

# ForwardCom: открытый стандарт набора команд для высокопроизводительных микропроцессоров

Агнер Фог

5 августа 2016 г.

# Оглавление

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| <b>1</b> | <b>Введение</b>   | <b>3</b>  |
| 1.1      | Основные моменты . . . . .  | 3         |
| 1.2      | Основы . . . . .  | 4         |
| 1.3      | Цели дизайна . . . . .  | 4         |
| 1.4      | Сравнение с другими открытыми наборами команд . . . . .   | 5         |
| 1.5      | Литература и ссылки . . . . .   | 6         |
| <b>2</b> | <b>Основы архитектуры</b>   | <b>7</b>  |
| 2.1      | Полностью ортогональный набор команд . . . . .  | 7         |
| 2.2      | Размер команды . . . . .  | 7         |
| 2.3      | Набор регистров . . . . .   | 8         |
| 2.4      | Поддержка векторов . . . . .  | 8         |
| 2.5      | Циклы по векторам . . . . .   | 9         |
| 2.6      | Максимальная длина вектора . . . . .  | 10        |
| 2.7      | Маски команд . . . . .  | 11        |
| 2.8      | Режимы адресации . . . . .  | 11        |
| <b>3</b> | <b>Форматы команд</b>   | <b>12</b> |
| 3.1      | Форматы и шаблоны . . . . .   | 12        |
| 3.2      | Кодирование операндов . . . . .   | 16        |
|          | Тип операнда . . . . .  | 16        |
|          | Тип регистра . . . . .  | 16        |
|          | Регистры–указатели . . . . .  | 17        |
|          | Индексные регистры . . . . .  | 17        |
|          | Смещения . . . . .  | 17        |
|          | Лимит для индекса . . . . .   | 17        |
|          | Длина вектора . . . . .   | 17        |
|          | Комбинирование векторов с различными длинами . . . . .  | 18        |
|          | Непосредственно заданные константы . . . . .  | 18        |
|          | Регистры масок . . . . .  | 18        |
| 3.3      | Кодирование масок . . . . .   | 18        |
| 3.4      | Формат команд перехода, вызова, и ветвления . . . . .   | 19        |
| 3.5      | Назначение кодов операций . . . . .   | 24        |
| <b>4</b> | <b>Списки команд</b>  | <b>26</b> |
| 4.1      | Список многоформатных команд . . . . .  | 29        |
| 4.2      | Список малых команд . . . . .   | 30        |
| 4.3      | Список одноформатных команд . . . . .   | 31        |
| 4.4      | Описание команд . . . . .   | 38        |
|          | Многоформатные команды . . . . .  | 38        |
|          | Команды малого формата . . . . .  | 41        |
|          | Одноформатные команды, использующие регистры общего назначения и специальные регистры . . . . .                             | 42        |
|          | Одноформатные команды с РОН в качестве входного операнда и векторным регистром в качестве выходного, или наоборот . . . . . | 44        |
|          | Другие одноформатные команды, которые могут изменять длину вектора . . . . .  | 45        |

|   |           |
|---|-----------|
| Одноформатные команды, которые могут перемещать данные горизонтально из одного вектора в другой . . . . . | 46        |
| Иные одноформатные векторные команды . . . . .  | 47        |
| 4.5 Распространённые операции, для которых нет специальных команд . . . . .                               | 50        |
| 4.6 Неиспользуемые команды . . . . .  | 52        |
| <b>5 Другие детали реализации</b>   | <b>53</b> |
| 5.1 Порядок байтов . . . . .  | 53        |
| 5.2 Реализация стека вызовов . . . . .  | 53        |
| 5.3 Вещественные ошибки и исключения . . . . .  | 55        |
| 5.4 Обнаружение целочисленного переполнения . . . . .   | 55        |
| 5.5 Многопоточность . . . . .   | 56        |
| 5.6 Свойства безопасности . . . . .   | 57        |
| Как улучшить безопасность приложений и систем . . . . .   | 57        |
| <b>6 Программируемые специфичные для приложения команды</b>   | <b>60</b> |
| <b>7 Микроархитектура и дизайн конвейера</b>  | <b>61</b> |

# Глава 1. Введение

ForwardCom означает Forward Compatible Computer system.

Данный документ предлагает новую открытую архитектуру набора команд, спроектированную для оптимальной производительности, гибкости и масштабируемости. Проект ForwardCom включает в себя как новую архитектуру набора команд, так и соответствующую экосистему программных стандартов — прикладной двоичный интерфейс (ABI), управление памятью, средства разработки, форматы библиотек и системные функции. Этот проект иллюстрирует улучшения, которых можно добиться посредством полного вертикального перепроектирования аппаратного и программного обеспечения, основываясь на открытом совместном процессе.

Настоящее руководство и весь связанный с ним код находятся по адресу <https://github.com/ForwardCom>.

## 1.1. Основные моменты

- Набор команд ForwardCom является компромиссом между принципами RISC и CISC, объединяя быстрый и оптимизированный дизайн декодирования и конвейера RISC-систем с компактностью и большим числом работы, в пересчёте на одну команду, CISC-систем.
- Дизайн ForwardCom — масштабируется, для поддержки как малых встроенных систем, так и огромных суперкомпьютеров и векторных процессоров, без потери двоичной совместимости.
- Для обработки больших наборов данных предоставляются векторные регистры переменной длины.
- Циклы по массивам реализованы новым гибким способом, автоматически использующим максимальную длину вектора, поддерживаемую микропроцессором, во всех итерациях цикла, кроме последней. Последняя итерация автоматически использует такую длину вектора, в которую целиком помещается оставшееся число элементов. Для обработки с оставшихся данных и специальных случаев не нужно никакого дополнительного кода. Нет нужды компилировать код отдельно для разных микропроцессоров с разными длинами векторов.
- Когда становится доступным новый микропроцессор, с большей длины векторными регистрами, не нужно перекомпиляции или обновления программного обеспечения. Программное обеспечение гарантированно будет совместимым снизу вверх, и получит преимущество от более длинных векторов новых моделей микропроцессора.
- Сильные функции безопасности — фундаментальная часть аппаратного и программного дизайна.
- Управление памятью проще и эффективнее, чем в традиционных системах. Используются различные приёмы для устранения фрагментации памяти. Нет разбиения памяти на страницы и буфера ассоциативной трансляции (translation lookaside buffer, TLB). Вместо этого есть отображение памяти, с ограниченным количеством секций переменного размера.
- Нет динамически компокуемых библиотек (dynamic link libraries, DLLs) или разделяемых объектов. Вместо этого есть лишь один тип библиотек функций, который может использоваться и для статической, и для динамической компоновки. Загружается и компокуется лишь та часть библиотеки, которая действительно используется. Библиотечный код почти во всех случаях хранится непрерывно с кодом основной программы. В момент загрузки на основании аппаратной конфигурации, операционной системы, или окружения пользовательского интерфейса, можно автоматически выбирать разные версии функции или библиотеки.
- Предоставляется механизм для вычисления требуемого размера стека, что может в большинстве случаев предотвратить переполнение стека, не создавая при этом стек большего размера, чем необходимо.
- Предоставляется механизм оптимального распределения регистров по программным модулям и библиотекам функций. Это делает возможным сохранение большинства переменных в регистрах без сброса этих переменных в память. Векторные регистры могут быть сохранены эффективным способом, сохраняющим только ту часть регистра, которая действительно используется.

## 1.2. Основы

Архитектура набора команд — это стандартизированный набор машинных команд, который может выполнять компьютер. Имеется много используемых архитектур наборов команд.

Некоторые широко используемые наборы команд плохо спроектированы с самого начала. Эти системы много раз дополнялись расширениями и заплатками. Один из наихудших случаев — широко используемый набор команд x86 и его многочисленные расширения. Набор команд x86 — результат длительной истории недальновидных расширений и заплаток. Результат этой разработки — очень сложная архитектура, с тысячами разных кодов команд, очень сложная и дорогая для декодирования микропроцессором. Мы должны извлечь уроки из прошлых ошибок, чтобы сделать более хороший выбор при проектировании новой архитектуры набора команд и поддерживающего её программного обеспечения.

Дизайн должен быть основан на открытом процессе. Кырсте Асанович (Krste Asanović) и Дэвид Паттерсон (David Patterson) представили убедительные аргументы в пользу того, что следует предпочесть открытый набор команд. Открытость может быть решающей для успеха технического дизайна. Например, первоначальный IBM PC в начале 1980-х имел преимущество по сравнению с конкурирующими компьютерами, ибо открытая архитектура позволяла другим производителям аппаратного и программного обеспечения выпускать совместимое оборудование. IBM утратила своё доминирующее положение на рынке, когда она в 1987г. перешла к проприетарной Micro Channel Architecture. Также хорошо известен и не нуждается в дальнейшем обсуждении успех программного обеспечения с открытым исходным кодом. Единственно, что отсутствует в полной компьютерной экосистеме, основанной на открытых стандартах — открытая микропроцессорная архитектура, открывающая рынок также для меньших производителей микропроцессоров и для нишевых продуктов.

Настоящее руководство основано на обсуждении на различных интернет-форумах. Спецификации являются предварительными. Разработка нового стандарта извлекла бы пользу из длинной экспериментальной фазы, и было бы неразумно зафиксировать стандарт на данной, начальной, стадии.

## 1.3. Цели дизайна

Ранее опубликованные открытые наборы команд подходят для малых, дешёвых микропроцессоров, предназначенных для встроенных систем, однокристалльных систем, реализаций на основе ПЛИС для научных экспериментов, и т.п. Предлагаемая архитектура ForwardCom развивает эту идею, и нацелена на дизайн, который может превзойти существующие высокопроизводительные процессоры.

Набор команд ForwardCom основан на следующих приоритетах:

- Набор команд должен обладать простым и последовательным модульным дизайном.
- Набор команд должен представлять подходящий компромисс между принципами RISC, позволяющими быстрое декодирование, и принципами CISC, делающими возможным выполнение большей работы в расчёте на одну команду и более эффективное использование кэша кода.
- Дизайн должен быть расширяемым, чтобы новые команды и расширения можно было добавлять последовательным и предсказуемым образом.
- Дизайн должен быть масштабируемым, чтобы он подходил и для малых компьютеров с памятью на кристалле, и для огромных суперкомпьютеров с очень большими векторами.
- Дизайн должен быть конкурентоспособен по сравнению с имеющимися коммерческими, и сосредоточен на высокопроизводительных приложениях завтрашнего дня, а не низкопроизводительных приложениях дня вчерашнего.
- Поддержка векторов и других черт, которые, как давно доказано, существенны для высокой производительности, должна быть фундаментальной частью дизайна, а не неуклюжим отроостком.
- Фундаментальной частью дизайна должна быть безопасность, а не специально добавляемые заплатки.
- Набор команд должен быть спроектирован в открытом процессе, с участием международного сообщества программистов и „железячников“, подобно работе по стандартизации в других технических областях.

- Весь вертикальный дизайн должен быть непроприетарным, и должен позволять всем создавать совместимое программное обеспечение, аппаратное обеспечение, и оборудование, для тестирования, отладки, и эмуляции.
- Решения о командах и расширениях должны определяться не краткосрочными маркетинговыми соображениями монополистической микропроцессорной промышленности, а долгосрочными нуждами всего сообщества программистов, „железячников“, и организаций.
- Дизайн должен позволять построение совместимого снизу вверх программного обеспечения, которое будет работать без перекомпиляции на будущих процессорах с большего размера векторными регистрами.
- Дизайн должен позволять специфичные для приложения расширения.
- Базовые аспекты экосистемы — стандарт для ABI, ассемблер, компиляторы, библиотеки функций, системные функции, каркас пользовательского интерфейса, и т.п. — также, ради максимальной совместимости, должны быть стандартизированы.

