

Н. Я. КАКУРИН, канд. техн. наук, А. П. КУРБАТОВ

### СИНТЕЗ И ПРИМЕНЕНИЕ ТРИГГЕРОВ С ИНВЕРСНЫМИ ВХОДАМИ

Теория автоматов широко используется для проектирования устройств цифровой вычислительной техники и автоматики, где она является основным математическим аппаратом. Необходимость дальнейшего развития теории автоматов стимулируется рядом новых проблем, в частности проблемой автоматизации человеческой деятельности [1].

Решение данной проблемы требует совершенствования и разработки эффективных теоретических и практических методов синтеза цифровых устройств, способных заменить человека в определенных видах интеллектуальной деятельности. В этом случае большое значение имеет теория структурного синтеза автоматных моделей [2], таких, как микропрограммные автоматы Мили, Мура, Уилкса-Стринджера, матричные автоматы и т. д.

Оптимизация аппаратных затрат микропрограммных автоматов часто достигается за счет применения в запоминающей части автоматов триггеров с инверсными входами. При этом можно снизить коэффициент качества кодирования до значений, меньших единицы, что недостижимо при использовании в запоминающей части автоматов триггеров с прямыми входами. Алгоритм кодирования внутренних состояний автоматов и особенности их анализа для триггеров с инверсными входами рассмотрены в работах [3, 4].

Рассмотрим методику синтеза  $\bar{J}\bar{K}$ ,  $\bar{R}\bar{S}$ ,  $\bar{T}$ ,  $\bar{D}$  триггеров с инверсными входами, при использовании которых в запоминающей части микропрограммных автоматов достигается наибольший эффект снижения аппаратных затрат в комбинационной части автоматов, определяются уровни применения триггеров с инверсными входами или триггеров с прямыми входами. Необходимость рассмотреть такую методику объясняется тем, что в большинстве интегральных систем элементов применяются триггеры с прямыми входами  $D$ ,  $T$ ,  $TV$ ,  $DV$ ,  $RS$ ,  $R$ ,  $S$ ,  $E$  типов, матрицами переходов которых являются матрицы (1) — (9) соответственно:

$$\begin{array}{c}
 D \qquad \qquad \qquad T \qquad \qquad \qquad V \quad T \\
 \begin{array}{c}
 0-0 \\
 0-1 \\
 1-0 \\
 1-1
 \end{array}
 \left| \begin{array}{c}
 0 \\
 1 \\
 0 \\
 1
 \end{array} \right|
 \quad (1) \quad
 \begin{array}{c}
 0-0 \\
 0-1 \\
 1-0 \\
 1-1
 \end{array}
 \left| \begin{array}{c}
 0 \\
 1 \\
 1 \\
 0
 \end{array} \right|
 \quad (2) \quad
 \begin{array}{c}
 0-0 \\
 0-1 \\
 1-0 \\
 1-0
 \end{array}
 \left| \begin{array}{cc}
 b_1 & b_1 b_2 \\
 1 & 1 \\
 1 & 1 \\
 b_3 & \bar{b}_3 b_4
 \end{array} \right|
 \quad (3)
 \end{array}$$

$$\begin{array}{c}
 \begin{array}{c} V \quad D \\
 \begin{array}{l} 0-0 \\ 0-1 \\ 1-0 \\ 1-1 \end{array} \left| \begin{array}{l} b_1 \\ 1 \\ 1 \\ b_3 \end{array} \right. \begin{array}{l} \bar{b}_1 b_2 \\ 1 \\ 0 \\ b_3 \vee b_4 \end{array} \end{array} \quad (4)
 \end{array}
 \end{array}
 \begin{array}{c}
 \begin{array}{c} K \quad J \\
 \begin{array}{l} 0-0 \\ 0-1 \\ 1-0 \\ 1-1 \end{array} \left| \begin{array}{l} b_1 \\ b_2 \\ 1 \\ 0 \end{array} \right. \begin{array}{l} 0 \\ 1 \\ b_3 \\ b_4 \end{array} \end{array} \quad (5)
 \end{array}
 \begin{array}{c}
 \begin{array}{c} R \quad S \\
 \begin{array}{l} 0-0 \\ 0-1 \\ 1-0 \\ 1-1 \end{array} \left| \begin{array}{l} b_1 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{array} \right. \begin{array}{l} 0 \\ 1 \\ 0 \\ b_2 \end{array} \end{array} \quad (6)
 \end{array}
 \end{array}$$
  

