

УДК 681.3.01

ОБ ИССЛЕДОВАНИЯХ Л.В.КАНТОРОВИЧА  
В ОБЛАСТИ АРХИТЕКТУРЫ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ МАШИН

Л.И.Фет

Круг интересов Леонида Витальевича Канторовича был необычайно широк. И во всех областях своей многогранной деятельности он вносил оригинальный и глубокий вклад. В этих заметках мы попытаемся кратко описать взгляды Л.В.Канторовича на архитектуру вычислительных машин и охарактеризовать его работы в этом направлении.

Будучи выдающимся математиком, автором фундаментальных математических теорий, Л.В.Канторович в то же время уделял большое внимание вопросам технической реализации сложных вычислительных процессов.

Еще в 40-е годы, до появления электронных вычислительных машин, Леонид Витальевич успешно использовал для научных расчетов электромеханические счетно-перфорационные машины. В эти годы в Ленинградском отделении Математического института Академии наук СССР им была создана, как мы сейчас сказали бы, "многопроцессорная параллельная вычислительная система" из табуляторов. При расчете на этой системе таблиц функций Бесселя [1] по специально разработанной единой программе производились вычисления одновременно для всех 120 функций.

Затем Леонид Витальевич предлагает расширить возможности табуляров путем присоединения "приставок" (то, что сейчас называется "специализированными процессорами"). Одна из таких приставок, предназначенная для функциональных вычислений, была создана еще в конце 40-х годов [2,3].

Эта приставка, построенная на диодах и электромагнитных реле, выполняла вычисление различных функций таблично-интер-

поляционным методом с точностью до шестого десятичного разряда при пятиразрядном аргументе, приведенном к интервалу  $(0,1)$ . Использовалась линейная интерполяция. Таблицы были реализованы с помощью диодного постоянного запоминающего устройства, которое по трем старшим разрядам аргумента выдавало опорное значение функции (6 десятичных разрядов) и значение разности (3 десятичных разряда). Умножение разности на приращение аргумента (младшие два его разряда) осуществлялось также по таблицам. Табулятор использовался в качестве сумматора, в котором после двух поправок формировалось точное значение функции.

Преобразователь [3] успешно применялся для вычисления различных функций, в частности — в сложных физических расчетах, где использовались интегральные логарифмы.

В своих работах по архитектуре Л.В.Канторович предвосхитил многие прогрессивные направления развития вычислительных машин. На заре вычислительной техники, в те времена, когда электронные вычислительные машины были еще очень громоздкими, дорогими и труднодоступными, Л.В.Канторович чувствовал необходимость развития технических средств для "персональных" вычислений. Он очень интересовался настольными клавишными вычислительными машинами. В середине 50-х годов под его руководством была разработана релейная клавишная вычислительная машина оригинальной конструкции [4], которая по сравнению с распространенными в то время электромеханическими клавишными машинами, обеспечивала значительно более высокое быстродействие, расширенные функциональные возможности и большую надежность. В конце 50-х годов в СССР было налажено серийное производство этих машин (под названиями "Вильнюс" и "Вятка"), и на рабочих столах конторских служащих, инженеров, исследователей во многих учреждениях Советского Союза появились релейные "персональные ЭВМ", изготовленные по идее Л.В.Канторовича.

В 60-е годы Л.В.Канторович предложил ряд остроумных способов выполнения операций десятичной арифметики. На этой основе были разработаны арифметические устройства для электронных клавишных машин, позже запатентованные в США [5] и других западных странах.

Большим вкладом Л.В.Канторовича в развитие вычислительной науки была выдвинутая им в начале 50-х годов концепция круп-

ноблочной организации вычислительных процессов, которая в дальнейшем разрабатывалась в многочисленных работах самого Леонида Витальевича и его учеников [6-15].

В соответствии с крупноблочным подходом предлагалось в качестве основного объекта, с которым оперирует система, рассматривать упорядоченные совокупности чисел — величины (векторы, матрицы и т.д.). При этом одно число представляет собой простейшую величину — элемент. Для величины, наряду с ее числовым содержанием, вводится справка, в которой содержится описание числового материала и его расположение (число компонент, начальный элемент, шаг и т.д.).