Новому набору команд нелегко будет добиться успеха на коммерческом рынке, даже если этот набор лучше, нежели устаревшие системы, поскольку рынок предпочитает обратную совместимость с существующим программным и аппаратным обеспечением. Вряд ли набор команд ForwardCom станет успешным коммерческим продуктом, но обсуждение идеального набора команд и программной экосистемы всё же могло бы быть полезным. Проект ForwardCom уже породил много важных идей, так что его стоит разрабатывать дальше, даже если мы не узнаем, когда он закончится. Настоящая работа может быть полезной, если по другим причинам должна возникнуть необходимость во введении нового набора команд. Работа будет особенно полезной для больших векторных процессоров; для приложений, в которых важна безопасность; для операционных систем реального времени; а равно и для проектов, в которых были бы препятствием патентные и лицензионные ограничения иных архитектур.

Предложения данного документа могут также быть полезны как источник вдохновения и для научных экспериментов. Многие идеи не зависят от деталей дизайна, и могут быть реализованы в существующих системах.

## 1.4. Сравнение с другими открытыми наборами команд

Было предложено несколько других открытых наборов команд, наиболее заметные — RISC-V и OpenRISC. Оба имеют чистый RISC-дизайн, с, преимущественно, фиксированным 32-разрядными командными словами. Эти наборы команд подходят для малых систем, где экономится место на кремнии, но они не спроектированы для высокопроизводительных суперскалярных процессоров, и не сосредоточены на деталях, критичных для достижения максимальной производительности в больших системах. Настоящее предложение рассматривается как следующий шаг к созданию открытого набора команд, который действительно эффективнее наилучших сегодняшних коммерческих наборов команд.

Типичный RISC-дизайн с размером команды, ограниченным 32 разрядами, оставляет ограниченное пространство для непосредственно заданных констант и адресов находящихся в памяти операндов. Программе среднего размера потребуются 32-разрядные относительные адреса находящихся в статической памяти операндов, во избежание переполнения во время процесса перерасмещения адресов компоновщиком. Тридцатидвухразрядный относительный адрес требует нескольких команд в чистых RISC-дизайнах. Например, для прибавления находящегося в памяти операнда к регистру в чистом RISC-дизайне с только 32-разрядными командными словами вам потребуется пять команд: (1) загрузить младшую часть 32-разрядного адресного смещения; (2) прибавить старшую часть 32-разрядного адресного смещения; (3) прибавить точку отсчёта или указатель команд к этому значению; (4) прочесть операнд, находящийся по вычисленному адресу памяти; (5) выполнить желаемое сложение. Дизайн ForwardCom выполняет все указанные действия одной командой с удвоенным размером слова. Преимущество в скорости очевидно. Вычисление адреса, загрузка, и выполнение, чтобы достичь плавного прохода одной команды за такт в каждой ветви конвейера, осуществляются на своих стадиях конвейера,

Другое важное отличие состоит в том, что предыдущие RISC-дизайны имели ограниченную поддержку векторных операций. Дизайн ForwardCom вводит новую систему векторных регистров переменной длины, более эффективную и гибкую, чем наилучшие имеющиеся коммерческие дизайны. Эффективные векторные операции существенны для получения максимальной производительности, и были важным приоритетом в предлагаемом здесь дизайне ForwardCom.

## 1.5. Литература и ссылки

- Krste Asanović and David Patterson: "The Case for Open Instruction Sets. Open ISA Would Enable Free Competition in Processor Design". Microprocessor Report, August 18, 2014.  
[www.linleygroup.com/mpr/article.php?id=11267](http://www.linleygroup.com/mpr/article.php?id=11267)
- RISC-V: The Free and Open RISC Instruction Set Architecture [riscv.org](http://riscv.org)
- OpenRISC: [openrisc.io](http://openrisc.io)
- Open Cores: [opencores.org](http://opencores.org)
- Agner Fog: Proposal for an ideal extensible instruction set, 2015. A blog discussion thread that initiated the ForwardCom project.  
[www.agner.org/optimize/blog/read.php?i=421](http://www.agner.org/optimize/blog/read.php?i=421)
- Agner Fog: Stop the instruction set war, 2009. Blog post about the problems with the x86 instruction set.  
[www.agner.org/optimize/blog/read.php?i=25](http://www.agner.org/optimize/blog/read.php?i=25)
- Darek Mihocka: Standard Need To Be Forward Looking, 2007. Blog post criticizing the x86 instruction set standard.  
[www.emulators.com/docs/nx02\\_standards.htm](http://www.emulators.com/docs/nx02_standards.htm). See also the following pages.

# Глава 2. Основы архитектуры

В данной главе приводится обзор наиболее важных черт архитектуры набора команд ForwardCom. Детали приводятся в последующих главах.

## 2.1. Полностью ортогональный набор команд

Набор команд ForwardCom — полностью ортогонален во всех отношениях. Одна и та же команда может использовать целочисленные операнды всех размеров и вещественные операнды всех точностей. Она может использовать регистровые операнды, операнды из памяти, или непосредственно заданные операнды. Она может также использовать много разных режимов адресации. Команды могут кодироваться в коротких формах с двумя операндами, в которых один и тот же регистр и как операнд–приёмник, и как операнд источник; или в более длинных формах с тремя операндами. Команда может работать со скалярами и векторами любого размера. Она может иметь предикаты или маски для условного выполнения для векторов на уровне элементов, и может иметь в качестве входных аргументов флаги — для определения режима округления, управления исключениями, и других деталей, там, где это нужно. Константные данные всех типов могут включаться в команды, и, для уменьшения размера команды, сжиматься различными способами.

### Обоснование

Ортогональность реализуется посредством стандартизированного модульного дизайна, что упрощает реализацию аппаратуры, а также делает компиляцию более простой и гибкой, и облегчает компилятору преобразование линейного кода в векторный.

Поддержка непосредственно заданных констант всех типов является улучшением, по сравнению с имеющимися системами. Большинство имеющихся систем хранят вещественные константы в сегменте данных, и обращаются к ним через 32–разрядные адреса в коде команды. Это является пустой тратой места в кэше данных и вызывает много промахов кэша, так как данные разбросаны по разным секциям. Замена 32–разрядного адреса 32–разрядной непосредственно заданной константой делает код более эффективным и не увеличивает размер кода. Расширения, позволяющие 64–разрядные непосредственно заданные константы, возможны ценой наличия команд тройной длины. Однако эта возможность в базовом дизайне ForwardCom не требуется, поскольку, по объяснённым ниже причинам, приоритет состоял в минимизации количества разных размеров команд.

## 2.2. Размер команды

Набор команд ForwardCom для кода использует 32–разрядное слово. Команда может состоять из одного или двух 32–разрядных слов, с возможным расширением на три или более слова. Плотность кода можно увеличить, используя малые команды половинного размера, а равная 32 разрядам единица размера сохраняется соединением малых команд по две. Невозможно перейти во вторую малую команду из такой пары малых команд. В будущем можно добавить расширения с командами размером в три или более слова.

### Обоснование

Архитектура CISC с многими разными размерами команд — неэффективна для суперскалярных процессоров, на которых мы хотим выполнять несколько команд за такт. Декодирующий препроцессор — часто узкое место. Вы должны определить длину первой команды, прежде чем узнаете начало новой команды. „Декодирование длин команд“ по своей сути — последовательный процесс, что делает сложным декодирование нескольких команд за такт. У некоторых микропроцессоров, чтобы обойти это узкое место, есть дополнительный „кэш микроопераций“, находящийся после декодера.

Желательно иметь как можно меньше разных длин команд, и чтобы облегчить определение длины каждой команды. Мы хотим малый размер команды для наиболее употребляемых простых команд, но нам также



нужен большой размер команд, чтобы вместить вещи вроде большого набора регистров, команд с многими операндами, векторных операций с продвинутыми возможностями, 32-разрядных адресных смещений, и больших непосредственно заданных констант. Данное предложение — компромисс между компактностью кода, лёгким декодированием, и пространством для продвинутых возможностей.

## 2.3. Набор регистров

Имеется 32 регистра общего назначения (r0–r31) по 64 разряда в каждом, и 32 векторных регистра (v0–v31) переменной длины. Максимальная длина вектора — разная для разных реализаций аппаратуры. Регистры общего назначения можно использовать для целых чисел разрядности до 64 включительно и для указателей. Векторные регистры можно использовать для скаляров, либо для векторов, состоящих из целых и вещественных чисел.

Определяются следующие специальные регистры, видимые на уровне прикладной программы (все — 64-разрядные):

- указатель команд (Instruction pointer, IP);
- указатель секции данных (Data section pointer, DATAP);
- указатель блока окружения потока (Thread environment block pointer THREADP);
- указатель стека (Stack pointer, SP);
- численный управляющий регистр (Numeric control register, NUMCONTR).

Указатель стека идентичен r31. К другим специальным регистрам как к обычным регистрам обращаться нельзя.

Специального регистра флагов нет. Регистры r1–r7 и v1–v7 могут использоваться для масок, предикатов, и флагов для вещественных чисел, для управления такими атрибутами, как режим округления и управление исключениями.

Неиспользуемая часть регистра всегда устанавливается равной нулю. Это означает, что целочисленные операции с размером операнда, меньшим 64 разрядов, и векторные операции с размером вектора, меньшим максимального, всегда обнуляют неиспользуемые разряды регистра-приёмника.

### Обоснование

Количество регистров — компромисс между плотностью кода и гибкостью. Цена сброса регистров в память обычно важна лишь в критичном наиболее глубоко вложенном цикле, которому вряд ли нужно более 32 регистров.

Мы можем избежать ложных зависимостей от предыдущего содержимого регистра, обнулив все неиспользуемые разряды регистра, вместо того, чтобы оставлять их неизменными. Аппаратура может сэкономить энергию, отключив неиспользуемые части исполнительных модулей и шин данных.

Специальный регистр флагов нежелателен для кода, планирующего вычисления как посредник между последними, и для векторного кода.

Причина обработки вещественных скаляров в векторных регистрах, а не в отдельных регистрах, заключается в облегчении для компилятора преобразования скалярного кода, включающего вызовы функций, в векторный код. Вещественный код часто содержит вызовы функций из математической библиотеки. Если библиотечная функция имеет векторы переменной длины и на входе, и на выходе, то та же функция может использоваться и для скаляров, и для векторов, а компилятор может легко векторизовать код, содержащий такие вызовы библиотечных функций.

## 2.4. Поддержка векторов

Векторные регистры могут содержать целые числа размером в 8, 16, 32, 64, и, возможно, 128 разрядов, или вещественные числа одинарной, двойной, и, возможно, четырёхкратной точности. Все элементы вектора обязаны иметь один и тот же тип. Элементы вектора обрабатываются параллельно. Например, векторное сложение даёт сумму двух векторов за одну операцию.

Векторные регистры имеют переменную длину. Каждый векторный регистр имеет дополнительные разряды для хранения длины вектора. Максимальная длина вектора зависит от аппаратуры. Например, если аппаратура поддерживает максимальную длину вектора, равную 64 байтам, а конкретному приложению нужно лишь 16 байт, то длина вектора устанавливается равной 16.

Некоторым командам необходимо явно указывать длину вектора, например, для чтения вектора из памяти. Эти команды используют регистр общего назначения для указания длины вектора. Длина обычно указывается как количество байтов, а не количество элементов вектора.

Сведения о максимальной длине вектора предоставляет специальный регистр. Максимальная длина, поддерживаемая процессором, должна быть степенью двойки. Используемая длина не обязана быть степенью двойки. Если используемая длина больше максимальной, то используется максимальная длина.

