транзистор) или слоистые структуры, например  $\text{SiO}_2$  –  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (МАОП-транзистор),  $\text{SiO}_2$  –  $\text{Si}_3\text{N}_4$  (МНОП-транзистор) и др. К полевым транзисторам с изолированным затвором относят также полевой транзистор с так называемым плавающим затвором и полевой транзистор с накоплением заряда в изолированном затворе (их применяют как элементы электронной памяти). В полевых транзисторах в качестве полупроводника используют в основном Si и GaAs, в качестве металлов, образующих переход, – Al, Mo, Au. Полевые транзисторы были созданы в 50–70-е гг. XX в. на основе работ американских ученых У. Шокли, С. Мида, Д. Канга, М. Аталлы и др.

Полевые транзисторы широко применяют в электронной аппаратуре для усиления электрических сигналов по мощности и напряжению. Полевые транзисторы – твердотельные аналоги электронных ламп, они характеризуются аналогичной системой параметров – крутизной характеристики ( $0,1\text{--}400\text{ мА/В}$ ), напряжением отсечки ( $0,5\text{--}20\text{ В}$ ), входным сопротивлением по постоянному току ( $10^{11}\text{--}10^{16}\text{ Ом}$ ) и т. д.

Полевой транзистор с управляющим р-п-переходом обладает наиболее низким среди полупроводниковых приборов уровнем шумов (являющихся в основном тепловыми шумами) в широком диапазоне частот – от инфразвуковых до СВЧ (коэффициент шума лучших полевых транзисторов  $< 0,1\text{ дБ}$  на частоте  $10\text{ Гц}$  и  $\sim 2\text{ дБ}$  на частоте  $400\text{ МГц}$ ). Мощность рассеяния полевых транзисторов такого типа может достигать нескольких десятков ватт. Их основной недостаток – относительно высокая проходная емкость, требующая нейтрализации ее при большом усилении. В полевом транзисторе с переходом металл – полупроводник достигнуты наиболее высокие рабочие частоты (максимальная частота усиления по мощности лучших полевых транзисторов на арсениде галлия превышает  $40\text{ ГГц}$ ). Полевой транзистор с изолированным затвором обладает высоким входным сопротивлением по постоянному току (до  $10^{16}\text{ Ом}$ , что на 2–3 порядка выше, чем у других полевых транзисторов, и сравнимо с входным сопротивлением лучших электрометрических ламп). В области СВЧ усиление и уровень шумов у этих полевых транзисторов такие же, как и у биполярных транзисторов (предельная частота усиления по мощности около  $10\text{ ГГц}$ , коэффициент шума на частоте  $2\text{ ГГц}$  около  $3,5\text{ дБ}$  и динамический диапазон  $> 100\text{ дБ}$ ), однако они превосходят последние по параметрам избирательности и помехоустойчивости (благодаря строгой квадратичности передаточной характеристики). Относительная простота изготовления (по планарной технологии) и схемные особенности построения позволили использовать их в больших интегральных схемах (БИС) устройств вычислительной техники (например, созданы большие интегральные схемы, содержащие более 10 тыс. МДП-транзисторов в одном кристалле).

Важной особенностью МДП-транзистора является его двумерность. Принципиальное устройство МДП-транзистора приведено на рис. 2.2.



Рис. 2.2. Принципиальная схема устройства полевого транзистора

Если на затвор подать положительный потенциал, то дырки, находящиеся в полупроводниковой пластине, будут уходить как можно дальше от затвора, а электроны, которых мало в дырочном материале, будут наоборот подтягиваться к диэлектрическому слою, создавая между истоком и стоком проводящий электронный канал. Настолько тонкий, что его вполне можно считать двумерным. Концентрация электронов в двумерном слое определяется напряжением на затворе и практически не зависит от температуры. Это и позволяет говорить о двумерном металле, а не о двумерном полупроводнике, поскольку независимость концентрации электронов проводимости от температуры является характерным признаком металла. Однако в практической реализации МДП-транзистора возникает ряд проблем. Окисление поверхности кремния приводит к микроскопическим напряжениям и разупорядочению связей на поверхности, так как параметры решетки кремния и  $\text{SiO}_2$  не совпадают. Это настолько мучительная проблема, что обычно окисление проводят при небольшом парциальном давлении воды, чтобы водород мог садиться на свободные связи кремния.

Биполярный транзистор – это, по существу, прибор, управляемый током, а полевой транзистор – прибор, управляемый напряжением. Оба типа транзисторов широко применяются в схемах микроэлектроники.

### 2.3.3. Гетероструктуры

Гетероструктуры получаются при создании контактов двух полупроводников с различными ширинами запрещенных зон. Они гораздо более легко реализуемые по сравнению с МДП-транзисторами.

Для электронов, движущихся в узкозонном полупроводнике и имеющих меньшую энергию, граница будет играть роль потенциального барьера. Два гетероперехода ограничивают движение электрона с двух сторон, образуя потенциальную яму. Таким образом создают квантовые ямы, помещая тонкий слой полупроводника с узкой запрещенной зоной между двумя слоями материала с более широкой запрещенной зоной. В результате электроны заперты в одном направлении, что и приводит к квантованию энергии поперечного движения. В то же время в двух других направлениях движение электронов будет свободным, поэтому электронный газ в квантовой яме становится двумерным. Аналогично можно приготовить структуру, содержащую квантовый барьер. Для этого следует поместить тонкий слой полупроводника с широкой запрещенной зоной между двумя полупроводниками с узкой запрещенной зоной. Экспериментальное исследование гетероструктур было проведено в 70-х гг. в Ленинградском физико-техническом институте Ж. И. Алфёровым, теория разработана Г. Крёмером.



**Жорес Иванович Алфёров** родился 15 марта 1930 г. в белорусском г. Витебске. После 1935 г. семья переехала на Урал. В г. Турийске Алфёров учился в школе с пятого по восьмой классы. 9 мая 1945 г. его отец, Иван Карпович Алфёров, получил назначение в Минск, где Алфёров окончил мужскую среднюю школу № 42 с золотой медалью. По совету школьного учителя физики, Якова Борисовича Мельцерзона Алфёров поступил на факультет электронной техники (ФЭТ) Ленинградского электротехнического института (ЛЭТИ) им. В. И. Ульянова. На третьем курсе Алфёров пошел работать в вакуумную лабораторию профессора Б. П. Козырева. Там он начал экспериментальную работу под руководством Натальи Николаевны Созиной. Со студенческих лет Алфёров привлекал к участию в научных исследованиях других студентов. Так, в 1950 г. полупроводники стали главным делом его жизни.

В 1953 г., после окончания ЛЭТИ, Алфёров был принят на работу в Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе в лабораторию В. М. Тучкевича. В первой половине 50-х гг. перед институтом была поставлена задача создать отечественные полупроводниковые приборы для внедрения в отечественную промышленность. Перед лабораторией стояла задача: получение монокристаллов чистого германия и создание на его основе плоскостных диодов и триодов. При участии Алфёрова были разработаны первые отечественные транзисторы и силовые германиевые приборы. За комплекс проведенных работ в 1959 г. Алфёров получил первую правительенную награду, а также им была защищена кандидатская диссертация, подводившая черту под десятилетней работой.

После этого перед Ж. И. Алфёровым встал вопрос о выборе дальнейшего направления исследований. Накопленный опыт позволял ему перейти к разработке собственной темы. В те годы была высказана идея использования в полупроводниковой технике гетеропереходов. Создание совершенных структур на их основе могло привести к качественному скачку в физике и технике. В то время во многих журнальных публикациях и на различных научных конференциях неоднократно говорилось о бесперспективности проведения работ в этом направлении, так как многочисленные попытки реализовать приборы на гетеропереходах не приходили к практическим результатам. Причина неудач крылась в трудности создания близкого к идеальному перехода, выявлении и получении необходимых гетеропар.

Но это не остановило Жореса Ивановича. В основу технологических исследований им были положены эпитаксиальные методы, позволяющие управлять такими фундаментальными параметрами полупроводника, как ширина запрещенной зоны, величина электронного сродства, эффективная масса носителей тока, показатель преломления и т. д. внутри единого монокристалла.

Для идеального гетероперехода подходили GaAs и AlAs, но последний почти мгновенно на воздухе окислялся. Значит, следовало

подобрать другого партнера. И он нашелся тут же, в институте, в лаборатории, возглавляемой Н. А. Горюновой. Им оказалось тройное соединение AlGaAs. Так определилась широко известная теперь в мире микроэлектроники гетеропара GaAs/AlGaAs. Ж. И. Алфёров с сотрудниками не только создали в системе AlGaAs – GaAs гетероструктуры, близкие по своим свойствам к идеальной модели, но и первый в мире полупроводниковый гетеролазер, работающий в непрерывном режиме при комнатной температуре.

Открытие Ж. И. Алфёровым идеальных гетеропереходов и новых физических явлений – «суперинжекции», электронного и оптического ограничения в гетероструктурах – позволило также кардинально улучшить параметры большинства известных полупроводниковых приборов и создать принципиально новые, особенно перспективные для применения в оптической и квантовой электронике. Новый этап исследований гетеропереходов в полупроводниках Жорес Иванович обобщил в докторской диссертации, которую успешно защитил 1970 г.

Работы Ж. И. Алфёрова были по заслугам оценены международной и отечественной наукой. В 1971 г. Франклиновский институт (США) присуждает ему престижную медаль Баллантайна, называемую «малой Нобелевской премией» и учрежденную для награждения за лучшие работы в области физики. Затем следует самая высокая награда СССР – Ленинская премия (1972 г.).

С использованием разработанной Ж. И. Алфёровым в 70-х гг. технологии высокоеффективных, радиационностойких солнечных элементов на основе AlGaAs/GaAs гетероструктур в России (впервые в мире) было организовано крупномасштабное производство гетероструктурных солнечных элементов для космических батарей. Одна из них, установленная в 1986 г. на космической станции «Мир», проработала на орбите весь срок эксплуатации без существенного снижения мощности.

На основе предложенных в 1970 г. Ж. И. Алфёровым и его сотрудниками идеальных переходов в многокомпонентных соединениях InGaAsP созданы полупроводниковые лазеры, работающие в существенно более широкой спектральной области, чем лазеры в системе AlGaAs. Они нашли широкое применение в качестве источников излучения в волоконно-оптических линиях связи повышенной дальности.

В начале 90-х гг. одним из основных направлений работ, проводимых под руководством Ж. И. Алфёрова, становится получение и исследование свойств наноструктур пониженной размерности: квантовых проволок и квантовых точек.

В 1993–94 гг. впервые в мире реализуются гетеролазеры на основе структур с квантовыми точками – «искусственными атомами». В 1995 г. Ж. И. Алфёров со своими сотрудниками впервые демонстрирует инжекционный гетеролазер на квантовых точках, работающий в

непрерывном режиме при комнатной температуре. Принципиально важным стало расширение спектрального диапазона лазеров с использованием квантовых точек на подложках GaAs. Таким образом, исследования

Ж. И. Алфёрова заложили основы принципиально новой электроники на основе гетероструктур с очень широким диапазоном применения, известной сегодня как «зонная инженерия».

В одном из своих многочисленных интервью (1984 г.) на вопрос корреспондента: «По слухам, Вы нынче были представлены к Нобелевской премии. Не обидно, что не получили?» Жорес Иванович ответил: «Слышал, что представляли уже не раз. Практика показывает – либо ее дают сразу после открытия (в моем случае это середина 70-х гг.), либо уже в глубокой старости. Так было с П. Л. Капицей. Значит, у меня еще все впереди».

Здесь Жорес Иванович ошибся. Как говорится, награда нашла героя раньше наступления глубокой старости. 10 октября 2000 г. по всем программам российского телевидения сообщили о присуждении Ж. И. Алфёрову Нобелевской премии по физике за 2000 г.

«Современные информационные системы должны отвечать двум простым, но основополагающим требованиям: быть быстрыми, чтобы большой объем информации, можно было передать за короткий промежуток времени, и компактными, чтобы уместиться в офисе, дома, в портфеле или кармане.

Своими открытиями Нобелевские лауреаты по физике за 2000 г. создали основу такой современной техники. Жорес И. Алфёров и Герберт Крёмер открыли и развили быстрые опто- и микроэлектронные компоненты, которые создаются на базе многослойных полупроводниковых гетероструктур. Гетеролазеры передают, а гетероприемники принимают информационные потоки по волоконно-оптическим линиям связи. Гетеролазеры можно обнаружить также в проигрывателях CD-дисков, устройствах, декодирующих товарные ярлыки, в лазерных указках и во многих других приборах. На основе гетероструктур созданы мощные высокоэффективные светоизлучающие диоды, используемые в дисплеях, лампах тормозного освещения в автомобилях и светофорах. В гетероструктурных солнечных батареях, которые широко используются в космической и наземной энергетике, достигнуты рекордные эффективности преобразования солнечной энергии в электрическую.

Джек Килби награжден за свой вклад в открытие и развитие интегральных микросхем, благодаря чему стала быстро развиваться микроэлектроника, являющаяся – наряду с оптоэлектроникой – основой всей современной техники».

В 1973 г. Алфёров, при поддержке ректора ЛЭТИ А. А. Вавилова, организовал базовую кафедру оптоэлектроники (ЭО) на факультете электронной техники Физико-технического института им. А. Ф. Иоффе.

В невероятно сжатые сроки Ж. И. Алфёров совместно с Б. П. Захарченей и другими учеными Физтеха разработал учебный план подготовки инженеров по новой кафедре. Он предусматривал обучение студентов первого и второго курсов в стенах ЛЭТИ, поскольку уровень физико-математической подготовки на ФЭТ был высоким и создавал хороший фундамент для изучения специальных дисциплин, которые, начиная с третьего курса, читались учеными Физтеха на его территории. Там же с использованием новейшего технологического и аналитического оборудования выполнялись лабораторные практикумы, а также курсовые и дипломные проекты под руководством преподавателей базовой кафедры.

Прием студентов на первый курс в количестве 25 человек осуществлялся через вступительные экзамены, а комплектование групп второго и третьего курсов для обучения по кафедре ОЭ проходило из студентов, обучавшихся на ФЭТ и на кафедре диэлектриков и полупроводников Электрофизического факультета. Комиссию по отбору студентов возглавлял Жорес Иванович. Из примерно 250 студентов, обучавшихся на каждом курсе, было отобрано по 25 лучших. 15 сентября 1973 г. начались занятия студентов вторых и третьих курсов. Для этого был подобран прекрасный профессорско-преподавательский состав.

Ж. И. Алфёров очень большое внимание уделял и уделяет формированию контингента студентов первого курса. По его инициативе в первые годы работы кафедры в период весенних школьных каникул проводились ежегодные школы «Физика и жизнь». Ее слушателями были учащиеся выпускных классов школ Ленинграда. По рекомендации учителей физики и математики наиболее одаренным школьникам вручались приглашения принять участие в работе этой школы. Таким образом набиралась группа в количестве 30–40 человек. Они размещались в институтском пионерском лагере «Звездный». Все расходы, связанные с проживанием, питанием и обслуживанием школьников, наш вуз брал на себя.

На открытие школы приезжали все ее лекторы во главе с Ж. И. Алфёровым. Все проходило и торжественно, и очень по-домашнему. Первую лекцию читал Жорес Иванович. Он так увлекательно говорил о физике, электронике, гетероструктурах, что все его слушали как завороженные. Но и после лекции не прекращалось общение Ж. И. Алфёрова с ребятами. Окруженный ими, он ходил по территории лагеря, играл в снежки, дурачился. Насколько не формально он относился к этому «мероприятию», говорит тот факт, что в эти поездки Жорес Иванович брал свою жену Тамару Георгиевну и сына Ваню...

Результаты работы школы не замедлили сказаться. В 1977 г. состоялся первый выпуск инженеров по кафедре ОЭ, количество выпускников, получивших дипломы с отличием, на факультете удвоилось. Одна группа студентов этой кафедры дала столько же «красных» дипломов, сколько остальные семь групп.

В 1988 г. Ж. И. Алфёров организовал в Политехническом институте физико-технический факультет. Следующим логическим шагом стало объединение этих структур под одной крышей. К реализации данной идеи Ж. И. Алфёров приступил еще в начале 90-х гг. При этом он не просто строил здание Научно-образовательного центра, он закладывал фундамент будущего возрождения страны... И вот первого сентября 1999 г. здание Научно-образовательного центра (НОЦ) вступило в строй.

Свою Нобелевскую премию Жорес Иванович потратил на поддержку фундаментальных исследований молодых ученых.

Алфёров всегда остается самим собой. В общении с министрами и студентами, директорами предприятий и простыми людьми он одинаково ровен. Не подстраивается под первых, не возвышается над вторыми, но всегда с убежденностью отстаивает свою точку зрения.

Ж. И. Алфёров всегда занят. Его рабочий график расписан на месяц вперед, а недельный рабочий цикл таков: утро понедельника – Физтех (он его директор), вторая половина дня – Санкт-Петербургский научный центр (он председатель); вторник, среда и четверг – Москва (он член Государственной думы и вице-президент РАН, к тому же нужно решать многочисленные вопросы в министерствах) или Санкт-Петербург (тоже вопросов выше головы); утро пятницы – Физтех, вторая половина дня – Научно-образовательный центр (директор). Это только крупные штрихи, а между ними – научная работа, руководство кафедрой ОЭ в ЭТУ и физико-техническим факультетом в ТУ, чтение лекций, участие в конференциях. Всего не перечесть!

Наш лауреат прекрасный лектор и рассказчик. Неслучайно все информационные агентства мира отметили именно Алфёровскую Нобелевскую лекцию, которую он прочитал на английском языке без конспекта и с присущим ему блеском.

При вручении Нобелевских премий существует традиция, когда на банкете, который устраивает король Швеции в честь Нобелевских лауреатов (на нем присутствуют свыше тысячи гостей), представляется слово только одному лауреату от каждой «номинации». В 2000 г. Нобелевской премии по физике были удостоены три человека: Ж. И. Алфёров, Герберт Крёмер и Джек Килби. Так вот двое последних уговорили Жореса Ивановича выступить на этом банкете. И он эту просьбу выполнил блестяще, в своем слове удачно обыграв нашу российскую привычку делать «одно любимое дело» на троих.

В своей книге «Физика и жизнь» Ж. И. Алфёров, в частности, пишет: «Все, что создано человечеством, создано благодаря науке. И если уж суждено нашей стране быть великой державой, то она ею будет не благодаря ядерному оружию или западным инвестициям, не благодаря вере в Бога или Президента, а благодаря труду ее народа, вере в знание, в науку, благодаря сохранению и развитию научного потенциала и образования. Десятилетним мальчиком я прочитал за-

мечательную книгу Вениамина Каверина «Два капитана». И всю последующую жизнь я следовал принципу ее главного героя Сани Григорьева: «Бороться и искать, найти и не сдаваться». Правда, очень важно при этом понимать, за что ты берешься».



**Крёмер Герберт (Kroemer Herbert)** – американский физик немецкого происхождения. Родился 25 августа 1928 г. в Веймаре (Германия). В 1947 г. Крёмер поступил в Йенский университет. В 1948 г. бежал от репрессий в Западный Берлин, и с помощью А. Кенига и В. Паули поступил в Геттингенский университет. С 1952 г. работал в Центральной лаборатории телекоммуникаций Почтовой службы Германии. В настоящее время Крёмер работает в Университете штата Калифорния в Санта-Барбаре.

Изучал взаимодействие двух периодических потенциалов на границе двух сред с разными электрическими свойствами. В 1954 г. он опубликовал статью, содержащую самые первые соображения о биполярных транзисторах на гетероструктурах, и в том же году он был приглашен на работу в телерадиокомпанию RCA в Принстоне (США). Ввел представление о квазиэлектрических полях, которое считает фундаментальным принципом разработки гетероструктур. В 1963 г. предложил защитить гетеропереход другими полупроводниковыми структурами с более широкой запрещенной зоной для получения непрерывной инверсной заселенности при комнатной температуре. В 1968 г. Крёмер перешел в университет штата Колорадо и 1970-е гг. посвятил изучению так называемых квантовых стенок – гетероструктур со специально разработанными запрещенными зонами. Однако в конце 1970-х он вернулся к полупроводниковым приборам на гетероструктурах. В настоящее время его научные интересы сосредоточены на «сверхгетероструктурах»: он участвует в разработке полупроводников, являющихся токоподводами для сверхпроводниковых электродов.

В 1973 г. он был удостоен Эберсовской премии Американского института инженеров-электриков (IEEE), в 1982 г. – Велькеровской медали Международного симпозиума по GaAs, в 1986 г. – премии Мортона IEEE, в 1994 г. – Гумбольдтовской премии и в 2000 г. – Нобелевской премии по физике – совместно с Ж. Алфёровым и Дж. Килби.

Для изготовления гетероструктур разработано несколько типов технологических процессов. Однако наилучшие результаты в приготовлении квантовых структур достигнуты с помощью метода молекулярно лучевой эпитаксии. Несколько потоков атомов, которые получаются испарением вещества из отдельных нагретых источников, одновременно направляют на тщательно

очищенную подложку. Чтобы избежать загрязнения, выращивание структуры производят в глубоком вакууме. Весь процесс управляетяется компьютером. Химический состав и кристаллическая структура выращиваемого слоя в процессе роста контролируется методами рентгеновской и Оже-спектроскопии, состав газовой фазы – методами масс-спектроскопии. Таким образом удается выращивать совершенные монокристаллические слои толщиной всего в несколько периодов решетки. Образование гетероперехода, требующеестыковки кристаллической решетки, возможно лишь при совпадении типа, ориентации и периода кристаллической решетки сращиваемых материалов. Кроме того, в идеальном гетеропереходе граница раздела должна быть свободна от структурных и других дефектов, а также от механических напряжений. Наиболее широко применяются монокристаллические гетеропереходы на основе арсенида галлия GaAs и твердого раствора  $Al_xGa_{1-x}As$ , в котором часть атомов галлия, обычно в пределах от 0,15 до 0,35, замещена атомами алюминия. Ширина запрещенной зоны в арсениде галлия составляет 1,5 эВ, а в твердом растворе  $Al_xGa_{1-x}As$  она растет с ростом  $x$ . Так, при  $x = 1$ , т. е. в соединении AlAs, ширина запрещенной зоны равна 2,2 эВ. Поверхность раздела между GaAs и твердым сплавом  $Al_xGa_{1-x}As$  является эпитаксиальной, но атомы алюминия замещают галлий в решетке GaAs случайным образом и являются рассеивающими центрами. В обеих системах существует проблема легирующих ионов, которые также являются сильными рассеивателями, ибо, потеряв часть электронов, они создают сильное кулоновское поле. Техника модулированного легирования, разработанная Х. Штермером, А. Госсардом, В. Вигманом и Р. Динглом, очень сильно подавляет данный эффект.

Аналогичным образом можно изготовить квантовые нити и квантовые точки. Одноэлектронные транзисторы, в которых электроны по одиночке перепрыгивают с истока на наностровок кремния и далее на сток, сегодня изучаются не только сами по себе, но и в связи с попытками построить квантовый компьютер. Расположив рядом с транзисторным наностровком еще одну квантовую точку – кубит, охлажденный до 0,005 К, физики из Кембриджского университета сумели организовать интерфейс между квантовыми и макроскопическими процессами.

В нанотранзисторах существенно меньше рабочие напряжения и токи, что позволяет значительно уменьшить такую характеристику процессоров, как произведение энергии переключе-

ния на время срабатывания электронного ключа. Популярность МДП технологий с каждым годом растет и все больше микросхем и процессоров изготавливаются на кремниевых слоях толщиной в несколько десятков или сотен нанометров, отделенных от основного слоя кремния слоем окисла кремния либо другого химического элемента, например, диоксида гафния. Последний обладает меньшей проводимостью и большей диэлектрической проницаемостью, что позволяет уменьшить токи утечки и рабочие напряжения транзисторов.

По прогнозам аналитиков, лет через десять-пятнадцать технологии вплотную подойдут к тому рубежу, за которым квазиклассические представления о протекании тока и работе транзисторов уже не применимы, и надо будет переходить к квантовому описанию. Но эта область изучена недостаточно и необходимы значительные фундаментальные исследования. Тогда как основные производители микросхем полагают, что на классических принципах, с рабочими размерами элементов порядка 10 нм еще долго можно будет успешно удовлетворять растущие не по дням, а по часам потребности пользователей персональных компьютеров и сотовых телефонов.

### 2.3.4. p-n-p-n-приборы

Четырехслойная структура, называемая триодным тиристором (SCR), представляет собой наиболее важный тип приборов со структурой p-n-p-n. Другие приборы с этой структурой – двухвыводной и двусторонний диоды.

Тиристор представляет собой эффективный переключатель, позволяющий работать со значительными уровнями мощностей. При прямом напряжении на тиристоре переход В имеет смещение в обратном направлении, так что тока через него практически нет. Но когда напряжение смещения в прямом направлении увеличивается до некоторого критического уровня, на переходе В развивается лавинный процесс. Носители заряда инжектируются затем в средние области N и P, вызывая диффузию дырок на переходе А p-n-p-структур и диффузию электронов на переходе С n-p-n-структур. В результате ток увеличивается, и падение напряжения на приборе становится малым. Этот процесс можно инициировать при меньшем прямом смещении, инжектируя небольшой ток в одну из точек слоя р управляющего электрода. Отсюда следует, что SCR может служить почти идеальным переключателем, в котором практически не протекает ток в закрытом состоянии, но в открытом состоянии течет значительный ток при низком напряжении. Приборы SCR широко используются в схемах управления электродвигателями и печами, в регуляторах освещения и других применениях.

### 2.3.5. Сверхвысокочастотные приборы

Транзисторы находят также широкое применение в СВЧ-технике. К тому же сверхвысокие частоты можно генерировать с помощью полупроводниковых компонентов, имеющих всего два вывода, но обладающих отрицательным сопротивлением, подобно туннельным диодам. К наиболее распространенным СВЧ-приборам такого типа относятся лавинно-пролетные диоды и диоды Ганна.

В лавинно-пролетном диоде при лавинном пробое в обратносмещенном p-n-переходе возникают избыточные носители в области дрейфа, т. е. в области, где носители заряда движутся под влиянием приложенного напряжения. Если размер области дрейфа выбран правильно, то избыточные носители проходят ее на протяжении отрицательного полупериода напряжения пере-

менного тока. Далее ток увеличивается при уменьшении напряжения. При этом существует своего рода отрицательная проводимость, которую можно использовать в объемном резонаторе для генерации СВЧ-колебаний.

Принцип действия *диода Ганна* основан на свойстве таких полупроводников, как GaAs и InP, вызывать замедление электронов в материале при некоторой критической напряженности электрического поля. В соответствии с законом Ома ток при слабых полях пропорционален напряженности поля. Однако при очень сильных полях (с напряженностью порядка нескольких тысяч вольт на сантиметр) энергии электронов в GaAs или InP возрастают до величин, при которых свобода движения электронов в полупроводниковом кристалле ограничивается. Вследствие их пониженной подвижности при превышении напряженностью электрического поля некоторого критического уровня электроны еще более замедляются. Как и в лавинно-пролетном диоде, здесь возникает некоторая разновидность отрицательной проводимости, которую можно использовать для генерации СВЧ-колебаний.

## 2.4. Использование полупроводниковых приборов

В электронике полупроводниковые приборы служат для преобразования различных сигналов, в энергетике – для непосредственного преобразования одних видов энергии в другие. Известно много разнообразных способов классификации полупроводниковых приборов, например по назначению и принципу действия, по типу материала, конструкции и технологии, по области применения. К основным классам полупроводниковых приборов относят следующие:

- электропреобразовательные приборы, преобразующие одни электрические величины в другие электрические величины (полупроводниковый диод, транзистор, тиристор);
- оптоэлектронные приборы, преобразующие световые сигналы в электрические, и, наоборот (оптрон, фоторезистор, фотодиод, фототранзистор, фототиристор, полупроводниковый

лазер, светоизлучающий диод, твердотельный преобразователь изображения – аналог видикона и т. п.);

- термоэлектрические приборы, преобразующие тепловую энергию в электрическую и наоборот (термоэлемент, термоэлектрический генератор, солнечная батарея, термистор и т. п.);
- магнитоэлектрические приборы (датчик, использующий Холла эффект, и т. п.);
- пьезоэлектрические и тензометрические приборы, которые реагируют на давление или механическое смещение.

К отдельному классу полупроводниковых приборов следует отнести интегральные схемы, которые могут быть: 1) электропреобразующими, оптоэлектронными; 2) смешанными, сочетающими самые различные эффекты в одном приборе. Электропреобразовательные полупроводниковые приборы – наиболее широкий класс приборов, предназначенных для преобразования (по роду тока, частоте и т. д.), усиления и генерирования электрических колебаний в диапазоне частот от долей герц до 100 ГГц и более. Их рабочие мощности находятся в пределах от  $< 10^{-12}$  Вт до нескольких сотен ватт, напряжения – от долей вольта до нескольких тысяч вольт и ток – от нескольких наноампер до нескольких тысяч ампер. В зависимости от применяемого полупроводникового материала различают германиевые, кремниевые и другие полупроводниковые приборы. По конструктивным и технологическим признакам полупроводниковые приборы разделяют на точечные и плоскостные; последние, в свою очередь, делят на сплавные, диффузионные, мезапланарные, планарные (наиболее распространены), эпипланарные и другие. В соответствии с областью применения различают высокочастотные, высоковольтные, импульсные и другие полупроводниковые приборы.

Полупроводниковые приборы выпускают в металлокерамических, металлокерамических или пластмассовых корпусах, защищающих приборы от внешних воздействий; для использования в гибридных интегральных схемах выпускаются так называемые бескорпусные полупроводниковые приборы. Во всех странах мира выпускается около 100 000 типов приборов различного назначения. В качестве полупроводниковых материалов для изготовления транзисторов используют преимущественно германий и кремний. В соответствии с технологией получения в кристалле зон с различными типами проводимости транзисторы

делят на сплавные, диффузионные, конверсионные, сплавно-диффузионные, эпитаксиальные, планарные и планарно-эпитаксиальные. По конструктивному исполнению транзисторы подразделяются на транзисторы в герметичных металлокерамических, металлокерамических или пластмассовых корпусах и бескорпусные; последние имеют временную защиту кристалла от воздействия внешней среды (тонкий слой лака, смолы, легкоплавкого стекла) и герметизируются совместно с устройством, в котором их устанавливают. Наибольшее распространение получили планарные и планарно-эпитаксиальные кремниевые транзисторы.

## 2.5. Фотонные кристаллы

Все большее число специалистов видят в фотонных кристаллах будущее оптической связи, а некоторые – и вычислительной техники вообще. Если использовать для передачи сигналов не электрический ток, а свет, то есть надежда достичь тактовых частот порядка 1000 ГГц.

В 1998 г. западные информационные агентства сообщили, что в лаборатории Sandia National Laboratories, принадлежащей американскому Департаменту энергетики, разработана новая светоизгибающая (light bending) технология, которая в недалеком будущем найдет применение в телекоммуникационных сетях. Микроскопическая трехмерная структура (получившая название фотонной решетки) создана на основе кремния и позволяет передавать когерентный свет в оптическом диапазоне длин волн с минимальными потерями. Эффективность передачи составляет 95 %, что значительно превосходит показатель стандартных светопередающих сред (около 30 %), используемых в настоящее время. При этом можно направлять лучи по сложной траектории, содержащей «изгибы», практически под прямым углом в заданную точку. Решетка представляет собой пачку тонких кремниевых двухмерных дифракционных решеток, каждый слой которой повернут на 90° относительно соседнего. Для создания работающей фотонной решетки достаточно десяти таких слоев.

При взгляде через микроскоп фотонная решетка похожа на подготовленный костер, сложенный колодцем. Она обладает уникальной способностью изгибать траекторию световых волн определенной частоты практически в любом направлении и практически без потерь. Это изобретение может привести к су-

щественному прогрессу в области телекоммуникаций и оптических компьютеров.

Решетка из перекрестных диэлектрических полосок является идеально отражающей средой для световых волн определенного диапазона частот, который называется запрещенной зоной. Световые волны этого диапазона не могут распространяться внутри решетки, а при наличии внутри нее полостей или нерегулярностей оказываются захваченными такими ловушками. Создавая цепочки нерегулярностей, можно формировать световедущие каналы, при помощи которых открывается возможность изменять направление световых волн даже на острые углы. Потери на изгиб в таких устройствах практически отсутствуют, а радиус изгиба в пять-десять раз меньше, чем в использующихся сейчас устройствах интегральной оптики.

Идея фотонной решетки была предложена еще в 1987 г. Эли Яблоновичем, работающим сейчас профессором в Калифорнийском университете. Первый фотонный кристалл размером с бейсбольный мяч был создан в 1990 г., он управлял микроволновым излучением. Тогда же был создан кристалл размером уже с шарик для пинг-понга (в университете штата Айова), он тоже работал в микроволновом диапазоне. Первые кристаллы-решетки собирались вручную из обычных металлических иголок. В том же направлении работала и группа Иоаннопулоса в Массачусетском технологическом институте.

Главное достижение лаборатории Sandia – технологический прорыв в область нанометровых трехмерных структур. Об открытии было объявлено 16 июля 1998 г., оно запатентовано, есть уже предложения от крупных промышленников, готовых организовать коммерческое производство. Современные решетки, созданные там Шоном Лин и Джимом Флеммингом, успешно работают в инфракрасном диапазоне (длины волн около десяти микрон). Мало того, исследователи не останавливаются на достигнутом и изготавливают решетку для полупротамикронных длин волн – именно в этом диапазоне сегодня передается информация по волоконно-оптическим кабелям. «У меня нет сомнений в том, что группа Лина добьется успеха еще в этом году», – говорит профессор Вильнев из Массачусетского технологического института.

Такая уверенность основана на том, что в лаборатории Sandia очень развита технология изготовления микроструктур из

кремния, похожая на ту, что обычно используют при производстве компьютерных чипов. Многослойная кремниевая вафля покрывается двуокисью кремния, затем в нем процарапываются канавки, которые заполняются полисиликоном. Слой полируется, и на него накладывается следующий с полосками, направленными перпендикулярно ведущим полоскам. После построения десятка или более слоев двуокись кремния вытравляется при помощи кислоты, и остается объемная решетка из полисиликоновых полосок толщиной 1,2 мк и высотой 1,5 мк с расстоянием между ними в 4,8 мк. На шестидюймовом чипе можно разместить десяток тысяч таких решеток.

Подобное достижение означает революционный прорыв в создании оптического компьютера, мечты о котором давно будоражат умы изобретателей. Одним из главных препятствий на пути его создания была невозможность изгибать траектории лучей света на большие углы на малых расстояниях. Ведь если заменить провода в современных чипах световодами, то в устройстве размером со спичечный коробок световоды придется изгибать миллионы раз.

Первое применение фотонного кристалла – создание световедущих каналов. Современные световедущие каналы на основе оптического волокна не могут иметь крутых изгибов из-за недопустимого увеличения потерь, вызванного нарушением полного внутреннего отражения в них. Световедущие каналы в фотонном кристалле основаны на другом принципе: практически идеальное отражение света под любым углом от стенок световедущего канала обеспечивается наличием запрещенной зоны для световой волны передаваемой частоты, препятствующей проникновению света в глубь фотонного кристалла.

Второе применение – это спектральное разделение каналов. Во многих случаях по оптическому волокну идет не один, а несколько световых сигналов. Их бывает нужно рассортировать – направить каждый по отдельному пути. Например – оптический телефонный кабель, по которому идет одновременно несколько разговоров на разных длинах волн. Фотонный кристалл – идеальное средство для высечения из потока нужной длины волны и направления ее туда, куда требуется.

Третье – кросс для световых потоков. Такое устройство, предохраняющее от взаимного воздействия световых каналов при их

физическом пересечении, совершенно необходимо при создании светового компьютера и световых компьютерных чипов.

Сотрудники факультета электротехники Стэнфордского университета под руководством профессора Елены Вукович (*Jelena Vuckovic*) разработали прототип логического устройства, осуществляющего взаимодействие отдельных фотонов. Американские исследователи создали квантовую точку внутри фотонного кристалла, введя в сферическую полость в арсениде галлия микроскопический шарообразный фрагмент из арсенида индия. Полученное таким образом устройство оказалось способным к захвату фотонов, которые взаимодействуют между собой на квантовой точке. В отличие от предыдущих подобных попыток, где использовались сложные системы захвата фотонов и наблюдения их взаимодействия, удалось создать систему, в которой смогли продемонстрировать взаимодействие двух фотонов в одной квантовой точке. К тому же использовавшиеся материалы и способы освоены микроэлектронной промышленностью.

Логический вентиль в цифровых схемах выполняет элементарную логическую операцию, итогом которой является преобразование множества входных логических сигналов в выходной логический сигнал. Например, одна из операций может состоять в том, что на выходе будет «1» в том случае, если оба входных сигнала также равны «1», и «0», если один из входных сигналов равен «0». Аналогичным образом квантовый фотонный вентиль должен определять свойства поступающих в него фотонов из двух источников и выдавать на выходе фотон с одним из двух возможных вариантов поляризации.

Эксперимент, описанный в статье американских ученых, заключался в том, что сначала на квантовую точку направляли один поток фотонов, при этом на квантовой точке происходило поглощение и переизлучение фотонов без какого-либо изменения их свойств. Однако при облучении квантовой точки двумя потоками ситуация меняется – если сначала в нее попадает «контрольный» поток, то затем, после попадания в нее «сигнального» потока, время пребывания фотонов внутри квантовой точки изменяется, что соответствует возникновению фазового сдвига между контрольным и сигнальным потоком или повороту плоскости поляризации. Достигнутый в эксперименте фазовый сдвиг составил  $12,6^\circ$ . Это пока далеко до  $180^\circ$ , соответствующих изменению поляризации на противоположное, что яв-

ляется обязательным условием для работы квантового логического вентиля. Исследователи считают, что решить проблему можно путем размещения последовательности нескольких квантовых точек, которые в совокупности смогут обеспечить требуемый фазовый сдвиг. Того же эффекта можно будет добиться при совершенствовании технологии получения квантовых точек и точности их позиционирования внутри кристалла.

Специалисты по волоконной оптике сразу заинтересовались фотонными кристаллами, разглядев самые разные перспективы их использования для увеличения пропускной способности сетей. Чтобы увеличить объем передаваемых по волоконным световодам данных, надо создавать как можно более короткие оптические импульсы. Это определяется временем срабатывания эмиссионных диодов. Вторая проблема – волоконные световоды прозрачны в малом диапазоне длин волн. Третья проблема – на выходе информационных каналов требуются узкочастотные оптические фильтры и высокоскоростные оптические переключатели – своеобразные интегральные оптические схемы. Для них нужно создавать миниатюрные плоскостные волноводы.

Фотонные кристаллы могут помочь решить все эти проблемы. С их помощью можно сузить диапазон длин волн излучения в полупроводниковых лазерах и эмиссионных диодах или создать оптические фильтры с высокой селективностью. Главный недостаток существующих эмиссионных диодов и полупроводниковых лазеров в том, что они испускают фотоны в большой телесный угол и в широком частотном диапазоне. На основе фотонных кристаллов можно создать зеркало, которое будет отражать определенную волну света для любого выбранного угла и направления.

Такие трехмерные зеркала были созданы в 1994 г. в лаборатории Эймса (США) для СВЧ-волн. Для более коротких длин волн их разработали специалисты из Голландии и США. Эти структуры представляют собой специально уложенные кремниевые полоски – для СВЧ-волн – или специальным образом ориентированные крошечные (меньше микрона) кварцевые сферы в некотором коллоидном веществе.

Еще одна перспективная технология в волоконной оптике – скоростные солитонные линии связи, которые отличаются от обычных высокой помехоустойчивостью и низким уровнем шумов. Солитоны – это устойчивые уединенные гребни волн, ко-

торые распространяются в среде как частицы. При взаимодействии друг с другом или с другими возмущениями они не разрушаются, а расходятся, сохраняя свою структуру неизменной. Разработка таких терабитных линий связи финансируется министерством телекоммуникаций Японии в размере около 4 млрд долл. в год. Программа была начата в 1996 г. и рассчитана на десять лет. В ней принимают участие все крупнейшие японские высокотехнологичные компании. К 2012 г. планируется получить готовые к эксплуатации солитонные линии протяженностью до 10 тыс. км. К сожалению, о российских разработках в этой области нам ничего неизвестно.

## 2.6. Гигантское магнетосопротивление

Каждая Нобелевская премия по физике отмечает собой новую эру. В 2007 г. этой именитой премией за работы в физике твердого тела были отмечены Альбер Фер и Петер Грюнберг. Ученые, согласно сообщению Нобелевского комитета, открыли «квантомеханический эффект, наблюдаемый в тонких пленках, составленных из меняющихся ферромагнитных слоев». Благодаря открытию емкость запоминающих устройств – жестких дисков компьютеров – увеличивается, тогда как их физические размеры значительно сокращаются. Это существенно повлияло на развитие всей «компьютерной» отрасли. Это открытие может рассматриваться и как первое практическое воплощение нанотехнологий. Однако более принципиальным является не практическое применение, а та физика, которая следует из этого открытия.



**Петер Андреас Грюнберг** (Peter Andreas Grünberg) – немецкий физик, специализирующийся в области физики твердого тела. Родился 18 мая 1939 г. в г. Пльзене (нынешняя Чехия). Самым известным его открытием является эффект гигантского магнетосопротивления, за которое он был удостоен Нобелевской премии в 2007 г. (совместно с Альбером Фером). После переселения в Германию Грюнберг проживал со своими родителями в городе Лаутербах в федеральной земле Гессен. В 1959 г. он сдал экзамены на допуск в университет. Начиная с 1962 г. он обучался в университете города Франкфурт-на-Майне и в техническом университете Дармштадта. С 1966 г. по 1969 г. Грюнберг проходил аспирантуру у профессора Штефана Гюфнера по теме «Спектроскопические исследования некоторых редкоземельных гранатов». После защиты диссертации в 1969 г. получил степень доктора

философии. Затем он провел три года в Карлтонском университете в Оттаве. С 1972 г. работал научным сотрудником в исследовательском центре Юлиха. Защитил докторскую диссертацию в университете Кельна, где он с 1984 г. работал приват-доцентом, а с 1992 г. – профессором. С момента выхода на пенсию в 2004 г. Грюнберг работает в качестве приглашенного ученого в исследовательском центре Юлиха в институте исследования твердого тела, в отделении электронных свойств.

Грюнберг был одним из первых, кто занялся исследованием магнитных свойств тонких пленок. Эта область исследований изучает спиновые свойства материалов и называется спинтроникой. Результаты исследований позволили создать новые, уменьшенные электронные устройства. В 1986 г. Грюнберг открыл антиферро-магнитную взаимосвязь в слоях железа и хрома. В конце 1987 г. Грюнберг открыл, почти одновременно с Альбером Фером, эффект гигантского магнетосопротивления, при помощи которого в конце 1990-х гг. удалось резко увеличить емкость накопителей на жестких магнитных дисках. Принцип действия большинства головок записи/считывания информации по состоянию на 2007 г. основывался на этом эффекте. Плата за лицензии на использование патентов (начиная с патента DE 3.820.475 «сенсоры магнитного поля с тонким ферромагнитным слоем», дата заявки – 16.06.1988) поступает на счет института в Юлихе и составляет десятки миллионов.



**Альбер Фер (Albert Fert)** – французский ученый-физик. Родился 7 марта 1938 г. в г. Каркассон. В 1962 г. Фер окончил Высшую нормальную школу в Париже, а в 1963 г. он получил степень магистра в Сорbonne. В 1970 г. стал доктором в университете Париж-Юг. Первоначально Фер и Грюнберг работали независимо друг от друга, но с 1988 г. стали проводить исследования вместе и в этом же году обнаружили в слое железа и хрома эффект гигантского магнетосопротивления, за которое и были удостоены Нобелевской премии в 2007 г.

Электрический ток в металле – это поток свободных (не связанных с конкретными атомами) электронов. Возникает он потому, что кусок металла находится под напряжением, т. е. внутри него возникают электрические силы, которые и приводят электроны в движение. В свою очередь, сопротивление проводника возникает из-за того, что в своем движении электроны натыкаются на препятствия, постоянно сбиваясь с того курса, на который их направляют электрические силы.

Не стоит представлять себе этот процесс протекания тока так, словно электроны разгоняются, сталкиваются с атомами, останавливаются и снова разгоняются. На самом деле электроны

внутри металла движутся всегда, даже без внешнего электрического поля и при нулевой температуре, причем с весьма большой скоростью порядка  $10^6$  м/с. Подобное неустранимое движение электронного газа внутри металла возникает из-за принципа Паули – важнейшего квантового закона, запрещающего двум или более электронам занимать одинаковое квантовое состояние. В данном случае это означает, что электроны не могут иметь слишком близкие значения энергии, а значит, они не могут все остановиться. В результате электроны в металле обладают всевозможными энергиями – от нуля и до энергии Ферми.

«Препятствия», на которые натыкаются электроны, – это вовсе не атомы. На самом деле, атомы для электронов проводимости вообще прозрачны – если, конечно, они расположены в виде строгой периодической решетки (это проявление волновой природы электронов, т. е. чисто квантовое явление). Натыкаются же электроны на неоднородности, нарушения строгой периодичности – например, на дефекты кристалла, на примесные атомы или просто на тепловые колебания.

Если приложить напряжение, то на быстрое беспорядочное движение электронов наложится медленное смещение под действием внешних электрических сил. Этот медленный дрейф и есть электрический ток. Тут есть важный момент: участвовать в этом движении могут далеко не все электроны, а только очень небольшая их часть – лишь те, которые обладают энергией, близкой к максимальной (т. е. к энергии Ферми). Если таких электронов много, то ток течет большой, а значит, сопротивление маленькое. Если таких электронов мало, то ток получается малым, т. е. материал имеет большое сопротивление.

У электрона есть еще одна квантовая характеристика – спин  $s = 1/2$ , с двумя возможными проекциями на выделенное направление  $\pm 1/2$ . Если выбрать какое-то направление, то у электрона спин может быть ориентирован по этому направлению и против него – условно говоря, вверх и вниз.

В большинстве веществ ориентация спина никак не сказывается на электрическом токе – потому-то в электротехнике про спин электрона вообще не вспоминают. Однако для явления гигантского магнетосопротивления именно спин играет ключевую роль. Само это открытие гигантского магнетосопротивления, собственно, стало моментом рождения новой области электро-

ники – спинtronики, в которой спин электрона – такая же важная характеристика, как и его заряд.

