

УДК 621.391.519.2:519.95

ОБРАБОТКА И РАСПОЗНАВАНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЙ
С ПОМОЩЬЮ КЛЕТОЧНЫХ АВТОМАТОВ

А.И.Мишин

В работе рассматривается применение клеточных автоматов для обработки и распознавания графической информации на примерах вычисления эйлеровой характеристики фигуры, приведения фигуры к единичной толщине, сглаживания контура, заполнения мелких дыр, составления описания фигуры, инвариантного относительно вращения, переноса и изменения масштаба. Показано, что время кодирования и распознавания плоской фигуры определяется временем обхода фигуры и составляет не более $4G + 2W$ тактов, где G - число "черных" элементов, составляющих фигуру, а W - число "белых" элементов, ограничивающих фигуру.

Γ^0 . Рассматриваемое однородное устройство (клеточный автомат) ориентировано на выполнение обработки графической информации. Впервые применение однородных устройств для распознавания образов было рассмотрено в работе [1]. В настоящее время появились публикации работ в этом направлении, например, [2], в которых показана возможность преобразования фигур на решетке путем параллельной обработки информации в окрестности каждого элемента. Однако при обработке изображений возникает необходимость определения таких характеристик фигуры (например, связности), которые невозможно вычислить путем локальных действий [3], то есть параллельной обработкой информации в ограниченной окрестности каждого элемента решетки. Поэтому клеточный автомат для обработки графической информации должен сочетать в себе возможность как последовательной, так и параллельной обработки.

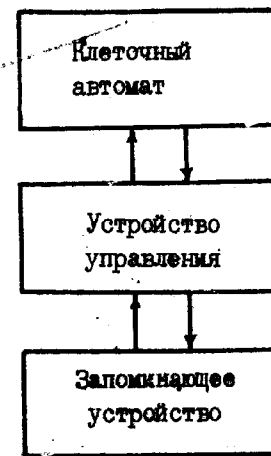


Рис. 1

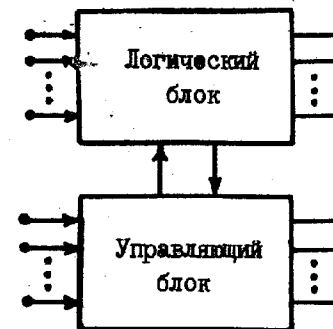


Рис. 2

Описываемая система (рис. 1) содержит клеточный автомат (КА), управляющее устройство (УУ) и запоминающее устройство. КА представляет собой регулярную решетку, элементы которой - идентичные конечные автоматы. Управление работой последних осуществляется командами, поступающими из УУ по общим линиям, число шин не зависит от количества элементов решетки и определяется количеством управляющих входов у одного элемента.

Каждый элемент КА (рис.2) содержит управляющий и логический блоки [4]. Логический блок представляет собой конечный автомат, реализующий некоторый набор логических функций от $K + 1$ переменных (K двоичных сигналов поступает с выходов соседних элементов, один сигнал - собственное состояние логического блока, определяемое наличием кванта графической информации).

Управляющий блок состоит из разряда двумерного регистра сдвига и элемента памяти, в который записывается информация о локальных характеристиках фигуры, определяемых логическим блоком, и перемещении "1"

(читающей головки - ЧГ) по регистру сдвига [5].

Управление работой КА осуществляется следующими командами:

- а) сдвиг ЧГ в выбранном направлении;
- б) образование ЧГ в одном или в нескольких элементах решетки;
- в) запись информации в блок памяти одного или нескольких элементов;
- г) чтение информации с блока памяти одного элемента;

д) ассоциативный поиск (с отметкой) элементов с требуемыми состояниями соседних элементов.

Чтение и запись производится только в тех элементах, в которых образована ЧГ. Отметим, что ЧГ может быть образована как в одном, так и в нескольких элементах.

Работа КА с одной ЧГ соответствует последовательной обработке информации, например, обходу фигуры для сбора характеристик, вычисленных при параллельной работе КА. Работа КА с группой ЧГ соответствует параллельной обработке информации в окрестности каждого элемента, отмеченного (путем образования ЧГ) при ассоциативном поиске [6].

