

## ЭВМ посредством ЭВМ

Сергей Лебедев

Прогресс вычислительной техники в значительной мере определяется автоматизацией проектирования и изготовления электронных вычислительных машин (ЭВМ). Для этой цели все шире используются сами машины.

### Машины 3-го поколения



За недолгий срок развития вычислительной техники сменилось три поколения ЭВМ. Год от года происходит совершенствование структуры и методов вычислений, увеличение объема оборудования ЭВМ, но резкая смена поколений связана с успехами электронной техники. Сначала на смену электронной лампе в ячейку ЭВМ пришел транзистор, и первое поколение уступило место второму. Последовавшее бурное развитие полупроводниковой промышленности привело к возникновению групповых («интегральных»), методов массового изготовления радиоэлектронных компонентов.

С течением времени удалось распространить эти методы на одновременное изготовление нескольких связанных между собой приборов, и в результате на одном кристалле и в одном корпусе оказался не один полупроводниковый прибор, а целая электронная схема, выполняющая те или иные логические функции. Так появились новые элементы ЭВМ — интегральные схемы, которые предопределили рождение третьего поколения вычислительных машин. Разработчику вычислительных машин третьего поколения уже не требуется создавать свои электронные схемы ячеек, он имеет дело с готовыми интегральными схемами в корпусе, из которых, как из кирпичиков, составляются схемы отдельных устройств и всей машины в целом.

Интегральная схема занимает почти такой же объем, как и отдельный полупроводниковый прибор. За счет этого, естественно, сокращаются габариты машины. Уменьшение объема и веса — это очень важно для ЭВМ, но в большинстве случаев все-таки не является самоцелью.

Производительность машины, число выполняемых операций в секунду зависит от времени срабатывания приборов и оно уже сегодня стало так мало, что соизмеримо со временем передачи сигнала по соединительным проводам. Скорость распространения электрического сигнала ограничена скоростью света, поэтому единственный путь экономить время и повышать быстродействие — это сокращать длину соединений, другими словами, уменьшать габариты машин.

Переход от схем с навесными деталями к интегральным, наряду с увеличением быстродействия, повышает надежность ЭВМ. Контакты транзистора к схеме, осуществленные с помощью паяльника, только в пять раз надежнее самого прибора. Контакты внутри интегральной схемы выполняются значительно более надежными методами, и благодаря этому общее время безотказной работы машины существенно увеличивается. Повышение надежности позволяет применять более сложные схемы отдельных устройств, что также увеличивает производительность машин.

Короче говоря, применение интегральных схем открывает новые перспективы прогресса ЭВМ, но, как это обычно бывает в технике, одновременно с перспективами возникают и новые проблемы, без решения которых прогресс оказывается невозможным.

Переход от первого поколения ЭВМ ко второму был связан с изменением физических принципов работы приборов, но конструктивное оформление практически осталось без изменений. Третье поколение ЭВМ использует те же приборы, что и второе, но разработка и сборка машин требуют принципиально новых решений.

Более плотная компоновка деталей приводит к более насыщенному монтажу. Расположить соединения в одной плоскости, как это принято для ЭВМ второго поколения, уже не удается, и приходится переходить к многослойному печатному монтажу. С возрастанием сложности резко сокращается количество однотипных плат, и почти каждая плата требует индивидуального исполнения. Ошибки в схемах уже не могут быть исправлены путем перепайки проводов, как это делается в большинстве случаев для машин второго поколения.

Трудности возникают не только в связи с необходимостью перестройки производства, но и в процессе разработки и проектирования. Анализ структурных схем современных высокопроизводительных ЭВМ получается настолько громоздким, что обычными методами его провести невозможно. Составление схем многослойного печатного монтажа с учетом всех требований к нему требует перебора громадного количества вариантов, который человеку фактически уже не под силу. Привлечение ЭВМ к трудоемким вопросам конструирования становится не только желательным, но и неизбежно необходимым.

