

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ СРЕДА НА ПОРОГОВЫХ ЭЛЕМЕНТАХ С
СОВМЕЩЕННЫМИ ФУНКЦИЯМИ

Л.И. Макаров

В работах [1],[2] рассматривались вопросы микроструктуры вычислительной системы. В качестве одного из наиболее перспективных направлений в реализации микроструктуры вычислительной системы предлагалась её реализация в виде вычислительной среды (ВС). В этих работах исследовался случай ВС, каждый элемент которой может быть настроен на выполнение одной из функций, удовлетворяющих условиям автоматной и соединительной полноты [2], причём при выполнении элементом соединительной функции предполагается принцип мгновенного влияния, т.е. передача сигналов через такой элемент происходит без задержки. Для ВС с индивидуальным поведением элементов установлено, что количество информации настройки для симметрического элемента ВС составляет не менее 2 бит. Для антисимметрического элемента ВС необходима дополнительная информация настройки для задания направлений приема и передачи обрабатываемой информации.

В данной работе рассматривается возможность построения ВС из элементов, в которых выполнение функций из автоматически полного набора совмещено с выполнением соединительных функций, причём при выполнении элементом любой функции передача сигналов происходит с одинаковой задержкой и некоторые функции выполняются при групповом взаимодействии элементов. Возможность

построения такой ВС, т.е. исследование автоматной и соединительной полноты её элементов, показана на примерах двух вариантов ВС, элементами которых являются пороговые элементы импульсного (ИПЭ) и потенциального (ППЭ) типов.

Для элемента ВС, построенной из ИПЭ, количество информации настройки составляет 1 бит, а для элемента ВС, построенной из ППЭ, - 5 бит.

Таким образом, для ВС, элементы которых совмещают выполнение автоматных и соединительных функций, показана возможность уменьшения количества информации настройки одного элемента по сравнению с ВС с индивидуальным поведением элементов.

1. Вычислительная среда, построенная из импульсных пороговых элементов

При импульсном способе информация выражается мгновенными значениями напряжений в дискретные моменты времени. В этом случае элемент может обладать свойством рефрактерности, т.е. периодом абсолютной невозбудимости, наступающим вслед за мгновенным возбуждением элемента.

Рассмотрим импульсный пороговый элемент (ИПЭ), описываемый следующим уравнением:

$$Z(t+\tau) = S\pi \left[\sum_{i=1}^n x_i(t) + \gamma - \gamma \right],$$

где

$$S\pi(\beta) \begin{cases} 1 & \text{при } \beta \geq 0, \\ 0 & \text{при } \beta < 0, \end{cases}$$

τ - задержка;

$x_i \in \{0,1\}$ - входная информационная переменная;

$z \in \{0,1\}$ - выходная информационная переменная;

$\gamma \in \{0,1\}$ - входная управляющая переменная (настройка ИПЭ);

γ - порог;

$\gamma = 2, i = 1, 2, 3, 4.$

Пусть ИПЭ обладает рефрактерностью R , т.е. после появления мгновенного выходного сигнала $Z(t+\tau)=1$ наступает период длительности R , во время которого независимо от зна-

чений входных переменных $x_i(t+\theta) Z(t+\tau+\theta)=0$, где $0 < \theta \leq R$. Определим среду из ИПЭ как двумерную решетку (рис. 1а), узлами которой являются ИПЭ (рис. 1б), причём выход каждого ИПЭ отождествляется с соответствующими входами соседних [2]. Рассмотрим свойства такой среды.

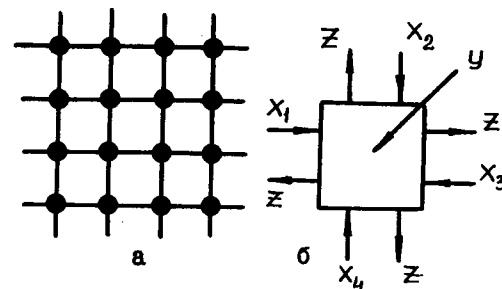


Рис.1.

1. Передача информации (сигнала) по некоторому пути (каналу) возможна при настройке $\gamma = 1$ элементов пути и $\gamma = 0$ для элементов, соседних с элементами пути (рис. 2). Свойство

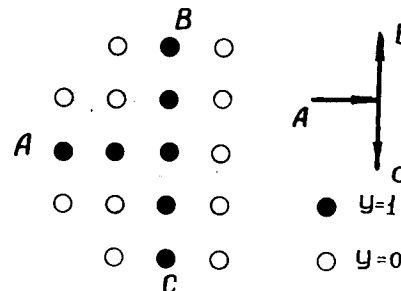


Рис.2.

