

Генерация тестовых данных для системного функционального тестирования микропроцессоров с учетом кэширования и трансляции адресов

Е.Корныхин

Аннотация

В статье рассматривается задача генерации тестовых данных для системного функционального тестирования микропроцессоров (core-level testing), а именно задача построения тестовой программы по заданной ее абстрактной форме (тестовому шаблону). Для решения этой задачи в работе предложен алгоритм, сводящий ее к задаче разрешения ограничений. В данной статье рассматриваются вопросы тестирования инструкций работы с памятью (при этом учитываются такие особенности микропроцессора, как кэширование и трансляция адресов) – тестирование других инструкций не рассматриваются.

1 Введение

Вычислительные системы играют все большую роль в процессах, от которых зависит здоровье и жизнь людей. Поэтому необходимо, чтобы вычислительные системы работали корректно. Базовым компонентом многих вычислительных систем являются микропроцессоры, выполняющие управляющие функции. Тестирование микропроцессоров является важной задачей, которой и посвящена данная работа.

В данной работе микропроцессор рассматривается как единая система, входными данными для которой являются машинные программы, загруженные в память (далее такие программы будут называться *тестовыми программами*). В рамках *функционального тестирования* эти программы исполняются, процесс исполнения протоколируется и затем анализируется. При этом важно лишь, правильно ли исполнена загруженная программа.

В [4] была предложена технологическая цепочка построения тестовых программ на основе модели микропроцессора. В рамках этой цепочки сначала тестовые программы систематически строятся в абстрактном виде (в виде *тестового шаблона*¹) – без конкретных параметров инструкций. А затем уточняются до тестовых программ, что было описано лишь схематически, хотя и сказано,

¹в работе [4] термином «тестовый шаблон» называется другое понятие; в данной статье термин «тестовый шаблон» используется в том смысле, в каком оно принято в большинстве работ по генерации тестовых программ [11, 5]

что для этого можно применять разрешение ограничений. Для сложных тестовых шаблонов этот этап становится отдельной проблемой, которой и посвящена данная статья.

2 Обзор работ по системному функциональному тестированию микропроцессоров

В настоящее время в практике системного функционального тестирования микропроцессоров можно выделить следующие подходы к генерации тестовых программ:

- *ручная разработка тестовых программ* хоть и практически неприменима для полного тестирования микропроцессора, всё же может применяться для тестирования особых, крайних случаев;
- *тестирование с использованием кросс-компиляции* применяется часто из-за невысокой сложности его проведения: после согласования спецификации микропроцессора можно начинать делать кросс-компилятор, а код, предназначенный для кросс-компиляции, уже готов. Однако гарантировать полноту такое тестирование не может;
- *случайная генерация тестовых программ* применяется так же часто в силу простоты автоматизации. Сгенерированные таким образом тестовые программы позволяют быстро обнаружить простые ошибки, однако не гарантируют полноты тестирования. Разрабатываются и более хитрые варианты случайной генерации [6];
- *случайная генерация тестовых программ на основе тестовых шаблонов* предполагает разделение процесса генерации тестовой программы на два этапа: на первом подготавливаются тестовые шаблоны – абстрактные представления тестовых программ (в тестовых шаблонах для параметров инструкций вместо значений указываются ограничения на значения) – а на втором этапе по тестовым шаблонам генерируются тестовые программы. Вторым этапом включает в себя *генерацию тестовых данных*, т.е. генерацию параметров инструкций (регистров, констант) и начальных значений регистров, ячеек кэш-памяти, строк TLB и т.д.

Тестовые шаблоны описывают последовательность инструкций, параметры инструкций с информацией о процессе исполнения инструкций. В качестве параметров инструкции могут быть как явно указаны регистры и константы, так и предоставлена возможность инструменту самому подобрать регистры. Последовательность инструкций чаще всего задана явно. Необходимость в тестовом