Содержимое векторного регистра может произвольно интерпретироваться как имеющее любые поддерживаемые типы и размеры. Например, аппаратура не предотвращает применение целочисленных команд к векторам, содержащим вещественные данные. То, что код имеет смысл — на совести программиста.

## 2.5. Циклы по векторам

Чтобы сделать циклы по векторам более компактными, предоставляется специальный режим адресации. Он использует базовый указатель  $P$  и отрицательный индекс  $J$ , и вычисляет адрес находящегося в памяти операнда как  $P - J$ , где  $P$  и  $J$  — регистры общего назначения. Это делает возможным выполнение цикла по массиву так, как это показано следующим псевдокодом:

```
P = адрес массива
J = размер массива (в байтах)
L = максимальная длина вектора (зависит от процессора)
X = векторный регистр
P += J; // указывает на конец массива
while (J > 0) {
    X = некая_операция(X), [P-J], (длина вектора, J)
    J -= L;
}
```

Данный цикл работает следующим образом:  $P$  указывает на конец массива,  $J$  представляет собой количество оставшихся элементов массива, уменьшающееся до тех пор, пока цикл не завершится. Цикл читает по одному вектору, находящемуся по адресу  $[P - J]$ , за раз. На всех итерациях цикла, кроме последней,  $J$  больше максимальной длины вектора,  $L$ , что заставляет процессор использовать максимальную длину вектора. Если размер массива не кратен максимальной длине вектора, то на последней итерации цикл будет использовать вектор меньшей длины, чтобы поместить оставшееся количество элементов. Очевидно, что цикл может содержать любое количество операций чтения векторов, записи векторов, и векторных арифметических команд, используя тот же принцип.

Данный цикл будет работать на разных процессорах, с разными максимальными длинами векторов, не зная в момент компиляции максимальную длину вектора. Таким образом, одна и та же часть программного обеспечения будет работать на разных микропроцессорах, с разными длинами векторов, без необходимости компилировать отдельно для каждого микропроцессора. Ещё одно преимущество состоит в том, что по завершении цикла не нужно никакого дополнительного кода для обработки оставшихся элементов, в случае, если размер массива не кратен длине вектора.

### Обоснование

Большинство существующих систем имеют фиксированные длины векторов. Если разные процессоры имеют разные длины векторов, то вы должны компилировать код отдельно для каждой длины вектора. Каждый раз, когда на рынке появляется новый процессор с большей длиной векторов, вы должны откомпилировать новую версию кода, для новой длины вектора, используя вновь определённые расширения набора команд. Для нового программного обеспечения обычно требуется несколько лет для разработки и выхода на основной рынок. Для производителей программного обеспечения дорого разрабатывать и сопровождать разные версии их кода для каждой изредка появляющейся длины вектора.

Ещё одна проблема существующих систем заключается в том, что невозможно сохранить векторный регистр способом, который гарантированно совместим с последующими процессорами, имеющими более длинные вектора. Этой проблемы в дизайне ForwardCom нет, ибо длина вектора сохраняется в векторном регистре. Предоставляются команды для сохранения и восстановления векторов переменной длины и для сохранения лишь той части векторного регистра, которая действительно используется.

Дизайн ForwardCom делает возможным получение преимуществ нового процессора с более длинными векторными регистрами сразу же, без перекомпиляции кода. Метод выполнения цикла, описанный выше, делает это легко и очень эффективно. Вам не нужны разные версии кода для разных процессоров.

Можно получить тот же самый эффект и без специального режима отрицательной адресации, если обратить знак  $J$  и разрешить отрицательное значение в регистре, указывающем длину вектора, в то же время используя абсолютную величину в качестве длины вектора. Это решение менее элегантно и более запутанно, но его можно включить в дизайн ForwardCom, разрешив отрицательные значения при указании длины вектора.

Разворачивание цикла, как правило, не нужно: накладные расходы на цикл уже уменьшены до одной команды (вычитания и перехода, если положительно), и суперскалярный процессор выполнит много итераций параллельно, если цепочки зависимости не слишком длинны. Разворачивание цикла с многими аккумуляторами может быть полезно для сокращения проходящей через весь цикл зависимости. В этом случае вы либо вставляете в развёрнутом коде после каждой секции команды управления циклом, либо вычисляете количество итераций цикла перед его началом.

У дизайна ForwardCom нет практического ограничения на длину вектора, которую может поддерживать микропроцессор. Большой микропроцессор с очень длинными векторами может быть полезен для вычислений с высокой степенью параллелизма по данным. Обсуждались и другие способы достижения высокой производительности при параллельной обработке данных, такие, как вращающиеся стеки регистров и программная конвейеризация, но был сделан вывод, что длинные векторы — метод, который может быть реализован эффективнее всего и в микропроцессоре, и в компиляторе.

## 2.6. Максимальная длина вектора

Максимальная длина векторных регистров будет разной у разных процессоров. Максимальная длина должна быть степенью двойки, и может быть столь большой, насколько желательно, и должна быть не меньше 16 байт. Каждая команда может использовать меньшую длину, которой не нужно быть степенью двойки.

Максимальная длина может быть разной для элементов разных размеров. Например, максимальная длина для 32-разрядных целых чисел может быть равна 32 байтам, чтобы содержать восемь целых чисел, тогда как максимальная длина для 8-разрядных целых чисел могла бы быть равной 16 байтам, чтобы содержать 16 меньших чисел. Однако для разных типов с одним и тем же размером элемента максимальная длина должна быть одной и той же. Например, максимальная длина для вещественных чисел двойной точности должна быть такой же, что и для 64-разрядных целых чисел, поскольку циклы наверняка содержат оба типа, когда целочисленные вектора используются как маски для вещественных векторов. Максимальная длина для 32-разрядных элементов не может быть меньше, чем для элементов другого размера или типа операнда. Данное правило гарантирует возможность сохранения полного вектора при использовании 32-разрядного типа операнда.

Максимальная длина вектора, как правило, должна быть одна и та же для всех команд с одним и тем же типом данных. Однако могут быть исключения для команд, которые особенно дорого реализовать.

Несколько специальных регистров дают сведения о максимальной длине вектора, поддерживаемой аппаратурой, для каждого размера элемента вектора. Прикладная программа или операционная система может уменьшить максимальный размер вектора, что может быть полезным, если меньший размер вектора более подходит для конкретной цели.

Также можно уменьшить размер вектора для целей эмуляции. Виртуальные векторные регистры, которые больше, нежели поддерживает аппаратура, могут эмулироваться с помощью ловушек (синхронных прерываний), чтобы проверить функциональность программы на процессорах с большей максимальной длиной вектора, чем доступно в настоящий момент.

Когда команда указывает более длинный вектор, чем максимально возможно, то, если не активирована эмуляция больших векторов, используется максимальная длина. Это необходимо для эффективной реализации циклов по векторам, как описано выше, на с. 9.

## 2.7. Маски команд

Большинство команд может иметь регистр маски, который может использоваться для условного выполнения и для указания различных опций. Команды, работающие с регистрами общего назначения, в качестве регистра маски или предиката используют один из регистров  $r1-r7$ . Бит 0 регистра маски указывает, выполняется ли команда, или нет; бит 1 — должен ли результат быть нулём или остаться неизменным, в случае, когда операция не выполняется.

Данный механизм может быть векторизован. Команды, работающие с векторными регистрами, в качестве регистров маски используют векторные регистры  $v1-v7$ . Вычисление над каждым элементом вектора обусловлено соответствующим элементом регистра маски.

Дополнительные разряды регистра маски используются для различных опций, перекрывая значения в численном управляющем регистре.

## 2.8. Режимы адресации

Вся адресация памяти — относительно некоторого базового указателя. Находящийся в памяти операнд может адресоваться с помощью одной из двух общих форм:

$$\text{Address} = \text{BP} + \text{IX} * \text{SF}$$
$$\text{Address} = \text{BP} + \text{OS}$$

Здесь BP — 64-разрядный базовый указатель, IX — 64-разрядный индексный регистр, SF — масштабирующий множитель, а OS — непосредственно заданное смещение. Базовый указатель присутствует всегда, остальные элементы — необязательны.

Базовый указатель, BP, может быть регистром общего назначения, указателем секции данных (DATAP), указателем команд (IP), или указателем стека (SP).

Индексный регистр, IX, может быть одним из регистров  $r0-r30$ . Значение, равное 31, означает отсутствие индексного регистра.

К индексному регистру можно применить лимит, в виде 16-разрядного беззнакового целого числа. Если индексный регистр больше (в смысле беззнакового сравнения), чем лимит, то возбуждается синхронное прерывание (trap).

Масштабирующий множитель, SF, равен размеру (в байтах) для скалярных операндов и для размножений значений. Для векторных операндов масштабирующий множитель равен 1. Как объяснено на с. 9, также доступен специальный режим адресации с  $\text{SF} = -1$ .

Смещение, OS, представляет собой расширенное знаком восьми-, шестнадцати-, или тридцатидвухразрядное число. Восьмиразрядные смещения умножаются на размер операнда. У шестнадцати- и тридцатидвухразрядных смещений множителя нет.

Поддержка режимов адресации и с индексом, и со смещением, — необязательна.

Переходы и вызовы указывают целевой адрес относительно указателя команд. Относительный адрес указывается со знаковым смещением размером в 8, 16, 24, или 32 разряда, умноженным на размер слова кода, равный 4 байтам. При 32-разрядном смещении охватывается адресный диапазон  $\pm 8\text{ГБ}$ .

### Обоснование

Используется 64-разрядное адресное пространство. Относительная адресация используется для того, чтобы в коде команды избежать 64-разрядных адресов. В том редком случае, когда 64-разрядный абсолютный адрес необходим, он должен быть загружен в регистр, который затем используется как указатель.

Адресация с индексом, масштабируемым размером операнда, полезна для массивов. К индексу может быть применён лимит, так что границы массивов можно проверить без каких-либо дополнительных команд.

Адресация с отрицательным индексом полезна для эффективной реализации циклов по векторам, описанной на с. 9.

Указанные здесь режимы адресации охватят все распространённые применения, включая массивы, векторы, структуры, классы, и кадры стека.

Поддержка режима адресации с базовым указателем, индексом, и непосредственно заданным смещением, — необязательна, ибо это потребовало бы двух сумматоров на стадии конвейера, предназначенной для вычисления адреса, что могло бы ограничить максимальную тактовую частоту.

# Глава 3. Форматы команд

## 3.1. Форматы и шаблоны

Все команды используют один из общих шаблонов форматов, показанных ниже (самые старшие разряды — слева). Базовая компоновка 32-разрядного слова кода показана в шаблоне А. Шаблоны В, С и D получаются из шаблона А заменой 8, 16, или 24 разрядов, соответственно, непосредственно заданными константами. Команды двойного и тройного размеров можно построить, добавив к одному из этих шаблонов одного или двух 32-разрядных слов. Например, шаблон А с дополнительным 32-разрядным словом, содержащим данные, называется А2. Шаблон Е2 представляет собой расширение шаблона А, в котором второе слово кода содержит дополнительное регистровое поле, дополнительные разряды кода операции, разряды опций, и данные.

Некоторые малые часто используемые команды можно закодировать в малом (tiny) формате, использующем половину слова кода. Две таких малых команды можно, используя шаблон Т, упаковать в одно слово кода. Неспаренная малая команда, чтобы заполнить полное слово кода, должна комбинироваться с малого размера командой NOP.