2°. Работу КА рассмотрим на примере распознавания символов на решетке с шестью соседями (6-решетка). Исходной информацией является совокупность квантов графической информации, составляющих фигуру. Распознавание состоит из следующих этапов [7]:

1. Предварительная обработка фигуры, заключающаяся в за-
полнении мелких дыр и приведении фигуры к единичной толщине (при распознавании линейных фигур), выполняется параллельно путем ассоциативного поиска и изменения состояния элементов, имеющих требуемое состояние окрестности.

Любое преобразование можно представить в виде последовательности элементарных преобразований (ЭП), каждое из которых заключается в изменении состояния центрального элемента и его соседей. Общее число элементарных преобразований равно $2^7(2^7 - 1)$. Из всех ЭП на рис. 3 приведены те, которые имеют единственную группу связанных "единиц" в окрестности элемента. В зависимости от состояния центрального элемента ЭП можно разделить на две группы (номера I - 6 и 7 - 12 на рис. 3); первая группа ЭП используется для "расширения" (сглаживания) фигур с заполнением дыр, вторая для "стирания" фигуры и приведения ее к единичной толщине. Каждое ЭП (за исключением номеров 6 и 12) представляет группу из шести преобразований с точностью до вращения окрестности центрального элемента.

Примеры преобразований фигур на 6-решетке приведены на рис. 4, в верхней части которого показано "расширение" фигуры и заполнение мелких дыр (осуществляется последовательным применением ЭП с номерами 4, 5, 6), а в нижней части - приведение фигуры к единичной толщине (ЭП 8 - II), стирание концов отрезков (ЭП-7) и

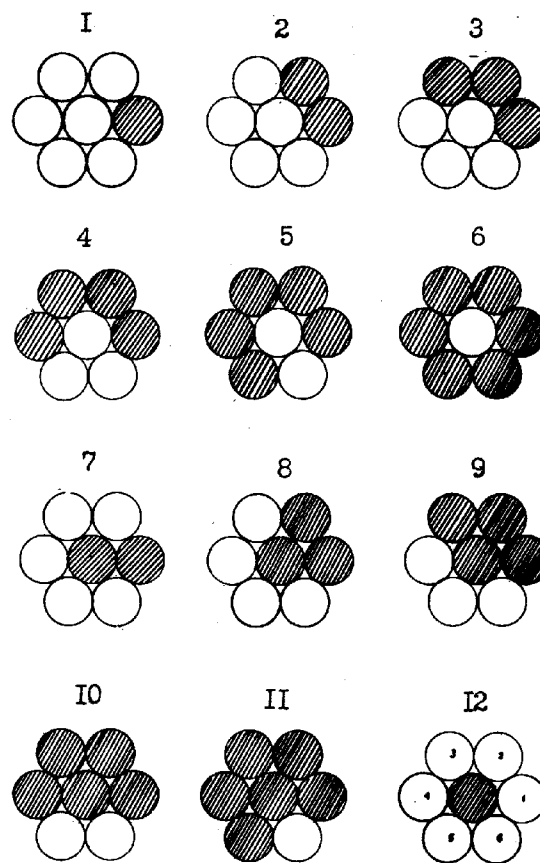


Рис. 3

фильтрация одиночных черных точек на белом фоне (ЭП 12). Отметим, что после некоторого числа применений ЭП с номерами 4-6 фигура перестает изменяться, а неограниченное применение ЭП с номером 7 превращает отрезок в точку.

2. Поиск фигуры на решетке производится исследованием ограниченной области, представляющей собой окрестность радиуса R с центром в ЧГ, и основан на подсчете числа тактов распространения сигналов от фигуры до ЧГ. Число тактов равно минимальному расстоянию от фигуры до ЧГ и составляет z ($z \leq R$). После определения z ЧГ перемещается в некотором направлении на расстояние