направленности распространения информации можно задать, выбрав R из соотношения $2\tau < R < 3\tau$ (ограничение R сверху задаёт частоту работы ИПЭ). Тогда возбуждение одного из крайних элементов пути приводит через время τ к возбуждению элемента пути, соседнего с крайним, и т.д. Очевидно, для отсутствия взаимодействия между параллельными каналами диаметр канала, т.е. число элементов, расположенных перпендикулярно направлению канала, должен быть $\alpha \geq 3$. На рисунках каналы обозначены прямыми линиями.

2. Разветвление каналов передачи информации можно осу-

ществить заданием такого расположения элементов, имеющих $\gamma = 1$, как показано на рис. 2. Возбуждение в некоторый момент времени элемента A приведет к возбуждению элементов B и C через время задержки, равное соответственно $\ell(AB) \cdot \tau$ и $\ell(AC) \cdot \tau$, где $\ell(P, Q)$ — длина канала PQ , т.е. число элементов канала, начальный элемент которого есть элемент P , а конечный — элемент Q .

3. Конъюнкцию двух переменных $z(t+\tau) = x_1(t) \& x_2(t)$ можно реализовать схемами, показанными на рис. 3, где по каналам x_1 и x_2 распространяются сигналы, кодирующие значения переменных x_1 и x_2 .

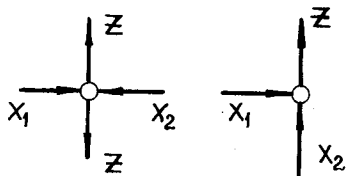


рис. 3.

4. Дизъюнкцию двух переменных можно реализовать схемами $\vee 1, \vee 2$, показанными на рис. 4б, 4в. Для схемы $\vee 1$ $z(t+\tau) = x_1(t) \vee x_2(t)$. Для схемы $\vee 2: z(t+8\tau) = x_1(t) \vee x_2(t)$. Каналы x_1 и x_2 изолируются друг от друга с помощью вентильных схем (рис. 4а).

5. Один из способов реализации постоянного хранения информации (постоянной памяти) показан на рис. 5. По входу схемы γ_{11} записываются импульсы, которые хранятся в схеме и периодически выдаются на её выходе. В такую память можно записать серию импульсов, количество которых зависит от длины замкнутого пути.

6. Операция отрицания может быть реализована схемой, показанной на рис. 6. Для различных алгоритмов, которые реализуются в схеме, построенной в ВС, в одном и том же канале будет различное распределение информации по тактам (различные временные диаграммы работы схемы). Поэтому для реализации операции отрицания необходимо знать, в какие такты входная переменная воздействует на вход схемы отрицания. На рис. 6 в постоянной памяти A записана последовательность импульсов, соответствующая последовательности тактов, в которые переменная

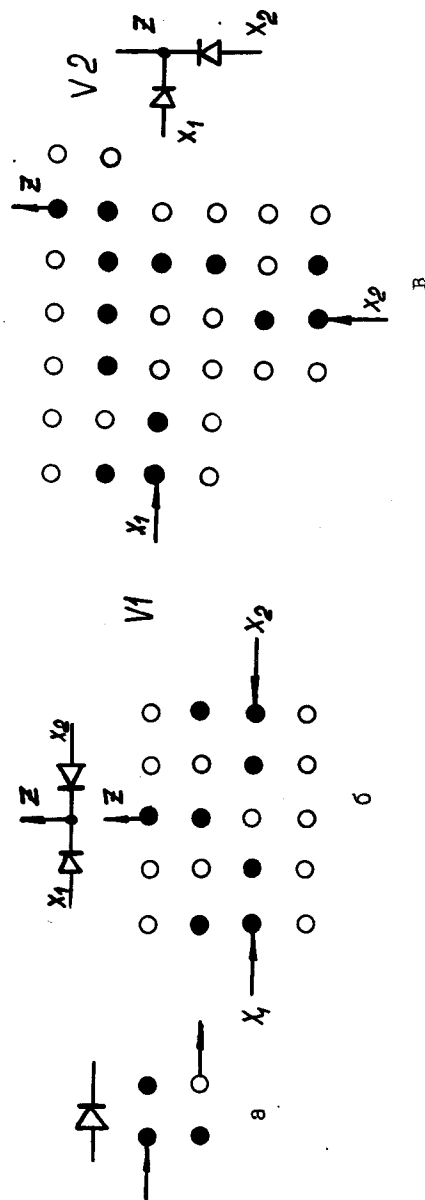


Рис. 4.

