

А. Г. ОВАНИСЯН, Р. Л. УРУТЯН

ОПЕРАЦИОННОЕ УСТРОЙСТВО

Специфика экспериментируемого алгоритма выдвинула необходимость создания операционного устройства, способного выполнять, наряду с традиционными операциями (сложение, сдвиг, взятие обратного кода и т. д.), также и специальные операции—поиск конструкции, подсчет единиц, ассоциативная выборка из словарей и т. д. ОУ состоит из логического узла (ЛУ), блока местного управления (блок МУ), сдвигающего устройства (СУ) и определителя конструкции (ОК). Первым трем из приведенных устройств посвящены отдельные параграфы настоящей статьи. Синтез схемы ОК выделен в отдельную статью [1].

§ 1. Логический узел

В настоящем параграфе дано описание основных узлов ЛУ, а также их технические характеристики, связи между собой и назначение каждого из них. Дальнейшее изложение материала в настоящей статье и в ряде последующих статей [1, 2, 3] предполагает знакомство читателя со структурой ЛУ, описанной в данном параграфе.

В состав логического узла (рис. 1) входят: регистры P_1, P_2, P_3, P_4 , индексные регистры PI_1, PI_2, PI_3, PI_4 , регистр обмена информацией PO , схема сравнения содержимого регистров PI_3 и PI_4 (включая триггер признака равенства—ТПР), схемы подсчета единиц в регистре P_3 и ряд небольших схем, нами опущенных.

Регистры P_1, P_2 и P_3 являются 32-разрядными регистрами. Каждый из них имеет общую для всех разрядов шину установки в нулевое состояние. Имеется возможность поразрядного сдвига содержимого этих регистров влево, а для регистра P_3 —также и вправо (время сдвига на один разряд равно 4 мксек). Эти регистры используются главным образом для выполнения следующих операций: поиска конструкции (ПК), образования логической суммы, умножения и отрицания двоичных наборов, подсчета числа единиц на P_3 (ПЕ), операции сложения «по mod 2» и сдвига. Кроме того, эти регистры совместно с регистром P_4 (его

старшими 32 разрядами) могут быть объединены в один длинный регистр—РД, в котором можно производить поразрядный сдвиг. В этом регистре младшим разрядом служит младший разряд регистра P_1 , а старшим разрядом—старший разряд регистра P_4 . Старшие разряды регистров P_1, P_2 и P_3 связаны со схемой ОК, где эти разряды проверяются при поиске конструкции. Старший разряд регистра P_3 , кроме того, связан с индексным регистром PI_1 через схему ПЕ—эта связь используется в операции подсчета единиц. При выполнении команд записи из ДОЗУ в МБ или же выводе содержимого ДОЗУ на печатающее устройство регистр P_3 играет роль буферного регистра, осуществляющего эту связь. При этом передача содержимого P_3 в РО осуществляется с помощью шестиразрядной последовательно-параллельной связи.

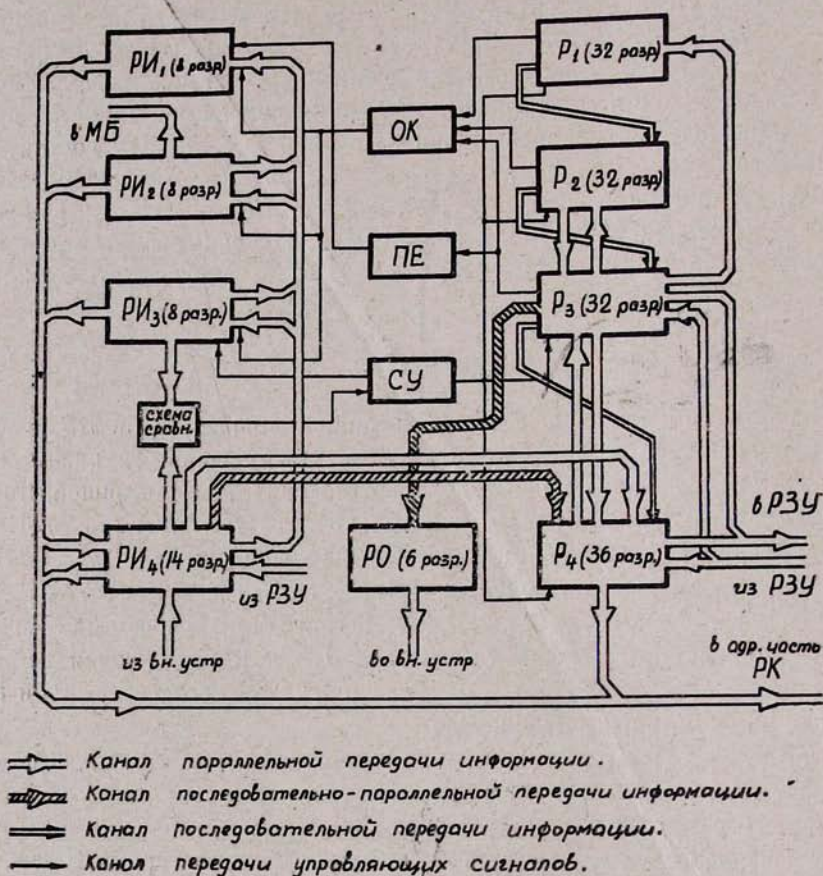


Рис. 1.

Регистр P_4 является 36-разрядным регистром-сумматором. Регистр этот также имеет общую для всех разрядов шину установки в нулевое состояние. В нем можно производить поразрядный сдвиг влево (время

одного сдвига—3 мксек). Имеется возможность проверять содержимое P_4 на нуль. Этот регистр совместно с регистром P_3 используется при выполнении операции логического умножения и сложения, операций сложения, вычитания, сложения «по mod 2» и в ряде других операций, не приведенных здесь. Результат этих операций выдается на регистр P_4 . Старшие 14 разрядов регистра P_4 используются в качестве индексного регистра при формировании исполнительного адреса [4].

Регистры PI_1, PI_2, PI_3 содержат по 8, а PI_4 —14 разрядов. Из них PI_1 и PI_3 являются также и счетчиками. Имеется возможность взятия обратного кода содержимого регистра PI_1 . Функциональная схема взаимодействия индексных регистров между собой и с другими регистрами и устройствами приведена на рис. 1.

Во время работы ОУ регистры PI_1 — PI_4 используются при выполнении команд обмена информацией, а также команд, содержащих операцию сдвига. В регистрах PI_1 — PI_3 получают [4] номера компонент найденных конструкций при выполнении команд ПК. В регистре PI_1 получается результат выполнения команды ПЕ. Во время работы СУ регистр PI_3 выполняет роль счетчика циклов, а в PI_4 (в младших 8 разрядах) хранится задающее число, т. е. число, указывающее, на сколько разрядов следует сдвинуть содержимое того или иного регистра. Старшие 6 разрядов PI_4 используются при прохождении информации из внешних устройств машины через P_4 в ДОЗУ. Все эти регистры во время работы УЦУ используются в качестве индексных регистров для формирования исполнительного адреса чтения или записи.

РО—шестиразрядный регистр, имеющий общую для всех разрядов шину установки на нуль. Регистр РО, как это было отмечено выше, связан с P_3 шестиразрядной последовательно-параллельной связью приема и используется при выдаче информации внешним устройствам.

Схема сравнения регистров PI_3 и PI_4 производит сравнение на равенство содержимого регистра PI_3 с содержимым младших 8 разрядов регистра PI_4 . Используется эта схема при работе СУ, а также при выполнении команд условного перехода.

§ 2. Синтез блока местного управления

Операции вычислительной машины—будь то универсальной или специализированной,—предусмотренные в командах (на языке которых составляются программы), могут потребовать для своего выполнения различное количество машинных тактов. Для определенности в дальнейшем эти операции будем называть машинными операциями. Реализация каждой машинной операции сводится к выполнению микропрограмм—последовательности более мелких операций, выполняемых в течение одного такта каждая. Такие операции будем называть микрооперациями. В свою очередь микрооперация может состоять из более простых, уже неделимых операций, называемых элементарными операциями. Совокупность элементарных операций составляет внутренний или техни-

ческий алфавит машины. Таким образом, машинные операции могут одновременно рассматриваться и как слова, состоящие из букв технического алфавита, и как буквы внешнего алфавита, с помощью которых составляются программы.

Назначение устройства управления состоит в преобразовании распоряжений программы, записанной в терминах внешнего алфавита, в термины внутреннего алфавита и реализации этих распоряжений. В настоящем параграфе рассматриваются вопросы членения машинных операций на микрооперации, минимизации полученных при этом микропрограмм и составления тактовых функций на базе микропрограмм.

Было решено: там, где это приводит к упрощению схем, не проводить резкого разграничения между устройствами центрального управления и блоком местного управления ОУ. В связи с этим в ряде случаев произведено перераспределение (между этими двумя устройствами) схем, реализующих микропрограмму машинных команд.

Введем символы для обозначения элементарных операций.

„0“ $\rightarrow P_i$ — установка регистра P_i в нулевое состояние,

„1“ $\rightarrow P_i$ — установка регистра P_i в единичное состояние,

$P_i \rightarrow P_j$ — передача содержимого регистра P_i в регистр P_j по единичному входу (логическое сложение),

$P_i \dot{+} P_j$ — передача содержимого регистра P_i в регистр P_j по счетному входу (сложение „по mod 2“),

„1“ $\dot{+} P_i$ — взятие обратного кода содержимого регистра P_i ,

„+n“ P_i — увеличение содержимого регистра P_i на n единиц,

Чт — посылка в ЗУ приказа о выборке слова,

$\Pi(M=N) \uparrow$ — логический оператор, проверяющий условие, заключенное внутри скобок: если оно выполнено, то управление передается по стрелке, если нет — то к соседнему справа символу,

$\uparrow^A$ — посылка запускающего сигнала в устройство A ,

$A \downarrow$ — сигнал об окончании работы устройства A .