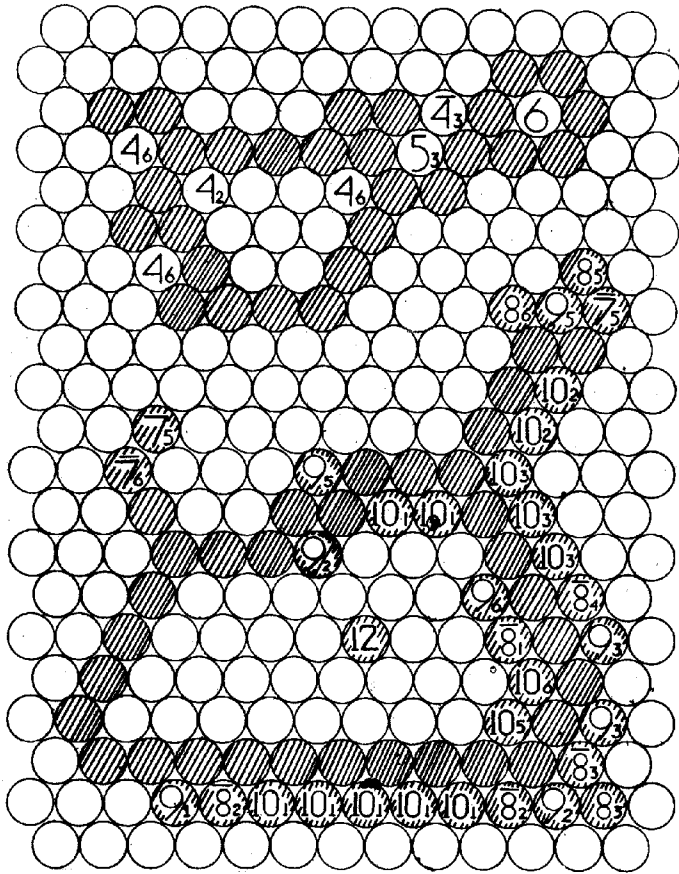


Рис. 4

ε ; дальнейшее движение ЧГ осуществляется по окружности радиуса ε с центром в точке первоначального расположения ЧГ до тех пор, пока не встретится точка, принадлежащая фигуре. Среднее время поиска в этом случае составляет 5ε тактов.

Если $\varepsilon > R$, то для нахождения фигуры может быть использован метод случайного поиска [8].

3. Кодирование фигуры. Во основу кодирования положен метод кусочно-линейной аппроксимации линий, составляющих фигуру. Код ли-

ний-это последовательность углов наклона отрезков квантования, $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_l$, соединяющих точки, лежащие на линии. Значение α_i находится одновременно с обходом на определителе направлений, представляющем собой часть решетки, выполненную в виде круга, периметр которого разбит на части, соответствующие углам α_i . При $l = 6$ функцию определителя направлений выполняет окружность радиуса 1 (см., например, окружность I2 на рис. 3).

При составлении полного описания фигуры может быть использован алгоритм обхода произвольных лабиринтов (графов) [9]. Для устранения неоднозначности выбора ребра (линии) при вершине ребра нумеруются по некоторому правилу, например, по часовой стрелке, начиная с ребра, которое привело в вершину в первый раз.

Полное описание фигуры имеет вид:

$$X_\phi = X_1 X_2 \dots X_{2n},$$

где $X_p = P_j^i$ - описание последовательности направлений отрезков квантования j -го ребра, принадлежащего i -ой вершине;

$$P_j^i = A_{ij1}^{\alpha_1} \dots A_{ijp}^{\alpha_p},$$

где $A_{ijq} \in \{1, 2, \dots, m\}$ - направление отрезка квантования, а α_q - число повторений этого отрезка.

В некоторых случаях, например, при распознавании символов (букв и цифр) приведенное описание фигуры является избыточным и его можно сократить, обходя символ по внешнему контуру (см. 6⁰).

Время составления описания равно времени обхода и составляет $G + W$, где G - число "черных" элементов, лежащих на внешнем контуре, а W - "белых" элементов, ограничивающих фигуру. Наличие W обусловлено тем, что при обходе, который осуществляется согласно алгоритму "автослежения", ЧГ проходит через элементы, ограничивающие фигуру. Время кодирования произвольной связанной фигуры равно $2G + W$, где G - число "черных" элементов, составляющих фигуру. Множитель 2 появляется в связи с тем, что ЧГ проходит каждое ребро в двух направлениях. Полное время распознавания складывается из поиска фигуры на решетке, составления описания и поиска кодового слова в памяти.

