

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПОНЯТИЯ "ЭЛЕМЕНТАРНАЯ МАШИННАЯ ОПЕРАЦИЯ" ДЛЯ АНАЛИЗА ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

*Н.А. Криницкий, Г.А. Миронов, Г.Д. Фролов*  
(Москва)

Для любой электронной цифровой машины следует различать систему операций и систему команд.

Система операций задается для данной машины при её разработке и представляет собой перечень всех различных элементарных машинных операций.

Под элементарной машинной операцией будем понимать [4] операцию, которая

- реализована аппаратно,
- имеет исходные данные в ячейках, содержимое которых является результатом выполнения элементарных операций,
- имеет результат, фиксируемый в одной отдельной ячейке, причем в упомянутой системе операций существует хотя бы одна, для которой применение этого результата в качестве исходного данного зависит от усмотрения программиста,
- не может быть расчленена на более простые операции, удовлетворяющие трем предыдущим условиям (т.е. не может быть представлена в виде их комплекса).

Элементарными машинными операциями являются также операции ввода в ячейку и выдачи содержимого ячейки.

Из элементарных операций (опять-таки при разработке машины) составляются комплексы, каждый из которых соответствует определенному классу команд и выполняется всегда в своей совокупности.

При этом команда:

- слово, состоящее из букв машинного алфавита, соответствующее определенному комплексу элементарных операций, содержащее информацию о ячейках, содержащих данные для указанных элементарных операций и о её результате и служащее в машине управляющим сигналом выполнения упомянутого комплекса.

В ряде случаев удобно использовать термин "операция машины", понимая под ним комплекс элементарных операций машины, выполняемых под воздействием одной команды. Каждой операции машины условно присваивается название одной из входящих в ее состав элементарных операций.

### Элементарные операции

При выявлении элементарных машинных операций, составляющих их системы, важно учитывать доступность при программировании, анализируя возможность использования при программировании содержимого выходной ячейки каждой из элементарных операций.

Как следует из определения элементарной операции, имеют место два случая:

1) Содержимое выходной ячейки используется элементарными операциями, входящими в машинную операцию, выполняемую по другой команде.

2) Содержимое выходных ячеек используется элементарными операциями, входящими в машинную операцию, выполняемую по той же команде.

Рассмотрим, вначале, элементарные операции, удовлетворяющие первому случаю.

К таким операциям в существующих машинах относятся все элементарные операции, заканчивающиеся записью в ячейки ОЗУ.

В трехадресных машинах примером могут служить элементарные арифметические, поразрядные и другие операции, выполняемые в арифметическом устройстве. Эти операции начинаются с выборки операндов из ОЗУ и кончаются записью в ОЗУ. Такие элементарные операции могут быть описаны формулой:

$$c = a \otimes b.$$

(1)

Здесь:  $\otimes$  - обозначение конкретной операции.

$a, b$  - номера входных ячеек,

$c$  - номер выходной ячейки.

Номера входных и выходных ячеек-суть содержимое адресной части регистра команд, образованное перед исполнением операции вида (I).

Приведенные операции не поддаются расчленению на более мелкие операции.

Трехадресные машины имеют также зачастую и другие одностепенные и двухстепенные элементарные операции, кончающиеся записью в ячейку ОЗУ. Например, в машине М-20 [I] имеется элементарная операция записи в ячейку ОЗУ содержимого регистра R-I и сумматора порядков арифметического устройства. Она называется "Вывод младших разрядов произведения" (это название неточно, так как соответствует действиям, которые по ней производятся, только в том случае, когда операция "Вывод младших разрядов произведения" выполняется вслед за командой, содержащей элементарную операцию "Умножение").

Записью в ячейку заканчиваются также некоторые элементарные операции, выполняющиеся без участия арифметического устройства, только с помощью, например, устройства управления.

К таким элементарным операциям (удовлетворяющим первому случаю) относятся операции, формирующие "команды возврата" или каким-либо другим способом записывающие в ОЗУ содержимое регистров устройства управления. Входные и выходную ячейки легко установить, анализируя данные конкретные операции.