Отличительной особенностью спина является его связь с магнитным полем. Спиновой (собственный) механический момент порождает собственный магнитный момент электрона, равный магнетону Бора  $0,927 \cdot 10^{-23}$  Дж/Тл. (Данное значение в два раза превышает предсказанное теорией Бора и получило объяснение лишь в релятивистской теории Дирака). Магнетизм ферромагнетиков обусловлен именно спиновыми магнитными моментами электронов, орбитальное движение электронов в них заморожено. В соответствии с первым правилом Хунда спины электронов в ионах переходных металлов (и, в частности, ферромагнетиков кобальта, никеля и железа) не скомпенсированы, и ионы приобретают большой спиновой, а, следовательно, и магнитный момент. При этом спины всех ионов выстраиваются в одинаковом направлении.

Теперь попытаемся представить, как ведут себя электроны проводимости, находясь в ферромагнетике. В отсутствии магнитного поля концентрация электронов со спином вверх и вниз одинаковая (рис. 2.3 а). Магнитное поле внутри металла влияет на электроны, причем по-разному для спинов по полю и против поля. Это немного сдвигает их энергии, и в результате количество электронов вблизи энергии Ферми со спином вверх и вниз получается разное (рис. 2.3 б). Как следствие, электрический ток в ферромагнитном металле состоит из двух разных, но тщательно перемешанных потоков – потоков электронов со спином по направлению намагниченности и против него. Эти два типа электронов испытывают со стороны металла разное сопротивление – те, которые ориентированы против поля, двигаются более свободно, чем те, которые ориентированы наоборот. (Напомним, что вследствие отрицательного заряда электрона его спиновой механический и магнитный моменты направлены в противоположные стороны.)

Подчеркнем, что в обычной медной проволоке такого разделения нет – эта картина специфична именно для ферромагнетиков, например для намагниченного куска железа. Она была подтверждена экспериментально не так давно, в 1968 г.

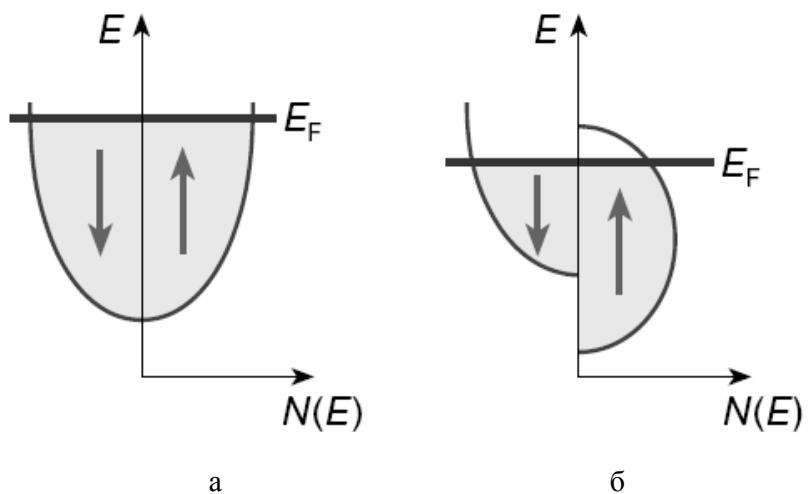


Рис. 2.3. Концентрация 3d-электронов проводимости в зависимости от энергии

Итак, «внутренний мир» ферромагнетика оказывается очень богатым, но пока не видно способа им воспользоваться для манипуляции сопротивлением образца. Ведь если металл ферромагнитный, то он таким остается и при воздействии внешних полей, разве только у него может измениться направление намагниченности. Но тут пришли на помощь новые искусственные материалы, не существующие в природе – сверхрешетки.

Сверхрешетка представляет собой чередующиеся слои толщиной в несколько атомов различных материалов с согласованной кристаллической структурой. То есть это слоеный кристалл, состоящий из строго чередующихся слоев то одного, то другого материала толщиной всего в несколько атомов. Приставка «сверх» отражает здесь наличие периодической структуры еще большего размера, чем период кристаллической решетки.

Если правильно подобрать материал для немагнитных слоев и его толщину, то магнитные слои приобретут «противоестественную» для ферромагнетика тенденцию чередовать ориентацию намагниченности.

Кстати, не стоит думать, что все такие открытия делаются автоматически. У Грюнберга был шанс «проглянуть» это замечательное свойство слоек железа – хрома. Его группа изучала также и слойки железо – золото, и вот в них ничего подобного найдено не было. Если бы исследование только ими и ограничилось, открытие эффекта, возможно, задержалось бы на некоторое время.

Последнее, что здесь нужно объяснить, – как такая слойка перестраивается под действием внешнего магнитного поля. Магнитное поле, как известно, способно перемагнитить «неправильно» ориентированный ферромагнетик. Поэтому если такую слойку поместить в достаточно сильное магнитное поле, то оно заставит все слои железа развернуться в одном направлении, как показано на рис. 2.3 справа. Если же поле убрать, то чередование слоев вновь восстановится. Так у экспериментаторов появилась возможность легко изменять тип магнитной упорядоченности.

В отсутствие внешнего магнитного поля слои железа намагниченны в чередующемся направлении. Двигаясь поперек слойки, электроны со спином вверх чувствуют большое сопротивление внутри слоев с магнитным полем вверх, но слабое сопротивление внутри слоев с магнитным полем вниз. Для электронов со спином вниз все в точности наоборот. Поскольку и тех, и других слоев одинаковое число, то оба сорта электронов оказываются в равноправной ситуации.

Если же приложить внешнее поле и выровнять намагниченность всех слоев, то электроны двух типов окажутся в разных условиях. Электроны, ориентированные по полю, везде, во всех слоях, испытывают большое сопротивление, т. е. их вклад в ток уменьшится. В то же время электроны, ориентированные в противоположном направлении, испытывают везде маленькое сопротивление. Иными словами, для таких электронов слойка выглядит как короткое замыкание, и переносимый ими ток заметно возрастает. Во сколько именно раз уменьшится ток со спином по полю и увеличится ток со спином против поля – зависит от свойств вещества, но в любом случае увеличение пересилит уменьшение тока, и в результате суммарное сопротивление уменьшается.

Первоначальные эксперименты Фера показали уменьшение сопротивления образца почти в два раза. Правда, такой результат был достигнут лишь с использованием сильных магнитных полей и при очень низкой температуре, всего  $4,2^{\circ}$  выше абсолютного нуля. В экспериментах Грюнберга при комнатной температуре изменение сопротивления было гораздо скромнее, всего полтора процента – и тем удивительнее, что будущий нобелевский лауреат не только разглядел в этом принципиально новый эффект, но и запатентовал его. Несколько лет исследований позволили добиться уменьшения сопро-

тивления в два раза уже при комнатной температуре и гораздо меньших магнитных полях.

На гигантское магнетосопротивление полезно взглянуть еще и вот с какой точки зрения. Само явление формулируется чрезвычайно просто и выглядит очень естественно: электрический ток и магнитное поле – это классическая физика XIX в. Однако реальные микроскопические причины, приводящие к такому интересному эффекту, очень непросты и многократно опираются на квантовую механику. Можно даже отметить, что в этом явлении проявляются все три принципиальных отличия квантовой механики от классической – волновая природа, тождественность и спин частиц.

# Глава 3. НЕКОТОРЫЕ МАТЕМАТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ

*Ищите в наперстках и в здравых умах,  
гоняйтесь с надеждой и вилкой; грозите  
пакетами ценных бумаг, и мылом мания и  
ухмылкой.*

*Л. Кэррол «Охота на Снарка»*

## 3.1. Теория алгоритмов

Фундамент вычислительной математики образует **теория алгоритмов**. Приложения этой теории имеются и в других отраслях математики, в которых достаточно часто встречаются алгоритмические проблемы.

Первым дошедшим до нас алгоритмом в его интуитивном понимании – конечной последовательности элементарных действий, решающих поставленную задачу, считается предложенный Евклидом в III в. до нашей эры алгоритм нахождения наибольшего общего делителя двух чисел (алгоритм Евклида). Отметим, что в течение длительного времени, вплоть до начала XX в. само слово «алгоритм» употреблялось в устойчивом сочетании «алгоритм Евклида». Для описания пошагового решения других математических задач использовалось слово «метод».

Начальной точкой отсчета современной теории алгоритмов можно считать работу немецкого математика Курта Геделя (1931 г. – теорема о неполноте символьических логик), в которой было показано, что некоторые математические проблемы не могут быть решены алгоритмами из некоторого класса. Общность результата Геделя связана с тем, совпадает ли использованный им класс алгоритмов с классом всех (в интуитивном смысле) алгоритмов. Эта работа дала толчок к поиску и анализу различных формализаций алгоритма.

Первые фундаментальные работы по теории алгоритмов были опубликованы независимо в 1936 г. годы Аланом Тьюрингом, Алоизом Черчем и Эмилем Постом. Предложенные ими машина Тьюринга, машина Поста и лямбда-исчисление Черча были эквивалентными формализмами алгоритма. Сформулиро-

ванные ими тезисы (Поста и Черча–Тьюринга) постулировали эквивалентность предложенных ими формальных систем и интуитивного понятия алгоритма. Важным развитием этих работ стала формулировка и доказательство алгоритмически неразрешимых проблем.

В 1950-е гг. существенный вклад в теорию алгоритмов внесли работы Колмогорова и Маркова.

К 1960–70-м гг. оформились следующие направления в теории алгоритмов:

- классическая теория алгоритмов (формулировка задач в терминах формальных языков, понятие задачи разрешения, введение сложностных классов, формулировка в 1965 г. Эдмондсом проблемы  $P = NP$ , открытие класса  $NP$ -полных задач и его исследование);
- теория асимптотического анализа алгоритмов (понятие сложности и трудоемкости алгоритма, критерии оценки алгоритмов, методы получения асимптотических оценок, в частности для рекурсивных алгоритмов, асимптотический анализ трудоемкости или времени выполнения), в развитие которой внесли существенный вклад Кнут, Ахо, Хопкрофт, Ульман, Карп;
- теория практического анализа вычислительных алгоритмов (получение явных функций трудоемкости, интервальный анализ функций, практические критерии качества алгоритмов, методика выбора рациональных алгоритмов), основополагающей работой в этом направлении, очевидно, следует считать фундаментальный труд Д. Кнута «Искусство программирования для ЭВМ».

Обобщая результаты различных разделов теории алгоритмов можно выделить следующие цели и соотнесенные с ними **задачи**, решаемые в теории алгоритмов:

- формализация понятия «алгоритм» и исследование формальных алгоритмических систем;
- формальное доказательство алгоритмической неразрешимости ряда задач;
- классификация задач, определение и исследование сложностных классов;
- асимптотический анализ сложности алгоритмов;
- исследование и анализ рекурсивных алгоритмов;
- получение явных функций трудоемкости в целях сравнительного анализа алгоритмов;

- разработка критериев сравнительной оценки качества алгоритмов.

Полученные в теории алгоритмов теоретические результаты находят достаточно широкое практическое применение, при этом можно выделить следующие два аспекта:

*Теоретический аспект*: при исследовании некоторой задачи результаты теории алгоритмов позволяют ответить на вопрос – является ли эта задача в принципе алгоритмически разрешимой – для алгоритмически неразрешимых задач возможно их сведение к задаче останова машины Тьюринга. В случае алгоритмической разрешимости задачи – следующий важный теоретический вопрос – это вопрос о принадлежности этой задачи к классу NP-полных задач, при утвердительном ответе на который, можно говорить о существенных временных затратах для получения точного решения для больших размерностей исходных данных.

*Практический аспект*: методы и методики теории алгоритмов (в основном разделов асимптотического и практического анализа) позволяют осуществить:

- рациональный выбор из известного множества алгоритмов решения данной задачи с учетом особенностей их применения (например, при ограничениях на размерность исходных данных или объема дополнительной памяти);
- получение временных оценок решения сложных задач;
- получение достоверных оценок невозможности решения некоторой задачи за определенное время, что важно для криптографических методов;
- разработку и совершенствование эффективных алгоритмов решения задач в области обработки информации на основе практического анализа.

Во всех сферах своей деятельности, и частности в сфере обработки информации, человек сталкивается с различными способами или методиками решения задач. Они определяют порядок выполнения действий для получения желаемого результата – мы можем трактовать это как первоначальное или интуитивное определение алгоритма. Некоторые дополнительные требования приводят к неформальному определению алгоритма:

Определение 1.1: Алгоритм – это заданное на некотором языке конечное предписание, задающее конечную последовательность выполнимых элементарных операций для решения задачи, общее для класса возможных исходных данных.

Пусть  $D$  – область (множество) исходных данных задачи, а  $R$  – множество возможных результатов, тогда мы можем говорить, что алгоритм осуществляет отображение  $D \rightarrow R$ . Поскольку такое отображение может быть не полным, то вводятся следующие понятия:

Алгоритм называется частичным алгоритмом, если мы получаем результат только для некоторых  $d \in D$  и полным алгоритмом, если алгоритм получает правильный результат для всех  $d \in D$ .

Несмотря на все усилия исследователей отсутствует одно исчерпывающее строгое определение понятия алгоритм, в теории алгоритмов были введены различные формальные определения алгоритма и удивительным результатом является доказательство эквивалентности этих формальных определений в смысле их равнomoщности.

Варианты словесного определения алгоритма принадлежат российским ученым А. Н. Колмогорову и А. А. Маркову

**Определение 1.2 (Колмогоров):** Алгоритм – это всякая система вычислений, выполняемых по строго определенным правилам, которая после какого-либо числа шагов заведомо приводит к решению поставленной задачи.

**Определение 1.3 (Марков):** Алгоритм – это точное предписание, определяющее вычислительный процесс, идущий от варьируемых исходных данных к искомому результату.

Отметим, что различные определения алгоритма, в явной или неявной форме, постулируют следующий ряд требований:

- алгоритм должен содержать конечное количество элементарно выполнимых предписаний, т. е. удовлетворять требованию конечности записи;
- алгоритм должен выполнять конечное количество шагов при решении задачи, т. е. удовлетворять требованию конечности действий;
- алгоритм должен быть единым для всех допустимых исходных данных, т. е. удовлетворять требованию универсальности;
- алгоритм должен приводить к правильному по отношению к поставленной задаче решению, т. е. удовлетворять требованию правильности.

Другие формальные определения понятия алгоритма связаны с введением специальных математических конструкций (машина Поста, машина Тьюринга, рекурсивно-вычислимые функ-

ции Черча) и постулированием тезиса об эквивалентности такого формализма и понятия «алгоритм».

### 3.2. Теория автоматов

В сороковых-пятидесятых годах двадцатого столетия в связи с попытками математического описания нервно-психической деятельности человека и функционирования универсальных вычислительных машин была создана **теория автоматов**. Однако в скором времени класс рассматриваемых в этой теории объектов и ее проблематика существенно расширились за счет внедрения в другие разделы математики (теорию алгоритмов, математическую логику, теорию информации, математическую лингвистику), а также благодаря многочисленным приложениям в различных областях естествознания – биологии, социологии, экологии, физике.

В настоящее время теория автоматов – это один из основных разделов математической кибернетики, изучающий математические модели преобразователей дискретной информации (автоматов). В широком смысле слова под автоматами, как преобразователями информации понимаются реальные устройства (вычислительные и управляющие машины, алгоритмы, живые организмы и их популяции), а также абстрактные системы (аксиоматические теории, математические машины).

Из многочисленной литературы по теории автоматов наше внимание привлекла статья С. Холодилова «Недетерминированные конечные автоматы» [24], возможно по причине «лихого» стиля изложения. Мы приводим статью практически полностью.

**«Просто» конечные автоматы.** Скорее всего, все более-менее знают, что такое конечные автоматы. Проблема в том, что их существует три варианта: конечные автоматы Мура, конечные автоматы Мили и «просто» конечные автоматы. Поскольку дальше нам потребуется вполне конкретное определение, имеет смысл ввести его здесь.

Итак, детерминированным конечным автоматом (ДКА) называется устройство, описываемое следующими параметрами:

$Q$  – конечное множество состояний,

$\Sigma$  – конечное множество входных символов,

$\delta$  – функция перехода. Аргументы – состояние и входной символ, результат – состояние,

$q_0$  – начальное состояние, принадлежит  $Q$ ,

$F$  – множество допускающих состояний, является подмножеством  $Q$ .

Функционирование происходит по следующей схеме.

Автомат начинает работу в состоянии  $q_0$ .

Если автомат находится в состоянии  $q_i$ , а на вход поступает символ  $b$ , то автомат переходит в состояние  $\delta(q_i, b)$ .

Возможно, более простым вам покажется следующее определение: детерминированным конечным автоматом называется такой автомат, в котором при любой данной последовательности входных символов существует лишь одно состояние, в которое автомат может перейти из текущего.

Работа ДКА заключается в распознавании цепочек символов, принадлежащих множеству  $\Sigma$ . Если, обработав цепочку, автомат оказался в допускающем состоянии, то цепочка считается допустимой, если нет, то нет. Таким образом, ДКА задает некоторый язык – множество допускаемых им цепочек, алфавит этого языка – множество  $\Sigma$ .

Это определение конечного автомата используется в теории вычислений. Автоматы Мура и Мили используются, в основном, при проектировании цифровой аппаратуры.

Конечные автоматы удобно изображать графически. На рисунке 3.1 приведен несложный ДКА, допускающий цепочки из 0 и 1, заканчивающиеся символом 0. *Начальное состояние* помечено треугольником, *допускающее* (в данном случае оно одно) – двойным кружком.

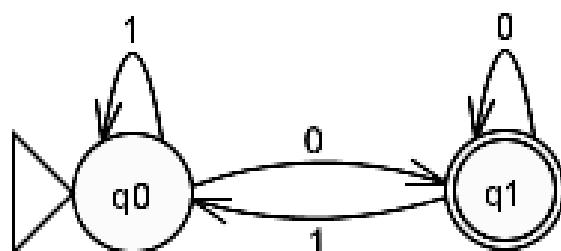


Рис. 3.1. Простой детерминированный конечный автомат

Второй вариант изображения автоматов – таблица переходов. В таблице 3.1 представлен тот же детерминированный конечный автомат, что и на рис. 3.1.

Таблица 3.1

Простой детерминированный конечный автомат

		0	1
->	q <sub>0</sub>	q <sub>1</sub>	q <sub>0</sub>
*	q <sub>1</sub>	q <sub>1</sub>	q <sub>0</sub>

По горизонтали отложены символы входного алфавита, по вертикали – состояния, начальное состояние отмечено стрелочкой, а допускающие – звездочками. Этот способ изображения менее нагляден, и приведен только в качестве примера, использовать его «для дела» я не буду.

Определение *недетерминированного конечного автомата* (НКА) практически полностью повторяет приведенное выше определение ДКА. Отличий всего два:

$\delta$  – функция перехода. Аргументы – состояние и входной символ, результат – множество состояний (возможно – пустое).

Если автомат находится в состоянии  $q_i$ , а на вход поступает символ  $b$ , то автомат переходит во множество состояний  $\delta(q_i, b)$ . Если автомат находится во множестве состояний  $\{q_i\}$ , то он переходит во множество состояний, получаемое объединением множеств  $\delta(q_i, b)$ .

$$\{q_i\}^{next} = \bigcup \delta(q_j, b), \text{ где } q_j \in \{q_j\}^{current}.$$

НКА тоже распознает цепочки символов, цепочка считается допустимой, если после ее обработки множество состояний, в котором оказался автомат, содержит хотя бы одно допускающее. Таким образом, НКА также задает некоторый язык.

На рис. 3.2 и в табл. 3.2 изображен простой (один и тот же) НКА, допускающий цепочки из 0 и 1, заканчивающиеся на 00.

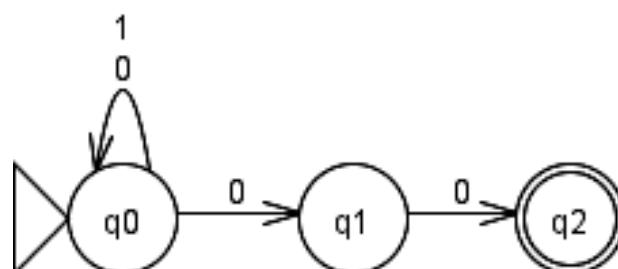


Рис. 3.2. Простой недетерминированный конечный автомат

Таблица 3.2  
Простой недетерминированный конечный автомат

		0	1
->	$q_0$	$\{q_0, q_1\}$	$\{q_0\}$
	$q_1$	$\{q_2\}$	$\emptyset$
*	$q_2$	$\emptyset$	$\emptyset$

Разберемся, как он работает.

**Подход 1.** Допустим, на вход автомата поступила цепочка «100100».

До	Вход	Описание	После
		Автомат начинает работу в множестве состояний $\{q_0\}$	$\{q_0\}$
$\{q_0\}$	1	Из состояния $q_0$ по символу 1 существует только один переход, в $q_0$ же.	$\{q_0\}$
$\{q_0\}$	0	Из состояния $q_0$ по символу 0 существует два перехода, в $q_0$ и в $q_1$ .	$\{q_0, q_1\}$
$\{q_0, q_1\}$	0	Из состояния $q_0$ по символу 0 существует два перехода, в $q_0$ и в $q_1$ , из состояния $q_1$ – один переход, в $q_2$ . Поскольку автомат находится в двух состояниях, множества объединяются.	$\{q_0, q_1, q_2\}$
$\{q_0, q_1, q_2\}$	1	Автомат находится в трех состояниях, но из $q_1$ и из $q_2$ не существует переходов по символу 1 (т. е. значение функции перехода из этих состояний по входному символу 1 – пустое множество). В итоге остается только $q_0$ .	$\{q_0\}$
$\{q_0\}$	0	И т. д.	$\{q_0, q_1\}$
$\{q_0, q_1\}$	0	И т. п. Так как в получившемся множестве состояний есть $q_2$ – допускающее состояние, автомат признает цепочку корректной.	$\{q_0, q_1, q_2\}$

**Подход 2.** Менее формальное, но немного более наглядное представление обработки той же цепочки тем же автоматом изображено на рис. 3.3.

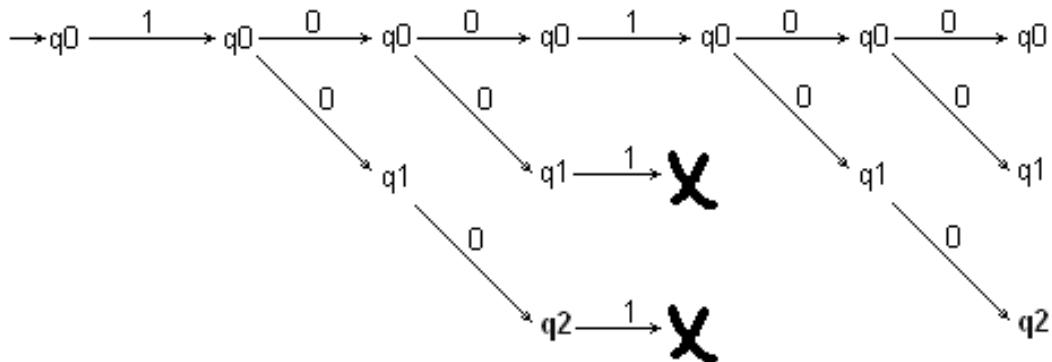


Рис. 3.3. Обработка цепочки 100100

В данном случае мы несколько удаляемся от определения НКА (множества состояний не представлены так явно). Картина основана на следующей идее: каждый раз, когда по входному символу возможен переход в несколько состояний, порождается новая ветка вычислений, когда переходов нет – ветка «засыхает». Если хоть одна из «живых» веток ведет в допускающее состояние – цепочка допущена.

В общем, подходы дают аналогичные результаты, за исключением одной мелочи. Слегка измененный НКА, изображенный на рис. 3.4, допускает любую цепочку символов  $\{0, 1\}$ , содержащую два нуля подряд. Если каждый раз честно порождать новую ветку, то при обработке цепочки «1001001...» получится дерево, изображенное на рис. 3.5. Понятно, что две нижние ветки полностью совпадают (они представляют одинаковые состояния автомата, получают одинаковые входы, значит, и результаты будут одинаковые), более того, каждый раз, когда в цепочке будет встречаться 00, будет порождаться еще одна точно такая же ветка.

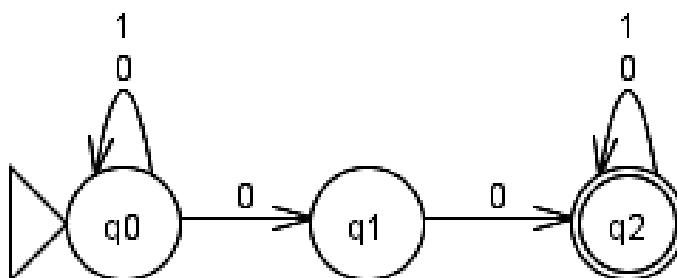


Рис. 3.4. Немного измененный НКА

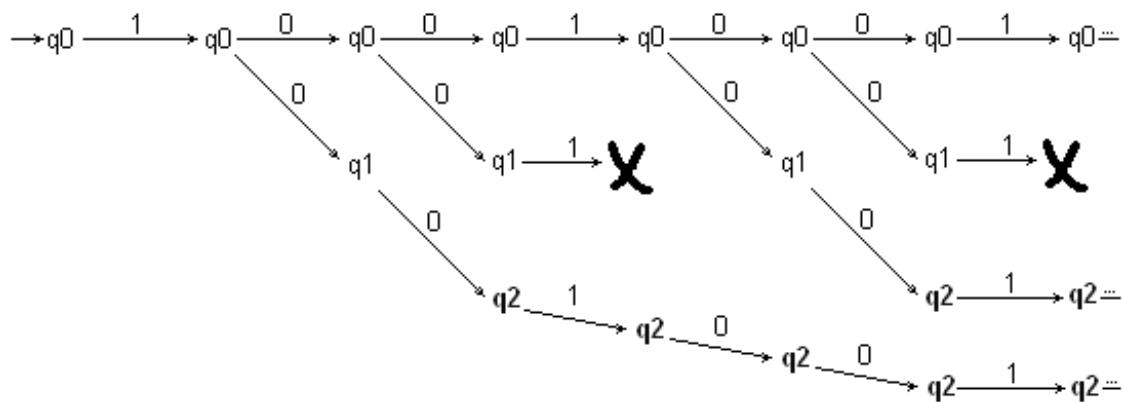


Рис. 3.5. Обработка цепочки 1001001

Можно добавить слияние одинаковых веток, но это уменьшит наглядность. В подходе, основанном на множествах, слияние происходит автоматически – множество не может содержать два одинаковых элемента.

**Подход 3.** Наименее формальный подход к описанию работы НКА основан на том, что он «угадывает». Вернемся к автоматау на рис. 3.2 и цепочке «100100».

До	Вход	Описание	После
		Автомат начинает работу в состоянии $\{q_0\}$	$q_0$
$Q_0$	1	Из состояния $q_0$ по символу 1 существует только один переход, в $q_0$ же.	$q_0$
$Q_0$	0	Из состояния $q_0$ по символу 0 существует два перехода, в $q_0$ и в $q_1$ . Но! Автомат угадал, что эта последовательность нулей – еще не конец цепочки. Поэтому остаемся в $q_0$ .	$q_0$
$Q_0$	0	И т. д.	$q_0$
$Q_0$	1	И т. п.	$q_0$
$Q_0$	0	А вот теперь автомат угадал, что это завершение, и что следующим входным символом тоже будет 0 (иначе нет смысла переходить в $q_1$ – из него нет переходов по 1). Переход в $q_1$	$q_1$
$Q_1$	0	Из $q_1$ только один переход – в $q_2$ . Цепочка допущена.	$q_2$

То есть, фактически, мы взяли дерево из подхода № 2, и обрезали все ветки, кроме одной – наиболее успешной.

Небольшое полезное расширение стандартного НКА –  $\epsilon$ -НКА, или НКА с эпсилон-переходами.

«Эпсилон-переходом» называется переход между состояниями, который может быть выполнен автоматом «просто так», без входного символа. На графах и в таблицах такие переходы обычно помечаются символом  $\epsilon$ .

В замечательной программе JFLAP, скриншоты из которой используются в качестве рисунков,  $\epsilon$ -переходы почему-то обозначаются символом  $\lambda$ , но я нашел в себе силы поправить картинки.

На рис. 3.6 изображен пример  $\epsilon$ -НКА.

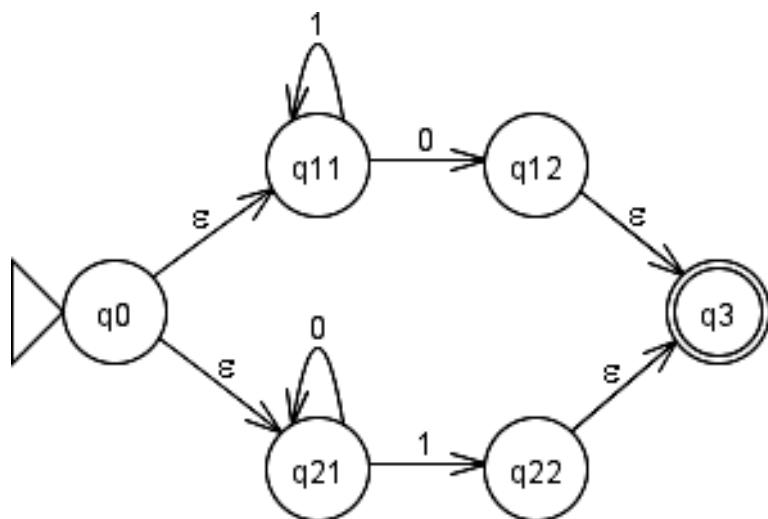


Рис. 3.6. НКА с  $\epsilon$ -переходами

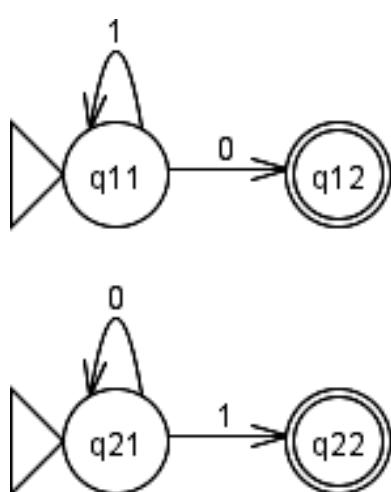


РИС. 3.7. СО-  
СТАВНЫЕ ЧАС-  
ТИ АВТОМАТА,  
ПОКАЗАННОГО  
НА РИС. 3.6

На этом немного странном примере продемонстрировано одно из наиболее полезных свойств  $\epsilon$ -переходов – возможность простого объединения нескольких автоматов в один. В данном случае объединяемыми автоматами являются НКА, изображенные на рис. 3.7, а результирующий автомат допускает цепочки, допустимые хотя бы одним из них.

Кроме того, обратите внимание, что никаких дополнительных ограничений на  $\epsilon$ -переходы не накладывается. То есть:

- из одного состояния  $\epsilon$ -НКА может выходить сколько угодно как обычных, так и  $\epsilon$ -переходов;
- может существовать цепочка из нескольких последовательных  $\epsilon$ -переходов;
- автомат может проходить цепочку целиком, частично или не проходить ее вообще (если у  $\epsilon$ -НКА есть другие варианты поведения).

В общем, граф/таблица переходов автомата выглядят так, как будто во входном алфавите появился еще один символ –  $\epsilon$ , а его работа так, будто в любом месте обрабатываемой цепочки (в начале, в конце, между символами) находится произвольное количество этих символов. При этом для каждого состояния есть как минимум один переход по  $\epsilon$  – в себя.

Подойдем более формально. Введем понятие  **$\epsilon$ -замыкание**.

$\epsilon$ -замыканием состояния  $q_i$  называется множество состояний  $\epsilon$ -НКА, в которые из  $q_i$  можно попасть по цепочке  $\epsilon$ -переходов. Как минимум, в это множество входит само  $q_i$ .

Функцию, аргументом которой является состояние, а значением – соответствующее  $\epsilon$ -замыкание, назовем  $eclose$ .

Функцию  $eclose$  можно определить так:

$$eclose(q_i) = \{q_i\} \cup \{eclose(q_j) \mid \exists \text{ } \epsilon\text{-переход от } q_i \text{ к } q_j\}$$

А теперь мы можем строго определить функционирование  $\epsilon$ -НКА.

Автомат начинает работать во множество состояний  $eclose(q_0)$ .

Если автомат находится во множестве состояний  $\{q_i\}$ , то он переходит во множество состояний, получаемое  $\epsilon$ -замыканием всех состояний из объединения множеств  $\delta(q_i, a)$ .

$$\{q_i\}^{next} = \bigcup eclose(q_j), \text{ где } q_j \in \bigcup \delta(q_k, a), \text{ где } q_k \in \{q_k\}^{current}$$

Допустим, вам нужен автомат, распознающий двоичные, десятичные и шестнадцатеричные числа в стандартном ассемблерном формате (я понимаю, что такие ситуации происходят в вашей жизни нечасто, но я и так сломал голову в поисках не слишком искусственного примера). То есть, допустимая строчка должна описываться одним из следующих утверждений:

Состоит из одной или более цифр (0–9), может завершаться символом «d» (например, «1234»).

Состоит из одного или более символов «0», «1», завершается символом «b» (например, «0100b»).

Начинается с десятичной цифры, потом идет любое количество символов 0–9 и a–f, завершается символом «h» (например, «0ab4h»). Решение показано на рис. 3.8.

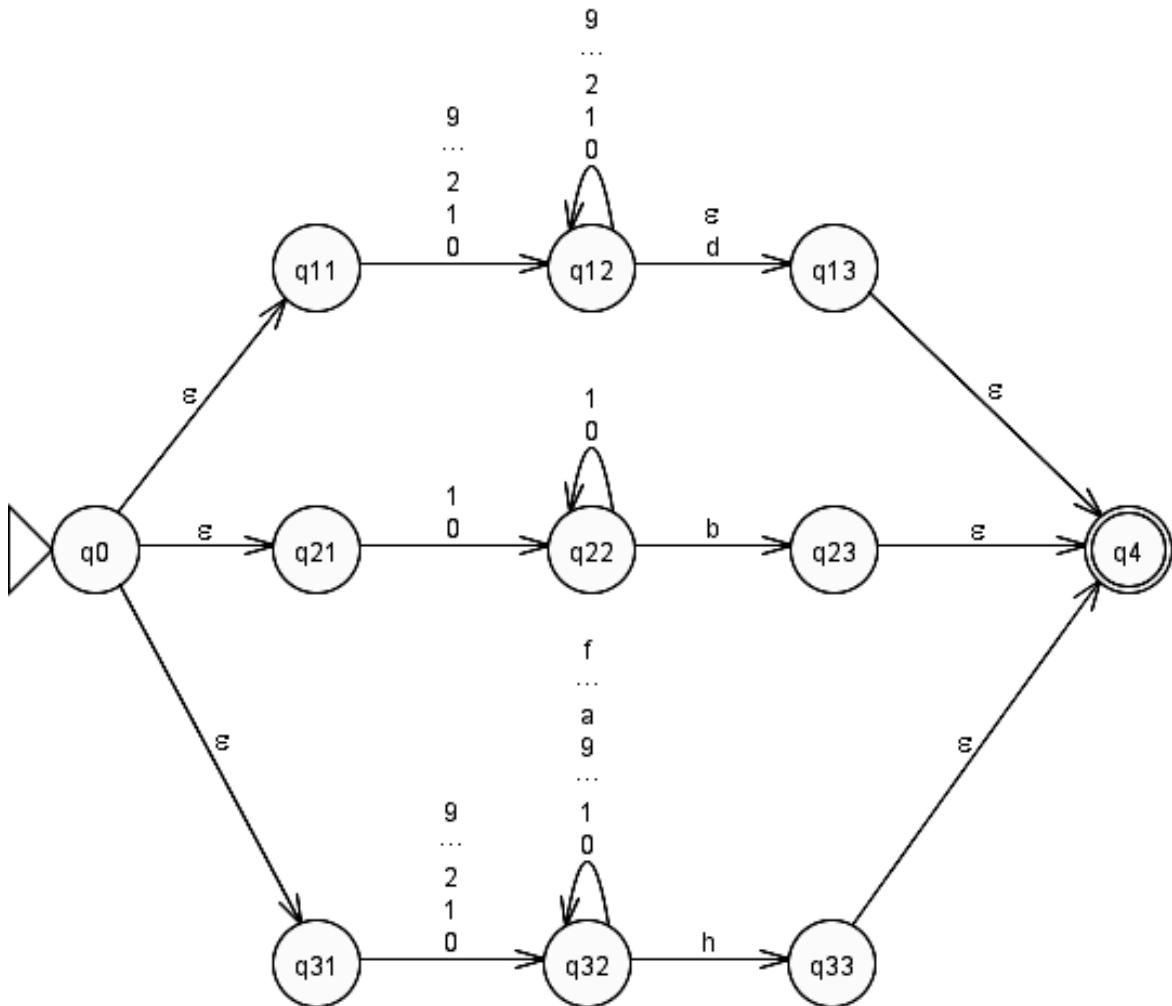


Рис. 3.8.  $\epsilon$ -НКА, распознающий числа в ассемблерном формате

Что в первую очередь радует в этом конечном автомате – то, что он понятен и изменяем. Посмотрев на граф, можно практически сразу сказать, что делает автомат, и убедиться, что он соответствует ТЗ. А если задание поменяется, граф будет достаточно просто изменить. Например, если добавляется еще одна система счисления, нужно просто нарисовать соответствующий автоматик и присоединить его к начальному и допускающему состояниям исходного автомата  $\epsilon$ -переходами.

Выполняющий аналогичную задачу ДКА приведен на рис. 3.9 (что за цифры под состояниями – разберемся позже, пока не обращайте внимания), он тоже не слишком сложен, более того, в данном случае даже получилось меньше состояний (а вот пере-

ходов больше, 78 против 60). Но сравните: насколько ДКА более запутан! Попробуйте, глядя на него, понять, что делает этот автомат, проверить, правильно ли он это делает, попробуйте добавить или убрать систему счисления, еще как-нибудь изменить ТЗ...

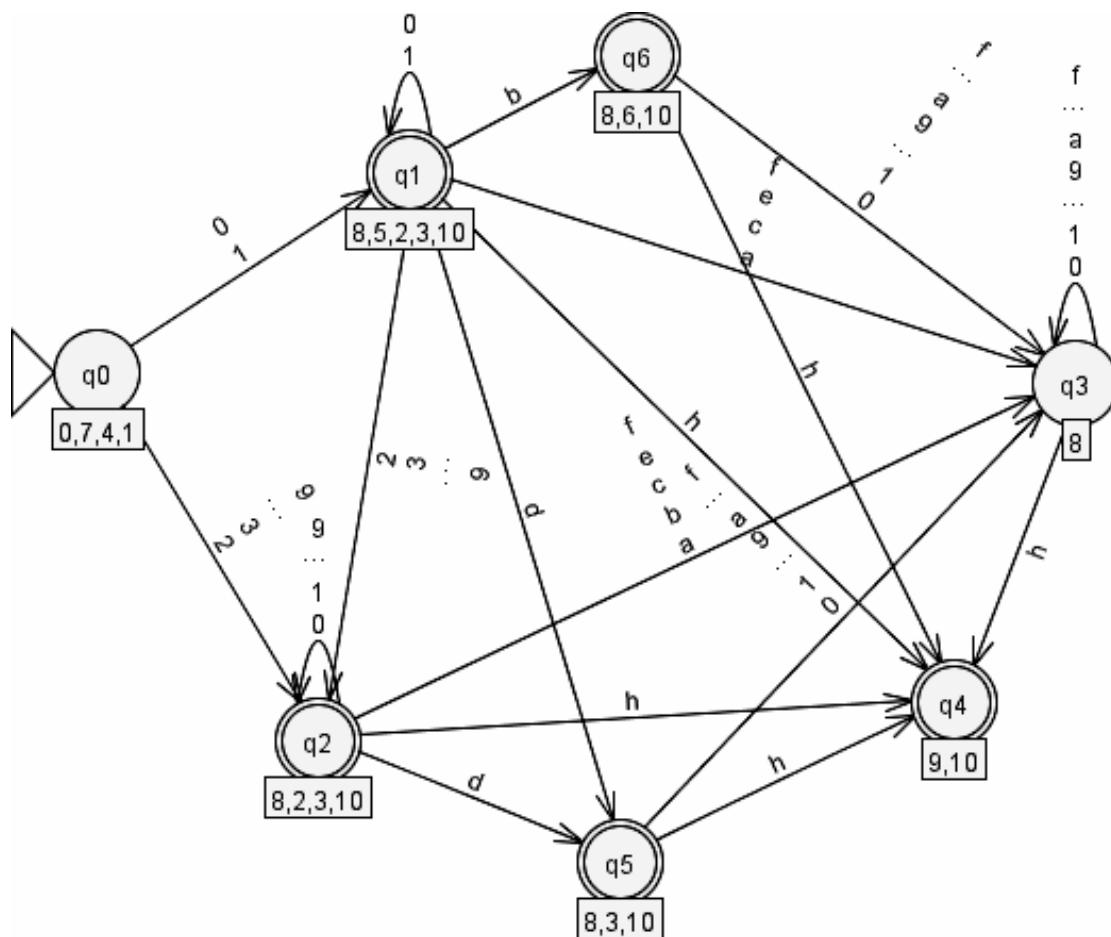


Рис. 3.9. ДКА, распознающий числа в ассемблерном формате

Помимо прочего, это еще и не совсем правильный ДКА. В «воистину правильном» ДКА из каждого состояния есть переход по каждому символу входного алфавита, определением для ДКА не предусмотрено ситуации пустого множества состояний и «засыхания ветки вычислений».

Поэтому для полного соответствия нужно добавить в автомат еще одно состояние, в которое должны сходиться все переходы по «непредусмотренным» символам, а выхода из этого состояния не будет – по любому символу следует переход в себя. Иногда такие состояния называют «дьявольскими».

В общем, мораль такая: с точки зрения проектирования конечных автоматов,  $\epsilon$ -НКА – язык более высокого уровня, чем

ДКА. Вычислительные возможности  $\epsilon$ -НКА, просто НКА и ДКА совпадают – для любого  $\epsilon$ -НКА теоретически можно построить ДКА, описывающий тот же язык (этим мы скоро займемся), но проектировать  $\epsilon$ -НКА гораздо, гораздо проще и удобнее.

**Реализация методом «в лоб».** На детерминированном компьютере проще всего реализовывать НКА, основываясь на его определении. То есть, хранить множество текущих состояний, а при обработке очередного входного символа, переходить из каждого состояния в соответствующее множество и объединять результаты.

Производительность? На первый взгляд, количество операций, необходимое для обработки одного символа можно оценить как  $O(M)$ , где  $M$  – количество состояний автомата. Но эта оценка верна, только если вам удастся реализовать объединение множеств за константное время, не зависящее ни от размера первого множества, ни от размера второго.

Типичная сложность реализации объединения множеств линейно зависит от размера второго множества. Поскольку оценить мы его можем только как  $O(M)$ , в результате сложность обработки одного символа –  $O(M^2)$ , обработка строки длиной  $N$  –  $O(N \cdot M^2)$ .

Правда, это, конечно, оценка худшего случая – если все состояния соединены друг с другом всеми возможными переходами, в среднем все будет не так печально.

**$\epsilon$ -переходы.** При желании таким же несложным способом можно реализовать и  $\epsilon$ -НКА – нужно перед началом обработки данных и после обработки каждого символа подавать на вход автомата  $\epsilon$ , пока множество состояний не перестанет изменяться. Это ужасающе неэффективно, но зато работает.

Немного подумав, можно вспомнить про формальное определение  $\epsilon$ -НКА через  $\epsilon$ -замыкания, и сообразить, что множество  $\text{eclose}(q_i)$  – фиксировано, и его нужно вычислить только один раз, причем до начала работы автомата. В этом случае сложность также  $O(M^2)$ .

**Реализация преобразованием в ДКА.** Рассмотрим произвольный НКА с тремя состояниями –  $q_0, q_1, q_2$ .

Независимо от своей внутренней структуры, в каждый конкретный момент этот НКА может находиться в одном из следующих множеств состояний:

$\emptyset$  (пустое множество)

$\{q_0\}$

$\{q_1\}$

$\{q_2\}$

$\{q_0, q_1\}$

$\{q_0, q_2\}$

$\{q_1, q_2\}$

$\{q_0, q_1, q_2\}$

И все, других вариантов нет. Причем переход между множествами состояний четко детерминирован – это просто объединение значений функции перехода для каждого из состояний, и сами значения и их объединения тоже находятся в этом списке.

Обобщая наблюдения до произвольного НКА с любым количеством состояний, мы можем определить следующий ДКА:

- его состояниями будут множества состояний НКА (цифры под состояниями ДКА на рис. 3.9 обозначали соответствующие ему состояния НКА).

$$q_j^{\text{дка}} = \{q_i^{\text{нка}}\},$$

- входной алфавит – такой же, как у НКА ;

- функция перехода будет «правильным образом» сопоставлять множеству и входному символу другое множество

$$\delta^{\text{дка}}(q_j^{\text{дка}}, a) = \bigcup \delta^{\text{нка}}(q_i^{\text{нка}}, a), \text{ где } q_i^{\text{нка}} \in q_j^{\text{дка}};$$

- начальным состоянием будет множество, состоящее только из начального состояния НКА

$$q_0^{\text{дка}} = \{q_0^{\text{нка}}\},$$

- допускающими будут те состояния ДКА, которые содержат хотя бы одно допускающее состояние НКА.

$$F^{\text{дка}} = \{q_j^{\text{дка}} \mid q_j^{\text{дка}} \cap F^{\text{нка}} \neq \emptyset\}$$

Идея преобразования основана на том, что множество подмножеств конечного множества состояний – конечно, т. е., как бы НКА не крутился, он всегда находится в одном из конечного множества состояний.

Если мысль о том, что множества состояний одного автомата являются состояниями другого автомата, пока что плохо влезает в вашу голову, можно представить то же самое менее абстрактно. Для НКА с тремя состояниями, обозначим состояния ДКА следующими строчками:

\* -x-  
 \* -q0-  
 \* -q1-  
 \* -q2-  
 \* -q0-q1-  
 \* -q0-q2-  
 \* -q1-q2-  
 \* -q0-q1-q2-

Назначим среди этих состояний правильное начальное (оно должно соответствовать начальному состоянию НКА) и допускающие, нарисуем таблицу для функции переходов, получим ДКА.

Для НКА с большим количеством состояний – по аналогии.

С использованием индукции достаточно просто доказывается, что сконструированный ДКА описывает тот же язык (допускает точно те же цепочки символов), что и исходный НКА. Эта задача оставляется читателю в качестве упражнения.