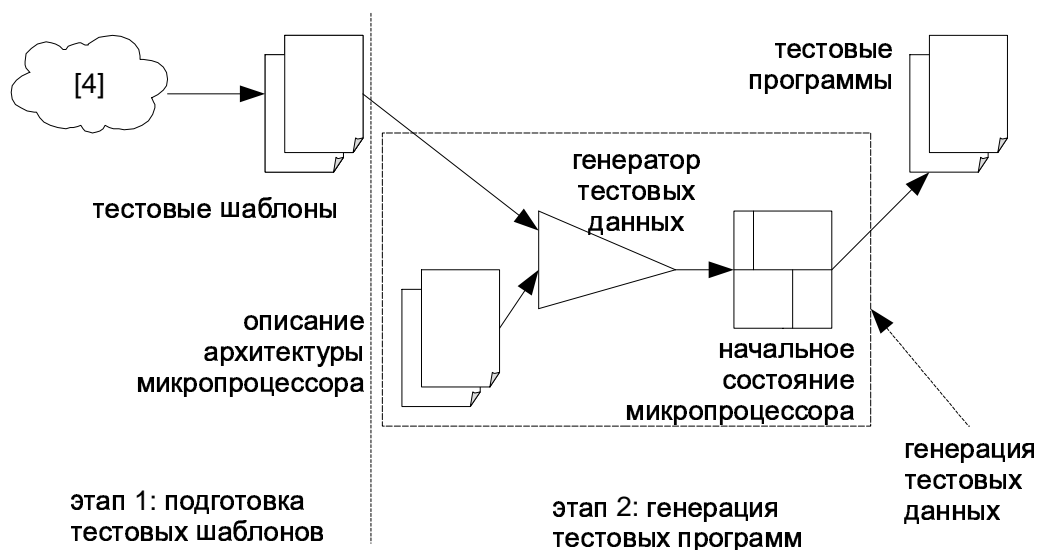


Рис. 1: Генерация тестовых программ на основе тестовых шаблонов

шаблоне обычно возникает тогда, когда тестирование проводится нацеленным образом и эта цель выражена последовательностью инструкций, каждая из которых должна быть исполнена заданным образом. Пример тестового шаблона:

```
REGISTER ax:32; REGISTER bx:32; REGISTER cx:32;
ADD ax, ax, bx @ overflow
LW cx, ax, 0 @ l1Hit
MUL ax, cx, bx @ normal
```

в котором 3 инструкции – ADD, LW и MUL. У каждой инструкции указаны параметры – или 3 регистра, или 2 регистра и константа – и информация о том, как должна быть исполнена инструкция: с переполнением (overflow), с кэш-попаданием (l1Hit) или без исключений (normal). Чтобы получить тестовую программу по этому шаблону, достаточно задать начальные значения регистров ax, bx и cx и той части кэш-памяти, с которой работает вторая инструкция (LW) (это и будут тестовые данные для данного шаблона). Это можно сделать, добавив в начало тестового шаблона инструкции инициализации состояния микропроцессора. Полученную тестовую программу можно исполнить и проверить, совпадает ли поведение каждой инструкции с тем, что было заявлено в тестовом шаблоне.

Обратимся к задаче генерации тестовых данных. Среди известных работ можно выделить следующие методы ее решения:

- комбинаторные техники
- решение задачи ATPG

- разрешение ограничений

Комбинаторные техники применимы в случае простых тестовых шаблонов. Такие тестовые шаблоны включают лишь простые ограничения, а именно указание области значений переменной. Причем все значения этой области в тестовой программе равноправны. Техника хоть и простая, но довольно ограниченная в применении, поскольку не всегда получается привести ограничения на переменные к такому простому виду. В работе исследователей из Fujitsu Lab. [7] предлагается описать тестовые программы в виде выражений (Test Specification Expressions, TSE), а инструкции микропроцессора – на языке ISDL. Специальный генератор строит тестовые программы, удовлетворяющие TSE. Kohno и Matsumoto [8] рассматривают задачу верификации конвейерных микропроцессоров, используя для этого генерацию тестовых программ с помощью тестовых шаблонов. Области значений переменных в таких шаблонах складываются из регистров и числовых констант.

Исследователи из Politecnico di Milano [10] предложили генеровать тестовые данные с использованием *техник решения задачи ATPG* (Automatic Test Pattern Generation). ATPG – задача поиска значений входных сигналов («векторов») схемы с целью поиска ее некорректного поведения. ATPG чаще применяется для модульного тестирования, если известна RTL-модель микропроцессора. Задача ATPG известна давно и для ее решения существуют (в том числе коммерческие) инструменты. Для применения ATPG при генерации тестовых программ необходимо, чтобы RTL-модель микропроцессора была готова к моменту генерации тестовых данных. Кроме того, использование такой методики именно для функционального тестирования ограничено, поскольку тесты на функционирование микропроцессора приходится строить с учетом модели спроектированного микропроцессора, которая сама же при этом будет и тестироваться, что выглядит странным.