4. Оценка числа элементов решетки.

Число элементов решетки, необходимое для составления описания линейной фигуры, определяется требуемой точностью аппроксимации линий, составляющих фигуру, отрезками прямых.

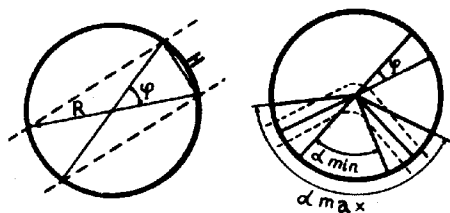


Рис. 5

Под отрезком прямой на решетке будем понимать линию, лежащую в полосе ширины H и длины $2R$ (рис. 5). Если через Δl обозначить максимальное отклонение линии от оси полосы, то ширина полосы составит $H = 2\Delta l + 1$.

Обозначив через $\varphi = \frac{2\pi}{m}$ точность измерения угла, образованного отрезками прямых, будем иметь $H \approx R \cdot \varphi$ с точностью до вложения окружности в 6-решетку. Здесь m - число частей периметра окружности искомого радиуса R , требуемого для аппроксимации кривой, расположенной в полосе ширины H , с точностью до угла φ .

Для нахождения R используем два выражения длины "окружности" (для 6-решетки - правильного шестиугольника) радиуса R :

$$6R = H \cdot m, \text{ откуда } R = \frac{H \cdot m}{6}; m = 6k,$$

так как длина периметра окружности на 6-решетке кратна 6.

Общее число элементов, требуемых для вложения фигуры диаметра D , кривизна которой в каждой точке не более $\frac{1}{R}$, составляет:

$$D \cdot H \leq S \leq 1 + 3 \frac{D}{2} \left(\frac{D}{2} + 1 \right),$$

где D - максимальное расстояние между двумя точками фигуры.

4°. Если обход фигуры начинать с особой точки, лежащей на внешнем контуре, то число модификаций кодового слова равно числу этих особых точек. Каждая модификация описания фигуры будет инвариантна относительно поворота на угол, кратный $\frac{2\pi}{m}$, если при составлении кодового слова за начало отсчета взять α_i . Поворот фигуры на угол $p \cdot \varphi$, кратный углу φ , осуществляется путем прибавления к коду направления каждого отрезка числа P ($P = 0, 1, 2, \dots$) по формуле

$$\alpha'_i = \alpha_i + p \pmod{m}.$$

Инвариантность описания относительно изменения размеров фигуры достигается изменением числа повторений выбранных значений α_i и α_j , где $j = (i + \frac{m}{2}) \pmod{m}$. Например, инвариантности относительно изменения масштаба соответствует одинаковое изменение числа повторений каждого символа α_i .

Инвариантность описания относительно других искажений фигуры, например относительно аффинных (линейных) преобразований, достигается преобразованием определителя направлений в эллипсе, а также изменением местоположения значений α_i на периметре определителя направлений.

5°. Будем считать, что связанную фигуру образуют элементы (с единичным значением кванта графической информации), расположенные на расстоянии не более ρ друг от друга, причем расстояние между двумя соседними элементами решетки принято за 1. Учитывая, что ввод фигуры в решетку приводит к разбросу толщины линии на ± 1 элемент, имеем общий разброс точек, образующих фигуру, равный $\pm(\rho + 1)$. Так как обработка фигур производится локальными действиями, возникает необходимость получения такой фигуры, каждый элемент которой имеет хотя бы одного "соседа", принадлежащего фигуре. Это достигается "расширением" фигуры, то есть распространением квантов графической информации каждого элемента по всем направлениям, с запоминанием сигналов (квантов) в каждом элементе. Для этого требуется ρ тактов работы КА.

Для сохранения топологического типа фигуры ρ должно быть меньше $2(R_{min} + 1)$, где R_{min} - радиус наименьшей дыры.

Чтобы предотвратить склеивание особых точек, расстояние между ними надо выбирать не менее $2(\rho + 1)$.