Индукционное предположение – в процессе обработки цепочки ДКА всегда находятся в состоянии, соответствующем текущему множеству состояний НКА. База очевидна, для доказательства индукционного перехода нужно посмотреть на определение НКА и сравнить алгоритм вычисления следующего множества состояний с алгоритмом работы функции перехода нашего ДКА. А после всего этого сравнить, в каких случаях автоматы допускают цепочки.

**Добавляем  $\epsilon$ -переходы.** Конструирование ДКА, соответствующего заданному  $\epsilon$ -НКА, немного отличается – нужно в нескольких местах заменить слова «состояние  $q_i$ » на « $\epsilon$ -замыкание состояния  $q_i$ ». Вот эти места:

функция перехода ДКА будет «правильным образом» со-поставлять множеству и входному символу другое множество.

$$\delta^{\text{дка}}(q_j^{\text{дка}}, a) = \bigcup \text{eclose}(q_i^{\text{нка}}), \text{ где } q_i^{\text{нка}} \in \bigcup \delta^{\text{нка}}(q_k^{\text{нка}}, a), \text{ где } q_k^{\text{нка}} \in q_j^{\text{дка}}$$

начальным состоянием ДКА будет  $\epsilon$ -замыкание начального состояния  $\epsilon$ -НКА

$$q_0^{\text{дка}} = \text{eclose}(q_0^{\text{нка}})$$

Доказательство идентичности описываемых автоматами языков аналогично доказательству для обычного НКА.

Таким образом, можно считать доказанным, что любой язык, описываемый  $\epsilon$ -НКА, может быть описан обычным ДКА.

А поскольку обратное очевидно (ДКА это просто частный случай  $\epsilon$ -НКА), вычислительная мощность ДКА и  $\epsilon$ -НКА совпадают. (Просто хотелось отдельно отметить этот важный теоретический результат.)

**Алгоритм.** Для начала оценим количество состояний «теоретического» ДКА. Если НКА имеет  $M$  состояний, то состояниями ДКА будут все подмножества множества  $\{q_0, \dots, q_{M-1}\}$ . Поскольку каждое из  $q_i$  может входить или не входить в подмножество, мы получаем  $2^M$  состояний ДКА.

Такое количество состояний немного пугает, но, к счастью, часто подавляющее большинство состояний оказывается недостижимым, т. е., не существует последовательности переходов, которая приводит автомат в такое состояние из начального, поэтому их можно просто отбросить, и это никак не повлияет на описываемый ДКА язык.

Но часто – не значит всегда. Пример НКА, ДКА которого будет содержать  $2^{M-1}$  состояний, приведен на рис. 3.10. Вставляя «в хвост» НКА дополнительные состояния, можно неограниченно увеличивать количество состояний ДКА.

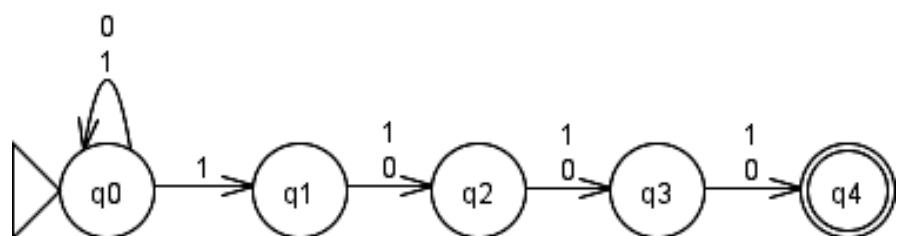


Рис. 3.10. Неудачный НКА

**Генерация ДКА.** Возможны два подхода:

Сначала сгенерировать все состояния ДКА, которые только могут потребоваться, установить между ними связи, а потом избавляться от недостижимых состояний.

Сразу же генерировать только достижимые состояния.

Мы пойдем вторым путем. Основная идея алгоритма:

- Начинаем с начального состояния ДКА –  $\text{eclose}(q_0)$ . Оно достижимо по определению.
  - Если состояние достижимо, то все состояния, в которые из него можно попасть, тоже достижимы.
  - Из состояния  $q_i$  можно попасть в те состояния, которые являются значением  $\delta(q_i, x)$ , где  $\delta$  – функция перехода ДКА, а  $x$

принадлежит множеству входных символов. Перебрав все входные символы, получим все такие состояния.

- После чего применяем к полученным состояниям тот же принцип. Остановка – когда все сгенерированные состояния рассмотрены подобным образом.

Оценка производительности алгоритма генерации ДКА неутешительна. Количество операций линейно зависит от количества состояний ДКА, а верхняя оценка для них –  $2^M$ . В среднем будет получше, но тоже ничего хорошего – генерация новых состояний, т. е. внутренняя часть цикла, это  $O(M^2 * S)$  операций (где  $S$  – количество символов).

Но зато, после того как ДКА сгенерирован, он обрабатывает любой символ за константное время, а строчку длиной  $N$  – за  $O(N)$ .

Возможно, вам кажется, что все описано недостаточно строго, или же что описано ужасающе мало. Этих и многих других недостатков лишена замечательная книжка «Введение в теорию автоматов, языков и вычислений», авторы Джон Хопкрофт, Раджив Мотвани, Джекфри Ульман (издательство «Вильямс», 2002). Однако на русском языке это издание является достаточно раритетным.

Значительно проще найти книгу Мозгового М. В. «Классика программирования: алгоритмы, языки, автоматы, компиляторы», (издательство «Наука и Техника», 2006). Тоже хорошая книжка, она менее фундаментальна и строга, ближе к программированию, и содержит куски кода на C#.

### 3.3. Вейвлет-анализ

**Вейвлет** (от английского *wavelet*) – «маленькая волна», или «волны, идущие друг за другом». И тот и другой перевод подходит к определению вейвлетов. Вейвлеты – это семейство функций, которые локальны во времени и по частоте (маленькие), и в которых все функции получаются из одной посредством ее сдвигов и растяжений по оси времени (так что они «идут друг за другом»). Математики иногда называют вейвлеты всплесками, но ведь и принтеры можно называть АЦПУ.

Именно свойство одновременной локальности по частоте и во времени и сделало вейвлеты столь пригодными для применения. Проблема поиска таких функций появилась давно. Известны и оптимальные с этой точки зрения функции – сфероидаль-

ные. Но эти функции не являются базисами, и по ним сигнал раскладывать нельзя, а разложив – не соберешь обратно. То, что вейвлеты являются базисами многих важных пространств, есть второе их главное свойство. А наибольшей популярностью вейвлеты стали пользоваться, когда открыли их первое главное свойство – наличие быстрого алгоритма преобразования. Оказывается, вейвлет-преобразование с точки зрения реализации является разновидностью субполосного кодирования и осуществляется путем фильтрации сигнала древовидным банком фильтров.

Области применения вейвлетов:

1. Обработка экспериментальных данных. Поскольку вейвлеты появились именно как механизм обработки экспериментальных данных, их применение для решения подобных задач представляется весьма привлекательным до сих пор. Вейвлет-преобразование дает наиболее наглядную и информативную картину результатов эксперимента, позволяет очистить исходные данные от шумов и случайных искажений, и даже «на глаз» подметить некоторые особенности данных и направление их дальнейшей обработки и анализа. Кроме того, вейвлеты хорошо подходят для анализа нестационарных сигналов, возникающих в медицине, анализе фондовых рынков и других областях.

2. Обработка изображений. Наше зрение устроено так, что мы сосредотачиваем свое внимание на существенных деталях изображения, отсекая ненужное. Используя вейвлет-преобразование, мы можем сгладить или выделить некоторые детали изображения, увеличить или уменьшить его, выделить важные детали и даже повысить его качество!

3. Сжатие данных. Особенностью ортогонального много-масштабного анализа является то, что для достаточно гладких данных полученные в результате преобразования детали в основном близки по величине к нулю и, следовательно, очень хорошо сжимаются обычными статистическими методами. Огромным достоинством вейвлет-преобразования является то, что оно не вносит дополнительной избыточности в исходные данные, и сигнал может быть полностью восстановлен с использованием тех же самых фильтров. Кроме того, отделение в результате преобразования деталей от основного сигнала позволяет очень просто реализовать сжатие с потерями – достаточно просто отбросить детали на тех масштабах, где они несущественны! Достаточно сказать, что изображение, обработанное вейвлетами,

можно сжать в 3–10 раз без существенных потерь информации (а с допустимыми потерями – до 300 раз!). В качестве примера отметим, что вейвлет-преобразование положено в основу стандарта сжатия данных MPEG4.

4. Нейросети и другие механизмы анализа данных. Большие трудности при обучении нейросетей (или настройке других механизмов анализа данных) создает сильная зашумленность данных или наличие большого числа особых случаев (случайные выбросы, пропуски, нелинейные искажения и т. п.). Такие помехи способны скрывать характерные особенности данных или выдавать себя за них и могут сильно ухудшить результаты обучения. Поэтому рекомендуется очистить данные, прежде чем анализировать их. По уже приведенным выше соображениям, а также благодаря наличию быстрых и эффективных алгоритмов реализации, вейвлеты представляются весьма удобным и перспективным механизмом очистки и предварительной обработки данных для использования их в статистических и бизнес-приложениях, системах искусственного интеллекта и т. п.

5. Системы передачи данных и цифровой обработки сигналов. Благодаря высокой эффективности алгоритмов и устойчивости к воздействию помех, вейвлет-преобразование является мощным инструментом в тех областях, где традиционно использовались другие методы анализа данных, например, преобразование Фурье. Возможность применения уже существующих методов обработки результатов преобразования, а также характерные особенности поведения вейвлет-преобразования в частотно-временной области позволяют существенно расширить и дополнить возможности подобных систем.

## 6. И многие другие.

Несмотря на то, что математический аппарат вейвлет-анализа хорошо разработан и теория, в общем, оформилась, вейвлеты оставляют обширное поле для исследований. Достаточно сказать, что выбор вейвлета, наиболее подходящего для анализа конкретных данных, представляет собой скорее искусство, чем рутинную процедуру. Кроме того, огромное значение имеет задача разработки приложений, использующих вейвлет-анализ – как в перечисленных областях, так и во многих других, перечислить которые просто не представляется возможным.

### 3.3.1. Основы теории вейвлет-преобразования

Некоторые идеи теории вейвлетов появились очень давно. Например, уже в 1910 г. А. Хаар опубликовал полную ортонормальную систему базисных функций с локальной областью определения (теперь они называются вейвлетами Хаара). Первое упоминание о вейвлетах появилось в литературе по цифровой обработке и анализу сейсмических сигналов (работы А. Гроссмана и Ж. Морле). В последнее время возникло и оформилось целое научное направление, связанное с вейвлет-анализом и теорией вейвлет-преобразования. Вейвлеты широко применяются для фильтрации и предварительной обработки данных, анализа состояния и прогнозирования ситуации на фондовых рынках, распознавания образов, при обработке и синтезе различных сигналов, например речевых, медицинских, для решения задач сжатия и обработки изображений, при обучении нейросетей и во многих других случаях.

Несмотря на то, что теория вейвлет-преобразования уже в основном разработана, точного определения, что же такое вейвлет, какие функции можно назвать вейвлетами, насколько нам известно, не существует. Вейвлеты могут быть ортогональными, полуортогональными, биортогональными. Эти функции могут быть симметричными, асимметричными и несимметричными. Различают вейвлеты с компактной областью определения и не имеющие таковой. Некоторые функции имеют аналитическое выражение, другие – быстрый алгоритм вычисления связанного с ними вейвлет-преобразования. Попробуем дать вначале неформальное определение вейвлет-преобразования, а затем – его точное математическое обоснование.

### 3.3.2. Вейвлеты и многомасштабный анализ

Рассмотрим задачу, которая очень часто встречается на практике: у нас есть сигнал (а сигналом может быть все, что угодно, начиная от записи показаний датчика и кончая оцифрованной речью или изображением). Идея многомасштабного анализа (*multiscale analysis, multiresolutional analysis*) заключается в том, чтобы взглянуть на сигнал сначала вплотную – под микроскопом, затем через лупу, потом отойти на пару шагов, потом посмотреть издалека (рис. 3.11).



Рис. 3.11. Пример многомасштабного анализа изображения

Что это нам дает? Во-первых, мы можем, путем последовательного огрубления (или уточнения) сигнала выявлять его локальные особенности (ударение в речи или характерные детали изображения) и подразделять их по интенсивности. Во-вторых, таким образом обнаруживается динамика изменения сигнала в зависимости от масштаба. Если резкие скачки (например, аварийное отклонение показаний датчика) во многих случаях видны «невооруженным глазом», то взаимодействия событий на мелких масштабах, перерастающие в крупномасштабные явления (так, мощный транспортный поток состоит из движения многих отдельных автомобилей), увидеть очень сложно. И наоборот, сосредоточившись только на мелких деталях, можно не заметить явлений, происходящих на глобальном уровне.

Идея применения вейвлетов для многомасштабного анализа заключается в том, что разложение сигнала производится по базису, образованному сдвигами и разномасштабными копиями функции-прототипа (т. е. вейвлет-преобразование по своей сути является фрактальным). Такие базисные функции называются вейвлетами (*wavelet*), если они определены на пространстве

$L^2(\mathbb{R})$  – пространство комплекснозначных функций  $f(t)$  на прямой с ограниченной энергией, колеблются вокруг оси абсцисс и быстро сходятся к нулю по мере увеличения абсолютного значения аргумента (рис. 3.12). Оговоримся сразу, что это определение не претендует на полноту и точность, а дает лишь некий

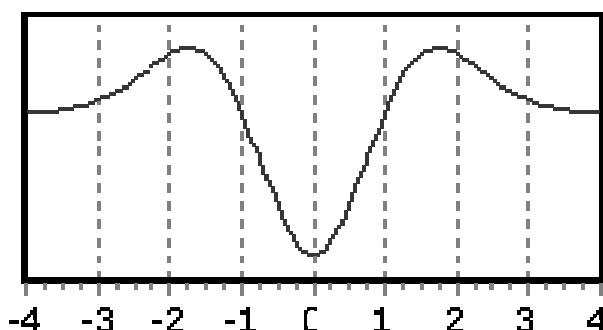
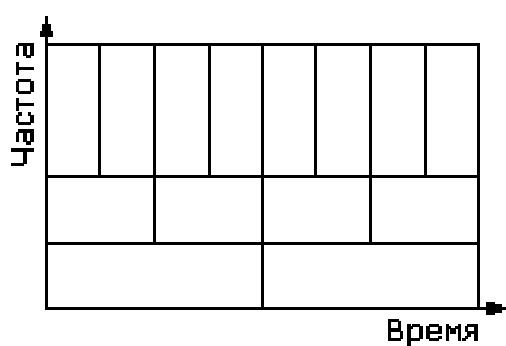


Рис. 3.12. ВЕЙВЛЕТ  
СОМБРЕРО

словесный портрет вейвлета. Таким образом, свертка сигнала с одним из вейвлетов позволяет выделить характерные особенно-

сти сигнала в области локализации этого вейвлета, причем чем больший масштаб имеет вейвлет, тем более широкая область сигнала будет оказывать влияние на результат свертки.

Согласно принципу неопределенности, чем лучше функция сконцентрирована во времени, тем больше она размазана в частотной области. При перенасштабировании функции произведение временного и частотного диапазонов остается постоянным и представляет собой площадь ячейки в частотно-временной (фазовой) плоскости. Преимущество вейвлет-преобразования перед, например, преобразованием Габора заключается в том, что оно покрывает фазовую плоскость ячейками одинаковой площади, но разной формы (рис. 3.13). Это позволяет хорошо локализовать низкочастотные детали сигнала в частотной области (пребывающие гармоники), а высокочастотные – во временной (резкие скачки, пики и т. п.). Более того, вейвлет-анализ позволяет исследовать поведение фрактальных функций, т. е. не имеющих производных ни в одной своей точке.



**Рис. 3.13. ФАЗОВАЯ ПЛОСКОСТЬ ВЕЙВЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЯ**

Вейвлет-анализ позволяет исследовать поведение фрактальных функций, т. е. не имеющих производных ни в одной своей точке.

### 3.3.3. Ортогональное вейвлет-преобразование

Вейвлет-преобразование несет огромное количество информации о сигнале, но, с другой стороны, обладает сильной избыточностью, так как каждая точка фазовой плоскости оказывает влияние на его результат. Вообще говоря, для точного восстановления сигнала достаточно знать его вейвлет-преобразование на некоторой довольно редкой решетке в фазовой плоскости (например, только в центре каждой ячейки на рис. 3.13). Следовательно, и вся информация о сигнале содержится в этом довольно небольшом наборе значений. Идея здесь заключается в том, чтобы масштабировать вейвлет в некоторое постоянное (например, 2) число раз, и смещать его во времени на фиксированное

ванное расстояние, зависящее от масштаба. При этом все сдвиги одного масштаба должны быть попарно ортогональны – такие вейвлеты называются ортогональными. При таком преобразовании выполняется свертка сигнала с некоторой функцией (так называемой скейлинг-функцией, о ее свойствах мы расскажем позже) и с вейвлетом, связанным с этой скейлинг-функцией. В результате мы получаем сглаженную версию исходного сигнала и набор деталей, отличающихся сглаженным сигналом от исходного. Последовательно применяя такое преобразование, мы можем получить результат нужной нам степени детальности (гладкости) и набор деталей на разных масштабах – то, о чем говорили в начале статьи. Более того, применив вейвлет-преобразование к заинтересовавшей нас детали сигнала, мы можем получить ее «увеличенное изображение». И наоборот, отбросив несущественные детали и выполнив обратное преобразование, мы получим сигнал, очищенный от шумов и случайных выбросов (например, «убрать» случайно попавшую в кадр птицу на фотографии здания).

### **3.3.4. Дискретное вейвлет-преобразование и другие направления вейвлет-анализа**

Очевидно, идея использовать вейвлет-преобразование для обработки дискретных данных является весьма привлекательной (дискретизация данных необходима, например, при их обработке на ЭВМ). Основная трудность заключается в том, что формулы для дискретного вейвлет-преобразования нельзя получить просто дискретизацией соответствующих формул непрерывного преобразования. К счастью, И. Добеши удалось найти метод, позволяющий построить (бесконечную) серию ортогональных вейвлетов, каждый из которых определяется конечным числом коэффициентов. Стало возможным построить алгоритм, реализующий быстрое вейвлет-преобразование на дискретных данных (алгоритм Малла). Достоинство этого алгоритма, помимо всего вышесказанного, заключается в его простоте и высокой скорости: и на разложение, и на восстановление требуется порядка  $cN$  операций, где  $c$  – число коэффициентов, а  $N$  – длина выборки.

В последнее время теория вейвлет-преобразования переживает просто революционный рост. Появились и развиваются та-

кие направления, как биортогональные вейвлеты, мультивейвлеты, вейвлет-пакеты, лифтинг и т. д.

### 3.4. Математическое обеспечение ЭВМ

Математическое обеспечение для ЭВМ представляет собой систему программ, приданную к конкретной ЭВМ и предназначеннную для обеспечения ее использования, а также математические методы и алгоритмы решения задач, по которым составлены данные программы. Состоит из общего математического обеспечения разрабатываемого предприятием (фирмой), поставляющим ЭВМ, и специального математического обеспечения, разрабатываемого пользователями машины. Общее математическое обеспечение поступает в распоряжение каждого пользователя. Стоимость общего математического обеспечения входит в стоимость ЭВМ и составляет значительную ее часть (30 % и более).

Начальные формы математического обеспечения можно найти уже у машин первого поколения (например, так называемая система ИС-2 для ЦВМ М-20, состоящая из библиотеки подпрограмм и программы-библиотекаря). Однако полное математическое обеспечение для ЦВМ первого поколения было невозможно из-за их низкого быстродействия и малого объема оперативной памяти. Эксплуатация ЦВМ второго и третьего поколений без общего математического обеспечения (и, в частности, без операционной системы) уже невозможна.

Программа, принадлежащая математическому обеспечению ЭВМ, должна быть выполнимой на данной ЭВМ, при необходимости с использованием некоторых других программ системы математического обеспечения обладать структурой, принятой в системе математического обеспечения; должна быть оформленной и снабженной инструкциями, установленными в системе математического обеспечения; быть зарегистрированной и введенной в систему математического обеспечения в соответствии с принятыми правилами. Приведенные условия обеспечивают совместимость программ, принадлежащих системе математического обеспечения, и возможность их применения любым пользователем.

Общее математическое обеспечение обычно состоит из операционной системы, средств поддержания системы математического обеспечения в рабочем состоянии, средств программиро-

вания и приложений. К математическому обеспечению должны быть отнесены также испытательные программы, предназначенные для контроля исправности ЭВМ, которые, однако, используются лишь персоналом, обслуживающим ЭВМ, не применяются при программировании и не влияют на него.

Операционная система представляет собой программное дополнение ЭВМ, вместе с которой образует как бы новую машину, обладающую собственной системой операций и своим машинным языком. К операционной системе относятся программы, обеспечивающие: ввод заказов на выполнение работ; предварительное планирование хода выполнения работ и распределение оборудования машины; ввод программ или их частей; оперативное выполнение работ, статистический учет используемого оборудования и расхода машинного времени; вывод информации. Четкое распределение функций между отдельными программами операционной системы и однозначная терминология еще не сложились. Программы ввода программ и их частей обычно называют загрузчиками, программу предварительного планирования хода работ – планировщиком (иногда монитором), программу оперативного управления работами – диспетчером (иногда супервизором). Остальные программы в разных системах имеют различные названия.

Состав операционной системы и внутренняя структура ее программ в значительной степени зависят от так называемой конфигурации ЭВМ, т. е. от входящего в ее состав оборудования (ЭВМ одного и того же типа могут отличаться числом блоков памяти на магнитных дисках и магнитных лентах, количеством устройств ввода и вывода и другим) и его функциональных взаимосвязей, а также от класса задач, для решения которых главным образом предназначается ЦВМ, и от режима ее использования. Наиболее известные операционные системы предназначены для решения научно-технических и экономических задач.

Средствами для поддержания системы математического обеспечения в рабочем состоянии служат программы дублирования материалов на машинных носителях записи, формирования библиотек подпрограмм, программы выполнения «ежедневного туалета» операционной системы (например, «чистка» магнитных лент и дисков, редактирование информации) и тому подобное. К этому же разделу математического обеспечения отно-

сятся программы, с помощью которых в начале эксплуатации ЭВМ получают некоторый вариант информационной системы, соответствующий имеющейся конфигурации ЭВМ, и вносят изменения в операционную систему в связи с изменением конфигурации ЭВМ или при модернизации операционной системы.

Средства программирования объединяют разнообразные программы, используемые для составления новых программ: трансляторы с различных алгоритмических языков; программы, собирающие программы из так называемых модулей; программы, автоматизирующие отладку вновь разрабатываемых программ и др.

Система средств программирования предусматривает обычно использование алгоритмических языков (так называемых входных языков программирования) трех уровней: машинно-ориентированных языков (типа языка ассемблера); проблемно-ориентированных алгоритмических языков, удобных для программирования узких классов задач (например, язык RPG, принятый для ЦВМ фирм IBM, ICL и многие другие); одного или нескольких универсальных алгоритмических языков, таких, как алгол, фортран, кобол. Возможность отладки на ЦВМ программ, заданных на алгоритмических языках, должна быть заложена либо в самих трансляторах, либо обеспечена с помощью самостоятельных отладочных программ.

Система средств программирования ЭВМ третьего поколения, как правило, основывается на модульном принципе. Модулями называются массивы информации, заданные на алгоритмическом языке вычислительной системы или на входном языке программирования. Массивы, заданные на входных языках программирования, должны содержать информацию, необходимую для их преобразования в модули. Программу, собирающую программы из модулей, иногда называют «композером». В составе операционной системы иногда предусматривают библиотеку модулей (на языке исполнительной системы). Новые модули, составленные в процессе программирования, могут быть включены в состав библиотеки модулей с помощью соответствующей программы из числа средств поддержания системы математического обеспечения.

В раздел «приложения» системы математического обеспечения входят программы решения конкретных задач, например таких, как транспортная задача, задача решения системы линей-

ных уравнений, распределительная задача линейного программирования, задача выравнивания динамических рядов и пр. Программы, входящие в «приложения», обычно группируются по классам задач (например, пакет линейной алгебры, пакет математической статистики и другие).

Существуют два способа разработки общего математического обеспечения. При первом способе математическое обеспечение разрабатывается и отлаживается на вспомогательной ЭВМ, на которой для этого программно моделируется исполнительная ЭВМ. Этот способ удобен тем, что математическое обеспечение можно разрабатывать заблаговременно, в отсутствии исполнительной ЭВМ. Однако при этом необходимо наличие достаточно мощной вспомогательной ЭВМ, уже имеющей математическое обеспечение. При втором способе математическое обеспечение разрабатывают уже после появления хотя бы опытного образца исполнительной ЭВМ. Разработка математического обеспечения ведется таким образом, чтобы уже имеющиеся части математического обеспечения могли быть использованы при создании недостающих частей. Экономически выгодно при разработке новых ЭВМ сохранять в них систему команд ЭВМ, разработанных ранее и уже имеющих математическое обеспечение. При этом все программы, разработанные для уже действующих ЭВМ, могут быть использованы и в новой ЭВМ, если последняя укомплектована достаточным оборудованием.

Математическое обеспечение размещается в ЭВМ следующим образом. Основная часть диспетчер-программы (называется резидентом) обычно находится в оперативной памяти ЭВМ; остальные части диспетчер-программы и другие программы математического обеспечения размещаются во внешних запоминающих устройствах. Возможны случаи повреждения диспетчер-программы в процессе эксплуатации ЭВМ, поэтому в машине обычно хранится легко доступная копия резидента. Оперативная память ЭВМ делится на 3 части: область резидента, рабочее поле, на которое в процессе работы резидент вызывает необходимые части операционной системы (не вошедшие в состав резидента) из внешних запоминающих устройств, и область пользователей, на которой размещаются программы (или части программ) решаемых задач, исходная информация и получаемые результаты. Значительная часть внешних запоминающих устройств, не занятая материалами математического обеспече-

ния, также является областью пользователей. Эффективное использование математического обеспечения возможно лишь в том случае, когда область пользователей достаточно велика, что возможно лишь при больших объемах памяти ЭВМ. Это обстоятельство необходимо принимать во внимание при выборе ЭВМ.

Специальное математическое обеспечение разрабатывается пользователями ЭВМ для решения своих конкретных задач с учетом всех возможностей, представляемых общим математическим обеспечением. В состав специального математического обеспечения могут входить трансляторы с новых языков (не входящие в общее математическое обеспечение), разработанные пользователем дополнительные программы контроля ЭВМ, программы решения отдельных задач или классов задач и т. п. Как исключение, в состав математического обеспечения могут входить программы, дополняющие операционную систему. В особых случаях программы, входящие в состав специального математического обеспечения, разрабатывают непосредственно на языке машины, для того чтобы исключить использование операционной системы. Это делают тогда, когда к разрабатывающим программам предъявляются высокие требования, которым операционная система не удовлетворяет.

Программное обеспечение имеет ряд классификаций по различным параметрам.

По способу распространения (доставки, оплаты, ограничения в использовании) программное обеспечение разделяется на: Commercial Software, Freeware, Shareware, Abandonware, Adware, Free Software, Careware.

По назначению программное обеспечение разделяется на системное, прикладное и инструментальное, а также выделяют программные средства защиты.

#### *A. Системное ПО*

-операционные системы (общего назначения, реального времени, сетевые ОС, встраиваемые);

- загрузчик операционной системы;
- драйверы устройств;
- программные кодексы;
- утилиты.

#### *B. Программные средства защиты*

- криптошлюзы;
- средства аутентификации;

- средства мониторинга и аудита;
- сканеры защищенности;
- средства разграничения доступа;
- системы криптографической защиты, шифрования и ЭЦП;
- антивирусные и антиспамовые программы;
- межсетевой экран.

*В. Инструментальное программное обеспечение включает:*

- средства разработки программного обеспечения – среды разработки (в том числе RAD), SDK;
- системы управления базами данных (СУБД): реляционные (например, DB2, Informix, Interbase, Firebird, Microsoft SQL Server, MySQL, Oracle Database, PostgreSQL), объектно-ориентированные, иерархические, сетевые.

*Г. Прикладное программное обеспечение*

- Офисные приложения: текстовые редакторы; текстовые процессоры; табличные процессоры; редакторы презентаций; корпоративные информационные системы; аудиторские программы.

- Бухгалтерские программы: системы MRP; системы MRP II; системы ERP; системы CRM; системы SCM; системы управления проектами (Project Management); системы автоматизации документооборота (EDM-системы); системы управления архивами документов (DWM-системы); корпоративный портал.

- Системы проектирования и производства: системы автоматизированного проектирования (САПР, CAD-системы): САЕ-системы; САМ-системы; РДМ-системы; РЛМ-системы; АСУТП (Системы SCADA); АСТПП (Системы MES).

- Системы логистической поддержки изделий: системы анализа логистической поддержки (LSA-системы); системы создания ИЭТР (IETM); системы обработки и хранения медицинской информации; система передачи, обработки, хранения и архивации изображений; радиологическая информационная сеть; госпитальная информационная сеть.

- Научное программное обеспечение: системы математического и статистического расчета и анализа; системы компьютерного моделирования.

- Клиенты для доступа к интернет-сервисам; электронная почта; веб; мгновенная передача сообщений; чат-каналы; IP-телефония; P2P обмен файлами; потоковое вещание; банк-клиент.

- Мультимедиа: компьютерные игры; музыкальные редакторы; графические редакторы; видео редакторы; мультимедиа проигрыватели.
- Прочие системы: геоинформационные системы; системы поддержки принятия решений; системы управления ИТ-инфраструктурой.

В некоторых типах встроенных систем прикладное и системное программное обеспечение может быть практически неразделимо, как например в случае ПО для видеомагнитофонов или микроволновых печей.

### 3.5. Программирование

Программирование – процесс и искусство создания компьютерных программ с помощью языков программирования. Программирование сочетает в себе элементы искусства, науки, математики и инженерии.

В узком смысле слова, программирование рассматривается как кодирование – реализация одного или нескольких взаимосвязанных алгоритмов на некотором языке программирования. Под программированием также может пониматься разработка логической схемы для ПЛИС, а также процесс записи информации в ПЗУ. В более широком смысле программирование – процесс создания программ, т. е. разработка программного обеспечения.

Большая часть работы программиста связана с написанием исходного кода на одном из языков программирования. Различные языки программирования поддерживают различные стили программирования (так называемые парадигмы программирования). Отчасти искусство программирования состоит в том, чтобы выбрать один из языков, наиболее полно подходящий для решения имеющейся задачи. Разные языки требуют от программиста различного уровня внимания к деталям при реализации алгоритма, результатом чего часто бывает компромисс между простотой и производительностью (или между временем программиста и временем пользователя).

Единственный язык, напрямую выполняемый процессором – это машинный язык (также называемый машинным кодом). Изначально все программисты прорабатывали каждую мелочь в машинном коде, но сейчас эта трудная работа уже не делается. Вместо этого программисты пишут исходный код, и компьютер

(используя компилятор, интерпретатор или ассемблер) транслирует его, в один или несколько этапов, уточняя все детали, в машинный код, готовый к исполнению на целевом процессоре. Даже если требуется полный низкоуровневый контроль над системой, программисты пишут на языке ассемблера, мнемонические инструкции которого преобразуются один к одному в соответствующие инструкции машинного языка целевого процессора.

В некоторых языках вместо машинного кода генерируется интерпретируемый двоичный код «виртуальной машины», также называемый байт-кодом (byte-code). Такой подход применяется в Forth, некоторых реализациях Lisp, Java, Perl, Python, а также в языках платформы Microsoft .NET.

Компьютерная программа представляет собой последовательность формализованных инструкций, предназначенных для исполнения устройством управления вычислительной машины. Чаще всего образ программы оформляется в виде отдельного файла (исполняемого модуля) или группы файлов. Из упомянутого образа, находящегося, как правило, на диске, исполняемая программа в оперативной памяти может быть построена программным загрузчиком. Инструкции программы записываются при помощи машинного кода или специальных языков программирования. В зависимости от контекста рассматриваемый термин может относиться к исходным текстам, при помощи которых записывается программа или к исполняемому машинному коду программы.

В системном программировании существует более формальное определение программы как размещенных в оперативной памяти компьютера ресурсов и машинных кодов, исполняемых процессором для достижения некоторой цели. Здесь подчеркиваются две особенности: обязательное присутствие программы в памяти и наличие процесса ее исполнения процессором.

Запись программ при помощи языков программирования удобна для понимания и редактирования человеком. Этому, в частности, помогает использование комментариев, допускаемое в синтаксисе большинства языков. Для выполнения на компьютере готовая программа преобразуется (компилируется) в исполняемый машинный код (чаще всего – двоичный).

Современные языки программирования позволяют обходиться без предварительной компиляции программы и переводить ее в инструкции машинного кода непосредственно во время исполнения. Это процесс называется интерпретацией и по-

зволяет добиться переносимости программ между различными аппаратными и программными платформами, а также избежать не всегда нужного хранения исполняемых файлов.

Некомпилируемые программы, интерпретацию которых выполняет операционная система компьютера или специальные программы-интерпретаторы, называются скриптами или «сценариями».

Большинство компьютерных программ состоят из списка инструкций, точно описывающих заложенный алгоритм; подобные программы называются «императивными» (см. также Императивное программирование). Альтернативным вариантом является описание в программе исходных и требуемых характеристик обрабатываемых данных и предоставление выбора исполняемого алгоритма компьютеру или другой выполняемой программе. Такой подход именуют декларативным программированием, а соответствующие программы – «декларативными программами».

Большинство пользователей компьютеров используют программы, предназначенные для выполнения конкретных прикладных задач, таких как подготовка и оформление документов, математические вычисления, обработка изображений и т. п. Соответствующие программные средства называют прикладными программами или прикладным программным обеспечением. Поддержку базовой функциональности компьютеров берет на себя системное программное обеспечение, наиболее важной составляющей которого является операционная система компьютера.

Системное программирование заключается в работе над системным программным обеспечением. Основная отличительная черта системного программирования по сравнению с прикладным программированием заключается в том, что результатом последнего является выпуск программного обеспечения, предлагающего определенные услуги пользователям (например, текстовый процессор), в то время как результатом системного программирования является выпуск программного обеспечения, предлагающего сервисы по взаимодействию с аппаратным обеспечением (например, дефрагментация жесткого диска), что подразумевает сильную зависимость таких программ от аппаратной части. В частности, выделим следующее:

- необходимо учитывать специфику аппаратной части и другие свойства системы, в которой функционирует программа, использовать эти свойства, например, применяя специально оптимизированный для данной архитектуры алгоритм;

- обычно используется низкоуровневый язык программирования или такой диалект языка программирования, который позволяет функционирование в окружении с ограниченным набором системных ресурсов, работает максимально эффективно и имеет минимальное запаздывание по времени завершения, имеет маленькую библиотеку времени выполнения (RTL) или не имеет вообще ее, позволяет прямое управление (прямой доступ) к памяти и управляющей логике, позволяет делать ассемблерные вставки в код;
- отладка программы может быть затруднена при невозможности запустить ее в отладчике из-за ограничений на ресурсы, поэтому может применяться компьютерное моделирование для решения этой проблемы.

Системное программирование существенно отличается от прикладного, что обычно приводит к специализации программиста в одном из них. (*«Голова в системном программировании нужна, как и в любом другом, но только в первом случае она действует упорядоченно»*, – сказал как-то В. Н. Накозин. – Прим. Н. Д.). Часто, для системного программирования доступен ограниченный набор средств. Использование автоматической сборки мусора довольно редкое явление и отладка обычно сложна. Библиотека времени выполнения, при ее наличии, часто менее способная и совершает меньшее количество проверок. В связи с этими ограничениями обычно применяют при мониторинге и записи данных – операционные системы.

Изначально программисты безвариантно писали на языке ассемблера. Эксперименты с поддержкой оборудования в языках высокого уровня (1960-е гг. привели к появлению таких, как BLISS и BCPL. Однако, язык программирования Си, сыгравший значительную роль в создании UNIX, завоевал большую популярность и распространился повсеместно к 1980-м гг.

В настоящее время некоторое применение нашлось для встраиваемого C++. Реализация основных частей в операционной системе и при использовании сетей нуждается в разработчиках системного ПО. Например, реализация постраничности (через виртуальную память) или драйверы устройств.

Термин «системное программирование» непосредственно связан с термином «системный программист». Это программист, работающий (создающий, отлаживающий, диагностирующий и т. п.) над системным программным обеспечением.

# Глава 4. ОТЕЧЕСТВЕННЫЕ ЭВМ В ОБОРОННЫХ ПРОЕКТАХ

*Старый серый ослик Иа-Иа стоял один одинешенек в заросшем чертополохом уголке леса, широко расставив передние ноги и думал о Серьезных Вещах.*

*А. Милн*

Компьютеры и цифровая техника настолько прочно вошли в нашу жизнь, что сейчас воспринимаются как данность. И мало кто задает себе вопросы, кем и каким трудом был проложен путь к современным информационным технологиям. К сожалению, за годы искусственно созданной информационной закрытости государства в сознании многих людей сложился стереотип национального компьютерного нигилизма. Между тем, зная факты развития науки и техники не понаслышке, можно смело говорить о наличии глубоких корней и традиций отечественного компьютеростроения, имевшихся у нас достижений мирового уровня в этой области.

Осознанию истинных масштабов участия наших соотечественников в мировой компьютерной истории призван способствовать рассказ о вкладе академика Сергея Алексеевича Лебедева в становление электроники и вычислительной техники, как в нашей стране, так и в мире.



**Сергей Алексеевич Лебедев** родился 2 ноября 1902 г. в Нижнем Новгороде в семье учителя. В 1921 г. он сдал экзамены за курс средней школы и поступил в Московское высшее техническое училище им.

Н. Э. Баумана (МВТУ), которое окончил 1928 г. Его дипломная работа, выполненная под руководством выдающегося ученого К. А. Круга, была посвящена проблеме устойчивости параллельной работы электростанций и имела большое научное и практическое значение. По окончании института С. А. Лебедев стал преподавателем МВТУ и одновременно сотрудником Всесоюзного электротехнического института им. В. И. Ленина (ВЭИ), сначала младшим научным сотрудником, руководителем группы, затем руководителем Лаборатории электрических сетей. В 1933 г. совместно с А. С. Ждановым С. А. Ле-



бедев опубликовал монографию «Устойчивость параллельной работы электрических систем». В 1935 г. он получил звание профессора, в 1939 г., не будучи кандидатом наук, защитил докторскую диссертацию, связанную с разработанной им теорией искусственной устойчивости энергосистем. В течение 10 лет С. А. Лебедев руководил отделом автоматики ВЭИ. В этом отделе начинали работу многие известные ученые: Д. В. Свечарник, А. Г. Иосифьян, А. В. Михайлов, А. В. Фельдбаум, Н. Н. Шереметьевский и др.

Во время войны С. А. Лебедев разработал систему стабилизации танкового орудия при прицеливании, принятую на вооружение, аналоговую систему автоматического самонаведения на цель авиационной торпеды. В 1945 г. С. А. Лебедев создал первую в стране электронную аналоговую вычислительную машину для решения систем обыкновенных дифференциальных уравнений, которые часто встречаются в задачах, связанных с энергетикой.

В 1946 г. С. А. Лебедев был приглашен в Академию наук Украины на должность директора Института энергетики. Через год Институт энергетики разделился на два, и С. А. Лебедев стал директором Института электротехники АН Украины. Здесь совместно с Л. В. Цукерником С. А. Лебедев выполнил исследования по управлению энергосистемами и разработку устройств автоматики, повышающих устойчивость энергосистем. В 1950 г. С. А. Лебедеву и Л. В. Цукернику была присуждена Государственная премия СССР.

Решая задачи электротехники и энергетики с помощью аналоговых вычислительных машин, С. А. Лебедев пришел к постановке задачи создания цифровой машины. С осени 1948 г. С. А. Лебедев начал разработку Малой электронной счетной машины (МЭСМ). Для определения набора операций МЭСМ он пригласил приехать в Киев А. А. Дородницына и К. А. Семеняева. Основы построения МЭСМ обсуждались в январе-марте 1949 г. на созданном С. А. Лебедевым семинаре, в котором участвовали М. А. Лаврентьев, Б. В. Гнedenko, А. Ю. Ишлинский, А. А. Харкевич и сотрудники лаборатории С. А. Лебедева. К концу 1949 г. определилась принципиальная схема блоков машины. В 1950 г. МЭСМ была смонтирована в двухэтажном здании бывшего монастыря в Феофании (под Киевом), где размещалась лаборатория С. А. Лебедева. В конце 1951 г. МЭСМ прошла испытания и была принята в эксплуатацию Комиссией АН СССР во главе с академиком М. В. Келдышем. В состав комиссии входили академики С. Л. Соболев, М. А. Лаврентьев, профессора К. А. Семеняев, А. Г. Курош.

В 1952 г. на МЭСМ решались важнейшие научно-технические задачи из области термоядерных процессов

(Я. Б. Зельдович), космических полетов и ракетной техники (М. В. Келдыш, А. А. Дородницын, А. А. Ляпунов), дальних линий электропередач (С. А. Лебедев), механики (Г. Н. Савин), статистического контроля качества (Б. В. Гнеденко). В 1950 г., когда был опробован макет МЭСМ, подобная машина работала лишь в Англии – ЭДСАК М. Уилкса, (1949 г.), причем в ЭДСАК арифметическое устройство было последовательным.

После МЭСМ началось создание специализированной ЭВМ СЭСМ для решения систем алгебраических уравнений. Ее главным конструктором был З. Л. Рабинович. Основные идеи построения СЭСМ выдвинул С. А. Лебедев. В 1950 г. С. А. Лебедев начал разработку БЭСМ АН СССР. В марте 1950 г. он был назначен заведующим лабораторией Института точной механики и вычислительной техники (ИТМиВТ), директором которого стал М. А. Лаврентьев.

Разработку арифметического устройства БЭСМ С. А. Лебедев поручил П. П. Головистикову, а устройства управления – К. С. Неслуховскому. Над БЭСМ трудились и студенты-практиканты из вузов, выполнившие дипломные работы – макетирование отдельных блоков и описание соответствующих разделов эскизного проекта БЭСМ: В. С. Бурцев, В. А. Мельников, А. Г. Лаут, И. Д. Визун, А. С. Федоров и Л. А. Орлов. В апреле 1951 г. Государственная комиссия под председательством М. В. Келдыша приняла эскизные проекты машин БЭСМ и «Стрела». В I квартале 1953 г. БЭСМ была налажена, а в апреле 1953 г. принята Государственной комиссией в эксплуатацию. В связи с дефицитом электронных трубок, которые поставлялись тогда только для «Стрелы», первые три года БЭСМ эксплуатировалась с памятью на акустических ртутных трубках, что снижало ее быстродействие в несколько раз. В 1956 г. БЭСМ была принята Государственной комиссией вновь – с памятью на потенциалоскопах.

В 1956 г. доклад С. А. Лебедева о БЭСМ на международной конференции в Дармштадте произвел сенсацию – БЭСМ была на уровне лучших американских машин и самой быстродействующей в Европе. В 1958 г. БЭСМ с памятью на ферритовых сердечниках емкостью 2048 слов передали в серийное производство, она выпускалась под названием БЭСМ-2 заводом им. Володарского.

В 1953 г. по рекомендации М. А. Лаврентьева, ставшего вице-президентом АН СССР, С. А. Лебедев был назначен директором ИТМиВТ. В 1953 г. его избрали действительным членом АН СССР. На банкете по поводу избрания новых членов Академии С. О. Шмидт сказал: «Сегодня мы выбрали в академики двух замечательных ученых – С. А. Лебедева и А. Д. Сахарова».

В 1955 г. С. А. Лебедев начал разработку М-20 (цифра в названии указывала на ожидаемое быстродействие – 20 тыс. операций в секунду). Такой скорости вычислений тогда не имела ни одна машина в мире. Постановлением Правительства СССР создание М-20 было

поручено ИТМиВТ и СКБ-245. С. А. Лебедев стал главным конструктором, М. К. Сулим (СКБ-245) – его заместителем. Идеологию и структуру М-20 разрабатывал С. А. Лебедев, систему команд – М. Р. Шура-Бура, схемотехнику элементной базы – П. П. Головистиков. М. К. Сулим руководил разработкой технической документации и изготовлением опытного образца в СКБ-245. В 1958 г. Государственная комиссия приняла М-20 и рекомендовала ее в серийное производство. Впервые в отечественной практике в М-20 С. А. Лебедевым с целью повышения производительности были реализованы автоматическая модификация адреса, совмещение работы арифметического устройства и выборки команд из памяти, введение буферной памяти для массивов данных, выдаваемых на печать, совмещение ввода и вывода данных со счетом, использование полностью синхронной передачи сигналов в логических цепях. Позднее были разработаны полупроводниковые варианты М-20, реализующие ту же архитектуру: М-220 и М-222 (главный конструктор – М. К. Сулим); БЭСМ-3М и БЭСМ-4 (главный конструктор – О. П. Васильев). ИТМиВТ после завершения работ по ламповым БЭСМ-2 и М-20 начал проектирование полупроводниковой БЭСМ-6, которая обладала быстродействием 1 млн операций в секунду. Главным конструктором БЭСМ-6 был С. А. Лебедев, заместителями – его ученики

В. А. Мельников и Л. Н. Королёв.

В 1967 г. Государственная комиссия под председательством М. В. Келдыша приняла БЭСМ-6 с высокой оценкой и рекомендовала ее к серийному производству. БЭСМ-6 имела полное программное обеспечение. В его создании принимали участие многие ведущие программисты страны. По инициативе и при активном участии С. А. Лебедева в ходе разработки на ЭВМ БЭСМ-2 было проведено моделирование будущей машины с помощью программных моделей. На основе БЭСМ-6 были созданы вычислительные центры коллективного пользования для научных организаций, системы автоматизации научных исследований в ядерной физике и других областях науки, информационно-вычислительные системы обработки информации в реальном времени. Она использовалась для моделирования сложнейших физических процессов и процессов управления, в системах проектирования программного обеспечения для новых ЭВМ. БЭСМ-6 выпускалась Московским заводом САМ в течение 17 лет. За разработку и внедрение БЭСМ-6 ее создатели (из ИТМиВТ – С. А. Лебедев, В. А. Мельников, Л. Н. Королёв, Л. А. Зак, В. Н. Лаут, В. И. Смирнов, А. А. Соколов, А. Н. Томилин, М. В. Тяпкин, от завода САМ – В. А. Иванов, В. Я. Семешкин) были удостоены Государственной премии. ИТМиВТ совместно с заводом САМ на основе БЭСМ-6 разработал вычислительную систему АС-6, модульная организация и унифицированные каналы обмена которой обеспечивали возможность построения децентрализованных много-

машинных вычислительных комплексов. В АС-6 была обеспечена эффективная реализация трансляторов с языков программирования высокого уровня, многоуровневая система защиты памяти на основе механизмов стека состояния. Операционная система АС-6, построенная по принципу децентрализации, обеспечивала функционирование в режимах пакетной обработки, удаленной пакетной обработки, разделения времени, реального времени. АС-6 использовалась для обработки данных и управления в системах космических экспериментов, а также в ряде вычислительных центров крупных научно-исследовательских организаций.