Устанавливаются некоторые специальные операции над величинами. Арифметические операции представляют собой распространение обычных арифметических операций на все элементы операндов-величин. Геометрические операции не изменяют числовое содержание величин, а только преобразуют их структуру. К геометрическим операциям относятся, например, операции вырезки определенного сечения из величины (вырезка вектора из матрицы и т.д.). Другой пример геометрической операции — транспонирование величины.

Некоторые идеи крупноблочного подхода впоследствии получили развитие в других системах программирования (например, в языках APL, PL-1, Алгол-68).

В то же время крупноблочная система с ее операндами-массивами и специализированными крупноблочными операциями представляет широкие возможности для применения новых архитектурных решений. Сюда относятся, в частности, различные формы одновременной обработки многих элементов или величин. Так, при организации арифметических операций над величинами естественно использовать независимую параллельную обработку всех компонент. Другим примером являются операции конвейерного типа, которые осуществляют одновременную переработку некоторого потока элементов (или величин) так, что до окончания обработки предыдущего может быть начата переработка следующего.

Анализ величин и операций над ними позволяет выделить типичные виды ("технологии") обработки, например покомпонентная обработка, редукция, поиск, упорядочение, и обосновать выбор структуры операционных устройств, реализующих те или иные базовые операции.

Мы уже упоминали о первом специализированном процессоре ("приставке") Л.В.Канторовича - функциональном преобразователе, присоединенном к табулятору.

В общем виде идея приставок, "усиливающих" вычислительные возможности ЭВМ, была сформулирована в [16], где предлагалась вычислительная система, состоящая из универсальной машины традиционной архитектуры и малой специализированной машины, ориентированной на определенные виды массовой обработки. Предполагалось, что универсальная машина выделяет в программе крупноблочные операторы и передает их на приставку. Высокая скорость обработки в приставке должна достигаться за счет использования характерных особенностей тех или иных операторов и операндов, которые отражаются в архитектуре приставки. Для обеспечения адаптации и расширения набора операций приставки в ней используется микропрограммное управление и переменный формат данных, а для подключения к основной машине служит специальный блок сопряжения.

В начале 60-х годов в Институте математики Сибирского отделения Академии наук СССР, где в то время работал Л.В.Канторович, под его руководством был разработан технический проект одной из таких приставок [17,18], которая получила название "арифметической машины" (АМ) и предназначалась для ускорения решения задач линейной алгебры и линейного программирования. В связи с этим назначением при ее создании особое внимание было обращено на векторные операции. Главные принципы, использованные в машине АМ для предельного ускорения векторных вычислений, заключались в следующем.

1. Максимально использовать поток чисел, который может обеспечить оперативная память основной ЭВМ. Для этого был организован прямой доступ к памяти, непрерывный поток чисел с тактовой частотой использованного запоминающего устройства и непрерывная обработка этих чисел в специальном быстродействующем арифметическом устройстве.

2. Чтобы получить необычайно высокое быстродействие арифметического устройства, при его проектировании были использованы, в соответствии с принципами крупноблочного подхода, характерные особенности обрабатываемого материала (численные векторы достаточно большой размерности) и базовых операторов (основной из них - скалярное произведение векторов).

В арифметическом устройстве приставки АМ был использован четырехступенчатый конвейер [19], имеющий четыре уровня сверх-оперативных буферных регистров.

Чтобы согласовать работу всех ступеней конвейера, необходимо было обеспечить скорость работы арифметического устройства мантисс, значительно превышающую возможности логических элементов, доступных в то время. Поэтому была предпринята разработка мощного многоходового сумматора с хранением переносов [20], который Леонид Витальевич предложил назвать "ротатором".

В 1967-68 гг. был изготовлен образец машины АМ, который прошел успешные испытания на Вычислительном центре Сибирского отделения АН СССР. На векторно-матричных операциях эта машина показала быстроедействие, на порядок большее, чем универсальные машины, выполненные на такой же элементной базе.