Минимальное расстояние между точками, принадлежащими различным линиям, должно быть не менее $2(\rho + 1)$. Множитель 2 в указанных выражениях появляется в связи с тем, что расширение (стирание) линий происходит равномерно со всех сторон.

6°. Распознавание символов по информации о внешнем контуре осуществляется следующим образом.

Для составления описания символа каждый элемент КА должен иметь состояния: "отметка начала - конца", "отметки 1, 2", "отметка вершин".

Описание фигуры составляется путем обхода ее по алгоритму "автослежения" за ходом внешнего контура (см. рис. 6).

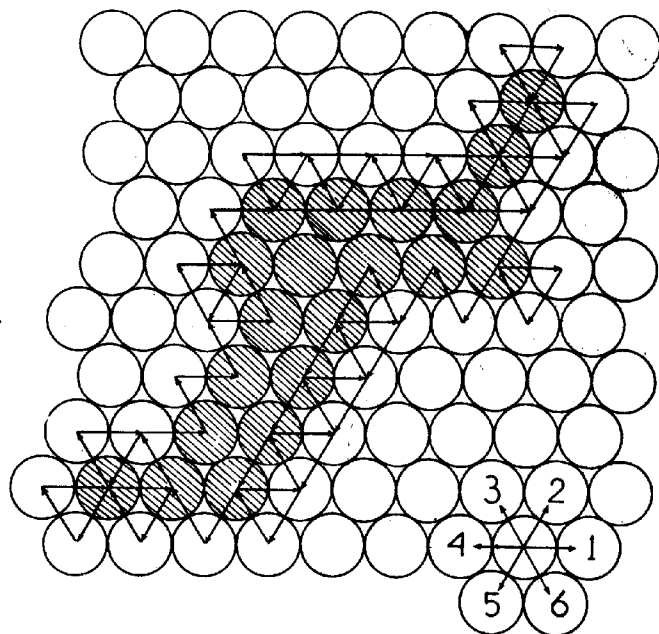


Рис. 6

Код фигуры - это последовательность $S_0, S_1, S_2, \dots, S_n$ сдвигов ЧГ. После того как фигура найдена, ЧГ перемещается по ее внешнему контуру согласно алгоритму "автослежения". Каждый последующий сдвиг определяется через предыдущий по формулам:

$$S_i = S_{i-1} + 2 \pmod{6}, \text{ если ЧГ в "черном" элементе;}$$

$$S_i = S_{i-1} - 2 \pmod{6}, \text{ если ЧГ в "белом" элементе.}$$

При этом обход осуществляется в направлении, совпадающем с направлением нумерации сдвигов на решетке. Если в приведенных формулах знаки заменить на обратные, то обход будет осуществляться в направлении, противоположном нумерации сдвигов*.)

*.) Формулы для обхода фигур в квадратной решетке могут быть получены из формул для 6-решетки заменой цифры 2 на 1 и $\pmod{6}$ на $\pmod{4}$.

При обходе фигуры изменяются состояния элементов решетки: производится запись сигналов "отметка 1", если элемент встречается первый раз, и "отметка 2", если элемент встречается дважды. Отмечаются особые точки (вершины), а также особая точка, соответствующая началу обхода. Признаком конца обхода является попадание ЧГ в особую точку с отметкой "начало" второй раз.

Последовательность сигналов "отметка 1" и "отметка 2" является характеристикой символа, используемой для разбиения исходного множества распознаваемых символов на классы (см. таблицу, где сигналы "отметка 1" и "отметка 2" обозначены соответственно символами 0 и 1). Характеристика символа формируется автоматом с точностью до циклической перестановки сигналов 0, 1.

Т а б л и ц а

Номер типа	Тип	Примеры символов	Характеристика типа	Значение эйлеровой характеристики
1	○	○ ○ Δ	0	0
2	○	Р 6 e	01	0
3	○	А Д В	0101	0
4	○	γ φ а	011	0
5	⊗	в 8 в	00	-1
6	⊗	в в	0010	-1
7	⊗	& ϕ	00110	-1
8	⊕	⊕	001	-1
9	⊕	φ	0101	-1
10	○	в	0111	0
11		П С С	1	1
12	⊥	γ ч в	111	1
13	+	х γ w	1111	1
14	н	к ш	11111	1

Отметим, что данная характеристика разбивает множество символов на классы, эквивалентные относительно непрерывных преобразований линейных фигур на плоскости. Исключением являются симво-

лы, содержащие информацию о своей форме внутри контура (см. типы 3,9). Однако они различаются по значению эйлеровой характеристики.