К элементарным операциям относятся также:

$\tilde{P}_i$ — разрешение на сдвиг содержимого регистра P_i влево на один разряд,

$\bar{P}_i$ — разрешение на сдвиг содержимого регистра P_i вправо на один разряд,

ΣP_j — разрешение на выдачу единицы переноса в регистре P_j .

Эти элементарные операции самостоятельно в машине не применяются. Первые две вырабатываются совместно с элементарной операцией „0“ P_i и образуют микрооперации:

$\tilde{C}_i P_i$ — сдвиг содержимого P_i влево на один разряд

$$\tilde{C}_i P_i = \text{„0“ } P_i \tilde{P}_i \quad (i = 1, 2, 3),$$

$\vec{C}_d P_i$ — сдвиг содержимого P_i вправо на один разряд

$$\vec{C}_d P_i = \text{"0"} P_i \bar{P}_i \quad (i = 3).$$

Элементарная операция $\sum P_j$ применяется совместно с элементарными операциями $P_i + P_j$ и $\text{"0"} P_j$ и образует микрооперации:

$P_i + P_j \rightarrow P_j$ — суммирование содержимого P_i с содержимым P_j , с получением результата в P_j .

$$P_i + P_j \rightarrow P_j = (P_i + P_j) \sum P_j \quad (j = 4),$$

$\vec{C}_d P_j$ — сдвиг содержимого сумматора P_j влево на один разряд

$$\vec{C}_d P_j = \text{"0"} P_j \sum P_j \quad (j = 4).$$

Построение схем, реализующих каждую машинную операцию в виде микропрограммы, проводится в два этапа. На первом этапе производится переход от содержательного представления задачи к формальному, когда по заданному списку микроопераций и логической структуре машины составляется микропрограмма, реализующая данную операцию. (Микропрограммы машинных операций приведены в табл. 1). На втором этапе производится оптимизация этих микропрограмм с тем, чтобы получить минимальные тупиковые формы переключательных функций как для каждой микрооперации, так и для совокупности микроопераций (всех машинных операций), выполняемых внутри одного и того же такта. Ниже приводится методика распределения по тактам микроопераций (входящих в микропрограммы), дающая возможность получить минимальное количество машинных тактов, требуемых для выполнения каждой из микропрограмм.

Определение. Будем говорить, что микрооперация a_i зависит от микрооперации a_j той же микропрограммы, если a_i обязательно должна предшествовать a_j .

Зависимость двух микроопераций обозначается стрелкой, проведенной от независимой операции к зависимой (стрелки при этом всегда направлены справа налево). Микрооперации в микропрограмме, связанные между собой последовательными стрелками, будем называть цепочкой микроопераций или, сокращенно, цепочкой. Крайнюю (правую) микрооперацию цепочки будем называть базовой. Номер микрооперации в цепочке, при пересчете слева направо, будем называть шаговым показателем микрооперации в микропрограмме (см. рис. 2).

Изменение взаимного расположения элементарных операций в микропрограмме, если это перемещение не приводит к изменению взаимного расположения элементарных операций в цепочках, не меняет реализуемую микропрограммой операцию. Кроме того, минимальное количество тактов, необходимых для выполнения данной микропрограммы, равно числу элементарных операций внутри цепочки с наибольшей длиной.

Разбивка основных операций на элементарные операции

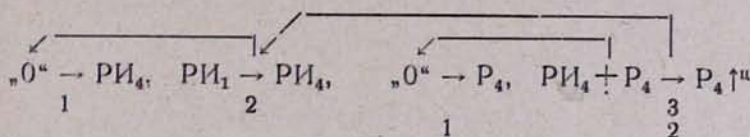
Операции.	Последовательность выполнения элементарных операций.
$P3Y \rightarrow P_3$	$0 \rightarrow P_3, 4m, P3Y \rightarrow P_3, \uparrow^{4u}$
$P3Y \vee P_3 \rightarrow P_3$	$4m, P3Y \rightarrow P_3, \uparrow^{4u}$
$ад. P3Y \rightarrow P_3$	$0 \rightarrow P_3, 4m, 1 \div P3Y \rightarrow P_3, \uparrow^{4y}$
$P3Y \wedge P_3 \rightarrow P_3$	$1 \div P_3, 4m, 1 \div P3Y \rightarrow P_3, 1 \div P_3, \uparrow^{4y}$
$P3Y \circ P_3 \rightarrow P_3$	$1 \div P_3, 4m, P3Y \rightarrow P_3, 1 \div P_3, \uparrow^{4u}$
$P3Y \rightarrow P_4$	$0 \rightarrow P_4, 4m, P3Y \div P_3 \rightarrow P_4, \uparrow^{4y}$
$ад. P3Y \rightarrow PH_1$	$0 \rightarrow PH_1, 4m, P3Y \rightarrow PH_1, 0 \rightarrow PH_1, PH_1 \div PH_1, \div PH_1, \div PH_1, \uparrow^{4u}$
$P3Y \rightarrow PH_1$	$0 \rightarrow PH_1, 4m, P3Y \rightarrow PH_1, 0 \rightarrow PH_1, PH_1 \div PH_1, \div PH_1, \uparrow^{4u}$
$P3Y \rightarrow PH_2$	$0 \rightarrow PH_2, 4m, P3Y \rightarrow PH_2, 0 \rightarrow PH_2, PH_2 \rightarrow PH_2, \uparrow^{4u}$
$P3Y \rightarrow PH_3$	$0 \rightarrow PH_3, 4m, P3Y \rightarrow PH_3, 0 \rightarrow PH_3, PH_3 \div PH_3, \div PH_3, \uparrow^{4u}$
$P3Y \rightarrow PH_4$	$0 \rightarrow PH_4, 4m, P3Y \rightarrow PH_4, \uparrow^{4u}$
$P3Y \rightarrow PM$	$0 \rightarrow PM, 4m, P3Y \rightarrow PM, \uparrow^{4u}$
ПК	$0 \rightarrow P_3, 4m, P3Y \rightarrow P_3, n(12PK \div 0) \uparrow^{4u} 0 \rightarrow P_3, P_3 \rightarrow P_3, 0 \rightarrow PPK, \div 1 \uparrow^{4u}$ $n(12PK \div 0) \uparrow^{4u} 0 \rightarrow P_2, P_2 \rightarrow P_2, 0 \rightarrow PPK, \div 1 \uparrow^{4u}$
ПЕ	$0 \rightarrow P_3, 4m, P3Y \rightarrow P_3, \uparrow^{4u}$
$P3Y \Rightarrow$	$0 \rightarrow P_3, 4m, P3Y \rightarrow P_3, \uparrow^{4u}$
Общая часть микропрограммы для команд переключения управления имеет следующий вид:	
$\begin{aligned} & \uparrow^{4u} 0 \rightarrow T_1 \uparrow^{4u} 1 \rightarrow T_1 \uparrow^{4u} P_2 (T_1 = 1) \uparrow^{4u} 1 \rightarrow PAK \uparrow^{4u} \\ & 0 \rightarrow PAK, A \rightarrow PAK \uparrow^{4u} \end{aligned}$	
БП	$a = 0$
$P_2 = 0$	$P_2 \neq 0$
$PH_1 = 0$	$PH_1 \neq 0$
$PH_3 = 0$	$PH_3 \neq 0$
$PH_4 = 0$	$PH_4 \neq 0$
$PH_3 = PH_4$	$PH_3 \neq PH_4$
$OP_2 = 1$	$OP_2 = 0$
$Tок = 1$	$Tок = 0$
$C_4.C = 40 \div 42PK$	$C_4.C = 40 \div 42PK$
$P_3 \rightarrow P3Y$	$\uparrow^{4u}$
$P_4 \rightarrow P3Y$	$\uparrow^{4u}$
$P_2 \vee P_3 \rightarrow P_3$	$P_2 \rightarrow P_3, \uparrow^{4u}$
$P_4 \vee P_3 \rightarrow P_3$	$P_4 \rightarrow P_3, \uparrow^{4u}$
$P_2 \wedge P_3 \rightarrow P_3$	$1 \div P_3, P_2 \rightarrow P_3, 1 \div P_3, \uparrow^{4u}$
$P_4 \wedge P_3 \rightarrow P_3$	$1 \div P_3, 1 \div P_4, P_4 \rightarrow P_3, 1 \div P_3, 1 \div P_4, \uparrow^{4u}$
$P_3 + P_4 \rightarrow P_3$	$P_3 \div P_4 \rightarrow P_4, PCP_4, \uparrow^{4u}$
$P_4 \rightarrow P_3 \rightarrow P_4$	$1 \div P_3, P_3 \div P_4 \rightarrow P_4, PCP_4, \div 16P_4, 1 \div P_3, \uparrow^{4u}$
$PH_3 \rightarrow PH_1$	$0 \rightarrow PH_1, PH_3 \rightarrow PH_1, \uparrow^{4u}$
$PH_4 \rightarrow PH_1$	$0 \rightarrow PH_1, PH_4 \rightarrow PH_1, \uparrow^{4u}$

Переход от микропрограммы (отмеченной стрелками) к тактовым функциям (см. ниже) производится следующим образом. Для каждой микропрограммы составляется таблица—тактовая таблица микропрограммы, в которой столбцы соответствуют машинным тактам, а строки—цепочкам микропрограммы. Количество столбцов таблицы берется равным наибольшему в данной микропрограмме шаговому показателю: количество строк берется равным количеству цепочек. Элементарные операции с одинаковыми шаговыми показателями располагаются в один и тот же столбец, номер которого численно равен шаговому показателю. После этого в случае, если это способствует упрощению синтезируемой схемы, производится сдвиг элементарной операции в соседнюю (пустую) клетку в горизонтальном направлении. Такой сдвиг производится многократно. При составлении тактовой таблицы удобно первой рассматривать наиболее длинную цепочку и при этом необходимо учитывать шаговый показатель базовой элементарной операции с наибольшим численным значением.

