

## УНИВЕРСАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ НА УРОВНЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СХЕМ

Ю.В. Гайкович, Г.А. Миронов  
(Москва)

В настоящее время широко распространенным методом исследования сложных систем является метод прямого моделирования. В частности, при исследовании дискретных схем, т.е. схем, состоящих из элементов, работающих с дискретным сигналом, предметом исследования является поведение всех элементов схемы, а средством — электронная цифровая машина (ЭЦМ).

Одним из основных вопросов, связанных непосредственно с моделированием, является вопрос об описании поведения элементов. Выбор степени детализации в описании существенным образом зависит от решаемых задач.

В настоящем докладе рассматриваются вопросы, связанные с моделированием на уровне функциональных элементов [2]. При этом, в отличие от моделей, связанных с двоичным представлением реального физического сигнала, в данной работе рассматривается более детализированное восьмизначное представление сигнала. Математическая модель сигнала представлена на рис. I.

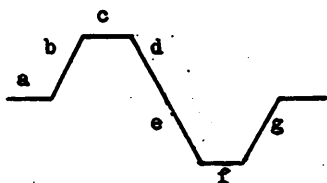


Рис. I.

Принятая модель сигнала позволяет сравнительно просто исследовать поведение элементов (схемы) не только в установившемся (состояния а, с, f) режиме, но и при переходных процессах, возникающих в элементах при смене установившихся значений сигнала.

## 1. Постановка задачи

Как справедливо отмечено в [1], любой метод моделирования дискретных автоматов удобно характеризовать следующими признаками:

1. Входным языком, то есть средством для описания структуры и поведения автомата;
2. Совокупностью программ, предназначенных для моделирования дискретного автомата;
3. Методикой исследования автомата, то есть способом задания его входной и анализа выходной последовательностей.

Если первые два признака связаны в основном с формальным описанием структуры автомата (язык для описания), созданием транслятора для перевода выражений о языке описания в код выбранной электронной цифровой машины (ЭЦМ) и т.д., то третий признак связан в основном с теми задачами, для которых строится данная модель.

Описываемая ниже модель была создана для решения следующих задач анализа:

1. Анализ схемы на функциональную устойчивость (т.е. на отсутствие опасных состязаний - ОС [2]);
2. Расчленение схемы на элементарные операции [3];
3. Обработка схемы для применения методики построения полного логического теста;
4. Получение контролирующих комбинаций для диагностирующих ИП [6];
5. Определение тяжелых режимов [5].

Основное внимание при составлении комплекса программ было уделено задачам 1, 3, 4. Задачи 2, 5 решаются путем добавления отдельных подпрограмм в общий комплекс программ.

Известно [7], что моделирование автомата может быть произведено путем интерпретации или компиляции.

В данной системе принят интерпретирующий способ. К разработке общей системы программ были предъявлены следующие основные требования:

1. Описание схемы должно быть по возможности простым.
2. Число операций при записи информации о схеме для переноса на один из носителей (для ввода в ЭЦМ) должно быть минимальным.
3. Набор типовых ФЭ должен быть достаточно широким.

4. При наличии в схеме ОС должна выдаваться информация о входных сигналах, вызывающих ОС в данном такте моделирования.

5. По окончании процесса моделирования необходимо выдать диаграммы работы каждого элемента схемы.

6. "Емкость" (число элементов) схемы должна быть достаточно большой с тем, чтобы обеспечить моделирование практически используемых схем.

Построенная модель на уровне функциональных элементов обладает следующими характеристиками:

1. Кодирование схемы производится довольно простым способом, в большинстве случаев совпадающим с реально принятой нумерацией элементов в автомате (например, в схемах ЭЦМ). Кодирование схемы из ФЭ производится при вводе в ЭЦМ для моделирования только один раз. Закодированная схема записывается на магнитную ленту (МЛ).

2. Допускается наличие до 63 типов ФЭ. Представлены следующие типы ФЭ:

а) инвертор (И), б) усилитель (У), в) схема совпадения (СП), г) собирательная схема (СБ), д) триггер (допускается 4 модификации), е) линия задержки, ж) одновибратор, з) формирователь (12 типов).

3. Возможно одновременное представление в схеме:

а) 256 триггеров, б) 256 формирователей, в) 256 линий задержек и одновибраторов. Число ФЭ типа И, У, СП, СБ неограничено. Общее число элементов в схеме не должно превышать 4096.

4. Каждый такт моделирования, т.е. для всех входных слов  $Q_i$  ( $i = 0, 1, 2, \dots$ ) сопровождается выдачей выходных слов  $Q_k$  ( $k = 0, 1, 2, \dots$ ). Слова  $Q_i$  и  $Q_k$  называются пространственными входными и выходными словами.

Слова типа  $P_j$  ( $j = 0, 1, 2, \dots$ ) — временные слова каждого из входов схемы.

