

Решение проблемы условных переходов в конвейере команд

- 1 Основные группы способов для решения проблемы условных переходов
- 2 Буфер предвыборки команд
- 3 Множественные потоки команд
- 4 Задержанный переход
- 5 Предсказание перехода
 - 5.1 Точность предсказания
 - 5.2 Статическое предсказание переходов
 - 5.3 Динамическое предсказание переходов

- **Знать:** четыре способа сокращения издержек, связанных с условными переходами в конвейере команд: буферы предвыборки, множественные потоки, задержанный переход, предсказание перехода.
- **Уметь:.**
- **Помнить:** о сочетании различных способов.
- **Литература:** [1, с. 413-446].

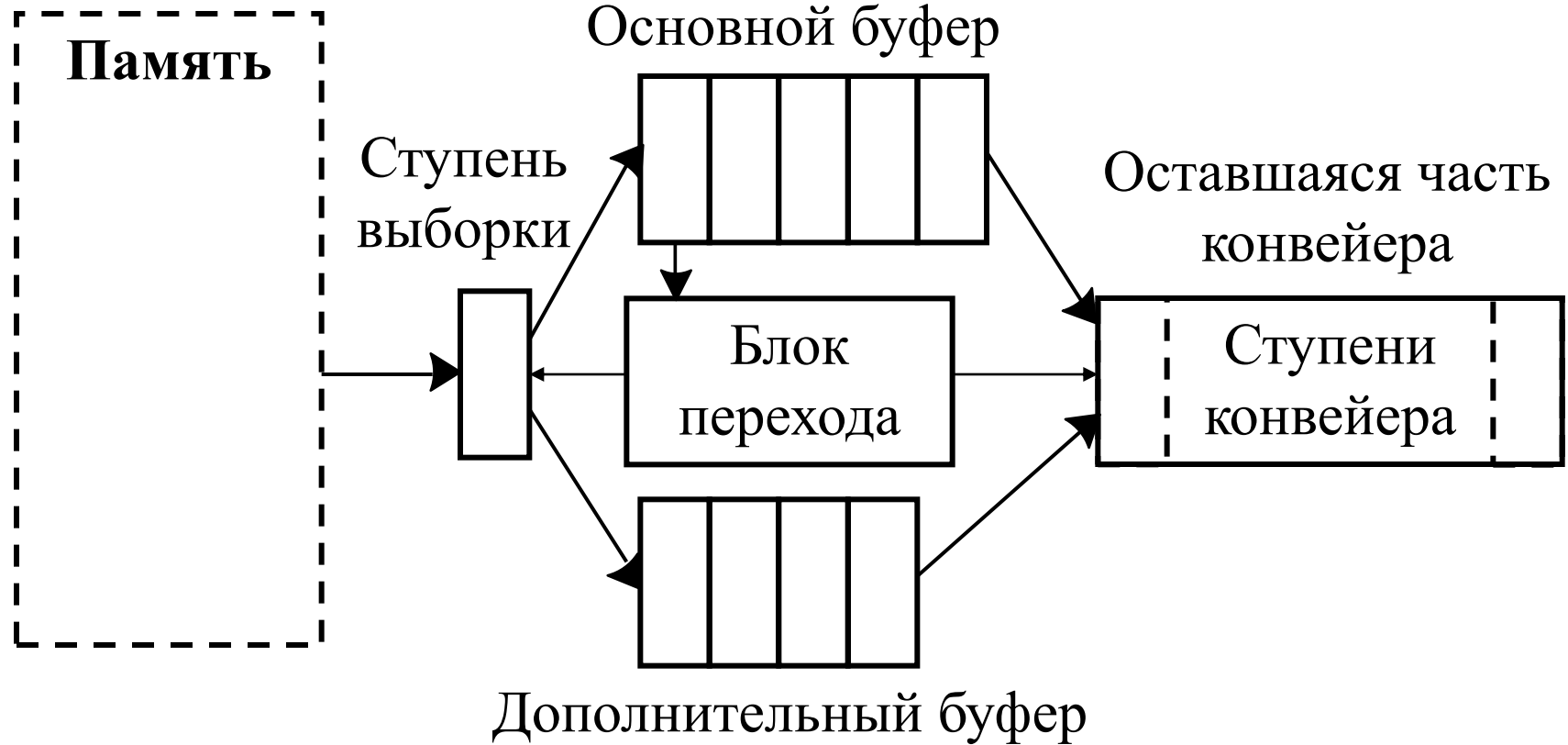
1 Основные группы способов для решения проблемы условных переходов