Специализированные ЭВМ, созданные под руководством С. А. Лебедева для системы противоракетной обороны, стали основой достижения стратегического паритета СССР и США в период «холодной войны». В 1952–1955 гг. учеником С. А. Лебедева В. С. Бурцевым были разработаны специализированные ЭВМ «Диана-1» и «Диана-2» для автоматического съема данных с радиолокатора и автоматического слежения за целями. Затем для системы ПРО, генеральным конструктором которой был Г. В. Кисунько, в 1958 г. была предложена ламповая ЭВМ М-40, а немного позднее М-50 (с плавающей точкой). Возможность поражения баллистических ракет, обеспеченная ПРО, заставила США искать пути заключения договора с СССР об ограничении ПРО, который появился в 1972 г. Создатели первой системы ПРО получили Ленинскую премию. Среди них были Г. В. Кисунько, С. А. Лебедев и В. С. Бурцев.

Увидеть выпуск следующей серии высокопроизводительных ЭВМ, которые разрабатывал ИТМиВТ, С. А. Лебедеву не довелось. Сергей Алексеевич Лебедев умер 3 июля 1974 г. в Москве. Он похоронен на Новодевичьем кладбище.

Имя С. А. Лебедева теперь носит ИТМиВТ. Ученики С. А. Лебедева создали свои научные школы и коллектизы.

По словам президента Российской академии наук академика Ю. С. Осипова, уникальные разработки С. А. Лебедева «определенлили столбовую дорогу мирового компьютеростроения на несколько десятилетий вперед». Именно академик Лебедев создал в тяжелые послевоенные годы первую отечественную ЭВМ и последующие все более и более производительные вычислительные машины. Появление электронно-вычислительных машин стало научно-технической революцией, кардинально изменившей развитие общества.

## 4.1. Научный подвиг С. А. Лебедева

Любому значительному научному открытию предшествуют годы неустанного поиска и труда. По окончании МВТУ им. Баумана в 1928 г., Сергей Алексеевич посвятил себя работе в области электротехники. Результаты его работ были использованы при вводе в эксплуатацию первых отечественных электростанций и высоковольтных линий передач. Уже в 1939 г. С. А. Лебедев, минуя кандидатскую, защитил докторскую диссертацию по теории искусственной устойчивости энергосистем.

После нападения Германии на Советский Союз будущий академик записался добровольцем в ополчение, но из-за стратегической важности выполняемых работ на фронт его не отпустили. Лебедев продолжил исследования и во время войны разработал самонаводящуюся на излучающие или отражающие излучение цели торпеду, а также систему автоматического самонаведения на цель авиационной торпеды и систему стабилизации танкового орудия при прицеливании.

Создание таких систем требовало проведения колоссального объема вычислений. Именно это обстоятельство привело ученого к пониманию необходимости автоматизации вычислительных процессов. В 1945 г. С. А. Лебедев создает первую аналоговую вычислительную машину для решения системы обыкновенных дифференциальных уравнений. Сергей Алексеевич обладал по-настоящему большой смелостью и верил в свои силы. В 45 лет, будучи уже известным ученым, он занялся совершенно новым направлением – созданием вычислительной техники.

Увлеченность Сергея Алексеевича новым делом была такой всепоглощающей, что когда в 1948 г. его пригласили выступить на Парижской международной конференции по большим электроэнергетическим системам, он, подготовив доклад «Искусственная устойчивость синхронных машин», доверил прочитать этот труд другому человеку. А сам на конференцию не поехал – настолько погрузился в разработку принципов действия электронной счетной машины.

Как известно, за рубежом принципы компьютеростроения и электронного счета разработал фон Нейман, классическая архитектура компьютера так и называется «фон Неймановская». Научный подвиг Лебедева заключается в том, что в условиях информационной замкнутости тех лет Сергей Алексеевич пришел к тем же выводам, что и фон Нейман, но на полгода раньше.

Разработанные теоретические выкладки позволили Сергею Алексеевичу перейти к практической работе. Первым значимым результатом стала Малая электронная счетная машина (МЭСМ), которая в 1951 г. была принята комиссией в эксплуатацию, а в 1952 г. на ней уже решались важные научно-технические задачи из области термоядерных процессов, космических полетов, ракетной техники, дальних линий передач и проч. В Киеве, в Национальной академии наук Украины, где создавалась МЭСМ, сохранилась конструкторская документация и папки с материалами о первой отечественной ЭВМ, большая часть из которых составлена С. А. Лебедевым. Чьей-то рукой более 50 лет назад на них было написано: «Хранить вечно».

Параллельно с завершающим этапом работ над МЭСМ в 1950 г. была начата разработка первой Большой (впоследствии переименованной в Быстродействующую) электронно-счетной машины. Разработка БЭСМ велась уже в Москве, в лаборатории ИТМИВТ, которую возглавил С. А. Лебедев. И здесь проявился его научный талант как конструктора-практика.

В те годы не было собственной элементной базы, необходимых конструкций под вычислительные блоки, охладительных систем. Приходилось самим изготавливать шасси и стенды, сверлить и клепать, монтировать и отлаживать различные варианты триггеров, счетчиков сумматоров, проверять их на надежность в работе.

Сергей Алексеевич всегда был в центре этих работ, часто с паяльником в руках перепаивал схемы, внося в них необходимые изменения, исправлял найденные неполадки. Он безошибочно находил вышедшие из строя радиолампы и детали. После насыщенного, трудового дня С. А. Лебедев до 3–4 ч ночи просиживал за пультом или осциллографом, отлаживая машину.

Напряженная интеллектуальная работа и перегруженный график, тем не менее, не мешали ученому в любой ситуации сохранять спокойствие и рассудительность. Когда в институте случился локальный пожар на первом этаже, где располагалась уже собранная и подготовленная к госиспытаниям БЭСМ, Сергей Алексеевич, не теряя ни секунды, решительно произнес: «Выключайте все электричество». Машина не пострадала. Возможно, решительность ее создателя и спасла тот первый экземпляр легендарной ЭВМ.

У С. А. Лебедева талант ученого-исследователя совмещался с замечательными способностями организатора и вдохновителя работ. Он умел подобрать сильную команду, увлечь ее работой и сконцентрировать все усилия для решения общей задачи. В 50-е гг., когда у измученной войной страны не хватало научных кадров, Лебедев сделал ставку на молодежь – и не ошибся. Он собрал вокруг себя талантливых студентов – дипломников и выпускников МГТУ, МИФИ, МФТИ. Для учеников С. А. Лебедева разработка БЭСМ стала стартом научной деятельности, впоследствии многие из них стали известными учеными, академиками.

В музее ИТМиВТ сохранилась половинка тетрадного листа из рукописи Сергея Алексеевича – на ней подробно изложена структурная схема и календарный план разработки БЭСМ. Удивительно, что вся машина, в реальности занимавшая около ста квадратных метров уместилась на небольшом листке бумаги. Но для этого потребовалось огромное напряжение интеллектуальных и физических сил – обоснование и теоретические выкладки по БЭСМ заняли у Лебедева десятки толстых тетрадей.

В итоге колossalный труд был вознагражден победой – задуманная ЭВМ была создана. Первый запуск БЭСМ состоялся осенью 1952 г., а госиспытания она прошла в 1953 г. В том же году Лебедев стал директором Института точной механики и вычислительной техники и действительным членом АН СССР по Отделению физико-математических наук. Он стал первым академиком по специальности «счетные устройства».

Знаменательный факт истории – представленный С. А. Лебедевым в октябре 1955 г. в Дармштадте (ФРГ) на Международной конференции по электронным счетным машинам доклад о наших достижениях произвел сенсацию – БЭСМ была признана самой быстродействующей машиной в Европе. Ее быстродействие оказалось рекордным – 8 000 оп/с.

Ученик Сергея Алексеевича академик В. А. Мельников в своих воспоминаниях подчеркивает: «Гениальность С. А. Лебедева состояла именно в том, что онставил цель с учетом перспективы развития структуры будущей машины, умел правильно выбрать средства для ее реализации применительно к возможностям отечественной промышленности».

После триумфальной победы БЭСМ, под руководством Лебедева сразу начались работы над следующей версией ЭВМ, с

улучшенными характеристиками: повышенным быстродействием, большей памятью, увеличенным временем устойчивой работы. Так появились следующие версии семейства БЭСМ – БЭСМ-2, БЭСМ-3М, БЭСМ-4. Эти машины уже выпускались серийно на Заводе счетно-аналитических машин ЗСАММ, сначала по несколько десятков экземпляров – затем сотнями.

Лучшей в серии БЭСМ по праву стала знаменитая БЭСМ-6 – первый в мире серийный «миллионник» (1 млн оп/с). Главный конструктор реализовал в ней множество революционных для того времени решений, благодаря чему машина пережила три поколения вычислительной техники и выпускалась 17 лет. За это время было произведено около 450 машин, что является абсолютным рекордом для ЭВМ класса «суперкомпьютер». До настоящего времени сохранился последний экземпляр БЭСМ-6, работающий под Санкт-Петербургом в Учебном центре Военно-морского флота. Разработка БЭСМ-6 – это яркий пример своеобразного школе С. А. Лебедева творческого подхода к созданию ЭВМ, учитывающего все возможности технической базы, математического моделирования структурных решений, а также производства для достижения наилучших характеристик машины. Не стоит забывать, что производство вычислительных машин БЭСМ создало реальные условия для появления нескольких отечественных школ по разработке программного обеспечения для этих оригинальных по своей архитектуре ЭВМ.

Велика роль ученого и в области разработки математического обеспечения ЭВМ. Сергей Алексеевич Лебедев одним из первых понял значение системного программирования и важность сотрудничества программистов-математиков и инженеров по созданию вычислительных систем, включающих как неотъемлемую часть программное обеспечение. По его инициативе в ИТМиВТ была организована лаборатория математического обеспечения, выполнявшая разработку системного ПО для всех систем, создавшихся в институте.

Творческой энергии Сергея Алексеевича хватало на ведение как научных проектов, так и специализированных, предназначенных для оборонных целей. Для укрепления стратегического паритета государства в ИТМиВТ была разработана линейка ЭВМ М-20, М-40, 5Э92, на базе которых построили первую систему Противоракетной обороны (ПРО) Москвы.

В марте 1961 г. прошли успешные государственные испытания первого противоракетного комплекса – неоднократно удавалось сбить реальную баллистическую боеголовку объемом 0,5 куб. м практически прямым попаданием. По словам очевидцев, во время первых испытаний произошла заминка, ставшая, наверное, одним из самых драматических моментов в жизни С. А. Лебедева и участвовавших в испытаниях сотрудников. Цель была запущена, ее вели все локаторы. Программист нажимает кнопку, отметка цели на экране. Следом пуск противоракеты, ее полет должен был продлиться 3 мин, и тут происходит сбой в ЭВМ.

Однако за две минуты неисправность устраняется силами сотрудника ИТМиВТ Андрея Михайловича Степанова, и противоракета, наведенная с помощью вычислительной сети, сбивает баллистическую ракету. На экране ЭВМ высвечивается надпись: «Подрыв цели». На следующий день данные кинофоторегистрации подтвердили: головная часть баллистической ракеты развалилась на куски.

Еще один интересный факт: первую компьютерную сеть создал Лебедев на полигоне Сары-Шаган в 1956 г., как раз при испытаниях комплекса ПРО. Американцы как-то узнали об этом и начали работу над созданием сети, ставшей впоследствии «всемирной паутиной» – Интернетом.

На базе БЭСМ-6 был создан многомашинный вычислительный комплекс АС-6, который в течение 15 лет использовался в центрах управления полетами космических аппаратов для обработки информации в реальном времени. Так, в 1975 г. при совместном полете космических кораблей «Союз» и «Аполлон» наш АС-6, обрабатывая информацию, обсчитывал данные по траектории полета за 1 минуту, в то время как у американской стороны такой расчет занимал полчаса.

Ни один из типов машин С. А. Лебедева не являлся копией какой-либо иностранной ЭВМ, все создавалось на собственной научной базе, с применением оригинальных подходов к решению теоретических и прикладных задач. И в этом проявление высоких интеллектуальных способностей действительно выдающегося русского ученого и его научный подвиг.

Сергей Алексеевич был человеком скромным и даже немногого застенчивым. Он всегда умел находить общий язык со своими молодыми коллегами, а они относились к нему с большим и искренним уважением. В нем сочетались душевная доброта и до-

верие к людям, высокая принципиальность и требовательность. Он редко повышал на кого-нибудь голос. Если же его поручение вовремя не выполнялось, забирал его и делал задание сам. Такое «наказание» запоминалось лучше любых строгих выговоров.

Личный пример у С. А. Лебедева был главным принципом воспитания. В ИТМиВТ долго вспоминали такой случай. Для завершения проекта БЭСМ оставалось очень мало времени, но были еще недоделки. Кто-то сказал: «Не успеем, мало дней осталось». Сергей Алексеевич ответил: «Успеем, есть еще夜里, ночью хорошо работать – никто не мешает». Он работал, бывало, по трое суток, не покидая рабочего места, забывая об усталости, и своим примером увлекал других. Соратники академика вспоминают еще один эпизод, который замечательно характеризует принципиальность С. А. Лебедева в отношении оценки достоинств и недостатков своей работы и научных изобретений. Государственная комиссия принимала машину БЭСМ-6 в комплексе с ее программным обеспечением, что явилось новым прецедентом приемки вычислительной техники. Операционная система Д-68 к моменту предъявления комиссии не полностью отвечала техническому заданию на ее разработку.

Отвечавший за комплекс в целом главный конструктор С. А. Лебедев настоял на том, чтобы сами разработчики Д-68 перечислили все имеющиеся недоработки в операционной системе, хотя о многих из них вполне можно было бы умолчать. В результате честность и объективность ученого покорила Государственную комиссию, которая приняла комплекс в целом, предложив устраниТЬ отмеченные разработчиками недостатки, что и было сделано в назначенный срок.

Сергей Алексеевич Лебедев умел создавать в институте атмосферу большой и дружной семьи. Многие коллеги часто бывали у него дома на семейных праздниках, а на работу шли с таким настроением, как приходят в родной дом. Вместе со всеми сотрудниками Сергей Алексеевич участвовал в благоустройстве территории нового здания ИТМиВТ на Калужском шоссе (теперь Ленинский проспект), высаживал деревья и декоративные кусты, которые цветут по весне и сейчас.

Большое внимание Сергей Алексеевич уделял развитию самостоятельности у своих учеников и сотрудников. Если пред-

ложенное учеником решение было не хуже его наработок, то часто за основу принималось предложение сотрудника.

Несмотря на доброту и мягкость в отношении коллег, современники отмечали его решительность и даже категоричность, если дело касалось принципиальных вопросов. Как-то Лебедева вызвали в ЦК, где ему было предложено вместо разработки собственных машин начать копирование иностранных ЭВМ. Лебедев твердо отказался. К сожалению, его позиция не остановила министров тех лет.

Еще одной характерной чертой С. А. Лебедева было то, что он никогда не требовал к себе особых привилегий, полагающихся ему по академическому статусу, никогда не отделял себя от научного коллектива. Во время тяжелых испытаний на полигоне Сары-Шаган, в условиях проживания, далеких от комфорта, он жил там же, где и его сотрудники, питался в той же столовой.

Сергей Алексеевич не был «кабинетным ученым». В его напряженной интеллектуальной жизни находилось место и отдыху. Когда появлялась возможность использовать отпуск, он всегда выбирал активный отдых – горный альпинизм или поход на байдарках. Сын Лебедева Сергей, рассказывая о манере отца отдыхать, подчеркивал, насколько С. А. Лебедев умело расходовал свои силы, выбирал равномерный ритм и спокойно шел к цели. Такой подход «поспешать медленно» Сергей Алексеевич всегда применял и в работе, кропотливо создавая очередную ЭВМ.

Для нашей страны создание собственных вычислительных технологий было большим прорывом. Сергей Алексеевич еще в далекие 60-е гг. понимал, что электронная вычислительная техника является одним из самых мощных средств научно-технического прогресса, окажет огромное воздействие на развитие науки, экономики и обороны страны. Впоследствии в одной из своих статей он напишет: «Внедрение таких машин, реорганизацию умственного труда человека по их результатам можно сравнить только с таким этапом истории человечества, как введение машинного труда взамен ручного».

Первая БЭСМ стала основой серии из 6 поколений машин, внесших огромный вклад в развитие отечественной науки и техники: в освоении космоса, в атомной промышленности, в создании противоракетной обороны. Вне всякого сомнения, без Лебедевской вычислительной техники в этих отраслях сложно бы-

ло бы достичь таких результатов. Этот вклад был настолько существенен, что его высоко ценили сами конструкторы, в чьих интересах создавались ЭВМ.

Академик Королёв говорил, что без своевременно сделанных Лебедевым машин было бы сложно начать осваивать космос. Даже в знаменитую формулу ЗК – так журналисты называли засекреченных ученых И. В. Курчатова, С. П. Королёва и М. В. Келдыша – сведущие люди и сами конструкторы добавляли букву Л (С. А. Лебедев, его имя также держалось в секрете). Правомерность формулы «ЗК + Л» не вызывает сомнений, все понимали, что без ЭВМ не могло бы быть таких достижений. Сергею Алексеевичу Лебедеву удалось сформировать отечественную школу исследований и разработок, которая многие годы по ряду направлений удерживала лидирующие позиции в мире. Только с середины 70-х гг. XX в. началось постепенное отставание от западных разработчиков. Во многом это было связано с копированием серий IBM, а также с наметившимся разрывом в области элементной базы.

Международное признание пришло к Лебедеву много лет спустя после кончины. Международное компьютерное общество IEEE Computer Society удостоило С. А. Лебедева своей высшей наградой – медалью «Computer Pioneer Award» за выдающиеся новаторские работы в области создания вычислительной техники. На медали написано: «Сергей Алексеевич Лебедев. Разработчик и конструктор первого компьютера в Советском Союзе. Награжден в 1996».

Дело жизни академика Лебедева продолжает жить в его родном институте. После 40 лет успешной работы ИТМиВТ в тяжелые 90-е гг., как и многие другие государственные институты, пережил сложные времена. Возрождение началось в 2005 г. со сменой руководства и перестройкой работы Института, будущее которого теперь видится в становлении ИТМиВТ как ведущего R&D-центра международного формата.

Сегодня научный коллектив успешно занимается разработкой встраиваемых систем для ответственных применений, интеллектуальных решений на базе сенсорных сетей, системного и встроенного программного обеспечения, перспективных вычислительных архитектур и т. д.

В Институте работает базовая кафедра ЭВМ, ведется подготовка специалистов по основным направлениям: основы конст-

рирования ЭВМ, системы автоматизированного проектирования, компьютерные сети и системы, архитектура специализированных вычислительных систем и проч. Проводится работа со студентами старших курсов МГУ и МФТИ, которые учатся на реальных проектах и многие после защиты дипломов приходят работать в ИТМИВТ, пишут кандидатские работы, становятся учеными.

Замечательно, что на том историческом этапе научно-технического развития, когда ЭВМ с программным управлением неизбежно должны были появиться на свет, появился такой учений, который всем своим опытом предыдущих работ, своим творческим энтузиазмом, искренней верой в правоту своих идей оказался готов возглавить становление компьютеростроения в нашей стране.

Именно сейчас, наблюдая бурное развитие индустрии электронной техники и ее проникновение буквально во все сферы науки и жизни общества, мы можем только удивляться небывалой прозорливости Сергея Алексеевича Лебедева, сумевшего оценить зарождение судьбоносного научно-технического направления, определить, предложить и реализовать основополагающие решения, увидеть перспективы их развития и успешно руководить их воплощением.

Второй знаковой фигурой в данной области является ученик Сергея Алексеевича академик В. С. Бурцев. Всеволод Сергеевич внес значительный вклад в создание систем управления объектами в реальном времени. Немаловажен его вклад в развитие обороноспособности страны.



**Всеволод Сергеевич Бурцев** родился 11 февраля 1927 г. в Москве. В 1951 г. окончил Московский энергетический институт. В 1962 г. защитил докторскую диссертацию по вычислительной технике в Институте точной механики и вычислительной техники АН СССР.

С 1950 по 1986 г. работал в Институте точной механики и вычислительной техники, с 1973 по 1984 г. директор Института точной механики и вычислительной техники АН СССР, с 1984 по 1992 г. заместитель директора Вычислительного центра коллективного пользования АН СССР, с 1992 по 1995 г. директор ВЦКП РАН, с 1995 по 1998 г. являлся директором Института высокопроизводительных вычислительных систем.



В 1976 г. был избран членом-корреспондентом АН СССР, а с 1992 г. – действительным членом Российской Академии наук, с 1998 г. – Советник Президента Российской Академии наук. Лауреат Ленинской и Государственной премий.

Всеволод Сергеевич Бурцев является крупнейшим специалистом в нашей стране в области создания высокопроизводительных вычислительных машин и комплексов как универсального, так и специализированного применения для управления объектами, работающими в масштабе реального времени, руководил созданием в России суперкомпьютеров и вычислительных комплексов для систем управления реального времени. Он был Генеральным конструктором универсального многоцелевого комплекса ЭЛЬБРУС-2. В настоящее время является научным руководителем Проекта ОСВМ.

В. С. Бурцев начал свою деятельность под руководством выдающегося ученого академика С. А. Лебедева еще до окончания Московского энергетического института. Темой его дипломной работы была система управления первой советской быстродействующей электронной машины – БЭСМ АН СССР. Уже на дипломном проектировании он стал одним из ведущих разработчиков в создании этой системы. Под его научным руководством и при непосредственном участии проведены следующие научные исследования, которые имели большое научно-техническое значение и были внедрены в промышленности.

В 1953–56 гг. Бурцевым В. С., как ответственным исполнителем, разработан принцип селекции и оцифровки радиолокационного сигнала, осуществлен съем данных о цели с радиолокационной станции и ввод их в вычислительную машину. Успешно был проведен эксперимент одновременного сопровождения нескольких целей вычислительной машиной. На базе этой работы была написана кандидатская

диссертация, а на защите члены совета единогласно проголосовали за присуждение Бурцеву В. С. степени доктора технических наук. Успешный эксперимент со съемом данных с РЛС в корне изменил структуру управляющих противоракетных и противосамолетных комплексов.

Под непосредственным руководством В. С. Бурцева в 1956–61 гг. разработаны принципы построения вычислительных средств противоракетной обороны (ПРО) и создан высокопроизводительный вычислительный комплекс для решения задачи высококачественного автоматического управления сложными, разнесенными в пространстве объектами, работающими в масштабе реального времени. Вычислительные комплексы ПРО были оснащены самой быстродействующей для того времени серийной ЭВМ М-40, в которой Бурцевым В. С. впервые были предложены принципы распараллеливания вычислительного процесса за счет аппаратных средств – все основные устройства машины (арифметическое, управления, ОЗУ, управления внешней памятью и т. д.) имели автономные системы управления и работали параллельно во времени. Впервые был использован принцип мультиплексного канала, благодаря которому без замедления вычислительного процесса удалось осуществить прием и выдачу информации с десяти асинхронно работающих направлений с общей пропускной способностью 1 млн бит/с.

В 1961–68 гг. под непосредственным руководством В. С. Бурцева для создания сложных боевых систем разрабатывается первая высокопроизводительная полупроводниковая ЭВМ 5Э92б с повышенной структурной надежностью и достоверностью выдаваемой информации, основанной на полном аппаратном контроле вычислительного процесса. В этой ЭВМ впервые был реализован принцип многопроцессорности, внедрены новые методы управления внешними запоминающими устройствами, позволяющие осуществлять одновременную работу нескольких машин на единую внешнюю память. Все это дало возможность по-новому строить вычислительные управляющие и информационные комплексы для систем ПРО, управления космическими объектами, центров контроля космического пространства и другие. Многомашиные вычислительные комплексы с автоматическим резервированием хорошо зарекомендовали себя на боевых дежурствах.

В 1969–72 гг. Бурцев В. С., являясь главным конструктором, создает первую вычислительную машину третьего поколения для перевозимой серийной противосамолетной системы. Это была трехпроцессорная ЭВМ, построенная по модульному принципу. Каждый модуль (процессор, память, устройство управления внешними связями) полностью охвачены аппаратным контролем, благодаря чему осуществлялось автоматическое скользящее резервирование на уровне модулей в случае их отказов и сбоев, практически без прерывания вы-

числительного процесса. Комплекс по производительности равный БЭСМ-6 занимал объем не более одного кубического метра. Эти комплексы в системе С-300 и до настоящего времени стоят на боевом дежурстве и продаются в другие страны.

В 1973–85 гг., являясь главным конструктором многопроцессорного вычислительного комплекса (МВК) «Эльбрус-1» и «Эльбрус-2», Бурцев В. С. наряду с принципиальными схемотехническими вопросами большое внимание уделял конструктивно-технологическим вопросам, принципиальным вопросам системы охлаждения и повышения интеграции элементной базы, а также вопросам автоматизации проектирования. В процессе создания МВК «Эльбрус-2» по его инициативе и при непосредственном участии созданы новые быстро действующие интегральные схемы, высокочастотные групповые разъемы, многокристальные и большие интегральные схемы, микрокабели, прецизионные многослойные печатные платы. Это было большим вкладом в развитие технологии в нашей стране.

В 1980 г. были закончены работы по созданию МВК «Эльбрус-1» общей производительностью 15 млн операций в секунду. В 1985 г. успешно завершены Государственные испытания десятипроцессорного МВК «Эльбрус-2» производительностью 125 млн операций в секунду. Оба комплекса освоены в серийном производстве.

При создании этих комплексов были решены принципиальные вопросы построения универсальных процессоров предельной производительности. Так, динамическое распределение ресурсов сверхоперативной памяти исполнительных устройств и ряд других решений, впервые используемых в схемотехнике, позволили в несколько раз увеличить производительность каждого процессора. С целью дальнейшего повышения производительности комплекса были решены фундаментальные вопросы построения многопроцессорных систем, такие как исключение взаимного влияния модулей на общую производительность, обеспечение обезличенной работы модулей и их взаимной синхронизации.

В 1986–98 гг. разработана структура супер-ЭВМ, основанная на новом не фон Неймановском принципе, обеспечивающая существенное распараллеливание вычислительного процесса на аппаратном уровне. Эта архитектура использует новейшие принципы оптической обработки информации, обладает высокой регулярностью структуры и позволяет достичь производительности  $10^{10}$ – $10^{12}$  операций в секунду.

Принципиальной особенностью предлагаемой архитектуры является автоматическое динамическое распределение ресурсов вычислительных средств между отдельными процессами и операторами. Решение этой проблемы освобождает человека от решения задачи распределения ресурсов при программировании параллельных процессов в многомашинных и многопроцессорных комплексах. Работы по исследованию и созданию новых архитектур ЭВМ проводились в

рамках «Программы Основных направлений фундаментальных исследований и разработок по созданию оптической сверхвысокопроизводительной вычислительной машины Академии наук» (ОСВМ).

В настоящее время В. С. Бурцев является научным руководителем фундаментальных исследований по разработке различных архитектурных решений высокопроизводительных вычислительных машин нетрадиционной архитектуры и их системного программного обеспечения с целью создания информационно-вычислительного комплекса с максимальной производительностью  $10^{12}$ – $10^{14}$  операций в секунду с применением новых физических принципов.

Бурцев В. С. удостоен Ленинской премии и Государственных премий, награжден орденами Ленина, Октябрьской революции, Трудового Красного знамени и медалями. За цикл работ «Теория и практика создания высокопроизводительных многопроцессорных вычислительных машин» ему присуждена премия АН СССР им. С. А. Лебедева.

Он является автором более 150 научных работ, опубликованных как в нашей стране так и за рубежом, которые положены в основу проектирования новых вычислительных средств, и используются в учебных целях в ведущих вузах России. Бурцев В. С. ведет большую работу по подготовке научных кадров. Под его руководством успешно защитили диссертации на соискание ученой степени кандидата и доктора технических наук более 40 человек. Он преподавал более 20 лет в Московском физико-техническом институте со для его основания. В настоящее время Бурцев В. С. является заведующим филиала кафедры «Микропроцессорные системы, электроника и электротехника» Московского авиационно-технологического университета им. К. Э. Циолковского и научным руководителем кафедры.

## 4.2. ФГУП «Институт точной механики и вычислительной техники им. С. А. Лебедева Российской академии наук»

Сегодня Институт точной механики и вычислительной техники им. С. А. Лебедева (ИТМиВТ) – это ведущий научно-исследовательский институт в области информационных технологий, вычислительной техники и микроэлектроники, возрождающий ныне отечественную школу инноваций.

Начиная с 1948 г. ИТМиВТ формировал отечественную школу исследований и разработок, которая многие годы по ряду направлений удерживала лидирующие позиции в мире. Усилиями специалистов Института были созданы электронно-вычислительные машины, ставшие в свое время государственным промышленным стандартом и основой для таких стратегических систем, как Система противоракетной обороны (ПРО), Система предупреждения о ракетном нападении (СПРН), Система контроля космического пространства (СККП) и др.

Созданные в период 60–80-х гг. вычислительные машины серии БЭСМ, уникальные комплексы «Эльбрус-1», «Эльбрус-2» и другие ЭВМ (всего более 20 типов), в составе систем обеспечили решение важнейших оборонных и научных задач. Более 70 специалистов Института стали лауреатами различных премий – Ленинской, Государственной, Совета Министров СССР.

ИТМиВТ сегодня – это современный центр исследований и разработок в области информационно-коммуникационных систем и микроэлектроники. Здесь проектируются и разрабатываются информационные системы государственного масштаба, аппаратно-программные комплексы, микроэлектронные системы и электронная компонентная база двойного назначения.

Институт в полной мере сохранил лучшие традиции отечественной научной школы. Специалисты ИТМиВТ владеют успешным опытом поиска и создания оригинальных технических решений в интересах государственных предприятий аэрокосмической промышленности, обороны и безопасности, медицины и телекоммуникаций.

Институт точной механики и вычислительной техники был образован для создания в СССР новых средств вычислительной техники, в первую очередь – быстродействующей вычислитель-

ной машины (тогда еще не существовало термина суперЭВМ) в конце сороковых годов.

Постановление Совета Министров СССР № 2369 о формировании нового института в составе Академии наук СССР датировано 29 июня 1948 г. и подписано главой Правительства СССР И. В. Сталиным (рис. 4.1). Решением руководства института день 29 июня объявлен днем рождения ИТМИВТ, хотя, конечно, работа над созданием института началась еще до принятия правительственного Постановления и продолжалась после его принятия длительное время.

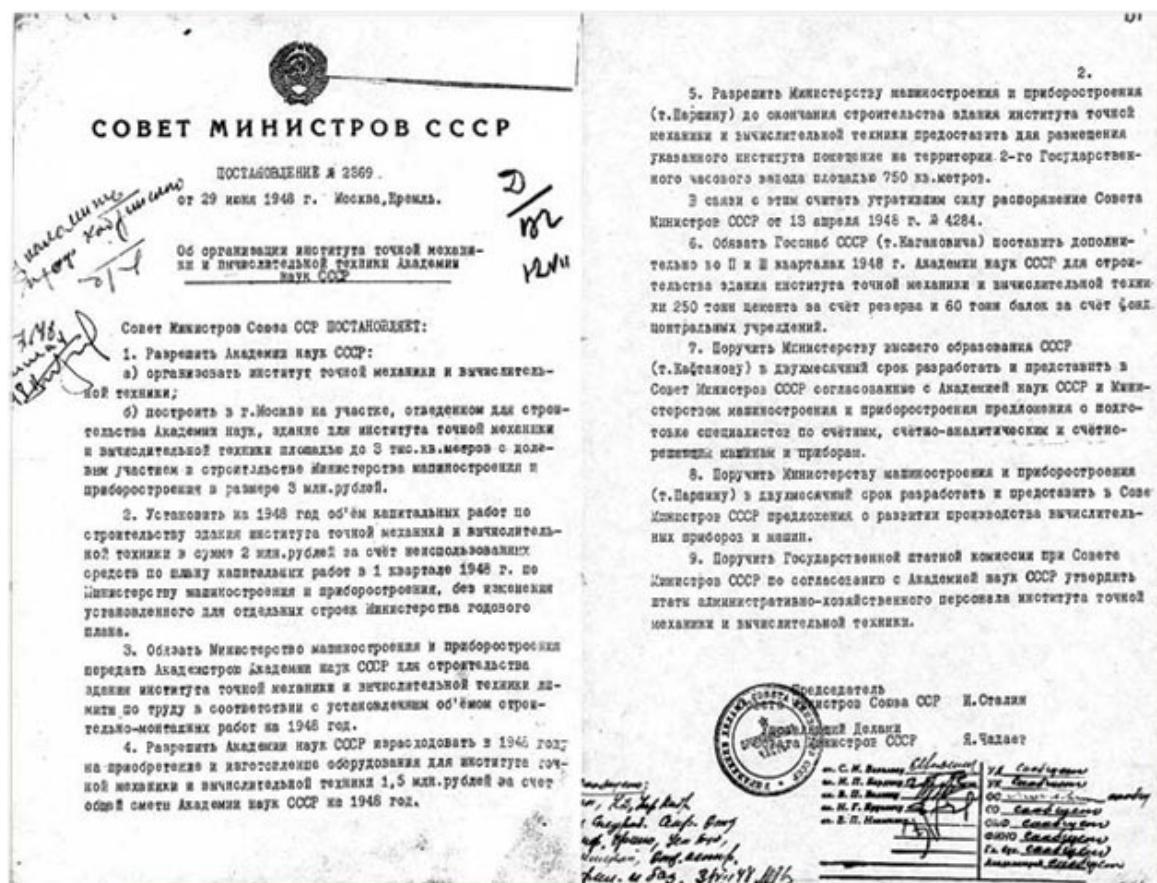


Рис. 4.1. Постановление Совета Министров СССР № 2369 от 29.06.48 о формировании Института точной механики и вычислительной техники

16 июля 1948 г. вышел первый приказ по ИТМиВТ о начале исполнения обязанностей первым директором института Николаем Григорьевичем Бруевичем. До сентября решались организационные вопросы создания нового института: штаты, структура, помещения... В приказе № 2 от 2 октября 1948 г. за подписью Н. Г. Бруевича говорилось о зачислении в штат ИТМиВТ с

16 сентября 1948 г. приблизительно 60 сотрудников с установлением им окладов в пределах штатного расписания.

ИТМиВТ образован на базе трех институтов АН СССР: Института машиноведения, Энергетического и Математического институтов.

Из института машиноведения выделен отдел точной механики во главе с академиком Н. Г. Бруевичем (рис. 4.2.). Из Энергетического института выделена лаборатория электромоделирования во главе с профессором Л. И. Гутенмахером. Из сотрудников Математического института имени В. А. Стеклова образованы отдел приближенных вычислений (начальник отдела – член-корреспондент Л. А. Люстерник) и экспериментально-счетная лаборатория во главе с И. Я. Акушским.



Рис. 4.2. Н. Г. Бруевич – первый директор ИТМиВТ

Территориально вновь образованный институт находился в двух помещениях. Отдел точной механики располагался на территории Института машиноведения (Малый Харитоньевский переулок). Здесь же находились дирекция, бухгалтерия, кадры. Остальные подразделения остались в здании на Большой Калужской улице (ныне Ленинский проспект), где сотрудники работали до образования ИТМиВТ.

В отдел точной механики ИТМиВТ были переведены 13 человек из института Машиноведения, в их числе будущий лауреат Государственной премии, а тогда младший научный сотруд-

ник П. П. Головистиков). В конце 1948 г. в отдел был зачислен м. н. с. В. И. Рыжов, закончивший МВТУ им. Н. Э. Баумана, а также некоторые другие сотрудники.

Из Энергетического института в ИТМиВТ были переведены 19 человек, в том числе В. В. Бардиж, будущий лауреат Государственной премии, много сделавший для института.

Основной расчетной техникой в то время были механические вычислительные средства – табуляторы, перфораторы, репродукторы, электромеханические настольные клавишные машины.

Многими в то время высказывались мнения, что круг задач, где требуется очень большое количество вычислений, не так уж велик, поэтому широкого применения электронные вычислительные машины найти не смогут. Однако появление ЭВМ настолько расширило область их применения, что они с тех пор вошли во все сферы жизни людей.

Весь 1949 г. велась подготовка к разработке в СССР первых больших вычислительных машин. Разрабатывались два варианта ЭВМ – один в Академии наук (ИТМиВТ), а второй – в министерстве машиностроения и приборостроения.

2 сентября 1949 г. в составе отдела точной механики была образована группа для проведения предварительных работ по быстродействующих цифровым математическим машинам.

В это время в ИТМиВТ еще ничего не знали о работах С. А. Лебедева в Киеве. Только в январе 1950 г. М. А. Лаврентьев и С. А. Лебедев впервые посетили ИТМиВТ, где Н. Г. Бруевич познакомил их с работами института и его сотрудниками.

В начале 1950 г. директором ИТМиВТ стал академик М. А. Лаврентьев, а С. А. Лебедев с 16 марта 1950 г. был назначен начальником лаборатории № 1, оставаясь также начальником лаборатории киевского института электротехники АН УССР, где коллектив под его руководством заканчивал работу над МЭСМ. В декабре 1950 г. отдел точной механики во главе с Н. Г. Бруевичем был переведен из ИТМиВТ в институт машиноведения, где он функционировал когда-то. Территориально отдел остался в своем старом помещении – в Малом Харитоньевском переулке, а остальные сотрудники переехали в здание 2-го часового завода у Белорусского вокзала, откуда позднее переместились в здание на Ленинском проспекте, которое было построено к сентябрю 1951 г. (рис. 4.3).



Рис. 4.3. Строительство здания ИТМиВТ

К весне 1951 г. в лаборатории № 1 уже работали около 50 человек. Среди них уже были будущие действительные члены Академии наук СССР Всеволод Сергеевич Бурцев, Владимир Андреевич Мельников. 21 апреля 1951 г. начала работу Государственная комиссия, а летом 1952 г. было завершено изготовление машины, которая заработала к осени 1952 г.

В апреле 1953 г. Государственная комиссия под председательством М. В. Келдыша приняла к работе БЭСМ, а в июне 1953 г. С. А. Лебедев, оставшись начальником лаборатории № 1, был назначен директором ИТМиВТ, который теперь носит его имя.

Понимая, как важна подготовка специалистов для нового направления, с 1953 г. и до конца своих дней С. А. Лебедев возглавлял кафедру «Электронные вычислительные машины» в Московском физико-техническом институте.

23 октября 1953 г. С. А. Лебедев был избран действительным членом Академии наук СССР по Отделению физико-математических наук. Он стал первым академиком по специальности «счетные устройства». За создание БЭСМ С. А. Лебедев в 1954 г. был награжден орденом Ленина, а в 1956 г. ему было присвоено звание Героя Социалистического труда. В 1966 г. С. А. Лебедев вместе со своим учеником В. С. Бурцевым были удостоены Ленинской премии.

Кроме лаборатории № 1, которую длительное время возглавлял сам С. А. Лебедев, а впоследствии передал В. А. Мельникову, в институте были созданы новые лаборатории. Лабораторию № 2, занимавшуюся проблемами специальных ЭВМ, возглавил ученик С. А. Лебедева, будущий директор института, будущий академик В. С. Бурцев. Лаборатория № 3 с ее начальником В. В. Бардигем занималась разработкой запоминающих устройств (сначала магнитных, потом полупроводниковых). Лаборатория № 4, которая была поручена П. П. Головистикову, занималась разработкой элементной базы и исследованиями в области полупроводниковой электроники. Выпускнику МГУ им. Ломоносова Л. Н. Королёву, будущему члену-корреспонденту АН СССР и заведующему кафедрой на факультете вычислительной математики и кибернетики МГУ было поручено целое направление – в его лаборатории № 5 велась разработка математического и программного обеспечения для всех ЭВМ, разрабатывавшихся в ИТМиВТ.

В 1979 г. институт награжден орденом Трудового Красного знамени. За время с 1948 г. сотрудники института были награждены:

- Званием Героя Социалистического труда – 1 человек
- Ленинской премией – 7 человек
- Государственной премией СССР и России – 42 человека
- Премией Совета Министров СССР – 12 человек.

Орденами и медалями СССР и Российской Федерации награждены более 700 человек.

К первой линии ЭВМ, созданных в ИТМиВТ, относятся машины серии БЭСМ, М-20, М-220, БЭСМ-2, М-50, БЭСМ-4, БЭСМ-6, Эльбрус 1-К2, Эльбрус 1-КБ. В качестве управляющих машин в системах управления реального времени использовались Диана, Диана-2, М-40, 5Э261/2, 5Э265/6, 40У6. Управление космическими объектами осуществлялось машинами БЭСМ-6, АС-6. В системах противоракетной обороны работали машины 5Э92, 5Э92Б, 5Э51, 5Э65, 5Э67, Эльбрус 1 и Эльбрус 2 (рис. 4.4). Для систем противовоздушной обороны разрабатывались ЭВМ 5Э261, 5Э262, 5Э265, 5Э266 × 40У6.

Помимо законченных вычислительных машин в ИТМиВТ разрабатывались отдельные устройства, входившие в состав ЭВМ в качестве составных элементов. В состав комплекса АС-6 входила периферийная машина ПМ-6, а в состав МВК Эльбрус могли дополнительно включаться: процессор быстрого преобра-

зования Фурье (БПФ), векторный процессор, процессор ввода/вывода (ПВВ), процессор передачи данных (ППД), универсальный инженерный пульт (УИП).

Кроме перечисленных ЭВМ, в ИТМиВТ были созданы проекты и других вычислительных машин, которые по разным причинам не были реализованы. Среди нереализованных проектов – проект БЭСМ-10, проект мини- суперЭВМ (совместимой с МКП), Эльбрус 3, Эльбрус 4, Эльбрус 5, а также машины серии МВС, разрабатывавшиеся как развитие машины 40У6, и проект 40У6М.



Рис. 4.4. Эльбрус-2

### Наиболее значимые разработки ИТМиВТ: **БЭСМ-2**

Расчет траектории лунной ракеты, доставившей вымпел Советского Союза на Луну. Главный конструктор машины Герой Социалистического Труда академик С. А. Лебедев.

### **M-20**

С помощью М-20 создавались автоматические линии и агрегатные станки.

**БЭСМ-4**

Полупроводниковая ЭВМ, программно совместимая с М-20, применялась для решения сотен различных задач, в том числе для расчетов воздушных бассейнов крупнейших металлургических предприятий страны, как действующих, так и проектируемых. Главный конструктор машины кандидат технических наук О. П. Васильев.



Рис. 4.5. БЭСМ-4

Универсальная машина БЭСМ-6 (рис. 4.5) использовалась во всех отраслях народного хозяйства (нефтепромыслы, планирование машиностроительных отраслей, создание автоматических линий, ядерный реактор, синхрофазotron, обслуживаемые машиной). Главный конструктор Герой Социалистического труда академик С. А. Лебедев.

**AC-6**

Обеспечениестыковки космических кораблей «Аполлон» и «Союз». Система связи и обработки информации. Космический комплекс «Союз-Салют». Программа «Интеркосмос». Главные конструкторы: Герой Социалистического труда академик С. А. Лебедев, В. А. Мельников, А. А. Соколов.

**Диана-1, Диана-2**

Автоматический съем данных от обзорной радиолокационной станции с селекцией объекта от шумов и расчет траектории движения. Руководители работ: С. А. Лебедев, Д. Ю. Панов, В. С. Бурцев, Г. Т. Артамонов.

**M-40, M-50**

Работа в замкнутом контуре управления в качестве управляющего звена. Работа с удаленными объектами по радиорелейным дуплексным линиям связи. Главный конструктор: С. А. Лебедев. За разработку ЭВМ М-40 и М-50 С. А. Лебедев и В. С. Бурцев удостоены Ленинской премии за 1966 г.

### **5Э92Б, ЭВМ5Э51**

Главный конструктор: С. А. Лебедев, зам. главного конструктора: В. С. Бурцев. За разработку 5Э92Б и 5Э51 В. С. Бурцев, В. И. Рыжов, А. С. Крылов удостоены Государственной премии СССР.

### **5Э65, 5Э67**

Перевозимый высокопроизводительный вычислительный комплекс специального применения, обеспечивающий проведение исследований в реальном масштабе времени в полевых условиях с высокой степенью достоверности за счет применения памяти с неразрушающим считыванием, полного аппаратного контроля, средств устранения последствий сбоев. С применением комплекса были произведены исследования различных бортовых средств радиоизмерений и радионавигации в атмосфере и в космосе. Вариант 5Э67 представляет собой модификацию 5Э65 с общим полем внешней памяти и аппаратно-программными средствами реконфигурации на уровне машин. Комплекс обеспечивает работу в жестких климатических условиях. С участием комплекса были произведены уникальные радиоизмерения эпизодических явлений в верхних слоях атмосферы в реальном масштабе времени. Главный конструктор – С. А. Лебедев, зам. главного конструктора – И. К. Хайлов. За создание 5Э67 И. К. Хайлов удостоен Государственной премии СССР в 1977 г.

### **5Э261, 5Э262**

Первая в СССР мобильная многопроцессорная высокопроизводительная управляющая система, построенная по модульному принципу, с высокоэффективной системой автоматического резервирования, базирующейся на аппаратном контроле и обеспечивающей возможность восстановления процесса управления при сбоях и отказах аппаратуры, работающей в широком диапазоне климатических и механических воздействий, с развитым математическим обеспечением и системой автоматизации программирования. Работает в составе систем ПВО С-300 ПТ сухопутного и морского базирования. Главные конструкторы С. А. Лебедев, В. С. Бурцев. За создание 5Э261/2 Е. А. Кривошеев, Ю. Д. Острецов, Ю. С. Рябцев удостоены Государственной премии СССР в 1980 г. На рис. 4.6 представлена фотография 5Э261.