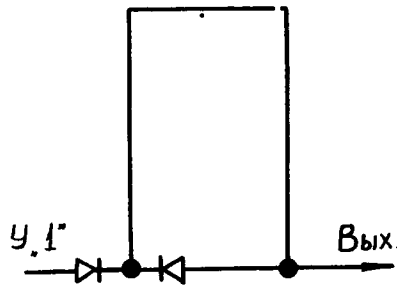


Рис.5.

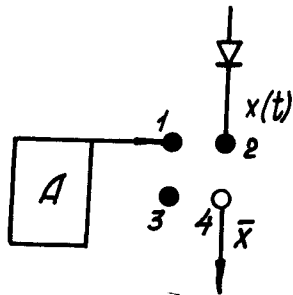


Рис.6.

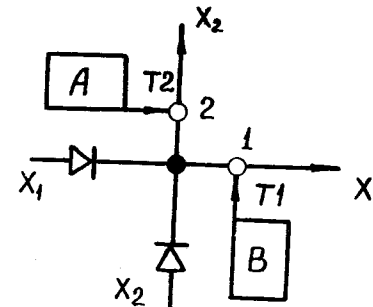


Рис.7.

x воздействует на схему отрицания. Тогда в некоторый такт t на вход элемента 1 приходит импульс из памяти A , а на вход элемента 2 - входная переменная x . Если $x(t)=0$, то элемент 1 возбуждает элементы 2 и 3 в момент $(t+2\tau)$ и в момент $(t+3\tau)$ возбуждается элемент 4, т.е. $z_4(t+3\tau) = \bar{x}(t)$. Если $x(t)=1$, то элемент 2 возбуждается в момент $(t+\tau)$, а элемент 3 в момент $(t+2\tau)$, т.е. элемент 4 не возбуждается и $z_4(t+3\tau) = \bar{x}(t)$.

7. Пересечение каналов информации без их взаимодействия при импульсном способе кодирования информации можно осуществить, используя временные сдвиги между импульсами различных каналов. В этом случае необходимо знать временные диаграммы работы для каждого канала в точке пересечения и задать временной сдвиг между импульсами разных каналов, используя длину пути до точки пересечения так, чтобы импульсы попарно не совпадали; при этом необходимо учитывать длину пути от точки пересечения до вентиляльных схем. Тогда (рис. 7), записав в память A последовательность импульсов $T2$, соответствующую временной диаграмме работы канала x_2 для элемента 2, а в память B последовательность импульсов $T1$, соответствующую временной диаграмме работы канала x_1 для элемента 1, получим схему пересечения каналов без взаимодействия.

8. До момента внешнего воздействия такая среда будет находиться в состоянии покоя, т.е. для всех элементов выполняется $z=0$ при любой настройке y .

Можно показать, что перечисленные свойства среды позволяют построить в ней любой конечный автомат. Действительно, зададим в решетке (рис. 1) систему прямоугольных координат (X, Y) так, чтобы узлы решетки имели целочисленные координаты. Определим расстояние $\rho(a, b)$ между двумя произвольными узлами решетки a и b следующим образом: $\rho(a, b) = |x_a - x_b| + |y_a - y_b|$. Тогда нетрудно доказать следующие утверждения:

- 1) Для любых узлов a, b, c решетки $\rho(a, c) + \rho(c, b) = \rho(a, b) + \Delta$, где Δ - четное.
- 2) Для того, чтобы для любых a и b существовало c такое, что $\rho(a, c) = \rho(b, c)$, необходимо и достаточно, чтобы $\rho(a, b)$ было четным.

Будем располагать элементы, выполняющие все функции, кроме функции передачи информации, в узлах решетки, находящихся на четном расстоянии от начала координат. Тогда из свойств среды и утверждения 2 следует, что в данной среде можно реализовать любую функцию алгебры логики, а из утверждения 1 следует, что можно реализовать обратные связи (память), имеющие одинаковые задержки.

Таким образом, в данной среде можно построить любой автомат.