По окончании процесса моделирования могут быть выданы диаграммы работы каждого ФЭ схемы.

Комплекс программ выполнен в коде ЭЦМ "Урал-4".

## 2. Краткое описание ФЭ. Кодирование схемы из ФЭ

Ранее было показано кодирование реального физического сигнала буквами в некотором алфавите А:

$$A = \{a, b, c, d, e, f, g\}.$$

При реализации в машине для букв А принята следующая кодировка:

a = 000, b = 001, c = 011, d = 010, e = 101,  
f = 111, g = 110

Для моделируемого набора ФЭ было принято, что любой вид состязаний является опасным и обозначается комбинацией 100.

Таблицы 1 и 2 описывают функционирование элементов СП, СБ.

Таблица 1

	000	001	011	010	101	111	110	100
000	000	000	000	000	000	000	000	000
001	000	001	001	100	101	101	100	100
011	000	001	011	010	101	111	110	100
010	000	100	010	010	100	110	010	100
101	000	101	101	100	101	101	100	100
111	000	101	111	010	101	111	110	100
110	000	100	110	010	100	110	110	100
100	000	100	100	100	100	100	100	100

Таблица 2

	000	001	011	010	101	111	110	100
000	000	001	011	010	101	111	110	100
001	001	001	011	100	101	111	100	101
011	011	011	011	011	011	011	011	011
010	010	100	011	010	100	111	110	100
101	101	101	011	100	101	111	100	101
111	111	111	011	111	111	111	111	111
110	110	100	011	110	100	111	110	100
100	100	101	011	100	101	111	100	100

Количество входов СП, СБ должно удовлетворять соотношению:

$$2 \leq n_{\text{вх}} \leq 254.$$

Входы СП и СБ записываются в любом порядке.

Для И, У, СП, СБ количество выходных связей (разветвление выходного сигнала) должно удовлетворять соотношению

$$1 \leq n_{\text{вых}} \leq 127.$$

## Т р и г г е р

В модели представлена схема так называемого обобщенного триггера. Данный триггер имеет следующие входы-выходы:

1. Приоритетный вход. При наличии на данном входе комбинаций 011 или 111 выходной сигнал триггера определяется согласно табл. 3. Во всех остальных случаях выходной сигнал триггера определяется сигналом (он присваивается по инверсному выходу) на приоритетном входе.

Таблица 3

Y <sup>"1"</sup>	Y <sup>"0"</sup>	Cч	T <sub>t</sub>	T <sub>t/t+1</sub>	T <sub>t+1</sub>	A <sub>t+1</sub>
000	000	000	000	000	000	000
000	000	000	011	011	011	011
010	000	000	000	001	011	011
010	000	000	011	011	011	011
000	010	000	000	000	000	000
000	010	000	011	010	000	000
000	000	010	000	001	011	011
000	000	010	011	010	000	000

2. Установка триггера в "1" (Y<sup>"1"</sup>).

3. Установка триггера в "0" (Y<sup>"0"</sup>).

4. Счетный вход (Cч).

5. Прямой выход - A : = T.

6. Инверсный выход - B : = T, где A - выходной сигнал, а T - внутреннее состояние.

Если какой-либо вход триггера не используется, то при кодировке на данном входе записывается "0".

Легко видеть, что с помощью соответствующей записи можно получить практически все используемые модификации триггера (триггер с раздельными входами, со счетным выходом и т.д.).

На условия функционирования триггера наложено ограничение, выраженное следующим условием: значения сигналов e и d не могут одновременно присутствовать более чем на одном из входов триггера. Сигналы e и d являются возбуждающими.

Запись входных сигналов триггера производится в той же последовательности, как они перечислены выше. Количество выходных связей для A и B должно удовлетворять соотношению:

$$n_A \leq 127, \quad n_B \leq 127.$$

## Формирователь

Различают два типа формирователей:

1. Формирователи, с помощью которых производится улучшение (восстановление) формы входного сигнала.

Будем считать, что описание (логическое) формирователей I-го типа совпадает с описанием либо усилителя, либо инвертора.

2. Формирователи, с помощью которых выделяется одна из частей сигнала  $\Delta$ . При этом, на выходе выдается сигнал типа  $\Delta$ ,  $\Delta^+$  или  $\Delta^-$ . Каждый из сигналов  $\Delta$ ,  $\Delta^+$  или  $\Delta^-$  является последовательностью букв из алфавита А. Эти сигналы в кодированном виде представляются:

$\Delta^+ = 000, 001, 011, 010$ ;  $\Delta^- = 000, 101, 111, 110$ ;

$\Delta = 000, 001, 011, 010, 101, 111, 110$ ;  $\nabla = 000, 011, 111$ .

С учетом этих обозначений функционирование формирователя представлено табл. 4 (х - вход формирователя, у - его выход).

