УДК 681.142.34

О КОММУТАЦИИ ЦИФРОВЫХ ИНТЕГРАТОРОВ В ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СТРУКТУРАХ

А.В. Каляев, А.Н. Мелихов, Н.А. Пудзенков
Л.С. Берштейн, В.И. Кодачигов
(Таганрог)

I. Оценка количества задач, реализуемых с помощью цифровых интеграторов

Вычислительные структуры, состоящие из обобщенных цифровых интеграторов, позволяют решать широкий круг задач, которые сводятся к уравнениям Шеннона [I]

$$\left.\begin{aligned} dY_p &= A_p\, dZ, \\ dY_q &= A_q\, dZ; \\ dZ &= M(Y_p)\, dY_q, \\ Y_p(x_0) &= Y_{p0}. \end{aligned}\right\} \qquad (I)$$

Программа решения любой задачи на такой вычислительной структуре полностью определяется двумя матрицами, одна из которых задает коммутацию интеграторов по входам переменных интегрирования $Y_q(x)$

$$A_q = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ A_{q21} & A_{q22} & A_{q23} & \dots & A_{q2N} \\ A_{q31} & A_{q32} & A_{q33} & \dots & A_{q3N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ A_{qN1} & A_{qN2} & A_{qN3} & \dots & A_{qNN} \end{bmatrix}, \qquad (2)$$

а другая – по входам подынтегральных функций $Y_p(x)$

$$A_p = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ A_{p21} & A_{p22} & A_{p23} & \dots & A_{p2N} \\ A_{p31} & A_{p32} & A_{p33} & \dots & A_{p3N} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ A_{pN1} & A_{pN2} & A_{pN3} & \dots & A_{pNN} \end{bmatrix}. \qquad (3)$$

Элементы матриц A_p и A_q могут принимать значения, равные либо нулю, либо единице.

Можно показать, что несмотря на простоту программы и относительно небольшое число интеграторов N, необходимых для её реализации, количество задач, которые могут быть решены таким методом, весьма велико.

При определении общего количества задач, которые могут быть решены с помощью вычислительной структуры, состоящей из N интеграторов, следует ограничить максимальное число входов каждого класса интегратора как для подынтегральной функции $y_p(x)$, так и для переменной интегрирования $y_q(x)$ (рис.I). Предположим, что число входов в каждом интеграторе

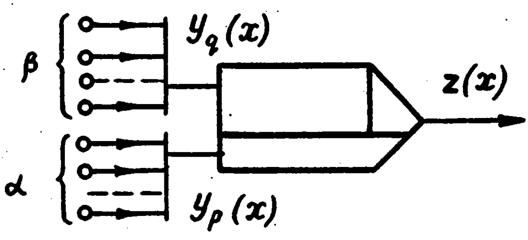

Рис. I.

для подынтегральной функции $y_p(x)$ равно α, а для переменной интегрирования $y_q(x)$ соответственно β. Это означает, что в матрице A_p^{α}, состоящей из N строк и N столбцов, в каждой строке содержится не более α единиц, а в каждой строке матрицы A_p^{β} – не более β единиц. Столбцы матриц A_p^{α} и A_q^{β} могут содержать от 0 до $(N-1)$ единиц.

Количество задач, решаемых с помощью вычислительной структуры из N интеграторов, определяется числом отличных друг от друга пар программных матриц. Рассмотрим матрицу A_p^{α} и вычислим общее число возможных комбинаций из единиц и нулей в каждой строке. Так как в каждой строке содержится N элементов, из которых единиц не более α, а остальные нули, то об-

щее количество различных комбинаций в любой строке матрицы A_p^α равно

$$S_p = \sum_{i=0}^{\alpha} C_N^i \quad , \tag{4}$$

где C_N^i – число сочетаний из N элементов по i .

Совокупность всех возможных для каждой строки различных комбинаций из нулей и единиц образует множество M_p , общее число элементов которого определяется величиной S_p . Произвольная матрица A_p^α может быть получена как совокупность первой постоянной строки и любых ($N - 1$) элементов из множества M_p . Нетрудно видеть, что множество M_{A_p} матриц коммутации A_p^α является ($N - 1$) – кратным декартовым произведением множеств M_p .

$$\underbrace{M_{A_p} = M_p \times M_p \times M_p \times \ldots \times M_p}_{N-1} = M_p^{N-1} . \tag{5}$$

Число элементов множества M_{A_p} будет очевидно равно

$$Q_p = S_p^{N-1} = \Big[\sum_{i=0}^{\alpha} C_N^i \Big]^{N-1} . \tag{6}$$

Таким образом, число различных матриц A_p^α определяется величиной Q_i . Аналогично можно получить выражения для числа матриц A_q^β , составляющих множество M_{A_q} ,

$$Q_q = \Big[\sum_{j=0}^{\beta} C_N^j \Big]^{N-1} . \tag{7}$$

Полное число задач, которые могут быть решены на N интеграторах , определяется декартовым произведением множеств $M_A = M_{A_p} \times M_{A_q}$ и равно

$$Q = Q_p Q_q = \Big[\Big(\sum_{i=0}^{\alpha} C_N^i \Big) \Big(\sum_{j=0}^{\beta} C_N^j \Big) \Big]^{N-1} = \Big(\sum_{i=0}^{\alpha} \sum_{j=0}^{\beta} C_N^i \, C_N^j \Big)^{N-1} . \tag{8}$$

В пределе при $\alpha = \beta = N$, как нетрудно установить, получим

$$Q = 2^{2(N-1)N} .$$

Если $\alpha < N$ и $\beta < N$ (что является наиболее вероятным с практической точки зрения), то для грубой оценки коли-

чества решаемых задач можно с учетом

$$\sum_{i=0}^{\alpha} C_N^i \approx \frac{N^\alpha}{\alpha!}; \qquad \sum_{j=0}^{\beta} C_N^j \approx \frac{N^\beta}{\beta!}, \tag{9}$$

принять

$$Q = \frac{N^{(\alpha+\beta)(N-1)}}{(\alpha!\,\beta!)^{N-1}}. \tag{10}$$

Например, для $N = 100$, $\alpha = \beta = 3$ имеем $Q \approx 10^{1000}$.