Для одноадресных машин примерами элементарных операций, заканчивающихся записью в ячейку, могут служить элементарные операции: "посылка в ячейку из сумматора"; "посылка в ячейку из регистра АУ"; "посылка в ячейку из регистра переадресации". В ряде случаев код, хранящийся в сумматоре, перед передачей в ОЗУ предварительно подвергается преобразованию. Например, в машине "Урал-2" производится его нормализация и округление.

В двухадресных машинах имеются, например, в "Раздане - 2" [I], элементарные операции, кончающиеся записью в ячейку ОЗУ, не отличающиеся от операций отправки в ячейку для одноадресных машин. Заметим для пояснения, что элементарные операции, выполняющие некоторое арифметическое или другое действие, образуют результат в сумматоре, который в двухадресных машинах доступен для программиста, поэтому машинные операции, осуществляющие некоторое действие, а затем запись в ячейку, представляют собой совокупность двух элементарных операций.

Первому случаю удовлетворяют также обычно все операции, выполняемые в арифметическом устройстве одноадресных машин, результат которых образуется в сумматоре. В двухадресных машинах среди элементарных операций, результат которых образуется в сумматоре, первому случаю удовлетворяют лишь такие, к которым в любых из имеющихся машинных операций не добавляются никакие элементарные операции, использующие содержимое сумматора. Например, среди более чем 60-ти различных элементарных машинных операций машины "Раздан-2", формирующих результат в сумматоре, нет операций, удовлетворяющих первому случаю.

Отдельными элементарными операциями, выполняемыми в арифметических устройствах ЭЦМ, являются также все операции вычисления значений управляющих сигналов.

При этом значения выработанных сигналов выражаются, например, для трехадресных машин зачастую формулами (2)

$$\begin{aligned} \omega &: = f_{\omega} (a; b) \\ \varphi &: = f_{\varphi} (a; b). \end{aligned} \quad (2)$$

Приведенные операции удовлетворяют первому случаю.

Элементарные операции, удовлетворяющие второму случаю использования их результатов, содержатся в машинах, имеющих запоминающие устройства (например, сумматор АУ, регистр команд), обеспечивающие доступность результатов в качестве исходных данных для элементарных операций, входящих в машинные операции, выполняемые по той же команде. Например, в машине "Раздан-2" имеются элементарные операции, выполняемые в арифметическом устройстве, результаты которых используются в других элементарных операциях той же команды.

Примерами таких операций являются:

а) сложение без нормализации и округления содержимого ячеек  $a$  и  $b$ , б) сложение без нормализации и округления содержимого сумматора и ячейки  $a$  и помещение суммы в сумматор, в) сложение с нормализацией и без округления содержимого сумматора и ячейки, номер которой указан в первом адресе ячейки  $a$  и помещение суммы в сумматор, г) сложение с нормализацией и округлением содержимого сумматора и ячейки  $b$  и помещение суммы в сумматор.

Такие же операции, как и обозначенные буквами а); б); в) выполняют в машине "Раздан-2" действия: вычитание, умножение, деление и др.

Результаты перечисленных элементарных операций могут использоваться в той же машинной операции, например, в указанной ранее элементарной операции послыки содержимого сумматора в ячейку ОЗУ, удовлетворяющей первому случаю использования результатов машинных операций.

Ко второму случаю использования результатов элементарных операций (элементарными операциями, входящими в ту же машинную операцию) относятся также элементарные операции, изменяющие выполняемую команду на содержимое некоторого регистра устройства управления (например, на содержимое регистра переадресации). Для этих операций и операции выборки команды из ОЗУ приходится применять понятие "регистра команд".

Однако это не обязательно, так как содержимое регистра команд до переадресации может быть выражено как содержимое ячейки, номер которой указан в счетчике команд, а содержимое регистра команд после переадресации может указываться как некоторая функция, аргументами которой являются содержимое счетчика команд и регистра переадресации. Например, если регистр команд определен как доступная ячейка, то в одноадресной машине типа "Урал-1", "Урал-2" и "Урал-4" определена элементарная машинная операция, выраженная формулами:

$$A := A \begin{array}{|c|c|} \hline \square & \square \\ \hline \end{array} \tau_1 \cdot \delta,$$

$$\tau_1 := \tau_1, \quad \tau_2 := \tau_2, \quad \theta := \theta,$$

где  $A$  - адресная часть регистра команд (содержит 12 рядов),

$\delta$  - регистр переадресации,

$\tau_1$  - признак переадресации,

$\tau_2$  - признак длины ячейки,

$\theta$  - код операции.