Таблица 4

Тип формирователя	х	у
Ф1	001	$\Delta^+$
Ф2	001	$\Delta$
Ф3	001	$\Delta^-$
Ф4	010	$\Delta$
Ф5	010	$\Delta^+$
Ф6	010	$\Delta^-$
Ф7	101	$\Delta$
Ф8	101	$\Delta^+$
Ф9	101	$\Delta^-$
Ф10	110	$\Delta$
Ф11	110	$\Delta^+$
Ф12	110	$\Delta^-$

### Инвертор, усилитель

В модели оба типа Ф9 имеют парафазные выходы. Поэтому инвертор (усилитель) может быть описан двояко: либо как уси-

литель (инвертор) с инверсным выходом, либо как инвертор (усилитель) с выходом прямого кода.

Функционирование усилителя и инвертора представлено в таблицах 5 и 6.

Таблица 5

000	001	011	010	101	111	110	100
011	010	000	001	110	000	101	100

Таблица 6

000	001	011	010	101	111	110	100
000	001	011	010	101	111	110	100

### Линия задержки (ЛЗ)

Известно [8], что функционирование линии задержки может быть описано следующим соотношением:

$$y(t) = x(t - \tau'),$$

где  $y(t)$  - выходной сигнал ЛЗ в момент  $t$ ,

$\tau'$  - величина задержки,

$x(t - \tau')$  - входные сигналы в момент  $t - \tau'$ .

Рассмотрим работу ЛЗ в следующих интервалах:

1.  $t < \tau'$ ,      2.  $t = \tau'$ ,      3.  $t > \tau'$ .

При  $t < \tau'$  во все моменты интервала  $t < \tau'$  выходной сигнал ЛЗ есть одно из значений 000, 011, 111. Поступающие на вход сигналы ( $\Delta$ ,  $\Delta^+$ ,  $\Delta^-$ ) "запоминаются" ЛЗ. При  $t = \tau'$  начиная с данного момента  $t$  выходной сигнал  $y(t)$  повторяет сигнал (сигналы)  $x(t - \tau')$ . Одновременно, производится "запоминание" входных сигналов, поступивших на вход ЛЗ. При  $t > \tau'$  производится выдача выходного сигнала  $y(t) = x(t - \tau')$ . Поступившие входные сигналы  $x(t)$  запоминаются.

При логическом (функциональном) моделировании величина  $\tau'$  может быть задана или некоторым соотношением [6], устанавливающим логическую связь между входными, выходными сигналами линии задержки и другими переменными схемы или числом интервалов времени, на которые происходит задержка.

В обоих случаях отсутствует значение некоторого параметра, с помощью которого можно было бы определить значение "емкости" ЛЗ, то есть количества запоминаемых одновременно сигналов (без их искажения). Как правило, этот вопрос решается при практической реализации схемы, то есть при реализации схемы на базе выбранного комплекса стандартных элементов.

Для работы каждой ЛЗ в модели отводится некоторое количество ячеек, называемых рабочим полем ЛЗ. Структура рабочего поля ЛЗ представлена в табл. 7. Приняты следующие обозначения:

- Н - номер (код) линии задержки,
- счетчик 1 - текущий номер элемента (часть сигнала) для выдачи на выход ЛЗ,
- счетчик 2 - текущий номер элемента для записи в рабочее поле ЛЗ,
- счетчик 3 - счетчик текущего времени ЛЗ (в момент  $t < \tau'$ ).

Рабочее поле ЛЗ разбивается на отдельные элементы. Каждый элемент, состоящий из трех двоичных разрядов, предназначен для хранения одной из частей сигнала. Все элементы перенумерованы. Всего для каждой ЛЗ отводится рабочее поле из 832 элементов. Следовательно, одновременно возможно хранение 104 сигналов  $\Delta$ , или 208 сигналов  $\Delta^+$  ( $\Delta^-$ ). При переполнении рабочего поля ЛЗ происходит останов.

### Одновибратор (ОД)

В [8] было описано функционирование одновибратора. Реализация данного ФЭ в модели сводится к следующему:

1. Начиная с момента  $t = t_{\text{возб}}$  для каждого одновибратора отдельным счетчиком (Сч I) отсчитывается некоторый интервал, равный длительности выходного сигнала. С выхода ОД снимается установившееся значение сигнала.

2. В исходный момент  $t = t_{\text{ост}}$  возбуждение ОД заканчивается. Этот факт фиксируется с помощью счетчика Сч I. Одновибратор переводится в другое ("0") установившееся состояние. С выхода ОД снимается сигнал перехода. Содержимое Сч I (длительность возбуждения ОД) восстанавливается.

Выше были описаны ФЭ некоторого комплекса. Используя данную методику описания функционирования ФЭ можно представить в данном комплексе некоторые другие элементы.



**Т а б л и ц а 7**

0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32 33 34

28517

[illegible]

## Кодирование схемы из ФЭ

Для описания схемы, то есть для описания соединения элементов между собой используется некоторая формальная процедура. Элементами этой процедуры являются:

1. Формальная запись ФЭ и их соединений.
2. Формальная запись сведений о всей схеме в целом.