Машина АМ, предложенная Л.В.Канторовичем и разработанная под его руководством и при его участии, была, по-видимому, одним из первых векторных конвейерных процессоров - прообразом современных супер-ЭВМ.

Л.В.Канторович видел большие резервы развития вычислительной техники в организации согласованных усилий исследователей разных специальностей - математиков, программистов, инженеров - в системном подходе к проблеме. Он неоднократно подчеркивал, что архитектура вычислительных машин отстает от современных возможностей науки и техники [15, 21, 22]. Важнейшим направлением комплексных исследований он считал изучение вычислительных методов и алгоритмов с точки зрения эффективного использования технических возможностей и максимальное использование возможностей машин для осуществления современных вычислительных процессов.

Леонид Витальевич внимательно следил за развитием электронной техники и технологии. Мы уже охарактеризовали его предложения по усовершенствованию макроархитектуры. Внимание Леонида Витальевича привлекали также и вопросы развития микроструктуры ЭВМ, более эффективного использования достижений микроэлектроники, технологии больших интегральных схем.

Если крупные блоки информации содержат большое количество однотипных элементов, требующих однотипной обработки, то естественно, чтобы и устройства, оперирующие с этими объекта-

ми, имели однородный характер и работали параллельно. Различные виды обработки требуют применения разных специализированных логических схем, отражающих и выгодно использующих особенности тех или иных алгоритмов выполнения крупноблочных операций. Леонид Витальевич живо интересовался подобными функционально-ориентированными структурами - ассоциативными запоминающими устройствами, сортирующими сетями и т.д. Под его руководством был выполнен комплекс работ по исследованию однородных микроэлектронных структур, реализующих широкий круг крупноблочных операций [23].

Леонид Витальевич считал, что на основе разумного набора специализированных операционных устройств (процессоров) может быть построена высокопроизводительная система универсального назначения, работающая под управлением какой-либо ЭВМ традиционной архитектуры [24]. В такой системе структура каждого из специализированных процессоров должна отвечать характеру выполняемой обработки: среди них могут быть устройства конвейерного, матричного, ассоциативного типов и др. Управляющая машина поддерживает специальную операционную систему, опирающуюся на некоторый крупноблочный язык программирования. Специальная программа-диспетчер распределяет задания по соответствующим процессорам. Таким образом - через специализацию процессоров - мы вновь приходим к универсальности, но на новом, существенно более эффективном уровне.

Оригинальные идеи Л.В.Канторовича в области архитектуры вычислительных машин опережали время. Многие из них становятся реальностью только сейчас, в машинах четвертого и пятого поколений.

Здесь так же, как в своих исследованиях в области дескриптивной теории множеств и функций, функционального анализа и вычислительной математики, математического программирования и математической экономики, он был первооткрывателем.