Возможность использования ЭВМ для автоматизации проектирования ЭВМ не ограничивается лишь составлением схем, а имеет значительно более широкое применение и более принципиальное значение. Можно говорить о возможности использования ЭВМ для разработки полной документации вновь проектируемых машин и хранения всей этой документации в памяти ЭВМ-«разработчика».

### **ЭВМ проектирует ЭВМ**

Разработка новой ЭВМ проводится в два этапа: проектирование детальной структурной схемы и создание чертежей конструктивного оформления: грубо говоря, сначала принципиальная схема, потом монтажная. Проектирование структуры ЭВМ ведется от общих схем к более детальным. Сначала конструктор за письменным столом, исходя из имеющихся технических возможностей и собственного опыта, выбирает необходимые устройства и блоки и соединяет их между собой соответственно назначению машины. На бумаге возникает структурная схема, элементы которой связаны между собой необходимыми логическими закономерностями. Эти закономерности конструктор описывает уравнениями и кодирует. Теперь к работе можно привлекать ЭВМ.

По специальной программе вычислительная машина проверяет составленную человеком схему и отмечает имеющиеся в ней ошибки. Конструктор видоизменяет схему и вновь отдает на редакцию ЭВМ. Такой обмен информацией между машиной и человеком может повторяться несколько раз до тех пор, пока схема не будет признана полностью работоспособной. Безошибочность — это необходимое условие, но недостаточное. Схема работоспособна, но неизвестно, является ли она оптимальной. В выборе блоков и определении конструктором их характеристик присутствовал элемент интуиции. Для решения этого вопроса проводится исследование с помощью ЭВМ влияния отдельных устройств на производительность проектируемой машины, а также целесообразность включения тех или иных блоков. Сначала анализ ведется на основе обобщенных интегральных зависимостей, а затем на базе решения типовых задач. Конструктор и ЭВМ обмениваются информацией, и возникает оптимизированная уточненная структура будущей ЭВМ.

До сих пор крупный блок рассматривался как «черный ящик»: у него были только входы, выходы и способность производить нужные операции. Когда готова общая структура, можно перейти к разработке внутренней, детальной структуры каждого блока. Схемы блоков, также как и общая схема, составляются конструктором, проверяются на ЭВМ,

потом оптимизируются с помощью ЭВМ, и в результате рождается совокупность оптимизированных уточненных структурных устройств и блоков. Может случиться, что уточненные параметры какого-нибудь блока не совпадут с теми, которые принял гипотетически конструктор в самом начале работы. Тогда ему придется откорректировать общую схему и провести цикл проверки сначала.

Таким образом, конструктор на каждом этапе, советуясь с ЭВМ, создает детальную структуру будущей машины. В заключение самая подробная структурная схема проверяется на ЭВМ на отсутствие ошибок и устанавливаются ее окончательные параметры. На этом заканчивается наиболее ответственный творческий этап работы — этап принципиального проектирования. Расин говорил: «Моя пьеса готова, осталось ее только написать».

Вся схема будущей ЭВМ хранится в памяти машины-разработчика. Новая машина готова настолько, что можно проверить ее в работе. Используя данные памяти, машина-разработчик может решать задачи так, как они будут решаться во вновь создаваемой ЭВМ, но только в существенно замедленном темпе. Это позволяет параллельно с созданием ЭВМ вести разработку ее математического обеспечения (разработка стандартных и обслуживающих программ, программ диспетчера и т.п.).

Дальнейший этап проектирования — конструктивное оформление и создание монтажных плат — уже не требует регулярного обмена мнениями и может почти полностью выполняться на вычислительной машине. Полной автоматизации дальнейшего проектирования способствует стандартизация конструктивного оформления, в том числе плат многослойного печатного монтажа разных уровней. Иерархия построения плат проста: на микро печатных платах 1-го уровня устанавливаются интегральные схемы, платы 2-го уровня komponуются из плат первого, и все они соединяются на платах 3-го уровня. Механическая конструкция этих плат одинакова для различных устройств машины. Геометрическое размещение интегральных схем также стандартно, различные типы интегральных схем выполняются в одинаковом корпусе.