Рассмотрим примеры некоторых схем. Схемы (рис. 8а, б) реализуют следующие функции: $z_3(t + b\tau) = z_1(t) \& \bar{z}_2(t)$;

$$z_4(t + b\tau) = \bar{z}_1(t) \& z_2(t); \quad z_5(t + b\tau) = z_1(t) \vee z_2(t).$$

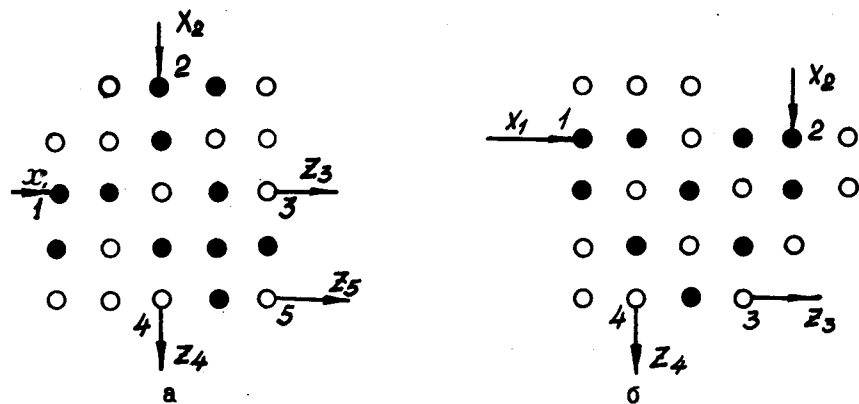


Рис. 8.

Если осуществить временной сдвиг между импульсами каналов x_1 и x_2 не менее чем на 3τ , то эти схемы будут схемами пересечения каналов без взаимодействия.

На рис. 9а, б приведены схемы реализации памяти со стиранием. В схеме рис. 9а импульс "1", записанный в память, гасит-

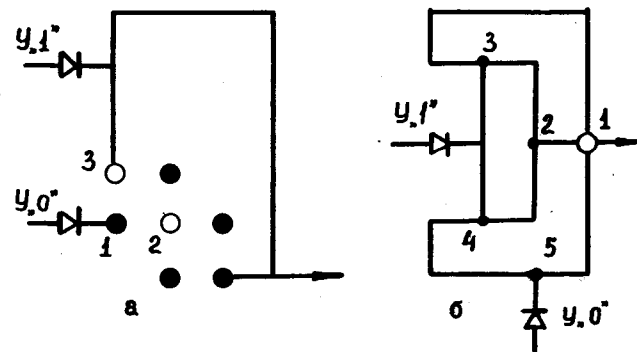


Рис. 9

ся, если момент воздействия импульса $y_{0''}$ на элемент 1 совпадает с моментом воздействия импульса "1" на элемент 2. Схема рис. 9б менее критична к моменту прихода импульса $y_{0''}$. Импульс "1" записывается по входу $y_{1''}$, далее в схеме образуются три импульса, один идет по пути 3-1, второй по пути 4-1, третий по пути 2-1. Третий импульс подходит к элементу 1 и гаснет. Поскольку пути 3-1 и 4-1 одинаковы, то элемент 1 в некоторый момент возбуждается от одновременного воздействия первого и второго импульсов, выдает выходной импульс и импульс по пути 1-2, который снова возбуждает импульсы по путям 3-1 и 4-1. Импульс $y_{0''}$ гасит записанный импульс "1", если только момент воздействия импульса $y_{0''}$ на элемент 5 не совпадает с периодом рефрактерности этого элемента.

Рассмотрение схем различных функций позволяет сделать некоторую оценку сложности и быстродействия схем, построенных в такой ВС. Для реализации различных функций требуется разное количество элементов, зависящее от выполняемого в схеме алгоритма (для разных алгоритмов - разные временные диаграммы работы). Для реализации схем, сложность которых не зависит от алгоритма работы, требуется: 1) для реализации канала - $d \cdot l \geq 3l$ элементов, где l - длина, а d - диаметр кана-

ла; 2) для схемы & - I элемент; 3) для схемы „ ∇ ” - 8 элементов; 4) для схемы „ $\sqrt{2}$ ” („ $\sqrt{1}$ ”) - 34 (20) элементов; 5) для схемы (рис. 8а, б) - 24 (24) элементов.