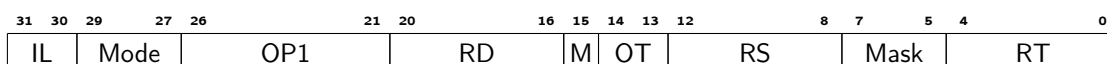


Рис. 3.1.1. Шаблон А. Имеется три регистровых операнда и регистр маски.

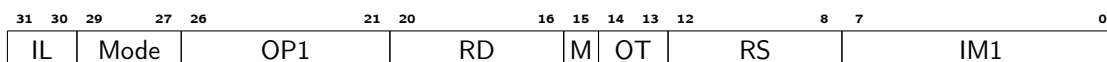


Рис. 3.1.2. Шаблон В. Имеется два регистровых операнда и 8-разрядная непосредственно заданная константа.

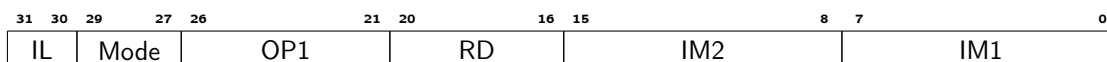


Рис. 3.1.3. Шаблон С. Имеется один регистровый операнд и две 8-разрядных непосредственно заданных константы.

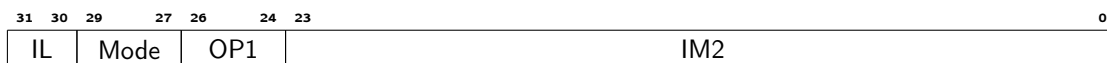


Рис. 3.1.4. Шаблон D. Нет регистрового операнда, но есть непосредственно заданная 24-разрядная константа.

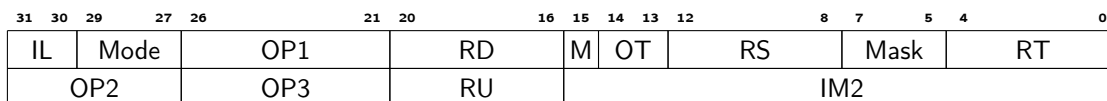


Рис. 3.1.5. Шаблон Е2. Имеется 4 регистровых операнда, маска, 16-разрядная непосредственно заданная константа, и дополнительные разряды для кода операции или опций.

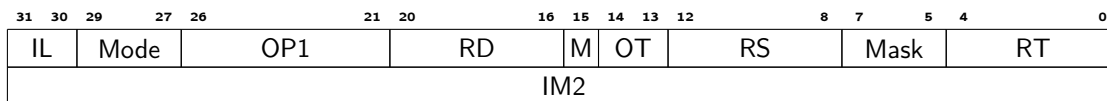


Рис. 3.1.6. Шаблон А2. Два слова. Как А, но с дополнительной 32-разрядной непосредственно заданной константой.

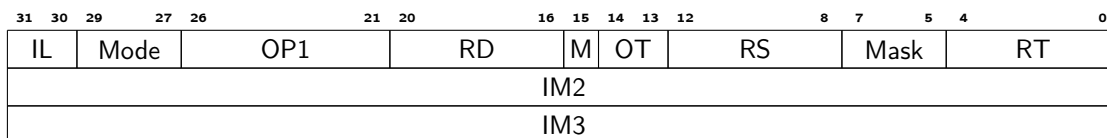


Рис. 3.1.7. Шаблон А3. Три слова. Как А, но с двумя дополнительными 32-разрядными непосредственно заданными константами.

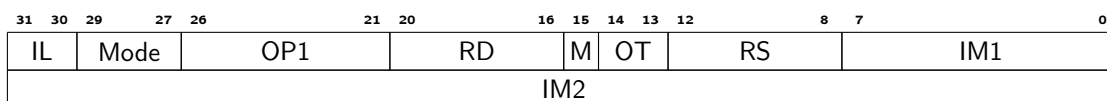


Рис. 3.1.8. Шаблон В2. Как В, но с дополнительной 32-разрядной непосредственно заданной константой.

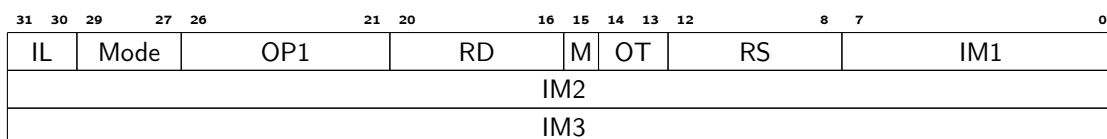


Рис. 3.1.9. Шаблон В3. Как В, но с двумя дополнительными 32-разрядными непосредственно заданными константами.

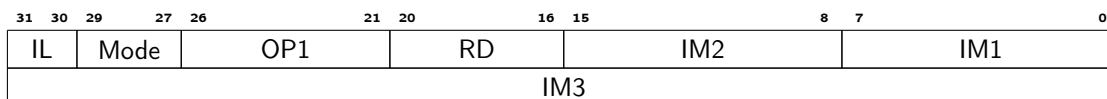


Рис. 3.1.10. Шаблон С2. Как С, но с дополнительной 32-разрядной непосредственно заданной константой.

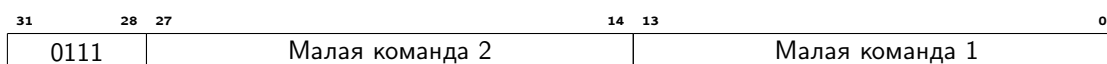


Рис. 3.1.11. Шаблон Т. Одно слово, содержащее две малых команды.



Рис. 3.1.12. Формат каждой малой команды.

Смысл каждого поля описан в следующей таблице.

Таблица 3.1.1. Поля в шаблоне команды

| Имя поля | Смысл         | Значения  |
|----------|---------------|---|
| IL       | Длина команды | 0 или 1: 1 слово = 32 разряда<br>2: 2 слова = 64 разряда<br>3: 3 или более слов                                     |
| Mode     | Формат        | Определяет формат шаблона и использование каждого поля. Когда необходимо, расширяется разрядами М. Детали см. ниже. |

|               |                                    |   |
|---------------|------------------------------------|---|
| OP1           | Код операции                       | Определяет операцию, например, сложение или пересылку.  |
| OT            | Тип и размер (OS) операнда         | 0: 8-разрядное целое, OS = 1 байт<br>1: 16-разрядное целое, OS = 2 байта<br>2: 32-разрядное целое, OS = 4 байта<br>3: 64-разрядное целое, OS = 8 байт<br>4: 128-разрядное целое, OS = 16 байт (необязательно)<br>5: вещественное одинарной точности, OS = 4 байта<br>6: вещественное двойной точности, OS = 8 байт<br>7: вещественное четырёхкратной точности, OS = 16 байт (необязательно)<br>Когда необходимо, поле OT расширяется разрядами M. |
| RD            | Регистр-приёмник                   | r0–r31 или v0–v31. Также используется для первого операнда-источника, если формат команды не указывает достаточное количество операндов.  |
| RS            | Регистр-источник                   | r0–r31 или v0–v31. Регистр-источник, указатель, индекс, или регистр длины вектора.  |
| RT            | Регистр-источник                   | r0–r31 или v0–v31. Регистр-источник или указатель.  |
| RU            | Регистр-источник                   | r0–r31 или v0–v31. Регистр-источник.  |
| Mask          | Регистр маски                      | 0 означает отсутствие маски. 1–7 означает, что для маски и битов опций используется регистр общего назначения или векторный регистр.  |
| M             | Тип операнда или режим.            | Расширяет поле Mode, когда разряды 1 и 2 этого поля оба равны нулю (регистры общего назначения). В противном случае расширяет поле OT (векторные регистры).   |
| OP2           | Код операции                       | Расширение кода операции.   |
| IM1, IM2, IM3 | Непосредственно заданные константы | 8-, 16-, 32-, или 64-разрядный непосредственно заданный операнд, или адресное смещение, или разряды опций. Соседние поля IM могут быть слиты вместе.  |
| OP3           | Опции                              | Разряды опций, разряды режима, или непосредственно заданные константы.  |

Согласно приводимой ниже таблице, у команд есть несколько различных форматов, определяемых полем IL и разрядами режима.

Таблица 3.1.2. Список форматов команд

| Имя формата | IL | Mode | Шаблон | Использование  |
|-------------|----|------|--------|--|
| 0.0         | 0  | 0    | A      | Три операнда (RD, RS, RT), являющихся регистрами общего назначения.  |
| 0.1         | 0  | 1    | B      | Два регистра общего назначения (RD, RS) и 8-разрядный непосредственный операнд (IM1).  |
| 0.2         | 0  | 2    | A      | Три операнда (RD, RS, RT), являющихся векторными регистрами.   |
| 0.3         | 0  | 3    | B      | Два векторных регистра (RD, RS) и размножаемый 8-разрядный непосредственный операнд (IM1).   |
| 0.4         | 0  | 4    | A      | Один векторный регистр (RD), находящийся в памяти операнд с указателем (RT) и длина вектора, указанная в регистре общего назначения (RS).  |
| 0.5         | 0  | 5    | A      | Один векторный регистр (RD) и находящийся в памяти операнд с базовым указателем (RT). Отрицательный индекс и длина вектора указаны в RS. Используется для циклов по векторам, как объяснено на с. 9. |
| 0.6         | 0  | 6    | A      | Один векторный регистр (RD) и находящийся в памяти скалярный операнд, имеющий базовый указатель (RT) и индекс (RS), умножаемый на размер операнда.   |

|       |   |          |      |   |
|-------|---|----------|------|---|
| 0.7   | 0 | 7        | B    | Один векторный регистр (RD) и находящийся в памяти скалярный операнд, имеющий базовый указатель (RS) и 8-разрядное смещение.  |
| 0.8   | 0 | 0<br>M=1 | A    | Один регистр общего назначения (RD) и находящийся в памяти операнд, имеющий базовый указатель (RT) и индекс (RS), умножаемый на размер операнда.  |
| 0.9   | 0 | 1<br>M=1 | B    | Один регистр общего назначения (RD) и находящийся в памяти операнд, имеющий базовый указатель (RT) и 8-разрядное смещение.  |
| 1.0   | 1 | 0        | A    | Одноформатные команды. Три регистра общего назначения в качестве операндов.   |
| 1.1   | 1 | 1        | C    | Одноформатные команды. Один регистр общего назначения и 16-разрядный непосредственный операнд.  |
| 1.2   | 1 | 2        | A    | Одноформатные команды. Три векторных регистра в качестве операндов.   |
| 1.3   | 1 | 3        | B, C | Одноформатные команды. Два векторных регистра и разнотомжаемый 8-разрядный непосредственный операнд, либо один векторный регистр и разнотомжаемый 16-разрядный операнд.   |
| 1.4   | 1 | 4        | B    | Команды перехода с двумя регистровыми операндами и 8-разрядным смещением.   |
| 1.5   | 1 | 5        | C, D | Команды перехода с одним регистровым операндом, 8-разрядной константой (IM2), и 8-разрядным смещением (IM1); либо нет регистрового операнда, но есть 24-разрядное смещение.   |
| 1.8   | 1 | 0<br>M=1 | B    | Одноформатные команды. Два регистра общего назначения и 8-разрядный непосредственный операнд.   |
| T     | 1 | 6-7      | T    | Две малых команды.  |
| 2.0   | 2 | 0        | A2   | Два регистра общего назначения (RD, RS) и находящийся в памяти операнд с базовым указателем (RT) и 32-разрядным смещением (IM2).  |
| 2.1   | 2 | 1        | A2   | Три регистра общего назначения и 32-разрядный непосредственный операнд IM2.   |
| 2.2   | 2 | 2        | A2   | Один векторный регистр (RD) и находящийся в памяти операнд с базовым указателем (RT) и 32-разрядным смещением (IM2). Длина вектора указывается регистром общего назначения RS.                                      |
| 2.3   | 2 | 3        | A2   | Три векторных регистра и разнотомжаемый 32-разрядный непосредственный операнд IM2.  |
| 2.4.0 | 2 | 4        | E2   | OP3=00xxxx. Два векторных регистра (RD, RU) и находящийся в памяти скалярный операнд с базовым регистром (RT) и 16-разрядным смещением (IM2), расширяемым до длины (RS).  |
| 2.4.1 | 2 | 4        | E2   | OP3=01xxxx. Два векторных регистра (RD, RU) и находящийся в памяти скалярный операнд с базовым регистром (RT), 16-разрядным смещением (IM2), длиной (RS).   |
| 2.4.2 | 2 | 4        | E2   | OP3=10xxxx. Два векторных регистра (RD, RU) и находящийся в памяти операнд с базовым регистром (RT), отрицательным индексом (RS), and length (RS). Optional support for offset $IM2 \neq 0$ , otherwise $IM2 = 0$ . |
| 2.4.3 | 2 | 4        | E2   | OP3=11xxxx. Два векторных регистра (RD, RU) и находящийся в памяти скалярный операнд с базовым регистром (RT), масштабируемым индексом (RS), и лимитом $RS \leq IM2$ (беззнаково).                                  |