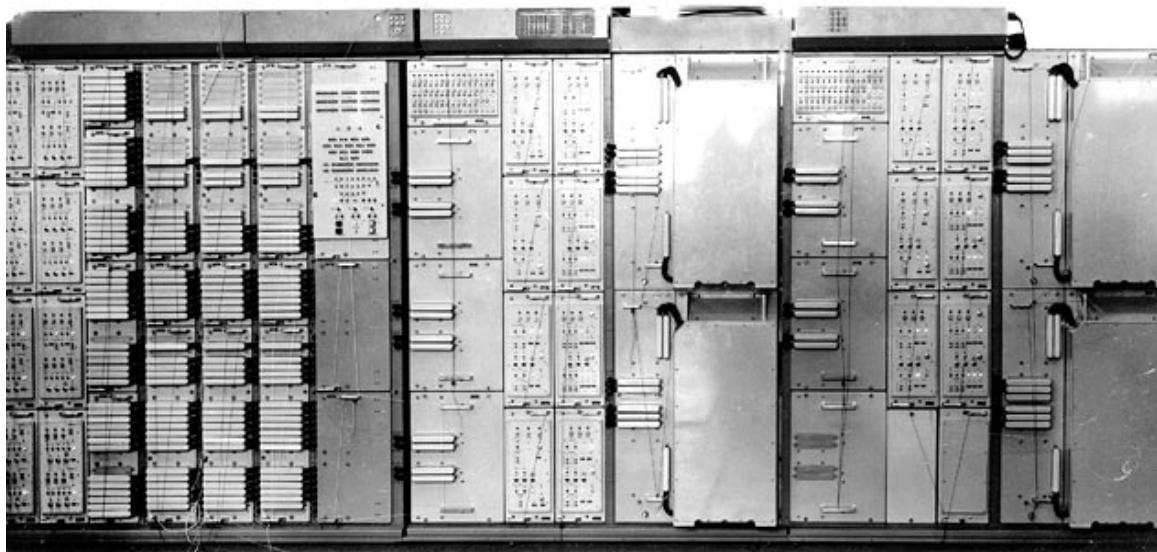


Рис. 4.6. 5Э261 – первая в СССР мобильная многопроцессорная высокопроизводительная управляющая система

### **Эльбрус-1**

Главный конструктор: В. С. Бурцев. Суперскалярная архитектура, применение процессоров ввода-вывода для организации передачи потоков данных между оперативной памятью и периферийными устройствами.

### **Эльбрус-2**

Главный конструктор: В. С. Бурцев. По структуре незначительно отличается от Эльбрус-1, однако использована более современная элементная база. Использовались в оборонной отрасли, в ядерных исследовательских центрах в Арзамасе-16 и Челябинске-70, а с 1991 г. применялись в системе противоракетной обороны А-135 и в других военных объектах. За создание Эльбрус-2 Б. А. Бабаян и другие получили Ленинскую премию, а Главный конструктор В. С. Бурцев и другие – Государственную премию.

### **5Э265, 5Э266**

Развитие ЭВМ 5Э261×5Э262. Работает в составе систем ПВО С-300 ПС сухопутного и морского базирования. Главный конструктор В. С. Бурцев.

### **Эльбрус 1-К2, Эльбрус 1-КБ**

Основаны на технологиях Эльбрус-2 и использовались для замены БЭСМ-6. Процессор Эльбрус 1-К2 (СВС) был совместим

с БЭСМ-6 на уровне системы команд, но работал в 2–3 раза быстрее. Между БЭСМ-6 и Эльбрус 1-КБ имелась полная обратная программная совместимость, дополненная новыми режимами работы с увеличенной разрядностью адресов и чисел. Эта ЭВМ имела быстродействие примерно на порядок большее, чем БЭСМ-6 и была в несколько раз компактнее.

### **40У6**

Главный конструктор: Е. А. Кривошеев. Работает в режиме жесткого реального времени в составе системы С-300ПМ сухопутного и морского базирования, а также в сложных системах управления крупными объектами специального назначения, рассчитана на работу в широком диапазоне климатических и механических воздействий, имеет развитое математическое обеспечение автоматизации программирования. За создание 40У6 Е. А. Кривошеев удостоен Государственной премии.

### **Эльбрус-3**

Многопроцессорный вычислительный комплекс, 16 процессоров, быстродействие в два раза выше, чем у CRAY-YMP. Был изготовлен, но в серию запущен не был.

Действительными членами Академии наук СССР и Российской Федерации во время работы в ИТМиВТ были:

- Н. Г. Бруевич (1939, 1942).
- М. А. Лаврентьев (1939 – АН УССР, 1946)
- С. А. Лебедев (1945 – АН УССР, 1953)
- В. А. Мельников (1976, 1981)
- В. С. Бурцев (1976, 1992)

Членами-корреспондентами по итогам работ в ИТМиВТ стали:

- Л. Н. Королёв (1981)
- Б. А. Бабаян (1984)
- В. П. Иванников (1984)
- Г. Г. Рябов (1984)
- Ю. И. Митропольский (1990)

Сотрудниками института были получены более 700 авторских свидетельств. Институтом оформлены около 60 патентов, из которых около 10 действуют до сих пор. Опубликованы более 1500 научных работ в отечественных и зарубежных изданиях. Многие сотрудники ИТМиВТ и смежных организаций защи-

тили кандидатские и докторские диссертации по тематике работ института.

Основные направления исследований и разработок Института в настоящее время:

- Встраиваемые системы для ответственных применений (авионика, энергетика, металлургия, космос);
- ЭКБ оборонного, специального и промышленного назначения;
- Беспроводные системы мониторинга;
- Навигационные, информационные и управляющие системы;
- Группа методов адаптивного управления;
- Системы автоматизации проектирования микроэлектроники (САПР);
- Оптимизирующие компиляторы;
- Корпоративные информационные системы;
- Информационная безопасность и криптография.

Исследования, проводимые в стенах ИТМиВТ, носят прикладной характер – результатом являются инновационные продукты и решения, конкурентоспособные на внутреннем и внешнем рынке.

Помимо исследовательской деятельности ИТМиВТ предлагает услуги проектирования готовых изделий и их компонент, включая разработку микроэлектронной элементной базы, радиоэлектронной аппаратуры, встроенных систем, системного, специализированного и прикладного программного обеспечения.

ИТМиВТ ведет проекты в области системной интеграции и в первую очередь обеспечивает создание, внедрение, модернизацию и поддержку сложных информационных и коммуникационных систем для решения задач государственных структур, предприятий оборонно-промышленного комплекса и крупных коммерческих организаций

### **4.3. Работы в области микроэлектронных технологий**

Одной из ярких страниц в истории развития вычислительной техники [39, 41] явились работы, начатые во второй половине 50-х гг. в Ленинграде коллективом, руководимым Филиппом Георгиевичем Старосом и его ближайшим помощником Иозефом Вениаминовичем Бергом. Особенностью этих работ была изначаль-

ная ориентация на микроэлектронные технологии. Это позволило получить первые в СССР крупные результаты в создании и внедрении образцов микроэлектронной управляющей вычислительной техники и инициировать организацию Научного центра микроэлектроники в Зеленограде с филиалами в ряде городов Союза. Другой важной особенностью этих работ было то, что руководили ими ученые, тесно связанные с ядерным проектом, но только не советским, а американским.



**Филипп Георгиевич Старос (Альфред Сарант, Alfred Sarant, 1918–1979)** – американско-советский инженер, разведчик. По происхождению грек. В Канаде превратил свою фамилию Сарантопулос в Сарант. В 1941 г. получил степень бакалавра по электронике в университете Купер-Юнион в Нью-Йорке. В 1944 г. вступил в коммунистическую партию США, состоял в одной ячейке с Джюлиусом и Этель Розенбергами. Во время Второй мировой работал в лабораториях корпуса связи армии США вместе со своим другом Джоэлом Барром. Находясь в контакте с советским разведчиком Феклисовым, Барр и Сарант передавали советской разведке техническую информацию об американских вооружениях, в том числе о радарных установках, авиаприцелах, аналоговых компьютерах для управления огнем и других системах. С 1946 г. Сарант работал в лабораториях Корнелльского университета. Был знаком со многими известными физиками, включая Ханса Бете и Ричарда Фейнмана. В 1950 г. после ареста Джюлиуса Розенберга ФБР допросило Саранта, но не арестовало его. Вскоре Сарант бежал в Мексику с Кэрол Дэйтон – женой своего соседа. Там он вышел на связь с советской разведкой и был переправлен в Чехословакию, где встретился с Барром и получил новое имя Филипп Георгиевич Старос. Никто точно не знает, чем занимались друзья эти годы, но в конце 1955 из Чехословакии в СССР прибывают два эмигранта: Филипп Старос и Иозеф Берг.



В 1956 г. при одной из ленинградских конструкторских организаций для ученых была организована специальная (закрытая) лаборатория СЛ-IL Уже в первые годы ее существования были достигнуты серьезные результаты по созданию экспериментальных образцов пленочных микросхем, интегральных многоотверстных ферритовых пластин для запоминающих уст-

ройств и логических узлов ЭВМ с малым потреблением энергии. После посещения СЛ-11 в 1959 г. Д. Ф. Устиновым (бывшим тогда председателем ВПК при СМ СССР) было принято решение об организации самостоятельного КБ под руководством Ф. Г. Староса. Оно было создано в 1961 г. и получило название КБ-2 электронной техники. Последствия не замедлили сказаться.

Старос приехал в Советский Союз из Праги в конце 1955-го или начале 1956 г. в сопровождении своей американской жены, четырех детей и американского коллеги, друга и доверенного лица Иозефа Берга, который был женат на чешке и впоследствии работал заместителем Староса. Хотя существует некоторая неясность в отношении того, кто пригласил Староса в СССР (некоторые утверждают, что это был Дементьев, в то время министр авиационной промышленности, по другой версии Хрущев привез его в Советский Союз вместе с семьей), есть очень мало сомнений в том, что советские власти с самого начала относились к нему с очень большим вниманием. Его зарплата в 700 руб. в месяц была намного выше, чем 550 руб., которые получали другие заместители министра электронной промышленности СССР.

Первым крупным исследованием новой организации, выполненным в рекордно короткий срок (два года), явилась разработка управляющей ЭВМ УМ1-НХ. (*НХ* формально означало «народное хозяйство». Но, отвечая на вопрос Хрущева, что означает эта аббревиатура, Старос слегка запнулся: «Это значит Никита...» и Хрущев радостно закончил: «Все ясно! НХ означает «Никита Хрущев»). Массой 65 кг, потребляющая 100 Вт, состоявшая из восьми тысяч транзисторов и примерно десяти тысяч резисторов и конденсаторов, во время испытаний УМ1-НХ проработала без сбоев в течение 250 час. В 1962 г. она была принята Государственной комиссией под председательством академика А. А. Дородницына и рекомендована к серийному производству. Разработчик машины был представлен публике советской прессой как тов. Филиппов. Только через пять лет, когда Старос получил Государственную премию, было объявлено, что именно он является разработчиком машины УМ1-НХ. (*Тогда стало ясно, что фамилия Филиппов является производной от имени Староса*). ЭВМ УМ1-НХ стала предвестницей появления нового класса вычислительной техники – микроэлектронных управляющих ЭВМ. Хотя логическая часть УМ1-НХ, а

также ПЗУ констант и команд были выполнены на дискретных элементах, в ней впервые были реализованы принципы и технические решения микросхемотехники. Существенными отличительными характеристиками УМ1-НХ явились низкая для того времени стоимость и высокая надежность работы в производственных условиях. Например, за первые 12 тыс. часов работы в условиях металлургического производства в системе управления нажимным устройством блюминга 1150 на Череповецком металлургическом заводе показатель безотказности УМ1-НХ составил более 1,5 тыс. час. Приоритет УМ1-НХ как первой в мире мини-ЭВМ фактически признали американские специалисты, УМ1-НХ была названа «замечательной» (*remarkable*) по своим размерам и потребляемой мощности. По постановлению ЦК КПСС и СМ СССР в 1963 г. началось освоение и серийное производство УМ1-НХ на Ленинградском электромеханическом заводе (ЛЭМЗ). В последующие годы ЛЭМЗом было также освоено производство новых устройств для УМ1-НХ, расширяющих ее возможности, используя которые вместе с базовым конструктивом УМ1-НХ, завод выполнял заказы промышленности на управляющие комплексы для конкретных объектов.

Наиболее крупным комплексом, который был изготовлен ЛЭМЗ, является комплекс автоматического контроля и регулирования для 2-го блока Белоярской АЭС (руководитель разработки В. Е. Панкин, КБ-2). Центральная подсистема управления состояла из двух УМ1-НХ, работавших в режиме «горячего» резерва, к которым подключалось около 4 тыс. каналов ввода-вывода, размещаемых в 15 конструктивах типа УМ1-НХ. Комплекс был укомплектован 120 преобразователями «угол-код».

Работой по внедрению комплексов и систем на базе УМ1-НХ руководил один из ближайших в то время помощников Староса Виталий Михайлович Вальков. История внедрения УМ1-НХ (рис. 4.7) в различных отраслях народного хозяйства интересна тем, что было доказано в принципе очевидное положение: для решения целого ряда конкретных задач управления требуются средства вычислительной техники с весьма скромными характеристиками. Это дало толчок многочисленным работам в области использования УМ1-НХ для управления различными объектами.

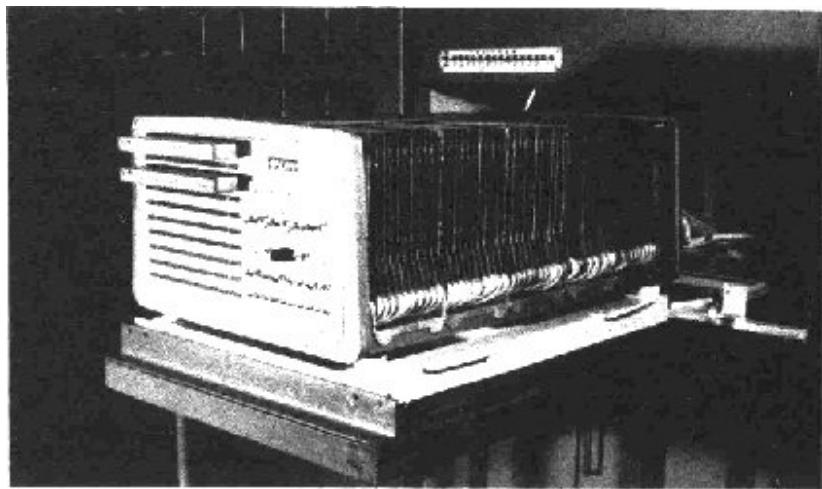


Рис. 4.7. УМ1-НХ

Итог подвело Постановление ЦК КПСС и СМ СССР от 01.11.1969 г.: «Присудить Государственную премию СССР Старосу Филиппу Георгиевичу, доктору технических наук, главному конструктору, руководителю работы, Валькову Виталию Михайловичу, Панкину Владимиру Ефимовичу, начальникам отделов, Бергу Иозефу Вениаминовичу, кандидату технических наук, главному инженеру, Бородину Николаю Иннокентьевичу, кандидату технических наук, заместителю главного конструктора, работникам конструкторского бюро и другим – за разработку малогабаритной электронной управляемой машины и управляющих вычислительных комплексов типа УМ1-НХ и внедрение их в первые цифровые управляющие системы в различных отраслях народного хозяйства».

Одновременно с этими работами в КБ-2 интенсивно развивались исследования в области микроэлектронной технологии, создавались экспериментальные образцы микроминиатюрных логических узлов и узлов памяти ЭВМ, отрабатывались идеи и методы создания микроэлектронной аппаратуры различного назначения.

4 мая 1962 г. КБ-2 посетил Н. С. Хрущев. Его сопровождали Устинов, главком ВМФ Горшков, министр электронной промышленности Шокин и ряд других высокопоставленных деятелей военно-промышленного комплекса. Старос сделал четкий и короткий доклад (Хрущев любил доклады в таком стиле) о значении микроэлектроники для обороноспособности страны и научно-технического прогресса СССР в целом. Во время доклада демонстрировались действующие образцы микроэлектронных средств вычислительной техники от УМ1-НХ, микросборок, ин-

тегральных узлов памяти до макета микроминиатюрной аппаратуры на бескорпусных транзисторах, имитирующей решения летчика для маневрирования истребителя в бою. Апофеозом стало краткое изложение сути разработанного под руководством Староса проекта Научного центра микроэлектроники.

Результатом посещения КБ-2 Хрущевым был выпуск буквально через месяц (беспрецедентный срок!) постановления ЦК КПСС и СМ СССР о строительстве Научного центра микроэлектроники в Зеленограде и организации ряда филиалов в Киеве, Минске, Риге, Вильнюсе и др. В разработке проекта научного центра микроэлектроники кроме Староса участвовали И. В. Берг, В. М. Вальков, Н. И. Бородин, Г. Р. Фирдман. Проект предусматривал интенсивное комплексное развитие всех необходимых компонентов микроэлектроники как науки и как базовой отрасли развития народного хозяйства – от материалов и новых технологий до новой подотрасли электронного машиностроения и создания – «пионерских» образцов микроэлектронной вычислительной техники. Первые два года Ф. Г. Старос исполнял обязанности заместителя генерального директора по науке создаваемого Центра, оставаясь главным конструктором КБ-2, которое до 1970 г. входило как самостоятельное предприятие в систему Научного центра. В 1961 г. был создан новый мощный Госкомитет, а затем, в 1965 г., Министерство электронной промышленности, возглавил которое Александр Шокин. Целью создания этого министерства было увеличение производства основных электронных компонентов, без которых невозможно производство радарного оборудования и вычислительных машин. На Министерство электронной промышленности возлагались большие надежды и оно заняло место среди так называемых «девяти сестер» – девяти индустриальных министерств, которые более всего были вовлечены в военное производство. Это делало позицию Шокина очень сильной, но в то же время и уязвимой, так как он постоянно должен был демонстрировать быстрые практические результаты. Этот факт может объяснить, почему он столь охотно поддержал Староса в его планах. Поддерживая Староса в направлении расширения его конструкторского бюро, он в то же время невольно содействовал тому, что Старос очень быстро ощутил пределы советской терпимости в отношении иностранцев.

Первая советская полупроводниковая микросхема была создана в 1961 г. в Таганрогском радиотехническом институте, в лаборатории Л. Н. Колесова.

Первая в СССР полупроводниковая интегральная микросхема была разработана (создана) на основе планарной технологии, разработанной в начале 1960 г. в НИИ-35 (затем переименован в НИИ «Пульсар») коллективом, который в дальнейшем был переведен в НИИМЭ (Микрон). Создание первой отечественной кремниевой интегральной схемы было сконцентрировано на разработке и производстве с военной приемкой серии интегральных кремниевых схем ТС-100 (37 элементов – эквивалент схемотехнической сложности триггера, аналога американских ИС серии SN-51 фирмы Texas Instruments). Образцы-прототипы и производственные образцы кремниевых интегральных схем для воспроизведения были получены из США. Работы проводились НИИ-35 (директор Трутко) и Фрязинским заводом (директор Колмогоров) по оборонному заказу для использования в автономном высотомере системы наведения баллистической ракеты. Разработка включала шесть типовых интегральных кремниевых планарных схем серии ТС-100 и с организацией опытного производства заняла в НИИ-35 три года (с 1962 по 1965 г.). Еще два года ушло на освоение заводского производства с военной приемкой во Фрязино (1967 г.).

В 1964 г. в КБ-2 под руководством Староса была разработана микроминиатюрная ЭВМ УМ-2, ориентированная на применение в аэрокосмических объектах. Кроме достаточно развитой архитектуры, УМ-2 имела оригинальные схемо-конструктивные и технологические решения, которые оказали большое влияние на развитие бортовой вычислительной техники в последующие годы. Для организаций Королёва и Туполева были разработаны опытные образцы этой машины.

Второй крупной разработкой 1964 г. было семейство наращиваемых магнитных интегральных накопителей типа КУБ-1 (-2, -3, -4). Серийное производство этих накопителей было освоено заводом ЛЭМЗ, ими комплектовались не только управляющие комплексы на базе УМ1-НХ, но и системы управления ракетами, находящиеся на вооружении армии.

Разработка УМ-2, ее удачные архитектурные и конструктивно-технологические решения получили свое развитие и практическое внедрение по двум направлениям: была разрабо-

тана управляющая ЭВМ «Электроника К-200» и управляющий комплекс с наращиваемыми устройствами ввода-вывода и периферийными устройствами, получивший название «Электроника К-201». В конце 60-х гг. они стали выпускаться в Псковском объединении «Рубин».

Она весила примерно 120 кг и могла производить 40 тыс. операций в секунду. Авторы американского обзора об этой машине отметили, что «многие ее черты не считались бы слишком оригинальными на Западе, но появление таких особенностей в советской вычислительной машине крайне необычно. К-200 была первым компьютером советского производства, который можно считать хорошо разработанным и удивительно современным». Подчеркивался также современный английский технический жаргон, сопровождавший описание машины. Конечно, все эти качества машины не так уж удивили бы авторов обзора, если бы они знали, что ее разработчиком является американский электронщик, который регулярно следил за американскими публикациями по этому предмету.

Таким образом, разработки КБ-2 инициировали возникновение второго нового производителя средств микроэлектронной управляющей вычислительной техники. В 70-е гг. «Электроника К-200» и комплексы на ее основе нашли достаточно широкое применение для контроля и управления в промышленности (в первую очередь электронной). Основными работами по направлению «Электроника К-200» руководил В. М. Вальков; его ближайшими коллегами были В. И. Хлебников, Г. В. Федоров, В. Н. Колесов, Л. А. Старн.

Второе рождение УМ-2 получила в многоцелевой управляющей системе «Узел» для малых подводных лодок. Разработка «Узла» (гл. конструктор Ф. Г. Старос) проводилась по заданию ВМФ и по решению ВПК при СМ СССР. «Узел» успешно прошел государственные (а в дальнейшем объектовые) испытания, был внедрен в мелкосерийное производство на Псковском объединении «Рубин» и в 70–80-е гг. поставлялся для комплектования объектов ВМФ. В комплексе работ по «Узлу» особая роль принадлежала ученику Староса д-р техн. наук, проф. М. П. Гальперину, за что ему была присуждена (в составе коллектива) Государственная премия СССР.

К началу 70-х гг. в КБ-2 под руководством Староса были получены первые результаты по созданию монолитных БИС в

виде комплекта для первого микрокалькулятора, производителем которого стало ПО «Светлана» (ныне АО «Светлана»). Получение этих результатов (на несколько месяцев раньше, чем на других микроэлектронных предприятиях) было обеспечено не только тщательной отработкой технологии МДП-БИС с применением средств автоматизации на базе мини-ЭВМ (экспонирование фотошаблонов и контроль изготавливаемых изделий), но и внедрением мощной системы топологического проектирования (в то время на базе БЭСМ-6). Разработки БИС для микрокалькуляторов послужили базой для развития работ по созданию машины «Электроника С5» – первого в СССР семейства одноплатных, многоплатных и однокристальной микро-ЭВМ для управления объектами и процессами. Среди этого семейства с оригинальной структурой и архитектурой, в разработке которых приняли участие ученые Института кибернетики им. В. М. Глушкова АН Украины (А. В. Палагин и др.), следует особо выделить однокристальную микро-ЭВМ С5-31, оригинальность которой была отмечена американскими специалистами. Работы по совершенствованию микроэлектронной технологии и созданию новых образцов микропроцессорной вычислительной техники продолжаются и по сей день в АО «Светлана» – «Микроэлектроника» (так сейчас называется бывшее КБ-2). Ведущую роль в этих работах играют ученики Староса Е. И. Жуков – ныне главный инженер предприятия, В. Я. Кузнецов, В. Е. Панкин, Ю. П. Шендерович. Они были активными участниками всех основных разработок начиная с УМ1-НХ.

Самым важным и одновременно самым опасным шагом, предпринятым Старосом, была разработка проекта создания Центра микроэлектроники в Зеленограде, который ныне является частью Москвы, своеобразной «кремниевой долиной» под Москвой. Создание Научного центра и мощный импульс в развитии микроэлектроники, последовавший за его появлением в 70–80-е гг., по-видимому, являются самым выдающимся вкладом Староса и Берга в микроэлектронику и вычислительную технику в СССР. Центр микроэлектроники должен был включать 6–7 исследовательских институтов, конструкторских бюро, учебный институт, известный ныне как Институт электронной техники, завод. Работа этого Центра должна была координироваться генеральным директором. Старос был назначен помощником генерального директора по науке, одновременно сохра-

няя должность главного конструктора своего бюро в Ленинграде. Эта-то ситуация и привела к неприятностям для Староса. С одной стороны, он должен был оставаться в Ленинграде, чтобы бороться с критикой местной партийной бюрократии, направленной против его конструкторского бюро. С другой стороны, Центр в Зеленограде начал развиваться так успешно, что советские коллеги Староса решили, что они и сами, без него могут справиться с разработкой Центра. К лету 1964 г. Старос обнаружил, что находится под двойной атакой. Секретари Ленинградского обкома были очень недовольны тем, что директор важной исследовательской организации, работающей для военных, является практически иностранцем. Они, в особенности секретарь Ленинградского обкома Григорий Романов, возражали против кадровой политики Староса, который набирал на работу специалистов в основном только в соответствии с уровнем их знаний. Результатом его кадровой политики явилось возникновение политически «ненадежной» группы очень сильных профессионалов внутри коллектива советских военных разработчиков. Среди этих профессионалов было много евреев и беспартийных. Чувствуя неблагоприятную обстановку в Ленинграде, Старос в то же время не мог не осознать, что шансы на переход в Зеленоград становятся очень малыми.

Как и в 1950 г., Старос решил разрубить гордиев узел своей судьбы одним смелым ударом. Он написал личное письмо Хрущеву, излагая свои проблемы и жалуясь на «отсутствие поддержки от министра электронной промышленности т. Шокина». Письмо было получено концелярией Хрущева в начале октября 1964 г. К несчастью Староса, Хрущев через несколько дней был вынужден уйти в отставку, и письмо Староса попало в руки министра электронной промышленности. Его реакция была вполне предсказуемой. Есть информация, что во время беседы со Старосом Шокин сказал следующее: «Филипп Георгиевич, мне кажется, что у вас возникла странная фантазия, будто вы являетесь создателем советской микроэлектроники. Это неправильно. Создателем советской микроэлектроники является Коммунистическая партия, и чем скорее вы осознаете этот факт, тем лучше будет для вас».

Это означало, что Старос больше не мог играть независимой роли в Центре микроэлектроники в Зеленограде, который он создал. Он был снят с поста заместителя директора Центра в 1965 г.

Несмотря на то, что в 1967 г. Ф. Г. Старос защитил докторскую диссертацию, в 1973 г. его конструкторское бюро было включено в объединение «Светлана» и последние годы своей жизни он провел во Владивостоке в Институте вычислительных машин Дальневосточного центра АН СССР, где возглавил исследования по созданию искусственного интеллекта на базе новой микроэлектронной технологии. (Во Владивосток его пригласил А. П. Капица по рекомендации своего отца.) Ф. Г. Старос был интереснейшим и разносторонним человеком. Он имел не только более 200 патентов на самые разные изобретения, но и замечательную коллекцию поп-, рок-музыки и классики. Играя на гитаре, банджо и флейте. Был яхтсменом и поэтом. Он создал не только лабораторию в ДВНЦ и кафедру на физическом факультете ДВГУ, но и музыкальный и английский клубы на филологическом факультете.

Несмотря на то, что он был членом Президиума ДВНЦ, на выборах в академию наук его проваливали раза четыре, а последний раз голосование так и не состоялось – Филипп Старос умер в Москве в 1979 г., за несколько часов до начала очередного заседания АН СССР. На его похоронах в Москве присутствовали практически все, кто стоял у истоков создания советской микроэлектроники и микроэлектронной вычислительной техники. Ф. Г. Старос был выдающимся инженером, ученым, организатором научных коллективов, его деятельность явилась незабываемой особой страницей в истории развития электроники и вычислительной техники в СССР. На надгробной плите стоит Alfred Sarant и ниже Филипп Георгиевич Старос.

#### **4.4. Отечественный атомный проект**

Разработки ядерного и термоядерного оружия в нашей стране способствовали также быстрому развитию вычислительной математики и вычислительной техники. В реализацию отечественного атомного проекта большой вклад внесли выдающиеся математики академики АН СССР М. В. Келдыш, С. Л. Соболев, А. А. Дородницын, М. А. Лаврентьев. В связи с этим следует привести высказывание заместителя научного руководителя Всероссийского научно-исследовательского института экспериментальной физики (ВНИИЭФ) и руководителя математического отделения профессора Ивана Денисовича Соф-

ронова: «Математические расчеты при создании атомного оружия играют особую роль. Ну, а главная наша гордость – то, что все ядерное оружие, которое стоит на боевом дежурстве, было рассчитано нашими математиками, по нашим методикам, по нашим программам с использованием только отечественной вычислительной техники. Надо сказать, что наше отставание от американцев по производительности вычислительных машин было на два порядка или больше. Тем не менее, паритет в оружии был достигнут. И заслуга в том наших математиков, наших физиков-теоретиков и конструкторов.

Как ни парадоксально это звучит, но наше отставание в вычислительной технике оказало большое влияние на интенсивность математических разработок, на эффективность создаваемых математических методов. Именно оно заставляло нас изобретать экономичные алгоритмы решения задач, разрабатывать более совершенную технологию расчетов, наконец, привлекать к работе большие, чем в США, математические коллективы. Смею заверить, что сегодня у нас нет конкурентов в решении столь сложных прикладных задач. Мы располагаем самым большим пакетом программ и методик для решения, в том числе и трехмерных задач математической физики, механики сплошной среды, нейтронной физики и др. У нас самый большой математический коллектив в стране. И мы неплохо вооружены, мощность нашего машинного парка мало кому в России уступит.

В свое время мы выдержали конкуренцию с американцами в создании атомного оружия. И это оружие до сих пор является нашим щитом, который на полвека предотвратил всякое пополнование воевать с нами. Конечно, это не только наша заслуга, но и физиков-теоретиков, которые считаются у нас авторами зарядов, физиков-экспериментаторов, конструкторов и др. Ядерное оружие, однако, требует к себе пристального внимания, его надо правильно хранить, оно должно быть безопасным и готовым к применению, его надо совершенствовать, что нельзя делать без испытаний, которые в настоящее время запрещены. Где же выход? В математических расчетах.

Совсем недавно это считалось невозможным. Но уже в прошлом году президент США Клинтон собрал своих генералов и разработчиков ядерного оружия и объявил, что у них создана виртуальная ядерная бомба. То есть американцы заявили, что они умеют делать оружие без испытаний. Для этого пять лет

назад была придумана инициатива СКИ и появились терафлопные машины. Американцы уже готовы делать, может быть, не очень современные, но заряды без испытаний. Пока, правда, ни одного подобного заряда на вооружение не поступило. Но, тем не менее, они к этому упорно идут. Я думаю, что максимум лет через пять они объявят, что могут это делать, и начнут ставить на вооружение вполне современные заряды без испытаний. Думаю, что мы пойдем тем же путем. Для этого нам необходимо создать супер-ЭВМ. Сейчас в нашей стране есть две законченные разработки – машина МВС, созданная НИИ «Квант» и Институтом прикладной математики РАН, и наша машина МП-Х-У. Они отличаются по архитектуре, составу элементной базы и программному обеспечению. Мы начинали разрабатывать машину вместе с ИПМ РАН, но у нас оказались разные точки зрения, и каждый стал делать свою систему.

Недавно мы лишний раз убедились, что их подход к проектированию ЭВМ, предназначенных для решения наших задач, не годится. Дважды пытались мы считать свои задачи на машинах, разработанных конкурентами, и оба раза чуда не произошло – эффективность их машин для наших нужд оказалась неприемлемо низкой. Поэтому считать задачи второго ядерного века мы на них не стали. Сам факт, что изначально мы должны были отвечать за свои расчеты и просчитывать тысячи вариантов изделия, вынудил нас работать ответственно и большими коллективами. Задача в 1000 час. машинного времени для нас ничего рекордного даже 20 или 30 лет назад не представляла. Были задачи и в 10 000 час. непрерывной работы машины. И это с учетом того, что бесшбйность работы отечественной вычислительной техники оценивалась по ТУ не более чем 10 часов. Насущной необходимостью при этом оказалось распараллеливание счета задач, то есть решение одной задачи сразу на нескольких машинах. В 1993–1994 гг. во ВНИИЭФ создана мультипроцессорная система с производительностью 1 гигафлоп, в которой используются специально разработанные и изготовленные на отечественной элементной базе коммутаторы с пропускной способностью 90 Мб в секунду. На этих экземплярах мультипроцессоров нами разработаны параллельные программы решения ряда производственных задач – трехмерные задачи адиабатической газовой динамики, газовой динамики с учетом теплопроводности, трехмерные задачи переноса нейtronов в кинематиче-

ском приближении, двухмерные задачи газовой динамики с учетом теплопроводности на нерегулярной сетке и т. д.

Один образец нашей машины был куплен Ливерморской национальной лабораторией США для отладки тех программ, которые мы разрабатываем по ее заказу. Сейчас ведутся интенсивные работы по созданию следующей мультипроцессорной системы с производительностью 120–240 гигафлоп, с последующим наращиванием ее до мощности в 1 терафлоп. Будучи базовой моделью в ряду МП-Х, этот мультипроцессор позволит создать в будущем году аналог современных супер-ЭВМ США типа ASCI RED и Origin 2000. Сейчас они аналогов в России не имеют».

Из воспоминаний Александра Андреевича Самарского (1919–2008) академика, лауреата Ленинской и Государственных премий, Героя социалистического труда: «В 1953 г. был создан Институт прикладной математики, и там наша лаборатория стала отделом.

– *Директором был Мстислав Всеволодович Келдыш, его заместителем – Тихонов, а я – начальником отдела. Наш отдел был самым крупным в институте. Чуть позже появился отдел, который возглавил Охоцимский. Это уже космос...»*



Институт прикладной математики им. М. В. Келдыша (ИПМ РАН) был образован в 1953 г. для решения сложных математических проблем, связанных с государственными программами исследования космического пространства, развития атомной и термоядерной энергетики, на основе создания и широкого использования вычислительной техники и программного обеспечения. Его организатором и директором (1953–1978 гг.) был президент Академии наук СССР Мстислав Всеволодович Келдыш.

С первых же лет деятельность Института, ориентированная на решение крупных прикладных задач, базируется на фундаментальных научных исследованиях в области математики, механики, кибернетики, информатики, которые ведутся его сотрудниками. В ИПМ работают 4 академика, 5 членов-корреспондентов Российской академии наук, 74 доктора и 224 кандидата наук. Среди них 14 лауреатов Ленинской премии, 30 лауреатов Государственной премии, 5 лауреатов премии Совета Министров СССР.

Организованный в Институте Баллистический центр, начиная с запуска первого искусственного спутника Земли, успешно решает проблемы баллистико-навигационного обеспечения полетов пилотируемых кораблей, долговременных орбитальных станций «Салют» и

«Мир», многоразовой космической системы «Энергия-Буран», автоматических аппаратов научного назначения «Луна», «Венера», «Марс» и др., участвует в разработке и реализации международных космических проектов. Мировое признание получили работы по алгоритмическому и программному обеспечению для транспортных средств нового типа – шагающих роботов, автоматизации ручных операций при сборке изделий машиностроения с помощью адаптивных роботов.

В Институте были проведены расчеты уникальных по сложности и объему задач газодинамики взрыва, защиты от проникающих излучений, сверхзвукового обтекания летательных аппаратов, детальный нейтронно-физический расчет ядерного реактора. В начале 60-х гг., задолго до подобных расчетов в США, были проведены численные эксперименты на ЭВМ, открывшие новую область прикладной математики – вычислительную электродинамику.

Институт является родоначальником использования электронно-вычислительной техники в Советском Союзе. В нем была установлена первая серийная отечественная ЭВМ и организовано первое в стране структурное подразделение, выполнившее пионерские работы по созданию программного обеспечения. В 1963 г. был реализован транслятор Алгол-60 – один из первых в мире трансляторов с полной версии языка, система ИС-2 – первая мини-ОС. Линия разработки системного обеспечения ЭВМ в дальнейшем получила развитие в полномасштабных операционных системах ДИСПАК и ОС ИПМ, оптимизирующем компиляторе с языка Фортран, комплексе программ ГРАФОР для графического вывода информации, в работах по архитектуре и программному обеспечению супер-ЭВМ, многомашинных комплексов и сетей. Важное место в деятельности Института занимают работы по системному обеспечению прикладных задач: система программирования и отладки аппаратуры многоразового корабля «Буран», система управления объектами в реальном времени, информационно-поисковые системы для различных областей, системы автоматизации проектирования и производства (CAD/CAM), инструментальные системы построения пакетов прикладных программ.

Много внимания уделяется в Институте подготовке квалифицированных научных кадров. Институт является базовой организацией для таких вузов, как МГУ, МИФИ и МАИ. Здесь работает кафедра прикладной математики МФТИ.

Институт прикладной математики им. М. В. Келдыша определен головной организацией по ряду ведущих направлений прикладной математики. Работы Института получили широкое признание в нашей стране и за рубежом. От него в разное время отпочковались и стали ведущими по своим направлениям такие организации Российской академии наук, как Вычислительный центр, Институт космических исследований, Институт математического моделирования.

Сейчас Институт возглавляет член-корреспондент РАН Попов Ю. П.

10 июня 1948 г. за подписью И. В. Сталина с грифом «совершенно секретно (Особая папка)» выходит Постановление Совета Министров СССР № 1990–774 с/оп «О дополнительных заданиях по плану специальных научно-исследовательских работ на 1948 год», в котором в 9-м пункте говорится о предоставлении «в первоочередном порядке» некоторым ученым квартир и комнат. В то время кандидат геофизических наук А. А. Самарский и кандидат физико-математических наук А. Д. Сахаров могли претендовать только на комнаты, которые они и получили. Но самое главное: именно этим постановлением они вошли в чрезвычайно узкий круг людей, которым поручалось произвести расчеты ПО конструкций РДС–1, РДС–2, РДС–3, РДС–4, РДС–5 с различными вариантами уравнения состояния. (Аббревиатура РДС скрывала атомную бомбу, а ПО – ее центральную часть из плутония-239).

О том времени академик Александр Андреевич Самарский в беседе с известным журналистом и историком ядерной и ракетно-космической отраслей В. С. Губаревым [39] вспоминает с грустью, мол, годы были молодые, радостные, хотя жизнь складывалась драматически, а подчас даже трагически:

– По линии Академии наук нашей лаборатории как бы не существовало, да и в атомное наше министерство мы официально не входили – засекречены мы были очень сильно! – но тем не менее нельзя забывать о тех людях, которые сделали первые расчеты атомной бомбы...

– *Есть классический вопрос журналиста: кто вы? Подразумевается, что вы должны представиться: откуда родом, где и когда родились, как начинали свою трудовую биографию?*

– Родился в деревне, учился в Донецке, закончил школу в Таганроге. Кстати, школу им. Чехова. Вполне понятно, что именно в этой школе была большая тяга к литературе практически у всех учеников. У меня хорошо шла математика и физика, но чеховская традиция сказывалась: я решил поступать в литературный институт, тем более что уже писал пьесы... Однако мои учителя по физике и математике «восстали» – они потребовали, чтобы я поступал на физический факультет МГУ. Ослушаться своих учителей я не мог, а потому последовал их совету.

Мне было 18 лет, и казалось, что все в жизни определилось... Но пришла война, и 6 июля 1941 г. я подал заявление в дивизию народного ополчения...

– *Но вы же были студентом?!*

– Да, я мог получить броню, но для нашего поколения главным было Отечество, его защита.

– *И где воевали?*

– Сначала там, где полегло практически все московское ополчение, – на реке Угра. Ну а потом началось наступление. 12 декабря в разведке я попал на мину. Из меня вытащили более тридцати осколков – было множество операций. Однако восемь осколков так и осталось во мне, достать их хирурги не смогли. В сентябре 42-го г. я выписался из госпиталя. Вышел оттуда на костылях... Это было в Хакасии. Родные у меня остались в Таганроге, а он был оккупирован немцами. Университет из Москвы был эвакуирован и находился, кажется, в Ашхабаде. Что же мне делать? И меня направили учителем в школу на золотой прииск „Коммунар“. Преподавал математику... Там я проработал больше года.

– *Наверное, думали, что останетесь в Сибири навсегда?*

– Так и могло случиться, но у меня в Москве был друг, с которым я переписывался. Он учился в Военной академии, но все-таки съездил в университет и добился-таки, чтобы меня вызвали на учебу. И уже в декабре 43-го я вернулся в Москву. Мой учитель член-корреспондент Тихонов...

– *Будущий знаменитый математик – академик Тихонов?*

– Да, да, именно он!.. Я посещал много семинаров, и так как очень сильно „изголодался“ по науке, то был активен и любознательен, а потому многие профессора предлагали мне заниматься у них. Но выбор, к счастью, пал на Андрея Николаевича Тихонова. Он был молод, азартен и необычайно талантлив. В 16 лет экстерном закончил школу, поступил в университет, очень быстро добился успеха – теорема его имени вошла в мировую науку, он решил ряд интересных задач. Потом стал работать в Геофизическом институте, потому что его привлекали прикладные задачи... Ну а я лишь искал свой путь. У меня была даже опубликована одна работа по теоретической физике... Андрей Николаевич вдруг решил, что мне следует попробовать и в экспериментальной физике. Слово учителя – закон! Я на своих костылях ковылял по лаборатории и сразу же возненавидел этот

раздел физики. Вернулся к теоретическим работам. На защите диплома мои оппоненты предлагали сразу дать мне кандидатскую степень – работа действительно получилась хорошей...

– *Она была по физике или математике?*

– По математике, но с физическим содержанием... Я уточняю это, потому что именно сочетание физики и математики во многом определило мою будущую судьбу в науке... Кстати, именно Тихонов возразил против того, чтобы мне дали кандидатскую степень!

– *Почему? Ведь ему как учителю это было лестно, не правда ли?*

– Он сказал так: „*Если мы дадим ему степень, то как ино-городний он обязан будет уехать из Москвы. А аспирантура даст ему возможность еще три года быть в университете!*“ Это было мудрое решение, потому что, когда я заканчивал аспирантуру, у меня уже было около двадцати опубликованных работ. Я пробовал себя в разных областях, в том числе в применении численных задач в химической физике.

– *Для нормальных людей – это область терра инкогнита...*

– А может быть, наоборот?!

– *В таком случае уточню: для подавляющего большинства людей...*

– С этим уже можно согласиться... А просто это можно объяснить так: есть модели разного уровня или, как мы говорим, „разного ранга“. Математики исследуют принципиальные проблемы... Поначалу было иначе – от нас требовался ответ на конкретный вопрос, но из частных задач ничего принципиально нового не получишь, а потому меня, конечно же, интересовали глобальные проблемы. Просто это интересно!

Нельзя полагаться, что наука будет развиваться стихийно, удовлетворяя свои внутренние потребности саморазвития и самоорганизации. Наука должна выполнять неотложный социальный заказ, содействуя научно-техническому прогрессу не в отдаленном будущем, а уже сегодня. Нельзя пользоваться такой моделью (имеющей немалое число сторонников): сначала проводить фундаментальные исследования, а затем искать, где их можно использовать. Необходимо найти пути развития науки в заданном направлении, связанном с решением определенных крупных проблем. По-видимому, для этого могут быть применены методы управления ресурсами (материальными и людскими

ми). Важно помнить, что все проблемы нужно решать быстро и на высоком научном уровне. Требуемый уровень прикладных работ возможен только на основе фундаментальных исследований, которые носят ориентированный характер. В связи с развитием и применением вычислительной техники особая ответственность ложится на математику. Современная прикладная математика должна, выполняя социальный заказ, решать то что нужно и как нужно.

– *Как идет поиск глобальных задач?*

– Пути разные. К примеру, я перелистывал однажды старые журналы по физике и нашел там статью молодых Ландау и Иваненко, в ней говорилось о структуре атома, о некоторых особенностях процессов, которые шли в нем... В общем, мне удалось доказать, что их выводы ошибочны.

– *Это вызвало сенсацию?*

– Эта работа стала моей кандидатской диссертацией. Кстати, она была весьма невелика: двадцать страниц введения и двадцать страниц текста. Оппонентом на защите у меня был академик Петровский, он написал блестящий отзыв.

– *После защиты и окончания аспирантуры вы должны были уехать из Москвы?*

– Так и случилось бы, но в это время вышло секретное постановление ЦК партии о создании математической лаборатории для решения задач, связанных с созданием атомной бомбы. Было некое совещание на высшем уровне, где Тихонов предложил провести расчеты атомной бомбы... Кстати, на этом совещании присутствовал и Ландау, который заявил, что „*если подобное можно сделать, то это будет научный подвиг!*“ Тем не менее предложение Тихонова было принято, и появилась крошечная лаборатория, в которой было всего несколько человек – математиков. И набрали около тридцати девушек-вычислителей, которые закончили геодезический институт.

– *Вместо вычислительных машин?*

– Да... И перед нами поставили задачу: создать „числовую модель атомной бомбы“.

– *И именно тогда Спецкомитет выделил вам и кандидату наук Сахарову по комнате?*

– Именно так, потому что мне негде было жить... Однако выполнено постановление было только в конце 50-го г. Так как я был холостой, то не очень законно продолжал жить в общежи-

тии университета, а потом уже начал снимать жилье... Впрочем, основное время проводили на работе – ведь срок для работы нам был отведен очень маленький: всего около года! А ведь это задача была высшей категории сложности, да и к тому же у физиков были весьма неточные данные... Их модели были очень грубые, приближенные... С ними они и оперировали... А мы с Андреем Николаевичем Тихоновым договорились, что я буду заниматься точными моделями.

– *Судя по всему, вы одновременно пришли к финишу?*

– Да, к моменту первого испытания нашей бомбы первые результаты у нас уже были... Расхождения составляли всего 30 процентов...

– *Всего?!*

– Это великолепный результат! Не знаю, как сейчас, но у американцев раньше ни разу расхождений менее 30 процентов не было. Таким образом, наши расчеты оказались весьма точными... В дальнейшем мы свели цифру расхождений до десяти процентов...

– *Как же вам это удалось? Думаю, вычислительная техника у американцев была всегда лучше!*

– Исходные данные у нас были взяты правильно. Мы старались сохранить правильное математическое описание физического процесса, и в этом, убежден, помогло то, что поначалу у меня было физическое образование.