Тогда элементарная машинная операция сложения выражается формулой

$$\Sigma := \Sigma + a,$$

где  $\Sigma$  - сумматор,

$a$  - содержание адресной части регистра команд.

Если регистр команд не определен как доступная ячейка,

ка при программировании, то операция сложения имеет вид:

$$\Sigma := \Sigma + (N_A \overset{\boxplus}{12} N_{\tau_1} \cdot 6),$$

где  $N$  - содержимое счетчика команд,

$N_A$  - адресная часть ячейки, номер которой указан в счетчике команд,

$N_{\tau_1}$  - признак переадресации в ячейке, номер которой указан в счетчике команд.

Приведенный пример показывает, что состав системы элементарных машинных операций определяется ячейками, определенными как доступные.

Примем, что регистр команд доступная ячейка. Тогда результат выполнения элементарной операции над содержимым регистра команд, выполняемой при наличии специального признака в коде команды, по которой выполняется данная элементарная операция, используется для других элементарных операций.

В устройстве управления выполняются обычно операции: условного и безусловного переходов, формирования содержимого счетчика команд при отсутствии перехода, формирования содержимого счетчика циклов, формирования содержимого счетчика групповых операций и регистра закона изменения адреса ("Стрела").

Операция формирования содержимого счетчика команд при отсутствии перехода обычно заключается в увеличении содержимого этого счетчика на "1".

Исходные данные для этой элементарной операции задаются с помощью команд в процессе программирования с одной стороны тем, что программист, записывая команду, устанавливает абсолютное или относительное значение счетчика команд, а с другой стороны тем, что при размещении программы в ОЗУ каждая команда помещается в ячейку, выбор команды из которой возможен только путем образования на счетчике команд заданного программистом адреса (см. [2] стр. 9, пункт I.2.5).

Входными ячейками для этой операции являются: счетчик команд и ячейка, хранящая единицу (например, специальная схема, которая выдает импульс, воспринимаемый как единица). Выходной ячейкой является счетчик команд.

Для операции условного перехода входные ячейки в различных машинах различны. В машинах "Стрела", М-20 - ячейка, хранящая сигнал  $\omega$  и регистр команд. В машине БЭСМ-2 - ячейки,

содержание сравниваемые числа или коды; ячейка, показывающая по центральной или местной системе управления командами работает машина, счетчики команд центральной или местной систем управления (ЦУК или МУК). Для машин, имеющих автоматическое изменение команд на регистре команд (М-20; Урал - I, 2, 4 и др.) входными ячейками обычно также являются регистр команд и содержимое ячейки, хранящей значение сигнала  $\omega$ .

Для элементарных операций безусловного перехода ("Урал", М-20, "Стрела") входные ячейки те же, что и в предыдущем случае, исключая ячейку, хранящую значение  $\omega$ .

### Система команд и машинные операции

Система команд представляет собой совокупность машинных слов, таких, что на регистр команд может быть записано только одно слово.

Слова, образующие систему команд, разделяются на группы так, что:

- при записи на регистр команд машины любого из слов, принадлежащих к одной группе, выполняется одна и та же операция машины;
- при записи на регистр команд машины любого из слов, принадлежащих разным группам, выполняются разные машинные операции.

Из совокупности элементарных операций, образующих машинную операцию, обычно выделяется одна элементарная операция (или несколько операций), название которой (которых) присваивается этой машинной операции. Такие элементарные операции будем называть именными. Например:

1) Машинная операция, выполняемая машиной "Урал-I" и содержащая элементарные операции:

- запись на регистр команд содержимого ячейки, номер которой указан в счетчике команд;
- изменение адресной части регистра команд на содержимое регистра переадресации;
- посылка в сумматор из ячейки ОЗУ;
- выработка сигнала  $\omega$ ;
- прибавление единицы к содержимому счетчика команд - условно именуется: "Посылка в сумматор".