|       |   |          |            |  |
|-------|---|----------|------------|--|
| 2.5   | 2 | 5        | E2         | Три векторных регистра (RD, RS, RT) и разнорможаемое 16-разрядное непосредственно заданное целое число IM2. IM2 сдвигается влево на значение, указанное 6-разрядной беззнаковой величиной OP3, если OP3 не используется для других целей. RU обычно не используется. |
| 2.6   | 2 | 6        | A2         | Одноформатные команды. Три регистра общего назначения и 32-разрядный непосредственный операнд.   |
| 2.7   | 2 | 7        | A2, B2, C2 | Команды перехода (OP1 < 16). Одноформатные команды. Три векторных регистра и 32-разрядный непосредственный операнд.  |
| 2.8.0 | 2 | 0<br>M=1 | E2         | OP3=00xxxx. Три регистра общего назначения (RD, RS, RU) и находящийся в памяти операнд с базовым регистром (RT) и 16-разрядным смещением (IM2).  |
| 2.8.1 | 2 | 0<br>M=1 | E2         | OP3=01xxxx. Два регистра общего назначения (RD, RU) и находящийся в памяти операнд с базовым регистром (RT), индексом (RS), и без масштабирования. Необязательная поддержка для смещения $IM2 \neq 0$ , иначе $IM2 = 0$ .  |
| 2.8.2 | 2 | 0<br>M=1 | E2         | OP3=10xxxx. Два регистра общего назначения (RD, RU) и находящийся в памяти операнд с базовым регистром (RT) и масштабируемым индексом (RS). Необязательная поддержка для смещения $IM2 \neq 0$ , иначе $IM2 = 0$ .   |
| 2.8.3 | 2 | 0<br>M=1 | E2         | OP3=11xxxx. Два регистра общего назначения (RD, RU) и находящийся в памяти операнд с базовым регистром (RT), масштабируемым индексом (RS), и лимит $RS \leq IM2$ (беззнаково).   |
| 2.9   | 2 | 1<br>M=1 | E2         | Три регистра общего назначения (RD, RS, RT) и 16-разрядное непосредственно заданное целое число IM2. IM2 сдвигается влево на значение, указанное 6-разрядной беззнаковой величиной OP3, если OP3 не используется для других целей. RU обычно не используется.        |
| 3.0   | 3 | 0        | A3, B3     | Команды перехода. Одноформатные команды с регистрами общего назначения в качестве операндов. Необязательно.  |
| 3.1   | 3 | 1        | A3         | Три регистра общего назначения и 64-разрядный непосредственно заданный операнд. Необязательно.   |
| 3.2   | 3 | 2        | A3         | Одноформатные векторные команды. Необязательно.  |
| 3.3   | 3 | 3        | A3         | Три векторных регистра и разнорможаемый 64-разрядный непосредственно заданный операнд. Необязательно.  |
| 3.8   | 3 | 0<br>M=1 |            | В настоящее время не используется.   |
| 4.x   | 3 | 4-7      |            | Зарезервировано для последующих команд, размером в 4 и более слова.  |

## 3.2. Кодирование операндов

### Тип операнда

Тип и размер операндов определяется полем OT, как указано выше. Если поля OT нет, то, по умолчанию, тип операнда — 64-разрядное целое (OS = 8).

### Тип регистра

Команды могут использовать либо регистры общего назначения, либо векторные регистры. Регистры общего назначения используются и для операндов-источников, и для операндов-приёмников, и для масок, если режим равен 0 или 1 (с M = 0 или 1). Векторные регистры используются и для операндов-источников,

и для операндов–приёмников, и для маск, если режим равен значению между 2 и 7. Равное нулю значение поля маски означает, что маски нет, и операция является безусловной.

## Регистры–указатели

Команды с находящимся в памяти операндом всегда используют адреса относительно базового указателя. Базовый указатель может быть регистром общего назначения, указателем секции данных, или указателем команд. Базовый указатель определяется полем RS или RT. Это поле интерпретируется следующим образом.

Команды с форматами без смещения или с 8–разрядным смещением (0.4–0.9) могут использовать любой из регистров r0–r31 в качестве базового указателя. Регистр r31 является указателем стека.

Команды с форматами, имеющими 16–разрядное или 32–разрядное смещение (2.0, 2.2, 2.4, 2.8), могут использовать те же регистры, кроме r29, заменяемого указателем секции данных (DATAP), и r30, заменяемого указателем команд (IP). Это применимо также и к форматам с неиспользуемым 16–разрядным смещением (форматы 2.4.2 и 2.4.3).

Малые команды, имеющие находящийся в памяти операнд, в качестве указателя в 4–разрядном RS поле могут использовать r0–r14 или указатель стека (r31) — равное 15 значение поля RS обозначает указатель стека.

## Индексные регистры

Команды с форматами, имеющим индекс, в качестве индекса могут использовать r0–r30. Значение в поле индекса (RS), равное 31, означает отсутствие индекса. Знаковый индекс умножается на размер операнда (OS) для форматов 0.6, 0.8, 2.4.3, 2.8.2, 2.8.3; на 1 для формата 2.8.1; или -1 для форматов 0.5 и 2.4.2. Результат складывается со значением базового указателя.

## Смещения

Смещения могут быть восьми–, шестнадцати–, или тридцатидвухразрядными. Значение смещения расширяется знаком до 64 разрядов. Восьмиразрядное смещение умножается на размер операнда (OS), определяемый полем OT. Шестнадцатиразрядное или тридцатидвухразрядное смещение не масштабируется. Результат складывается со значением базового указателя.

Поддержка режимов адресации и с индексом, и со смещением (форматы 2.4.2, 2.8.1, 2.8.3) — необязательна. Если этот тип адресации, требующий двух сложений, не поддерживается, то смещение в IM2 должно быть нулём.

## Лимит для индекса

В форматах 2.4.3 и 2.8.3 имеется 16–разрядный лимит для индексного регистра, что полезно для проверки границ массивов. Если значение индексного регистра, рассматриваемое как беззнаковое целое число, больше беззнакового лимита, то порождается ловушка (trap, синхронное прерывание).

## Длина вектора

Длина находящегося в памяти вектора указывается (для форматов 0.4, 0.5, 2.2, 2.4) в поле RS, регистрами r0–r30. Значение поля RS, равное 31, используется для обозначения скаляра той же длины, что и размер операнда (OS).

Значение длины находящегося в регистре вектора задаёт длину векторного операнда, находящегося в памяти, в байтах, а не в количестве элементов. Если это значение больше максимально возможной длины вектора, то используется максимальная длина вектора. Длина вектора может быть равна нулю. Поведение для отрицательных значений длины зависит от реализации: либо данное значение рассматривается как беззнаковое, либо используется абсолютная величина.

Длина вектора должна быть кратна размеру операнда (OS), указываемому полем OT. Если длина вектора не кратна размеру операнда, то поведение для частично определённого элемента вектора зависит от реализации.

Длина вектора для находящихся в векторных регистрах операндов–источников сохраняется в регистре.

## Комбинирование векторов с различными длинами

Длина вектора, находящегося в приёмнике, будет такой же, что длина вектора, находящегося в первом из операндов-источников, даже если первый операнд-источник использует поле RD.

Как следствие, при комбинировании векторов с разными длинами длина результата определяется порядком операндов.

Если операнды-источники имеют разные длины, то длины будут настроены так, как показано ниже. Если векторный операнд-источник слишком длинен, то лишние элементы игнорируются. Если векторный операнд-источник слишком короток, то отсутствующие элементы будут равны нулю.

Находящийся в памяти скалярный операнд (форматы 0.6 и 0.7) не размножается, а рассматривается как короткий вектор, и дополняется нулями до длины вектора-приёмника.

Размножаемый операнд, находящийся в памяти (формат 2.4.1) будет использовать длину вектора, заданную регистром, указанным в поле RS.

Размножаемый непосредственно заданный операнд будет использовать ту же длину вектора, что и операнд-приёмник.

## Непосредственно заданные константы

Непосредственно заданные константы могут иметь разрядность, равную 4, 8, 16, 32, и, необязательно, 64. Непосредственно заданные поля, как правило, выровнены на естественные адреса, и интерпретируются следующим образом.

Если поле OT указывает целочисленный тип, то поле (непосредственно заданное) рассматривается как целое число. Если поле меньше размера операнда, то оно расширяется знаком до подходящего размера. Если поле больше размера операнда, то излишние разряды игнорируются. Усечение слишком большого непосредственно заданного операнда не взведёт никакого условия переполнения.

Если поле OT указывает вещественный тип, то поле рассматривается так. Непосредственно заданные поля разрядности, меньшей 32, интерпретируются как знаковые целые числа, и преобразуются в вещественные числа желаемой точности. Тридцатидвухразрядное поле рассматривается как вещественное число одинарной точности, и, если необходимо, преобразуется к желаемой точности. Шестидесятичетырёхразрядное поле (если таковое поддерживается) интерпретируется как вещественное число двойной точности. Шестидесятичетырёхразрядное поле для типа операнда, являющегося числом одинарной точности, не допускается. Несколько необязательных команд формата 1.3C имеют в качестве операндов вещественные непосредственно заданные константы половинной точности, которые преобразуются в скаляр одинарной или двойной точности.

Шестнадцатиразрядные константы в форматах 2.5 и 2.9 могут сдвигаться влево на значение, указанное 6-разрядной беззнаковой величиной OP3, чтобы получить 64-разрядное знаковое значение. Всё, что окажется за пределами 64 разрядов, игнорируется. Сдвиг выполняется до какого-либо преобразования в вещественные числа. Никакого сдвига не выполняется, если OP3 используется в других целях.

Команду можно сделать компактной, если использовать наименьший размер поля непосредственно заданного операнда, в который помещается действительное значение константы.

## Регистры масок

Трёхразрядное поле маски указывает регистр маски. Если приёмником является регистр общего назначения, то используются регистры r1–r7; а если приёмник — векторный регистр, то используются регистры v1–v7. Значение поля маски, равное нулю, означает отсутствие маски и безусловное выполнение, с использованием опций, указанных в численном управляющем регистре.

Если маска является векторным регистром, то она рассматривается как вектор, имеющий тот же размер элемента, что и указанный полем OT. Каждый элемент регистра-маски применяется к соответствующим компонентам результата.