– *Значит, на первом месте все-таки математика?*

– И именно это определило наш успех. А в Лос-Аламосе расчеты вели физики. Это принципиальное различие. Но как решать полученные уравнения? Я горжусь тем, что придумал “распараллеливание вычислений”. В моем подчинении было тридцать девушки. Уравнений было несколько сотен. Получалось приблизительно по десять уравнений на каждую девушку. Они считали как будто независимо, но передавали свои данные друг другу... Я, конечно, несколько упрощаю, но идея метода, мне кажется, ясна... «распараллеливание вычислений» дало возможность провести нам расчеты за два месяца, примерно раз в пятнадцать мы ускорили процесс работы... Это я считаю самым крупным достижением в первый год работы над атомной бомбой.

Использование благ математического моделирования и основанных на нем средств информатики в технологических приложениях требует серьезных интеллектуальных и организаци-

онных усилий. Симптомы нашего отставания и в этой области от развитых стран, пожалуй, более тревожны, чем в фундаментальных науках. На Западе наметился переход к массовому внедрению математического моделирования и вычислительного эксперимента в технологию. Типичными становятся закупки автомобильными концернами супер-ЭВМ для расчета полных конструкций автомобилей, в частности при аварийных ситуациях. Это оказывается очень выгодным делом, поскольку в “авариях” участвуют математические модели, а не дорогостоящие машины. Фирмы, не располагающие соответствующими расчетными методиками, становятся неконкурентоспособными... Создан европейский консорциум “Математика в промышленности”. Его цели – эффективное использование методов математического моделирования в промышленности и разработка соответствующего каталога задач. На этом фоне почти не используется накопленный нашими специалистами уникальный опыт математического моделирования некоторых технологий микроэлектроники, приборостроения, лазерной и термической обработки материалов.

– *А жена не из девушек-вычислителей?*

– Нет, она медик. Кстати, узбечка. Ее отец был академиком-механиком, он в свое время заканчивал МГУ. А дед – революционер... Почему вы об этом спросили?

– *Я знаю одного академика-атомщика. Он теоретик, а жена занималась как раз вычислениями...*

– Вы имеете в виду академика Аврорина?

– *Точно!*

– Все, кто начинал работать над бомбой, были молоды, а потому таких «атомных семей» много. То время, конечно же, вспоминается с добрыми чувствами, хотя было очень трудно, так как на первом этапе работали с примитивной вычислительной техникой... Но было очень интересно, это была творческая работа. Численные методы быстро совершенствовались: буквально через два года я предложил более точную математическую модель... До 1953 г. мы пользовались ручной техникой, и довольно далеко продвинулись в этой области... Я сразу же понял, что надо заниматься теорией численных методов, и это было правильным, так как удалось продвинуть специальные методы расчетов. Кстати, американцы отстали в этой области – они надеялись на технику и просчитались.

– Они это признавали: позже подтвердили, что, несмотря на сильное отставание в вычислительных машинах, мы не уступили им в главном: в расчетах сложнейших физических процессов, которые происходят при взрывах атомных и термоядерных бомб... Вы назвали дату: 1953 год. Неужели после этого вы не занимались оружием?

– Я им занимаюсь всю жизнь...

– Известно участие Келдыша в Атомном проекте.... Оношло через ваш отдел?

– Да... Появление ЭВМ в 1953–1954 гг. открыло новые возможности для проведения вычислительных экспериментов. На наших довольно слабых компьютерах мы смогли решать все необходимые для обороны задачи – ведь у нас были разработаны эффективные численные методы и оптимизирована триада “модель – алгоритм – программа”.

– Звучит необычно и красиво!

– А это было одно из достижений, которым я горжусь. Если обратиться к той же бомбе, то схема выглядела приблизительно так. Было некоторое разделение между расчетными группами. Сначала проводился обсчет процесса сжатия – это своеобразная подготовка в взрыву, а затем эти данные и расчеты поступали в наш отдел, где и обсчитывались все процессы, связанные с взрывом... Любопытно, что задание писалось прямо у меня в кабинете. К примеру, приезжал Сахаров и тут же на моем столе давал нам задания... Кстати, я передал недавно в Саров, то есть в Арзамас-16, мою тетрадь, в которой Сахаров, Зельдович и Ба-баев вели записи.

– Вы имеете в виду расчет термоядерной бомбы?

– Еще до появления машин у нас было огромное количество вычислений – ведь к этому времени мы уже шесть лет вели расчеты.

– И у вас не было конкурентов?

– В разное время, на том или ином этапе они появлялись, но неизбежно наши конкуренты проигрывали... В конце концов Келдыш полагался только на нас и, насколько мне известно, к другим группам математиков не обращался.

– У вас была информация от американцев?

– Я даже не знал о существовании шпионов в этой облас-ти!.. Ни разу и ни от кого – а я на первом этапе много общался с Таммом, Сахаровым и Зельдовичем – не получал ни единой ин-формации, ни единой цифры или идеи! Подчеркиваю – ни разу!

И сразу же добавляю: к счастью, потому что это позволило идти своим путем и в конце концов опередить американцев. Так что заимствование могло быть только в другую сторону: от нас к американцам.

– *И как долго вы работали на Атомный проект?*

– Очень активно – где-то до 80-го г. Потом сотрудничали лишь эпизодически, когда возникала необходимость... По сути дела, к тому времени все принципиальные проблемы были решены.

– *Вы сказали: „Проблемы были решены“... Именно это и определило то, что крупные ученые – Сахаров и Зельдович – уехали из Арзамаса-16. Кстати, ваше впечатление о них?*

– Сахаров, бесспорно, выдающийся человек, лишенный каких-то комплексов. Он сочетал в себе талант прозорливого физика и математика. Но ему приписали определение „отец водородной бомбы“, и это неверно, так как это обидело многих физиков, которые работали с Сахаровым. Да и не нужно это было делать, потому что Сахаров не нуждался в возвеличивании – сам по себе он был выдающийся ученый и человек.

– *А Зельдович?*

– Он уникален по-своему... Реактивный тип – готов был наброситься на любую проблему, но ему не хватало общематематической культуры. Он схватывал идеи быстро, но разбросанность в его характере все-таки была... И в то же время общаться с ним было легче, чем с Сахаровым... Кстати, он был у меня оппонентом при защите диссертации, дал на нее хороший отзыв. Но почему-то он считал, что я должен больше заниматься физикой, чем математикой. А это абсолютно неверно!.. Любопытный он был человек, но слабинки все же были – мог стать бесстыдным, обижал людей. Мне он напоминал капризное дитя.

– *А Келдыш?*

– В нем был аристократизм... Что к этому добавить? В Атомном проекте я забыл упомянуть Юрия Романова. Прекрасный ученый! Он холодноват, но не в науке. И бесспорно, давно уже заслужил право быть членом академии, а его даже в члены-корреспонденты не избрали. Это несправедливо! К сожалению, ко многим это относится. К тому же Феоктистову, Щелкину...

– *Докторская диссертация была такая же краткая, как и кандидатская?*

– Что вы?! Там уже было 800 страниц текста!.. Имейте в виду, что созданные нами методы, алгоритмы и комплексы программ позволили перейти к применению циклов исследований методами вычислительного эксперимента многих актуальных задач ядерной физики, физики плазмы и управляемого термоядерного синтеза, автокаталитических процессов в химии, задач лазерной термохимии и конвенции.

– Я хочу задать вам более общий вопрос: что вы считаете самым важным в науке во второй половине XX века?

– Вы надеетесь, что я назову атомную проблему?

– Честно говоря, да.

– И это действительно так!.. Чтобы там ни говорили, но мы спасли человечество от термоядерной войны. Достоверно известно, что американцы разработали десять сценариев нападения на СССР, и могла случиться трагедия, которая поставила бы критическую точку в истории цивилизации. Нам, именно нам удалось предотвратить катастрофу, и сознание этого придавало нам колоссальный импульс. Я – фронтовик, и пережил войну, а потому знаю ей цену. И мы работали над предотвращением новой войны с полной отдачей, самоотверженно, бескорыстно.

– А потому было обидно, что забыли о вас во время торжеств, посвященных 50-летию создания советской атомной бомбы?

– Дело не в забывчивости. Когда-то меня избрали в члены-корреспонденты АН СССР всего за несколько любительских работ, о главных тогда не говорили – все было совершенно секретно. А ведь в общей сложности их набралось около 500! Уже это говорит о масштабах участия нашей лаборатории в Атомном проекте. Второе, чем я горжусь: я – своеобразный чемпион по числу книг в области вычислительной математики. Эти книги стали результатом разработок крупных задач, как по атомной тематике, так и по лазерному управляемому синтезу. И как результат всего – создание теории численных методов.

Историческая задача преобразования российского общества оказалась значительно более трудной, чем это представлялось перед началом реальных реформ, вскрывших истинный масштаб проблем, их сложность и неповторимость, сопровождающиеся острым недостатком ресурсов и дефицитом времени. Цена ошибок и некомпетентности становится столь высокой, что может поставить под сомнение конечный успех не только отдельных

направлений, но и судьбу реформы в целом. Жизненно важно мобилизовать и привести в действие все имеющиеся в стране интеллектуальные резервы в сфере методологии анализа, прогноза и принятия решений по важнейшим вопросам общества. Наиболее доступным и эффективным резервом является методология, основанная на методах математического моделирования. Именно она необходима при формировании национальной научно-технической и социальной политики.

– *Мы сохраним лидерство?*

– На этот вопрос трудно отвечать... Я не очень хорошо знаю, что происходит в Китае. Такое впечатление, что они застались перед прыжком.

– *У вас есть основания так думать?*

– Я сужу по тому, что они переводят. Очень квалифицированно отбирают нужную литературу, внимательно следят за тем, что происходит в мировой науке. Мне кажется, что в XXI в. именно им суждено стать лидерами

– **И еще некоторые размышления о науке.** Мир нелинейен, то есть основные законы развития неживой и живой природы (от микро- до макромира), в том числе социальных и экономических структур, являются нелинейными. Это означает, в частности, что возможно несколько путей эволюции сложного объекта, то есть будущее неоднозначно определяется настоящим (начальными условиями) и его нельзя предсказать, опираясь только на предшествующий опыт. Оптимальный путь эволюции надо выбирать, опираясь на знание законов его развития, его нужно вычислять и управлять. Это задача сложная и трудная, однако жизнь требует ее решения.

Компьютеризация образования сама по себе не может решить проблему кадров. Ее смысл в другом – создать образовательный фон и психологические предпосылки для достаточно широкого выпуска среднеквалифицированных специалистов (пользователей новой методологии). Для подготовки же высококвалифицированных разработчиков требуются интенсивные и концентрированные мероприятия. Одно из них – создание в крупнейших вузах центров по математическому моделированию. Этот шаг весьма перспективен и отвечает природе высшей школы. Многоцелевой характер математического моделирования позволит объединить усилия ученых разных специальностей, работающих в вузах, поможет синтезу научного и учебно-

го процессов без распыления средств по факультетам и кафедрам. Без привлечения крупных капиталовложений будет достигнут значительный рост доли исследовательских работ в вузах.

#### **4.5. Создание системы противоракетной обороны и суперЭВМ**

Существенно большее значение по сравнению с атомным проектом вычислительная техника имела для решения проблемы противоракетной обороны. Из воспоминаний академика РАН В. С. Бурцева: «В один прекрасный день меня вызвали в кабинет директора, академика Сергея Алексеевича Лебедева. В кабинете сидел моложавый мужчина средних лет в погонах полковника. Шла непринужденная беседа о возможности построения ПРО. Видно было, что Григорий Васильевич Кисунько (полковник) отвечает на вопросы С. А. Лебедева с большим удовольствием, так как вопросы были не праздные, и собеседники быстро стали единомышленниками. Надо сказать несколько слов о предыстории. Дело в том, что Сергей Алексеевич как бы предвидел эту проблему, и мы уже более трех лет вели работы по съему данных с радиолокатора в цифровом виде. Работы велись в интересах противосамолетной обороны и в нашей лаборатории к этому времени была создана специальная ЭВМ Диана-1, на которой мы провели натурные испытания в Кратово, в которых показали возможность одновременного сопровождения нескольких целей с помощью вычисления траектории в цифровом виде.

Беседа Сергея Алексеевича с Григорием Васильевичем закончилась обоюдным согласием в том, что решить поставленную проблему можно только с помощью цифровых вычислительных систем. Наиболее узкими местами являются точностные характеристики системы (наведение противоракеты с точностью не менее 25 м) и временная синхронизация данных системы, в особенности, выдача сигнала подрыва противоракеты с точностью до микросекунд. Не ясно было также воздействие осколочного заряда в безвоздушном пространстве. Г. В. Кисунько рассказал свои идеи решения этих проблем – метод определения координат головок баллистический ракеты дальнего действия (БРДД) и противоракеты по трем дальностям, измеренным

разнесенным в пространстве радиолокаторам точного наведения (РТН) и возможность привязки всей системы к единому времененному масштабу.

Мне разговор очень понравился (я только слушал) потому, что он был очень содержательным, велся на профессиональном уровне и, самое главное, наверное, потому, что было ясно – без вычислительной техники и нашей последней работы по съему данных с РЛС решить эту задачу невозможно.

После встречи Сергея Алексеевича с Григорием Васильевичем реакция была молниеносной. На следующий день к нам в лабораторию прислали группу специалистов высшего класса с целью изучения работ по съему данных с РЛС и принципам работы вычислительной техники. Освоение этих вопросов было столь эффективным и быстрым, что уже через месяц КБ-1 (отдел Г. В. Кисунько) приступил к разработке цифровых радиолокаторов слежения за целью практически без нашей помощи и консультации. Должен отметить, что раньше, чем Григорий Васильевич с нашими работами познакомился, сам академик А. Л. Минц. Результат был несколько иной. А. Л. Минц прислал одного человека для изучения проблемы, который прежде всего написал диссертационную работу по селекции сигнала РЛС и его оцифровки. В это время мы заканчивали в Курске систему наведения истребителей на цели с помощью ЭВМ «Диана-1» и «Диана-2». Несмотря на то, что испытания прошли положительно, эти идеи использования дискретной вычислительной техники в контуре наведения были реализованы много лет спустя. Лет 20–30 еще выпускались вычислительные системы непрерывного действия на коноидах и сельсинах.

Часто мне и другим специалистам задают вопрос: «Надо ли было проводить работы такого масштаба по ПРО?»

Необходимо отметить, что среди научно-технической общественности не было единого мнения о необходимости проведения работ по столь дорогостоящей проблеме. Если бы, наверное, не инициатива Дмитрия Федоровича Устинова эта работа не состоялась бы, так как много уважаемых конструкторов военных систем были против нее.

Выскажу свое мнение по этому вопросу, рассматривая два различных аспекта значения этой работы: политический и научно-технический.

Думаю, что некоторое политическое значение эта работа имела, так как после успешного ее испытания Хрущев Н. С. в своих выступлениях занял более жесткую позицию в международной политике.

В то же время, если бы у нас не было многолетнего провала в работах по этому направлению в связи с уходом Г. В. Кисунько и соответствующей переориентацией в построении подмосковной системы, наш потенциальный противник не имел бы тех политических преимуществ, которые он имеет сегодня, говоря о космических войнах.

Остановлюсь более подробно на научно-техническом значении проблемы ПРО в развитии вычислительной техники. Создание экспериментального комплекса ПРО потребовало от вычислительных средств не только повышенного быстродействия, но и возможности работы в системе реального времени в комплексе вычислительных средств, разнесенных на большие расстояния (создание вычислительных сетей), построения мощных вычислительных комплексов обработки эксперимента, вычислительных комплексов крупных систем управления и информационных вычислительных центров, таких как центр контроля космического пространства и др.

Рассмотрим некоторые из выше перечисленных комплексов. Так для решения проблемы уничтожения БРДЦ, поставленной перед нами Григорием Васильевичем, как уже говорилось, потребовалось создать высокопроизводительную вычислительную сеть, в которой производительность центральной ЭВМ достигла бы 40 тыс. оп/с (в то время к этому пределу только приближались зарубежные ЭВМ).

Создание этой машины под названием М-40 было закончено в 1958 г. Для достижения столь высокой производительности были существенно пересмотрены принципы организации системы управления ЭВМ.

Каждое устройство машины: управление командами (УК), арифметическое устройство (АУ), оперативно-запоминающее устройство (ОЗУ), управление внешними устройствами (УВУ) получили автономное управление, что позволило реализовать их параллельную работу во времени. С этой целью создан мультиплексный канал обращения к ОЗУ со стороны УК, АУ и УВУ.

Эти устройства рассматривались как самостоятельно работающие процессоры, обращающиеся к общему ОЗУ, т. е. как

машина, фактически представлявшая собой многопроцессорный комплекс.

Согласно временной диаграмме М-40, обращение к памяти УК (А, А2, А3 и НК) и работы УВУ, включая систему передачи данных, процессор ввода-вывода данных (ПВВ), происходили, как правило, на фоне работы АУ, УК.

В экспериментальном комплексе противоракетной обороны (ПРО) эта машина осуществляла обмен информацией по пяти дуплексным одновременно и асинхронно работающим радиорелейным каналам связи с объектами, находящимися от нее на расстоянии от 100 до 200 километров, общий темп поступления информации через радиорелейные линии превосходил 1 МГц.

Проблема обмена информации с асинхронно работающими объектами была решена с помощью процессора ввода-вывода (ПВВ), работа которого основывалась на принципе мощного мультиплексного канала, имеющего свою память, доступную для всех каналов.

Одновременно с проведением боевой работы М-40 осуществляла запись на внешнее запоминающее устройство (барабан) экспресс-информации, которая обрабатывалась на аналогичной ЭВМ М-50 (модернизация М-40, обеспечивающая работу с плавающей запятой). Боевые пуски по всем направлениям входа и выхода сопровождались записью информации на магнитные ленты контрольно-регистрирующей аппаратуры (КРА). Это давало возможность в реальном масштабе времени «проигрывать» и анализировать каждый пуск, для чего ЭВМ М-40 и М-50 имели развитую систему прерываний.

Опыт эксплуатации экспериментального комплекса ПРО показал, что его вычислительные средства можно рассматривать как «мозг» всей системы; малейшие отклонения от нормы их функционирования приводят к нарушению работы всего комплекса, что может вызывать опасные ситуации.

Поэтому при создании вычислительных средств на полупроводниковых элементах для боевого комплекса особое внимание было уделено устойчивости его работы при сбоях и откатах. Вычислительная сеть системы ПРО имела протяженность несколько сот километров. Она состояла из вычислительных комплексов, каждый из которых был построен из идентичных боевых ЭВМ, обладающих полным пооперационным аппарат-

ным контролем. Резервирование в комплексе обеспечивалось на уровне машин.

На десять функционально работающих машин (М1–М10) предусматривалось две машины (М11–М12) для горячего резервирования, которые работали в режиме «подслушивания» и были готовы в течение нескольких десятков миллисекунд заменить любую из вышедших из строя ЭВМ. Сигнал неисправности ЭВМ вырабатывался аппаратно системой пооперационного контроля каждой ЭВМ и посыпался в систему прерывания всех машин. По межмашинному обмену, наряду с данными боевого цикла, передавалась необходимая экспресс-информация для ЭВМ, находящейся в резерве. В этом комплексе шесть ЭВМ (М1-М6) решали задачу обнаружения целей по данным радиолокатора дальнего действия и построения их траекторий. Четыре ЭВМ (М7-М10) решали задачи управления системой, включая задачу распределения целей по стрельбовым комплексам.

Эти ЭВМ под названием 5Э926 имели производительность 0,5 млн оп/с над числами с фиксированной запятой и ОЗУ объемом 32 тыс. 48 разрядных слов. Все основные устройства ЭВМ имели автономное управление, а управления внешними устройствами осуществлялось процессором передачи данных, имеющим довольно развитую специальную систему команд. Серийный выпуск этих машин для управления различными стационарными средствами вооружения был начат с 1966 г. Машина была модернизирована в части введения арифметики с плавающей запятой и мультипрограммного режима. Модернизированная ЭВМ имела название 5Э51 и серийно выпускалась с 1967 г. для построения мощных вычислительно-информационных центров повышенной надежности. Благодаря автономной работе ее основных устройств и, в первую очередь, процессора ввода-вывода, на базе общего ОЗУ эти машины успешно использовались при создании многомашинных комплексов с единой внешней памятью, состоящей из большого количества барабанов, дисков и лент.

После окончания работ по штатной системе Григорий Васильевич поставил новую задачу перед так называемыми «вычислителями». Потребовал для детального анализа отраженного сигнала вычислительные средства производительностью 100 млн скалярных операций, в то время как наиболее быстро-

действующая суперЭВМ «Cray» имела не более 5 млн оп/сек. Это можно было сделать только на новых архитектурных принципах.

Если М-40 можно отнести к многопроцессорной системе со специализированным процессором ввода и вывода, а функционирующие несколько позднее зарубежные многопроцессорные ЭВМ фирм Борроуз и Хьюлетт – Паккард были построены в первую очередь для обеспечения надежности комплекса (горячее резервирование) процессоров, то нам предстояло создать многопроцессорные системы с целью увеличения производительности комплекса (сложение производительности процессоров). Мирового опыта в этом не было или был отрицательный у ПВМ (при увеличении процессоров выше трех повышения производительности практически не наблюдалось). Многопроцессорные вычислительные комплексы (МВК) «Эльбрус-1» и «Эльбрус-2» первыми доказали возможность увеличения производительности системы с увеличением числа процессоров до 10.

Производительность многопроцессорной системы в основном ограничивается двумя факторами: пропускной способностью коммутатора между процессорами и ОЗУ и сложностью организации корректной работы сверхоперативной Кеш-памяти. Трудности, возникающие при решении этих двух проблем, существенно увеличиваются с ростом количества процессоров. Пропускная способность коммутатора «Эльбрус-2» достигала 2 Гб/с. Корректность работы сверхоперативной памяти была обеспечена путем ее разбиения на несколько частей, каждая из которых имела свой алгоритм работы в соответствии с выполняемой функцией. Так, в МВК «Эльбрус-2» имеется: сверхоперативная память команд, массивов, локальных данных, безадресный буфер быстрых регистров, построенный по принципу потока данных и буфер глобальных данных. Корректность работы буфера глобальных данных с ОЗУ вызывает те же проблемы в многопроцессорном комплексе, которые возникают в сверхоперативной кеш. В МВК «Эльбрус-2» реализована схема корректности работы этого буфера, которая обеспечивает корректную работу комплекса, практически не замедляя ее вне зависимости от числа процессоров. Аналогичные схемы, используемые в современных комплексах фирмы Hewlett Packard (SPP-2000) и Silicon Graphiks, существенно уступают по эффективности схеме МВК «Эльбрус-2».

МВК «Эльбрус-2» создавался в два этапа:

- на первом этапе отрабатывались новые архитектурные принципы, включая программное обеспечение;
- на втором этапе наряду с принципами архитектуры отрабатывалась новая конструкторско-технологическая база.

На первом этапе был реализован 10-процессорный комплекс «Эльбрус-1» производительностью в 15 млн оп/с на элементно-конструкторской базе 5Э26 и ТТЛ элементах с задержкой 10–20 нс на вентиль. На втором этапе МВК «Эльбрус-2» производительностью 120 млн оп/с и объемом ОЗУ 160 Мб, построенный на элементной базе типа Motorola 10000 с задержкой 2–3 нс на вентиль.

МВК «Эльбрус» построен по модульному принципу и в зависимости от комплектации может включать необходимое количество центральных процессоров (1–10), модулей оперативной памяти (4–32), процессоров ввода-вывода (ПВВ) (1–4), устройств внешней памяти (барабанов, дисков, магнитных лент), процессоров передачи данных (ППД) (1–16) и устройств ввода-вывода, подключенных либо непосредственно к ПВВ, либо через линии передачи данных посредством ППД. Каждый компонент комплекса, включая разнесенные по нему узлы центрального коммутатора, имеет стопроцентный аппаратный контроль и при появлении хотя бы одиночной ошибки в ходе вычислительного процесса выдает сигнал неисправности. По этому сигналу операционная система через аппаратно реализованную систему реконфигурации исключает неисправный модуль из работы.

Отключенный модуль попадает в ремонтную конфигурацию, в которой посредством тест-диагностических программ и специальной аппаратуры ремонтируется, после чего может быть включен операционной системой в рабочую конфигурацию.

Описанная структура позволяет осуществить резервирование на уровне однотипных модульных устройств. Время подключения резервного модуля не превосходит 0,01 с, что обеспечивает бесшлейфовую работу комплекса с заданной надежностью для всех боевых систем.

Таким образом, в процессе создания вычислительных средств системы ПРО СССР занимал передовые позиции в мире в области развития архитектуры суперЭВМ и схемотехническом решении вычислительной техники, таких как:

- организация мультиплексных каналов связи;

- создание вычислительных систем, объединяющих далеко разнесенные объекты;
- создание высокоскоростных самовосстанавливающихся вычислительных комплексов сначала на базе машинных, а затем на базе функциональных модулей (центральных процессоров (ЦП), оперативной памяти (ОП), процессоров ввода вывода (ПВВ), процессора приема передачи данных (ППД);
- повышение производительности многопроцессорного комплекса за счет сложения производительности процессоров;
- организация работы комплекса на общее поле внешней памяти;
- обеспечение высокой достоверности выдаваемой информации и аппаратно-программной диагностики;
- обезличенную работу модулей центральных и специализированных процессоров и возможность адаптации комплекса к решаемым задачам за счет подключения специализированных процессоров;
- решение проблемы когерентности кеш с минимальными потерями.

Новый толчок получило развитие радиолокации, теория и практика ракетостроения. Главным конструктором РЛС дальнего действия В. П. Сосульниковым впервые в мире была создана станция обзорного действия с селекцией сигнала в цифровом виде с дальностью обнаружения в 5000 км. Заставили лететь такую ракету-спринт (фактически снаряд), которую не могли заставить лететь в контуре управления на базе непрерывной техники. Существенное развитие получили цифровые системы моделирования. Натурным испытаниям предшествовало исследование контуров управления с достоверными цифровыми моделями поведения ракет.

Помню, как О. В. Голубев и Н. К. Свекопал ежедневно по ночам забирали все машинное время вычислительного комплекса для отработки системы управления всего комплекса, а в одно прекрасное утро, когда я входил в зал вычислительного комплекса, Олег Голубев, несмотря на бессонную ночь, был в хорошем настроении и сказал, что ракета-спринт полетит. И действительно, через некоторое время она полетела.

Новое развитие получили комплексы обработки натурных испытаний. Каждый удачный или неудачный «пуск» мы имели возможность полностью повторить и исследовать поведение

системы в любой момент времени как на боевом комплексе, так и на специальном вычислительном комплексе обработки экспресс-информации. На базе мощных вычислительных комплексов в ряде институтов развивались исследовательские центры моделирования различных ситуаций поведения систем военного назначения, а также комплексы контроля космоса и состояния самого земного шара на основании данных со спутников.

Таким образом, именно система ПРО дала мощный толчок внедрения высокопроизводительных вычислительных средств в народное хозяйство. Именно под эту систему впервые были созданы коллективы разработчиков и конструкторских бюро по созданию высокопроизводительных комплексов в Москве, Загорске, Пензе и других городах СССР. Именно эти коллективы, имея опыт создания вычислительных средств ПРО, успешно справились с созданием в кратчайшие сроки вычислительных средств для системы С-300 генерального конструктора, академика Б. В. Бункина. Помню, как он отчитывал на полигоне своих разработчиков цифровой техники за то, что у них, что ни работа – то отказ. А когда они оправдывались и говорили, что это интегральные схемы не достаточно надежны, Б. В. Бункин сказал: «Все интегральные схемы одинаковые, однако у вас отказывают, а у «вычислителей» (ИТМиВТ) отказов нет». В этот момент я подумал, что не зря мы получили опыт создания ПРО – мы научились делать отказоустойчивые системы. Если при создании ПРО по вине «вычислителей» было загроблено немало пусков, включая и полет ракеты на Караганду, то при отработке системы С-300 на нашем счету было не так много испорченных пусков.

Наряду с вышеперечисленными вычислительными системами, успешно были освоены заводами высокопроизводительные специализированные комплексы главного конструктора М. А. Карцева. Большое значение в развитии вычислительных средств имели информационно-вычислительные комплексы, создаваемые под руководством академика А. И. Савина.

Был создан высококвалифицированный коллектив разработчиков и технологов вычислительных средств, в первую очередь, за счет работ, проводимых по тематике ПРО. Создание высокопроизводительных вычислительных средств требовало создания и необходимой для их реализации элементной базы. Под заказ ПРО были поставлены разработки самых быстродействующих интегральных схем, разъемов, кабелей, высоко пре-

цизационных печатных плат и других компонент современной элементной базы.

Решения, которые предлагал Григорий Васильевич, базировались на более совершенных методах поражения боеголовки баллистической ракеты дальнего действия (БРДЦ) – точное наведение, осколочный заряд, частотная селекция, опознавание цели и т. д. Построенная система не содержала перспективных задач и реализовывалась на известных инженерных решениях.

Системы вооружения, создаваемые на базе вычислительных средств были конкурентоспособны зарубежным аналогам. Был период, когда мы в области ПРО опередили Америку более чем на 10 лет.

Поэтому, отвечая на вопрос о значении и необходимости работ по ПРО, я считаю, что значение этого направления работ в создании передовой технологии по многим ведущим направлениям науки и техники громадно. Строительство же под Москвой ПРО с атомным зарядом не содержала каких-либо прогрессивных решений в развитии ПРО и не ставило перед наукой и техникой задач, способствующих их развитию.

Направления работ Г. В. Кисунько базировались на прогрессивных научно-технических методах создания системы ПРО, направляющих на дальнейшее развитие научно-технического потенциала страны, в то время как последняя подмосковная система ПРО значительно уступала в этом отношении системам ПРО, разработанным под руководством Г. В. Кисунько.

#### **4.6. ПРО и современное состояние вычислительных средств**

Безусловно, будет вопрос, а каково состояние в настоящее время вычислительных средств и причины отставания их развития в нашей стране. Постараемся коротко ответить. В период до перестройки причиной отставания вычислительных средств было то, что со стороны правительства недостаточное внимание уделялось элементной базе. Основные средства страны «загонялись» в системы вооружения, по которым мы не уступали нашему предполагаемому противнику. Элементная база не выводилась на уровень конкурентоспособности с зарубежной. Вычислительные средства военных систем нивелировали эту си-

туацию за счет новых оригинальных архитектурных решений, которые несколько увеличивали аппаратные средства всего комплекса, что практически не сказывалось на увеличении общей стоимости системы вооружения. Поэтому неверным будет мнение о том, что мы отставали в области архитектурных и схемотехнических решений вопросов вычислительной техники. Что же касается послеперестроечного периода, то здесь нужно искать другие причины, основная из которых – бездарное распределение государственного бюджета в этой области:

- недооценка значения суперЭВМ как передового фронта развития вычислительной техники;
- закрытие высокопоставленными инстанциями всех проектов суперЭВМ (Векторный Эльбрус, СС БИС, МКП и ОСВМ);
- разгон коллективов и закрытие институтов ВЦКП, ИПК и ИВВС;
- систематическое вливание бюджетных средств в вычислительную технику без отдачи.

Но, чтобы закончить не на такой печальной ноте, отмечает В. С. Бурцев, – уцелел небольшой коллектив школы С. А. Лебедева, который в настоящее время создал проект суперЭВМ, позволяющей построить вычислительный комплекс рекордной производительности даже на современной элементной базе.

# Глава 5. КВАНТОВЫЙ КОМПЬЮТЕР. ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ

*You boil it in sawdust; you sall it in glue; you condense it with locust and tape: still keeping one principal object in view – to preserve its symmetrical shape.*

*Lewis Carroll*

Квантовый компьютер – вычислительное устройство, существенно использующее при работе квантовомеханические эффекты, такие как квантовая запутанность и квантовый параллелизм путем выполнения квантовых алгоритмов. Это позволяет преодолеть некоторые ограничения классических компьютеров. Основополагающая идея квантового компьютера была высказана Р. Фейнманом в его знаменитой лекции в Калифорнийском Технологическом институте в мае 1959 г.: «There is plenty of rooms at the bottom».



Американский физик **Ричард Филлипс Фейнман** родился 11 мая 1918 г. в Нью-Йорке, в семье Мелвилла Артура Фейнмана и урожденной Люсиль Филлипс.

Вместе с младшей сестрой он вырос в Фар-Роквэй, в Куинсе (район Нью-Йорка). Отец Фейнмана, заведующий отделом сбыта фабрики по изготовлению форменной одежды, питал глубокий интерес к естественным наукам и поощрял сына в проведении экспериментов в домашней лаборатории. Вместе со своим школьным приятелем Фейнман устраивал для соседей представления, показывая нехитрые химические фокусы. Еще будучи учеником средней школы, он зарабатывал на мелкие расходы починкой радиоприемников. Став капитаном школьной команды по алгебре, Фейнман обнаружил способность быстро решать головоломные математические задачи, рассматривая их в целом и избегая громоздких вычислений.

По окончании средней школы в 1935 г. Фейнман поступил в Массачусетский технологический институт (МТИ) и в 1939 г. окончил его с дипломом бакалавра по физике. В МТИ, вспоминал впоследствии Фейнман, он осознал, что «наиболее важной проблемой того времени было неудовлетворительное состояние квантовой теории электричества и магнетизма (квантовой электродинамики)». Кванто-

вая электродинамика занимается изучением взаимодействий между элементарными частицами и между частицами и электромагнитным полем.

Множество положений существовавшей тогда теории, созданной Вернером Гейзенбергом, Вольфгангом Паули и П. А. М. Дираком, получили блестящее подтверждение, но в ее структуре были и не совсем ясные моменты, например бесконечная масса и бесконечный заряд электрона. Фейнман начал разрабатывать радикально новые теоретические подходы к решению этих проблем. Он назвал допущение о действии электрона на самого себя (а именно оно было источником появления бесконечностей, или расходимостей) «глупым» и предложил считать, что электроны испытывают действие только со стороны других электронов, причем с запаздыванием из-за разделяющего их расстояния. Такой подход позволял исключить само понятие поля и тем самым избавиться от других бесконечностей, доставлявших немало хлопот. Хотя Фейнману и не удалось достичь удовлетворительных результатов, нетрадиционность мышления он сохранил на все последующие годы.

В 1939 г. Фейнман поступил в аспирантуру Принстонского университета и получил Прокторскую стипендию. В аспирантуре он продолжил эксперименты с различными подходами к квантовой электродинамике, учась на ошибках, отбрасывая неудачные схемы и пробуя множество новых идей, часть которых рождалась в беседах с его руководителем Джоном А. Уиллером. Фейнман стремился сохранить принцип запаздывающего действия одного электрона на другой: электрон, испытывающий действие со стороны другого электрона, в свою очередь воздействует на него с определенным дополнительным запаздыванием, подобно свету, отражающемуся назад, к своему источнику. По совету Уиллера Фейнман предположил, что такое отражение состоит в испускании не только обычной запаздывающей волны, но и «опережающей», достигающей электрон до того, как начинается его возмущающее действие на другой электрон. Парадоксальный ход времени, текущего не только вперед, но и назад, его не беспокоил, как признавался впоследствии Фейнман: «К тому времени я уже в достаточной мере стал физиком, чтобы не говорить: «О нет, это невозможно!»

После многих месяцев математических приколов, неудач и попыток найти новые подходы Фейнман преуспел в преобразовании понятий и уравнений с различных точек зрения. Ему удалось найти оригинальные пути включения квантовой механики в классическую электродинамику и разработать методы, позволяющие просто и быстро получать результаты, требующие при традиционном подходе громоздких вычислений. Одной из наиболее удачных его идей было применение принципа наименьшего действия, основанного на предположении о том, что природа выбирает для достижения определенной цели наиболее экономичный путь. Хотя Фейнман и не был удов-

летворен своими достижениями, однако он сознавал, что ему удалось существенно продвинуться в решении проблемы, а его работа получила признание. Фейнман опубликовал свою диссертацию «Принцип наименьшего действия в квантовой механике» («The Principle of Least Action in Quantum Mechanics») и в 1942 г. получил докторскую степень по физике.

Незадолго до завершения диссертации Фейнман получил приглашение на работу от группы принстонских физиков, занимавшихся разделением изотопов урана для нужд Манхэттенского проекта, т. е. для создания атомной бомбы. С 1942 по 1945 г. Фейнман возглавлял в Лос-Аламосе (штат Нью-Мексико) группу, работавшую в отделе Ханса А. Бете. Даже в эти годы он находил время размышлять во время поездок в автобусе, производя необходимые вычисления на клочках бумаги, над дальнейшим развитием предложенного им варианта квантовой электродинамики. В Лос-Аламосе Фейнман общался с Нильсом Бором, Оге Бором, Энрико Ферми, Робертом Оппенгеймером и другими ведущими физиками. Он был среди тех, кто присутствовал при первых испытаниях атомной бомбы в Аламогордо (штат Нью-Мексико).

После окончания войны лето 1945 г. Фейнман провел, работая с Хансом А. Бете в компании «Дженерал электрик» в Скенектади (штат Нью-Йорк). Затем он стал адъюнкт-профессором теоретической физики в Корнеллском университете. Тем временем перед квантовой электродинамикой встали новые вопросы. Так, в 1947 г. Уиллис Э. Лэмб с помощью прецизионных экспериментов показал, что два энергетических уровня, которые, по теории Дирака, должны были бы соответствовать одному и тому же значению энергии, в действительности слегка отличаются («лэмбовский сдвиг»). Другое расхождение между теорией и экспериментом было установлено Поликарпом Ка-шем, обнаружившим, что собственный магнитный момент электрона более чем на 0,1 % превышает магнетон Бора. В 1955 г. У. Лэмбу и П. Кашу за эти работы была присуждена Нобелевская премия.

Опираясь на основополагающие работы Бете, Фейнман приступил было к решению этих фундаментальных проблем, но вскоре у него наступил период застоя, вызванный, по его собственному мнению, тем, что физика перестала доставлять ему наслаждение как интеллектуальная игра. По прошествии какого-то времени он случайно оказался свидетелем того, как в кафетерии Корнеллского университета некто развлекался, подбрасывая тарелку в воздух, и заинтересовался зависимостью между скоростью вращения тарелки и ее «рысканием». Фейнману удалось вывести уравнения, описывающие полет тарелки. Это упражнение позволило ему восстановить душевые силы, и он возобновил свою работу над квантовой электродинамикой. «То, что я делал, казалось, не имело особого значения, — писал впоследствии Фейнман, — но в действительности в этом был заложен великий смысл. Диаграммы и все прочее, за что я получил Нобелевскую пре-

мию, берут свое начало в той, казалось бы, бессмысленной возне с летающей тарелкой».

«Все прочее» было новым вариантом теории, в котором квантово-электродинамические взаимодействия рассматривались с новой точки зрения – траектории в пространстве-времени. Говорят, что частица распространяется из начальной точки траектории в конечную; возможные взаимодействия «по дороге» выражаются в терминах их относительных вероятностей. Эти вероятности суммируются в ряды (иногда комплексные), для вычисления которых Фейнман разработал правила и графическую технику (диаграммы Фейнмана). Внешне простые, но чрезвычайно удобные, диаграммы широко используются во многих областях физики. Фейнману удалось объяснить «лэмбовский сдвиг», магнитный момент электрона и другие свойства частиц.

Независимо от Фейнмана и друг от друга, исходя из других теоретических подходов, Джюлиус С. Швингер и Синьитиро Томонага почти одновременно предложили свои варианты квантовой электродинамики и сумели преодолеть основные трудности. Используемая ими математическая процедура получила название перенормировки. Доставивших столько неприятностей расходимостей удалось избежать, постулируя положительные и отрицательные бесконечности, которые почти полностью компенсируют друг друга, а остаток (например, заряд электрона) соответствует экспериментально измеренным значениям. Квантовая электродинамика Фейнмана – Швингера – Томонаги считается наиболее точной из известных ныне физических теорий. Правильность ее подтверждена экспериментально в широком диапазоне масштабов – от субатомных до астрономических.

Совместно со Швингером и Томонагой Фейнману была присуждена Нобелевская премия по физике 1965 г. «за фундаментальные работы по квантовой электродинамике, имевшие глубокие последствия для физики элементарных частиц». В речи на церемонии вручения премии Ивар Валлер из Шведской королевской академии наук отметил, что лауреаты привнесли новые идеи и методы в старую теорию и создали новую, занимающую ныне центральное положение в физике. Она не только объясняет прежние расхождения между теорией и экспериментом, но и позволяет глубже понять поведение мю-мезона и других частиц в ядерной физике, проблемы твердого тела и статистической механики.

Фейнман оставался в Корнеллском университете до 1950 г., после чего перешел в Калифорнийский технологический институт на должность профессора теоретической физики. Там же в 1959 г. он занял почетную должность, учрежденную в память Ричарда Чайса Толмена. Помимо работ по квантовой электродинамике, Фейнман предложил атомное объяснение теории жидкого гелия, развитой советским физиком Львом Ландау. Гелий, переходящий в жидкое состояние при 4 К, становится сверхтекучим около 2 К. Динамика сверхтекучего гелия резко контрастирует с законами, которым удовлетворяют обыч-

ные жидкости: при течении он остывает, а не нагревается; свободно протекает сквозь микроскопически узкие отверстия, «презрев» силу тяжести, вползает вверх по стенкам сосуда. Фейнман вывел ротоны, постулированные Ландау для объяснения необычного поведения сверхтекучего гелия. Это объяснение состоит в том, что атомы очень холодного гелия агрегируют в ротоны, образуя нечто вроде дымовых колец.

Вместе со своим сотрудником Марри Гелл-Манном Фейнман внес существенный вклад в создание теории слабых взаимодействий, таких как испускание бета-частиц радиоактивными ядрами. Эта теория родилась из диаграмм Фейнмана, позволяющих графически представить взаимодействия элементарных частиц и их возможные превращения. Последние работы Фейнмана посвящены сильному взаимодействию, т. е. силам, удерживающим нуклоны в ядре и действующим между субъядерными частицами, или «партонами» (например, кварками), из которых состоят протоны и нейтроны.

Оригинальность мышления и артистизм Фейнмана как лектора оказали влияние на целое поколение студентов-физиков. Его метод интуитивного угадывания формулы и последующего доказательства ее правильности находит больше подражателей, чем критиков. Влияние как его теорий, так и его личности ощущается в каждом разделе современной физики элементарных частиц.

Фейнман был трижды женат. Арлен Х. Гринбаум, с которой он вступил в брак в 1941 г., умерла от туберкулеза в 1945 г., когда Фейнман был в Лос-Аламосе. Его брак с Мэри Луиз Белл, заключенный в 1952 г., закончился разводом. В 1960 г. он женился в Англии на Гвенет Ховарт. У них родились сын и дочь. Искренний и непочтительный к авторитетам, Фейнман входил в состав президентской комиссии, расследовавшей обстоятельства взрыва космического корабля многоразового использования «Челенджер» в 1986 г. Он составил собственный тринадцатистраничный отчет, в котором критиковал ответственных сотрудников Национального управления аeronавтики и космических исследований (НАСА) за то, что те дали «одурачить себя», не заметив существенных недостатков в конструкции космического корабля.

Человек неуемной любознательности и разносторонних интересов, Фейнман с удовольствием играл на барабанах «бонго», изучал японский язык, рисовал и занимался живописью, принимал участие в дешифровке текстов майя и проявлял живой интерес к чудесам парапсихологии, относясь к ним, однако, с изрядной долей скепсиса.

Помимо Нобелевской премии, Фейнман был удостоен премии Альберта Эйнштейна Мемориального фонда Льюиса и Розы Страусе (1954), премии по физике Эрнеста Орландо Лоуренса Комиссии по атомной энергии Соединенных Штатов Америки (1962) и международной золотой медали Нильса Бора Датского общества инженеров-строителей, электриков и механиков (1973). Фейнман был членом

Американского физического общества, Бразильской академии наук и Лондонского королевского общества. Он был избран членом Национальной академии наук США, но позднее вышел в отставку.

## 5.1. Квантовые вычисления

На рубеже XIX–XX вв. возникла великая физическая теория, описывающая свойства частиц и их движение в микромире – квантовая физика (механика). Одним из поводов к этому послужила невозможность с точки зрения классической физики описать спектр излучения абсолютно черного тела в коротковолновой части, так называемая «ультрафиолетовая катастрофа». В течение четверти века усилиями Планка, Н. Бора, Э. Шредингера, В. Гейзенберга был создан математический аппарат квантовой механики и решены основные задачи о квантовом описании движения объектов микромира: электронов, атомов и молекул; электронов и атомов в твердых телах; взаимодействия излучения и атомов (атомная спектроскопия).

На квантовом уровне мир описывается уравнением Шредингера:

$$i\hbar \frac{\partial |\Psi\rangle}{\partial t} = \hat{H}|\Psi\rangle.$$

Оператор  $\hat{H}$  линейный:

$$\hat{H}(a|\Psi_1\rangle + b|\Psi_2\rangle) = a\hat{H}|\Psi_1\rangle + b\hat{H}|\Psi_2\rangle,$$

следствием чего является квантовый принцип суперпозиции состояний. Если квантовая система может существовать в состояниях  $|\Psi_1\rangle$  и  $|\Psi_2\rangle$ , то она может столь же «законно» существовать и в состояниях их суперпозиции:  $a|\Psi_1\rangle + b|\Psi_2\rangle = |\Psi\rangle$ ,  $a, b$  – комплексные амплитуды,  $|a|^2 + |b|^2 = 1$ .

Эволюция состояний квантовых систем происходит согласно квантовому уравнению Шредингера. Свяжем с состояниями квантовой системы (частицы) информационные понятия и символы. Установление такого соответствия превращает квантовые системы в квантовые приборы. Последние можно рассматривать как квантовую элементную базу информационных систем. Эволюция состояний квантовых приборов представляет информационный процесс.

Таким образом, подчинение прибора уравнению Шредингера (и принципу суперпозиции) выделяет его в класс квантовых

приборов. Управление прибором извне (внешним полем) происходит также согласно уравнению Шредингера. Очевидно выделенными оказываются квантовые частицы (системы) с двумя состояниями, на которые отображаются информационные системы, построенные на двоичной системе исчисления.

Идея квантовых вычислений состоит в том, что квантовая система из  $L$  двухуровневых квантовых элементов (кубитов) имеет  $2^L$  линейно независимых состояний, а значит, вследствие принципа квантовой суперпозиции,  $2^L$ -мерное гильбертово пространство состояний. Операция в квантовых вычислениях соответствует повороту в этом пространстве. Таким образом, квантовое вычислительное устройство размером  $L$  кубит может выполнять параллельно  $2^L$  операций.