Например, пусть имеем микропрограмму, осуществляющую передачу $PI_1 \rightarrow P_4$,

$$"0" \rightarrow PI_4, \quad PI_1 \rightarrow PI_4, \quad "0" \rightarrow P_4, \quad PI_4 \div P_4 \rightarrow P_4 \uparrow "$$

Проставив стрелки связи и подписав под каждой элементарной операцией шаговый показатель, получим:



Тактовая таблица для этой микропрограммы будет иметь вид:

Таблица 2

Цепочка.	Такты		
	1	2	3
1	"0" → PI ₄	PI ₁ → PI ₄	PI ₄ : P ₄ ↑ "
2		"0" → P ₄	

Или, учитывая, что с точки зрения получения минимальной переключающей функции выгоднее осуществить микрооперацию $"0" \rightarrow P_4$ в первом такте.

Таблица 3

1	2	3
"0" → PI ₄	PI ₁ → PI ₄	PI ₄ : P ₄ ↑ "
"0" → P ₄		

Заметим, что одна микропрограмма может занимать несколько строк, в то время как для каждого такта отводится один столбец.

Далее, все тактовые таблицы, полученные для отведенных микропрограмм, объединяются в одну общую таблицу. Все микрооперации одного такта, взятые из общей тактовой таблицы и объединенные знаком дизъюнкции, будем называть тактовой функцией и обозначать F_k , где k — номер такта.

Следующим этапом является упрощение полученных тактовых функций, представляющих собой комбинационную схему со многими выходами. Синтез таких схем на импульсно-потенциальных элементах, где каждый клапан имеет два входа: для разрешающего сигнала (уровень потенциала) и для стробирующего сигнала (остроконечный импульс) несколько отличается от известных методов [5].

Приведенный ниже способ упрощения схем со многими выходами хотя и не претендует на универсальность или совершенность, тем не менее, на наш взгляд, является достаточно эффективным и удобным в практических целях. Суть способа заключается в следующем. Функция F_k со многими выходами $a_k^{(1)}, a_k^{(2)}, \dots, a_k^{(m)}$ записывается в виде дизъюнкции всех булевых функций $P_k^{(1)}, P_k^{(2)}, \dots, P_k^{(m)}$ элементарных операций, выполняемых во время k -го такта:

$$F_k = g_k \left(\frac{P_k^{(1)}}{a_k^{(1)}} \vee \frac{P_k^{(2)}}{a_k^{(2)}} \vee \dots \vee \frac{P_k^{(m)}}{a_k^{(m)}} \right), \quad (1)$$

после чего путем преобразований это выражение приводится к минимальной форме. В (1) через g_k обозначен сигнал, запускающий k -й такт схемы.

Минимизация выражения (1) производится с помощью группировки и вынесения общих членов за скобки. Тем самым общие части микропрограмм объединяются, и схема получается более компактной.

Все сложные функции (функции F_k) машины минимизированы с помощью описанного метода.

Приведенный способ записи, когда под функцией каждой из элементарных операций дан символ соответствующего выходного сигнала, делает дальнейшие преобразования F_k более удобными и, что самое главное, дает возможность после преобразования легко определять те места полученной схемы, с которых следует снимать выходные сигналы.

В заключение данного параграфа опишем способ, по которому осуществляется выбор кода каждой команды. Так как основные или дополнительные операции в каждой подгруппе [6] определяются тремя разрядами регистра РК (геометрическая интерпретация кодов операций представляет куб, вершины которого соответствуют кодам отдельных операций), то, чтобы представить функции элементарных операций в минимальных дизъюнктивных нормальных формах, коды машинных операций выбраны следующим образом:

1. Две машинные операции с одинаковыми микрооперациями имеют интервалы второго ранга.

2. Три или четыре машинные операции с одинаковыми микрооперациями имеют интервалы первого ранга.

Одновременно свободным кодам приписывались микрооперации, которые приводят к упрощению логической функции.

Ниже приводятся таблицы преобразованных микропрограмм (табл. 4), с помощью которых составлены тактовые функции для каждой элементарной операции (табл. 5). В табл. 5 через c_i обозначено единичное значение соответствующего разряда регистра РК.

Таблица 4

Случай $h_1 = 0$

Разряды РК		Обозначения операций	Такты		
4,5	6,7,10		1	2	3
00	000	$P_3 \rightarrow P_3 \vee$	—	—	$\uparrow c_3$
	001	$P_2 \vee P_3 \rightarrow P_3$	—	$P_2 \rightarrow P_3$	$\uparrow c_3$
	010	$P_4 \vee P_3 \rightarrow P_3$	—	$P_4 \rightarrow P_3$	$\uparrow c_3$
	011	$P_3 + P_4 \rightarrow P_4$	—	$P_3 + P_4; PCP_4$	$\uparrow c_3$
	100	Свободен	$1 + P_3$	—	$1 + P_3 \uparrow c_3$
	101	$P_3 + P_2 \rightarrow P_3$	$1 + P_3$	$P_4 \rightarrow P_3$	$1 + P_3 \uparrow c_3$
	110	$P_4 + P_3 \rightarrow P_3$	$1 + P_3; 1 + P_4$	$P_3 + P_4$	$1 + P_3; 1 + P_4 \uparrow c_3$
01	111	$P_4 - P_3 \rightarrow P_4$	$1 + P_3$	$P_3 + P_4; 16^* P_4; PCP_4$	$1 + P_3 \uparrow c_3$
	000	ПК ($\bar{P}_1$)	$\uparrow c_3$	—	—
	001	ПЕ ($\bar{P}_1$)	$0 \rightarrow PH_1; \uparrow c_3$	—	—
	010	$\bar{C}_3 \cdot P_3$	$\uparrow c_3$	—	—
	011	$\bar{C}_3 \cdot P_3$	$\uparrow c_3$	—	—
	100	ПК	$\uparrow c_3$	—	—
	101	$P_3 \vee P_4 \rightarrow P_3 \vee$	$0 \rightarrow C_4 MC; \uparrow c_3$	—	—
10	110	$\bar{C}_3 \cdot P_4$	$\uparrow c_3$	—	—
	111	$\bar{C}_3 \cdot P_4$	$\uparrow c_3$	—	—
	000	$PH_3 \rightarrow PH_1$	$0 \rightarrow PH_1$	$PH_3 + PH_1$	$\uparrow c_3$
	001	$об. PH_3 \rightarrow PH_1$	$0 \rightarrow PH_1; 0 \rightarrow PH_3$	$PH_3 + PH_1$	$1 + PH_1; \uparrow c_3$
	010	$PH_4 \rightarrow PH_1$	$0 \rightarrow PH_1$	$PH_4 + PH_1$	$\uparrow c_3$
	011	$об. PH_4 \rightarrow PH_1$	$0 \rightarrow PH_1; 0 \rightarrow PH_4$	$PH_4 + PH_1$	$1 + PH_1; \uparrow c_3$
	100	$PH_4 \rightarrow P_4$	$0 \rightarrow P_4$	—	$PH_4 + P_4; \uparrow c_3$
11	101	$PH_1 \rightarrow P_4$	$0 \rightarrow PH_4; 0 \rightarrow P_4$	$PH_4 \rightarrow PH_1$	$PH_4 + P_4; \uparrow c_3$
	110	$PH_2 \rightarrow P_4$	$0 \rightarrow PH_4; 0 \rightarrow P_4$	$PH_2 \rightarrow PH_4$	$PH_4 + P_4; \uparrow c_3$
	111	$PH_3 \rightarrow P_4$	$0 \rightarrow PH_4; 0 \rightarrow P_4$	$PH_3 \rightarrow PH_4$	$PH_4 + P_4; \uparrow c_3$
	000	Останов	—	—	—
	001	Останов по кл. 1	$n(к.1) \begin{cases} 0 & 1^* PAK \uparrow c_3 \\ 1 & n(K_{пер}) \begin{cases} 0 & 1^* PAK \uparrow c_3 \\ 1 & 0 \rightarrow PAK \end{cases} \end{cases}$	$PH \rightarrow PAK; 1^* PAK \uparrow c_3$	—
	010	Останов по кл. 2	$n(к.2) \begin{cases} 0 & 1^* PAK \uparrow c_3 \\ 1 & — \end{cases}$	—	—
	011	Останов по кл. 3	$n(к.3) \begin{cases} 0 & 1^* PAK \uparrow c_3 \\ 1 & n(K_{пер}) \begin{cases} 0 & 1^* PAK \uparrow c_3 \\ 1 & 0 \rightarrow PAK \end{cases} \end{cases}$	$PH \rightarrow PAK; 1^* PAK \uparrow c_3$	—

Таблица 4 (прод.)