Наиболее впечатляющих результатов достигают инструменты, использующие для генерации тестовых данных *разрешение ограничений*. Ограничение с логической точки зрения то же, что и предикат, а разрешение ограничений – то же, что и задача выполнимости системы предикатов, для решения которой применяются специальные алгоритмы [3]. В работе [12] исследователей из Китайского Национального Университета технологий безопасности описывается инструмент МААТГ. Тестовый шаблон для него может содержать лишь ограничения равенства или неравенства значений и указание области значений переменной. Для задания архитектуры микропроцессора используется описание на языке EXPRESSION. Другой инструмент – Genesys-Pro [11] – позиционируется компанией IBM как разработка, впитавшая лучшее из разработок последних 20 лет. Тестовые шаблоны позволяют задавать тестовые программы переменной

длины. Кроме того любая инструкция в тестовом шаблоне может быть снабжена указанием эвристики для выбора параметров инструкции [5]. Среди возможных эвристик есть и эвристики на события в кэш-памяти и при трансляции адресов. Однако в известных работах не раскрывается содержание таких эвристик, что не дает возможности понять эффективность генерации программ, нацеленных на тестирование памяти. Система команд микропроцессора должна быть описана в виде ограничений (constraint net) на операнды, код операции, что не является естественным описанием поведения инструкции, особенно если в рамках нее выполняется несколько последовательных вычислений на основе параметров инструкции. Для генерации параметров очередной инструкции Genesys-Pro использует уже построенную тестовую программу и состояние микропроцессора, которое известно полностью. Этот подход обеспечил масштабируемость на большие тестовые шаблоны, но и привел к необходимости использования механизма возврата (backtracking), если выбрать параметры для очередной инструкции.

В данной работе при решении задачи генерации тестовых данных также используется разрешение ограничений. В отличие от МААТГ тестовые шаблоны могут содержать не просто ограничения равенства или неравенства, а более сложные ограничения, например, кэш-промах. А по сравнению с Genesys-Pro в данной статье делается попытка транслировать тестовый шаблон в ограничения целиком ². При этом отпадает необходимость в механизме возврата ³. Особенностью тестовых шаблонов, получаемых в рамках [4], является фиксация для каждой инструкции регистров-параметров. Для таких шаблонов Genesys-Pro будет работать крайне неэффективно, поскольку теряется возможность «подогнать» с помощью выбора параметров исполнение очередной инструкции под заданные в тестовом шаблоне для нее события. На тестовых шаблонах из [4] Genesys-Pro будет работать следующим образом: выберет некоторое начальное состояние микропроцессора, начнет исполнять тестовый шаблон (поскольку начальное состояние ему известно), но как только дойдет до инструкции, которая будет исполнена не так, как требуется в шаблоне, Genesys-Pro сделает возврат в самое начало, а именно ему придется выбрать другое начальное состояние микропроцессора и весь процесс запустить заново. Такой процесс генерации тестовых данных слишком неэффективен. Кроме того попытка наивного переноса идей из представленных инструментов (кодирование изменений состояния каждого регистра и зависимостей между ними в виде ограничений) для инструкций работы с

²Известно, что задача разрешения ограничений (т.е. задача выполнимости) NP-полна. Это означает, что для больших тестовых шаблонов предлагаемый в данной статье метод может быть не столь эффективным. Однако действительно длинные тестовые шаблоны в практике тестирования микропроцессоров применяются редко

³Из-за этого качественно меняется разрешаемая система ограничений. Genesys-Pro сводит общую задачу к множеству задач, на порядок меньшей сложности. Кроме того, в данной статье предлагается более технологичный метод построения тестовых данных: описание архитектуры микропроцессора может быть получено из стандарта архитектуры микропроцессора и представляет собой понятное для человека императивное задание.

памятью приводит к очень сложным ограничениям ⁴, которые не удастся разрешить за приемлемое время.