На основании данных по структурной схеме вычислительная машина по специальной программе выбирает необходимые типы интегральных схем, определяет оптимальное размещение их на платах первого уровня, а также дает оптимальное распределение плат первого уровня на платах следующего уровня и компоновку всей машины в целом. Зная расположение интегральных схем и логическую схему их соединений, ЭВМ составляет монтажные схемы для многослойного печатного монтажа плат первого уровня и выдает их в виде чертежей или записывает на магнитную ленту или перфоленту для последующего использования этих данных для автоматического изготовления монтажа. Аналогичным образом составляются монтажные схемы плат других уровней.

В памяти ЭВМ в закодированном виде может храниться не только документация по структурной и монтажным схемам, но также конструкторские чертежи, технические условия, ведомости покупных изделий и материалов, описания, инструкции и т.п., иными словами, вся необходимая документация по ЭВМ. Значительная часть этой документации может быть выполнена непосредственно на ЭВМ.

Автоматизация проектирования значительно сокращает сроки разработки машин, позволяет избежать многих ошибок, которые выявляются при отладке опытного образца. Существенно упрощается внесение изменений и усовершенствований в ЭВМ, возникающих при отладке опытного образца и в процессе эксплуатации. При изменении схемы какого-либо узла соответствующие исправления вносятся автоматически в остальную документацию, которая затрагивается данным усовершенствованием.

Использование ЭВМ для проектирования ЭВМ требует разработки большого числа специализированных программ, по которым осуществляется тот или иной этап проектирования. Необходимо в удобной для использования в ЭВМ форме представить исходные данные или, как это называется, иметь «входной язык»: уметь автоматически переводить данные «входного языка» в «язык машины», т.е. в коды команд машины, что

осуществляется специальной программой — «транслятором», а так же ряд других вспомогательных средств. Все это требует большой работы математиков и инженеров.

## **Процесс изготовления ЭВМ**

Одним из основных процессов производства ЭВМ третьего поколения является изготовление плат многослойного печатного монтажа. Стандартным процессом для нанесения рисунка межсоединений является способ фотолитографии, основанный на засветке через фотошаблоны светочувствительных слоев-резистов, наносимых на плату со сплошным металлическим или диэлектрическим покрытием.

Операция аналогична обычной контактной фотопечати через негативы: при проявлении незасвеченный резист исчезает, а оставшиеся области служат защитой при травлении низлежащих слоев. Затем остатки резиста смываются, обнажается рисунок соединений или изоляции, и на него снова наносится сплошная пленка для следующего цикла локального вытравливания уже по новому фотошаблону.

Изготовление комплекта фотошаблонов включает целый ряд сложных операций: вычерчивание схемы в увеличенном масштабе, фотоуменьшение, ретушь и т.п. Эти дорогостоящие процессы отнимают много времени, что совсем неприемлемо при макетировании опытных образцов. Чертеж монтажной схемы можно получить на автоматическом рисующем координатографе, непосредственно используя информацию, получаемую от ЭВМ при процессе проектирования. Координатограф выдает увеличенный чертеж схемы, готовый для пересъемки. Исключение труда копировщиц несколько экономит время, но это далеко не полное решение вопроса автоматизации изготовления: желательно вообще обойтись без трудоемких шаблонов.

Такой метод есть. Это воспроизведение рисунка прямо на плате с помощью острогофокусированного светового луча. Луч — неподвижен, а монтажная плата с нанесенным чувствительным слоем-фоторезистом перемещается вместе с программным столом, управляемым от ЭВМ. Сам процесс засветки медленнее, т.к. линии обрабатываются постепенно от точки к точке, а не залпом, как через фотошаблон, но зато при макетировании и отладке нет надобности каждый раз делать новые фотошаблоны при внесении изменений в платы. Достаточно изменить программу, что несравненно проще, быстрее и может быть выполнено на ЭВМ. При наличии такого способа создания соединений конструктора ЭВМ не пугает увеличение количества типов плат, ибо даже в массовом производстве каждая плата может исполняться по собственной программе. Наряду с автоматическим изготовлением топологии схем печатного монтажа ЭВМ может управлять также другими технологическими процессами: сверлением отверстий в платах, установкой и запайкой интегральных схем и других компонентов, контролем производственных параметров и т.п. Для всех этих операций используются данные, хранящиеся в памяти ЭВМ. Помимо повышения производительности управление от ЭВМ придает большую рентабельность и гибкость производству.

