Доклады Академии наук СССР
1973. Том 208, № 2

УДК 681.325.5 *КИБЕРНЕТИКА И ТЕОРИЯ РЕГУЛИРОВАНИЯ*

Академик АН УССР Г. Е. ПУХОВ, В. Ф. ЕВДОКИМОВ

ОБ ОДНОМ ВОЗМОЖНОМ ПРИНЦИПЕ ПОСТРОЕНИЯ ЦИФРОВЫХ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МАШИН

Известно, что точность и быстродействие цифровых вычислительных машин (ЦВМ) почти пропорциональны объему оборудования, необходимого для вычислений, в то время как в аналоговых вычислительных машинах (АВМ) точность принципиально ограничена возможностями решающих элементов, а быстродействие практически не зависит от объема оборудования. Существует возможность построения машин, объем оборудования которых не зависит от их быстродействия, а с увеличением точности растет так же, как у ЦВМ. Это позволяет получить в этих машинах точность ЦВМ и быстродействие АВМ, что считается в вычислительной технике практически невозможным. Указанная цель достигается путем использования для построения цифровых машин неалгоритмического принципа, широко применяющегося в АВМ. Машины, построенные на базе такого принципа будем называть ц и ф р о в ы м и н е а л г о р и т м и ч е с к и м и м а ш и н а м и (ЦНМ).

Система кодирования чисел, используемая в ЦНМ и позволяющая достаточно просто получать числа обоих знаков без использования специального знакового разряда, образуется путем введения знаков в каждый разряд числа; назовем этот код з н а к о в ы м. Все сказанное далее распространяется на любую систему счисления, но мы ограничимся рассмотрением десятичной, как наиболее наглядной и удобной. Пусть, например, в знаковом коде задано число $A_1 = 3\bar{4}2\bar{3}$, где черта над вторым и четвертым разрядами означает, что эти разряды отрицательны. Тогда в обычный код, который является частным случаем знакового, когда все разряды имеют один знак, оно переводится следующим образом:

$$B_1 = 3\cdot 10^3 - 4\cdot 10^2 + 2\cdot 10^1 - 3\cdot 10^0 = +2617.$$

Перевод числа из обычного кода в знаковый не однозначен. Например, число $B_2 = 323$ может быть представлено в знаковом коде тремя способами, если ограничиться тремя разрядами:

$$A_2 = 4\bar{8}3, \quad A_2 = 4\bar{7}7, \quad A_2 = 33\bar{7};$$

однако можно показать, что, несмотря на эту неоднозначность, результат выполнения арифметических операций в знаковом коде однозначно соответствует аналогичному результату в обычном коде.

Число $a = A_1, A_2, \ldots, A_i, \ldots, A_n$, заданное в знаковом коде, представляется в машине вектором напряжений

$$U = \begin{array}{|c|c|c|c|c|c|}\hline u_1 & u_2 & \cdots & u_i & \cdots & u_n \\ \hline\end{array}\,' = \begin{array}{|c|c|c|c|c|c|}\hline kA_1 & kA_2 & \cdots & kA_i & \cdots & kA_n \\ \hline\end{array}\,,$$

где k — коэффициент пропорциональности.

При построении машин с фиксированной запятой некоторое количество разрядов (и, следовательно, компонент вектора U) выделяется под целую часть, остальные — под дробную. Функции одного аргумента дискретизуются по аргументу и в машине представляются вектором напряжений U_i на каждом i-м шаге дискретизации. Тогда операция сложения чисел в машине осуществляется путем суммирования соответствующих векторов напряжений с учетом переноса:

$$U_3 = S(U_1 + U_2),$$

где U_1, U_2 — векторы напряжений, представляющие в машине слагаемые, U_3 — вектор напряжений, представляющий в машине результат сложения, S — операция, соответствующая переносу в случае переполнения разрядов при сложении чисел в обычном коде.

Перемножение двух чисел $a = A_1, A_2, \ldots, A_i, \ldots, A_n$ и $b = B_1, B_2, \ldots$ $\ldots, B_i, B_n$, представленных в машине соответственно векторами

$$U_1 = \begin{array}{|c|c|c|c|c|c|}\hline u_{11} & u_{12} & \cdots & u_{1i} & \cdots & u_{1n} \\ \hline\end{array}\,', \quad U_2 = \begin{array}{|c|c|c|c|c|c|}\hline u_{21} & u_{22} & \cdots & u_{2i} & \cdots & u_{2n} \\ \hline\end{array}\,',$$

осуществляется по правилу, которое в матричной форме при $n = 3$ может быть записано следующим образом:

$$\begin{array}{|c|c|c|}\hline u_{11} & & \\ \hline u_{12} & u_{11} & \\ \hline u_{13} & u_{12} & u_{11} \\ \hline & u_{13} & u_{12} \\ \hline & & u_{13} \\ \hline\end{array} \quad \begin{array}{|c|}\hline u_{21} \\ \hline u_{22} \\ \hline u_{23} \\ \hline \\ \hline \\ \hline\end{array} \quad = \quad \begin{array}{|l|}\hline u_{11}\,u_{21} \\ \hline u_{12}\,u_{21} + u_{11}\,u_{22} \\ \hline u_{13}\,u_{21} + u_{12}\,u_{22} + u_{11}\,u_{23} \\ \hline u_{13}\,u_{22} + u_{12}\,u_{23} \\ \hline u_{13}\,u_{23} \\ \hline\end{array}$$

или

$$S\{D(U_1) \cdot U_2\} = U_3, \tag{1}$$

где $D(U_1)$ — матрица, коэффициенты которой зависят от компонент вектора U_1 и, следовательно, от разрядов числа a, S — операция переноса, U_3 — результат перемножения.