7°. Определение эйлеровой характеристики фигуры на решетке основано на методе, описанном в работе [3]. Определение эйлеровой характеристики складывается из двух этапов.

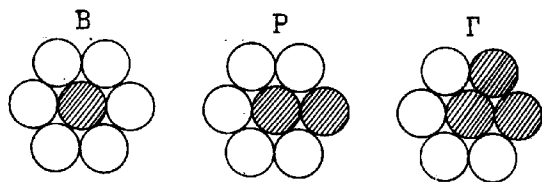


Рис. 7

На первом этапе в памяти каждого элемента фиксируется наличие вершин, ребер и граней в его окрестности. Под вершиной, ребром и гранью понимается совокупность одного, двух и трех смежных элементов с единичными значениями квантов графической информации, соответственно. На рис. 7 ребро и грань представлены с точностью до вращения окрестности центрального элемента. Состояния элементов окрестности, не входящих в искомую конфигурацию, безразличны (при поиске они маскируются).

На втором этапе производится считывание информации с памяти элементов решетки путем последовательного обхода всех элементов фигуры. Вычисление эйлеровой характеристики E производится по формуле:

$$E = B - \frac{1}{2} P + \frac{1}{3} G,$$

где B, P, G - число вершин, ребер и граней, соответственно.

Наличие коэффициентов при P и G обусловлено тем, что ребро отмечается в двух образующих его элементах, а грань - в трех.

Отметим, что выполнение E может быть осуществлено с помощью клеточных автоматов за время $2\sqrt{U}$ тактов, где U - число элементов в КА. Время вычисления E с помощью одного счетчика определяется временем обхода фигуры и составляет не более $2G + W$ тактов.

Элементарные преобразования Π_1, Π_2 , с помощью которых производится сложение чисел на решетке, представлены на рис. 8, а, б, где буквой M обозначены замаскированные элементы. На рис. 8, в, г, д иллюстрируется сложение трех чисел 10011, 11010 и 01010, записанных соответственно в строках решетки l_1, l_2, l_3 . Последовательное применение Π_1 и Π_2 преобразует картину на рис. 8, в в картину на рис. 8, д. Результат операции находится в строке l_1 .

8°. Оценка времени распознавания. Две фигуры \mathcal{F}_1 и \mathcal{F}_2 представляют один и тот же образ, если существует преобразование, переводящее \mathcal{F}_1 в \mathcal{F}_2 (или \mathcal{F}_2 в \mathcal{F}_1) так, что каждая из фигур $\mathcal{F}_1, \mathcal{F}_2$ содержится целиком (с точностью до масштаба) в \mathcal{Z} -окрестности другой фигуры. Под \mathcal{Z} -окрестностью фигуры \mathcal{F}_i понимается фигура, образованная совокупностью всех кругов радиуса \mathcal{Z} с центрами в точках фигуры \mathcal{F}_i .

Процесс распознавания заключается во вложении траектории движения ЧГ по предъявленной конфигурации (фигуре) в траектории движения аналогичных ЧГ по эталонным конфигурациям, хранящимся в памяти автомата. Если при изменении \mathcal{Z} -окрестности предъявленной (или эталонной) фигуры найдется круг радиуса \mathcal{Z}^* , при котором траектория движения ЧГ по входной конфигурации совпадает с точностью до повторения символов α_i с одной эталонной конфигурацией, то предъявленная фигура распознается однозначно, в противном случае - неоднозначно.

Учитывая, что время составления описания линейной фигуры равно $2G + W$ тактов (см. 2°), а вложение этого описания в эталонное может быть также осуществлено за время не более $2G + W$ тактов (определяется циклической перестановкой символов α_i), получим, что время распознавания T_p фигуры составляет

$$G + W \leq T_p \leq 4G + 2W.$$

Время распознавания может составлять $G + W$ тактов только для тех фигур (графов), которые имеют эйлеров цикл, так как в этом случае можно обойти всю фигуру, проходя по каждому ребру один раз.