$$\begin{array}{c}
 \begin{array}{c} R \quad S \\
 \begin{array}{l} 0-0 \\ 0-1 \\ 1-0 \\ 1-1 \end{array} \left| \begin{array}{l} b_1 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{array} \right. \begin{array}{l} b_1 b_2 \\ 1 \\ b_3 \\ b_4 \end{array} \end{array} \quad (7)
 \end{array}
 \begin{array}{c}
 \begin{array}{c} R \quad S \\
 \begin{array}{l} 0-0 \\ 0-1 \\ 1-0 \\ 1-1 \end{array} \left| \begin{array}{l} b_1 \\ b_2 \\ 1 \\ b_3 \end{array} \right. \begin{array}{l} 0 \\ 1 \\ 0 \\ b_3 \vee b_4 \end{array} \end{array} \quad (8)
 \end{array}
 \begin{array}{c}
 \begin{array}{c} R \quad S \\
 \begin{array}{l} 0-0 \\ 0-1 \\ 1-0 \\ 1-1 \end{array} \left| \begin{array}{l} b_1 \\ 0 \\ 1 \\ b_3 \end{array} \right. \begin{array}{l} b_1 b_2 \\ 1 \\ 0 \\ b_3 \vee b_4 \end{array} \end{array} \quad (9)
 \end{array}$$

Перевод триггера с прямыми входами в режим триггера с инверсными входами требует некоторого увеличения аппаратных затрат и становится целесообразным в случае, если снижение аппаратных затрат в комбинационной части превышает этот прирост. Так как число триггеров в запоминающей части микропрограммных автоматов  $n = \text{int} \log_2 N$  ( $N$  — число внутренних состояний автомата) существенно меньше числа выходов комбинационной части, то условие применения триггеров с инверсными входами легко выполняется для многих автоматов.

Синтез триггеров с инверсными входами рассмотрим на примере  $\bar{J}\bar{K}$  триггера, закон функционирования которого определяется столбцами  $\bar{K}(t)$ ,  $\bar{J}(t)$ ,  $Q(t)$  и  $Q(t+1)$  (табл. 1). Для этого используем канонический метод структурного синтеза. Функции возбуждения входов базовых триггеров определяют по матрицам (1)–(9), сравнивая значения  $Q(t)$  и  $Q(t+1)$  для каждой строки табл. 1.

Таблица 1

| $t$       |           |     | $t+1$ | $t$ |     |       |                 |       |                 |
|-----------|-----------|-----|-------|-----|-----|-------|-----------------|-------|-----------------|
| $\bar{K}$ | $\bar{J}$ | $Q$ | $Q$   | $D$ | $T$ | $V$   | $T$             | $V$   | $D$             |
| 0         | 0         | 0   | 1     | 1   | 1   | 1     | 1               | 1     | 1               |
| 0         | 0         | 1   | 0     | 0   | 1   | 1     | 1               | 1     | 0               |
| 0         | 1         | 0   | 0     | 0   | 0   | $b_1$ | $\bar{b}_1 b_2$ | $b_1$ | $\bar{b}_1 b_2$ |
| 0         | 1         | 1   | 0     | 0   | 1   | 1     | 1               | 1     | 0               |
| 1         | 0         | 0   | 1     | 1   | 1   | 1     | 1               | 1     | 1               |
| 1         | 0         | 1   | 1     | 1   | 0   | $b_3$ | $\bar{b}_3 b_4$ | $b_3$ | $b_3 \vee b_4$  |
| 1         | 1         | 0   | 0     | 0   | 0   | $b_1$ | $\bar{b}_1 b_2$ | $b_1$ | $b_1 b_2$       |
| 1         | 1         | 1   | 1     | 1   | 0   | $b_3$ | $\bar{b}_3 b_4$ | $b_3$ | $b_3 \vee b_4$  |