- Условные переходы приводят к большим издержкам в работе конвейера. Если переход произошел, то приходится сбрасывать весь конвейер и начинать его загрузку заново. Это может ощутимо влиять на производительность системы при большом количестве команд условного перехода и большой длине конвейера.
- Существует четыре группы способов для решения проблемы условных переходов:
 - буферы предвыборки команд;
 - множественные потоки команд;
 - задержанный переход;
 - предсказание перехода.

2 Буфер предвыборки команд

- Буфер предвыборки обеспечивает равномерность поступления команд в конвейер. Он строится по принципу очереди с емкостью 2-8 команд.
- Для решения проблемы условных переходов используется два таких буфера предвыборки.
- Каждая поступающая в основной буфер команда анализируется блоком перехода. При поступлении команды условного перехода вычисляется адрес перехода и заполняется второй буфер предвыборки.
- Блок перехода определяет исход команды условного перехода и подключает нужный буфер к оставшейся части конвейера. Команда поступает из этого буфера на конвейер, а другой буфер сбрасывается.

Конвейер с буферами предвыборки



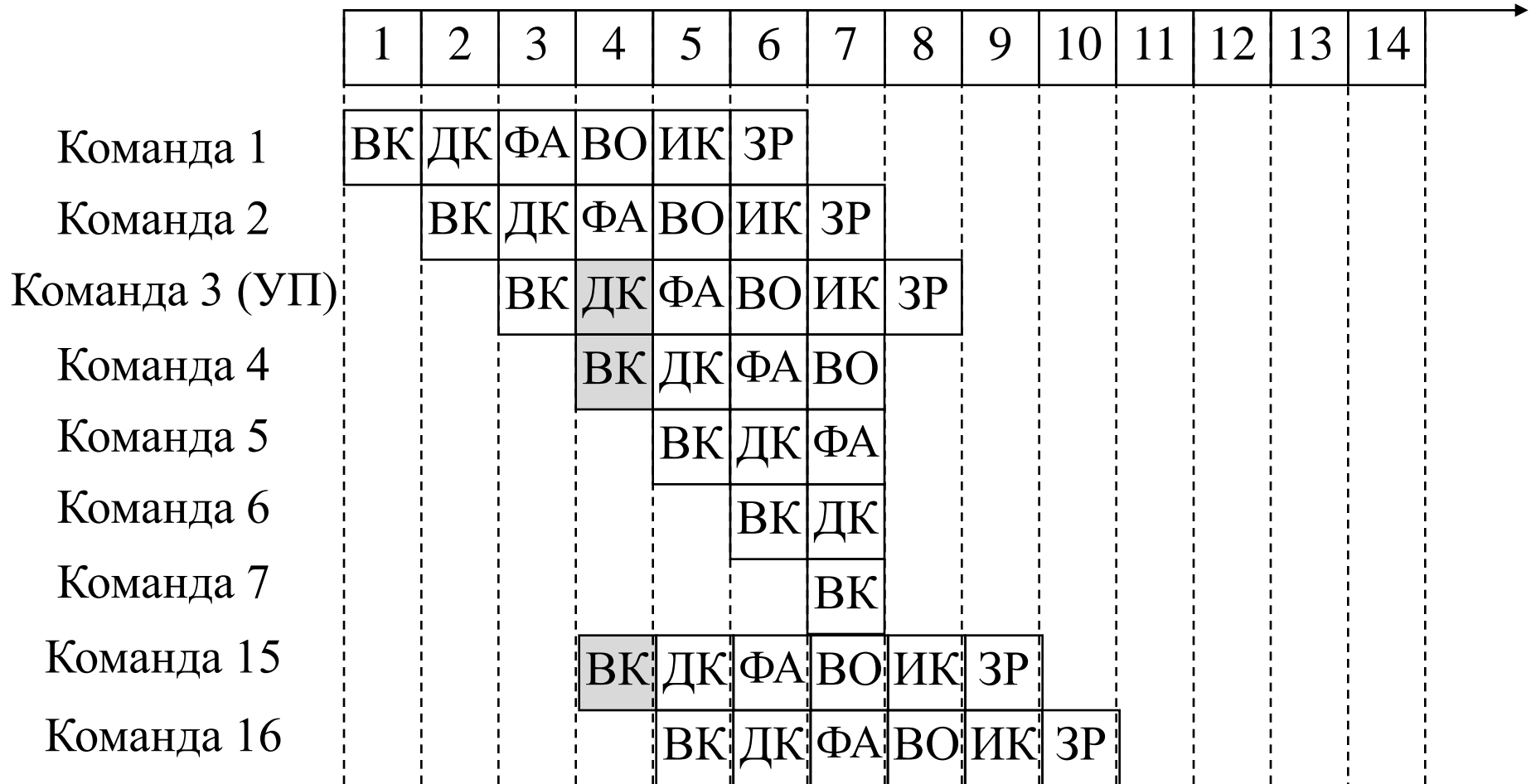
- Достоинство: экономия времени на выборку команды. (второй буфер делают небольшой глубины (1-2 команды)).
- Недостаток: задержка поступления команды на конвейер до выяснения исхода команды условного перехода.