3 Генерация тестовых данных для операций с памятью

Под *генерацией тестовых данных* понимается генерация начального состояния микропроцессора (регистров, ячеек кэш-памяти, строк TLB и т.п.) для заданного тестового шаблона. При исполнении тестового шаблона из сгенерированного начального состояния микропроцессора все инструкции шаблона должны быть выполнены в соответствии с требованиями шаблона. В качестве требований к исполнению инструкции используется указание *тестовой ситуации* у инструкции. Для операций с памятью тестовыми ситуациями могут быть кэш-промах, кэш-попадание, ограничение на адрес, с которым работает команда, ограничение на строку TLB, с которой работает трансляция адресов в данной инструкции. Например, в следующем тестовом шаблоне:

```
REGISTER ax:32; REGISTER bx:32; CONST c:16;  
LW ax, bx, c @ l1Hit, tlbMiss  
ADD ax, ax, bx @ overflow  
SW ax, bx, c @ l2Miss, tlbHit
```

тестовой ситуацией первой инструкции указано `l1Hit, tlbMiss`. Идентификатор `l1Hit` означает кэш-попадание в кэше первого уровня (L1). Идентификатор `tlbMiss` означает кэш-промах в кэше TLB. Этот кэш используется при трансляции виртуального адреса в физический. Аналогично тестовая ситуация третьей команды составлена из кэш-промаха в кэше второго уровня (L2) и кэш-попадания в кэш TLB.

В данной работе предлагается метод генерации тестовых данных для тестовых шаблонов с инструкциями, работающими с памятью. Тестовые ситуации для таких инструкций можно разделить на *тестовые ситуации в кэш-памяти* и *тестовые ситуации при трансляции адресов* (вычисление физического адреса по виртуальному). Поскольку тестовые ситуации в кэш-памяти разных инструкций связаны друг с другом ⁵, то сначала в предлагаемом методе надо сгенерировать ограничения для тестовых ситуаций в кэш-памяти (см. часть 4 данной статьи).

⁴ даже без учета трансляции адресов для кодирования состояния микропроцессора можно использовать формулу длиной порядка размера памяти ($mem_0 = var_0 \wedge mem_1 = var_1 \wedge \dots$); каждое изменение производится по неизвестному индексу, поэтому при записи нового состояния микропроцессора приходится перебирать все возможные варианты ($mem[i] := x$ приводит к формуле ($i = 0 \wedge mem_0 = x \wedge mem_1 = var_1 \wedge \dots$) $\vee (i = 1 \wedge mem_0 = var_0 \wedge mem_1 = x \wedge \dots) \vee \dots$), а если таких изменений несколько, то приходится рассматривать все возможные варианты значений индексов. Получающаяся формула имеет размер порядка $|L| \cdot 2^n$, где $|L|$ – размер памяти, а n – количество изменений памяти. В данной работе предложен метод кодирования изменений, приводящий к формуле размера порядка $|L| + n$.

⁵ например, кэш-промах в одной инструкции означает особый выбор физических адресов для предыдущих инструкций с кэш-попаданием

тэг	сет	индекс
-----	-----	--------

физический адрес

Рис. 2: Структура физического адреса

Так как тестовые ситуации при трансляции адресов связаны друг с другом (там тоже используется кэширование), то следующим шагом метода будет генерация ограничений для тестовых ситуаций при трансляции адресов (см. часть 5 данной статьи). В результате получится система ограничений на начальные значения регистров, физические адреса и строки TLB, после разрешения которой остается дополнить тестовый шаблон командами инициализации начального состояния микропроцессора на основе вычисленных начальных значений его подсистем.

4 Упрощение тестовых ситуаций в кэш-памяти

Каждая инструкция работы с памятью оперирует с некоторым физическим адресом. Физический адрес можно представить в виде трех битовых полей – *тег* (старшие биты адреса), *сет* и индекс в строке кэш-памяти (см. рис. 2).

Упрощение тестовых ситуаций в кэш-памяти начинается с *распределения тестовых ситуаций шаблона по сетам*, т.е. каждой такой тестовой ситуации следует сопоставить число – номер сета. Сопоставление можно проводить любым способом. Главное – чтобы этот выбор впоследствии давал решение. Например, можно сопоставить все тестовые ситуации одному сету или разным.