2) Машинная операция, выполняемая машиной "Раздан - 2" и содержащая элементарные операции:

- запоминание содержимого сумматора на дополнительном регистре;
- запись на сумматор содержимого ячейки, номер которой указан в счетчике команд;
- формирование первого и второго исполнительных адресов, (Входные ячейки - сумматор и одна из ячеек ОЗУ, используемая в качестве регистра переадресации. Результат в регистре команд);
- запись содержимого дополнительного регистра на сумматор;
- сложение без нормализации и округления содержимого сумматора и ячейки, указанной в первом исполнительном адресе;
- нормализация содержимого сумматора;
- округление содержимого сумматора;
- выработка сигнала  $\omega$ ;
- выработка сигнала  $\Phi$ ;
- условная передача управления к ячейке, номер которой указан во втором исполнительном адресе, условно именуется: "Сложение с нормализацией и округлением содержимого сумматора и ячейки, указанной в первом исполнительном адресе, и условный переход по второму исполнительному адресу", коротко: "Сложение с нормализацией и округлением и условный переход".

Если описание системы команд осуществляется только для целей программирования и программист никогда не обзоревает индикацию пульта управления о состоянии упомянутого дополнительного регистра и сумматора (в процессе обработки команд), то можно "загрубить" описание машинных операций, заменяя группы машинных операций более простыми, например, вместо первых четырех операций можно рассматривать две, им равносильные:

- запись на регистр команд содержимого ячейки, номер которой указан в счетчике команд;
- формирование первого и второго исполнительных адресов по содержимому регистра команд и регистра переадресации (ячейка ОЗУ). Результат в регистре команд.

Слова, образующие каждую из групп, на которые делится система команд, являются совокупностью всех конкретных команд, по которым выполняется одна и та же машинная операция.

Для всех конкретных команд, образующих каждую из групп, имеется общий вид команд, выполняющих данную машинную операцию, содержащий на фиксированных позициях конкретные цифры,



кодирующие данную машинную операцию (код операции), а в других частях - буквы (адреса, признаки переадресации и так далее).

Например, команды машины М-20, выполняющие машинную операцию, условно именуемую "Сложение с округлением и нормализацией", имеют общий вид:

$$\tau_1 \tau_2 \tau_3 01 a b c .$$

В ряде машин объединения групп команд образуют типы команд. Для типа команд также может быть установлен общий вид команды. При этом названием типа команд является название некоторого признака, общего для именуемых элементарных машинных операций объединяемых групп.

Например, в системе команд машины "Раздан-2" ряд групп команд могут быть объединены в тип команд по признаку: "Команды, выполняющие сложение с нормализацией и округлением". Общий вид такого типа команд:

$$r M 01 \tau_a a \tau_b b .$$

Здесь: М - указатель вида модификации операций сложения с нормализацией и округлением. Придавая конкретные значения М, получим общие виды команд для групп, объединяемых в тип команд:

$$r 001 \tau_a a \tau_b b .$$

("Сложение с нормализацией и округлением содержимого ячеек, указанных в первом и втором исполнительных адресах. Результат записывается в сумматор и ячейку, указанную во втором исполнительном адресе")

$$r 101 \tau_a a \tau_b b .$$

("Сложение с нормализацией и округлением содержимого ячеек, указанных в первом и втором исполнительных адресах. Результат записывается в сумматор")

$$r 201 \tau_a a \tau_b b .$$

("Сложение с нормализацией и округлением содержимого ячейки а, сумматора и ячейки б. Запись результата в сумматор и ячейку б").

г 701

τ<sub>a</sub> а τ<sub>b</sub> в.

(“Сложение с нормализацией и округлением содержимого сумматора и ячейки, указанной в первом исполнительном адресе, и условный переход ко второму исполнительному адресу”).

Группы команд (или типы) могут объединяться в классы по более общим признакам, характеризующим именуемые элементарные машинные операции. Обычно выделяют такие классы команд:

- команды, выполняющие арифметические операции,
- команды, выполняющие операции управления,
- команды, выполняющие поразрядные операции,
- команды, выполняющие операции над кодами команд,
- команды, осуществляющие операции обмена между запоминающими устройствами.