Таким образом, существующие методы изготовления ЭВМ принципиально позволяют автоматизировать большую часть технологических процессов. Однако сами технологические процессы не очень сильно отличаются от ранее применявшихся и в отношении плотности размещения деталей существенно уступают методам, применяемым для производства интегральных схем.

Если все интегральные схемы (без корпусов), необходимые для создания ЭВМ, можно свободно уложить в спичечный коробок, то после их герметизации, сборки в узлы и блоки, суммарный объем увеличится в десятки тысяч раз. Так как плотность деталей ограничивает рост быстродействия и надежности аппаратуры, необходимо искать новые конструктивные принципы компоновки.

Перспективным направлением является увеличение сложности загерметизированной схемы. Несколько полупроводниковых кристаллов с интегральными схемами собираются на плате, где соединения выполнены интегральными методами и заключаются в единый

корпус. Такие многокристальные интегральные схемы позволяют повысить плотность деталей приблизительно в 10 раз.

Но наиболее заманчивой идеей интегральной электроники является создание крупных блоков ЭВМ на одной пластине полупроводника целиком интегральными методами в одном корпусе. Размеры современных приборов вполне обеспечивают такую возможность. Главным препятствием является процент выхода: чем больше компонентов в интегральной схеме, тем больше вероятность, что какая-либо из них окажется негодной. В настоящее время экономически выгодно делать интегральные схемы из нескольких десятков компонентов. Несомненно, это число будет расти со временем по мере уменьшения брака на всех стадиях громоздкого и сложного процесса, и не так уж далек год, когда интегральные схемы будут насчитывать тысячи компонентов.

Есть способы приблизить реализацию этой идеи к сегодняшнему дню с помощью использования ЭВМ. Если на пластине создать некоторый избыток схем, то после проверки их параметров для каждой пластины ЭВМ может рассчитать топологию так, чтобы соединить только работоспособные и обойти негодные. Такой принцип создания сложных схем весьма перспективен, но требует для своего исполнения новых технологических методов.

### **Электронный луч и автоматизация производства**

Технологические методы автоматизации производства для машин следующих поколений должны отвечать двум основным требованиям: существенная миниатюризация продукции и возможность непосредственного управления от ЭВМ. В свете этих требований наиболее привлекательной оказывается технология электронно-лучевой размерной обработки. Высокая разрешающая способность и простота автоматизации — это достоинства, вытекающие из самой сути метода.

Управление электронным лучом в технологических установках аналогично принципам отклонения луча в телевизоре, только диаметр луча в 1000 раз меньше, а удельная энергия в 1000 раз больше. Подобно тому, как луч телевизора воспроизводит на экране информацию от телецентра, технологическая установка, связанная с ЭВМ, обеспечивает движение луча по плате, создавая с высокой точностью необходимые соединения.

Существует несколько технологических способов исполнения программированных соединений с помощью электронного луча. Метод электронной фрезеровки состоит в том, что электронный луч, двигаясь по программе, испаряет на своем пути металлическую пленку, тем самым ограничивая области, в которых находятся электрически связанные компоненты. Режимы луча подбираются таким образом, чтобы получить ширину профрезерованных каналов достаточной для обеспечения надежной изоляции с минимальной неровностью краев. Другой метод — засветка резистов электронным лучом по программе (электронолитография вместо фотолитографии) позволяет полностью исключить производство фотошаблонов и операцию засветки. Производительность метода, благодаря высокой скорости движения луча, по крайней мере, не уступает методам фотолитографии и значительно превосходит засветку световым лучом на программном столе.

Перспективной технологией является разложение электроорганики электронным лучом, при котором в месте соприкосновения луча с платой из газовой фазы растет металлическая или диэлектрическая пленка. При перемещении луча по программе на плате вырастают линии соединений и необходимые площадки изоляции. Этот же метод можно использовать для осуществления электрических контактов, наращивая металлическую пленку в местах соединений.