Как видно, число задач, которые могут быть решены с помощью вычислительной структуры, состоящей из 100 интеграторов, каждый из которых имеет по три входа в отдельности для функций $y_p(x)$ и $y_q(x)$, необозримо. Это обстоятельство подчеркивает широкие возможности подобной вычислительной структуры.

2. Об изоморфизме коммутирующих матриц.

Каждая пара матриц $(A_p^\alpha, A_q^\beta)_k \in M_A$ $(k = 1,2,\ldots,Q)$ определяет решение конкретной задачи. Все пары матриц, принадлежащие множеству M_A, отличаются друг от друга. Однако из множества M_A можно выделить такие пары, которые, различаясь между собой, определяют в то же время программу решения одной и той же задачи. Пары матриц, которые отличаются друг от друга, но решают одну и ту же задачу, будем называть изоморфными. Совокупность всех различных пар матриц, которые решают одну и ту же задачу, будем называть изоморфным подмножеством $И_A$ множества M_A ($И_A \subset M_A$).

Множество всех различных пар матриц

$$M_A = \{(A_p^\alpha, A_q^\beta)_1, (A_p^\alpha, A_q^\beta)_2, \ldots, (A_p^\alpha, A_q^\beta)_Q\}$$

можно разбить на подмножества изоморфных матриц

$$M_A = \{И_{A_1}, И_{A_2}, \ldots, И_{AS}\} \quad (S < Q).$$

Число изоморфных подмножеств S определяет число различных задач, которые могут быть решены на вычислительной структуре из N интеграторов.

Каждое подмножество $И_{Al} \subset M_A$ $(l = 1,2,\ldots,S)$ можно

образовать из одной пары матриц $(A_p^\alpha, A_q^\beta)_k \in И_{A1}$. Действительно, если в каждой матрице пары $(A_p^\alpha, A_q^\beta)_k$ одновременно переставить местами i-ю и j-ю строки, а также i-й и j-й столбцы

$$A_p^\alpha = \begin{array}{c} \\ i \\ \\ j \\ \\ \end{array} \left[\begin{array}{ccccc} & i & & j & \\ & \vdots & & \vdots & \\ \cdots & A_{pii} & \cdots & A_{pij} & \cdots \\ & \vdots & & \vdots & \\ \cdots & A_{pji} & \cdots & A_{pjj} & \cdots \\ & \vdots & & \vdots & \end{array} \right], \quad A_q^\beta = \left[\begin{array}{ccccc} & i & & j & \\ & \vdots & & \vdots & \\ \cdots & A_{qii} & \cdots & A_{qij} & \cdots \\ & \vdots & & \vdots & \\ \cdots & A_{qji} & \cdots & A_{qjj} & \cdots \\ & \vdots & & \vdots & \end{array} \right], \qquad (11)$$

то получим новую пару матриц, отличающуюся от исходной, но которая решает ту же самую задачу и, следовательно, является изоморфной. Если сохранять неизменными в каждой матрице первый столбец и первую строку, которые определяют ввод в интеграторы независимой переменной x, то общее число возможных описанных перестановок строк и столбцов в паре матриц $(A_p^\alpha, A_q^\beta)_k$ будет равно $(N-1)!$

Однако не все перестановки будут приводить к различным изоморфным матрицам. Некоторые перестановки в случаях, когда одновременно $A_{pii} = A_{pjj}$, $A_{pij} = A_{pji}$, $A_{qii} = A_{qjj}$ и $A_{qij} = A_{qji}$, будут приводить к тождественным, не отличающимся друг от друга, матрицам. Поэтому общее число различных матриц $Q_{И1}$ в изоморфном подмножестве $И_{A1}$ будет равно

$$Q_{И1} = (N - 1) - T_1 , \qquad (12)$$

где T_1 - число тождественных матриц в подмножестве $И_{A1}$, которые образуются при всех возможных перестановках строк и столбцов описанного типа.

Общее число матриц Q в множестве M_A равно сумме мат-

риц всех изоморфных подмножеств $И_{Al} \subset M_A$ $(l = 1,2,\dots S)$:

$$Q = \sum_{l=1}^{S} Q_{Иl} , \qquad (13)$$

или, учитывая (12),

$$Q = (N-1)!\, S - \sum_{l=1}^{S} T_l \; . \qquad (14)$$

Следовательно,

$$S > \frac{Q}{(N-1)!} \; . \qquad (15)$$

Величина S, представляющая собой число изоморфных классов в множестве M_A, определяет одновременно число задач, которые могут быть решены на вычислительной структуре из N интеграторов.