Случай $h_1 = 1$

Взаим. р.т.		Узнавания операций	Т а к т ы		
4,5	6,7,10		1	2	3
00	000	$P_3 \rightarrow P_3$	$0 \rightarrow P_3; 4m.$	$P_3 \rightarrow P_3$	$\uparrow 4y$
	001	$P_3 \vee P_3 \rightarrow P_3$	$4m.$	$P_3 \rightarrow P_3$	$\uparrow 4y$
	010	$0 \rightarrow P_3 \rightarrow P_3$	$0 \rightarrow P_3; 4m.$	$1 \rightarrow P_3 \rightarrow P_3$	$\uparrow 4y$
	011	Свободен	$4m.$	—	$\uparrow 4y$
	100	$P_3 \wedge P_3 \rightarrow P_3$	$1 \rightarrow P_3; 4m.$	$P_3 \rightarrow P_3$	$1 \rightarrow P_3 \uparrow 4y$
	101	Свободен	$1 \rightarrow P_3; 4m.$	—	$1 \rightarrow P_3 \uparrow 4y$
	110	$P_3 \wedge P_3 \rightarrow P_3$	$1 \rightarrow P_3; 4m.$	$1 \rightarrow P_3 \rightarrow P_3$	$1 \rightarrow P_3 \uparrow 4y$
	111	Свободен	$1 \rightarrow P_3; 4m.$	—	$1 \rightarrow P_3$
01	000	ПК	$0 \rightarrow P_3; 4m.$	$P_3 \rightarrow P_3$	$\left\{ \begin{array}{l} (12PK=1) \uparrow P_3 \rightarrow P_3; 1 \rightarrow P_3; 0 \rightarrow 12PK \uparrow \\ (12PK=0) \uparrow P_3 \rightarrow P_3; 1 \rightarrow P_3; 0 \rightarrow 12PK \uparrow \\ (13PK=1) \uparrow P_3 \rightarrow P_3; 1 \rightarrow P_3; 0 \rightarrow 13PK \uparrow \end{array} \right. \uparrow 4y$
	100		$\left\{ \begin{array}{l} (12PK=1) \uparrow P_3 \rightarrow P_3; 1 \rightarrow P_3; 0 \rightarrow 12PK \uparrow \\ (13PK=1) \uparrow P_3 \rightarrow P_3; 1 \rightarrow P_3; 0 \rightarrow 13PK \uparrow \end{array} \right. \uparrow 4y$	$\left\{ \begin{array}{l} (12PK=1) \uparrow P_3 \rightarrow P_3; 1 \rightarrow P_3; 0 \rightarrow 12PK \uparrow \\ (13PK=1) \uparrow P_3 \rightarrow P_3; 1 \rightarrow P_3; 0 \rightarrow 13PK \uparrow \end{array} \right. \uparrow 4y$	$\left\{ \begin{array}{l} (12PK=1) \uparrow P_3 \rightarrow P_3; 1 \rightarrow P_3; 0 \rightarrow 12PK \uparrow \\ (13PK=1) \uparrow P_3 \rightarrow P_3; 1 \rightarrow P_3; 0 \rightarrow 13PK \uparrow \end{array} \right. \uparrow 4y$
	001	ПЕ	$0 \rightarrow P_3; 4m.$ $0 \rightarrow P_{H_1}$	$P_3 \rightarrow P_3 \uparrow 4y$	
	010	$\bar{C}_g, P_3 \vee$	$0 \rightarrow P_3; 4m.$	$P_3 \rightarrow P_3 \uparrow 4y$	
	011	$\bar{C}_g, P_3 \vee$	$0 \rightarrow P_3; 4m.$	$P_3 \rightarrow P_3 \uparrow 4y$	
	101	$P_3 \vee \rightarrow P_3 \vee$	$0 \rightarrow P_3; 4m.$	$P_3 \rightarrow P_3 \uparrow 4y$	
	110	Свободен	$0 \rightarrow T_{np}$	—	$\left\{ \begin{array}{l} (T_{np}=1) \uparrow P_3 \rightarrow P_3; 1 \rightarrow P_3; 0 \rightarrow 12PK \uparrow \\ (T_{np}=0) \uparrow P_3 \rightarrow P_3; 1 \rightarrow P_3; 0 \rightarrow 13PK \uparrow \end{array} \right. \uparrow 4y$
	111	$C_{4M}=40 \div 42PK$	$0 \rightarrow T_{np}$	$n(C_{4M}=40 \div 42PK) \uparrow T_{np}$	$\left\{ \begin{array}{l} (T_{np}=1) \uparrow P_3 \rightarrow P_3; 1 \rightarrow P_3; 0 \rightarrow 12PK \uparrow \\ (T_{np}=0) \uparrow P_3 \rightarrow P_3; 1 \rightarrow P_3; 0 \rightarrow 13PK \uparrow \end{array} \right. \uparrow 4y$
10	000	$P_3 \rightarrow P_4$	$0 \rightarrow P_4; 4m.$	$P_3 \rightarrow P_4$	$\uparrow 4y$
	001	$0 \rightarrow P_3 \rightarrow P_{H_1}$	$0 \rightarrow P_{H_1}; 0 \rightarrow P_{H_1}; 4m.$	$1 \rightarrow P_{H_1}; P_3 \rightarrow P_{H_1}$	$P_{H_1} \rightarrow P_{H_1} \uparrow 4y$
	010	Свободен	$0 \rightarrow P_{H_2}; 4m.$	—	$\uparrow 4y$
	011	$P_3 \rightarrow P_{H_1}$	$0 \rightarrow P_{H_1}; 4m.$	$P_3 \rightarrow P_{H_1}$	$\uparrow 4y$
	100	$P_3 \rightarrow P_{H_2}$	$0 \rightarrow P_{H_2}; 4m.$	$P_3 \rightarrow P_{H_2}$	$\uparrow 4y$
	101	$P_3 \rightarrow P_{H_1}$	$0 \rightarrow P_{H_1}; 0 \rightarrow P_{H_1}; 4m.$	$P_3 \rightarrow P_{H_1}$	$P_{H_1} \rightarrow P_{H_1} \uparrow 4y$
	101	$P_3 \rightarrow P_{H_2}$	$0 \rightarrow P_{H_2}; 0 \rightarrow P_{H_2}; 4m.$	$P_3 \rightarrow P_{H_2}$	$P_{H_2} \rightarrow P_{H_2} \uparrow 4y$
	111	$P_3 \rightarrow P_{H_3}$	$0 \rightarrow P_{H_3}; 0 \rightarrow P_{H_3}; 4m.$	$P_3 \rightarrow P_{H_3}$	$P_{H_3} \rightarrow P_{H_3} \uparrow 4y$
11	000	БП	—	—	
	001	$T_{ок} = 1$	—	$T_{ок} \rightarrow T_{np}$	$T_{np} = 0; 1 \rightarrow P_{AK} \uparrow 4y$
	010	$P_4 = 0$	$n(P_4=0) \uparrow T_{np}$	$1 \rightarrow T_{np}$	
	011	$P_{H_1} = 0$	$n(P_{H_1}=0) \uparrow T_{np}$	$1 \rightarrow T_{np}$	
	100	$0P_4 = 1$	$0P_4 \rightarrow T_{np}$	—	
	101	$P_{H_2} = P_{H_4}$	$n(P_{H_2}=P_{H_4}) \uparrow T_{np}$	$1 \rightarrow T_{np}$	
	110	$P_{H_3} = 0$	$n(P_3=0) \uparrow T_{np}$	$1 \rightarrow T_{np}$	
	111	$P_{H_4} = 0$	$n(P_{H_4}=0) \uparrow T_{np}$	$1 \rightarrow T_{np}$	$T_{np} = 1; 0 \rightarrow P_{AK}; 1 \rightarrow P_{AK} \uparrow 4y$

Шоктобоз функция	Шоктобоз функция элементарной операции	Элементарная операция
$f_1^{(1)}$	$h_1 [\bar{C}_4 (\bar{C}_5 \vee \bar{C}_7) \vee \bar{C}_5]$	Чт
$f_2^{(1)}$	$h_1 \bar{C}_4 [C_5 (\bar{C}_6 \vee \bar{C}_7) \vee \bar{C}_6 \bar{C}_{10}]$	$0 \rightarrow P_3$
$f_3^{(1)}$	$h_1 C_4 \bar{C}_5 \bar{C}_6 \bar{C}_7 \bar{C}_{10} \vee \bar{h}_1 C_4 \bar{C}_5 C_6$	$0 \rightarrow P_2$
$f_4^{(1)}$	$\bar{C}_4 \bar{C}_5 C_6$	$\bar{1} \rightarrow P_3$
$f_5^{(1)}$	$h_1 \bar{C}_4 C_5 \bar{C}_6 \bar{C}_7 C_{10} \vee \bar{h}_1 \bar{C}_4 C_5 \bar{C}_6 \bar{C}_7 C_{10} \vee C_4 C_5 (h_1 \bar{C}_7 C_{10} \vee \bar{h}_1 \bar{C}_6)$	$0 \rightarrow PM_1$
$f_6^{(1)}$	$h_1 C_4 \bar{C}_5 C_7 \bar{C}_{10}$	$0 \rightarrow PM_2$
$f_7^{(1)}$	$h_1 C_4 C_6 C_7 C_{10}$	$0 \rightarrow PM_3$
$f_8^{(1)}$	$h_1 C_4 \bar{C}_5 (C_6 \vee \bar{C}_7 C_{10}) \vee \bar{h}_1 C_4 \bar{C}_5 C_6 (C_7 \vee C_{10})$	$0 \rightarrow PM_4$
$f_9^{(1)}$	$h_1 C_5 (C_4 \vee C_6 C_7)$	$0 \rightarrow T_1$
$f_{10}^{(1)}$	$h_1 C_4 \bar{C}_5 \bar{C}_6 C_{10} \vee \bar{h}_1 C_4 \bar{C}_5 \bar{C}_6 C_{10}$	$0 \rightarrow PM$
$f_{11}^{(1)}$	$\bar{h}_1 \bar{C}_4 \bar{C}_5 C_6 C_7 \bar{C}_{10}$	$\bar{1} \rightarrow P_4$
$f_{12}^{(1)}$	$\bar{h}_1 \bar{C}_4 C_5 (\bar{C}_6 \vee \bar{C}_7 \bar{C}_{10})$	$\uparrow \text{сч}$
$f_{13}^{(1)}$	$h_1 (C_4 \vee \bar{C}_5) \vee h_1 C_5 (C_4 \vee C_6 C_7)$	$\uparrow \bar{2} \tau$
$f_{14}^{(1)}$	$\bar{h}_1 \bar{C}_4 C_5 C_6 \bar{C}_7 C_{10}$	$\uparrow \text{мчвч}$