Из рассмотрения конкретных схем реализаций функций легко установить, что для схемы „ $\sqrt{1}$ ” так же, как и для канала передачи информации, временной интервал между входными импульсами должен быть не менее 3τ , а для схемы „ $\sqrt{2}$ ” не менее 7τ . Отсюда следует, что временной интервал между импульсами, следующими по одному каналу, в схеме пересечения каналов, использующей схему „ $\sqrt{1}$ ”, должен быть не менее 6τ , а в схеме пересечения, использующей схему „ $\sqrt{2}$ ”, не менее 14τ . Однако поскольку длина пути между двумя фиксированными элементами такой ВС может изменяться лишь на четное число элементов, то минимальные интервалы между импульсами, подаваемыми на входы схем, должны быть равны 7τ и 15τ , соответственно, (для схем рис. 8а, б, используемых для реализации пересечения каналов, минимальный интервал между импульсами должен быть не менее 11τ). Для устранения влияния разбросов параметров деталей ИПЭ можно ввести синхронизацию работы всех элементов ВС от генератора импульсов с частотой $1/\tau$.

Из приведенных свойств ВС, построенной из ИПЭ, можно сделать следующие выводы:

1. В такой ВС возможна реализация функций, удовлетворяющих условиям автоматной и соединительной полноты, причем выполнение некоторых функций возможно только при групповом взаимодействии элементов ВС и при учете временных диаграмм работы схем.

2. ИПЭ осуществляет совмещение выполняемых функций:

а) при $\gamma=1$ ИПЭ реализует операцию дизъюнкции и соединительные элементы типа P и D с задержками [2], однако для последнего необходимо использовать временное разделение информации, приходящей по разным каналам; б) при $\gamma=0$ ИПЭ реализует операцию конъюнкции и соединительный элемент типа O ; в) операция отрицания выполняется последовательно во времени для входной переменной $x=1$ (свойство рефрактерности ИПЭ), однако при использовании временной диаграммы работы реализуемого в ВС автомата возможно получить отрицание и для значения входной переменной $x=0$.

Рассмотренные свойства данного варианта ВС являются в достаточной степени характерными для ВС, построенных из ИПЭ (на-

пример, функции, выполняемые ИПЭ с порогом $\gamma=1$ или $\gamma=3$, с помощью настройки легко сводятся к функциям, выполняемым ИПЭ с $\gamma=2$).

2. Вычислительная среда, построенная из потенциальных пороговых элементов

Потенциальный способ кодирования предполагает кодирование информации значениями потенциалов, которые могут меняться в дискретные моменты времени, поэтому элементы потенциального типа не могут обладать свойством рефрактерности.

Рассмотрим потенциальный пороговый элемент (ППЭ), описываемый следующим уравнением:

$$z' = S_{\tau} \left[\sum_i \alpha_i x_i + \sum_j \alpha_j y_j - \gamma \right],$$

где

$$S_{\tau}(\beta) \begin{cases} 1 & \text{при } \beta \geq 0, \\ 0 & \text{при } \beta < 0; \end{cases}$$

$x_i \in \{0, 1\}$ - входная информационная переменная,

$z' \in \{0, 1\}$ - выходная информационная переменная,

$y_j \in \{0, 1\}$ - входная управляющая переменная,

α_i, α_j - веса соответствующих входов,

γ - порог,

$i = 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7$.

Пусть ППЭ обладает выходной переменной $z = \bar{z}'$, т.е.

$$z = \begin{cases} 1 & \text{при } \beta < 0, \\ 0 & \text{при } \beta \geq 0. \end{cases}$$

Время переключения ППЭ $\tau_{пер.} > 0$ будем считать достаточно малой величиной, поскольку во время переключения выходная величина элемента при потенциальном способе кодирования информации не определена.

Определим среду из ППЭ как правильную композицию ППЭ (рис. 10а), причём выход z каждого ППЭ отождествляется с соответствующими входами соседних (рис. 10б).

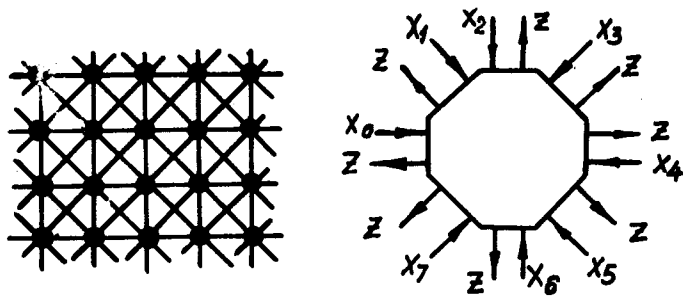


Рис. 10.