| $t$ |           |     | $t+1$ | $t$   |       |       |       |       |           |       |                |       |                |  |
|-----|-----------|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-----------|-------|----------------|-------|----------------|--|
| $K$ | $\bar{J}$ | $Q$ | $Q$   | $K$   | $J$   | $R$   | $S$   | $R$   | $S$       | $R$   | $S$            | $R$   | $S$            |  |
| 0   | 0         | 0   | 1     | $b_2$ | 1     | 0     | 1     | 0     | 1         | $b_2$ | 1              | 0     | 1              |  |
| 0   | 0         | 1   | 0     | 1     | $b_3$ | 1     | 0     | 1     | $b_3$     | 1     | 0              | 1     | 0              |  |
| 0   | 1         | 0   | 0     | $b_1$ | 0     | $b_1$ | 0     | $b_1$ | $b_1 b_2$ | $b_1$ | 0              | $b_1$ | $b_1 b_2$      |  |
| 0   | 1         | 1   | 0     | 1     | $b_3$ | 1     | 0     | 1     | $b_3$     | 1     | 0              | 1     | 0              |  |
| 1   | 0         | 0   | 1     | $b_2$ | 1     | 0     | 1     | 0     | 1         | $b_2$ | 1              | 0     | 1              |  |
| 1   | 0         | 1   | 1     | 0     | $b_4$ | 0     | $b_2$ | 0     | $b_4$     | $b_3$ | $b_3 \vee b_4$ | $b_3$ | $b_3 \vee b_4$ |  |
| 1   | 1         | 0   | 0     | $b_1$ | 0     | $b_1$ | 0     | $b_1$ | $b_1 b_2$ | $b_1$ | 0              | $b_1$ | $b_1 b_2$      |  |
| 1   | 1         | 1   | 1     | 0     | $b_4$ | 0     | $b_2$ | 0     | $b_4$     | $b_3$ | $b_3 \vee b_4$ | $b_3$ | $b_3 \vee b_4$ |  |

Поиск  $\bar{J}\bar{K}$  триггера минимальной сложности осуществим методом диаграмм Карно. Матрицы (1) — (9) можно разбить на два класса — с наличием взаимной зависимости сигналов на входах ( $TV, DV, R, S, E$ ) и без взаимной зависимости сигналов ( $D, T, IK, RS$ ) на входах триггера.

Нахождение минимальных форм функций возбуждения входов для триггеров первого класса следует осуществлять совместно для обоих входов. При этом взаимно связанными являются одинаково расположенные клетки диаграмм Карно обоих входов, в которые помещены неопределенные символы. Так как функции возбуждения входов частичны, то существует значительное число различных вариантов их доопределения. Например, при синтезе  $\bar{J}\bar{K}$  триггера на основе  $DV$  триггера возможно 80 вариантов доопределения функций  $V$  и  $D$ . Использование диаграмм Карно позволяет визуально выделить 5—6 наиболее выгодных вариантов, найти минимальные формы функций возбуждения и оценить их совместную сложность.

Если для функции возбуждения входа  $V$  положить  $b_1 = b_3 = 1$ , то при  $V = 1$  получим  $D = (\bar{J})\bar{Q} \vee \bar{K}\bar{Q}$ . Для реализации потребуется один элемент НЕ, два элемента И и один элемент ИЛИ с суммарным числом входов семь.

Исследуя другие варианты, находим, что наиболее экономичный вариант — доопределение  $b_1 = 0; b_3 = 1$  (рис. 1, а, б).

Диаграмма для входа  $D$  (рис. 1, б) при таком доопределении преобразуется в диаграмму (рис. 1, в). Функции возбуждения входов соответственно равны  $V = Q \vee \bar{J}$ ;  $D = Q \vee \bar{K}$ . Схема  $\bar{J}\bar{K}$  триггера на основе  $DV$  триггера с затратами в 5 входов показана на рис. 2. Применяя данную методику к различным типам триггеров с инверсными входами, находим оптимальные варианты их схемных решений на основе различных базовых триггеров. Результаты анализа приведены в табл. 2 в виде функций возбуждения входов базового триггера, откуда следует, что близость законов функционирования  $RS, R, S, E$  триггеров проявляется в идентичности функций возбуждения. Использование табл. 2 позволяет выполнить переход от имеющегося в инте-