Оценить общее число различных решаемых задач можно исходя из (15) и принимая во внимание неравенство $S < Q$:

$$Q > S > \frac{Q}{(N-1)!} \; . \qquad (16)$$

Учитывая (10) и то, что при больших N

$$(N-1)! \approx \frac{\sqrt{2\pi N}}{e^N} N^{(N-1)} , \qquad (17)$$

окончательно найдем

$$\frac{N^{(\alpha+\beta)(N-1)}}{(\alpha!\,\beta!)^{N-1}} > S > \frac{e^N}{\sqrt{2\pi N}} \cdot \frac{N^{(\alpha+\beta-1)(N-1)}}{(\alpha!\,\beta!)^{N-1}} \; . \qquad (18)$$

Для случая $N = 100;\ \alpha = \beta = 3,\quad 10^{1000} > S > 10^{840}$.

Как видно, даже при исключении изоморфных матриц в множестве M_A (в каждом подмножестве $И_{Al}$, $l=1,2,\dots S$) остается лишь по одной матрице, а остальные отбрасываются. Число задач, которые можно решить на вычислительной структуре из N интеграторов, весьма велико.

Среди неизоморфных пар матриц, оставшихся при исключении из множества M_A изоморфных пар матриц, могут встретиться такие пары, у которых в матрице A_p^α совпадают между собой несколько строк

$$A_{pi\gamma} = A_{pj\gamma} = A_{pk\gamma} \qquad (\gamma = 1,2,\dots,N) \qquad (19)$$

и одновременно совпадают между собой строки под теми же номе-

рами в матрице A_q^β

$$A_{qi\gamma} = A_{qj\gamma} = A_{qk\gamma} \quad (\gamma = 1,2,\ldots,N). \qquad (20)$$

Это означает, что интеграторы с соответствующими номерами i, j и k получают одинаковую входную информацию и вырабатывают одинаковые функции на выходе

$$Z_i(x) = Z_j(x) = Z_k(x) \; . \qquad (21)$$

Если при этом сумма элементов соответствующих столбцов не превышает единицу

$$(A_{p\gamma i} + A_{p\gamma j} + A_{p\gamma k}) = \begin{cases} 0 \\ 1 \end{cases} \quad (\gamma = 1,2,..,N), \qquad (22)$$

$$(A_{q\gamma i} + A_{q\gamma j} + A_{q\gamma k}) = \begin{cases} 0 \\ 1 \end{cases} \quad (\gamma = 1,2,..,N), \qquad (23)$$

то можно исходную пару матриц (A_p^α, A_q^β) заменить парой матриц, в которой строки $A_{pi\gamma}$ и $A_{qi\gamma}$ оставлены без изменения, строки $A_{pj\gamma}$; $A_{pk\gamma}$; $A_{qj\gamma}$ и $A_{qk\gamma}$ и столбцы $A_{p\gamma j}$, $A_{p\gamma k}$, $A_{q\gamma j}$ и $A_{q\gamma k}$ $(\gamma = 1,2,\ldots,N)$ заменены нулями,

$$\begin{aligned} A_{pj\gamma} &= A_{pk\gamma} = 0 , \\ A_{qj\gamma} &= A_{qk\gamma} = 0 , \\ A_{p\gamma j} &= A_{p\gamma k} = 0 , \\ A_{q\gamma j} &= A_{q\gamma k} = 0 . \end{aligned} \qquad (24)$$

$$(\gamma = 1,2,\ldots,N) ,$$

а столбцы $A_{p\gamma i}$ и $A_{q\gamma i}$ $(\gamma = 1,2,\ldots,N)$ образуются по правилу

$$\begin{aligned} A^*_{p\gamma i} &= A_{p\gamma i} + A_{p\gamma j} + A_{p\gamma k} ; \\ &\quad (\gamma = 1,2,3,\ldots,j-1,j+1,\ldots,k-1,k+1,\ldots,N), \\ A^*_{q\gamma i} &= A_{q\gamma i} + A_{q\gamma j} + A_{q\gamma k} ; \\ &\quad (\gamma = 1,2,3,\ldots,j-1,j+1,\ldots,k-1,k+1,\ldots,N), \\ A^*_{p\gamma i} &= 0, \quad A_{q\gamma i} = 0; \qquad \gamma = (j,k). \end{aligned} \qquad (25)$$

В случае выполнения описанной операции при замене исходной пары матриц новой парой с нулевыми строками и столбцами решаемая задача по существу не меняется, хотя число интеграторов, участвующих в её решении, уменьшается. В связи с этим подобные матрицы можно называть квазиизоморфными.

К числу квазиизоморфных матриц можно отнести и такие пары матриц, которые содержат одноименные нулевые строки

$$A_{p_i\gamma} = A_{p_j\gamma} = A_{p_k\gamma} = 0,$$
$$A_{q_i\gamma} = A_{q_j\gamma} = A_{q_k\gamma} = 0 \quad (\gamma = 1,2,\ldots,N) \tag{26}$$

и отличаются только столбцами

$$A_{p\gamma i} \; , \; A_{p\gamma j} \; , \; A_{p\gamma k} \qquad (\gamma = 1,2,\ldots,N)$$

или столбцами

$$A_{q\gamma i} \; , \; A_{q\gamma j} \; , \; A_{q\gamma k} \qquad (\gamma = 1,2,\ldots,N).$$

Это означает, что интеграторы с номерами i, j и k вырабатывают на выходе нулевые функции $Z_i(x) = Z_j(x) = Z_k(x) = 0$.

Поэтому столбцы $A_{p\gamma i}$, $A_{p\gamma j}$, $A_{p\gamma k}$, $A_{q\gamma i}$, $A_{q\gamma j}$ и $A_{q\gamma k}$ можно заменить нулевыми

$$A_{p\gamma\eta} = 0 \qquad (\gamma = 1,2,\ldots,N),$$
$$A_{q\gamma\eta} = 0 \qquad (\eta = 1,2,\ldots,N). \tag{27}$$

Таким образом, общее число различных задач, решаемых с помощью N интеграторов, будет, вообще говоря, меньше, чем число, определяемое соотношением (I8).