Область применения программируемого луча — это не только избавление от тирании соединений. Электронный луч и во многом аналогичный ему ионный луч могут быть использованы почти во всех процессах изготовления ЭВМ, включая изготовление полупроводниковых приборов и схем. Автоматизированная технология приведет к

большей однородности изготавливаемых компонентов и создаст более однотипный технологический процесс.

Полная автоматизация возможна только в случае существования обратных связей в процессе производства, обеспечивающих гибкое и контролируемое управление. Эти возможности тоже обеспечивает электронно-лучевая технология. Используя принципы растрового электронного микроскопа и микроанализатора, можно автоматизировать с помощью ЭВМ такие, казалось бы «ручные» операции, как точное совмещение и, кроме того, проводить анализ полученных структур и рисунков.

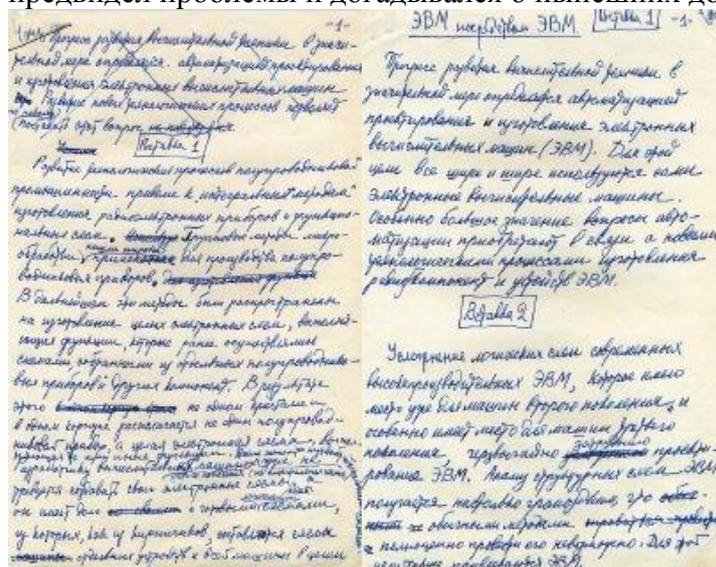
Электронно-лучевая установка, связанная с ЭВМ, сможет самостоятельно разделить годные и негодные компоненты на пластине, ЭВМ составит оптимальную схему их соединений и, управляя электронным лучом и его параметрами в замкнутом автоматизированном цикле, выполнит эту схему.

Электронный луч, конечно, не панацея от всех бед и не единственная проблема, которую предстоит решить разработчикам машин будущих поколений. Необходимо разрабатывать технологию слоистых структур, принципы сборки плат и т.п. Успехи в этих направлениях подготавливают переход к ЭВМ нового типа с резко уменьшенными размерами, более сложными и более надежными структурными схемами, создаваемыми на новых принципах. В конечном счете, можно ожидать, что вся центральная часть ЭВМ будет выполняться в виде одной интегральной схемы, способной поместиться в коробке «Казбека».

\* **Сергей Алексеевич Лебедев (1902-1974)** — выдающийся русский ученый, основоположник отечественной вычислительной техники. Академик, Герой Социалистического труда, лауреат Ленинской и Государственных премий. Главный конструктор ЭВМ серии БЭСМ (от БЭСМ-1 до БЭСМ-6) и ряда ЭВМ специального назначения. Директор ИТМиВТ АН СССР с 1953 по 1973 год. Статья публикуется впервые, с разрешения обладателей прав на наследие Сергея Алексеевича Лебедева. Изложение приводится в обработке редакции с максимальным сохранением авторской стилистики.