Запись информации об элементе естественным образом распадается на:

1. Информацию о данном элементе.
2. Информацию о его связях (входных, выходных).

Информация о данном элементе состоит из указания номера ФЭ в схеме и его типа (И, У, СП, СБ и т.д.). Нумерация ФЭ схемы, используемая в модели, носит иерархический характер. Номер ФЭ составной и разбивается на следующие части:

- номер устройства,
- номер блока,
- номер ФЭ в блоке.

Для кодирования номера ФЭ отводится шесть десятичных разрядов, один разряд для кодирования номера устройства, два - номера блока и три - номера элемента в блоке.

Для большинства схем по-видимому такая иерархия оправдана. Поэтому, при записи ФЭ отсутствует надобность в ручной перекодировке схемы.

В случае, если для какой-либо схемы такое представление номера неудобно, можно использовать новое представление (при тех же шести десятичных разрядах), введя дополнительную информацию в комплексе программы о принятой иерархии.

Кодирование информации о некоторой связи данного ФЭ заключается в следующем:

1. Указывается номер ФЭ, с которым соединена связь данного ФЭ.

2. Указывается тип связи.

Различается всего 6 типов связей:

1. Входная связь в схему.
2. Выходная связь из схемы.
3. Входная связь  $i$ -го ФЭ ( $i = 1, 2, \dots, n$ , где  $n$  - число ФЭ) не являющаяся входной для схемы.
4. Выходная связь  $i$ -го ФЭ, не являющаяся выходной для схемы.

5-6. Инверсная связь (типа 2, 4).

Для всех типов связей разрешается разветвление. При этом для связей типа "выход" количество выходных связей должно удовлетворять соотношению  $n_{\text{вых.}} \leq 127$ .

Для связей типа "вход" (тип I) количество входных связей должно удовлетворять соотношению  $n_{\text{вх.}} \leq 63$ .

Информация о входах и выходах схемы сводится к заданию следующих величин:

1. Общего числа ФЭ схемы.
2. Числа входных связей (тип I) в схему.
3. Числа запоминающих элементов (триггеров, ЛЗ, ОД).
4. Числа выходных из схемы связей (связи типа 2).

Число запоминающих элементов и число выходных связей могут не задаваться перед вводом схемы в машину, так как они подсчитываются автоматически в процессе работы программы комплекса.

Закодированный ФЭ перфорируется на бумажной ленте. Начало и конец каждого ФЭ отмечаются специальными метками (комбинациями).

## Некоторые алгоритмы моделирования Основные принципы организации комплекса программ

### I. Некоторые алгоритмы моделирования

Основными алгоритмами, практически используемыми в любой модели на ЭЦМ, являются:

- а) Алгоритм поиска требуемого ФЭ схемы.
- б) Алгоритм вычисления выходного сигнала ФЭ по значению входных (для ФЭ - для внутреннего состояния) сигналов.
- в) Алгоритмы:
  - организации процесса счета схемы;
  - выдачи некоторых промежуточных результатов при моделировании (значение выходных сигналов схемы на каждом такте моделирования, значение входных сигналов на данном ФЭ при ОС и т.д.),
  - выдачи окончательных результатов моделирования.

Рассмотрим подробнее некоторые алгоритмы.

#### Алгоритм поиска требуемого ФЭ схемы.

При вводе в машину ФЭ схемы автоматически составляется первая таблица соответствия ( $ТС_I$ ). В каждой из строк этой таблицы записываются принятый при кодировании схемы номер

элемента (десятичный) и присвоенный ему в машине двоичный номер. Далее  $TC_I$  используется при вводе информации в машину для уплотнения записи путем замены десятичных кодов на двоичные и при выдаче, когда выдаются десятичные номера.

Для записи каждой строки  $TC_I$  отводится две неполные (двадцатиразрядные ячейки). Распределение разрядов обеих ячеек представлено на рис. 2.

0	I	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
a <sub>1</sub>				a <sub>2</sub>				a <sub>3</sub>				a <sub>4</sub>				a <sub>5</sub>			
a <sub>6</sub>				Σ <sub>7</sub>			a <sub>8</sub>												

Рис. 2.

Здесь:

$\{a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6\}$  — номер (десятичный) ФЭ схемы,  
 $a_8$  — номер ФЭ в модели (двоичный),  
 $\Sigma_7 = [a_1 + a_2 + a_3 + a_4 + a_5 + a_6 + a_8]_{\text{mod } 8}$  — контрольный остаток.

Контрольный остаток предназначен для целей контроля работы программы (передача, хранение информации).

Таким же образом составлена таблица  $TC_2$ , в каждой строке которой записаны два числа:

$A_1$  — адрес расположения 1-го ФЭ в накопителе на магнитном барабане (НМБ) и

$a_1$  — конечный адрес ввода в ОЗУ 1-го ФЭ.