# ЛИТЕРАТУРА

1. Фаддеева В.Н., Гавурий М.К. Таблицы функций Бесселя целых номеров от 0 до 120 /Под ред. Л.В.Канторовича. - М., Л.: Гостехиздат, 1960.
2. Канторович Л.В., Гавурий М.К. О некоторых новых приемах вычислений на табуляторе, связанных с двичными разложениями чисел // Успехи мат. наук. - 1948. - Т.3, кн. 4(26), С.160-162.
3. Канторович Л.В., Гавурий М.К., Эпштейн В.А. Функциональный преобразователь: Авторское свидетельство СССР № 38671 от 03.10.50 // Бюл. изобретений. - 1954. - № 7.
4. Канторович Л.В., Петров Ю.П., Поснов Н.Н. Релейная клавишная вычислительная машина для автоматического выполнения арифметических операций: Авторское свидетельство СССР № 123762 от 20.03.58 // Бюл. изобретений. - 1959. - № 21.
5. Kantorovich L.V., Tolstiev V.P., Fet Ya.I. Digital serial arithmetic unit: U.S. Pat. 3,758,767. Filed: Oct. 19, 1971. Publ: Sept. 11, 1973.
6. Канторович Л.В. Перспективы развития и использования электронных счетных машин // Математика, ее содержание, методы и значение. - М., 1956. - Т.2. - С.382-390.
7. Канторович Л.В., Петрова Л.Т., Яковлева М.А. Об одной системе программирования // Пути развития советского математического машиностроения и приборостроения. Ч.3. - М.: ВИАМТ. - 1956. - С.30-36.
8. Канторович Л.В., Петрова Л.Т. О математической символике, удобной при вычислениях на машинах // Тр. Третьего Всесоюзного мат. съезда. - М., 1956. - Т.2. - С.151.
9. Петрова Л.Т., Яковлева М.А. О крупноблочном программировании // Тр. Третьего Всесоюзного мат. съезда. - М., 1956. - Т.2. - С.153.
10. Канторович Л.В. Об одной математической символике, удобной при проведении вычислений на машинах // Докл. АН СССР. - 1957. - Т.113, № 4. - С.738-741.
11. Канторович Л.В. О проведении численных и аналитических вычислений на машинах с программным управлением // Изв. АН АрмССР. - 1957. - Т.10, № 2. - С.3-16.

12. Булавский В.А. О символике записи вычислительных планов при автоматизации программирования // Изв. вузов. Математика. - 1958. - № 5. - С.5-17.
13. Яковлева М.А. Крупноблочная система программирования // Тр. Мат. ин-та им.В.А.Стеклова. - М.-Л., 1962. - Т.66.- С.4-15.
14. Канторович Л.В. Перспективы работы в области автоматизации программирования на базе крупноблочной системы // Тр. Мат. ин-та им.В.А.Стеклова. - Л., 1969. - Т.96. - С.5-15.
15. Канторович Л.В. Перспективы крупноблочного подхода в прикладной математике, программировании и вычислительной технике // Зап. науч. семинаров ЛОМИ / Мат. ин-т им.В.А.Стеклова. Ленингр. отд-ние. - 1974. - Т.48. - С.5-11.
16. Канторович Л.В., Фет Я.И. Вычислительная система, состоящая из универсальной цифровой вычислительной машины и малой цифровой вычислительной машины: Авторское свидетельство СССР № 172567 от 02.11.63 // Бюл. изобретений. - 1965. - № 13.
17. Технический проект арифметической машины АМ. - Новосибирск: изд. Ин-та математики СО АН СССР, 1965.
18. Канторович Л.В., Фет Я.И. О возможности повышения производительности универсальных ЦВМ при решении экономико-математических задач // Экономика и мат. методы. - 1969. - Т.5. вып.2. - С.276-279.
19. Канторович Л.В., Фет Я.И., Иловайский И.В. Арифметическое устройство цифровой вычислительной машины: Авторское свидетельство СССР № 209032 от 10.05.65 // Бюл. изобретений. - 1968. - № 4.
20. Канторович Л.В., Фет Я.И., Иловайский И.В. Сумматор для одновременного сложения нескольких двоичных чисел слагаемых: Авторское свидетельство СССР № 188151 от 15.03.65 // Бюл. изобретений. - 1966. - № 21.
21. Канторович Л.В. Пути развития вычислительных средств для решения больших задач оптимального планирования и управления // Оптимизация. - Новосибирск, 1972. Вып. 6(23). - С.5-7.
22. Канторович Л.В., Петрова Л.Т., Фет Я.И. Комплексный подход к реализации массовых вычислений // Оптимизация. - Новосибирск, 1974. - Вып. 13(30). - С.5-11.



23. Фет Я.И. Массовая обработка информации в специализированных однородных процессорах / Отв. ред. Л.В.Канторович. - Новосибирск: Наука, 1976.
24. Канторович Л.В., Фет Я.И. Архитектура будущих ЭВМ // Природа. - 1986. - № 7. - С.3-15.

Поступила в ред.-изд. отдел  
15.12.1986 г.