Второй такт

Шоктобоз функция	Шоктобоз функция элементарной операции	Элементарная операция
$f_1^{(2)}$	$h_1 \bar{C}_4 (C_5 \bar{C}_6 \vee \bar{C}_7)$	$P3Y \rightarrow P_3$
$f_2^{(2)}$	$h_1 \bar{C}_4 \bar{C}_5 C_7 \bar{C}_{10}$	$\bar{1} \rightarrow P3Y$
$f_3^{(2)}$	$h_1 C_4 \bar{C}_5 C_6 \bar{C}_7 \bar{C}_{10}$	$P3Y \rightarrow P_4$
$f_4^{(2)}$	$h_1 \bar{C}_7 C_5 \bar{C}_7 \bar{C}_{10} (C_{12} \vee C_{13})$	$\bar{1} \rightarrow A$
$f_5^{(2)}$	$h_1 \bar{C}_4 C_5 C_6 C_7 C_{10}$	$\Pi(C_{12} \vee C_{13} \rightarrow 12)PK$
$f_6^{(2)}$	$h_1 C_4 C_4 C_5 \bar{C}_6 \bar{C}_7 C_{10}$	$\bar{1} \rightarrow T_{0K} \rightarrow T_1$
$f_7^{(2)}$	$h_1 C_3 C_4 C_5 C_6 \bar{C}_7 \bar{C}_{10}$	$\bar{1} \rightarrow PK \rightarrow T_1$
$f_8^{(2)}$	$\bar{h}_1 \bar{C}_4 \bar{C}_5 C_6 C_7 C_{10}$	$\bar{16} \rightarrow P_4$
$f_9^{(2)}$	$\bar{h}_1 \bar{C}_4 \bar{C}_5 C_7 C_{10}$	$P C P_4$
$f_{10}^{(2)}$	$h_1 C_4 C_5 \bar{C}_6 C_7 C_{10}$	$\bar{1} \rightarrow PM_1$
$f_{11}^{(2)}$	$h_1 C_4 C_5 \bar{C}_6 C_7 \bar{C}_{10}$	$\Pi(P_4 = 0)$
$f_{12}^{(2)}$	$h_1 C_4 C_5 C_6 \bar{C}_7 C_{10}$	$\Pi(PM_3 = PM_4)$
$f_{13}^{(2)}$	$\bar{h}_1 \bar{C}_4 \bar{C}_5 \bar{C}_7 C_{10}$	$P_2 \rightarrow P_3$
$f_{14}^{(2)}$	$\bar{h}_1 \bar{C}_4 \bar{C}_5 C_7 \bar{C}_{10}$	$P_4 \rightarrow P_3$
$f_{15}^{(2)}$	$\bar{h}_1 \bar{C}_4 \bar{C}_5 C_7 C_{10}$	$P_3 \rightarrow P_4$
$f_{16}^{(2)}$	$h_1 C_4 \bar{C}_5 \bar{C}_6 \bar{C}_7$	$PM_3 \rightarrow PM_1$
$f_{17}^{(2)}$	$h_1 C_4 \bar{C}_5 \bar{C}_6 C_7$	$PM_4 \rightarrow PM_1$
$f_{18}^{(2)}$	$\bar{h}_1 C_4 \bar{C}_5 C_6 \bar{C}_7 C_{10}$	$PM_1 \rightarrow PM_4$
$f_{19}^{(2)}$	$\bar{h}_1 C_4 \bar{C}_5 C_6 C_7 \bar{C}_{10}$	$PM_2 \rightarrow PM_4$
$f_{20}^{(2)}$	$\bar{h}_1 C_4 \bar{C}_5 C_6 C_7 C_{10}$	$PM_3 \rightarrow PM_4$
$f_{21}^{(2)}$	$h_1 C_4 \bar{C}_5 (C_6 \vee \bar{C}_7 C_{10})$	$P3Y \rightarrow PM_4$
$f_{22}^{(2)}$	$h_1 C_4 \bar{C}_5 \bar{C}_6 C_7 C_{10}$	$P3Y \rightarrow PM$
$f_{23}^{(2)}$	$h_1 C_4 \bar{C}_5 C_6 C_7 C_{10}$	PM_1
$f_{24}^{(2)}$	$h_1 C_4 C_5 C_{12} \bar{C}_{13} \bar{C}_{15}$	$\bar{0} \rightarrow P_4$
$f_{25}^{(2)}$	$\bar{C}_5 \vee (C_4 \vee C_6 (C_7 \vee C_{10})) / (h_1 h_3 (C_7 \vee C_{10}))$	$\uparrow \bar{2} \tau$
$f_{26}^{(2)}$	$\bar{h}_1 C_4 C_5$	Поддержка установившегося
$f_{27}^{(2)}$	$h_1 \bar{C}_4 C_5 (\bar{C}_7 \bar{C}_{10} \bar{C}_{12} \bar{C}_{13} \vee \bar{C}_6 (C_7 \vee C_{10}))$	$\uparrow \bar{2} \tau$
$f_{28}^{(2)}$		$\uparrow \text{сч}$

Таблица 5 (прод.)

Третий такт

Тактовая функция	Тактовая функция элементарной операции	Элементарная операция
$f_1^{(3)}$	$\bar{C}_4 \bar{C}_5 C_6$	$\sim I'' \div P_3$
$f_2^{(3)}$	$\bar{h}_1 C_4 \bar{C}_5 \bar{C}_6 C_{10}$	$\sim I'' \div PH_1$
$f_3^{(3)}$	$h_1 C_5 C_{13} \bar{C}_{15} (C_4 \vee C_6 C_7)$	$\sim I'' C_4 C$
$f_4^{(3)}$	$h_1 C_5 \bar{C}_{11} C_{15} (C_4 \vee C_6 C_7)$	$0 \rightarrow C_4 C$
$f_5^{(3)}$	$h_1 C_5 \bar{C}_{15} (C_4 \vee C_6 C_7)$	$0 \rightarrow PAK$
$f_6^{(3)}$	$h_1 C_4 C_5 C_6 C_7 C_{10}$	$\sim I'' PM$
$f_7^{(3)}$	$h_1 C_4 C_5 C_{12} \bar{C}_{13} \bar{C}_{15}$	$PAK \rightarrow P_4$
$f_8^{(3)}$	$h_1 C_4 C_5 C_{12} \bar{C}_{13} \bar{C}_{15}$	$\sim 16'' P_4$
$f_9^{(3)}$	$h_1 C_4 C_5 C_{12} \bar{C}_{13} \bar{C}_{15}$	PCP_4
$f_{10}^{(3)}$	$h_1 \bar{C}_4 \bar{C}_5 C_6 C_7 \bar{C}_{10}$	$\sim I'' \div P_4$
$f_{11}^{(3)}$	$\bar{h}_1 C_4 \bar{C}_5 C_6$	$PH_4 \rightarrow P_4$
$f_{12}^{(3)}$	$h_1 C_4 \bar{C}_5 C_7 C_{10}$	$PH_4 \rightarrow PH_1$
$f_{13}^{(3)}$	$h_1 C_4 \bar{C}_5 C_6 C_7 \bar{C}_{10}$	$PH_4 \rightarrow PH_2$
$f_{14}^{(3)}$	$h_1 C_4 \bar{C}_5 C_6 C_7 C_{10}$	$PH_4 \rightarrow PH_3$
$f_{15}^{(3)}$	$h_1 C_5 C_{12} C_{13} \bar{C}_{15} (C_4 \vee C_6 C_7)$	$\sim I'' + C_4 C$
$f_{16}^{(3)}$	$(\bar{C}_4 \vee \bar{C}_5) \bar{C}_{11} C_{12} C_{13}$	$0 \rightarrow P_1$
$f_{17}^{(3)}$	$(\bar{C}_4 \vee \bar{C}_5) \bar{C}_{11} C_{12} C_{13}$	$0 \rightarrow P_2$
$f_{18}^{(3)}$	$\bar{C}_4 \vee \bar{C}_5 \bar{C}_{11} C_{12} C_{13}$	$0 \rightarrow P_3$
$f_{19}^{(3)}$	$h_1 \bar{C}_4 C_5 C_6 C_7 C_{10}$	$\uparrow MVBH$
$f_{20}^{(3)}$	$h_1 C_5 C_6 C_7 C_{15}$	$\sim I'' PAK$
$f_{21}^{(3)}$	$\bar{C}_5 \vee h_1 C_5 C_{15} (C_4 \vee C_6 C_7)$	$\uparrow 4H$
$f_{22}^{(3)}$	$\bar{h}_1 C_4 C_5 C_{12} \bar{C}_{13} C_{15}$	$\sim I'' \rightarrow 24,5 P_4$
$f_{23}^{(3)}$	1	$\uparrow IV T.$

Таблица 5 (прод.)