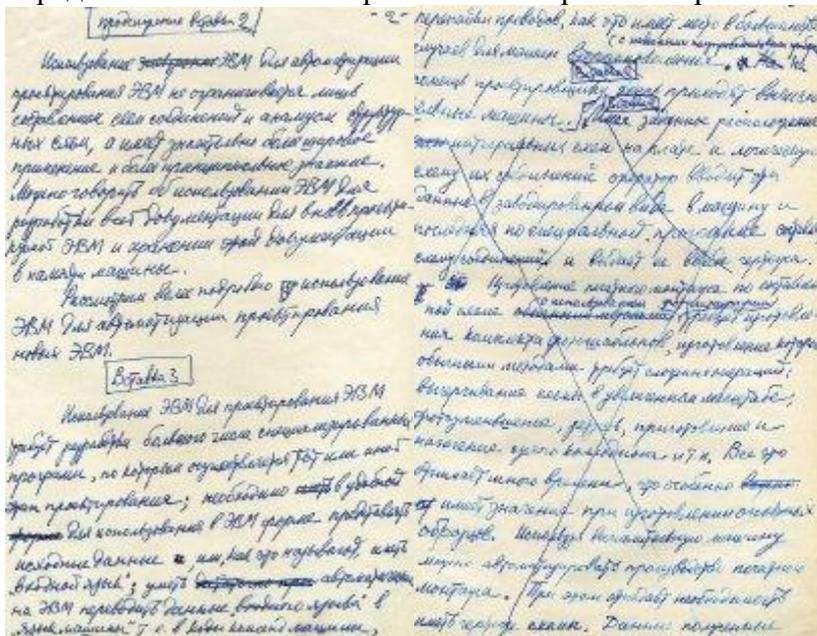
## Статья С.А.Лебедева «ЭВМ посредством ЭВМ»

Читая старые рукописи, невольно проецируешь их выводы на сегодняшний день, пытаешься понять, в чем автор оказался прав, а в чем нет. Масштаб личности ученого, оставившего нам свои рукописи, становится ясен, когда обнаруживаешь, как человек, имевший чисто умозрительные представления о современном нам периоде развития ИТ, предвидел проблемы и догадывался о нынешних достижениях науки.



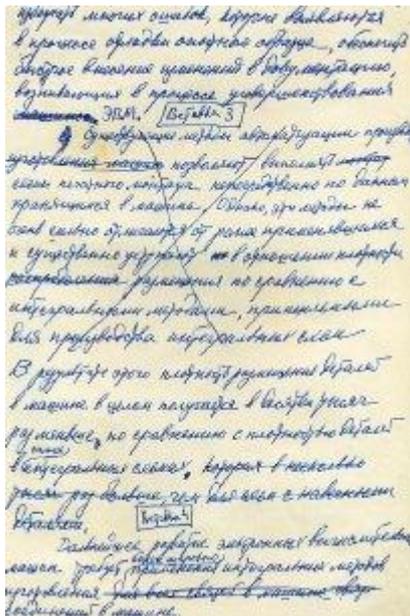
В семье Сергея Алексеевича Лебедева сохраняются рукописи академика, за свою жизнь сформировавшего ряд направлений научных исследований и отраслей отечественной промышленности. Начав свою научную деятельность с изучения теоретических основ электротехники, своими исследованиями в области устойчивости электрических машин, Лебедев обеспечил основу для создания единой энергосистемы СССР, сохраняемой до сих пор. Достигнув всеобщего признания, став директором академического института и получив государственную премию за работы по решению задач безаварийного функционирования длинных линий электропередач, он в 45 лет меняет всю свою жизнь, решив начать разработку цифровой электронной вычислительной машины.

В то время некоторые его коллеги, имевшие на своем счету немалые достижения, подшучивали над Лебедевым, заявляя, что его машина получается чрезмерно быстрой и за несколько месяцев решит все накопившиеся в стране задачи, однако Сергей Алексеевич придумывал новые задачи, открывал новые области применения вычислительной техники. Разработав быстрый вычислитель и передав его в распоряжение математиков, он первым понял, что цифровая вычислительная техника может не только решать системы дифференциальных уравнений, но и управлять реальными объектами. Шутки кончались, перед новой техникой открывались бескрайние горизонты.