На рис. 1 приведена схема устройства для умножения некоторой переменной a, представленной в машине вектором напряжений U_1, на постоянный коэффициент b. Устройство реализует операцию (1) и построено на базе элементов АВМ. Если использовать, например, операционные усилители с шкалой напряжения $U_0 = 100$ в, то коэффициент пропорциональности k между значением разряда числа и моделирующей его компонентой вектора U равен 10. Блоки S представляют собой устройства, реализующие операцию переноса. При достижении на выходе какого-либо из усилителей напряжения $U_0 = 100$ в соответствующее устройство S должно его скомпенсировать, а в усилитель следующего старшего разряда передать напряжение 10 в, соответствующее единице.

Если теперь сделать матрицу проводимостей G_1 управляемой, т. е. такой, чтобы ее коэффициенты как-то зависели от компонент вектора U_2, представляющего в машине другую машинную переменную b, то на базе рассмотренного устройства можно построить множитель, квадратор, функциональный преобразователь и т. д.

При необходимости осуществлять суммирование двух переменных с одновременным умножением их на постоянные или переменные коэффициенты в устройстве добавляется еще одна матрица G_2, на входы которой подается вторая из суммируемых переменных, выходы матрицы подключаются к входам операционных усилителей *1—5*, а коэффициенты ее g_{ij} настраиваются пропорционально соответствующим компонентам вектора напряжений, представляющего в машине коэффициент, на который умножается переменная. Для реализации операции вычитания на входе устройства по одной из переменных включается блок инвертирования переменной, представляющий собой набор обычных инверторов АВМ по количеству разрядов вычитаемой функции. Поскольку в данному случае речь идет об устройстве, оперирующем тремя разрядами чисел, то на выход его подается только три старших разряда u_{31}, u_{32}, u_{33}.

На рис. 2 приведен один из возможных вариантов схемы устройства, предназначенного для интегрирования функций времени. С целью упрощения здесь показана только третья строка матрицы емкостей C_1, C_2, C_3, а вся матрица в целом по структуре аналогична матрице сопротивлений, показанной на рис. 1. Работает устройство следующим образом. На первом такте дискретизации по времени интегрируемой функции на вход устройства подается вектор напряжений U_1 при замкнутых ключах K_1 и разомкнутых K_2, после этого ключи K_1 размыкаются, а K_2 — замыкаются, что приводит к разряду емкостей C_1, C_2, C_3, несмотря на что вектор напряжений U_1 на выходах операционных усилителей *1—5* остался равным $U_1\Delta t$, поскольку емкости C_1, C_2, C_3 настроены пропорционально соответствующим разрядам шага дискретизации $\Delta t = \Delta t_1\Delta t_2\Delta t_3$. После этого ключи K_1 и K_2 возвращаются в исходное состояние, а на вход схемы поступает вектор напряжений U_2, представляющий в машине интегрируемую функцию времени на втором шаге дискретизации. На выходе устройства при этом образуется вектор напряжений

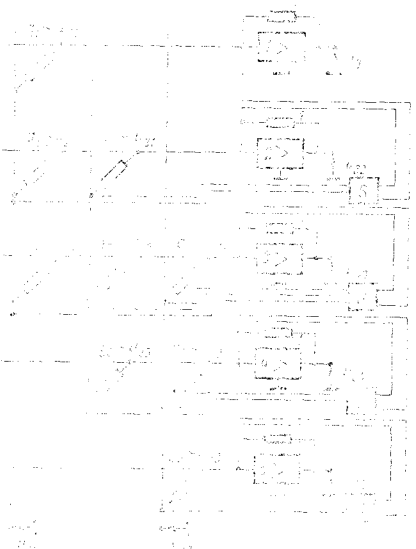

Рис. 1. Устройство для перемножения переменной на постоянный коэффициент

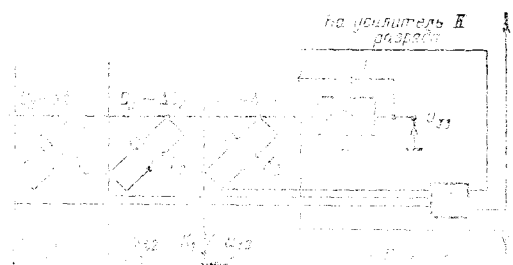

Рис. 2. Интегратор

$$U_{11} = \Delta t(U_1 + U_2),$$

а ключи K_1 и K_2 перебрасываются в противоположное состояние и т. д. Таким образом, на выходе устройства на каждом шаге дискретизации получаем вектор напряжений, представляющий собой приближенное значение интеграла входной функции времени, полученное по методу прямоугольников.

Реализация логических операций в ЦНМ осуществляется на основе непрерывной диодной логики.

Основным достоинством описанных устройств является их неалгоритмичность, поэтому быстродействие их определяется только временем переходных процессов в схеме, и при использовании элементов, обладающих высокочастотными свойствами, оно значительно превосходит быстродействие существующих алгоритмических цифровых устройств, а также аналоговых устройств с последовательным использованием решающих элементов.

Можно указать на три основных направления построения структур неалгоритмических цифровых машин на базе описанного принципа. Первое из них заключается в использовании описанных устройств в качестве приставок для универсальных серийно выпускаемых ЦВМ с целью увеличения быстродействия последних. Второе направление охватывает разработку машин, подобных по структуре АВМ широкого назначения, при этом практически достигается быстродействие АВМ и точность ЦВМ. И, наконец, третье направление основано на разработке специализированных машин, предназначенных для решения конкретных научно-технических задач.

Институт электродинамики
Академии наук УССР
Киев

Поступило
27 VII 1971