Смысл регистров флагов описан в следующем разделе.

## 3.3. Кодирование масок

Регистр маски может быть регистром общего назначения r1–r7 или векторным регистром v1–v7. Равное нулю значение поля маски означает отсутствие маски.

Разряды регистра маски кодируются так.

Таблица 3.3.1. Разряды регистра маски и численного управляющего регистра

| Номер разряда | Смысл   |
|---------------|---|
| 0             | Предикат или маска. Операция выполняется только в том случае, если этот разряд равен единице. Если этот разряд равен нулю, то операция не выполняется, и подавляются все условия проверки арифметических ошибок.  |
| 1             | Зануление. Этот разряд определяет результат, когда разряд №0 равен 0. Равенство нулю этого разряда зануляет результат, а равенство единице оставляет значение без изменения, т.е. результат — такой же, как и значение в первом операнде-источнике на входе. Разряд №1 не оказывает влияния, когда разряд №0 равен единице.                   |
| 2             | Обнаруживать беззнаковое целочисленное переполнение.  |
| 3             | Обнаруживать знаковое целочисленное переполнение.   |
| 6             | Распространять ошибочные разряды, обнаруженные разрядами №№2 и 3. Это экспериментальная возможность, см. с. 55.   |
| 7             | Возбудить прерывание, если обнаружено переполнение, указанное разрядами №2 или 3.   |
| 18-19         | Режим округления для вещественных чисел:<br>00 = к ближайшему или чётному<br>01 = в меньшую сторону<br>10 = в большую сторону<br>11 = к нулю  |
| 20            | Поддерживать денормализованные числа. Денормализованные вещественные числа рассматриваются как нуль (это, как правило, быстрее), когда данный разряд равен 0.   |
| 22            | Более хорошее распространение нечисел (NaN). Если равен нулю этот разряд, то строго придерживаться стандарта IEEE 754-2008 (или более позднего) для значений NaN. Равное единице значение разряда №22 улучшает распространение NaN и использует значения NaN для отслеживания ошибок вычислений с плавающей запятой. Детали описаны на с. 55. |
| 26            | Разрешить возбуждение прерывания при вещественном переполнении и при делении на нуль.   |
| 27            | Разрешить возбуждение прерывания при выполнении недопустимой операции с плавающей запятой.  |
| 28            | Разрешить возбуждение прерывания при вещественном антипереполнении и потере точности.   |
| 29            | Разрешить возбуждение прерывания при NaN в качестве входных аргументов команд сравнения и команд преобразования вещественных чисел в целые.   |

Разряды 8–9, 16–17, 24–25, и т.д. в векторном регистре маски могут использоваться подобно разрядам 0–1 для 8–разрядных и 16–разрядных операндов. Все прочие разряды зарезервированы для использования в будущем.

Векторные команды трактуют регистр маски как вектор с тем же размером элемента (OS), что и у операндов. У каждого элемента вектора-маски имеются битовые коды, перечисленные выше. У разных элементов вектора могут быть разные разряды маски.

Когда поле маски равно нулю или отсутствует, в качестве маски используется численный управляющий регистр (NUMCONTR). Когда у команды нет регистра маски, регистр NUMCONTR размножается для всех элементов вектора, используя столько разрядов регистра NUMCONTR, сколько указано размером операнда. В этом случае ко всем элементам вектора применяется одна и та же маска. Разряд №0 регистра NUMCONTR обязан быть равным 1.

### 3.4. Формат команд перехода, вызова, и ветвления

Большинство ветвлений в обычном коде основаны на результате арифметической или логической команды (АЛУ). Дизайн ForwardCom комбинирует команду АЛУ и условный переход в одну команду. Например, цикл можно реализовать одной командой, которая уменьшает счётчик и выполняет переход, если счётчик не

достиг нуля, либо увеличивает счётчик с отрицательного значения, и выполняет переход, если это значение не достигло нуля.

Переходы, вызовы, ветвления, и многопутёвые ветвления используют следующие форматы.

Таблица 3.4.1. Список форматов для команд передачи управления

| Формат | IL | Mode | OP1 | Шаблон | Описание   |
|--------|----|------|-----|--------|--|
| 1.4    | 1  | 4    | OPJ | B      | Короткая версия, с двумя регистровыми операндами (RD, RS) и 8-разрядным смещением (IM1).   |
| 1.5 C  | 1  | 5    | OPJ | C      | Короткая версия, с одним регистровым операндом (RD), и либо с 8-разрядной непосредственно заданной константой (IM2) и 8-разрядным смещением (IM1), либо с 16-разрядным смещением (склеены IM2 и IM1).                  |
| 1.5 D  | 1  | 5    | 0-7 | D      | Переход или вызов с 24-разрядным смещением.  |
| 2.7.0  | 2  | 7    | 0   | B2     | Версия двойного размера, с двумя регистровыми операндами и с 32-разрядным смещением (IM2). IM1 = OPJ.  |
| 2.7.1  | 2  | 7    | 1   | B2     | Версия двойного размера, с регистровым операндом-приёмником, регистровым операндом-источником, 16-разрядным смещением (младшая половина IM1) и 16-разрядным непосредственно заданным операндом (старшая половина IM2). |
| 2.7.2  | 2  | 7    | 2   | C2     | Версия двойного размера, с одним регистровым операндом (RD), одной 8-разрядной непосредственно заданной константой (IM2) и 32-разрядным смещением (IM3).   |
| 2.7.3  | 2  | 7    | 3   | C2     | Версия двойного размера, с одним регистровым операндом (RD), 8-разрядным смещением (IM2) и 32-разрядной непосредственно заданной константой (IM3).   |
| 2.7.4  | 2  | 7    | 4   | C2     | Двойного размера системный вызов, без OPJ, с 16-разрядной константой (IM1,IM2), и с 32-разрядной константой (IM3).   |
| 3.0.0  | 3  | 0    | 0   | C2     | Нет операции (NOP).  |
| 3.0.1  | 3  | 0    | 1   | B3     | Версия тройного размера, с регистровым операндом-приёмником, регистровым операндом-источником, 32-разрядным непосредственно заданным операндом (IM2), и 32-разрядным смещением (IM3). Необязательно.                   |

Команды перехода, вызова, и ветвления имеют знаковые смещения размером в 8, 16, 24, или 32 разряда, относительно указателя команд. Или, точнее, относительно конца команды. Данное смещение умножается на размер слова команды (равный 4 байтам), чтобы охватить диапазон в плюс-минус полкилобайта для коротких условных переходов с 8-разрядным смещением, в плюс-минус 32 мегабайта для 24-разрядных смещений, и плюс-минус 8 гигабайт для 32-разрядных смещений. Необязательный формат тройного размера включает безусловный переход и вызов с 64-разрядным абсолютным адресом.

Версия с шаблонами C и C2 не имеет поля OT. Когда поля OT нет, тип операнда — 64-разрядное целое. С вещественными типами использовать шаблоны C и C2 невозможно. Когда есть поле OT и M=1, команды будут использовать векторные регистры (только первый элемент). Иными словами, команды АЛУ-перехода будут использовать векторные регистры только когда указан вещественный тип (или, если таковой поддерживается, 128-разрядный целочисленный тип). Во всех иных случаях используются регистры общего назначения. Можно использовать поразрядные логические команды с векторными командами, указав вещественный тип.

Поле OPJ определяет операцию и условие перехода. Данное поле — 6-разрядное в версии одинарного размера, и 8-разрядное — в более длинных версиях. Два дополнительных разряда в более длинных версиях используются так: бит 6 зарезервирован для использования в будущем, и обязан быть равным нулю; а бит 7 может использоваться для указания поведения цикла, как подсказка для выбора оптимальной ветви

алгоритмом предсказания ветвлений.

Младшие 6 разрядов поля OPJ содержат следующие коды:

Таблица 3.4.2. Список команд передачи управления: переходы, вызовы, возвраты

| OPJ   | Бит 0 поля OPJ | Функция   | Комментарий                                      |
|-------|----------------|---|--|
| 0-7   | часть смещения | Безусловный переход с 24-разрядным смещением.   | Формат 1.5 D.                                    |
| 8-15  | часть смещения | Безусловный вызов с 24-разрядным смещением.   | Формат 1.5 D.                                    |
| 0-1   | инвертирован   | Знаково вычесть, и перейти, если отрицательно (sub_sign_jmpneg).                          | Форматы 1.4 и 2.7.0. Не для плавающей запятой.   |
| 2-3   | инвертирован   | Знаково вычесть, и перейти, если положительно (sub_sign_jmppos).                          | Форматы 1.4 и 2.7.0. Не для плавающей запятой.   |
| 4-5   | инвертирован   | Беззнаково вычесть, и перейти, если заём (sub_unsign_jmpborrow).                          | Форматы 1.4 и 2.7.0. Не для плавающей запятой.   |
| 6-7   | инвертирован   | Беззнаково вычесть, и перейти, если не ноль либо заём (sub_unsign_jmpnzc).                | Форматы 1.4 и 2.7.0. Не для плавающей запятой.   |
| 8-9   | инвертирован   | Вычесть, и перейти, если не ноль (sub_jmpnzero).  | Форматы 1.4 и 2.7.0. Не для плавающей запятой.   |
| 10-11 | инвертирован   | Знаково вычесть, и перейти, если переполнение (sub_sign_jmpovfl).                         | Форматы 1.4 и 2.7.0. Не для плавающей запятой.   |
| 12-15 |                | Зарезервировано для последующего использования.   | Форматы 1.4 и 2.7.0.                             |
| 16-17 | инвертирован   | Знаково сложить, и перейти, если отрицательно (add_sign_jmpneg).                          | Не для плавающей запятой.                        |
| 18-19 | инвертирован   | Знаково сложить, и перейти, если положительно (add_sign_jmppos).                          | Не для плавающей запятой.                        |
| 20-21 | инвертирован   | Беззнаково сложить, и перейти, если перенос (add_unsign_jmpcarry).                        | Не для плавающей запятой.                        |
| 20-21 | инвертирован   | Перейти, если один из операндов равен $\pm\infty$ или является NAN (cmp_float_jmpinfnan). | Для вещественных операндов.                      |
| 22-23 | инвертирован   | Беззнаково сложить, и перейти, если не ноль, либо перенос (add_unsign_jmpnzc).            | Не для плавающей запятой.                        |
| 22-23 | инвертирован   | Перейти, если один из операндов — денормализован (cmp_float_jmpsubnorm).                  | Для вещественных операндов.                      |
| 24-25 | инвертирован   | Сложить, и перейти, если не ноль (add_jmpnzero).  | Не для плавающей запятой.                        |
| 26-27 | инвертирован   | Знаково сложить, и перейти, если переполнение (add_sign_jmpovfl).                         | Не для плавающей запятой.                        |
| 28-29 | инвертирован   | Сдвинуть влево на n разрядов, и перейти, если не ноль (shift_jmpnzero).                   | Беззнаково сдвинуть вправо, если n отрицательно. |
| 30-31 | инвертирован   | Сдвинуть влево на n разрядов, и перейти, если перенос (shift_jmpcarry).                   | Беззнаково сдвинуть вправо, если n отрицательно. |
| 32-33 | инвертирован   | Знаково сравнить, и перейти, если ниже (cmp_sign_jmpbelow).                               |  |