Распределение разрядов в ячейках (строке  $TC_2$ ) приведено на рис. 3.

0	I	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
$A_1$																			
						$\Sigma$				$a_1$									

Рис. 3.

$\Sigma = [A_1 + a_1]$  — контрольный остаток.

Время считывания одного ФЭ определяется соотношением

$$T_{\text{сч}} = 2t_{\text{нбм}} + t',$$

где  $t_{\text{нбм}}$  — время обращения и считывания из НБМ;

$t'$  — время на определение адреса для считывания.

## Вычисление выходного сигнала ФЭ

Для элементов И, У, СП, СБ выходной сигнал определяется по схеме, представленной на рис. 4. Приняты следующие обозначения:

- j - текущий номер входного сигнала ФЭ,
- n - конечный номер входного сигнала ФЭ,
- k - количество ФЭ, у которых вычислен выходной сигнал.

Программа с блок-схемой, представленной на рис. 4, работает когда эта схема применима для элементов СП, СБ, И, У.

Для элементов Тг, Од, Ф, ЛЗ выходной сигнал определяется по схемам, которые несколько отличаются от схемы рис. 4 наличием других блоков между блоками I-6. Для примера на рис. 5 представлена схема вычисления выходного сигнала формирователя (любого режима). Приняты следующие обозначения:

- k - текущее значение числа частот сигнала, выданных в схему,
- m - число частот сигнала  $\Delta$  ( $\Delta^+$  или  $\Delta^-$ ).

Выходные сигналы схемы вычисляются по следующему алгоритму.

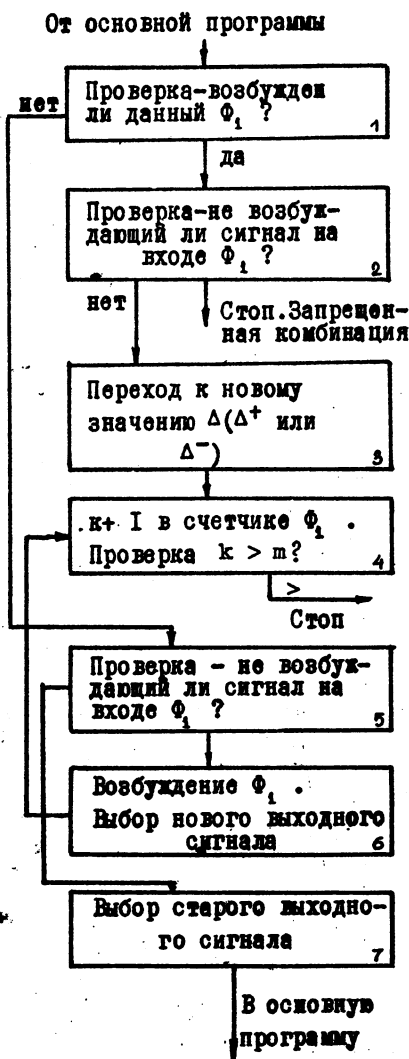
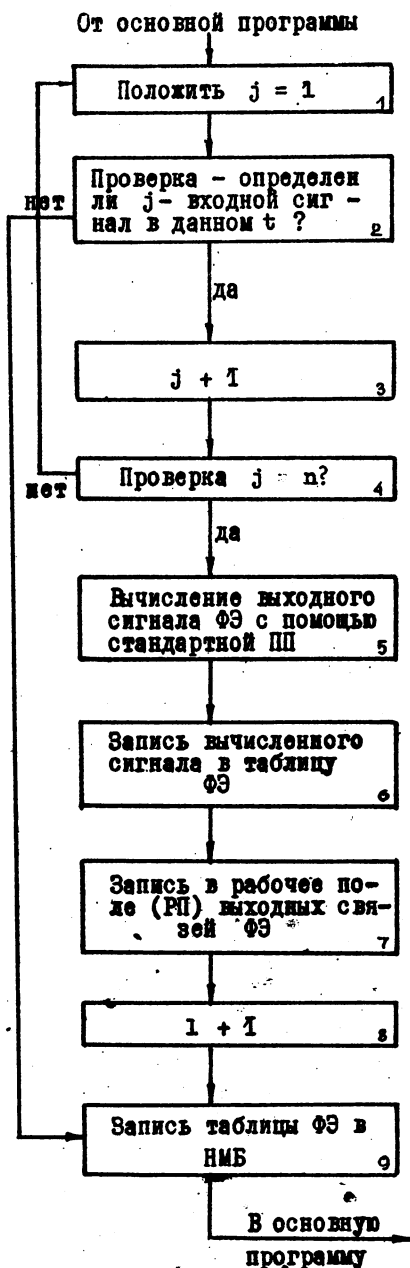
## Алгоритм счета схем

1. Положить  $i = 1$ , где  $i$  - текущий номер входного сигнала. Перейти к п. 2.