3 Множественные потоки команд

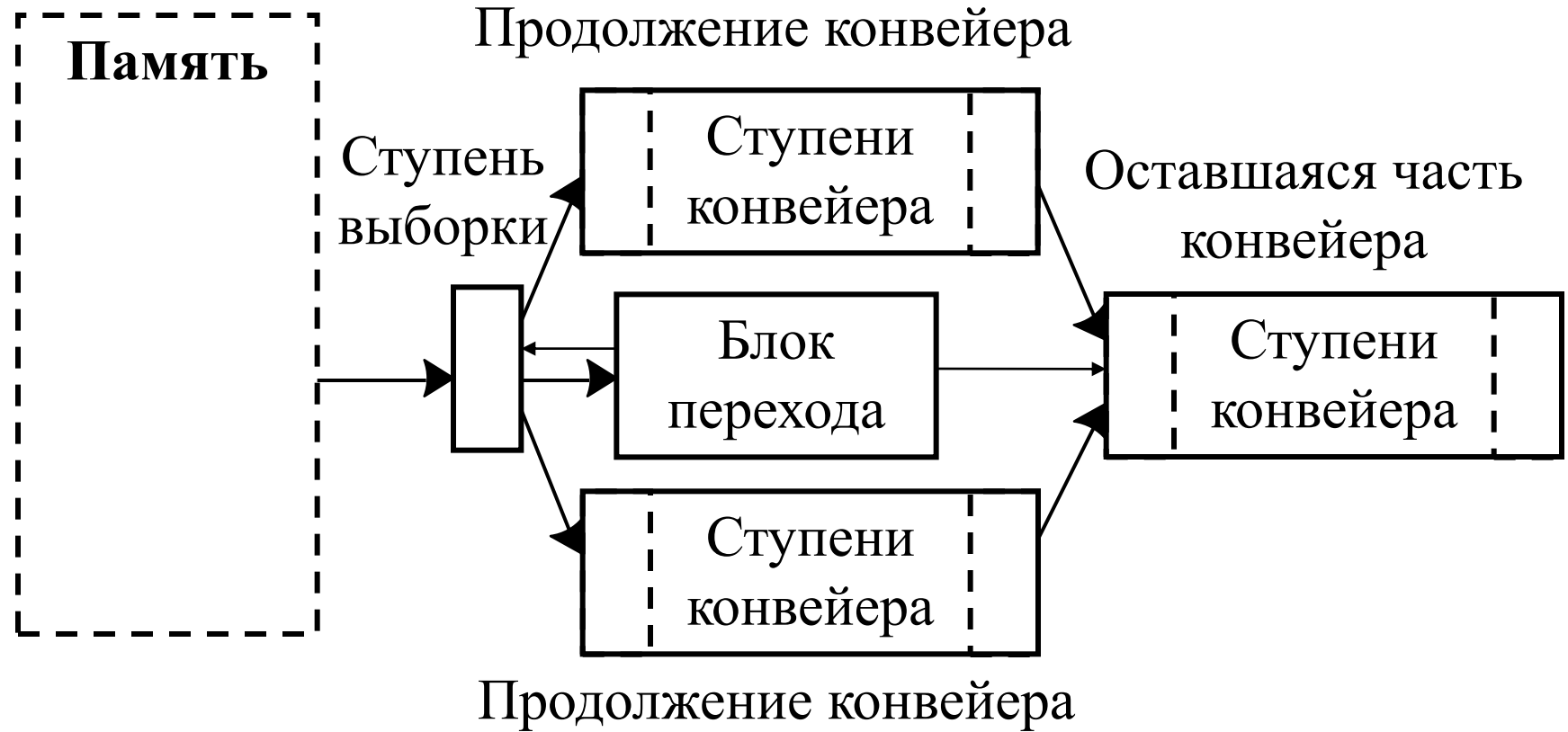
- Дублируются начальные ступени конвейера и создается тем самым два параллельных потока команд.
- При поступлении команды условного перехода в одной из ветвей такого "раздвоенного" конвейера образуется последовательность выборки и выполнения команд, соответствующая случаю, когда условие перехода не выполнилось, во второй ветви – случаю выполнения этого условия. Для рассмотренного ранее примера (см. диаграмму) в одном из потоков может обрабатываться последовательность команд 4-7, а в другом – 15-17.
- Оба потока сходятся в точке, где итог проверки условия перехода становится очевидным. Дальнейшее продвижение по конвейеру продолжает только "правильный" поток.