|       |                      |  |                                |
|-------|----------------------|--|--------------------------------|
| 34-35 | инвертирован         | Знаково сравнить, и перейти, если выше (cmp_sign_jmpabove).  |                                |
| 36-37 | инвертирован         | Беззнаково сравнить, и перейти, если ниже (cmp_unsign_jmpbelow).   | Целочисленные операнды.        |
| 36-37 | инвертирован         | Перейти, если один из операндов — NAN (cmp_float_jmpunordered).  | Вещественные операнды.         |
| 38-39 | инвертирован         | Беззнаково сравнить, и перейти, если выше (cmp_unsign_jmpabove).   | Целочисленные операнды.        |
| 38-39 | инвертирован         | Перейти, если один из операндов равен $\pm\infty$ (cmp_float_jmpinf).  | Вещественные операнды.         |
| 40-41 | инвертирован         | Сравнить, и перейти, если не равно (cmp_jmpneq).   |                                |
| 42-43 | инвертирован         | Поразрядное И без записи результата, и перейти, если не ноль (test_jmpnzero).  |                                |
| 44-45 | инвертирован         | Поразрядное И, и перейти, если не ноль (and_jmpnzero).   |                                |
| 46-47 | инвертирован         | Поразрядное или, и перейти, если не ноль (or_jmpnzero).  |                                |
| 48-49 | инвертирован         | Поразрядное ИСКЛЮЧАЮЩЕЕ ИЛИ, и перейти, если не ноль (xor_jmpnzero).   |                                |
| 50-51 | инвертирован         | Проверить один разряд, и перейти, если не ноль (testbit_jmpnzero).   |                                |
| 52-53 | инвертирован         | Проверить один разряд векторного регистра, и перейти, если не ноль (testbit_jmpnzero).   |                                |
| 54-57 |                      | Зарезервировано для последующего использования.  |                                |
| 58-59 | 0 переход<br>1 вызов | Косвенно, с адресом указателя в регистре, указанном в RS, и смещением указателя в IM1 или IM2 (jump/call).                         | Форматы 1.4 и 2.7.0.           |
| 58-59 | 0 переход<br>1 вызов | Безусловный косвенный переход/вызов с 16-разрядным или 32-разрядным смещением, либо с 64-разрядным абсолютным адресом (jump/call). | Форматы 1.5 C, 2.7.2, и 3.0.1. |
| 60-61 | 0 переход<br>1 вызов | Использовать таблицу адресов относительно регистра, указанного в RD. RT = базовый адрес таблицы, RS = индекс*OS (jump/call).       | Формат 1.4, шаблон А.          |
| 60-61 | 0 переход<br>1 вызов | Безусловный переход или вызов по адресу в регистре, указанном в RS (jump/call).  | Формат 1.5.                    |
| 62    | 0                    | Возврат из функции (return).   | Формат 1.4.                    |
| 62    | 0                    | Возврат из системной функции (sys_return).   | Формат 1.5.                    |
| 63    | 1                    | Системный вызов. ID — в регистре, указанном в RT, блок разделяемой памяти — в RD, длина — в RS. Маски нет (sys_call).              | Формат 1.4, шаблон А.          |
| 63    | 1                    | Системный вызов. ID — в константах, блок разделяемой памяти — в RD, длина — в RS. Маски нет (sys_call).                            | Форматы 2.7.1, 2.7.4 и 3.0.1.  |
| 63    | 1                    | Безусловное прерывание (trap). Номер прерывания — в IM1 (trap).  | Формат 1.5.                    |
| 63    | 1                    | Заполнитель для неиспользуемой памяти кода. Все поля равны 1 (filler).   | Формат 1.5.                    |
| 63    | 1                    | Прерывание, если (беззнаково) $RD > IM3$ . $IM2 = 38$ . Номер прерывания фиксирован (cmp_unsign_trapabove).                        | Формат 2.7.3.                  |

Знаковые целочисленные сравнения корректируются при переполнении, а знаковые сложения и вычитания — нет. Например, если А — большое положительное целое число, а В — большое отрицательное целое

число, то `sub_sign_jmpneg` выполнит переход, если вычисление A-B из-за переполнения даст отрицательный результат, а `cmp_sign_jmpbelow` не выполнит переход, ибо A — больше B.

Комбинирование команд АЛУ и команд условного перехода можно закодировать в форматах 1.4, 1.5 C, 2.7.0, 2.7.1, 2.7.2, 2.7.3, и 3.0.1, за исключением вычитания, которое не может быть закодировано в формате 1.5 C. Вычитание с непосредственно заданной константой в качестве операнда можно заменить сложением с отрицательной константой. Место в коде, которое в формате 1.5 C использовалось бы вычитанием, вместо этого используется для кодирования команды прямого перехода и вызова с 24-разрядным смещением, используя формат 1.5 D, в котором младшие три разряда поля OP1 используются как часть 24-разрядного смещения.

Операции сложения и вычитания для вещественных операндов обычно не поддерживаются, поскольку большие задержки этих вещественных операций усложняют дизайн конвейера. Вещественные сравнения поддерживаются, поскольку можно выполнить операцию вещественного сравнения за один такт, используя беззнаковое целочисленное сравнение совместно экспоненты и мантиссы, со специальной обработкой знакового разряда и значений NAN.

Команда проверки разряда (`testbit_jmpnzero`) проверяет в первом операнде разряд с номером n, где n — значение во втором операнде (RS или IM2). Она полезна для проверки битовых полей, знаковых разрядов, и результата команд сравнения. Независимо от типа операнда, второй операнд интерпретируется как беззнаковое целое число.

Команды сдвига влево сдвигают первый операнд на количество разрядов, указанное вторым операндом, влево, если тот положителен, и вправо, с расширением нулём, если второй операнд отрицателен. Переносом является последний выдвинутый разряд. Независимо от типа операнда, операнды трактуются как целые, но в случае, если указан вещественный тип операнда (M = 1), — используются векторные регистры.

Безусловные и косвенные переходы и вызовы используют указанные выше форматы, в которых неиспользуемые разряды должны быть нулями. Разряд №0 поля OPJ равен нулю для команд перехода, и единице для команд вызова.

Команды табличного косвенного перехода/вызова предназначены для облегчения реализации многупутёвых ветвлений (операторы `switch/case`), таблиц функций в интерпретаторах кода, и таблиц виртуальных функций в объектно-ориентированных языках с полиморфизмом. Таблица адресов перехода или вызова хранится в виде знакового смещения относительно произвольной точки отсчёта, которая может быть адресом таблицы, базовым адресом кода, или любой другой точкой отсчёта. Тип операнда указывает размер элемента таблицы. Обязательно должны поддерживаться 16-разрядные и 32-разрядные смещения, прочие размеры — необязательно. Использование относительных адресов делает таблицу компактнее, нежели при использовании 64-разрядных абсолютных адресов. Команда работает следующим образом: вычисляется адрес элемента таблицы, как сумма базового указателя (RT) и индекса (RS), умноженного на размер операнда; по данному адресу читается знаковое значение, которое умножается на 4; то, что получилось, расширяется знаком до 64 разрядов и складывается с указанной точкой отсчёта (RD); по вычисленному адресу совершается переход или вызов. Индекс массива (RS) умножается на размер операнда, в то время как элементы таблицы умножаются на размер слова команды (4). Поддержка маски — необязательна.

Таблицу, используемую командами табличного перехода/вызова, можно разместить в секции константных данных (CONST), что делает возможным использование в качестве точки отсчёта базового адреса таблицы, и улучшает безопасность, давая доступ к таблице только для чтения.

Когда используются соглашения вызова, сформулированные на с. ??, командам возврата смещение в стеке не нужно.

Системные вызовы для идентификации системных функций используют числа, ID, а не адреса. Этот ID является комбинацией ID модуля, идентифицирующего конкретный модуль системы или драйвер устройства, и ID функции, идентифицирующей конкретную функцию в этом модуле. Как ID модуля, так и ID функции — либо оба — 16-разрядные, либо оба — 32-разрядные, так что суммарный размер ID системного вызова может достигать 64 разрядов. Команда `sys_call` имеет следующие варианты:

Таблица 3.4.3. Варианты команды системного вызова

| Формат | Тип операнда | ID функции               | ID модуля                 |
|--------|--------------|--------------------------|---------------------------|
| 1.4    | 32 разряда   | разряды 0-15 регистра RT | разряды 16-31 регистра RT |
| 1.4    | 64 разряда   | разряды 0-31 регистра RT | разряды 32-63 регистра RT |
| 2.7.1  | 32 разряда   | разряды 0-15 поля IM2    | разряды 16-31 поля IM2    |
| 2.7.4  | 64 разряда   | разряды 0-15 поля IM21   | разряды 0-31 поля IM3     |
| 3.0.1  | 64 разряда   | разряды 0-31 поля IM2    | разряды 0-31 поля IM3     |



Команде `sys_call` можно указать блок памяти, разделяемый с системной функцией. Адрес блока памяти задаётся в регистре, указываемом полем RD, а длина — в регистре, указываемом полем RS. Этот блок памяти, к которому у вызывающего должны быть права доступа, разделяется с системной функцией. Системные функции получают те же права на этот блок, что и вызывающий поток, т.е. те же права на чтение и/или запись. Это полезно для быстрой передачи данных между вызывающим и системной функцией. У вызывающей и вызываемой функций нет никакого совместного доступа ни к какой другой области памяти. Если и поле RD, и поле RS равны нулю (т.е. указан регистр r0), то никакой блок памяти не разделяется. Команда `sys_call` формата 2.7.4 не может иметь никакого блока разделяемой памяти.

Параметры системных функций передаются в регистрах, следуя тем же соглашениям вызова, что обычные функции. Регистры, используемые для передачи параметров, обычно отличаются от регистров, указанных в полях RD, RS и RT. Параметры функций, не помещающиеся в регистры, должны находиться в блоке разделяемой памяти.

Ловушки работают подобно прерываниям. Безусловные ловушки имеют 8-разрядный номер прерывания в IM1, являющийся индексом в таблице векторов прерываний, первоначально находящейся по равному нулю абсолютному адресу. Команда безусловной ловушки для дополнительной информации может использовать IM2. Условная ловушка предназначена для проверки границ массивов. Номер прерывания фиксирован (решение о значении ещё не принято). Условная ловушка может (необязательно) поддерживать в IM2 иные коды условия, использующие те же самые коды, что и OPJ в табл. 3.4.2.

Команда ловушки с единицами во всех разрядах всех полей (код операции — 0x6FFFFFFF) может использоваться в качестве заполнителя неиспользуемых частей памяти кода.

## 3.5. Назначение кодов операций

Коды операций и форматы могут быть назначены новым командам в соответствии со следующими правилами.

- Многоформатные команды. Часто используемые команды, которым нужно поддерживать много различных типов операндов, режимов адресации, и форматов, используют большую часть (или все) из следующих форматов: 0.0-0.9, 2.0-2.5, 2.8-2.9, и (необязательно) 3.1 и 3.3 (если поддерживаются команды тройного размера). Во всех этих форматах используется одно и то же значение поля OP1. Поле OP2 обязано быть равно 0. Команды с немногими операндами-источниками идут первыми.
- Малые команды. В малой версии доступны лишь некоторые из наиболее употребимых команд, поскольку место есть только для 32 малых команд. Как показано в табл. 4.2.1 на с. 31, команды упорядочиваются по количеству и типам операндов.
- Команды передачи управления, т.е. переходы, ветвления, вызовы, и возвраты, могут быть закодированы как короткие команды с IL = 1, Mode = 4 или 5, и OP1 от 0 до 63, либо как команды двойного размера, с IL = 2, Mode = 7, OP1 от 0 до 15, и (необязательно) как команды тройного размера, с IL = 3, Mode = 0, OP1 от 0 до 15. См. с. 20.
- Короткие одноформатные команды с регистрами общего назначения. Используйте форматы 1.0, 1.1, и 1.8, с любым значением поля OP1.
- Короткие одноформатные команды с векторными регистрами. Используйте форматы 1.2 и 1.3, с любым значением поля OP1.
- Одноформатные команды двойного размера с регистрами общего назначения могут использовать форматы 2.8 и 2.9, с любым значением полей OP1 и  $OP2 \geq 8$  (для одного и того же OP1 предоставляйте сходные команды), и формат 2.6 с любым значением поля OP1.
- Одноформатные команды двойного размера с векторными регистрами могут использовать форматы 2.4 и 2.5, с любым значением полей OP1 и  $OP2 \geq 8$  (для одного и того же OP1 предоставляйте сходные команды), и формат 2.7 с OP1 в диапазоне от 16 до 63.
- Одноформатные команды тройного размера с регистрами общего назначения могут использовать формат 3.0 с OP1 в диапазоне от 16 до 63.
- Одноформатные команды тройного размера с векторными регистрами могут использовать формат 3.2 с любым значением поля OP1.