2. Значение  $i$ -го входного сигнала подставить во все зависящие от него таблицы элементов схемы. При этом имеет место одна из следующих возможностей:

а) при вычислении встречается элемент, отмеченный знаком "α".

В этом случае подставить ранее вычисленные значения других сигналов (аргументов) и по таблице функционирования определить значение выходного сигнала элемента. Получившееся значение выходного сигнала использовать для вычисления выходных сигналов следующих элементов. Перейти к п. 4.



б) при вычислении встречается элемент, выходной сигнал которого после подстановки значения данного входного сигнала не может быть вычислен (не вычислены значения других входных сигналов для данного элемента). Данный элемент отметить знаком "  $\alpha$  " и перейти к п. 4.

в) при вычислении встречается ЗЭ. В этом случае значение внутреннего состояния ЗЭ не вычислять, а указать лишь значение сигнала, действующего на данном входе (значение входных сигналов для ЗЭ запомнить). Перейти к п. 4.

г) при вычислении встречается элемент с дифференцированием (формирователь). Отметить данный элемент знаком  $\nabla$ . Определить значение выходного сигнала данного элемента (одно из значений  $\Delta$ ). Получившееся значение выходного сигнала использовать для вычисления следующих выходных сигналов. Перейти к п. 4.

д) при вычислении встречается ЛЗ. Произвести проверку  $t_{\text{тек}} = t'$ . Если да, то определить значение выходного сигнала ЛЗ и использовать его для вычисления выходных сигналов следующих элементов. В противном случае перейти к п. 4.

е) при вычислении встречается комбинация сигналов (аргументов), результат взаимодействия которых отмечен в таблице функционирования знаком "100". Перейти к п. 3.

ж) при вычислении встречается выходной элемент из схемы. Произвести проверку - все ли выходные сигналы из схемы вычислены. Если да, то переход к п. 10. В противном случае - переход к п. 4.

3. Отметить знаком "  $\beta$  " данную комбинацию сигналов. Выдать данную комбинацию сигналов. Выдать значения выходных и промежуточных сигналов схемы. Останов.

4. Произвести проверку - во все ли элементы, зависящие от  $i$ -го входного сигнала подставлены его значения. Если да, то перейти к п. 5. В противном случае перейти к п. 2.

5. Увеличить  $i$  на единицу. Если  $i = n$ , то перейти к п. 6. В противном случае перейти к п. 2.

6. Произвести проверку - имеются ли в схеме элементы, обозначенные знаком  $\nabla$ . Если да, то перейти к п. 7. В противном случае перейти к п. 9.

7. Произвести проверку - все ли значения сигналов элементов, обозначенных знаком  $\nabla$ , поданы в схему (значения  $\Delta^+$  или  $\Delta^-$ ). Если да, то перейти к п. 9. В противном случае перейти к п. 8.

8. Взять следующее значение выходного сигнала элемента, обозначенного знаком  $\nabla$ . Использовать его для вычисления следующих выходных сигналов (учитывая при этом условия 2а, б, в, г, д, е, ж). Перейти к п. 7.

9. Произвести проверку — все ли выходные сигналы схемы вычислены. Если да, то перейти к п. 10. В противном случае перейти к п. 11.

10. Произвести проверку — все ли исходные значения входных сигналов поданы в схему. Если да, то выдать значения выходных сигналов. Останов. В противном случае — выдать значения выходных сигналов для данного мгновенного режима и изменить значение входных сигналов. Перейти к п. 1.

11. Вычислить значения выходных сигналов всех элементов, зависящих от выходных сигналов ЗЭ схемы и от входных сигналов схемы. Каждый раз при подаче в схему выходных сигналов ЗЭ производится проверка — сигналы не последнего ли ЗЭ поданы в схему. Если нет, то выдать сигналы следующего ЗЭ. В противном случае перейти к п. 12.

12. Произвести проверку — все ли выходные сигналы схемы вычислены. Если да, то переход к п. 13. В противном случае перейти к п. 16.

13. Разрешить всем ЗЭ переработать входную информацию (входная информация на ЗЭ). Среди всех ЗЭ, перерабатывающих входную информацию, отмечать знаком "v" те, которые изменяют свое внутреннее состояние. Производить проверку — не было ли у данного ЗЭ знака "v" в данном мгновенном режиме. Если был, то останов. В противном случае переход к п. 14.

14. Произвести проверку — есть ли среди всех ЗЭ такие, которые изменяют свое внутреннее состояние. Если да, то перейти к п. 15. В противном случае перейти к п. 10.

15. Определить новое внутреннее состояние ЗЭ. При этом необходимо помнить, что в течение действия сигнала, от которого ЗЭ изменяет свое состояние, с его выходов в схему выдаются два разнополярных сигнала, соответствующие переходному процессу в ЗЭ, т.е. сигналы 001 и 010. Вычисление вести до ЗЭ. Перейти к п. 16.