Предположим, что имеется один кубит. В таком случае после измерения, в так называемой классической форме, результат будет 0 или 1. В действительности кубит – квантовый объект и поэтому, вследствие принципа неопределенности, может быть и 0, и 1 с определенной вероятностью. Если кубит равен 0 (или 1) со стопроцентной вероятностью, его состояние обозначается с помощью символа  $|0\rangle$  (или  $|1\rangle$ ) – в обозначениях Дирака.  $|0\rangle$  и  $|1\rangle$  – это базовые состояния. В общем случае квантовое состояние кубита находится между базовыми и записывается, в виде  $a^*|0\rangle+b^*|1\rangle$ , где  $|a|^2$  и  $|b|^2$  – вероятности измерить 0 или 1 соответственно. Более того, сразу после измерения кубит переходит в базовое квантовое состояние, аналогичное классическому результату.

Пример:

имеется кубит в квантовом состоянии.

В этом случае вероятность получить при измерении

0 – составляет  $(4/5)^2=16/25$  или 64 %;

1 – составляет  $(-3/5)^2=9/25$  или 36 %.

В данном случае при измерении мы получили 0 с 64 % вероятностью.

Тогда кубит перескакивает в новое квантовое состояние  $1^*|0\rangle+0^*|1\rangle=|0\rangle$ , т. е. при следующем измерении этого кубита мы получим 0 со стопроцентной вероятностью.

Перейдем к системе из двух кубитов. Измерение каждого из них может дать 0 или 1. Поэтому у системы 4 классических состояния: 00, 01, 10 и 11. Аналогичные им базовые квантовые состояния:  $|00\rangle$ ,  $|01\rangle$ ,  $|10\rangle$  и  $|11\rangle$ . И наконец, общее квантовое

состояние системы имеет вид. Теперь  $|a|^2$  – вероятность измерить 00 и т. д. Отметим, что  $|a|^2+|b|^2+|c|^2+|d|^2=1$  как полная вероятность.

В общем случае, системы из  $L$  кубитов у нее  $2^L$  классических состояний (00000...(L-нuleй), ...00001(L-цифр), ... , 11111...(L-единиц)), каждое из которых может быть измерено с вероятностями 0 – 100 %.

Таким образом, одна операция над группой кубитов затрагивает все значения, которые она может принимать, в отличие от классического бита. Это и обеспечивает беспрецедентный параллелизм вычислений.

Упрощенная схема вычисления на квантовом компьютере выглядит так: берется система кубитов, на которой записывается начальное состояние. Затем состояние системы или ее подсистем изменяется посредством базовых квантовых операций. В конце измеряется значение, и это результат работы компьютера.

Оказывается, что для построения любого вычисления достаточно двух базовых операций. Квантовая система дает результат, только с некоторой вероятностью являющийся правильным. Но за счет небольшого увеличения операций в алгоритме можно сколь угодно приблизить вероятность получения правильного результата к единице.

С помощью базовых квантовых операций можно симулировать работу обычных логических элементов, из которых сделаны обычные компьютеры. Поэтому любую задачу, которая решена сейчас, квантовый компьютер решит и почти за такое же время. Следовательно, новая схема вычислений будет не слабее нынешней.

Чем же квантовый компьютер лучше классического? Большая часть современных ЭВМ работают по такой же схеме:  $n$  бит памяти хранят состояние, и каждый такт времени изменяется процессором. В квантовом случае, система из  $n$  кубитов находится в состоянии, являющимся суперпозицией всех базовых состояний, поэтому изменение системы касается всех  $2^n$  базовых состояний одновременно. Теоретически новая схема может работать намного (в экспоненциальное число раз) быстрее классической. Практически, (квантовый) алгоритм Гровера поиска в базе данных показывает квадратичный прирост мощности против классических алгоритмов. Пока в природе их не существует.

**Алгоритм Гровера** позволяет найти решение уравнения за время: алгоритм Шора позволяет разложить натуральное число  $n$  на простые множители за полиномиальное от  $\log(n)$  время (для обычного компьютера полиномиальный алгоритм неизвестен); алгоритм Дойча – Джоза позволяет «за одно вычисление» определить, является ли функция двоичной переменной  $f(n)$  постоянной ( $f_1(n) = 0, f_2(n) = 1$  независимо от  $n$ ) или «сбалансированной» ( $f_3(0) = 0, f_3(1) = 1; f_4(0) = 1, f_4(1) = 0$ ). Было показано, что не для всякого алгоритма возможно «квантовое ускорение».

Алгоритм **квантовой телепортации** реализует точный перенос состояния одного кубита (или системы) на другой. В простейшей схеме используются 4 кубита: источник, приемник и два вспомогательных. Отметим, что в результате работы алгоритма первоначальное состояние источника разрушится – это пример действия общего принципа невозможности клонирования – невозможно создать точную копию квантового состояния, не разрушив оригинал. На самом деле, довольно легко создать одинаковые состояния на кубитах. К примеру, измерив 3 кубита, мы переведем каждый из них в базовые состояния (0 или 1) и хотя бы на двух из них они совпадут. Не получится скопировать произвольное состояние, и телепортация – замена этой операции.

Телепортация позволяет передавать квантовое состояние системы с помощью обычных классических каналов связи. Таким образом, можно, в частности, получить связанное состояние системы, состоящей из подсистем, удаленных на большое расстояние.

Может показаться, что квантовый компьютер – это разновидность аналоговой вычислительной машины. Но это не так: по своей сути это цифровое устройство, но с аналоговой природой.

Основная проблема, связанная с созданием и применением квантовых компьютеров: необходимо обеспечить высокую точность измерений; внешние воздействия могут разрушить квантовую систему или внести в нее искажения.

Благодаря огромной скорости разложения на простые множители, квантовый компьютер позволит расшифровывать сообщения, закодированные при помощи многих популярных криптографических алгоритмов, таких как RSA. До сих пор этот алгоритм считается сравнительно надежным, так как эффективный способ разложения чисел на простые множители для классического компьютера в настоящее время неизвестен. Для того, на-

пример, чтобы получить доступ к кредитной карте, нужно разложить на два простых множителя число длиной в сотни цифр. Даже для самых быстрых современных компьютеров выполнение этой задачи заняло больше бы времени, чем возраст Вселенной в сотни раз. При помощи алгоритма Шора эта задача делается вполне осуществимой, если квантовый компьютер будет построен.

Применение идей квантовой механики уже открыло новую эпоху в области криптографии, так как методы квантовой криптографии открывают новые возможности в области передачи сообщений, которые даже теоретически нельзя «расшифровать». Уже существуют коммерческие образцы систем подобного рода.

На данный момент, наибольший квантовый компьютер составлен из 7 кубитов. Этого достаточно, чтобы реализовать алгоритм Шора и разложить 15 на простые множители 3 и 5.

Физические модели, с помощью которых пытаются построить квантовый компьютер:

Канадская компания D-Wave заявила в феврале 2007 г. о создании образца квантового компьютера, состоящего из 16 кубит (устройство получило название Orion). Однако информация об этом устройстве, предоставленная научному сообществу, была довольно туманной, и новость не получила широкого признания.

В ноябре 2007 г. компания D-Wave продемонстрировала работу образца 28-кубитного компьютера онлайн на конференции, посвященной суперкомпьютерам.

## 5.2. Квантовая информатика

Состояние и перспективы развития квантовой информатики в стране и за рубежом и ее приложение в связи, криптографии и других отраслях науки и технологии обсуждались на заседании Президиума РАН в январе 2008 г. Основным докладчиком на заседании был академик К. А. Валиев. Приведем основные положения данного весьма интересного доклада (полный текст размещен на сайте РАН).

Информатика – наука о методах обработки информации – стала быстроразвивающейся областью человеческой деятельности. Понятие информации тесно связано с физическим понятием

энтропии. Она не существует вне физики, то есть реального мира. В информационных системах ее носители – физические тела, с состояниями которых связываются информационные понятия и символы, а с эволюцией состояний физических тел связываются процессы обработки информации.

Эти общие положения обретают наглядность при физическом отображении цифровых информационных систем, построенных на двоичной системе исчисления. Их отображением могут служить любые физические системы, имеющие два устойчивых состояния и способные совершать переходы между ними под воздействием внешних сигналов (механические или электрические переключатели (ключи)) (табл. 1)

При анализе информационных систем полезно выделить минимальной сложности операции (булевы функции), из которых могут быть построены системы любой сложности. Доказано, что классические двоичные системы могут быть построены из единственного элемента НЕ-И, имеющего два входа  $x, y$  (0; 1) и один выход  $f(x, y)$ , значение  $f(x, y) = 1$ , когда  $x = y = 0$ , и  $f(x, y) = 0$  во всех других случаях (рис. 5.1):

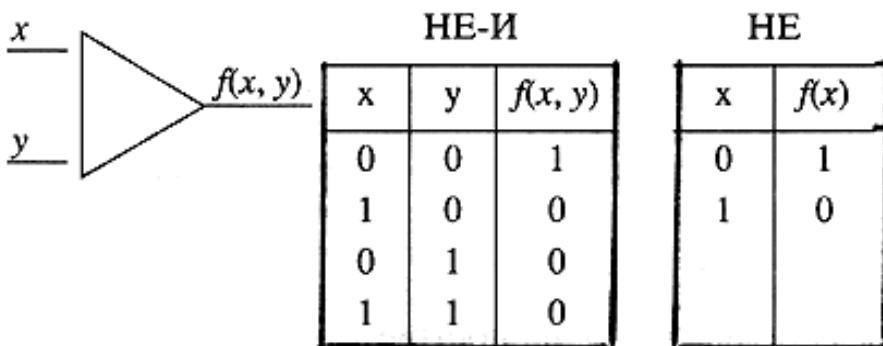


Рис. 5.1. Схема элемента НЕ-И

Одновходовой элемент НЕ в современных микропроцессорах строится на двух полевых транзисторах (рис. 5.2, *а*). Напряжение питания  $V_{DD}$  приложено к последовательно соединенным *p*-канальному (открыт, когда  $V_i < 0$ ) и *n*-канальному (открыт, когда  $V_i > 0$ ) транзисторам. Передаточная характеристика элемента (рис. 5.2, *б*) соответствует булевой функции НЕ: когда на входном электроде низкое напряжение (лог. |0>), на выходном электроде высокое напряжение (лог. |1>), и наоборот.

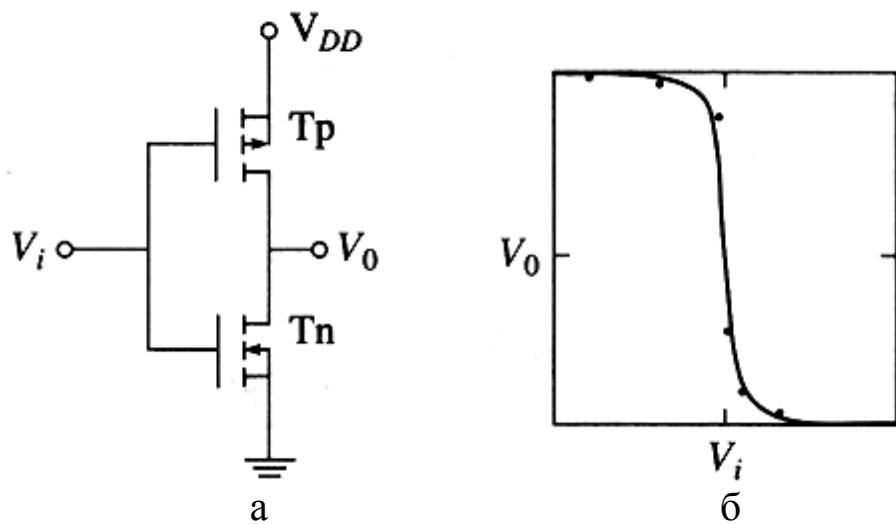


Рис. 5.2. Принципиальная схема логического элемента НЕ на полевых транзисторах (а); нелинейная зависимость выходного напряжения  $V_0$  от входного  $V_i$ , описывающая логическую операцию НЕ, если низкое напряжение считать логическим  $|0\rangle$ , и наоборот (б)

Элементы современных систем обработки информации – электронные лампы, транзисторы, диоды, фотоприемники, светодиоды и лазеры – являются «классическими» приборами. Определение «классический» отражает то обстоятельство, что внешние, функциональные свойства приборов (например, токи и напряжения на электродах) описываются законами классической физики. Конечно, внутренние процессы в приборах, происходящие на атомном уровне, являются квантовыми. Таковы зоны энергии и рассеяние электронов в полупроводниковой структуре транзисторов, процесса туннелирования в туннельно-резонансных диодах, излучение и поглощение фотонов в активной среде лазеров. Эти внутренние процессы описываются квантово-статистическим методом.

Выбор физической реализации логических «нуля» и «единицы» (см. табл. 5.1) связывает информатику с физикой.

Таблица 5.1  
Связь физических и математических реализаций

Информационная система	Физическая система	
	Механический переключатель	Электрический ключ
Логический нуль $ 0\rangle$	Выключен	Не проводит эл. ток
Логическая единица $ 1\rangle$	Включен	Проводит эл. ток

Главной тенденцией развития технологии твердотельных приборов микроэлектроники стало непрерывное уменьшение размеров элементов приборов. Сейчас минимальные размеры близки к 0,1 мкм – это 500 атомных размеров. Размеры меньше 0,1 мкм называются нанометровыми (1 нм = 0,001 мкм), а приборы – наноэлектронными.

Экстраполяция тенденции уменьшения размеров элементов приборов показывает, что атомные размеры в твердотельной технологии будут достигнуты через 20–30 лет. Не переоценивая точности этого предсказания, можно быть уверенным, что уровень технологии атомных размеров будет достигнут, и такая технология позволит изготавливать микросхемы, работающие на квантовых принципах. Другие технологии на атомном уровне (например, технологии на ионах и атомах в ловушке) также могут использоваться для построения квантовой элементной базы информационных систем.

Квантовая система с двумя различимыми состояниями  $|\Psi_0\rangle$   $|\Psi_1\rangle$ , способная нести 1 бит информации, получила название кубит (qubit). Если состояния  $|\Psi_0\rangle$   $|\Psi_1\rangle$  связаны с двумя уровнями энергии  $E_0 < E_1$ , то можно говорить о двухуровневой системе. Простейшим случаем двухуровневой квантовой системы является спин ядра атома или электрона  $S = 1/2$  в постоянном внешнем поле  $B_0$ : два уровня энергии и состояния соответствуют проекциям спина на направление  $B_0$  (рис. 5.3). Состояния спина  $I_z = \pm 1/2$  – и его уровни энергии  $E_{0,1} = \pm m_i B_0 / 2$  во внешнем поле  $B_0$  представляют логические состояния кубита  $|0\rangle$  и  $|1\rangle$ .

Два оптических уровня энергии и состояния электрона в ионе также могут быть выбраны в качестве двух состояний кубита (рис. 5.4). Для примера, состояния иона  $\text{Ca}^+$ , соответствующие уровням энергии  $^2\text{S}_{1/2}$  (основной) и  $^2\text{D}_{5/2}$  (метастабильный) выбраны за логические  $|0\rangle$  и  $|1\rangle$ . Числа у стрелок показывают длину волны лазера, вызывающего переход, и время жизни иона на соответствующем уровне.

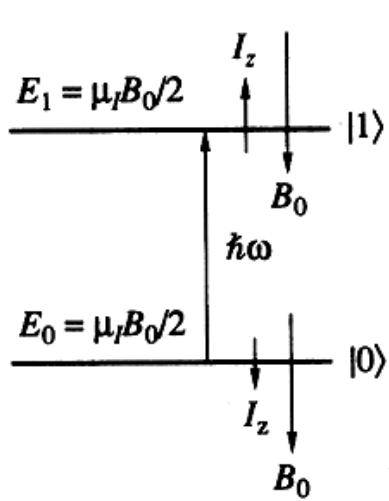
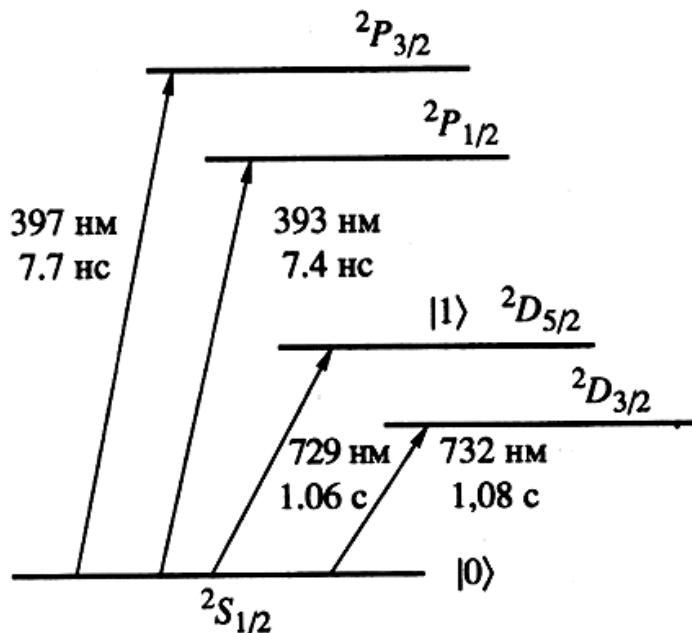


Рис. 5.3. Двухуровневая схема состояний

Рис. 5.4. Схема реального кульбита, основанного на двух состояниях иона  $\text{Ca}^+$ 

В других случаях состояния  $|\Psi_0\rangle$   $|\Psi_1\rangle$  могут различаться поляризацией (фотона) или фазой (сверхпроводника). Квантовая система может быть макроскопической (сверхпроводники, сверхтекущие жидкости, бозе-газ), отдельной атомной частицей, или колебательной модой. Все эти системы могут быть использованы в качестве кубита.

Некоторое число  $n$  кубитов образуют квантовый регистр компьютера. В ходе выполнения квантового алгоритма состояния кубитов изменяются согласно плану выполнения алгоритма. Доказано, что любой квантовый алгоритм может быть разложен на последовательность преобразований состояний отдельных кубитов и пар кубитов (одно- и двухкубитовые преобразования, или «вентили»). Чтобы построить квантовый компьютер, необходимо уметь осуществлять:

- 1) любые суперпозиции состояний  $|0\rangle$  и  $|1\rangle$  любого кубита,
- 2) контролируемый одним («контролирующим») кубитом преобразование НЕ другого («контролируемого») кубита.

Взглянем на таблицу 5.2.

Таблица 5.2  
Истинность преобразования Контролируемое НЕ

Начальные состояния		Конечные состояния	
Контролирующий кубит	Контролируемый кубит	Контролирующий кубит	Контролируемый кубит
0	0	0	1
0	1	1	0
1	0	1	1
1	1	0	0

$ 0\rangle$	$ 0\rangle$	$ 0\rangle$	$ 0\rangle$
	$ 1\rangle$		$ 1\rangle$
$ 1\rangle$	$ 0\rangle$	$ 1\rangle$	$ 1\rangle$

Контролируемое преобразование можно осуществить только при наличии физического взаимодействия между контролирующим и контролируемым кубитами. Чтобы выполнить необходимые операции на кубитах, на них воздействуют импульсами внешнего резонансного поля. Квантовая эволюция состояния кубита  $|\Psi_t\rangle$  совершается согласно уравнению Шредингера, где  $H_i(t) = -\mu\epsilon_0 \cos(\omega t + \varphi)$  – энергия взаимодействия дипольного момента  $\mu$  кубита и внешнего резонансного поля (например, лазера). При этом необходимо иметь возможность воздействовать избирательно на любой избранный кубит.

Мысль о возможности построения квантового компьютера впервые высказал Р. П. Фейнман. Схематическая структура квантового компьютера представлена на рис. 5.5.

Квантовую часть компьютера составляют  $n$  кубитов. К каждому из них может быть приложено селективное воздействие импульсами резонансного внешнего переменного поля. Включение генераторов полей и адресация их излучения на данный кубит осуществляется под управлением классического компьютера. Эволюция состояния кубитов изображается вдоль горизонтальных линий (ось времени) в виде последовательности однокубитовых и двухкубитовых вентилей. До того как «запустить» вычислительный процесс на квантовом компьютере, все  $n$  кубитов должны быть приведены в состояние  $|0\rangle$ . Эта процедура



Рис. 5.5. Схема квантового компьютера

носит название «инициализация». Это вовсе не тривиальная операция. Если в качестве кубитов используются ядерные спины, для инициализации потребуется охлаждение до температур порядка 1 мК или поляризация спинов накачкой. Ввод данных и исполнение алгоритма совершаются применением однокубитовых и двухкубитовых вентилей. По завершении алгоритма результат вычисления будет записан в конечном квантовом состоянии кубитов. Чтобы «считать» результат, необходимо провести квантовое измерение состояния кубитов (одного или нескольких). Квантовые алгоритмы решения сложных задач могут состоять из большого числа ( $\sim 10^9$ ) операций (вентилей), выполняемых на компьютерах, содержащих  $10^3$  кубитов.

Сейчас разработано немного алгоритмов для квантовых компьютеров, но в том, что сделано, получены ошеломляющие результаты. В 1994 г. Шор создал алгоритм факторизации, т. е. определения простых множителей больших  $n$  разрядных чисел [3]. На классическом компьютере для этого требуется экспоненциально большое число операций. Недоступность этой задачи современным компьютерам используется для кодирования (шифрования) секретной информации (в RSA криптосистемах). Шор показал, что квантовый компьютер способен решить эту задачу за  $n^3$  операций. Коэффициент ускорения задачи при больших  $n$  может быть очень большим. Такое же ускорение имеет место при решении на квантовом компьютере задач квантовой физики [5]. В то же время установлено, что многие алгоритмы, выполняемые неплохо на классических компьютерах, не ускоряются на квантовом [6].

Ускорение процесса решения задач на квантовом компьютере лежит в квантовой природе кубитов. Квантовость кубитов приводит к нескольким феноменам.

1. Гильбертово пространство состояний квантовой системы из  $n$  кубитов имеет огромную размерность, равную  $2^n$ . Физически это означает, что система имеет  $2^n$  базовых состояния, а состояние компьютера описывается суперпозицией из этих  $2^n$  базовых состояний. При воздействии на какой-либо кубит одновременно изменяются все  $2^n$  базовых состояния. Этот феномен носит название квантового параллелизма.

2. Вычислительный процесс носит характер интерференции, так как амплитуды базисных состояний являются комплексными числами. Квантовый компьютер можно рассматривать как сложное интерференционное устройство, в котором интерференция состояний создает вычислительную мощь компьютера.

С возникновения идеи создания квантовых компьютеров математики нашли новую важную задачу: разработать квантовые алгоритмы решения вычислительных задач математики и определить, где есть ускорение и каково оно. В алгоритме Шора, по-видимому, впервые обнаружен феномен, когда класс сложности задачи коренным образом изменяется в зависимости от того, на каких физических принципах строится вычислительный процесс. При выполнении задачи на любом из классических компьютеров принадлежность задачи к классу будет неизменной.

По-видимому, место квантовых компьютеров в компьютерном мире XXI в. можно определить следующим образом: они не вытесняют, а дополняют существующий компьютерный мир. Их надо будет применять в тех случаях, когда они дают большое ускорение решения задачи.

К настоящему времени предложены различные пути реализации квантовых компьютеров [6–15]. Наиболее впечатляющие результаты получены в экспериментах по квантовым вычислениям методом импульсного ядерного магнитного резонанса в молекулярных жидкостях (ансамблевый квантовый компьютер) [6, 7]. Другие авторы предлагают использовать в качестве элементной базы квантовых компьютеров ионы в ловушках в вакууме [8], ядерные спины атомов  $^{31}\text{P}$  в монокристаллическом кремнии [9], спины одиночных электронов в квантовых точках в двумерном газе в полупроводниковых гетероструктурах [10], атомы в резонаторах электромагнитного поля [11]. Возможно создание кубитов на состояниях сверхпроводников, разделенных переходами Джозефсона и различающихся числом зарядов [12, 13] или фазой сверхпроводников [14]. Интересно, что модели квантовых компьютеров могут быть построены на линейных оптических элементах (делители пучка, поляризаторы, фазорращатели, интерферометры) [15].

В ансамблевом ядерном магниторезонансном квантовом компьютере кубитами выступают спины – ядер водорода (протоны) и углерода  $^{13}\text{C}$  в молекулах жидкости. Так, в молекуле три-

хлорэтилена спины ядер двух атомов  $^{13}\text{C}$  и одного протона образуют три кубита (рис. 5.6). Два атома  $^{13}\text{C}$  химически неэквивалентны и поэтому имеют различные частоты ядерного магнитного резонанса  $\omega_A$  и  $\omega_B$  в заданном внешнем постоянном магнитном поле  $B_0$ , протон будет иметь третью резонансную частоту  $\omega_C$ . Подающая импульсы внешнего переменного магнитного поля на частотах  $\omega_A$ ,  $\omega_B$  и  $\omega_C$ , мы селективно управляем квантовой эволюцией любого из этих спинов (выполняем однокубитовые вентили). Между спинами ядер, разделенных одной химической связью  $^1\text{H}$ - $^{13}\text{C}$  и  $^{13}\text{C}$ - $^{13}\text{C}$ , имеется магнитное контактное взаимодействие, что позволяет построить двухкубитовые вентили.

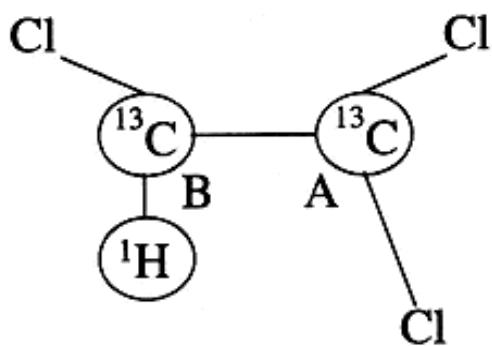


Рис. 5.6. Магниторезонанс. Квантовые кубиты

Макроскопически большое число ( $\sim 10^{20}$ ) молекул в пробирке импульсного ЯМР спектрометра, запрограммированного на выполнение квантового алгоритма на трехкубитовом компьютере  $S_A$ ,  $S_B$ ,  $S_C$  представляет собой ансамбль работающих параллельно квантовых компьютеров. «Ансамблевость» компьютера в данной ситуации позволяет решить трудные проблемы инициализации

компьютера (т. е. приведения всех кубитов в состояние  $|0\rangle$  перед вычислением) и измерения состояния кубитов по завершении процесса вычислений. Состояния  $|0\rangle$  и  $|1\rangle$  некоторого кубита в конечном состоянии определяется путем наблюдения знака (фазы) линии резонансного поглощения: в случае  $|0\rangle$  наблюдается, например, линия поглощения, а при  $|1\rangle$  – излучения.

К настоящему времени на спиновых двух- и трехкубитовых квантовых компьютерах выполнен модельный квантовый алгоритм Дойча – Иозса по определению типа дискретной функции от дискретного аргумента [16], алгоритма Гровера поиска в базе данных [17], алгоритм с квантовой коррекцией ошибок [18].

Эти результаты произвели большое впечатление на научное сообщество. Однако анализ показывает, что масштабирование квантового компьютера на спинах в молекулах на число кубитов порядка  $10^3$  вряд ли возможно: трудно представить,

что такое количество спинов ядер будут иметь различимые частоты резонанса.

Интересна идея создания квантового компьютера на ловушках в вакууме. «Подвешенные» в вакууме ионы (атомы) напрямую осуществляют идею максимально изолированных от окружающего мира квантовых частиц. Связь ионов с окружающим миром сохранена только для удержания ионов в ловушке (электроды с напряжениями) и управления квантовой эволюцией (сфокусированные лазерные пучки). Эксперименты в этом варианте квантового компьютера ведутся в Лос-Аламосе и Национальном институте стандартов США [19, 20].

Большой интерес вызывают предложения по созданию элементов квантовых компьютеров на твердом теле, так как в этом случае можно использовать накопленный опыт микроэлектронной технологии, а сами квантовые компьютеры могли бы иметь сходство с «чипами» микросхем. В [9] предложено использовать в качестве кубитов спины  $S = 1/2$  ядер атомов фосфора  $^{31}\text{P}$  в монокристаллическом кремнии (рис. 5.7).

Подnanoэлектродами А в безспиновом кремнии находятся одиночные неионизованные атомы  $^{31}\text{P}$ . Ядерные спины  $I_1, I_2$  выступают в качестве кубитов. Напряжения на электродах А управляют частотой магнитного резонанса ядерных спинов; с помощью напряжения на электроде J «включается» взаимодействие спинов, необходимое для выполнения операции контролируемое НЕ.

Частотой магнитного резонанса на ядрах  $^{31}\text{P}$  в кремнии можно управлять, подавая наnanoэлектрод над атомом электрическое напряжение  $V$ : оно поляризует электронную оболочку атома и изменяет константу  $A$  так называемого сверхтонкого взаимодействия электронного  $S_e$  и ядерного  $S$  спинов атома:  $H_i = A(V) S_e \cdot S$ . Таким образом достигается селективный доступ внешнего резонансного магнитного поля к спину ядра данного атома. Структура с единичным атомом, встроенным в заданную точку под электродом, отдаленно напоминает структуру полевого транзистора. Затвор последнего управляет движением электронов проводимости от истока к стоку. В случае кубита напряжения на затворе управляют движением электрона внутри атома, поляризуют атом и изменяют резонансную частоту кубита, связанного со спином его ядра.

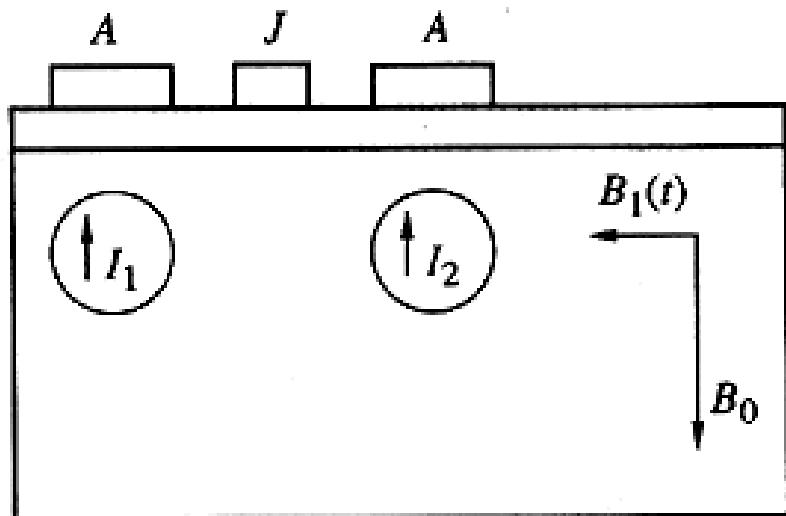


Рис. 5.7. Разрез структуры кремниевого квантового чина

Интересны предложения о создании элементов квантовых компьютеров на сверхпроводниках [12–14]. Одним из достоинств этих предложений является возможность использования структур с наноразмерами (структуры с Джозефсоновскими контактами), технология которых в значительной мере разработана.

Три сегодняшних технологии могут оказаться полезными при построении квантовых компьютеров на твердом теле: молекулярная эпитаксия, нанолитография, зондовая микроскопия. Молекулярная эпитаксия позволяет создавать совершенныеmonoатомные слои кристаллов, т. е. атомный размер достигается по толщине. Методы зондовой микроскопии позволяют, во-первых, наблюдать поверхность тел с атомным разрешением. Во-вторых, зонды можно использовать как технологическое средство типа атомного манипулятора: перемещать, доставлять, снимать атомы с поверхности. Зонды могут работать и как катализаторы локальных поверхностных химических реакций (окисление, травление, осаждение материала), доставляя энергию локального возбуждения (химической активации) в форме электрического тока, напряжения, фотонов, механической энергии (деформации). Наконец, зондовые методы могут сыграть роль приборов для измерения состояний атомных частиц. Методы электроннолучевой нанолитографии с разрешением 1–10 нм также могут занять существенное место в технологии атомных структур квантовых компьютеров.

Другим направлением атомной технологии является вакуумная технология ионов и атомов в ловушках. Эта технология

предусматривает размещение ионов или атомов в области минимума потенциала, создаваемого системой электродов и электромагнитных полей. Для охлаждения (замораживания) теплового движения атомов используется технология лазерного охлаждения. Первоначально технология «ионы в ловушках» развивалась в целях создания квантовых стандартов частоты; в настоящее время большой интерес к этой технологии связан с задачей создания квантовых компьютеров [19, 20].

Технологии с атомным разрешением имеют довольно высокий уровень зрелости и работа с отдельными атомами является экспериментальной реальностью. Тем не менее предстоит пройти большой путь, пока будет построен полномасштабный ( $10^3$ – $10^4$  кубитов) квантовый компьютер. Пока неясно, какой способ построения квантового компьютера окажется предпочтительным. Настоящий этап исследований характеризуется поиском возможностей их построения по всему фронту физики. То и дело возникают новые идеи, новые предложения. Оптимисты полагают, что среди новых идей могут найтись «прорывные», которые приблизят день построения полномасштабного квантового компьютера. По-видимому, одной из таких идей можно считать идею применения метода квантовой коррекции ошибок.

В самом начале развития идей о квантовом компьютере физики обнаружили и грозного противника этой машины. Имя этого противника – **декогерентизация**. Кубиты компьютера нельзя полностью изолировать от внешнего мира: кубиты работают в условиях шумового воздействия внешней среды. Флуктуации напряжений на электродах, шумовые токи, неточности выполнения самих импульсных воздействий на кубиты в ходе вычислительного процесса – все это вносит неконтролируемые ошибки в фазы и амплитуды состояний кубитов в ходе вычислительного процесса. По истечении времени, равном времени декогерентизации квантовых состояний системы кубитов, контролируемый вычислительный процесс прекратится, эволюция квантового компьютера приобретет случайный (диффузионный) характер. Время декогерентизации, как правило, будет меньше времени, необходимого для выполнения сложного алгоритма, состоящего из большого числа ( $-10^9$ ) вентилей.

Выход из этой, казавшейся тупиковой, ситуации был найден в применении методов квантовой коррекции ошибок [21]. Методы коррекции ошибок хорошо известны из теории обычных

(классических) компьютеров. Смысл их в том, что логические  $|0\rangle$  и  $|1\rangle$  кодируются большим числом битов; анализ кодовых комбинаций позволяет найти и удалить ошибку. Эти методы удалось разработать в квантовом варианте, где ошибки могут быть фазовыми и амплитудными. Выяснилось, что если вероятность ошибки при выполнении одной элементарной операции ниже некоторого порогового уровня, вычислительный процесс может длиться сколь угодно долго. Это означает, что операции квантовой коррекции ошибок удаляют из компьютера больше ошибок, чем вносят. Этот вывод очень важен: по существу, он имеет силу теоремы существования полномасштабного квантового компьютера.

### 5.3. Квантовая криптография

Из обширной области разработки квантовых методов связи и криптографии мы коснемся последствий создания квантовых компьютеров и систем связи для двух современных наиболее популярных крипtosистем: для системы с открытым ключом (RSA система, Rivest, Sharnir, Adieman, 1977) и системы с ключом одноразового пользования (Vernam, 1935).

Сразу отметим, что в основе системы RSA лежит предположение о том, что решение математической задачи о разложении больших чисел на простые множители на классических компьютерах невозможно; оно требует экспоненциально большого числа операций и астрономического времени.

Квантовый алгоритм Шора дает возможность вычислить простые множители больших чисел за практически приемлемое время и взломать шифры RSA крипtosистем. Таким образом, для RSA крипtosистем квантовый компьютер – плохая новость.

Для крипtosистем с ключом одноразового пользования квантовые методы связи оказываются хорошей новостью: они позволяют обнаружить наличие подслушивания при передаче ключа. Эта возможность основана на квантовом принципе неопределенности Гейзенберга, который гласит, что измерение изменяет состояние измеряемой квантовой системы. Пусть ключ передается по световолокну с помощью фотонов, и информация закодирована в поляризации фотонов [22]. Тогда подслушивание заключается в перехвате и измерении поляризации пересылаемых фотонов; после измерения они пересылаются адресату.

При наличии подслушивания адресат обнаружит, что 25% фотонов приходят к нему с «неправильной» поляризацией. Если этих ошибок нет, то передача ключа не подслушивается, и им можно пользоваться. Таким образом, квантовые методы обеспечивают гарантированную секретность ключа одноразового пользования. Были проведены эксперименты по передаче ключа на расстояние до 40 км.

Квантовые каналы связи дают и другие возможности.

1. С помощью одного кубита можно передавать 2 бита информации («плотное квантовое кодирование»).

2. Возможна передача неизвестного квантового состояния («квантовая телепортация») по классическому каналу, если абоненты связи предварительно поделили коррелированную пару квантовых частиц. Потенциальные возможности применения этих феноменов еще не выяснены.

Идеи квантового компьютера и квантовой связи (криптография) возникли через сто лет после рождения идей квантовой физики. Возможность построения квантовых компьютеров и систем связи подтверждается современными теоретическими и экспериментальными исследованиями. Новая техника XXI в. рождается путем синтеза новых идей в математике, физике, информатике, технологиях. Взаимодействие фундаментальных отраслей науки и технологий, рождающее новую технику, показано на схеме рис. 5.8. Важно подчеркнуть, что в процессе решения задач квантовой информатики происходит развитие и углубление понимания основ квантовой физики, подвергаются новому анализу и экспериментальной проверке основные ее проблемы – локальности (причинности), скрытых параметров, реальности, неопределенности, дополнительности, измерений, коллапса волновой функции.



Рис. 5.8. Схема взаимодействия фундаментальных отраслей науки и технологии, рождающего новую технику

Квантовые компьютеры, если их удастся построить, будут техникой XXI в. Для их изготовления потребуется развитие технологий на нанометровом и атомном уровне размеров. Эта работа может потребовать значительного времени. Построение квантовых компьютеров было бы еще одним подтверждением принципа неисчерпаемости природы: природа имеет средства для осуществления любой корректно сформулированной задачи.

## 5.4. Искусственный интеллект

Искусственный интеллект (англ. *artificial intelligence*, AI, ИИ) – раздел информатики, изучающий возможность обеспечения разумных рассуждений и действий с помощью вычислительных систем и иных искусственных устройств. При этом в

большинстве случаев заранее неизвестен алгоритм решения задачи.

Согласия в определении того, что именно считать необходимыми и достаточными условиями достижения интеллектуальности не достигнуто. Существует точка зрения, которую, в частности, в явном виде разделяли Норберт Винер, фон Нейман, академики Велихов и Раушенбах, что искусственный интеллект это математическое моделирование всех функций высшей нервной деятельности (в СССР) или всех функций коры головного мозга (в Западных исследованиях). Другие специалисты принимают иные гипотезы, например тест Тьюринга или гипотеза Ньюэлла – Саймона. Обычно к реализации интеллектуальных систем подходят именно с точки зрения моделирования человеческой интеллектуальности. Таким образом, в рамках искусственного интеллекта различают два основных направления:

- символное (семиотическое, нисходящее) основано на моделировании высокоуровневых процессов мышления человека, на представлении и использовании знаний;
- нейрокибернетическое (нейросетевое, восходящее) основано на моделировании отдельных низкоуровневых структур мозга (нейронов).

На рис. 5.9 изображен интеллектуальный гуманоидный робот.

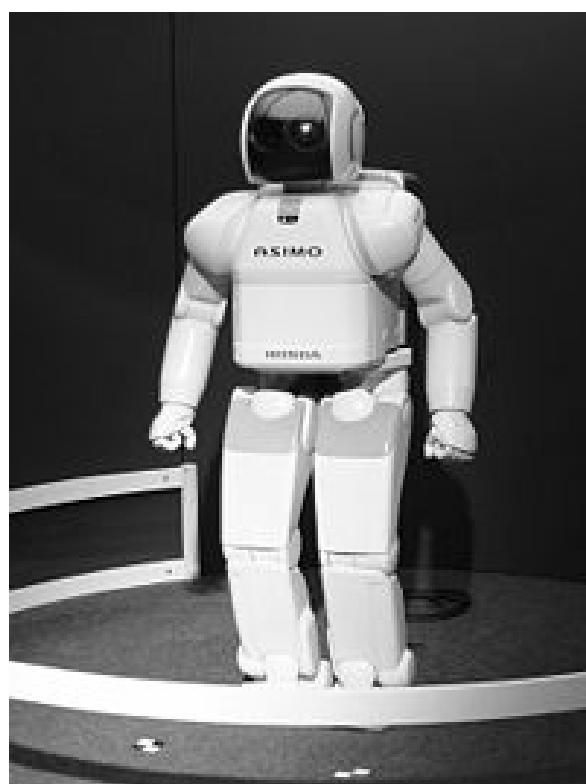


Рис. 5.9. ASIMO – Интеллектуальный гуманоидный робот от Honda

Таким образом, сверхзадачей искусственного интеллекта является построение универсальной, а не специализированной, предназначеннной для решения определенных типов задач компьютерной интеллектуальной системы, которая находила бы решения всех (или хотя бы большинства) неформализованных задач, с эффективностью, сравнимой с человеческой или превосходящей его. В качестве критерия и конструктивного определения интеллектуальности предложен мысленный эксперимент, известный как тест Тьюринга. В современной постановке можно рассматривать эту задачу как задачу приближения сингулярности в ее сверхинтеллектуальном понимании.

На данный момент не существует систем искусственного интеллекта, однозначно отвечающих основным задачам, обозначенным выше. Успехи в исследовании аналоговых и обратимых вычислений позволяют совершить большой шаг вперед в построении систем искусственного интеллекта.

Наиболее часто используемые при построении систем искусственного интеллекта парадигмы программирования – функциональное программирование и логическое программирование. От традиционных структурного и объектно-ориентированного подходов к разработке программной логики они отличаются нелинейным выводом решений и низкоуровневыми средствами поддержки анализа и синтеза структур данных.

### 5.4.1. Подходы к изучению

Существуют различные подходы к построению систем ИИ. На данный момент можно выделить 4 достаточно различных подхода:

- Логический подход. Основой для логического подхода служит Булева алгебра. Каждый программист знаком с нею и с логическими операторами с тех пор, когда он осваивал оператор IF. Свое дальнейшее развитие Булева алгебра получила в виде исчисления предикатов – в котором она расширена за счет введения предметных символов, отношений между ними, квантов – существования и всеобщности. Практически каждая система ИИ, построенная на логическом принципе, представляет собой машину доказательства теорем. При этом исходные данные хранятся в базе данных в виде аксиом, правила логического вывода как отношения между ними. Кроме того, каждая такая машина имеет блок генерации цели, и система вывода пытается доказать

данную цель как теорему. Если цель доказана, то трассировка примененных правил позволяет получить цепочку действий, необходимых для реализации поставленной цели (такая система известна как экспертные системы). Мощность такой системы определяется возможностями генератора целей и машиной доказательства теорем. Добиться большей выразительности логическому подходу позволяет такое сравнительно новое направление, как нечеткая логика. Основным ее отличием является то, что правдивость высказывания может принимать в ней кроме да/нет (1/0) еще и промежуточные значения – не знаю (0,5), пациент скорее жив, чем мертв (0,75), пациент скорее мертв, чем жив (0,25). Данный подход больше похож на мышление человека, поскольку он на вопросы редко отвечает только да или нет.

■ Под структурным подходом мы подразумеваем здесь попытки построения ИИ путем моделирования структуры человеческого мозга. Одной из первых таких попыток был перцептрон Френка Розенблатта. Основной моделируемой структурной единицей в перцептранах (как и в большинстве других вариантов моделирования мозга) является нейрон. Позднее возникли и другие модели, которые большинству известны под термином нейронные сети (НС). Эти модели различаются по строению отдельных нейронов, по топологии связей между ними и по алгоритмам обучения. Среди наиболее известных сейчас вариантов НС можно назвать НС с обратным распространением ошибки, сети Хопфилда, стохастические нейронные сети. В более широком смысле такой подход известен как Коннективизм.

■ Эволюционный подход. При построении систем ИИ по данному подходу основное внимание уделяется построению начальной модели, и правилам, по которым она может изменяться (эволюционировать). Причем модель может быть составлена по самым различным методам, это может быть и НС и набор логических правил и любая другая модель. После этого мы включаем компьютер и он, на основании проверки моделей отбирает самые лучшие из них, на основании которых по самым различным правилам генерируются новые модели. Среди эволюционных алгоритмов классическим считается генетический алгоритм.

■ Имитационный подход. Данный подход является классическим для кибернетики с одним из ее базовых понятий «черный ящик». Объект, поведение которого имитируется, как раз и представляет собой «черный ящик». Нам не важно, что у

него и у модели внутри и как он функционирует, главное, чтобы наша модель в аналогичных ситуациях вела себя точно так же. Таким образом, здесь моделируется другое свойство человека – способность копировать то, что делают другие, не вдаваясь в подробности, зачем это нужно. Зачастую эта способность экономит ему массу времени, особенно в начале его жизни.

В рамках гибридных интеллектуальных систем пытаются объединить эти направления. Экспертные правила умозаключений могут генерироваться нейронными сетями, а порождающие правила получают с помощью статистического обучения.

Многообещающий новый подход, называемый усиление интеллекта, рассматривает достижение ИИ в процессе эволюционной разработки как побочный эффект усиления человеческого интеллекта технологиями.

#### 5.4.2. Направление исследований

Анализируя историю ИИ, можно выделить такое обширное направление как моделирование рассуждений. Долгие годы развитие этой науки двигалось именно в этом направлении, теперь это одна из самых развитых областей в современном ИИ. Моделирование рассуждений подразумевает создание символьических систем, на входе которых поставлена некая задача, а на выходе требуется ее решение. Как правило, предлагаемая задача уже формализована, т. е. переведена в математическую форму, но либо не имеет алгоритма решения, либо он слишком сложен, трудоемок и т. п. В это направление входят: автоматическое доказательство теорем; оптимальное и стратегическое планирование и диспетчеризация; принятие решений, теория игр; задачи на предсказание.

Немаловажным направлением является обработка естественного языка, в рамках которого проводится анализ возможностей понимания, обработки и генерации текстов на «человеческом» языке. В частности, здесь еще не решена проблема машинного перевода текстов с одного языка на другой. По своей природе, оригинальный тест Тьюринга связан с этим направлением.

Согласно мнению многих ученых, важным свойством интеллекта является способность к обучению. Таким образом, на первый план выходит инженерия знаний, объединяющая задачи получения знаний из простой информации, их систематизации и

использования. Достижения в этой области затрагивают почти все остальные направления исследований ИИ. Также, здесь нельзя не отметить две важные подобласти. Первая из них – машинное обучение – касается процесса самостоятельного получения знаний интеллектуальной системой уже в процессе ее работы. Второе связано с созданием экспертных систем – программ, использующих специализированные базы знаний для получения достоверных заключений по какой-либо проблеме.