После этого отдельно для каждого сета проводится следующий *алгоритм получения ограничений «равенства-неравенства» тегов*. Исходными данным для этого алгоритма является последовательность тестовых ситуаций в кэш-памяти, относящихся к одному сету. Для каждой тестовой ситуации указаны 1-2 тега (имеющийся тег либо пара из вытесняющего и вытесняемого тегов). Алгоритм состоит из двух шагов. На первом шаге составляются ограничения на конечные множества тегов, а на втором шаге эти ограничения разрешаются символично (упрощаются) до искомого вида. Разрешение ограничений можно проводить любым из известных алгоритмов разрешения ограничений [3]. Именно использование символических упрощений и множественная интерпретация кэш-памяти ⁶ позволило отказаться от кодирования изменений состояния кэш-памяти, что упро-

⁶в противовес списочной (векторной) интерпретации сета кэш-памяти; по сути порядок элементов по метрике политики замещения в сете кэш-памяти кодируется не в состоянии сета, а в последовательности тестовых ситуаций в кэш-памяти

стило задачу на разрешение ограничений.

Ниже приведен псевдокод алгоритма. В нем учитывается, что при кэш-промахе происходит вытеснение согласно политике замещения LRU (Least Recently Used), хотя подобная техника применима и к другим политикам замещения. Текущее состояние сета моделируется множеством L . Кэш-попадание описывается принадлежностью тега этому множеству, а кэш-промах – непринадлежностью вытесняющего тега этому множеству. Политика замещения LRU переформулирована в следующем виде: после последнего обращения к тегу до его вытеснения должны произойти обращения ко всем остальным тегам сета. xs – теги-переменные начального состояния сета. Итоговые ограничения вида равенство-неравенство адресов будут сформулированы на содержимое xs и на вытесняющие теги.

```

procedure A(  $tt$  : test_template_for_set,  $xs$  : tэrvar-list )
returns  $C$  : constraint-set
begin
   $C := \{\}$ 
  var  $L$  : тэг-set :=  $\{\}$ 
  для каждого (тега  $t$  из  $xs$ )
  begin
    добавить в  $C$  ограничение  $t \notin L$ ;
     $L := L \cup \{t\}$ ;
  end;
  для каждой (тестовой ситуации  $\tau$  из  $tt$ )
  begin
    если  $\tau$  есть кэш-попадание тега  $p$ , то
      добавить в  $C$  ограничение  $p \in L$ 
    иначе если  $\tau$  есть кэш-промах тега  $p$  с вытеснением тега  $q$ , то
      begin
        добавить в  $C$  ограничение  $q \in L$ ;
        добавить в  $C$  ограничение  $p \notin L$ ;
        добавить в  $C$  ограничение  $lru( q, L, \tau, tt )$ ;
         $L := L \cup \{p\} \setminus \{q\}$ ;
      end;
    end;
  упростить  $C$ ;
end,
procedure lru(  $q$  : тэг,  $L$  : тэг-set,  $\tau$  : тестовая_ситуация,
 $tt$  : test_template_for_set ) returns  $C$  : constraint
begin
   $C := \perp$ ;
  для каждого ( $\tau'(p1)$  : кэш-попадания из  $tt$  с начала 7 до  $\tau$ )
  begin

```

⁷с добавления тегов-переменных начального состояния в сет


```

var  $T$  : тэг-set := множество вытесняющих тегов и тегов попадания в
 $tt$  между  $\tau'$  и  $\tau$  неключительно;
 $C := C \vee (q = p1) \wedge (L \setminus \{q\} = T)$ ;
end;
end

```

Приведенный алгоритм следует оптимизировать с целью уменьшения размера C с учетом следующих замечаний:

1. между последним обращением к тегу q и его вытеснением должно быть не менее $N - 1$ обращений к любым тегам, где N – ассоциативность кэш-памяти (размер сета), т.е. в цикле процедуры lru можно пропустить кэш-попадания, отстоящие от τ ближе, чем $N - 1$
2. порядок последних обращений к тегам повторяет порядок их вытеснения, т.е. в цикле процедуры lru можно пропустить кэш-попадания от начала tt до кэш-попадания тега, вытесняемого предыдущим кэш-промахом из цикла процедуры A
3. последовательность кэш-попаданий в цикле процедуры lru не должна проходить через более чем N вытеснений (в противном случае в этой последовательности обязательно должен был бы появиться вытесняемый тег), т.е. в этом цикле можно пропустить кэш-попадания от начала tt до кэш-промаха, отстоящего от τ ровно на N кэш-промахов
4. в процедуре lru можно генерировать C *ленивым* образом, т.е. для получения C проходить небольшое количество итераций цикла, затем возвращаться в алгоритм A; если такой C не дал решения, вернуться и пройти еще некоторое количество итераций (такой механизм, например, реализован в системах логического программирования с ограничениями [9])
5. если tt начинается с последовательности кэш-промахов, то несложно просчитать без разрешения ограничений, чему равны вытесняемые теги (например, первый вытесняемый тег равен первому добавлявшемуся тегу в сет, второй – второму и т.д.)