16. Взять один из неподсчитанных и не отмеченных знаком  $\theta$  выходных сигналов схемы. Определить неподсчитанный сигнал (аргумент), из-за которого не может быть вычислен данный выходной сигнал и положить его значение, равным 000. Отметить данный сигнал знаком  $\eta$ . Перейти к п. 17.



17. Подсчитать данный выходной сигнал и все связанные с ним. Произвести проверку — все ли выходные сигналы схемы вычислены. Если да, то переход к п. 18. В противном случае — восстановить прежнее значение выбранного сигнала (аргумента). Отметить данный выходной сигнал знаком  $\Theta$ . Перейти к п. 20.

18. Произвести проверку — совпадает ли вычисленное значение выбранного сигнала (аргумента), отмеченного знаком  $\Pi$ , и его предположенное значение. Если да, то перейти к п. 13. В противном случае — перейти к п. 19.

19. Произвести проверку — все ли значения сигнала использованы. Если нет, то в выбранном сигнале (аргументе) использовать следующее значение сигнала. Перейти к п. 17. Если да, то перейти к п. 20.

20. Произвести проверку — все ли из неподсчитанных выходных сигналов отмечены знаком  $\Theta$ . Если нет, то перейти к п. 16. В противном случае переход к п. 21.

21. Взять одну из  $C_m^1$  комбинаций оставшихся сигналов (аргументов) тех выходных сигналов, которые отмечены знаком  $\Theta$ . Отметить ее знаком  $\Phi$ . Взять неподсчитанные сигналы (аргументы) и положить их равными 000. Перейти к п. 18.

22. Подсчитать данные выходные сигналы и все связанные с ними. Произвести проверку — все ли выходные сигналы схемы вычислены. Если да, то переход к п. 24. В противном случае — перейти к п. 23.

23. Восстановить прежнее значение данной комбинации аргументов. Отметить данную комбинацию знаком  $\Phi$ . Перейти к п. 25.

24. Произвести проверку — совпадают ли вычисленные значения комбинации аргументов, отмеченных знаком  $\Phi$  и их предположенные значения. Если да, то перейти к п. 13. В противном случае — перейти к п. 25.

25. Произвести проверку — все ли значения  $\Delta$  использованы при выбранной комбинации аргументов для вычисления. Если да, то переход к п. 26. В противном случае взять следующую комбинацию значений сигналов и перейти к п. 22.

26. Произвести проверку — все ли комбинации  $C_m^1$  перебраны (где  $1 = 1, 2, 3, 4, \dots, a$  — число аргументов, отмеченных знаком  $\Theta$ ). Если да, то останов. В противном случае перейти к п. 21.

Все вспомогательные алгоритмы условно можно разделить на:

1. Алгоритмы ввода начальных (исходных) данных.
2. Алгоритмы перехода от  $t$  к  $t+1$ .
3. Алгоритмы вывода конечной (промежуточной) информации.

Алгоритмы ввода в свою очередь обеспечивают:

- а) ввод и кодирование схемы;
- б) ввод последовательностей (слова типа  $Q_j$ ) входных в

схему сигналов.

Об алгоритмах кодирования было сказано выше. С помощью алгоритмов п. "б" для каждого входного в схему сигнала составляется таблица 8.

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
$y_2$					$\Delta_0$										$N$					
$y_2$		$\Delta_1$			$\Delta_2$										$m$					
$y_3$		$\Delta_3$			$\Delta_4$										$y_1$					
$y_3$		$\Delta_5$			$\Delta_6$										$n_0$					
$y_3$		$\Delta_7$			$\Delta_{10}$										$n_1$					
$y_3$		$\Delta_{176}$			$\Delta_{177}$										$n_{77}$					

Принять следующие обозначения:

$N$  - номер (восьмеричный) входного в схему сигнала,

$m$  - число разветвлений входного сигнала,

$y_1$  - указатель-интерпретация входного сигнала (генератор, таблица, уравнение),

$y_2$  - указатель  $y_2 = \begin{cases} 0 & \text{если значение входного сигнала} \\ & \text{поставлено не по всем связям;} \\ 1 & \text{если значение входного сигнала} \\ & \text{поставлено по всем связям;} \end{cases}$

$y_3$  - указатель  $y_3 = \begin{cases} 0 & \text{если значение входного сигнала} \\ & \text{по данной связи не поставлено;} \\ 1 & \text{если значение входного сигнала} \\ & \text{поставлено по данной связи.} \end{cases}$

$\Delta_0$  - текущее значение входного сигнала, подаваемого в схему в рассматриваемый момент времени,

$\Delta_1 - \Delta_{177}$  - значения входного сигнала в моменты  $t_1 - t_{177}$

$n_0 - n_{77}$  - адреса (восьмеричные) ФЭ, с которыми связан данный входной сигнал.