Признаком, по которому группы команд объединяются в классы, является, зачастую способ интерпретации содержимого входных ячеек элементарными машинными операциями, входящими в команды каждого из класса.

Например, для класса “Команды, выполняющие арифметические операции” характерно то, что операнды воспринимаются как числа. Заметим, что, например, для машины “Урал-2” класс команд, выполняющих арифметические операции, можно разбить на подклассы - “команды, выполняющие арифметические операции с фиксированной запятой” и “команды, выполняющие арифметические операции с плавающей запятой”.

Признаками, по которым команды объединяются в классы, могут служить форматы команд (деление кода команды на части). Например, в машинах “Урал-2”, “Урал-4” и БЭСМ-2 при записи команд, по которым выполняются машинные операции арифметического устройства, устройства управления применяют “основной” формат; при записи команд, служащих для выполнения обмена между ОЗУ и внешними запоминающими устройствами, применяют другой “вспомогательный” формат.

Следует также особо отметить, что, в свете изложенного, те операции машины, которые выполняются по нескольким командам, не являются машинными операциями. Такие операции представляют собой совокупность машинных операций, а каждая из машинных операций, входящих в ее состав, является самостоятельной. Дейст-

вительно, команду, по которой выполняется любая из этих машинных операций, можно поместить отдельно от других, и машина при ее вызове на регистр команд выполнит все полагающиеся действия.

Обычно перечень элементарных операций, входящих в машинную операцию, постоянен. Исключение представляет машина "Стрела".

В этой машине каждая из элементарных операций, выполняемых в арифметическом устройстве, в зависимости от содержимого специального счетчика и регистров, помещающих признаки, может выполняться многократно в одной машинной операции над содержимым ячеек, адреса которых меняются по заданному закону. Это имеет место, когда выполняются "групповые операции".

#### Анализ вычислительных систем для целей контроля и диагностики неисправностей

Методика получения полных контролирующих и диагностических тестов коротко описана в [3]. Получаемые наборы элементарных тестов могут быть упорядочены с целью их минимизации.

В силу сложности современных дискретных автоматических систем (например, электронных цифровых машин) зачастую составление теста для всей системы требует большого времени и не позволяет получить испытательную программу высокого качества.

Поэтому на практике сложные системы разбивают на блоки, для которых строятся тесты. Формализованные правила разбиения систем на блоки применительно к электронным цифровым машинам (ЭЦМ) можно построить, используя понятие "элементарная машинная операция".

Основным блоком будем называть совокупность элементов машины, которые участвуют в образовании результата некоторой элементарной операции машины.

Таким образом, в электронной цифровой машине число основных блоков равно числу элементарных операций. Очевидно, что один и тот же элемент машины может входить в состав нескольких различных блоков.

Входными сигналами основного блока являются состояния ячеек, в которых размещаются исходные данные для выполнения элементарной операции, а также те сигналы, которые поступают

в блок от элементов, реализующих алгоритм выполнения в устройстве управления ЭЦМ.

Выходными сигналами блока является состояние ячейки, в которой формируется результат элементарной операции.

Необходимо заметить, что кроме основных блоков, реализующих элементарные машинные операции, в ЭЦМ имеются вспомогательные блоки:

1. Объединяющие элементы, реализующие алгоритм выполнения.

2. Объединяющие элементы, реализующие выбор ячейки оперативного запоминающего устройства (зоны, строки на магнитных барабанах и других запоминающих устройствах) по заданному ее номеру, а также обращение (запись или чтение) к этой ячейке (зоне, строке).

Блоки, осуществляющие выбор ячеек (зон, строк) в запоминающих устройствах, отражают то обстоятельство, что каждая из элементарных машинных операций определена над некоторым множеством ячеек (зон, строк) и служат для выбора конкретных представителей этих множеств.

Если при математическом описании элементарных машинных операций не приходится определять действие выбора из множества того или иного его элемента, то в машине для этого используются специальные схемы, состоящие обычно из дешифраторов адресов.

Таким образом, вся элементарная цифровая машина может быть разбита на блоки по формальным правилам.