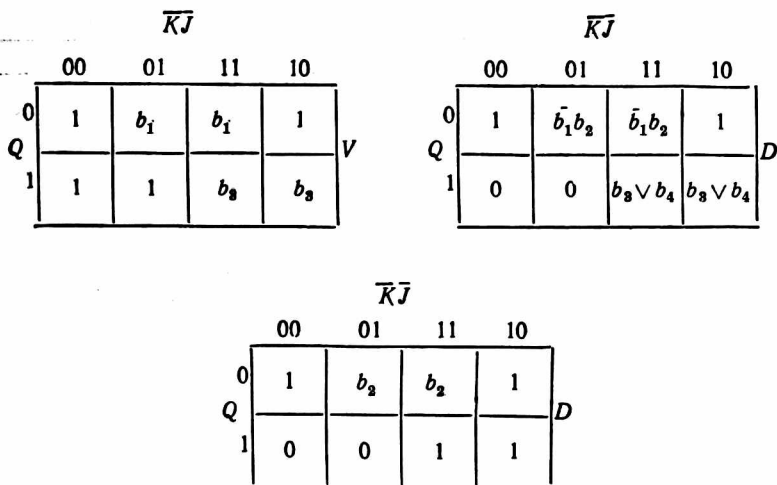


Рис. 1. Диаграммы Карно для  $\overline{J}K$  триггера на основе DV триггера

гальной системе элементов триггера с прямыми входами к соответствующему триггеру с инверсными входами. Выражение  $D = \bar{D}$  (табл. 2) следует понимать так, что слева в выражении стоит функция возбуждения входа базового триггера, а справа указано прямое или инверсное значение входа синтезируемого триггера. Так как входы синтезируемого триггера являются инверсными, то реализация выражения  $D = \bar{D}$  требует инвертора, подключенного к инверсному входу  $D$  ( $D = (\bar{D})$ ).

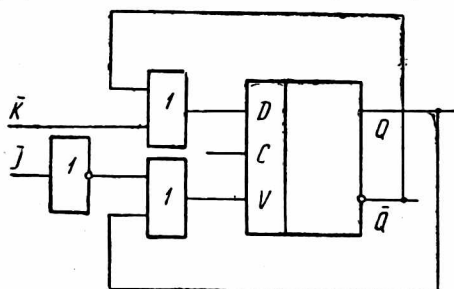


Рис. 2. Схема JK триггера на основе DV триггера

Отметим особенность применения триггеров  $\overline{J}, \overline{K}, \overline{T}$  типов в запоминающей части микропрограммных автоматов, заключающуюся в том, что для кодирования внутренних состояний автоматов в этом случае можно использовать модификацию эвристического алгоритма кодирования [4] при условии вычисления кодового расстояния  $d'(i, j)$  между

кодowymi комбинациями для исходного состояния  $a_i$  и состояния перехода  $a_j$  не в метрике Хемминга, а в метрике триггеров с инверсными входами.

Физически кодовое расстояние  $d'(i, j)$  в метрике триггеров с инверсными входами  $\overline{J}\overline{K}, \overline{T}$  типа означает суммарное число совпадающих по значению разрядов.

Тип базового триггера

| Синтезируемый триггер | Тип базового триггера        |                              |  |  |  |  |  |                                  |                          |  |
|-----------------------|------------------------------|------------------------------|--|--|--|--|--|----------------------------------|--------------------------|--|
|                       | D                            | T                            | RS                                     | R                                      | S                                      | E                                      | DV   | TV                               | JK                       |  |
| $\bar{T}$             | $D = \bar{T}Q \vee TQ$       | $T = T$                      | $R = \bar{S} = \bar{T}Q \vee \bar{T}Q$ | $R = \bar{S} = \bar{T}Q \vee \bar{T}Q$ | $R = \bar{S} = \bar{T}Q \vee \bar{T}Q$ | $R = \bar{S} = \bar{T}Q \vee \bar{T}Q$ | $V = T$<br>$D = \bar{Q}$                     | $V = T = T$                      | $K = J = T$              |  |
| $\bar{D}$             | $D = D$                      | $T = D\bar{Q} \vee \bar{D}Q$ | $R = \bar{D}$<br>$S = D$               | $R = \bar{D}$<br>$S = D$               | $R = \bar{D}$<br>$S = D$               | $R = \bar{D}$<br>$S = D$               | $V = 1$<br>$D = D$                           | $V = T = D\bar{Q} \vee \bar{D}Q$ | $K = \bar{D}$<br>$J = D$ |  |
| $\bar{RS}$            | $D = S \vee \bar{R}Q$        | $T = RQ \vee \bar{S}Q$       | $R = R$<br>$S = S$                     | $R = R$<br>$S = S$                     | $R = R$<br>$S = S$                     | $R = R$<br>$S = R$                     | $V = Q \vee S$<br>$D = \bar{R}$              | $V = T = \bar{R}Q \vee \bar{S}Q$ | $K = R$<br>$J = S$       |  |
| $\bar{JK}$            | $D = \bar{S}Q \vee \bar{R}Q$ | $T = \bar{S}Q \vee RQ$       | $R = KQ$<br>$S = JQ$                   | $R = KQ$<br>$S = JQ$                   | $R = KQ$<br>$S = JQ$                   | $R = KQ$<br>$S = JQ$                   | $V = Q \vee J$<br>$D = \bar{Q} \vee \bar{K}$ | $V = 1$<br>$T = KQ \vee JQ$      | $K = K$<br>$J = J$       |  |