5 Построение ограничений для трансляции адресов

Оставшиеся шаги алгоритма генерации тестовых данных включают генерацию ограничений для механизма трансляции адресов, разрешение получившихся ограничений и формирование начального состояния подсистем микропроцессора. В статье рассматривается трансляция адресов с помощью TLB (Translation Lookahead Buffer), принятая в стандарте микропроцессоров MIPS [2]. Процесс трансляции адресов и основные структуры показаны на рис. 3.

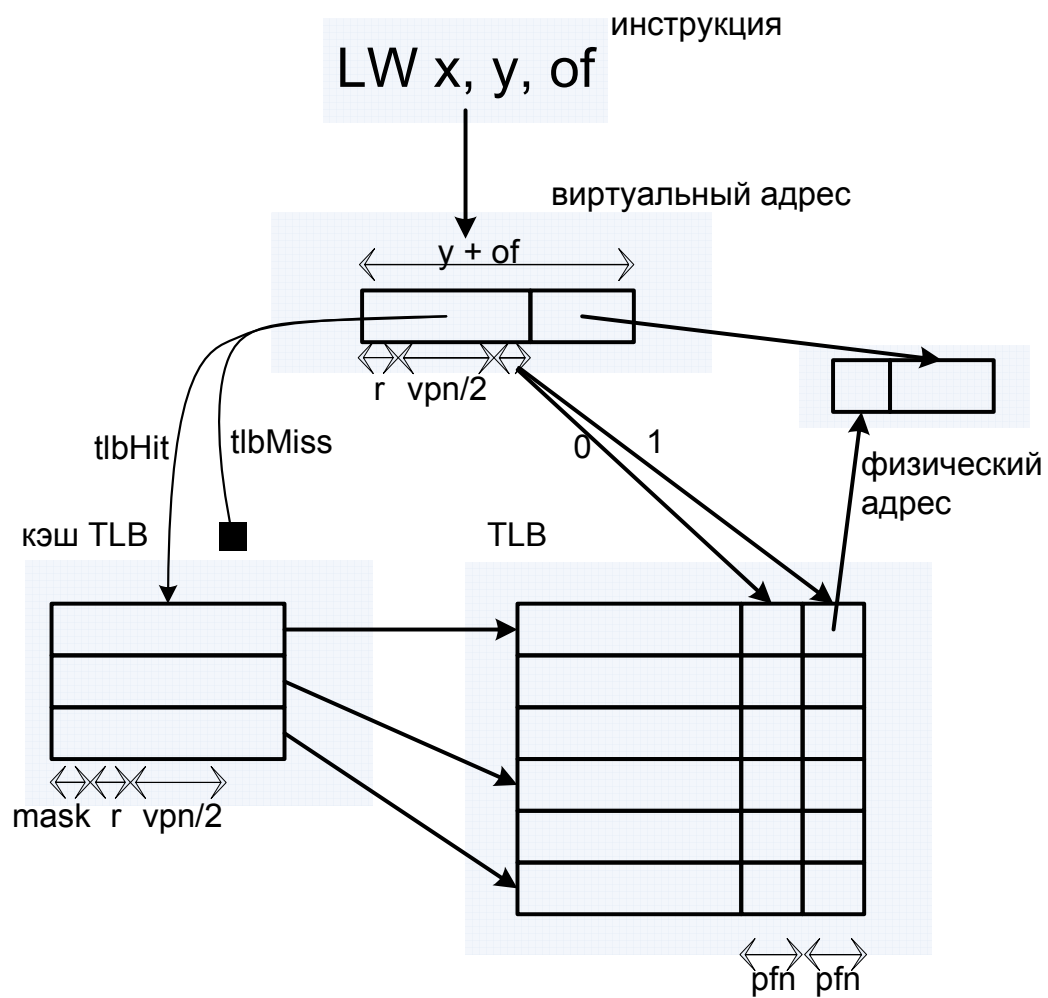


Рис. 3: Трансляция адреса в микропроцессорах стандарта MIPS

Для генерации ограничений для трансляции адресов используется тестовый шаблон и информация о сетах и тегах с этапа упрощения тестовых ситуаций в кэш-памяти. Первым этапом генерации ограничений является упрощение тестовых ситуаций в кэше TLB (это делается аналогично тому, как описано в части 4 – сет один и тот же, в качестве тегов выступают индексы строк TLB). Затем для каждой пары инструкций, обращающихся к одной строке TLB, выделяются ограничения на их виртуальные адреса (выраженные в терминах параметров инструкции):