Диаграмма конвейера с командой перехода

Время



Конвейер с множественными потоками



- Достоинство: экономия времени на прохождение начальных ступеней конвейера.
- Недостаток: потеря эффективности при большом количестве близко стоящих команд условного перехода.

4 Задержанный переход

- Стратегия задержанного перехода предполагает выполнение команд следующих за командой условного перехода, в независимости от её исхода.
- Стратегия имеет смысл когда, эти команды все равно должны выполняться и команда перехода не влияет на их выполнение.
- Для реализации данного подхода на этапе компиляции после команды условного перехода вставляются команды «Нет операции». Затем на этапе оптимизации они, по возможности, заменяются на полезные. В оптимизированной программе удастся заменить более 20% команд «Нет операции». на полезные.

5 Предсказание перехода

- Это один из наиболее эффективных способов борьбы с конфликтами по управлению.
- До момента выполнения команды условного перехода или сразу после ее поступления на конвейер делается предположение о наиболее вероятном исходе такой команды (переход произойдет или нет).
- Последующие команды подаются на конвейер в соответствии с предсказанием.
- При ошибочном предсказании конвейер необходимо вернуть к состоянию, с которого началась выборка "ненужных" команд (очистить начальные ступени конвейера), и приступить к загрузке, начиная с "правильной" точки, что по эффекту равносильно приостановке конвейера.

5.1 Точность предсказания

- При правильных предсказаниях получается большой выигрыш, так как конвейер функционирует ритмично без остановок и задержек. Причем выигрыш, тем больше, чем выше точность предсказания.
- Под *точностью предсказания* обычно понимают процентное отношение числа правильных предсказаний к их общему количеству.
- Известна оценка: чтобы снижение производительности конвейера из-за его остановок по причине конфликтов по управлению не превысило 10%, точность предсказания переходов должна быть выше 97,7%.
- Известно более двух десятков способов предсказания переходов. При этом обычно выделяют два подхода: статическое и динамическое предсказание переходов.

5.2 Статическое предсказание переходов

- Делается на этапе компиляции программы и в процессе ее выполнения не меняется. Можно выделить следующие стратегии предсказания для команд условного перехода:
 - переход происходит всегда (50-58%);
 - переход не происходит никогда (40-50%);
 - предсказание определяется по результатам профилирования (выполнения программы на некотором эталонном наборе данных) (75%);
 - предсказание определяется кодом операции команды перехода (для одних команд предполагается, что переход будет, для других – нет, например, для команд перехода по переполнению логично предположить, что перехода не будет) (75-86%);
 - предсказание зависит от направления перехода (например, предполагается, что переход назад будет всегда, а переход вперед – никогда) (вперед – 65%, назад – 85%);
 - при первом выполнении команды переход имеет место всегда.