При определении претендента на кодирование не закодированного состояния  $a_j$  его выбирают по минимуму оценочной функции

$$W_g = \sum_{i,j \in M_j} P(i, j) d'(i, j), \quad (10)$$

где  $M_j$  — матрица смежных для  $a_j$  состояний;  $P(i, j)$  — вес перехода из состояния  $a_i$  в состояние  $a_j$ .

Если использовать метрику Хемминга, то выбор претендента на кодирование следует производить по максимуму оценочной функции  $W_g$ . Между метрикой Хемминга  $d(i, j)$  и метрикой триггеров с инверсными входами существует простая связь  $d'(i, j) = n - d(i, j)$ .

Строго говоря, метрика триггеров с инверсными входами являются квазиметрикой, так как для нее выполняются только аксиома симметрии  $d'(i, j) = d'(j, i)$  и аксиома треугольника  $d'(i, j) \leq d'(i, k) + d'(k, j)$  ( $i, j, k \in X$ ) и не выполняется аксиома идентичности  $d'(i, j) = 0$  ( $i = j$ ).

Из особенностей определения кодового расстояния  $d'(i, j)$  следует, что каждый переход микропрограммного автомата типа  $a_i x_n y_i a_i$  вызывает усложнение функций возбуждения триггеров с инверсными входами на  $n$  компонент вида  $a_i x_n$ . В соответствии со схемой реализации отдельного пути перехода при выделении состояний автомата преддешифратором оценка Квайна для одной компоненты равна  $(n_x + 2)$ , где  $n_x$  — средняя длина конъюнкции осведомительных сигналов. Если в структурной таблице автомата имеется  $m$  строк вида  $a_i x_n y_i a_i$ , то в среднем на их реализацию требуется  $nm(n_x + 2)$  входов.

Так как коэффициент качества кодирования  $k$  представляет собой среднее число сигналов возбуждения на один переход автомата

$$k = \sum_{i=1}^{i=H} k_i / H,$$

то аппаратные затраты  $A_1$  автомата на триггерах с прямыми входами составят

$$A_1 = k_1 H (n_x + 2), \quad (11)$$

где  $H$  — число строк структурной таблицы.

При использовании триггеров с инверсными входами коэффициент качества кодирования  $k_2 < k$ , а оценка Квайна

$$A_2 = k_2 (H - m) (n_x + 2) + nm (n_x + 2). \quad (12)$$

Применение триггеров с инверсными входами в запоминающей части микропрограммных автоматов имеет смысл, если  $A_2 < A_1$ .

Из формул (11), (12) определим допустимое значение числа строк  $m$  типа  $a_i x_n y_i a_i$ :

$$k_1 H (n_x + 2) - k_2 (H - m) (n_x + 2) \geq nm (n_x + 2). \quad (13)$$

Из неравенства (13) найдем

$$m \leq \frac{(k_1 - k_2)H}{nk_2}. \quad (14)$$

Из формулы (14) следует, что применение триггеров с инверсными входами оправдано в основном в автоматах средней и большей степени сложности ( $H$  — десятки и сотни строк) при значениях  $m < m_{кр}$ .

Далее рассмотрим особенности применения триггера типа  $\bar{D}$ . Этот триггер по вектор-строке  $d_{рк} = (1, 0, 1, 0)$  относится к особому подклассу, для которого кодирование внутренних состояний микропрограммных автоматов следует выполнять по античастотному алгоритму. Античастотный алгоритм кодирования состоит в следующем.