Рассмотрим свойства среды, построенной из таких ППЭ.

1. Выделим в среде канал, состоящий из трех параллельных соседних рядов элементов (рис. 11а). Поскольку ППЭ не обладает свойством рефрактерности, то для задания направления распрост-

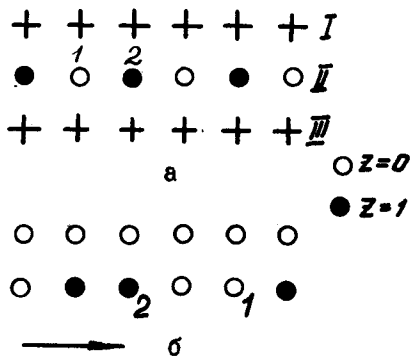


Рис. 11.

ранения информации необходимо коммутировать входы ППЭ. Поэтому считаем, что веса входов $\alpha_i \in \{0, 1\}$ и $\alpha_i = \bar{\alpha}_{(i+4) \bmod 8}$. Для элементов II-го ряда зададим значения $\alpha_i: \alpha_0 = \alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = 1$ в этом случае на каждый элемент II-го ряда воздействуют лишь

левый соседний элемент II-го ряда и три элемента I-го ряда, поэтому значения выходных величин z элементов III-го ряда безразличны. Предположим, что для всех элементов I-го ряда значения $z = 0$. Определим условия устойчивого состояния элементов II-го ряда, при котором значения выходных переменных его элементов, т.е. $z = 1$ и $z = 0$, чередуются (рис. 11а). Обозначим $\sum \alpha_j y_j - \gamma$ через σ . Для элемента I, имеющего $z = 0$, необходимо выполнить неравенство $\beta_1 \geq 0$, а для элемента 2, имеющего $z = 1$ - неравенство $\beta_2 < 0$. Из этого требования получаем систему статических неравенств:

$$\beta_1 = 1 + \sigma_1 \geq 0,$$

$$\beta_2 = \sigma_2 < 0.$$

Поскольку настройка элемента не должна зависеть от значения его выходной величины, то $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma$. Тогда получим, что устойчивое состояние элементов канала возможно при значении $\sigma = -1$. Очевидно, что канал может находиться в двух устойчивых состояниях и этим состояниям можно приписать значения "0" или "1" в зависимости от состояния входного элемента канала. Рассмотрим динамику перехода канала из одного состояния в другое. Здесь возможны два случая (рис. 11б): а) элемент находится в состоянии $z = 0$ и переходит в состояние $z = 1$ под воздействием соседнего, имеющего $z = 0$; б) элемент находится в состоянии $z = 1$ и переходит в состояние $z = 0$ под воздействием соседнего, имеющего $z = 1$. В случае а) необходимо, чтобы для элемента выполнялось $\beta < 0$; в случае б) $-\beta \geq 0$. Из этого требования получаем систему динамических неравенств (для элементов I и 2 рис. 11б):

$$\beta_1 = \sigma < 0,$$

$$\beta_2 = 1 + \sigma \geq 0.$$

Отсюда видно, что изменение состояния канала возможно при $\sigma = -1$ для всех элементов канала. Таким образом, реализация канала передачи информации осуществляется при $\sigma = -1$ и соответствующих значениях α_i для каждого элемента канала. Элементы I-го ряда будут находиться в состоянии $z = 0$ при значении $\sigma = 0$ для всех элементов этого ряда. Диаметр канала передачи информации $d \geq 2$. На рисунках каналы обозначены прямыми линиями.

Применив аналогичные рассуждения, мы получим следующие схемы, которые возможно реализовать в такой среде:

2. Разветвление канала (рис. 12) реализуется при $\sigma = -1$

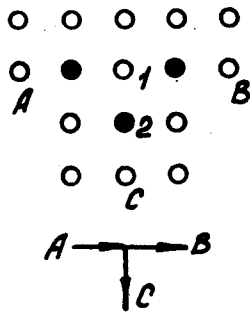


Рис. 12.