- совпадение битов виртуальных адресов, отвечающих полю «g»
- совпадение битов виртуальных адресов, отвечающих полю «v_{rp}/2» с учетом поля «mask» (например, если поле «v_{rp}/2» расположено с 40 по 13й биты, то $v_{40..13+m} = w_{40..13+m}$, где v и w – виртуальные адреса, а m – значение поля «mask»)
- ограничение на поля «g» и «asid»
- ограничения на бит четности номера виртуальной страницы, например, если при трансляции адресов двух инструкций происходит обращение к одной строке TLB, но физические адреса различаются (это можно понять на основе равенства-неравенства тегов и сетов), то биты четности разные

Затем для каждой задействованной строки TLB выбирается соответствующая ей инструкция из тестового шаблона. Для нее составляются ограничения с каждой инструкций из тестового шаблона, которой соответствует другая строка TLB. Ограничение выражает факт отличия строк TLB, а именно либо отличие бит виртуальных адресов, соответствующих полю «g» или полю «v_{rp}/2» (с учетом маски), или бит «g» равен 0 с отличием поля «asid» от значения в регистре EntryHi.

6 Заключение

В статье рассматривалась задача генерации тестовых данных для системного функционального тестирования микропроцессоров, а именно задача построения тестовой программы по заданной ее тестовому шаблону. Для решения этой задачи в работе предложен алгоритм, использующий разрешение ограничений [3]. Предложенный алгоритм реализуется на базе системы логического программирования с ограничениями ECLiPSe [9] в качестве решателя ограничений на целые числа и конечные множества целых чисел в проекте по тестированию промышленного микропроцессора стандарта MIPS64 [1]. В будущем предполагается расширить спектр используемых политик кэширования за счет внедрения механизмов их описания.

Список литературы

- [1] *MIPS64: Architecture for Programmers Volume II: The MIPS64 Instruction Set.*
- [2] *MIPS64: Architecture for Programmers Volume III: The MIPS64 Privileged Resource Architecture.*
- [3] Семенов А.Л. Методы распространения ограничений: основные концепции. *PSI'03/ИМРО — Интервальная математика и методы распространения ограничений*, 2003.
- [4] Камкин А.С. Генерация тестовых программ для микропроцессоров. *Труды ИСП РАН*, 14(2):23–64, 2008.
- [5] L.Fournier E.Marcus M.Rimon M.Vinov A.Ziv A.Adir, E.Almog. Genesys-pro: Innovations in test program generation for functional processor verification. *IEEE Design and Test of Computers*, 21(2):84–93, Mar/Apr 2004.
- [6] M. Sonza Reorda G. Squillero F. Corno, E. Sanchez. Automatic test program generation – a case study. *IEEE Design & Test, Special issue on Functional Verification and Testbench Generation*, 21(2):102–109, MArch-April 2001.
- [7] K.Takayama F.Fallah. A new functional test program generation methodology. *Proceedings 2001 IEEE International Conference on Computer Design: VLSI in Computers and Processors*, pages 76–81, 2001.
- [8] N.Matsumoto K.Kohn. A new verification methodology for complex pipeline behavior. *Proceedings of the 38st Design Automation Conference (DAC'01)*, 2001.
- [9] M.Wallace K.R.Apt. *Constraint Logic Programming Using Eclipse*. Cambridge University Press, 2007.
- [10] F.Ferrandi D.Sciuto M.Beardo, F.Bruschi. An approach to functional testing of vliw architectures. *Proceedings of the IEEE International High-Level Validation and Test Workshop (HLDVT'00)*, pages 29–33, 2000.
- [11] Y.Lichtenstein M.Rimon M.Vinov M.Behm, J.Ludden. Industrial experience with test generation languages for processor verification. *Proceedings of the 41st Design Automation Conference (DAC'04)*, 2004.
- [12] Y.Guo G.Liu S.Li T.Li, D.Zhu. Maatg: A functional test program generator for microprocessor verification. *Proceedings of the 2005 8th Euromicro conference on Digital System Design (DSD'05)*, 2005.