Четвертый такт

Тактовая функция	Тактовая функция элементарной операции	Элементарная операция
$f_1^{(4)}$	$(\bar{C}_4 \vee \bar{C}_5) C_{12} C_{13}$	$P_3 \rightarrow P_1$
$f_{12}^{(4)}$	$(\bar{C}_4 \vee \bar{C}_5) \bar{C}_{12} C_{13}$	$P_3 \rightarrow P_2$
$f_3^{(4)}$	$\bar{C}_4 \vee \bar{C}_5 C_{12} \bar{C}_{13}$	$P_3 \rightarrow P_4$
$f_4^{(4)}$	$\bar{C}_4 C_5 \bar{C}_7 \bar{C}_{10} \bar{C}_{12} C_{13}$	$0 \rightarrow 13PK$
$f_5^{(4)}$	$\bar{C}_4 C_5 \bar{C}_7 \bar{C}_{10} C_{12} C_{13}$	$0 \rightarrow 12PK$
$f_6^{(4)}$	$h_1 C_5 C_{15} (C_4 \vee C_6 C_7)$	$A \rightarrow PAK$
$f_7^{(4)}$	$h_1 C_5 C_{12} C_{13} C_{15} (C_4 \vee C_6 C_7)$	$\sim I'' + C_4 C$
$f_8^{(4)}$	$\bar{C}_4 C_5 C_7 C_{10}$	$\sim I'' A$

О б о з н а ч е н и я

$$h_1 = c_0 \vee c_1 \vee c_2; \quad n_2 = c_{14} \vee c_{15},$$

а также

$$h_3 = \bar{c}_4 \bar{c}_5; \quad h_7 = \bar{c}_7 \bar{c}_{10};$$

$$h_4 = \bar{c}_4 h_5; \quad h_8 = \bar{c}_7 c_{10};$$

$$h_5 = c_4 \bar{c}_5; \quad h_9 = c_7 \bar{c}_{10};$$

$$h_6 = c_4 c_5; \quad h_{10} = c_7 c_{10}.$$

Из тактовых функций элементарных операций (табл. 5) путем применения описанной выше методики получим объединенные тактовые функции:

$$F_1 = h_1 \left\{ \bar{c}_3 \left[\frac{1}{f_{1-1}} \vee c_4 \left(\frac{h_9}{f_{1-6}} \vee \frac{c_6}{f_{1-8}} \vee \left(\frac{1}{f_{1-5}} \vee \frac{1}{f_{1-8}} \right) \vee \right. \right. \right. \\ \left. \left. \left. \vee \bar{c}_6 \left(\frac{h_7}{f_{1-3}} \vee \frac{c_{10}}{f_{1-10}} \right) \right] \vee \bar{c}_4 \left[\bar{c}_6 \left(\frac{1}{f_{1-1}} \vee \frac{\bar{c}_{10}}{f_{1-2}} \right) \vee c_3 \bar{c}_6 \left(\frac{1}{f_{1-2}} \vee \frac{h_8}{f_{1-5}} \right) \vee \right. \right. \right. \\ \left. \left. \left. \vee \bar{c}_7 \left(\frac{1}{f_{1-1}} \vee \frac{\bar{c}_5}{f_{1-2}} \right) \right] \vee c_6 c_7 \left[\frac{c_4 c_{10}}{f_{1-7}} \vee c_5 \left(\frac{1}{f_{1-9}} \vee \frac{1}{f_{1-13}} \right) \right] \vee \right. \right. \\ \left. \left. \vee h_6 \left(\frac{1}{f_{1-9}} \vee \frac{1}{f_{1-3}} \right) \right] \vee \bar{h}_1 \left\{ h_4 \left[\frac{h_7}{f_{1-12}} \vee \frac{c_6 h_8}{f_{1-14}} \vee \bar{c}_6 \left(\frac{h_8}{f_{1-5}} \vee \frac{1}{f_{1-12}} \right) \right] \vee \right. \right. \\ \left. \left. \vee \bar{c}_5 \left[c_4 \bar{c}_6 \left(\frac{1}{f_{1-5}} \vee \frac{c_{10}}{f_{1-10}} \right) \vee c_6 \left(\frac{\bar{c}_4 h_9}{f_{1-11}} \vee c_4 \left(\frac{1}{f_{1-3}} \vee \frac{c_7 \vee c_{10}}{f_{1-8}} \right) \right) \right] \right\} \vee \frac{h_1 c_6}{f_{1-4}}, \right.$$

$$F_2 = h_1 \left\{ \frac{c_6 (c_7 \vee c_{10})}{f_{2-5}} \vee c_4 \left[\frac{1}{f_{2-25}} \vee c_5 \left(\frac{c_{12} \bar{c}_{13} \bar{c}_{15}}{f_{2-24}} \vee c_6 \left(\frac{c_3 h_7}{f_{2-7}} \vee \frac{h_9}{f_{2-12}} \right) \vee \right. \right. \right. \\ \left. \left. \left. \vee \bar{c}_6 \left(\frac{h_9}{f_{2-11}} \vee c_{10} \left(\frac{c_2 \bar{c}_7}{f_{2-6}} \vee \frac{c_7}{f_{2-10}} \right) \right) \right) \right] \vee \bar{c}_5 \left(\frac{c_6 \vee h_8}{f_{2-21}} \vee \bar{c}_6 \left(\frac{h_{10}}{f_{2-22}} \vee \bar{c}_7 \left(\frac{c_{10}}{f_{2-3}} \vee \frac{\bar{c}_{10}}{f_{2-23}} \right) \right) \right) \right] \vee \bar{c}_4 \left[\frac{\bar{c}_5 h_9}{f_{2-2}} \vee \right. \\ \left. \vee \bar{c}_5 \left(\frac{c_6 h_{10}}{f_{2-5}} \vee \bar{c}_6 \left(\frac{1}{f_{2-1}} \vee \frac{c_7 \vee c_{10}}{f_{2-27}} \right) \vee h_7 \left(\frac{c_{12} \vee c_{13}}{f_{2-4}} \vee \frac{\bar{c}_{12} \bar{c}_{13}}{f_{2-27}} \right) \right) \vee \frac{\bar{c}_7}{f_{2-1}} \right] \right\} \vee \\ \vee \bar{h}_1 \left\{ \frac{h_6}{f_{2-26}} \vee \bar{c}_5 \left[c_4 \left(c_6 \left(\frac{h_8}{f_{2-18}} \vee \frac{h_9}{f_{2-19}} \vee \frac{h_{10}}{f_{2-20}} \right) \vee \bar{c}_6 \left(\frac{\bar{c}_7}{f_{2-16}} \vee \frac{c_7}{f_{2-17}} \right) \right) \vee \right. \right. \\ \left. \left. \vee \bar{c}_4 \left(\frac{h_9}{f_{2-14}} \vee c_{10} \left(\frac{\bar{c}_7}{f_{2-13}} \vee c_7 \left(\frac{c_6}{f_{2-8}} \vee \frac{1}{f_{2-9}} \vee \frac{1}{f_{2-15}} \right) \right) \right) \right] \right\} \vee \frac{\bar{c}_5 c_6 (c_7 \vee c_{10})}{f_{2-25}},$$

$$\begin{aligned}
F_3 = & \bar{c}_5 \left\{ \frac{1}{f_{3-21}} \vee c_6 \left[\frac{c_4}{f_{3-1}} \vee \bar{h}_1 \left(\frac{c_4}{f_{3-11}} \vee \frac{c_4 h_9}{f_{3-10}} \right) \right] \right\} \vee \\
& \vee h_1 \left\{ c_5 \left[c_4 \left(\frac{\bar{c}_6 h_{10}}{f_{3-6}} \vee \bar{c}_{15} \left(c_{13} \left(\frac{1}{f_{3-3}} \vee \frac{c_{12}}{f_{3-15}} \right) \vee \frac{1}{f_{3-5}} \right) \vee \right. \right. \right. \\
& \vee c_{12} \bar{c}_{13} \left(\frac{1}{f_{3-7}} \vee \frac{1}{f_{3-8}} \vee \frac{1}{f_{3-9}} \right) \vee c_{15} \left(\frac{1}{f_{3-21}} \vee \frac{c_{11}}{f_{3-6}} \right) \left. \right] \vee \\
& \vee c_6 c_7 \left(\bar{c}_{15} \left(c_{13} \left(\frac{1}{f_{3-3}} \vee \frac{c_{12}}{f_{3-15}} \right) \vee \frac{1}{f_{3-5}} \right) \vee c_{15} \left(\frac{\bar{c}_{11}}{f_{3-4}} \vee \frac{1}{f_{3-20}} \vee \frac{1}{f_{3-21}} \right) \right) \right\} \vee \\
& \vee h_3 \left[\frac{h_8}{f_{3-12}} \vee c_6 c_7 \left(\frac{\bar{c}_{10}}{f_{3-13}} \vee \frac{c_{10}}{f_{3-14}} \right) \right] \vee \frac{h_4 h_8 c_6}{f_{1-19}} \vee \\
& \vee \bar{c}_{11} (\bar{c}_4 \vee \bar{c}_5) \left(\frac{c_{12} c_{13}}{f_{3-17}} \vee c_{12} \left(\frac{\bar{c}_{12}}{f_{3-18}} \vee \frac{c_{13}}{f_{3-16}} \right) \right) \vee \frac{\bar{h}_1 h_5 \bar{c}_6 c_{10}}{f_{3-2}}, \\
F_4 = & h_4 h_7 \left[\frac{1}{f_{4-8}} \vee c_{13} \left(\frac{\bar{c}_{12}}{f_{4-4}} \vee \frac{c_{12}}{f_{4-5}} \right) \right] \vee \\
& \vee (\bar{c}_4 \vee \bar{c}_5) \left(\frac{\bar{c}_{12} c_{13}}{f_{4-2}} \vee c_{12} \left(\frac{c_{13}}{f_{4-1}} \vee \frac{\bar{c}_{13}}{f_{4-3}} \right) \right) \vee \\
& \vee h_1 c_5 (c_4 \vee c_6 c_7) \left(\frac{c_{15}}{f_{4-6}} \vee \frac{c_{12} c_{13} \bar{c}_{15}}{f_{4-7}} \right).
\end{aligned}$$

На рис. 2 приведена блок-схема местного управления

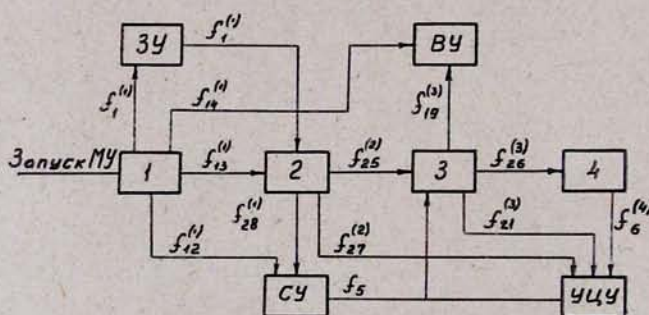


Рис. 2.