и следующих α_i для элемента 1 $\alpha_0 = \alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = 1$
 для элемента 2 $\alpha_0 = \alpha_2 = \alpha_5 = \alpha_7 = 1$

3. Операция дизъюнкции с отрицанием (стрелка Пирса) реализуется (рис. 13) при $\sigma = -I$ и следующих α_i :

для элемента 1 $\alpha_0 = \alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_7 = 1$
 2 $\alpha_0 = \alpha_1 = \alpha_3 = \alpha_6 = 1$
 3 $\alpha_0 = \alpha_2 = \alpha_3 = \alpha_5 = 1$
 4 $\alpha_0 = \alpha_5 = \alpha_6 = \alpha_7 = 1$
 5 $\alpha_0 = \alpha_1 = \alpha_6 = \alpha_7 = 1$

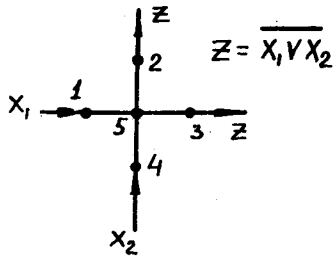


Рис. 13.

4. Поскольку значения выходных величин z элементов канала чередуются, то в зависимости от длины канала выходная величина последнего элемента может совпадать или быть противоположной выходной величине z первого элемента канала, поэтому, если на входе канала задана переменная x , т.е. выходная величина первого элемента $z_1 = x$, то при нечетной длине канала выходная величина последнего элемента $z_k = x$, а при четной $z_k = \bar{x}$. Таким образом, операция отрицания может быть задана длиной канала, поскольку между двумя фиксированными элементами в такой РС можно построить пути как четной, так и нечетной длины.

5. Запоминание информации осуществляется в схеме потенциального триггера (рис. 14) при $\sigma = -I$ и следующих α_i :

для элемента 1 $\alpha_0 = \alpha_1 = \alpha_3 = \alpha_6 = 1$
 2 $\alpha_0 = \alpha_2 = \alpha_5 = \alpha_7 = 1$

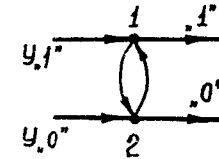


Рис. 14.

6. Пересечение каналов передачи информации реализуется в схеме рис. 15 при $\sigma = -I$ и следующих α_i :

для элемента 1 $\alpha_0 = \alpha_1 = \alpha_6 = \alpha_7 = 1$
 2 $\alpha_3 = \alpha_4 = \alpha_5 = \alpha_6 = 1$
 3 $\alpha_0 = \alpha_2 = \alpha_3 = \alpha_5 = 1$
 4 $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_4 = \alpha_7 = 1$

Из перечисленных свойств среды, построенной из ППЭ, следует, что в такой среде возможна реализация функций, удовлетворяющих условиям автоматной и соединительной полноты. Настройку каждого ППЭ можно определить из равенства $\sigma = \sum_j \alpha_j y_j - \gamma$, что при $j=1, \alpha_j=1, \gamma=1$ дает для $\sigma=0$ значение $y=I$, для $\sigma=-I$ $y=0$.

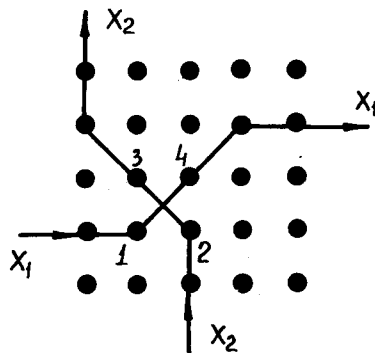


Рис.15.

Таким образом, в данной ВС, построенной из ППЭ:

1) некоторые функции, например пересечение каналов информации, выполняются при групповом взаимодействии элементов;

2) в каждом элементе выполнение соединительных функций совмещено с операцией отрицания;

3) количество информации настройки ППЭ составляет 5 бит.

Рассмотрение данных вариантов ВС показывает, что для некоторого класса ВС возможно уменьшение количества информации настройки, если элементы ВС совмещают выполнение некоторых функций, удовлетворяющих условиям автоматной и соединительной полноты, и некоторые из этих функций выполняются при групповом взаимодействии элементов.

Л и т е р а т у р а

1. Э.В. Евреинов. О микроструктуре элементарных машин вычислительной системы. - Вычислительные системы, Новосибирск, 1962, вып. 4.
2. Э.В. Евреинов, К.Г. Косарев. Однородные вычислительные системы высокой производительности. Новосибирск, 1966.