Это число еще более уменьшится, если исключить из рассмотрения матрицы, которые программируют на вычислительной структуре многократное решение одной и той же задачи. Такой случай возникает тогда, когда каждая матрица пары $(A_p^{\alpha}\, , A_q^{\beta})$ может быть представлена (одновременно с другой матрицей пары) в виде клеточной матрицы, у которой отличны от нуля и равны между собой клетки, расположенные по главной диагонали (от $ii = 11$ до $ii = MM$), а остальные клетки – нулевые. Некоторые пары матриц могут быть приведены к диагональным клеточным матрицам с одинаковыми клетками за счет перестановок строк и столбцов. Такие матрицы, в известном смысле, также можно от-

вести к классу квазиизоморфных.

Полное определение числа изоморфных тождественных и квазиизоморфных коммутирующих (программирующих) пар матриц, а следовательно, и точная оценка количества решаемых на вычислительной структуре, задач, представляет собой самостоятельную достаточно сложную проблему, подлежащую решению.

3. Системы коммутации в вычислительных структурах

Для физической реализации произвольной программы, заданной парой матриц $(A_p^{\alpha}, A_q^{\beta})_k$, необходима вычислительная структура, состоящая из N цифровых интеграторов, в которой предусмотрена возможность любых соединений между интеграторами. Такая возможность может быть обеспечена с помощью системы коммутации (рис.2), состоящей из

$$K_{max} = (\alpha + \beta) \cdot N^2 \qquad (28)$$

коммутирующих элементов. При реализации каждой конкретной пары матриц из общего числа коммутирующих элементов фактически будут использоваться лишь $(\alpha + \beta)N$ элементов. Остальные элементы необходимы по существу лишь для обеспечения максимальной универсальности вычислительной структуры.

Как правило, большая часть задач, встречающихся на практике, не требует максимальной универсальности вычислительной структуры. Действительно, любую сложную задачу, например, систему нелинейных дифференциальных уравнений, можно расчленить на ряд самостоятельных более простых задач, каждая из которых может быть запрограммирована с помощью отдельной группы интеграторов, причем такие группы объединяются между собой в соответствии с общей задачей относительно небольшим числом связей (рис. 3). В частности, все функциональные зависимости, входящие в решаемую систему уравнений, могут быть образованы с помощью изолированных групп цифровых интеграторов, а система дифференциальных уравнений в целом может быть образована в виде колец и цепей, состоящих из подобных групп и отдельных цифровых интеграторов (рис.4).