Значения входного сигнала  $> t_{177}$  записываются в отдельную зону (для каждого входного сигнала) МЛ. В момент  $t = t_{177}$  происходит новое формирование таблицы входного сигнала.

С помощью алгоритмов перехода от момента  $t$  к  $t+1$  производится циклическое выполнение (в пределах  $t_0 - t_{177}$ ) всех программ комплекса. При переходе производится следующее:

1.  $t := t + 1$  Текущее значение  $t$  фиксируется в отдельной ячейке.

2. Корректирование таблиц триггеров, ЛЗ, входных в схему сигналов. В таблицах "стираются" некоторые признаки, с помощью которых отмечается текущий момент.

3. При  $t > t_{177}$  таблицы входных сигналов формируются заново. Значения входных в схему сигналов выбираются из НМЛ.

При моделировании схемы производится выдача некоторой информации, характеризующей:

1. Процесс функционирования схемы. Выдаются значения всех выходных из схемы сигналов в каждый момент  $t$ . В случае, если у какого-либо элемента обнаруживается состязание, то производится останов с выдачей информации о сигналах, для которых обнаружено состязание.

2. Функционирование всех ФЭ схемы в моменты  $t_0 - t_n$ , где  $n = 1, 2, \dots, k$ ,  $k$  - число тактов моделирования.

Таблица выдается в виде матрицы  $M = |n \times k|$ , где  $n$  - число ФЭ схемы.

Все программы реализующие вспомогательные алгоритмы, находятся в НМЛ и вызываются в ОЗУ по мере необходимости.

## 2. Принципы организации комплекса программы

Весь комплекс программы моделирования состоит из:

1. Программы перекодирования (программа № 1). С помощью данной программы элементы схемы, записанные с помощью правил ручной кодировки, кодируются некоторым специальным образом. В таком виде элементы схемы используются всеми остальными программами. Одновременно с кодированием составляются рабочие таблицы (например  $TC_2$ ).

2. Программа занесения исходных данных и составления слов  $P_i$  и  $Q_i$  (программа № 2). С помощью данной программы:

- а) запоминающие элементы типа триггер устанавливаются в начальное состояние,

- б) таблицы запоминающих элементов типа ЛЗ, ОД заносятся величины задержки,

- в) формируются таблицы входных слов  $P_i$  и  $Q_i$ . Слова ( $1 \leq i \leq 177$ ) записываются в таблицы, расположенные в НМБ. Остальные слова записываются в НМД.

3. Программа моделирования (программа № 3). С помощью данной программы по значениям слов  $P_i$  и  $Q_i$ , начальным значениям триггеров и таблицам функционирования элементов вычисляются значения выходов из схемы сигналов.

4. Обслуживающие подпрограммы. С помощью данных подпрограмм:

- а) производится первоначальный ввод всего комплекса программ в память машины,

- б) производится переход от момента  $t$  к  $t+1$ ,

- в) производится выдача информации в процессе работы модели,

- г) производится выдача информации по окончании работы модели.

Каждая из программ № 1, 2, 3 состоит из отдельных подпрограмм. Отдельные алгоритмы, используемые во многих подпрограммах, выполнены также в виде отдельных подпрограмм.

Такое построение программ комплекса дает значительный эффект в экономии емкости памяти и повышении реального быстродействия.

## В ы в о д ы

Моделирование ряда схем, произведенное с помощью описанного выше комплекса программ, позволяет сделать следующие выводы:

1. Принятая математическая модель сигнала достаточно хорошо согласуется с полученными практическими результатами.

2. Реальное быстродействие модели существенным образом зависит от времени считывания (записи) НМБ, т.к. закодированная схема и все рабочие таблицы находятся в НМБ. Поэтому, моделирование достаточно сложных и больших схем желательно производить на ЭЦМ, имеющих большой объем ОЗУ.

3. Для сокращения времени моделирования необходимо применять ЭЦМ с высоким быстродействием.

### Л и т е р а т у р а

1. А.А. Уткин. О моделировании дискретных автоматов на УЦВМ. Сб. "Вычислительные системы", № 25, Новосибирск, 1966.
2. В.Н. Рогинский. Переходные процессы в релейных устройствах (дискретных автоматах). Сети передачи информации и их автоматизация. Наука, 1965.
3. Н.А. Криницкий, Г.А. Миронов, Г.Д. Фролов. Описание системы команд ЭЦМ с помощью элементарных машинных операций. Сб. "ЦВТ и программирование" № 4, 1968, "Советское радио".
4. Г. А. Миронов. Испытательные программы для контроля ЭЦВМ. М. Наука, 1964.
5. П. Кейс, Г. Графф и др. Автоматизация проектирования вычислительных систем с использованием логических схем на твердом теле. Кибернетический сборник № 1, 1965.
6. В.Н. Рогинский. Преобразование временных параметров сигналов в дискретных асинхронных автоматах. Проблемы передачи информации, том II, вып. I, Наука, 1966.