§ 3. Сдвигающее устройство

Сдвигающее устройство предназначено для управления процессом поразрядного сдвига содержимого регистров операционного устройства. Основные требования, предъявляемые к СУ, заключаются в том, что сдвигающее устройство, начиная с момента запуска, должно выдавать

сигналы сдвигов до тех пор, пока не будет выполнено нужное количество сдвигов, предусмотренное в данной команде или вытекающее из конкретных условий ее реализации. После этого СУ должно прекратить свою работу и передать управление другим узлам машины.

Схема, отвечающая приведенным выше требованиям, реализована в виде автомата и комбинационной схемы, формирующей выходные сигналы СУ.

Автомат* имеет входной алфавит $X(x_1, x_2)$ (где x_1 означает, что необходимо произвести очередной сдвиг, и x_2 — процесс сдвигов необходимо прекратить), множество внутренних состояний $U(u_0, u_1)$ (где u_0 — начальное состояние и u_1 — состояние, при котором выдаются выходные сигналы) и выходной алфавит $Y(y_0, y_1)$ (где y_0 — сигнал об окончании работы СУ и y_1 — комплекс выходных сигналов автомата). Состояние u_1 содержит ряд промежуточных состояний $u_1^{(1)}, \dots, u_1^{(4)}$, выполненных на элементах задержки. Соответственно комплекс выходных сигналов y_1 состоит из сигналов $y_1^{(1)}, \dots, y_1^{(4)}$. Эти сигналы после прохождения через соответствующие комбинационные схемы (см. ниже) образуют выходные сигналы СУ, которые осуществляют микропрограмму сдвигов.

В результате будем иметь:

для множества внутренних состояний

$$U[u_0, u_1(u_1^{(1)}, u_1^{(2)}, u_1^{(3)}, u_1^{(4)})],$$

для выходного алфавита

$$Y[y_0, y_1(y_1^{(1)}, y_1^{(2)}, y_1^{(3)}, y_1^{(4)})].$$

Граф описанного автомата приведен на рис. 3.

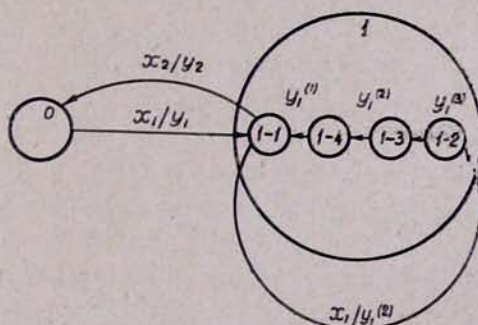


Рис. 3. Граф автомата СУ.

Кодировка состояний автомата произведена согласно следующей таблице.

* Описание синтеза автомата ввиду его простоты опущено.

Во время работы СУ используются: регистр $РИ_3$, играющий роль счетчика циклов, регистр $РИ_4$, в котором задается число, указывающее на количество сдвигов, схема сравнения на равенство содержимого этих регистров и, наконец, схема управления работой СУ.

Таблица 6

Элементы автомата Состояния	$\tau_{св}$	τ_1	τ_2	τ_3	τ_4
U_0	0	0	0	0	0
$U_1^{(1)}$	1	1	0	0	0
$U_1^{(2)}$	1	0	1	0	0
$U_1^{(3)}$	1	0	0	1	0
$U_1^{(4)}$	1	0	0	0	1

Работа автомата заключается в следующем. После запуска СУ в последнем возникает импульс, который при каждом прохождении через элементы замкнутой цепочки $\tau_1 - \tau_2$ будет выдавать сигналы, соответствующие выполняемой команде. Этот процесс повторяется до тех пор, пока не будет произведено нужное количество сдвигов, после чего под действием возникшей при этом входной буквы x_2 автомат перейдет в состояние u_0 и будет выдан сигнал y_0 .

Цикл работы автомата по характеру выполняемых им функций можно разбить на два этапа—подготовительный и основной. Во время подготовительного этапа производится установка схемы СУ в начальное состояние (при запуске извне), анализ на равенство содержимого регистров $РИ_3$ и $РИ_4$ и в случае необходимости—установка триггера ТСУ в нулевое состояние. До окончания подготовительного этапа триггер ТСУ может быть установлен в нулевое состояние также в следующих случаях:

- при выполнении команд ПК, если конструкция найдена;
- при выполнении команды ПКИ (двухкомпонентной), если конструкция не найдена;
- при переполнении счетчика циклов, т. е. после 32-го сдвига.

Во время основного этапа работы автомата СУ происходит выдача следующих управляющих сигналов: сигнала, запускающего схему определителя конструкции, сигналов сдвига содержимого регистров $Р_1$, $Р_2$, $Р_3$, $Р_4$ и РД и, наконец, сигнала прибавления единицы к содержимому счетчика циклов $РИ_3$. Из сказанного следует, что элементарные автоматы, из которых составлен рассматриваемый автомат СУ, должны одновременно учитывать:

τ_1 — время, необходимое для проведения проверки на равенство содержимого регистров $РИ_3$ и $РИ_4$;

τ_2 — время, необходимое для проверки старших разрядов регистров операционного устройства схемой ОК;

τ_3 — время, необходимое для полной работы ОК, так как (см. ниже) при прибавлении к счетчику секции единицы необходимо учесть результат поиска конструкции;

τ_4 — время установки счетчика циклов.

На рис. 4 дана примерная временная диаграмма работы СУ. Определение параметров линии задержек можно сделать после того, как будут известны конкретные логические схемы СУ. Однако уже на этой диаграмме видны основные условия, которым должны удовлетворять элементы задержек. А именно: как это видно из диаграммы, установка триггера ТСУ в единичное состояние должна завершиться до окончания процесса сравнения содержимых РИ₃ и РИ₄. Далее, установка триггера ТСУ в нулевое состояние должна быть закончена до наступления момента времени τ_1^* .

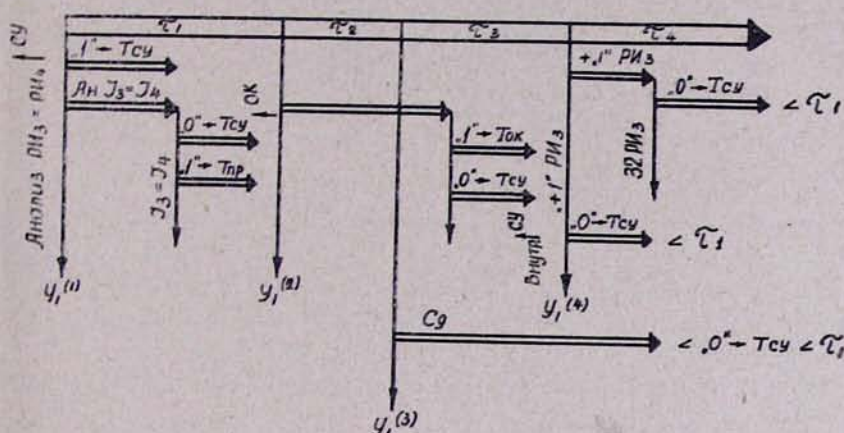


Рис. 4. Примерная временная диаграмма работы СУ.

Из диаграммы, в частности, видно, что работа определителя конструкции [1], включая установку триггера ТОК, может закончиться до наступления момента времени τ_3 (необходимо успеть заблокировать сигнал „+1“ РИ₃), однако проверка старших разрядов регистров Р₁—Р₃ схемой ОК должна быть завершена раньше, чем наступит момент времени τ_2 , так как к этому времени начинается процесс сдвига регистров. Этот сдвиг должен быть, в свою очередь, завершён к моменту времени τ_4 , чтобы, начиная с этого момента, схема ОК могла провести очередной анализ старших разрядов. Из диаграммы также видно, что время одного цикла автомата СУ должно быть не меньше времени, необходимого для сдвига содержимого регистров Р₁, Р₂, Р₃ на один разряд, плюс время анализа старших разрядов регистров схемой ОК.

* В дальнейшем изложении символом τ будет обозначаться момент времени, когда появляется сигнал на выходе соответствующего элемента задержки.

По окончании работы схема СУ выдает сигнал конца операции СУ и одновременно содержимое регистра адреса [2] команды увеличивает на единицу.

Перейдем к описанию операций, выполнение которых включает в себя сдвиги. Список этих операций с соответствующими кодами дан в табл. 7.

Таблица 7

№ операции	Операции	Значения разрядов 6, 7, 10 РК
1	С ₂ Р ₃	010
2	С ₂ Р ₃	011
3	С ₂ Р ₄	111
4	С ₂ Р _Д	110
5	ПЕ	001
6	ПК	000
7	ПКИ	100

Для удобства дешифрации выходных шин РК и простоты логических схем управления коды операций этих команд отнесены к одной группе (состояния триггеров 4 РК и 5 РК для всех команд одинаковые). При кодировке было учтено также и то, что операции 1—5, с точки зрения их реализации, значительно отличаются от операций 6 и 7 (в кодах последние разряды 7 и 10 равны нулю).