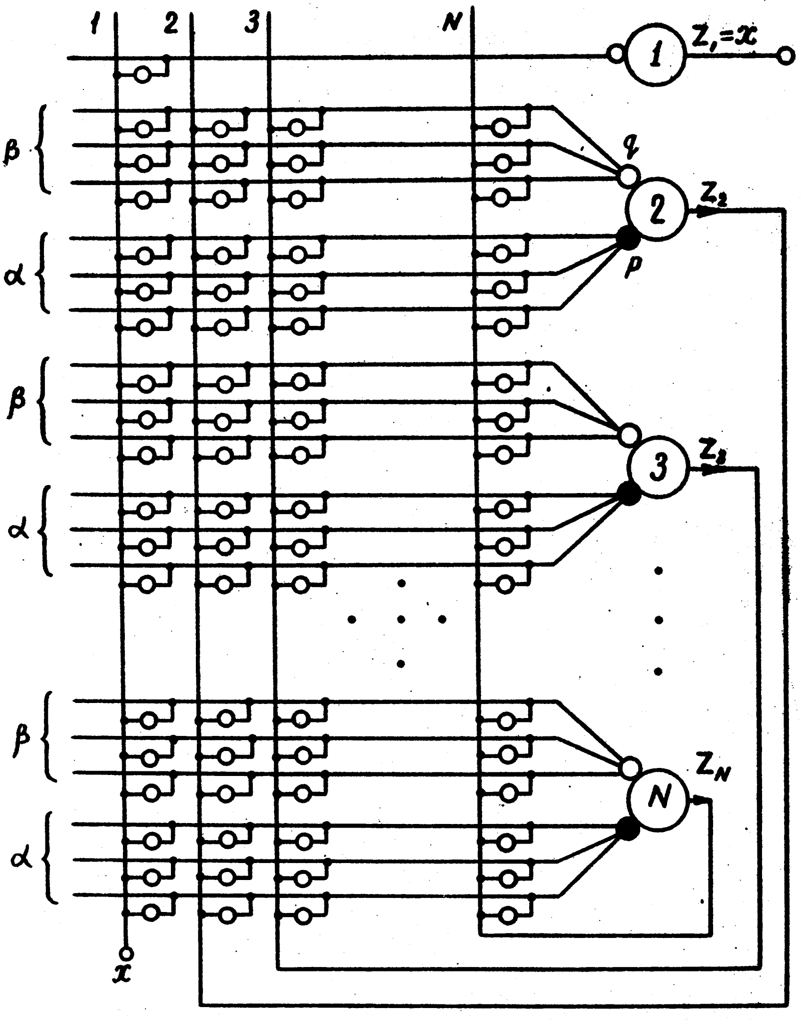

Рис. 2

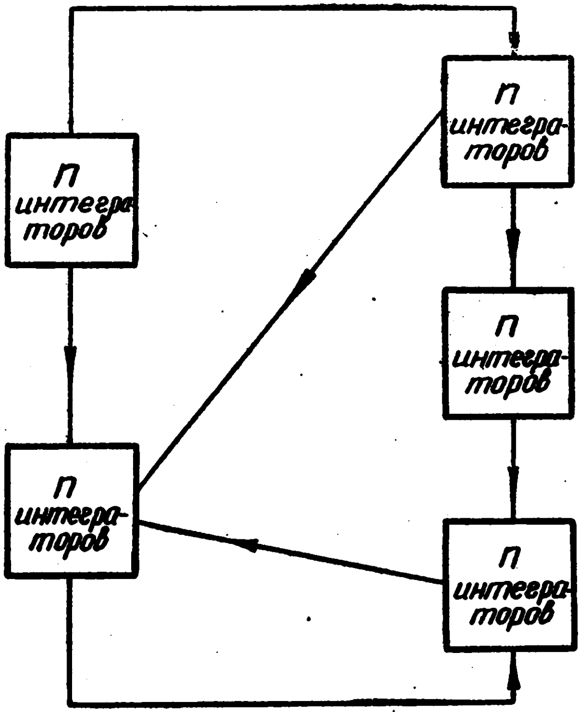
n интегра-торов
n интегра-торов
n интегра-торов
n интегра-торов
n интегра-торов

Рис. 3

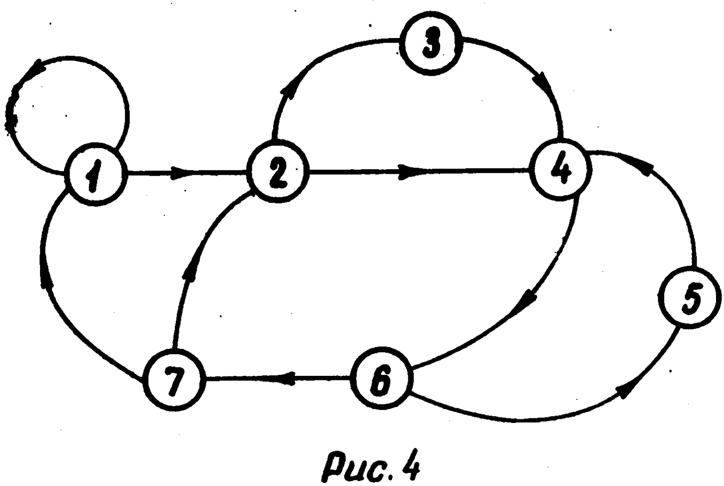
1
2
3
4
5
6
7

Рис. 4

В результате оказывается возможным уменьшить общее число коммутирующих элементов и тем самым упростить вычислительную структуру.

Имеется несколько путей снижения числа коммутирующих элементов, из которых мы рассмотрим два.

Первый путь заключается в объединении интеграторов в группы по n решающих блоков ($n < N$), внутри которых любой интегратор соединяется с любым другим интегратором. Отдельные группы соединяются между собой в любом порядке, но количество входов и выходов в каждой группе ограничено. Общее число коммутирующих элементов в этом случае будет определяться выражением

$$K = (\alpha + \beta)Nn + \eta\gamma\left(\frac{N}{n}\right)^2, \tag{29}$$

где $(\alpha + \beta)$ – общее количество входов каждого интегратора,
η и γ – число входов и выходов группы интеграторов .

Как видно, K зависит от n , причем функция $K(n)$ имеет минимум, который, как нетрудно определить, имеет место при

$$n = \sqrt[3]{\frac{2\eta\gamma N}{\alpha + \beta}}, \tag{30}$$

причем

$$K_{min} = \frac{3}{2} N \sqrt[3]{2(\alpha + \beta)^2 \eta\gamma N}. \tag{31}$$

Таким образом, при образовании групп интеграторов в соответствии с условием (30) количество коммутирующих элементов уменьшается в L раз

$$L = \frac{K_{max}}{K_{min}} = \frac{1}{3} \sqrt[3]{\frac{4(\alpha + \beta) N^2}{\eta\gamma}}. \tag{32}$$

Если, например, $N = 108$, $(\alpha + \beta) = \eta\gamma = 6$, то $L = 12$.

Второй путь уменьшения числа коммутирующих элементов состоит в организации вычислительной структуры по принципу близкодействия, когда каждый интегратор окружается кольцом коммутирующих элементов (рис.5) и из таких стандартных блоков конструируется плоская вычислительная структура без просветов, которая работает по принципу коммутации соседнего элемента с соседним. Такую вычислительную структуру будем называть в дальнейшем квазиоднородной.

В простейшем случае каждый интегратор и коммутирующий элемент, а также любой стандартный блок в целом могут иметь

формулу квадрата (рис.5). При этом интегратор будет иметь 3 входа и один выход и будет окружен восемью коммутирующими элементами. Вычислительная структура, состоящая из квадратных стандартных блоков, изображена на рис.6.

Общее число коммутирующих элементов, входящих в квазиоднородную вычислительную структуру из N интеграторов, равно

$$K_{min} = 8N . \qquad (33)$$

По сравнению с универсальной коммутирующей системой количество коммутирующих элементов в квазиоднородной вычислительной структуре уменьшается в L раз

$$L = \frac{K_{max}}{K_{min}} = \frac{\alpha + \beta}{8} N . \qquad (34)$$

Для $N = 108$, $(\alpha + \beta) = 6$, $L = 81$.