Однако проведение такого разбиения вручную-весьма трудоемкая операция и может быть выполнена, по-видимому, только для некоторых устройств машины. Процесс разбиения можно автоматизировать. Для этого необходимо иметь технические средства анализа дискретных схем. Вполне пригодна универсальная модель на уровне функциональных элементов, описанная в [5].

Для разбиения электронной цифровой машины на блоки дополнительно к модели строится специальный алгоритм. Исходными данными для него являются:

1) схема конкретной электронной цифровой машины, закодированная и введенная в машину, на которой выполняется модель, с указанием всех элементов, образующих те ячейки запоминающих устройств, относительно которых определены элементарные машинные операции;

2) система элементарных машинных операций для моделируемой электронной цифровой машины;

3) перечень выходных элементов блока, реализующего алгоритм выполнения, с указанием сигналов на выполнение элементарных операций, которые передаются с помощью этих элементов.

Содержание алгоритма разбиения сводится к следующему.

Для ячейки, в которой формируется результат некоторой элементарной операции, находятся все те элементы схемы электронной цифровой машины, выходные сигналы которых являются существенными аргументами, при условии, что из элементов, реализующих алгоритм выполнения, поступают сигналы на выполнение этой операции. Поиск производится вплоть до всех тех элементов, которые принадлежат к входным ячейкам данной элементарной операции (выходным ячейкам других блоков). Такие ячейки образуют "линии разделов" между блоками.

Все найденные элементы образуют блок. Такая процедура производится для всех элементарных машинных операций.

Результатом работы алгоритма являются множества элементов, образующих блоки.

Так как блоки охватывают всю электронную цифровую машину, (учитывая вспомогательные — реализующие алгоритм выполнения и выбор ячеек по номеру), то контроль и диагностика электронной цифровой машины может быть произведена путем контроля и диагностики всех ее блоков последовательно.

В настоящее время строится большое число вычислительных систем, объединяющих в один комплекс несколько электронных цифровых машин одинаковой или разной конструкции.

Для вычислительных систем может быть установлена система элементарных машинных операций. При этом ячейки запоминающих устройств делятся на множества, принадлежащие разным электронным цифровым машинам системы, и элементарные машинные операции устанавливаются по отношению к ячейкам того или иного множества. Контроль и диагностика вычислительной системы могут быть произведены так же, как и для отдельной ЭЦМ, путем контроля и диагностики её блоков.

Применяя методы, изложенные в [3], можно построить полные контролирующие и диагностические тесты для каждого из блоков вычислительной системы. Однако такие тесты могут обладать большой избыточностью за счет того, что многие элементы работают при выполнении различных элементарных операций, а следовательно, будут входить в различные блоки и

многokrатно проверяться системой полных тестов. Избыточность можно исключить, проверяя каждый из элементов только в каком-либо одном из блоков. Тогда тесты для проверки блоков будут неполными, однако для всей системы можно получить полный тест. В результате проверки по таким тестам с вероятностью, равной единице, будут обнаружены те неисправности, для которых обеспечивается автоматическое построение теста по логическим моделям вычислительных систем на уровне функциональных схем.

Использование понятия "элементарная машинная операция" позволяет также поставить задачу о создании программирующей программы, служащей для построения отдельных испытательных программ и их систем [6].

### Л и т е р а т у р а

1. Н.А. Криницкий, Г.А. Миронов, Г.Д. Фролов. Программирование. Наука, 1966 год.
2. А.Л. Брудно. Введение в программирование. Наука, 1965 г.
3. Г.А. Миронов, Д.Э. Федотова. Методика построения полных контролирующих и диагностических тестов. Настоящий сборник.
4. Н.А. Криницкий, Г.А. Миронов, Г.Д. Фролов. Описание систем команд с помощью элементарных машинных операций. В сборнике: "Цифровая вычислительная техника и программирование", № 4, 1968 г.
5. Ю.В. Гайкович, Г.А. Миронов. Универсальная модель на уровне функциональных элементов. Настоящий сборник.
6. Г.А. Миронов, В.П. Битюцкий, Н.А. Комиссаров, В.П. Пинаев. О программирующей программе для построения испытательных программ. Настоящий сборник.