Вместе со своими учениками: Владимиром Андреевичем Мельниковым, Андреем Андреевичем Соколовым, Валерием Назаровичем Лаутом, Львом Николаевичем Королевым, Марком Валериановичем Тяпкиным, Леонидом Александровичем Заком, Александром Николаевичем Томилиным, Владимиром Ивановичем Смирновым, Виктором Петровичем Иванниковым, Дмитрием Борисовичем Подшиваловым, Марком Германовичем Чайковским и многими другими — он создает машину БЭСМ-6, а затем, анализируя ситуацию, возникшую ко второй половине 1960-х годов, Лебедев пишет статью, которая так и осталась неопубликованной, назвав ее в рукописи — «ЭВМ посредством ЭВМ».

В статье поражает широта интересов ученого и то, как точно он отделяет главные проблемы от второстепенных. Уменьшение габаритов вычислительных машин для него проблема, требующая своего решения, но вторичная. Да, для БЭСМ-6 нужен зал площадью 200 квадратных метров, но не это главное — надо бороться с ограничениями, которые возникают из-за конечной скорости света.



Время распространения сигнала внутри вычислительной машины — вот задача, решение которой позволит уменьшить размеры машин. А ведь эта задача до конца не решена и сейчас. За одну наносекунду электрический сигнал проходит 30 см. На сколько порядков еще нам удастся сократить задержки распространения сигнала? Во сколько раз мы сможем уменьшить размеры вычислительных устройств? Это еще предстоит решить. Предвосхищая работы многих современных исследователей технологических процессов, Лебедев описывает свой подход к созданию вычислительной машины: исследование, анализ и проектирование, устранение ошибок, глубокий анализ и более детальное проектирование, лишь затем изготовление, лучше полностью автоматизированное и потому очень быстрое. Чем такой подход не современен? Многие проекты и сейчас страдают от того, что в самом их начале анализ исходной ситуации оказался недостаточно точным и интегральным.

Только сегодня многие (а тогда лишь интуитивно нащупываемые решения) точно сформулированы, описаны в многочисленных работах по управлению технологическими процессами и внедряются в реальное производство.

Лебедев видит новую задачу, которую способна решать вычислительная машина — она может стать инструментом для создания новых поколений ЭВМ. Автоматизация проектирования и производства — вот та задача, которую надо было срочно решать. ЭВМ должна стать и архивом, хранящим документацию на новые изделия, и средством сопровождения этого архива, и основным источником информации для других автоматических устройств. Опережающая разработка программного обеспечения позволит сократить сроки разработки новой техники. Фактически Лебедев предвидел создание сквозной технологии автоматизированного проектирования и производства вычислительной техники.

Не все, что предполагал в своей статье Лебедев, точно сбылось. Технология изготовления печатных плат с помощью фотошаблонов выявила скрытые резервы в этой области, и до сих пор востребованы гальваники, химики-фотолиграфы и сверловщики. Механическое сверление отверстий в платах коническими сверлами с плоским основанием оказалось более точным, чем прожигание лазером. Технология прямого экспонирования фоторезиста лазерным лучом до сих пор не стала массовой, а точность фотошаблонов серьезно увеличилась, что позволило уменьшить расстояния между печатными проводниками до нескольких микрон.

Произошла, однако, существенная миниатюризация электронных компонентов. Даже одиночные транзисторы в отдельных корпусах в десятки раз меньше своих аналогов из 60-х годов прошлого столетия. Когда Лебедев писал свою статью, центральный процессор МК Эльбрус 2 существовал только в виде набросков основных схем. В своем окончательном виде этот процессор размещался в трех стойках размером 1 x 0,35 м и высотой 1,70 м. Арифметическое устройство 5Э261/2 — последней машины, которая была разработана еще при жизни Лебедева — считалось компактным, оно располагалось всего на паре десятков ячеек. Теперь все целочисленные и вещественные вычисления проводятся внутри одной микросхемы. В вычислительную технику пришла эра микропроцессоров, появление которых точно предвидел наш замечательный соотечественник. Вернитесь к его статье и прочитайте еще раз последнее предложение. В нем весь Сергей Алексеевич, каким его помнят его ученики.