Как видно, в квазиоднородной вычислительной структуре коммутирующих элементов оказывается значительно меньше, чем в структуре, состоящей из отдельных групп интеграторов. Но следует иметь в виду, что сами коммутирующие элементы оказываются в этом случае более сложными, чем в вычислительной среде[2].

Квазиоднородная вычислительная структура также может быть разбита на отдельные группы интеграторов, с помощью которых решаются отдельные изолированные части задачи и из которых затем набирается структура решаемой задачи в целом. Конечно, при этом связи как внутри групп, так и между отдельными группами могут оказаться более ограниченными, чем в предыдущем случае.

Решение некоторых задач может потребовать интеграторов с количеством входов $(\alpha + \beta) > 3$. В этом случае затруднительно использовать квазиоднородную вычислительную структуру, состоящую из квадратных стандартных элементов.

Если цифровой интегратор имеет $(\alpha + \beta) = 5$ входов и один выход, то он может быть изображен шестиугольной симметричной фигурой, которая должна быть окружена кольцом таких же шестиугольных коммутирующих элементов (рис.7).

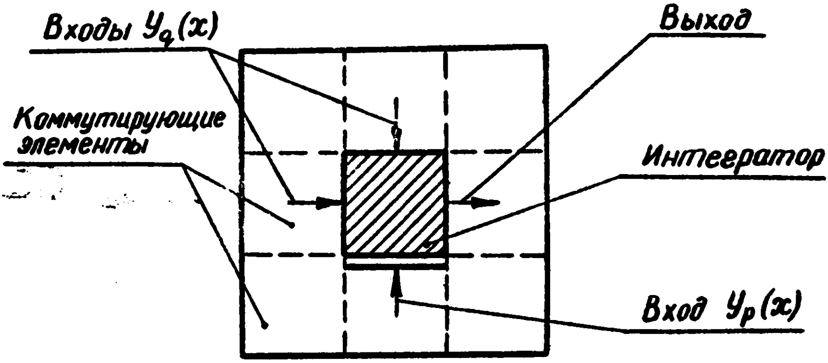
Входы $y_q(x)$
Выход
Коммутирующие элементы
Интегратор
Вход $y_p(x)$

Рис. 5

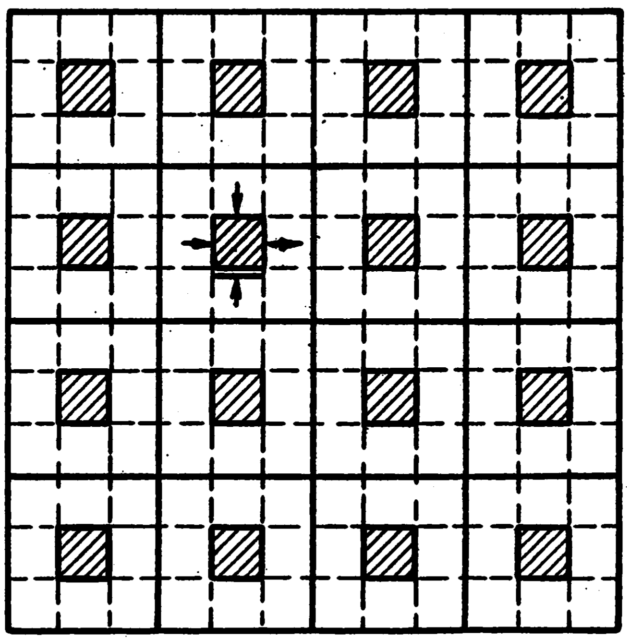

Рис. 6

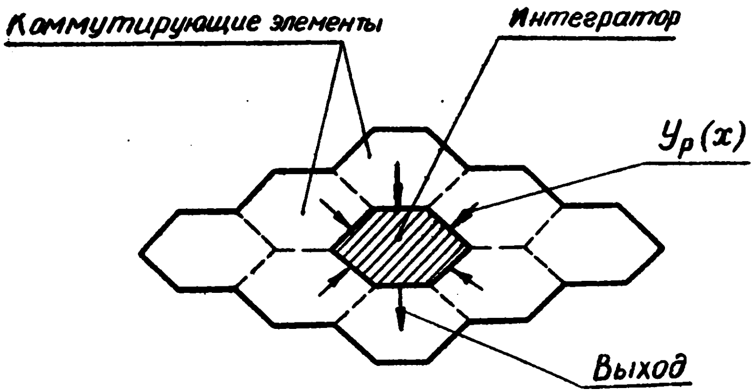

Рис. 7.

Введем шестиугольные коммутирующие элементы двух типов: **P** и **D** (аналогичные коммутирующим элементам, разработанным в [2]). Матрицу смежности коммутирующего элемента типа **P** определим следующим образом:

$$P = \begin{bmatrix} 0 & I & I & I & I & I \\ I & 0 & I & I & I & I \\ I & I & 0 & I & I & I \\ I & I & I & 0 & I & I \\ I & I & I & I & 0 & I \\ I & I & I & I & I & 0 \end{bmatrix}. \qquad (35)$$

Такая матрица реализует соединения, изображенные на рис.8.

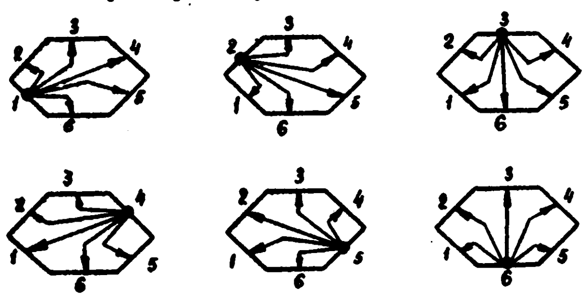

Рис. 8.