5.3 Динамическое предсказание переходов

- Решение о наиболее вероятном исходе команды условного перехода принимается в ходе вычислений, исходя из информации о предшествующих переходах (истории переходов), собираемой в процессе выполнения программы. В целом, динамические стратегии обеспечивают по сравнению со статическими более высокую точность предсказания.
- При классификации динамических стратегий предсказания переходов обычно выделяют следующие их виды:
 - одноуровневые или бимодальные;
 - двухуровневые или коррелированные;
 - гибридные;
 - асимметричные.

Одноуровневые схемы предсказания переходов

- *Вариант 1.* Строится небольшая таблица, в которую заносятся адреса последних команд условного перехода, при выполнении которых переход не случился. Таблица реализуется на базе ассоциативной кэш-памяти.
- При поступлении команды условного перехода её адрес сравнивается с адресами в кэш-памяти. Если совпадение обнаружено, то предполагается, что перехода не будет, иначе, что будет. Фактически для каждой новой команды (адрес, которой не записан в кэш-памяти), предполагается, что переход будет.
- После исхода таблица корректируется по правилу: если команда завершилась переходом, то ее адрес удаляется из кэш-памяти, иначе записывается, если его там еще нет. При заполнении таблицы опираются на стратегии LRU и FIFO.

- **Вариант 2.** Ориентирован на использование кэш-памяти команд. Каждая ячейка кэш-памяти содержит дополнительный бит (перехода), используемый для команд условного перехода. Состояние разряда характеризует предыдущий исход данной команды (1 – переход был, 0 – перехода не было).
- Новое предсказание делается в соответствии с состоянием бита перехода. При первом занесении в кэш-память команды условного перехода этот бит устанавливается в единицу (при первом выполнении переход имеет место всегда).
- После выполнения команды, её бит перехода корректируется в соответствии с исходом. Недостаток затраты времени на корректировку бита перехода в кэш-памяти. (Процент попадания – 89).

- **Вариант 3.** Строится одноразрядная таблица истории переходов. Состояние её элемента определяет произошёл переход (1) или нет (0).
- Каждый элемент таблицы адресуется k разрядами адреса команды условного перехода.
- Предсказание совпадает с результатом предыдущего выполнения команды.
- Если команда участвует в организации цикла, то стратегия даёт промах в начале и конце цикла.
- Стратегия использовалась в процессоре AMD K5. (Процент попадания – 78).

- **Вариант 4.** Элемент таблицы истории переходов состоит из двух бит, выполняющих функцию двухразрядного счетчика работающего в режиме насыщения (алгоритм Смита).

Состояния	Правила перехода
<i>00 – перехода не будет (сильное предсказание)</i>	<i>Состояние 00 переход был – 01, не было 00</i>
<i>01 – перехода не будет (слабое предсказание)</i>	<i>Состояние 01 переход был – 10, не было 00</i>
<i>10 – переход будет (слабое предсказание)</i>	<i>Состояние 10 переход был – 11, не было 01</i>
<i>11 – переход будет (сильное предсказание)</i>	<i>Состояние 11 переход был – 11, не было 10</i>

- Каждый счетчик адресуется k битами адреса команды условного перехода. Поиск в этой таблице выполняется только после декодирования команды, когда выяснилось, что команда есть команда условного перехода. Реализуется таблица истории на основе ЗУ с произвольным доступом.
- *Схема Смита или бимодальный предикатор.* Отличие от варианта четыре состоит в том, что таблица истории переходов реализуется на базе кэш-памяти с ассоциативным отображением. В качестве ассоциативного признака выступает адрес команды условного перехода. Такой подход устраняет эффект наложения, но связан с большими аппаратными затратами. Коэффициент попадания для последних двух случаев 92%. (максимум – 98%, минимум – 76,2%).

Таблицы истории для шаблонов

- При динамическом предсказании переходов история переходов фиксируется в форме таблицы, каждый элемент которой состоит из М битов. Нужный элемент таблицы указывается с помощью К-разрядной двоичной комбинации – шаблона (pattern). Этим объясняется общепринятое название таблицы предыстории переходов – *таблица истории для шаблонов* (РНТ, Pattern History Table).
- При описании динамических схем предсказания переходов часто используют модель автомата Мура (текущее состояние автомата определяется таблицей предыстории переходов).
- Элементы таблицы РНТ в автомате можно рассматривать как реверсивные счетчики, работающие в режиме с насыщением. При поступлении на конвейер команды условного перехода происходит обращение к соответствующему ей счетчику РНТ, и в зависимости от состояния счетчика делается прогноз, определяющий дальнейший порядок извлечения команд.