1. Анализируем частоты появления состояния  $a_j (j = \overline{1, N})$  в матрице переходов автомата. Каждому состоянию  $a_j$  ставим в соответствие его число появлений  $M_j$ .

2. Числа  $M_1, \dots, M_j (j = \overline{1, N})$  упорядочиваем по убыванию.

3. Состояние  $a_k$  с наибольшим  $M_k$  кодируем кодом  $11\dots 11$ .

4. Следующие  $n$  состояний в упорядоченном по п. 2 списке кодируем с одним нулем  $11\dots 10, 11\dots 01, \dots, 10\dots 11, 01\dots 11$ .

5. Для кодирования следующих незакодированных состояний используем сначала все коды, содержащие два нуля, затем три нуля и т. д., до тех пор, пока не будут закодированы все состояния.

Кодовое расстояние  $d'(i, j)$  при античастотном алгоритме совпадает с числом нулей в коде состояния перехода  $\kappa(a_j)$ .

В заключении отметим, что точный учет проектировщиком особенностей применения соответствующего типа триггера с инверсными входами позволяет построить более эффективную методику синтеза микропрограммных автоматов и получить экономический эффект путем оптимизации основных технических параметров.

**Список литературы:** 1. Шабанов-Кушнаренок Ю. П. Теория интеллекта.— Х.: Вища шк. Изд-во при Харьк. ун-те, 1984.—144 с. 2. Глушков В. М., Летический А. А., Годлевский А. Б. Методы синтеза дискретных моделей биологических систем.— К.: Вища шк. Головное изд-во, 1983.—262 с. 3. Какурин Н. Я., Кирьяков Ю. К. Об одном подходе к минимизации аппаратурных затрат в микропрограммных автоматах.— Пробл. бионики, 1984, вып. 32, с. 78—86. 4. Какурин Н. Я., Кирьяков Ю. К., Пряницкий А. М. Алгоритм кодирования внутренних состояний микропрограммных автоматов для триггеров с инверсными входами.— Приборостроение, 1983, № 6, с. 46—49.

Поступила в редколлегию 25.03.85.

В. П. КАЛЯВИН, А. Ю. ШЕРБАКОВ

## ВЫБОР ГЛУБИНЫ ПОИСКА ДЕФЕКТОВ

Важную роль в обеспечении высоких эксплуатационных характеристик РЭА играет исследование вопросов их восстановления. Восстановление РЭА осуществляется заменой отказавшего модуля — типового элемента замены (ТЭЗ). Определение отказавшего ТЭЗа выбранного уровня иерархии, т. е. достижение требуемой глубины поиска дефектов обеспечивается выполнением последовательности проверок, различных по объему, информативности, стоимости, затратам времени.

В работах [1—3] рассматривались вопросы оптимизации глубины поиска по вероятностным, информационным, стоимостным критериям. Использование указанных работ в практике затруднено из-за большой априорной информации, требуемой для решения данной задачи. От этого недостатка свободен подход по определению глубины поиска дефектов в сложных объектах, обеспечивающий минимизацию суммарных затрат на создание средств поиска дефектов (СПД) и комплекта ЗИП.

Для восстановления РЭА необходимо располагать определенным объемом ЗИПа, сформированного на том уровне, на котором происходит восстановление. Необходимые для поиска дефектного модуля проверки реализуют СПД, объем которых и, следовательно, стоимость зависят от глубины поиска. Очевидно, что снижение иерархического уровня ТЭЗа, дефект которого определяется, приводит, с одной стороны, к уменьшению затрат на ЗИП, а с другой — к увеличению стоимости СПД, вследствие роста количества проверок и объема обрабатываемой информации. Следовательно, возможна оптимизация глубины по критерию минимума средних суммарных затрат на СПД и ЗИП.

Поэтому выбор глубины поиска  $\mu$  основывается на определении

$$C(\mu) = \min C(i), \quad (1)$$

где  $C(i)$  — суммарные затраты на СПД и ЗИП при  $i$ -й глубине поиска;  $i = 0, k$ ;  $k$  — минимальный иерархический уровень ТЭЗа, определяемый возможностью его восстановления.

Рассмотрим возможные пути решения данной задачи.

Пусть объект представим  $k$  уровнями иерархии, выделение которых определяется конструктивными особенностями построения объекта. Известна структурная организация объекта (рисунок), количество модулей  $M_i$  каждого уровня можно определить по формулам табл. 1.