Матрица смежности коммутирующего элемента типа D может быть записана в виде

$$D = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & I & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & I & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & I \\ I & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & I & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & I & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \qquad (36)$$

Эта матрица реализует соединения, представленные на рис.9.

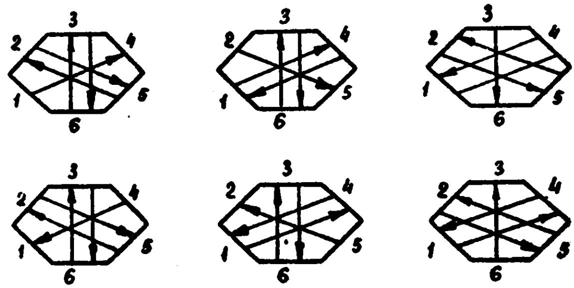

Рис. 9

Общий вид квазиоднородной вычислительной структуры, которая построена на стандартных элементах, состоящих из пятивходных цифровых интеграторов и коммутирующих элементов типа (P, D), приведен на рис. 10. Информационный граф такой структуры изображен на рис.11.

Общее число коммутирующих элементов в описанной квазиоднородной вычислительной структуре остается таким же, как и в предыдущем случае

$$K_{min} = 8N, \tag{37}$$

но коммутирующие элементы оказываются еще более сложными.

В принципе можно рассмотреть большое число вариантов коммутирующих элементов и стандартных блоков, состоящих из таких элементов и цифровых интеграторов. Можно, например, составить значительное число прямоугольных стандартных блоков, в которых используются простейшие квадратные коммутирующие элементы и цифровые интеграторы на большое количество входов (рис.12). Мы не будем останавливаться на этих вариантах, так как существенных отличий от вариантов, рассмотренных выше, в последнем случае не имеется.

Квазиоднородная вычислительная структура, состоящая из цифровых интеграторов и однородных коммутирующих элементов и действующая по принципу близкодействия, приводит к минимальному количеству коммутирующих элементов. Это позволяет максимально упростить вычислительную структуру и, что особенно важно, значительно упростить устройство управления коммутацией. В результате оказывается возможным автоматически перестраивать программу решения задач и на этой основе создавать самонастраивающиеся и самоорганизующиеся системы.