- После прохождения ступени исполнения, когда фактический исход команды становится ясным, содержимое счетчика увеличивается на единицу, (если команда завершилась переходом) или уменьшается на единицу (если перехода не было).
- Это означает, что добавление единиц сверх максимального числа в счетчике, а также вычитание единиц при нулевом содержимом счетчика уже не производится.
- Основанием для предсказания служит состояние старшего разряда счетчика. Если он содержит единицу, то принимается, что переход произойдет, в противном случае предполагается, что перехода не будет.
- В большинстве известных процессоров используются двухразрядные счетчики ($M=2$). При $M>3$ точность предсказания начинает снижаться.

Точность и аппаратные затраты одноуровневых схем

- В одноуровневых схемах с использованием двухразрядных счетчиков в таблице предыстории средний коэффициент попадания составляет 92%.
- Количество команд условного перехода наиболее часто используемых равно 16.
- Таким образом, для реализации таблицы в данной схеме достаточно $2 \cdot 16 = 32$ бит и можно использовать регистр.
- К каждой паре нужно адресоваться через адрес команды условного перехода для этого достаточно 4 бит.
- Эти 4 бита управляют 16-входовым двухразрядным мультиплексором, который подает нужный счетчик для анализа и модификации по алгоритму Смита.

Двухуровневые схемы

- Двухуровневые схемы предсказания переходов учитывают зависимость команд условного перехода не только от собственных исходов команд перехода, но и от других, предшествующих им, команд условного перехода.
- В них выделяется два уровня таблиц. В роли первой таблицы может выступать регистр глобальной истории (сдвиговый регистр, сдвиг происходит при выполнении команды условного перехода, а в освободившийся разряд записывается 0 если перехода не было, 1 если переход был, k разрядов его используется для доступа к таблице истории), тогда схему предсказания называют глобальной. А могут использоваться регистры локальной истории (тоже, что и глобальной истории, но в отдельный регистр пишутся исходы одной команды условного перехода) – локальная схема.
- Таблица второго уровня хранит историю переходов отдельной команды. Среднее количество попаданий 92% (80-99,2%) .

Точность и аппаратные затраты двухуровневых схем

- Динамические схемы характеризуются понятием разогрева: пока не накопится статистика выполнения команд условного перехода, предсказания весьма не точны.
- Двухуровневые схемы имеют средний процент попадания (92%).
- Аппаратурные затраты в них относительно велики, так как нужны достаточно длинные таблицы предыстории для получения высокой вероятности попадания (минимум 256 бит).
- Кроме того, требуется глобальный регистр на 8-12 разрядов, а если использовать локальные регистры, то нужны 10-16 8-разрядных регистров (по количеству команд условного перехода).

Гибридные схемы

- Гибридные схемы предсказания перехода объединяет в себе несколько механизмов предсказания переходов. Идея состоит в использовании наиболее эффективного алгоритма для каждой ситуации.
- Гибридная схема Макфарлинга содержит два элементарных предикатора, отличающихся друг от друга по своим характеристикам (временем разогрева и размером таблицы истории) и работающих независимо друг от друга. Выбор предикатора обеспечивается селектором.
- Средняя точность предсказаний гибридных схем 97,13 %. Они дают наилучший результат (97,7%), но и требуют больших аппаратных затрат.

Ассиметричные схемы

- Ассиметричная схема предсказания переходов сочетает в себе черты гибридных схем и коррелированных.
- В ассиметричной схеме есть три предикатора, каждый использует свою таблицу истории.
- Для доступа к таблице используется адрес команды условного перехода и содержимое таблицы глобальной истории.
- Шаблон для обращения к каждой таблице истории применен свой.
- При выполнении команды условного перехода каждый предикатор выдвигает свой прогноз. Выбор прогноза осуществляет мажоритарная схема. После завершения команды содержимое всех трех таблиц обновляется. Средняя точность этой схемы – 72%.