Приведем характеристики всех операций, а также требования, предъявляемые к ним.

1. Количество сдвигов при выполнении команд 1—5 определяется числом, заданным в регистре РИ₄. Там же задается номер разряда, с которого следует производить поиск конструкции при выполнении команд 6—7. Результат сравнения содержимого РИ₃ с содержимым РИ₄ фиксируется триггером ТПР. Правая граница поиска для этих команд определяется количеством секций, в пределах которых намечается производить поиск. Если команды 6 и 7 выполняются с записью результата операции, то обрабатываемое слово должно иметь длину в один отрезок.

2. Номера компонент конструкций, расположенных на регистрах Р₁, Р₂, Р₃, необходимо получить соответственно в регистрах РИ₁, РИ₂, РИ₃. После нахождения конструкции триггер ТОК устанавливается в единичное состояние (в котором остается до поступления новой команды ПК), а в РИ₃ и РИ₄ вырабатывается номер того разряда, в котором была найдена последняя компонента. Результат выполнения операции 5 необходимо получить в регистре РИ₁, а сдвиг обрабатываемого слова производить в регистре Р₃.

3. В случае обнаружения конструкции или отсутствия конструкции с итерационной скобкой процесс сдвигов прекращается.

4. При выполнении операций 6 и 7 производится одновременный сдвиг регистров P_1, P_2, P_3 влево, независимо от числа компонент. Последнее условие диктуется способом реализации команд 6 и 7 схемой ОК.

Для удобства записи приведенных ниже функций введем обозначения для некоторых сигналов УЦУ и СУ (см. табл. 8).

Таблица 8

Единичное знач. Тсу	α_1
— " — " — Ток	α_2
— " — " — Тпр	α_3
— " — " — DP_3	α_6
Условие $CyMC = 0$	α_n
Сигнал запуска СУ	λ_6
Условие $PI_3 = PI_4$	λ_7
Дифференциальный выход $8PI_3$	λ_8
Ответ об отсутствии конструкции	λ_9
Условие $CyMC = 40 \div 42PK$	λ_{10}
Сигнал передачи $T_m \sim T_{pr}$	λ_H

Ниже приводятся уравнения булевых функций, реализующих все выходные сигналы СУ. Уравнения эти выведены на основании логической структуры машины и условий, приведенных выше в п. п. 1—4.

Так как триггер ТСУ при работе СУ всегда находится в единичном состоянии, а при прекращении работы СУ устанавливается в нулевое состояние, то входное уравнение установки триггера в единичное состояние будет зависеть только от сигнала «Зап. СУ»

$$f_5^{(1)} = \lambda_6.$$

Тем же сигналом λ_6 , но уже при выполнении условий, приведенных выше, производится установка в нулевое состояние триггера ТОК:

$$f_5^{(2)} = \lambda_6 (c_7 \vee \bar{h}_1 \vee a_{11}) h_7,$$

а также триггера ТПР и регистра PI_3 :

$$f_5^{(3)} = \lambda_6 (c_7 \vee \bar{h}_1 \vee a_{11}).$$

На следующем этапе работы СУ сигналом $y_1^{(1)}$ выдается сигнал анализа содержимого $РИ_3$ и $РИ_4$ и производится — в случае необходимости — изменение состояния триггеров ТСУ или ТПР. Уравнениями этих функций будут соответственно:

$$f_5^{(4)} = y_1^{(1)} \bar{a}_2;$$

$$f_5^{(5)} = y_1^{(1)} a_2 \vee \lambda_7 \bar{h}_7 \vee \lambda_8 (\bar{c}_6 \vee c_7) \vee \lambda_9 \bar{a}_8;$$

$$f_5^{(6)} = \lambda_7 \vee \lambda_{11} \bar{c}_7 \vee \lambda_{10}.$$

Сигналом $y_1^{(2)}$ при $ТСУ = 1$ запускается следующий такт СУ и выдается сигнал:

$$f_5^{(7)} = y_1^{(2)} a_1 a_3.$$

При $ТСУ = 0$ выдаются следующие сигналы, связанные с окончанием работы СУ:
конец операции

$$f_5^{(8)} = y_1^{(2)} \bar{a}_1;$$

передача содержимого $РИ_3$ в $РИ_4$

$$f_5^{(9)} = y_1^{(2)} \bar{a}_1 h_7;$$

увеличение содержимого РАК на единицу

$$f_5^{(10)} = y_1^{(2)} \bar{a}_1 (h_7 (a_2 \vee h_2) \vee \bar{h}_7 (\bar{c}_7 h_2 \vee a_3)) \vee \lambda_{10} (\bar{c}_6 \vee h_7);$$

анализ на равенство содержимого СчМС с разрядами 40 ÷ 42 РК

$$f_5^{(11)} = y_1^{(2)} \bar{a}_1 (\bar{c}_7 \bar{h}_7 \vee \bar{a}_2 h_7) h_2;$$

увеличение содержимого СчМС на единицу

$$f_5^{(12)} = y_1^{(2)} \bar{a}_1 (\bar{c}_7 \bar{h}_7 \vee \bar{a}_2 h_7) h_1 h_2.$$

Во время следующего этапа работы СУ вырабатываются сигналы сдвигов регистров:

сдвиг содержимого регистров P_1 и P_2 влево

$$f_5^{(13)} = y_1^{(3)} \bar{c}_{10} (\bar{c}_6 \vee \bar{c}_7) \bar{P}_1.$$

$$f_5^{(14)} = y_1^{(3)} \bar{c}_{10} (\bar{c}_6 \vee \bar{c}_7) \bar{P}_2;$$

сдвиг содержимого регистра P_3 влево или вправо

$$f_5^{(15)} = y_1^{(3)} (\bar{c}_{10} (c_6 \vee c_7) \vee \bar{c}_6 (c_7 \vee c_{10})) \bar{P}_3.$$

$$f_5^{(16)} = y_1^{(3)} (\bar{c}_{10} (c_6 \vee c_7) \vee \bar{c}_6 (c_7 \vee c_{10})) \bar{P}_3;$$

«сдвиг содержимого регистра P_4 влево

$$f_5^{(17)} = y_1^{(3)} c_6 c_7 \sum P_4.$$

Процесс сдвигов P_1, P_2, P_3 осуществляется с помощью одновременной подачи на регистры сигналов установки на нуль и одного из сигналов разрешения $\bar{P}_i, \bar{P}_i, \sum P_i$ в зависимости от того, содержимое какого регистра и в какую сторону сдвигается (см. § 2 настоящей статьи).

На последнем такте каждого цикла работы СУ производится увеличение содержимого счетчика циклов на единицу:

$$f_5^{(18)} = y_1^{(4)} (\bar{a}_2 \vee \bar{h}_2),$$

после чего цикл работы СУ повторяется.

Ա. Գ. ՀՈՎՀԱՆՆԻՍՅԱՆ, Ռ. Լ. ՈՒՌՈՒՅՅԱՆ

ԳՈՐԾՈՂՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ՍԱՐՔ

Ա. մ փ ո փ ո լ մ

«Գառնի» թարգմանական մեքենայի գործողությունների սարքը բաղկացած է տրամաբանական հանգույցից, կառուցվածքների որոշիչից, տեղաշարժող հանգույցից և տեղական ղեկավարման սխեմաներից: Այդ սարքը նախատեսված է հիմնականում տրամաբանական և թվաբանական գործողությունների կատարելու համար: Առանձին դեպքերում այն կատարում է արտաքին ու հիշող սարքերի միջև միջանկյալ օղակի դեր:

Տրամաբանական հանգույցը բաղկացած է 4 մեծ (32—36 կարգ) և 5 փոքր (6—14 կարգ) թվային ռեգիստրներից, որոնք միմյանց հետ կապված են ինֆորմացիայի ընդունման և հաղորդման փականներով: Ռեգիստրներից երկուսը (P_3 և P_4) ունեն երկկողմանի կապի հնարավորություն և երբեքին հիշողության հետ մի ռեգիստր (PO) նախատեսված է արտաքին սարքերին ինֆորմացիա հաղորդելու և մեկն էլ (PI₄)՝ արտաքին սարքերից ինֆորմացիա ընդունելու համար: Տեղաշարժող հանգույցի օգնությամբ կատարվում են մեծ ռեգիստրների վրա գտնվող թվերի տեղաշարժում դեպի ձախ, իսկ P_3 ռեգիստրի վրա՝ նաև աջ: Անհրաժեշտության դեպքում բոլոր 4 ռեգիստրները կարող են միանալ և կազմել մեկ ռեգիստր:

Տեղական ղեկավարման սխեմաները իրականացնում են գործողությունների կատարումը սարքում: Պարզվում է, որ կախված էլեմենտների բնույթից, այդ սխեմաների սինթեզը կատարվում է տարբեր մեթոդներով:

Ուսումնասիրվել են իմպուլսա-պոտենցիալային տրամաբանական էլեմենտների օգտագործմամբ, մի քանի ելքերով միատակտ ղեկավարական սխեմաների կառուցումը:

ЛИТЕРАТУРА

1. А. Г. Ованисян, Р. Л. Урутян. Определитель конструкции. Настоящий сборник.
2. Р. Л. Урутян. Устройство центрального управления. Настоящий сборник.
3. Н. В. Варданян, Э. В. Егиазарян, Р. Л. Урутян. Организация словаря машины «Гарни». Настоящий сборник.
4. А. Г. Ованисян. Формирование исполнительных адресов запоминающих устройств. Настоящий сборник.
5. В. М. Глушков. Синтез цифровых автоматов. Физматгиз, 1962.
6. Р. Л. Урутян. Система команд машины «Гарни». Настоящий сборник.