Большие и интересные достижения имеются в области моделирования биологических систем. В общем говоря, сюда относятся несколько независимых задач. Нейронные сети используются для решения нечетких и сложных проблем, таких как разпознавание геометрических фигур или кластеризация объектов. Генетические алгоритмы основаны на идее, что некая программа может быть более эффективной, если позаимствует лучшие характеристики у других программ («родителей»). «Муравьиный» интеллект можно получить, если заставить массу «не очень интеллектуальных» программ взаимодействовать должным образом вместе.

Другие области: распознавание образов; нелинейное управление и робототехника; машинное зрение, виртуальная реальность и обработка изображений ИИ в играх и боты в компьютерных играх; машинное творчество; сетевая безопасность.

В начале XVII в. Рене Декарт предположил, что животное – некий сложный механизм, тем самым сформулировав механистическую теорию. В 1623 г. Вильгельм Шиккард (нем. Wilhelm Schickard) построил первую механическую цифровую вычислительную машину, за которой последовали машины Блеза Паскаля (1643) и Лейбница (1671). Лейбниц также был первым, кто описал современную двоичную систему счисления, хотя до него этой системой периодически увлекались многие великие ученые. В XIX в. Чарльз Бэббидж и Ада Лавлейс работали над программируемой механической вычислительной машиной.

В 1910–1913 гг. Берtrand Рассел и А. Н. Уайтхэд опубликовали работу «Принципы математики», которая произвела революцию в формальной логике. В 1941 г. Конрад Цузе построил первый работающий программно-контролируемый компьютер. Уоррен Маккалок и Валтер Питтс в 1943 г. опубликовали A Logical Calculus of the Ideas Immanent in Nervous Activity, который заложил основы нейронных сетей.

### 5.4.3. Современное положение дел

В настоящий момент в создании искусственного интеллекта (в первоначальном смысле этого слова, экспертные системы и шахматные программы сюда не относятся) наблюдается дефицит идей. Практически все подходы были опробованы, но к возникновению искусственного разума ни одна исследовательская группа так и не подошла.

Некоторые из самых впечатляющих гражданских ИИ систем: Deep Blue – победил чемпиона мира по шахматам. (Матч Каспаров против суперЭВМ не принес удовлетворения ни компьютерщикам, ни шахматистам, и система не была признана Каспаровым, хотя оригинальные компактные шахматные программы неотъемлемый элемент шахматного творчества. Затем линия суперкомпьютеров IBM проявилась в проектах brute force BluGene (молекулярное моделирование) и моделирование системы пирамидалных клеток в швейцарском центре Blue Brain. Данная история – пример запутанных и засекреченных отношений ИИ, бизнеса, и национальных стратегических задач.)

Mycin – одна из ранних экспертных систем, которая могла диагностировать небольшой набор заболеваний, причем часто так же точно, как и доктора.

20q – проект, основанный на идеях ИИ, по мотивам классической игры «20 вопросов». Стал очень популярен после появления в интернете на сайте 20q.net.

Распознавание речи. Системы, такие как ViaVoice способны обслуживать потребителей.

Роботы в ежегодном турнире RoboCup соревнуются в упрощенной форме футбола.

Банки применяют системы искусственного интеллекта (СИИ) в страховой деятельности (актуарная математика) при игре на бирже и управлении собственностью. В августе 2001 г. роботы выиграли у людей в импровизированном соревновании по трейдингу (BBC News, 2001). Методы распознавания образов (включая, как более сложные и специализированные, так и нейронные сети) широко используют при оптическом и акустическом распознавании (в том числе текста и речи), медицинской диагностике, спам-фильтрах, в системах ПВО (определение целей), а также для обеспечения ряда других задач национальной безопасности.

Разработчики компьютерных игр вынуждены применять ИИ той или иной степени проработанности. Стандартными задачами ИИ в играх являются нахождение пути в двухмерном или трехмерном пространстве, имитация поведения боевой единицы, расчет верной экономической стратегии и т. д.

В настоящее время просматриваются два направления развития ИИ:

- Первое заключается в решении проблем, связанных с приближением специализированных систем ИИ к возможностям человека и их интеграции, которая реализована природой человека.
- Второе заключается в создании Искусственного Разума, представляющего интеграцию уже созданных систем ИИ в единую систему, способную решать проблемы человечества.

Искусственный интеллект тесно связан с трансгуманизмом. А вместе с нейрофизиологией и когнитивной психологией он образует более общую науку, называемую когнитологией. Отдельную роль в искусственном интеллекте играет философия.

#### **5.4.4. Философия искусственного интеллекта**

Наука «о создании искусственного разума» не могла не привлечь внимание философов. С появлением первых интеллектуальных систем были затронуты фундаментальные вопросы о человеке и знании, а отчасти о мироустройстве. С одной стороны, они неразрывно связаны с этой наукой, а с другой – привносят в нее некоторый хаос. Среди исследователей ИИ до сих пор не существует какой-либо доминирующей точки зрения на критерии интеллектуальности, систематизацию решаемых целей и задач, нет даже строгого определения науки.

Наиболее горячие споры в философии искусственного интеллекта вызывает вопрос возможности мышления творения человеческих рук. Вопрос «Может ли машина мыслить?», который подтолкнул исследователей к созданию науки о моделировании человеческого разума, был поставлен Алланом Тьюрингом в 1950 г. Две основные точки зрения на этот вопрос носят названия гипотез сильного и слабого искусственного интеллекта.

Термин «сильный искусственный интеллект» ввел Джон Серль, его же словами подход и характеризуется:

Более того, такая программа будет не просто моделью разума; она в буквальном смысле слова сама и будет разумом, в том же смысле, в котором человеческий разум – это разум.

Напротив, сторонники слабого ИИ предпочитают рассматривать программы лишь как инструмент, позволяющий решать те или иные задачи, которые не требуют полного спектра человеческих познавательных способностей.

В своем мысленном эксперименте «Китайская комната», Джон Серль показывает, что прохождение теста Тьюринга не является критерием наличия у машины подлинного процесса мышления.

Мышление есть процесс обработки находящейся в памяти информации: анализ, синтез и самопрограммирование.

Аналогичную позицию занимает и Роджер Пенроуз, который в своей книге «Новый ум короля» аргументирует невозможность получения процесса мышления на основе формальных систем.

Существуют разные точки зрения на этот вопрос. Аналитический подход предполагает анализ высшей нервной деятельности человека до низшего, неделимого уровня (функция высшей нервной деятельности, элементарная реакция на внешние раздражители (стимулы), раздражение синапсов совокупности связанных функцией нейронов) и последующее воспроизведение этих функций.

Некоторые специалисты за интеллект принимают способность рационального, мотивированного выбора, в условиях недостатка информации. То есть интеллектуальной просто считается та программа деятельности (не обязательно реализованная на современных ЭВМ), которая сможет выбрать из определенного множества альтернатив, например, куда идти в случае «налево пойдешь...», «направо пойдешь...», «прямо пойдешь...». Также с проблемами искусственного интеллекта тесно связана эпистемология – наука о знании в рамках философии. Философы, занимающиеся данной проблематикой, решают вопросы, схожие с теми, которые решаются инженерами ИИ о том, как лучше представлять и использовать знания и информацию.

Среди последователей авраамических религий существует несколько точек зрения на возможность создания ИИ на основе структурного подхода. По одной из них мозг, работу которого пытаются имитировать системы, по их мнению, не участвует в процессе мышления, не является источником сознания и какой-либо другой умственной деятельности. Создание ИИ на основе структурного подхода невозможно.

В соответствии с другой точкой зрения, мозг участвует в процессе мышления, но в виде «передатчика» информации от души. Мозг ответственен за такие «простые» функции, как безусловные рефлексы, реакция на боль и т. п. Создание ИИ на основе структурного подхода возможно, если конструируемая система сможет выполнять «передаточные» функции. Обе позиции не соответствуют данным современной науки.

По мнению многих буддистов, ИИ возможен. Так, духовный лидер Далай-лама XIV не исключает возможности существования сознания на компьютерной основе.

Раэлиты активно поддерживают разработки в области искусственного интеллекта.

В научно-фантастической литературе ИИ чаще всего изображается как сила, которая пытается свергнуть власть человека (Омниус, HAL 9000, Скайнет, Colossus, Матрица и репликант) или обслуживающий гуманоид (C-3PO, Data, KITT и KARR, Двухсотлетний человек). Неизбежность доминирования над миром ИИ, вышедшего из под контроля, оспаривается такими фантастами, как Айзек Азимов и Кевин Уорвик.

Любопытное видение будущего представлено в романе «Выбор по Тьюрингу» писателя-фантаста Гарри Гаррисона и ученого Марвина Мински. Авторы рассуждают на тему утраты человечности у человека, в мозг которого была вживлена ЭВМ, и приобретения человечности машиной с ИИ, в память которой была скопирована информация из головного мозга человека.

Некоторые научные фантасты, например Вернор Виндж, также размышляли над последствиями появления ИИ, которое, по-видимому, вызовет резкие драматические изменения в обществе. Такой период называют технологической сингулярностью.

По мнению С. Бобровского [24], основные проблемы искусственного интеллекта связаны с ресурсами.

Сообщения об уникальных достижениях специалистов в области искусственного интеллекта (ИИ), суливших невиданные возможности, пропали со страниц научно-популярных изданий много лет назад. Эйфория, связанная с первыми практическими успехами в сфере ИИ, прошла довольно быстро, потому что перейти от исследования экспериментальных компьютерных моделей к решению прикладных задач реального мира оказалось гораздо сложнее, чем предполагалось.

На трудности такого перехода обратили внимание специалисты всего мира, и после детального анализа выяснилось, что практически все проблемы связаны с нехваткой ресурсов двух типов: компьютерных (вычислительной мощности, емкости оперативной и внешней памяти) и людских (наукоемкая разработка интеллектуального ПО требует привлечения ведущих специалистов из разных областей знания и организации долгосрочных исследовательских проектов).

К сегодняшнему дню ресурсы первого типа вышли (или выйдут в ближайшие пять-десять лет) на уровень, позволяющий системам ИИ решать весьма сложные для человека практические задачи. А вот с ресурсами второго типа ситуация в мире даже ухудшается – именно поэтому достижения в сфере ИИ связываются в основном с небольшим числом ведущих ИИ-центров при крупнейших университетах.

#### **5.4.5. Перспективные технологии**

Можно попытаться составить общую картину развития различных направлений ИИ путем анализа тематики европейских и американских конференций по ИИ за последние несколько лет (ежемесячно в мире проходят десятки таких конференций). Сначала вкратце рассмотрим наиболее активно развивающиеся подходы ИИ – в порядке убывания их популярности у специалистов. Надо отметить, что меньшая популярность нередко связана не столько с потенциалом технологии, сколько с отдаленностью перспектив ее прикладной реализации (например, крайне высокий потенциал кибер заводов пока не вызывает серьезного интереса из-за наличия множества нерешенных задач по их управлению).

##### *I. Нейронные сети*

Это направление стабильно держится на первом месте. Продолжается совершенствование алгоритмов обучения и классификации в масштабе реального времени, обработки естественных языков, распознавания изображений, речи, сигналов, а также создание моделей интеллектуального интерфейса, подстраивающегося под пользователя. Среди основных прикладных задач, решаемых с помощью нейронных сетей, – финансовое прогнозирование, раскопка данных, диагностика систем, контроль за деятельностью сетей, шифрование данных. В послед-

ние г. идет усиленный поиск эффективных методов синхронизации работы нейронных сетей на параллельных устройствах.

### *II. Эволюционные вычисления*

На развитие сферы эволюционных вычислений (ЭВ; автономное и адаптивное поведение компьютерных приложений и робототехнических устройств) значительное влияние оказали прежде всего инвестиции в нанотехнологии. ЭВ затрагивают практические проблемы самосборки, самоконфигурирования и самовосстановления систем, состоящих из множества одновременно функционирующих узлов. При этом удается применять научные достижения из области цифровых автоматов.

Другой аспект ЭВ – использование для решения повседневных задач автономных агентов в качестве персональных секретарей, управляющих личными счетами, ассистентов, отбирающих нужные сведения в сетях с помощью поисковых алгоритмов третьего поколения, планировщиков работ, личных учителей, виртуальных продавцов и т. д. Сюда же относится робототехника и все связанные с ней области. Основные направления развития – выработка стандартов, открытых архитектур, интеллектуальных оболочек, языков сценариев/запросов, методологий эффективного взаимодействия программ и людей.

Модели автономного поведения предполагается активно внедрять во всевозможные бытовые устройства, способные убирать помещения, заказывать и готовить пищу, водить автомобили и т. п.

В дальнейшем для решения сложных задач (быстрого исследования содержимого Сети, больших массивов данных наподобие геномных) будут использоваться коллективы автономных агентов. Для этого придется заняться изучением возможных направлений эволюции подобных коллективов, планирования совместной работы, способов связи, группового самообучения, кооперативного поведения в нечетких средах с неполной информацией, коалиционного поведения агентов, объединяющихся «по интересам», научиться разрешать конфликты взаимодействия и т. п.

Особняком стоят социальные аспекты – как общество будет на практике относиться к таким сообществам интеллектуальных программ.

*III. На третьем–пятом местах (по популярности) располагаются большие группы различных технологий.*

III.1. Нечеткая логика. Системы нечеткой логики активнее всего будут применяться преимущественно в гибридных управляющих системах.

### III.2. Обработка изображений

Продолжится разработка способов представления и анализа изображений (сжатие, кодирование при передаче с использованием различных протоколов, обработка биометрических образов, снимков со спутников), независимых от устройств воспроизведения, оптимизации цветового представления на экране и при выводе на печать, распределенных методов получения изображений.

Дальнейшее развитие получат средства поиска, индексирования и анализа смысла изображений, согласования содержимого справочных каталогов при автоматической каталогизации, организации защиты от копирования, а также машинное зрение, алгоритмы распознавания и классификации образов.

### III.3. Экспертные системы

Спрос на экспертные системы остается на достаточно высоком уровне. Наибольшее внимание сегодня привлечено к системам принятия решений в масштабе времени, близком к реальному, средствам хранения, извлечения, анализа и моделирования знаний, системам динамического планирования.

### III.4. Интеллектуальные приложения

Рост числа интеллектуальных приложений, способных быстро находить оптимальные решения комбинаторных проблем (возникающих, например, в транспортных задачах), связан с производственным и промышленным ростом в развитых странах.

### III.5. Распределенные вычисления

Распространение компьютерных сетей и создание высокопроизводительных кластеров вызвали интерес к вопросам распределенных вычислений – балансировке ресурсов, оптимальной загрузке процессоров, самоконфигурированию устройств на максимальную эффективность, отслеживанию элементов, требующих обновления, выявлению несоответствий между объектами сети, диагностированию корректной работы программ, моделированию подобных систем.

### III.6. ОС РВ

Появление автономных робототехнических устройств повышает требования к ОС реального времени – организации процессов самонастройки, планирования обслуживающих операций.

ций, использования средств ИИ для принятия решений в условиях дефицита времени.

### III.7. Интеллектуальная инженерия

Особую заинтересованность в ИИ проявляют в последние годы компании, занимающиеся организацией процессов разработки крупных программных систем (программной инженерий). Методы ИИ все чаще используются для анализа исходных текстов и понимания их смысла, управления требованиями, выработкой спецификаций, проектирования, кодогенерации, верификации, тестирования, оценки качества, выявления возможности повторного использования, решения задач на параллельных системах.

Программная инженерия постепенно превращается в так называемую интеллектуальную инженерию, рассматривающую более общие проблемы представления и обработки знаний (пока основные усилия в интеллектуальной инженерии сосредоточены на способах превращения информации в знания).

### III.8. Самоорганизующиеся СУБД

Самоорганизующиеся СУБД будут способны гибко подстраиваться под профиль конкретной задачи и не потребуют администрирования.

## *IV. Следующая по популярности группа технологий ИИ.*

IV.1. Автоматический анализ естественных языков (лексический, морфологический, терминологический, выявление неизвестных слов, распознавание национальных языков, перевод, коррекция ошибок, эффективное использование словарей).

IV.2. Высокопроизводительный OLAP-анализ и раскопка данных, способы визуального задания запросов.

IV.3. Медицинские системы, консультирующие врачей в экстренных ситуациях, роботы-манипуляторы для выполнения точных действий в ходе хирургических операций.

IV.4. Создание полностью автоматизированных кибер заводов, гибкие экономные производства, быстрое прототипирование, планирование работ, синхронизация цепочек снабжения, авторизации финансовых транзакций путем анализа профилей пользователей.

*V. Небольшое число конференций посвящено выработке прикладных методов, направленных на решение конкретных задач промышленности в области финансов, медицины и математики.*

Традиционно высок интерес к ИИ в среде разработчиков игр и развлекательных программ (это отдельная тема). Среди новых направлений их исследований – моделирование социального поведения, общения, человеческих эмоций, творчества.

#### **5.4.6. Искусственный интеллект в Стране восходящего солнца**

Профиль японских конференций (а этой стране принадлежит немало оригинальных и уникальных достижений в области ИИ), не сильно отличается от общемирового. Тем интереснее эти отличия – на них сосредоточены значительные объемы инвестиций государственных и частных японских организаций. Среди направлений, более популярных в Японии в сравнении с европейскими и американскими школами ИИ, отметим следующие: создание и моделирование работы э-рынков и э-аукционов, биоинформатика (электронные модели клеток, анализ белковой информации на параллельных компьютерах, ДНК-вычислители), обработка естественных языков (самообучающиеся многоязычные системы распознавания и понимания смысла текстов), Интернет (интеграция Сети и всевозможных датчиков реального времени в жилых домах, интеллектуальные интерфейсы, автоматизация рутинных работ на основе формализации прикладных и системных понятий Интернета, итерационные технологии выделения нужных сведений из больших объемов данных), робототехника (машинное обучение, эффективное взаимодействие автономных устройств, организация движения, навигация, планирование действий, индексация информации, описывающей движение), способы представления и обработки знаний (повышение качества знаний, методы получения знаний от людей-экспертов, раскопка и поиск данных, решение на этой основе задач реального мира – например, управления документооборотом).

Много работ посвящено алгоритмам логического вывода, обучению роботов, планированию ими действий.

#### **5.4.7. Военные технологии**

Исследования в области нейронных сетей, позволяющих получить хорошие (хотя и приближенные) результаты при решении сложных задач управления, часто финансирует военное

научное агентство DARPA. Пример – проект Smart Sensor Web, который предусматривает организацию распределенной сети разнообразных датчиков, синхронно работающих на поле боя. Каждый объект (стоимостью не более долл.300) в такой сети представляет собой источник данных – визуальных, электромагнитных, цифровых, инфракрасных, химических и т. п. Проект требует новых математических методов решения многомерных задач оптимизации. Ведутся работы по автоматическому распознаванию целей, анализу и предсказанию сбоев техники по отклонениям от типовых параметров ее работы (например, по звуку).

Операция «Буря в пустыне» стала стимулом к развитию экспертных систем с продвинутым ИИ, применяемым в области снабжения. На разработках, связанных с технологиями машинного зрения, основано все высокоточное оружие.

В СМИ нередко можно прочитать о грядущих схватках самостоятельно действующих армий самоходных машин-роботов и беспилотных самолетов. Однако существует ряд нерешенных научных проблем, не позволяющих в ближайшие десятилетия превратить подобные прогнозы в реальность. Прежде всего это недостатки систем автоматического распознавания, не способных правильно анализировать видеинформацию в масштабе реального времени. Не менее актуальны задачи разрешения коллизий в больших сообществах автономных устройств, абсолютно точно распознавания своих и чужих, выбора подлежащих уничтожению целей, алгоритмов поведения в незнакомой среде и т. п. Поэтому на практике военные пытаются достичь менее масштабных целей. Значительные усилия вкладываются в исследования по распознаванию речи, создаются экспертные и консультационные системы, призванные автоматизировать рутинные работы и снизить нагрузку на пилотов. Нейронные сети достаточно эффективно применяются для обработки сигналов сонаров и отличения подводных камней от мин. Генетические алгоритмы используются для эвристического поиска решения уравнений, определяющих работу военных устройств (систем ориентации, навигации), а также в задачах распознавания – для разделения искусственных и естественных объектов, распознавания типов военных машин, анализа изображения, получаемого от камеры с низким разрешением или инфракрасных датчиков.

Ключевым фактором, определяющим сегодня развитие ИИ-технологий, считается темп роста вычислительной мощности компьютеров, так как принципы работы человеческой психики по-прежнему остаются неясными (на доступном для моделирования уровне детализации). Поэтому тематика ИИ-конференций выглядит достаточно стандартно и по составу почти не меняется уже довольно давно. Но рост производительности современных компьютеров в сочетании с повышением качества алгоритмов периодически делает возможным применение различных научных методов на практике. Так случилось с интеллектуальными игрушками, так происходит с домашними роботами.

Снова будут интенсивно развиваться временно забытые методы простого перебора вариантов (как в шахматных программах), обходящиеся крайне упрощенным описанием объектов. Но с помощью такого подхода (главный ресурс для его успешного применения – производительность) удастся решить, как ожидается, множество самых разных задач (например, из области криптографии). Уверенно действовать автономным устройствам в сложном мире помогут достаточно простые, но ресурсоемкие алгоритмы адаптивного поведения. При этом ставится цель разрабатывать системы, не внешне похожие на человека, а действующие, как человек.

Ученые пытаются заглянуть и в более отдаленное будущее. Можно ли создать автономные устройства, способные при необходимости самостоятельно собирать себе подобные копии (размножаться)? Способна ли наука создать соответствующие алгоритмы? Сможем ли мы контролировать такие машины? Ответов на эти вопросы пока нет.

Продолжится активное внедрение формальной логики в прикладные системы представления и обработки знаний. В то же время такая логика не способна полноценно отразить реальную жизнь, и произойдет интеграция различных систем логического вывода в единых оболочках. При этом, возможно, удастся перейти от концепции детального представления информации об объектах и приемов манипулирования этой информацией к более абстрактным формальным описаниям и применению универсальных механизмов вывода, а сами объекты будут характеризоваться небольшим массивом данных, основанных на вероятностных распределениях характеристик.

Сфера ИИ, ставшая зрелой наукой, развивается постепенно – медленно, но неуклонно продвигаясь вперед. Поэтому результаты достаточно хорошо прогнозируемые, хотя на этом пути не исключены и внезапные прорывы, связанные со стратегическими инициативами. Например, в 80-х гг. национальная компьютерная инициатива США вывела немало направлений ИИ из лабораторий и оказала существенное влияние на развитие теории высокопроизводительных вычислений и ее применение во множестве прикладных проектов. Такие инициативы будут появляться скорее всего на стыках разных математических дисциплин – теории вероятности, нейронных сетей, нечеткой логики.

Исторически сложились три основных направления в моделировании ИИ:

В рамках первого подхода объектом исследований являются структура и механизмы работы мозга человека, а конечная цель заключается в раскрытии тайн мышления. Необходимыми этапами исследований в этом направлении являются построение моделей на основе психофизиологических данных, проведение экспериментов с ними, выдвижение новых гипотез относительно механизмов интеллектуальной деятельности, совершенствование моделей и т. д.

Второй подход в качестве объекта исследования рассматривает ИИ. Здесь речь идет о моделировании интеллектуальной деятельности с помощью вычислительных машин. Целью работ в этом направлении является создание алгоритмического и программного обеспечения вычислительных машин, позволяющего решать интеллектуальные задачи не хуже человека.

Наконец, третий подход ориентирован на создание смешанных человеко-машинных, или, как еще говорят, интерактивных интеллектуальных систем, на симбиоз возможностей естественного и искусственного интеллекта. Важнейшими проблемами в этих исследованиях является оптимальное распределение функций между естественным и искусственным интеллектом и организация диалога между человеком и машиной.

Самыми первыми интеллектуальными задачами, которые стали решаться при помощи ЭВМ, были логические игры (шашки, шахматы), доказательство теорем. Хотя, правда здесь надо отметить еще кибернетические игрушки типа «электронной мыши» Клода Шеннона, которая управлялась сложной релейной схемой. Эта мышка могла «исследовать» лабиринт, и находить

выход из него. Кроме того, помещенная в уже известный ей лабиринт, она не искала выход, а сразу же, не заглядывая в тупиковые ходы, выходила из лабиринта.

Американский кибернетик А. Самуэль составил для вычислительной машины программу, которая позволяет ей играть в шашки, причем в ходе игры машина обучается или, по крайней мере, создает впечатление, что обучается, улучшая свою игру на основе накопленного опыта. В 1962 г. эта программа сразилась с Р. Нили, сильнейшим шашистом в США и победила.

Каким образом машине удалось достичь столь высокого класса игры? Естественно, что в машину были программно заложены правила игры так, что выбор очередного хода был подчинен этим правилам. На каждой стадии игры машина выбирала очередной ход из множества возможных ходов согласно некоторому критерию качества игры. В шашках (как и в шахматах) обычно невыгодно терять свои фигуры, и, напротив, выгодно брать фигуры противника. Игрок (будь он человек или машина), который сохраняет подвижность своих фигур и право выбора ходов и в то же время держит под боем большое число полей на доске, обычно играет лучше своего противника, не придающего значения этим элементам игры. Описанные критерии хорошей игры сохраняют свою силу на протяжении всей игры, но есть и другие критерии, которые относятся к отдельным ее стадиям – дебюту, миттельшпилю, эндшпилю.

Разумно сочетая такие критерии (например, в виде линейной комбинации с экспериментально подбираемыми коэффициентами или более сложным образом), можно для оценки очередного хода машины получить некоторый числовой показатель эффективности – оценочную функцию. Тогда машина, сравнив между собой показатели эффективности очередных ходов, выберет ход, соответствующий наибольшему показателю. Подобная автоматизация выбора очередного хода не обязательно обеспечивает оптимальный выбор, но все же это какой-то выбор, и на его основе машина может продолжать игру, совершенствуя свою стратегию (образ действия) в процессе обучения на прошлом опыте. Формально обучение состоит в подстройке параметров (коэффициентов) оценочной функции на основе анализа проведенных ходов и игр с учетом их исхода.

По мнению А. Самуэля, машина, использующая этот вид обучения, может научиться играть лучше, чем средний игрок, за относительно короткий период времени.

Можно сказать, что все эти элементы интеллекта, продемонстрированные машиной в процессе игры в шашки, сообщены ей автором программы. Отчасти это так. Но не следует забывать, что программа эта не является «жесткой», заранее продуманной во всех деталях. Она совершенствует свою стратегию игры в процессе самообучения. И хотя процесс «мышления» у машины существенно отличен от того, что происходит в мозгу играющего в шашки человека, она способна у него выиграть.

Ярким примером сложной интеллектуальной игры до недавнего времени являлись шахматы. В 1974 г. состоялся международный шахматный турнир машин, снабженных соответствующими программами. Как известно, победу на этом турнире одержала советская машина с шахматной программой «Каисса».

Почему здесь употреблено «до недавнего времен»? Дело в том, что недавние события показали, что, несмотря на довольно большую сложность шахмат, и невозможность, в связи с этим произвести полный перебор ходов, возможность перебора их на большую глубину, чем обычно, очень увеличивает шансы на победу. К примеру, по сообщениям в печати, компьютер фирмы IBM, победивший Каспарова, имел 256 процессоров, каждый из которых имел 4 Гб дисковой памяти и 128 Мб оперативной. Весь этот комплекс мог просчитывать более 100 000 000 ходов в секунду. До недавнего времени редкостью был компьютер, могущий делать такое количество целочисленных операций в секунду, а здесь мы говорим о ходах, которые должны быть сгенерированы и для которых просчитаны оценочные функции. Хотя, с другой стороны, этот пример говорит о могуществе и универсальности переборных алгоритмов.

В настоящее время существуют и успешно применяются программы, позволяющие машинам играть в деловые или военные игры, имеющие большое прикладное значение. Здесь также чрезвычайно важно придать программам присущие человеку способность к обучению и адаптации. Одной из наиболее интересных интеллектуальных задач, также имеющей огромное прикладное значение, является задача обучения распознавания образов и ситуаций. Решением ее занимались и продолжают заниматься представители различных наук – физиологи, психологи,

математики, инженеры. Такой интерес к задаче стимулировался фантастическими перспективами широкого практического использования результатов теоретических исследований: читающие автоматы, системы ИИ, ставящие медицинские диагнозы, проводящие криминалистическую экспертизу и т. п., а также роботы, способные распознавать и анализировать сложные сенсорные ситуации.

В 1957 г. американский физиолог Ф. Розенблatt предложил модель зрительного восприятия и распознавания – перцепtron. Появление машины, способной обучаться понятиям и распознавать предъявляемые объекты, оказалось чрезвычайно интересным не только физиологам, но и представителям других областей знания и породило большой поток теоретических и экспериментальных исследований.

Перцепtron или любая программа, имитирующая процесс распознавания, работают в двух режимах: в режиме обучения и в режиме распознавания. В режиме обучения некто (человек, машина, робот или природа), играющий роль учителя, предъявляет машине объекты и о каждом из них сообщает, к какому понятию (классу) он принадлежит. По этим данным строится решающее правило, являющееся, по существу, формальным описанием понятий. В режиме распознавания машине предъявляются новые объекты (вообще говоря, отличные от ранее предъявленных), и она должна их классифицировать, по возможности, правильно.

Проблема обучения распознаванию тесно связана с другой интеллектуальной задачей – проблемой перевода с одного языка на другой, а также обучения машины языку. При достаточно формальной обработке и классификации основных грамматических правил и приемов пользования словарем можно создать вполне удовлетворительный алгоритм для перевода, скажем научного или делового текста. Для некоторых языков такие системы были созданы еще в конце 60-х гг. Однако для того, чтобы связно перевести достаточно большой разговорный текст, необходимо понимать его смысл. Работы над такими программами ведутся уже давно, но до полного успеха еще далеко. Имеются также программы, обеспечивающие диалог между человеком и машиной на урезанном естественном языке.

Что же касается моделирования логического мышления, то хорошей модельной задачей здесь может служить задача автоматизации доказательства теорем. Начиная с 1960 г. был разработан ряд программ, способных находить доказательства теорем в исчислении предикатов первого порядка. Эти программы обладают, по словам американского специалиста в области ИИ Дж. Маккатти, «здравым смыслом», т. е. способностью делать дедуктивные заключения.

В программе К. Грина и др., реализующей вопросно-ответную систему, знания записываются на языке логики предикатов в виде набора аксиом, а вопросы, задаваемые машине, формулируются как подлежащие доказательству теоремы. Большой интерес представляет «интеллектуальная» программа американского математика Хао Ванга. Эта программа за 3 минуты работы IBM-704 вывела 220 относительно простых лемм и теорем из фундаментальной математической монографии, а затем за 8,5 мин выдала доказательства еще 130 более сложных теорем, часть их которых еще не была выведена математиками. Правда, до сих пор ни одна программа не вывела и не доказала ни одной теоремы, которая бы, что называется, «позарез» была бы нужна математикам и была бы принципиально новой.

Очень большим направлением систем ИИ является роботехника. В чем основное отличие интеллекта робота от интеллекта универсальных вычислительных машин?

Для ответа на этот вопрос уместно вспомнить принадлежащее великому русскому физиологу И. М. Сеченову высказывание: «... все бесконечное разнообразие внешних проявлений мозговой деятельности сводится окончательно лишь к одному явлению – мышечному движению». Другими словами, вся интеллектуальная деятельность человека направлена в конечном счете на активное взаимодействие с внешним миром посредством движений. Точно так же элементы интеллекта робота служат прежде всего для организации его целенаправленных движений. В то же время основное назначение чисто компьютерных систем ИИ состоит в решении интеллектуальных задач, носящих абстрактный или вспомогательный характер, которые обычно не связаны ни с восприятием окружающей среды с помощью искусственных органов чувств, ни с организацией движений исполнительных механизмов.

Первых роботов трудно назвать интеллектуальными. Только в 60-х гг. появились очувствленные роботы, которые управлялись универсальными компьютерами. К примеру, в 1969 г. в Электротехнической лаборатории (Япония) началась разработка проекта «промышленный интеллектуальный робот». Цель этой разработки – создание очувствленного манипуляционного робота с элементами искусственного интеллекта для выполнения сборочно-монтажных работ с визуальным контролем.

Манипулятор робота имеет шесть степеней свободы и управляется мини-ЭВМ NEAC-3100 (объем оперативной памяти 32 000 слов, объем внешней памяти на магнитных дисках 273 000 слов), формирующей требуемое программное движение, которое отрабатывается следящей электрогидравлической системой. Схват манипулятора оснащен тактильными датчиками.

В качестве системы зрительного восприятия используются две телевизионные камеры, снабженные красно-зелено-синими фильтрами для распознавания цвета предметов. Поле зрения телевизионной камеры разбито на 64x64 ячеек. В результате обработки полученной информации грубо определяется область, занимаемая интересующим робота предметом. Далее, с целью детального изучения этого предмета выявленная область вновь делится на 4096 ячеек. В том случае, когда предмет не помещается в выбранное «окошко», оно автоматически перемещается, подобно тому, как человек скользит взглядом по предмету. Робот Электротехнической лаборатории был способен распознавать простые предметы, ограниченные плоскостями и цилиндрическими поверхностями при специальном освещении. Стоимость данного экспериментального образца составляла примерно 400 тыс. долл.

Постепенно характеристики роботов монотонно улучшались, но до сих пор они еще далеки по понятливости от человека, хотя некоторые операции уже выполняют на уровне лучших жонглеров. К примеру, удерживают на лезвии ножа шарик от настольного тенниса.

Можно также выделить работы киевского Института кибернетики, где под руководством Н. М. Амосова и В. М. Глушкова (ныне покойного) ведется комплекс исследований, направленных на разработку элементов интеллекта роботов. Особое внимание в этих исследованиях уделяется проблемам распознавания изображений и речи, логического вывода (автоматического

доказательства теорем) и управления с помощью нейроподобных сетей.



**Глушков Виктор Михайлович** (1923–1982), российский и украинский математик и кибернетик, основатель Института кибернетики АН Украины, академик АН Украины (1961) и АН СССР (1964).

Окончил Новочеркасский политехнический институт и параллельно экстерном физико-математический факультет Ростовского университета. Уже в годы учебы его заинтересовала проблема моделирования мыслительных процессов на ЭВМ. В 1956 г. начал работать в только что организованном Вычислительном центре АН УССР в Киеве. В 1962 г. на базе Центра организовал и возглавил один из первых в стране Институт кибернетики АН Украины (ныне им. Глушкова).

Основные труды по теоретической и прикладной кибернетике: теория цифровых автоматов, автоматизация проектирования ЭВМ, применение кибернетических методов в народном хозяйстве. На основе разработанных им новых принципов построения ЭВМ были созданы машины КИЕВ, ДНЕПР-2 и машины серии МИР, предвосхитившие многие черты появившихся позднее персональных ЭВМ. Глушков первым выдвинул идею безбумажной технологии, заключающейся в однократном вводе информации в вычислительное устройство с ее последующим сохранением и циркуляцией в базах данных. Это позволило бы прекратить поток подготавливаемых вручную бумажных документов, которые являются источником всевозможных ошибок.

Вклад Глушкова в развитие отечественной кибернетики отмечен многими наградами, в том числе Ленинской премией (1964), Государственной премией СССР (1968, 1977). В 1969 г. ему было присвоено звание Героя Социалистического Труда.

К примеру, можно рассмотреть созданный еще в 70-х гг. макет транспортного автономного интегрального робота (ТАИР). Конструктивно ТАИР представляет собой трехколесное шасси, на котором смонтирована сенсорная система и блок управления. Сенсорная система включает в себя следующие средства очувствления: оптический дальномер, навигационная система с двумя радиомаяками и компасом, контактные датчики, датчики углов наклона тележки, таймер и др. И особенность, которая отличает ТАИР от многих других систем, созданных у нас и за рубежом, это то, что в его составе нет компьютера в том виде, к которому мы привыкли. Основу системы управления составляет бортовая нейроподобная сеть, на которой реализуются различные алгоритмы обработки сенсорной информации, планирования поведения и управления движением робота.

В заключение рассмотрим примеры крупномасштабных экспертных систем.

MICIN – экспертная система для медицинской диагностики. Разработана группой по инфекционным заболеваниям Стенфордского университета. Ставит соответствующий диагноз, исходя из представленных ей симптомов, и рекомендует курс медикаментозного лечения любой из диагностированных инфекций. База данных состоит из 450 правил.

PUFF – анализ нарушения дыхания. Данная система представляет собой MICIN, из которой удалили данные по инфекциям и вставили данные о легочных заболеваниях.

DENDRAL – распознавание химических структур. Данная система старейшая, из имеющих звание экспертных. Первые версии данной системы появились еще в 1965 г. во все том же Стенфордском университете.

Пользователь дает системе DENDRAL некоторую информацию о веществе, а также данные спектрометрии (инфракрасной, ядерного магнитного резонанса и масс-спектрометрии), и та, в свою очередь, выдает диагноз в виде соответствующей химической структуры.

PROSPECTOR – экспертная система, созданная для содействия поиску коммерчески оправданных месторождений полезных ископаемых.

# Заключение

Сегодня можно видеть, что компьютер это не просто некая вещь, улучшающая возможности человека в различных сферах деятельности. Фактически компьютеры стали «мирообразующей вещью». Мы не говорим о том, что компьютеры стали превосходить по своим возможностям человеческие ресурсы. Хотя в отдельных областях компьютеры теснят человека, компьютеры пока все же не могут исполнять главную человеческую функцию — мыслить.

Но мы говорим о другом. Уклад человеческой жизни с приходом компьютеров кардинально поменялся. Сегодня кооперацией большого количества стран идет создание 100-долларовых компьютеров, технологий вживления чипа в человеческий мозг, разработка универсального переводчика. Интернет предоставил такие возможности, что их все сегодня никто не может оценить.

Это не «плохо» или «хорошо». Надо только понимать, что «из-за компьютеров» образование значительно меняется и будет меняться еще более кардинально.

## Литература

1. *Shumacher B. W.* Quantum coding // Phys. Rev. – 1995. – P. 2738–2747.
2. *Feinman R. P.* Quantum Mechanical Computer // Foundations of Physics. – 1986. – Vol. 16, № 6. – P. 507–531.
3. *Shor P. W.* Algorithms for quantum computation: Discrete logarithms and factoring // Proc. 35th Annual Symposium on Foundations of Computer Science (IEEE Press). 1994. – P. 124–134.
4. *Zalka C.* Simulating quantum systems on a quantum computer // Proc. Roy. Soc. – London, 1998. – P. 313–322.
5. *Ozhigov Y.* Quantum Computer Can Not Speed Up Iterated Applications of a Black Box // arXiv:quant-ph/9712051, 1997 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://arxiv.org/abs/quant-ph/9712051>
6. *Cory D. G.* Nuclear Magnetic Resonance spectroscopy: an experimentally accessible paradigm for quantum computing / D. G. Cory, A. F. Fahmy, T. F. Havel // Proc. of the 4th Workshop on Physics and Computation. – Boston, New England, 1996.
7. *Gershenfeld N. A.* Bulk spin resonance quantum computation / N. A. Gershenfeld, I. L. Chuang // Science. – 1997. – Vol. 275. – P. 350–356.
8. *Cirac J. I.* Quantum Computations with Cold Trapped Ions / J. I. Cirac, P. Zoller // Phys. Rev. Lett. – 1995. – № 20. – P. 4091–1094.
9. *Kane B. E.* A silicon based nuclear spin quantum computer // Nature. – 1998. – № 395.
10. *Loss D.* Quatum Computation with Quantum Dots / D. Loss, D. P. Vincenzo // Phys. Rev. – 1998. – № 1. – P. 120–126.
11. Quantum state transfer and entanglement distribution among distant nodes of a quantum network / J. I. Cirac [et al.] // Phys. Rev. Lett. – 1997. – Vol. 78. – P. 3221.
12. *Shnirman A.* Quantum Manipulations of Small Josephson Junctions / A. Shnirman, G. Schon, Z. Herman // Phys. Rev. Lett. – 1997. – Vol. 79. – P. 2371–2374.
13. *Averin D. V.* Adiabatic Quantum Computation with Cooper pairs // Solid State Commun. – 1998. – № 105. – P. 659–664.
14. Quest SDS Josephson Junctions for Quantum Computing / L. B. Ioffe [et al.] // arXiv:cond-mat/9809116. – Vol. 2. – Jan. 1999. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://arxiv.org/abs/cond-mat/9809116>
15. *Adami C.* Quantum Computation with Linear Optics / C. Adami, N. J. Cerf // arXiv:quant-ph/9806048v1. – 1998. – 14 June. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://arxiv.org/abs/quant-ph/9806048v1>
16. Experimental realization of a Quantum algorithm / I. L. Chuang [et al.] // Nature. – 1998. – Vol. 393. – P. 143–146.

17. *Jones J. A. Implementation of a Quantum search algorithm on a quantum computer / J. A. Jones, M. Mosca, R. S. Haasen // Nature – 1998. – Vol. 393. – P. 344–346.*
18. *Experimental Quantum Error Correction / D. G. Cory [et al.] // arXiv:quant-ph/9802018. – 1998. – 6 Feb. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://arxiv.org/abs/quant-ph/9802018>*
19. *The Los Alamos Trapped Ion Quantum Computer / R. J. Hughes [et al.] // Fortschr. Phys. – 1998. – № 4–5. – P. 329–361.*
20. *Experimental issues in coherent quantum-state manipulation of trapped ions / D. J. Wineland [et al.] // J. Res. Natl. Inst. Stand. Tech. – 1998. – № 103. – P. 259.*
21. *Steane A. Multiple particle interference and quantum error correction // Proc. Roy. Soc. – London, 1996. – P. 2551–2577.*
22. *Titlel W. Quantum cryptography / W. Titlel, G. Rihordy, N. Gisin // Physics World. – 1998. – March. – P. 41–45.*
23. *Валиев К. А. Квантовая информатика: компьютеры, связь и криптография // Вестн. РАН. – 2000. – Т. 70, № 8. – С. 688–695.*
24. *Холодилов С. А. Недетерминированные конечные автоматы // RDSN Magasine. – 2007. – № 2. – P. 17.*
25. *Giant Magnetoresistance of (001)Fe/(001)Cr Magnetic Superlattices / A. Fert [et al.] // Phys. Rev. Lett. – 1988. – Vol. 61. – P. 2472–2475.*
26. *Enhanced magnetoresistance in layered magnetic structures with antiferromagnetic interlayer exchange / G. Binasch, P. Grünberg, F. Saurenbach, W. Zinn // Phys. Rev. B. – 1989. Vol. 39. – P. 4828–4830.*
27. *Никитин С. А. Гигантское магнетосопротивление // Сорос. образоват. журн. – 2004. – № 2. – С. 92–98.*
- 28а. *Федотов, Я. А. Основы физики полупроводниковых приборов : учеб. пособие / Я. А. Федотов. – 2-е изд., испр. и доп. – М. : Сов. радио, 1970. – 591 с.*
- 28б. *Кремниевые планарные транзисторы / под ред. Я. А. Федотова. – М. : Сов. радио, 1973. – 335 с.*
- 28в. *Зи С. М. Физика полупроводниковых приборов : пер. с англ. / С. М. Зи ; под ред. А. Ф. Трутко. – М. : Энергия, 1973. – 655 с.*
29. *Онищенко Е. А. Полупроводниковые гетероструктуры: от классических к низкоразмерным, или «конструктор» от Нобелевского лауреата [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ioffe.rssi.ru/journals/ftp.html.ru>*
- 30а. *Ж. И. Алферов, Р. Ф. Казаринов. Авторское свидетельство № 181737, заявка N 950840 с приоритетом от 30 марта 1963 г.*
- 30б. *Kroemer H. A Proposed Class of Heterojunction Injection Lasers // Proc. IEEE. – 1963. – Vol. 51. – P. 1782–1783.*

- 31а. Алфёров Ж. И. О возможности создания выпрямителя на сверхвысокие плотности тока на основе p-i-n (p-n-n+, n-p-p+) структуры с гетеропереходами // ФТП. – 1967. – Т. 1. – С. 436–438.
- 31б. Алфёров Ж.И. История и будущее полупроводниковых гетероструктур // ФТП. – 1998. – Т. 32, вып. 1. – С. 3–18.
32. Исследование влияния параметров гетероструктуры в системе AlAs-GaAs на пороговый ток лазеров и получение непрерывного режима генерации при комнатной температуре / Ж. И. Алферов, В. М. Андреев, Д. З. Гарбузов, Ю. В. Жиляев, Е. П. Морозов, Е. Л. Портной, В. Г. Трофим // ФТП. – 1971. – Т. 4. – С. 1826–1829.
33. Esaki L. Superlattice and negative differential conductivity in semiconductors / L. Esaki, R. Tsu // IBM J. Res. Dev. – 1970. – Vol. 14. – P. 61–65.
34. Добеши И. Десять лекций по вейвлетам / И. Добеши. – М. : РХД, 2001.
35. Воробьев В. И. Теория и практика вейвлет-преобразования / В. И. Воробьев, В. Г. Грибунин – СПб. : ВУС, 1999.
36. Mallat S. A theory for multiresolutional signal decomposition: the wavelet representation // IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 1989. – № 7. – Р. 674–693.
37. Хопкрофт Дж. Введение в теорию автоматов, языков и вычислений / Дж. Хопкрофт, Р. Мотвани, Дж. Ульман. – М. : Вильямс, 2002.
38. Мозговой М. В. Классика программирования: алгоритмы, языки, автоматы, компиляторы / М. В. Мозговой. – М. : Наука и Техника, 2006.
39. Малиновский Б. Н. История вычислительной техники в лицах / Б. Н. Малиновский. – Киев : фирма «КИТ», ПТОО «А.С.К.», 1995. – 384 с.
40. Губарев В. С. Белый Архипелаг / В. С. Губарев. – М. : Наука и техника, 2004.
41. [www//http.wikipedia.org/wiki.ru](http://http.wikipedia.org/wiki.ru)
42. [www//http.delfi.ru](http://http.delfi.ru)
43. [www//http.n-t.ru](http://http.n-t.ru)
44. [www//http.element.ru](http://http.element.ru)

*Учебное издание*

**Душутин Николай Константинович,  
Ушакова Светлана Николаевна,  
Ясюкевич Юрий Владимирович**

## **ИЗ ИСТОРИИ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ**

*Учебное пособие*

ISBN 978-5-9624-0557-5

Подготовлено к печати *М. А. Айзиман*  
Дизайн обложки *П. Ериков*

Темплан 2011 г. Поз. 107.

Подписано в печать 12.12.2011.  
Формат 60×90 1/16. Усл. печ. л. 16,0. Уч.-изд. л. 13,7.  
Тираж 100 экз. Заказ 146.

Издательство ИГУ  
664003, Иркутск, бульвар Гагарина, 36; тел. (3952) 24-14-36