Можно высказать предположение, что полученная оценка времени распознавания произвольных фигур не может быть существенно улучшена.

Л и т е р а т у р а

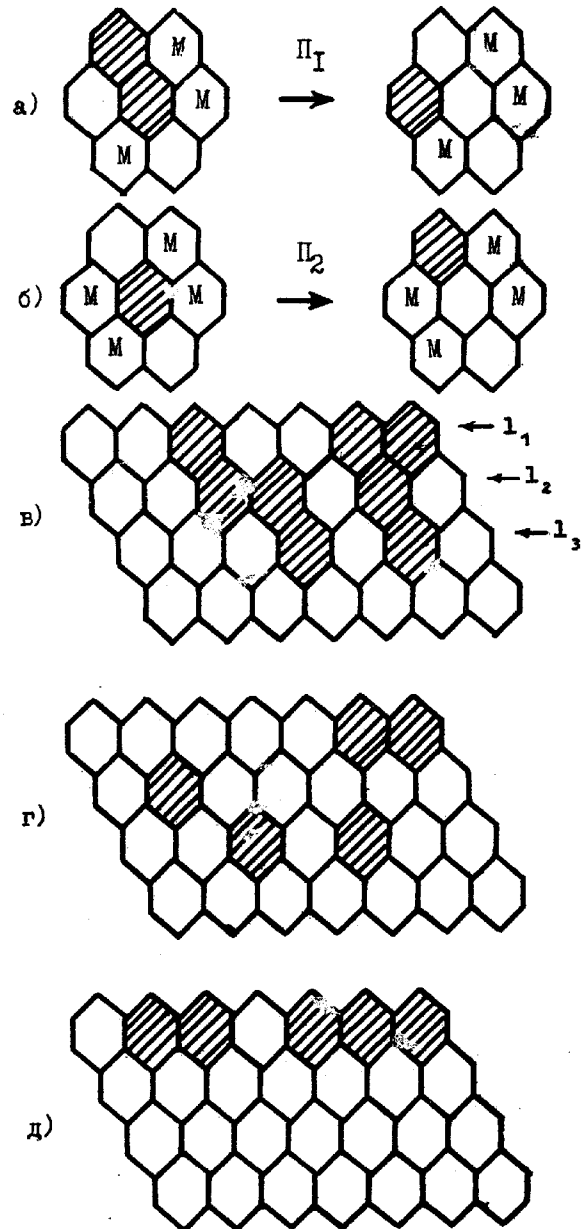


Рис. 8

1. UNGER S.H. Pattern recognition and detection. - "Proc. IRE", 1959, Oct., p.47.
2. GOLAY M.J.E. Hexagonal Parallel Pattern Transformations. - "IEEE Trans. Comput.", 1969, N 8.
3. МИНСКИЙ М., ПЕЙПЕРТ С. Перцептроны. "Мир", 1971.
4. МИШИН А.И. Основные свойства однородных устройств с переменной структурой настройки. - "Вычислительные системы", Новосибирск, 1971, вып. 41, с.
5. МИШИН А.И., ХРУШЕВ В.Г. Элемент вычислительной среды. Авт. свид. № 255654. - Б.И., 1969, № 33.
6. МИШИН А.И., АНИШЕВ П.А. Элемент вычислительной среды. Авт. свид. № 355611. - Б.И., 1972, № 31.
7. АНИШЕВ П.А., МИШИН А.И. Клеточный автомат и его применение для обработки графической информации. - "Вычислительные системы и среды. Материалы 3-й Всесоюз. конф. по проблеме "Однородные вычислительные системы и среды". Таганрог, 1972.
8. ЭДЛИОТ В. МОНТРОЛЛ. Статистика решеток. - "Прикладная комбинаторная математика", "Мир". 1968.
9. БЕРЖ К. Теория графов и ее применение. М., ИЛ., 1962.

Поступила в ред.-изд.отд.
28 февраля 1973 года