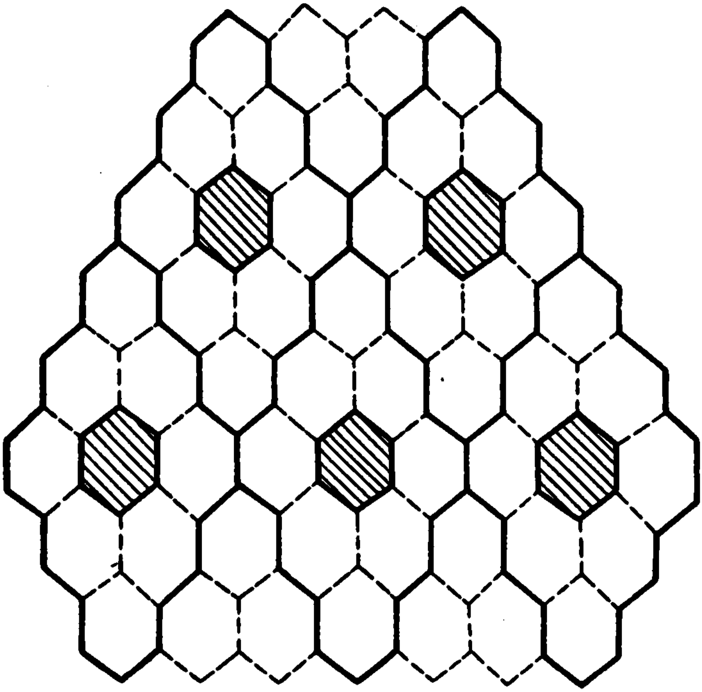

Рис.10

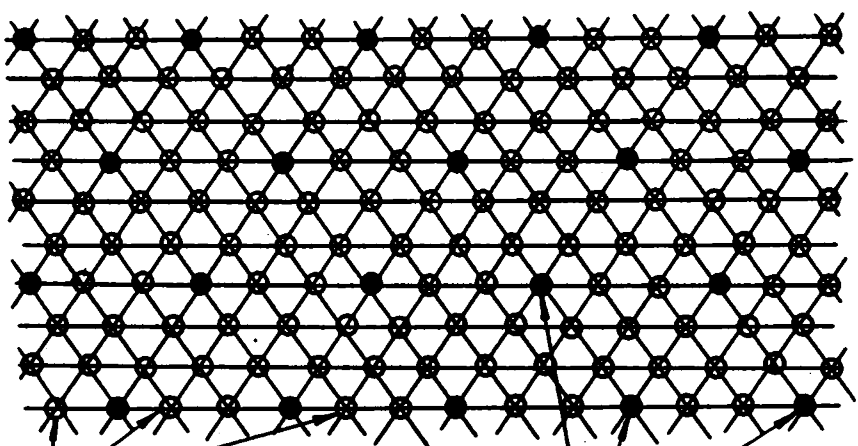

Рис. 11

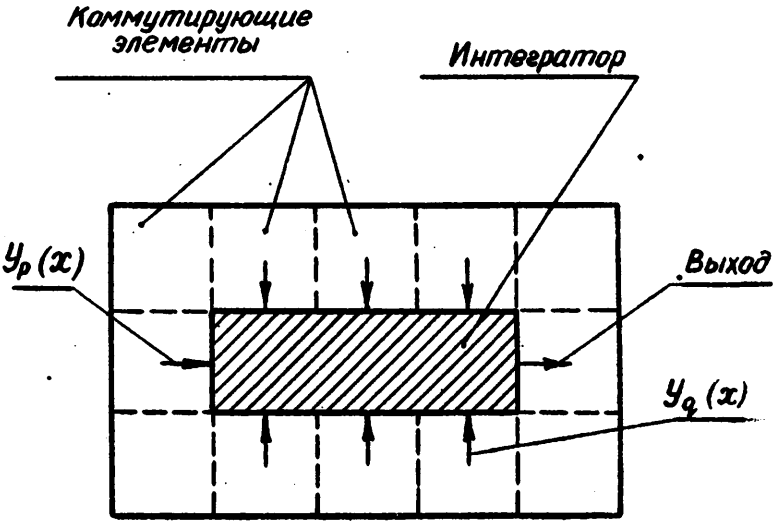

Рис. I2

Конечно, следует иметь в виду, что квазиоднородная вычислительная структура приводит к снижению общего числа задач, которые могут быть решены на основе N интеграторов. Однако задачи, наиболее часто встречающиеся на практике, которые могут быть, как правило, расчленены на группы более простых задач, с успехом решаются с помощью квазиоднородной вычислительной структуры.

В качестве примера на рис. I3 приведена схема решения уравнения Бесселя

$$\frac{d^2y}{dx^2} + \frac{dy}{dx} + \left(1 - \frac{n^2}{x^2}\right) y = 0 \qquad (38)$$

на квазиоднородной вычислительной структуре, состоящей из квадратных стандартных блоков, каждый из которых содержит интеграторы на 3 входа. Соответствующая блок-схема изображена на рис. I4.

Квазиоднородные вычислительные структуры имеют серьезное достоинство, заключающееся в том, что стандартные блоки легко поддаются микроминиатюризации. Это дает возможность наладить массовый выпуск таких блоков и построить весьма малога -

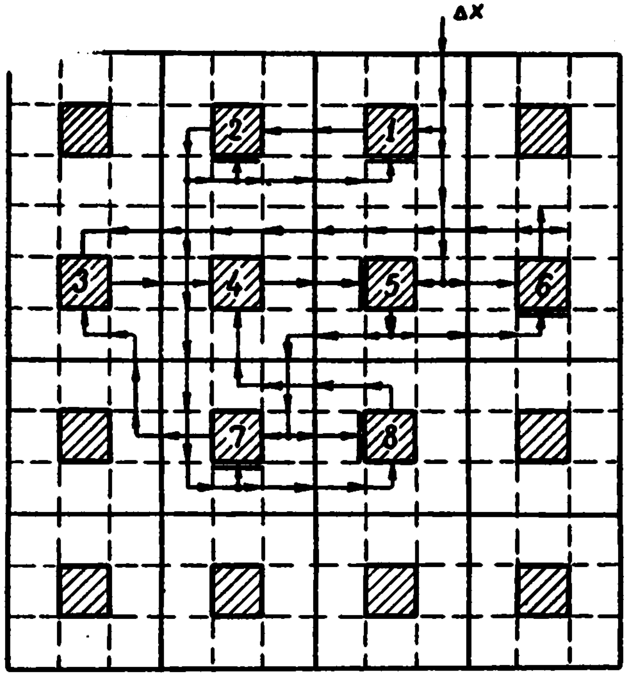
ΔX
2
1
3
4
5
6
7
8

Рис. 13

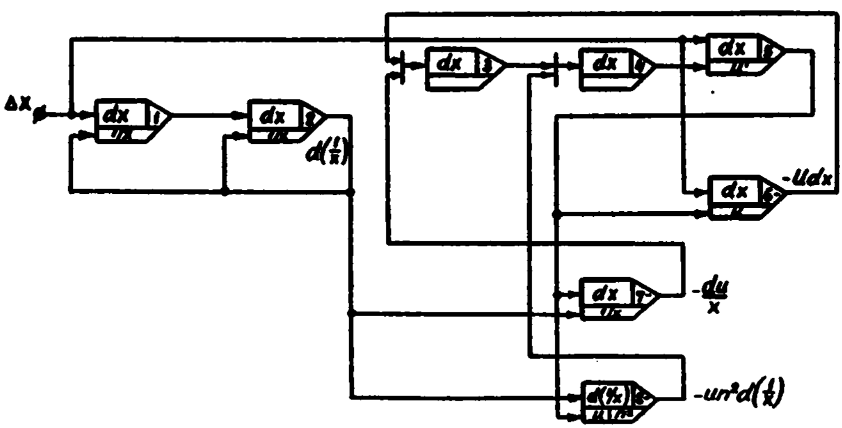
ΔX
dx
1
dx
2
$d(\frac{1}{x})$
dx
3
dx
4
dx
5
dx
6
$-Udx$
dx
7
$1/x$
$-\frac{du}{x}$
$d(1/x)$
8
$-un^2d(\frac{1}{x})$

Рис. 14

баритные и надежные вычислительные структуры, включающие большое число интеграторов.

ЛИТЕРАТУРА

1. А.В. Каляев. Алгоритмы вычислительных структур, состоящих из цифровых интеграторов. - Данный сборник.

2. Э.В. Евреинов. Теоретические основы построения универсальных вычислительных сред.-Вычислительные системы, Изд-во "Наука", Сибирское отделение, 1965, вып.16,стр. 3-72.