- Последующие команды, с длиной, большей трёх 32-разрядных слов, кодируются с  $IL = 3$ ,  $Mode =$  от 4 до 7.
- Новые опции или другие модификации существующих команд могут использовать разряды OP3 или разряды регистра маски.
- Новые режимы адресации могут быть реализованы как одноформатные команды чтения и записи. Новые режимы адресации или иные модификации, которые применимы ко всем мультиформатным командам, могут использовать для разрядов опций поле OP3. Если разрядов поля OP3 недостаточно, то возможно, в качестве последнего средства, использование значений поля OP2 из диапазона от 1 до 7.

Все неиспользуемые поля должны быть равны нулю. Для команд с наименьшим количеством входных операндов следует предпочесть наименьшие значения кодов в OP1.

Операнды назначаются следующим образом. Операнд-приёмник представляет собой регистр, указанный в поле RD. Операнды-источники используют регистровые поля RS, RT и RU, если только эти поля не задействованы для других целей (например, базового указателя, индекса, длины вектора). Если имеется находящийся в памяти операнд, либо непосредственно заданный операнд, то он должен быть последним из операндов-источников. Если выбранный формат имеет меньше операндов-источников, нежели необходимо для команды, то поле RD используется и как операнд-приёмник, и как первый из операндов-источников. Если всё ещё недостаточно операндов, то формат для конкретной команды использоваться не может. Если в формате имеется больше операндов, чем необходимо, то любой находящийся в памяти операнд или непосредственно заданный операнд будет последним операндом-источником, имея приоритет перед любым регистровым операндом. Неиспользуемые поля операндов должны быть равны нулю.

## Глава 4. Списки команд

Команды ForwardCom перечислены в файле с разделителями в виде запятых, название которого — `instruction_list.csv`. Этот файл предназначен для использования ассемблерами, дизассемблерами, отладчиками, и эмуляторами. Данный список предварителен, и, возможно, изменится. Пожалуйста, помните, что списки в этом документе синхронизированы со списком в `instruction_list.csv`.

Этот список команд имеет следующие поля:

Таблица 4.0.1. Поля в файле со списком команд

| Поле                                    | Смысл  |
|---|--|
| Name                                    | Имя команды, используемое ассемблером.   |
| Category                                | 1: одноформатная команда,<br>2: малая команда,<br>3: многоформатная команда,<br>4: команда перехода.   |
| Formats                                 | См. приводимую ниже табл. 4.0.2.   |
| Template                                | Шестнадцатиричное число:<br>0xA–0xE для шаблонов A–E,<br>0x1 для малого шаблона,<br>0x0 для множественных шаблонов.  |
| Source operands                         | Количество операндов–источников, включая регистровые операнды, находящиеся в памяти операнды, и непосредственно заданные операнды, но не включая маску, разряды опций, длину вектора, и индекс.                      |
| OP1                                     | Код операции, OP1.   |
| OP2                                     | Дополнительный код операции, OP2. Ноль, если нет.  |
| OP3 bits used                           | Количество разрядов в поле OP3, используемых для опций. Поле OP3 для счётчика сдвига в форматах 2.5 и 2.9 только если указанное здесь значение равно нулю.   |
| Operand types general purpose registers | Шестнадцатиричное число, указывающее требуемую и необязательную поддержку каждого из типов операндов для регистров общего назначения. По поводу смысла каждого разряда см. приводимую ниже табл. 4.0.3.              |
| Operand types scalar                    | Шестнадцатиричное число, указывающее требуемую и необязательную поддержку каждого из типов операндов для скалярных операций в векторных регистрах. По поводу смысла каждого разряда см. приводимую ниже табл. 4.0.3. |
| Operand types vector                    | Шестнадцатиричное число, указывающее требуемую и необязательную поддержку каждого из типов операндов для векторных операций. По поводу смысла каждого разряда см. приводимую ниже табл. 4.0.3.                       |
| Immediate operand type                  | Тип непосредственно заданного операнда для одноформатных команд. См. приводимую ниже табл. 4.0.4.  |
| Description                             | Описания команды и комментарии.  |

Таблица 4.0.2. Смысл полей формата в файле со списком команд

| Категория                 | Интерпретация полей форматов   |
|---------------------------|--|
| 1. Одноформатная команда. | Число из трёх шестнадцатиричных цифр. Крайняя левая цифра — значение поля IL (0-3). Средняя цифра — значение поля Mode, или комбинированного поля M+Mode (0-9). Крайняя правая цифра — подрежим, определяемый полем OP3 в форматах 2.4.x и 2.8.x, или OP1 в формате 2.7.x. Иначе нуль. Например, 0x283 означает формат 2.8.3.  |
| 2. Малая команда          | <p>0 Нет операндов.</p> <p>1 RD = операнд–приёмник, являющийся регистром общего назначения, RS = непосредственно заданный операнд.</p> <p>2 RD = операнд–приёмник, являющийся POH<sup>1</sup>, RS = регистр источник, являющийся POH.</p> <p>4 RD = операнд–приёмник, являющийся POH, RS = указатель на находящийся в памяти операнд–источник.</p> <p>5 RD = операнд–источник, являющийся POH, RS = указатель на находящийся в памяти операнд–приёмник.</p> <p>8 RD = операнд–приёмник, являющийся векторным регистром, RS — не используется.</p> <p>9 RD = операнд–приёмник, являющийся векторным регистром, RS — непосредственно заданный операнд.</p> <p>10 RD = операнд–приёмник, являющийся векторным регистром, RS — являющийся векторным регистром источник.</p> <p>11 RD = операнд–источник, являющийся векторным регистром, RS — являющийся приёмником POH r0-r14,r31.</p> <p>12 RD = операнд–приёмник, являющийся векторным регистром, RS = указатель на находящийся в памяти операнд–источник.</p> <p>13 RD = операнд–источник, являющийся векторным регистром, RS = указатель на находящийся в памяти операнд–приёмник.</p>  |
| 3. Многоформатная команда | <p>Шестнадцатиричное число, составленное из разрядов, каждый из которых отвечает за поддержку своего формата:</p> <p>0x0000001 Формат 0.0: три регистра общего назначения.</p> <p>0x0000002 Формат 0.1: два регистра общего назначения и 8–разрядное непосредственно заданное значение.</p> <p>0x0000004 Формат 0.2: три векторных регистра.</p> <p>0x0000008 Формат 0.3: два векторных регистра и 8–разрядное непосредственно заданное значение.</p> <p>0x0000010 Формат 0.4: один вектор и находящийся в памяти операнд.</p> <p>0x0000020 Формат 0.5: один вектор и находящийся в памяти операнд с отрицательным индексом.</p> <p>0x0000040 Формат 0.6: один вектор и находящийся в памяти скалярный операнд с индексом.</p> <p>0x0000080 Формат 0.7: один вектор и находящийся в памяти скалярный операнд с 8–разрядным смещением.</p> <p>0x0000100 Формат 0.8: один POH и находящийся в памяти операнд с индексом.</p> <p>0x0000200 Формат 0.9: один POH и находящийся в памяти операнд с 8–разрядным смещением.</p> <p>0x0000400 Формат 2.0: два POH и находящийся в памяти операнд с 32–разрядным смещением.</p> <p>0x0000800 Формат 2.1: три POH и 32–разрядное непосредственно заданное значение.</p> <p>0x0001000 Формат 2.2: один векторный регистр и находящийся в памяти операнд с 32–разрядным смещением.</p> <p>0x0002000 Формат 2.3: три векторных регистра и 32–разрядное непосредственно заданное значение.</p> |

<sup>1</sup>Регистр общего назначения

|                          |  |   |
|--------------------------|--|---|
|                          | 0x0004000  | Формат 2.4.0: два векторных регистра и находящийся в памяти скалярный операнд с 16–разрядным смещением. |
|                          | 0x0008000  | Формат 2.4.1: два векторных регистра и находящийся в памяти операнд с 16–разрядным смещением.           |
|                          | 0x0010000  | Формат 2.4.2: два векторных регистра и находящийся в памяти операнд с отрицательным индексом.           |
|                          | 0x0020000  | Формат 2.4.3: два векторных регистра и находящийся в памяти скалярный операнд с индексом и лимитом.     |
|                          | 0x0040000  | Формат 2.5: три векторных регистра и сдвинутое 16–разрядное непосредственно заданное значение.          |
|                          | 0x0080000  | Формат 2.8.0: три РОН и находящийся в памяти операнд с 16–разрядным смещением.                          |
|                          | 0x0100000  | Формат 2.8.1: два РОН и находящийся в памяти операнд с немасштабируемым индексом.                       |
|                          | 0x0200000  | Формат 2.8.2: два РОН и находящийся в памяти операнд с масштабируемым индексом.                         |
|                          | 0x0400000  | Формат 2.8.3: два РОН и находящийся в памяти скалярный операнд с индексом и лимитом.                    |
|                          | 0x0800000  | Формат 2.9: три РОН и сдвинутое 16–разрядное непосредственно заданное значение.                         |
|                          | 0x1000000  | Формат 3.1: три РОН и 64–разрядное непосредственно заданное значение (необязательно).                   |
|                          | 0x2000000  | Формат 3.3: три векторных регистра и 64–разрядное непосредственно заданное значение (необязательно).    |
| 4. Команда пере-<br>хода | Шестнадцатиричное число, составленное из разрядов, каждый из которых отвечает за поддержку своего формата: |   |
|                          | 0x001  | Формат 1.4: два регистра и 8–разрядное смещение.  |
|                          | 0x002  | Формат 1.5 C: один регистр, 8–разрядное непосредственно заданное значение, и 8–разрядное смещение.      |
|                          | 0x004  | Формат 1.5 C: 16–разрядное смещение.  |
|                          | 0x008  | Формат 1.5 D: нет регистра, но есть 24–разрядное смещение.  |
|                          | 0x010  | Формат 2.7.0: два регистра и 32–разрядное смещение.   |
|                          | 0x020  | Формат 2.7.1: два регистра, 16–разрядное непосредственно заданное значение, и 16–разрядное смещение.    |
|                          | 0x040  | Формат 2.7.2: один регистр, 8–разрядное непосредственно заданное значение, и 32–разрядное смещение.     |
|                          | 0x080  | Формат 2.7.3: один регистр, 32–разрядное непосредственно заданное значение, и 8–разрядное смещение.     |
|                          | 0x100  | Формат 2.7.4: системный вызов, 16–разрядный ID функции и 32–разрядный ID модуля.                        |
|                          | 0x200  | Формат 3.0.1: два регистра, 32–разрядное непосредственно заданное значение, и 32–разрядное смещение.    |
|                          | 0x400  | Формат 3.0.1: 64–разрядный абсолютный адрес.  |

Таблица 4.0.3. Указание типов операндов, поддерживаемых регистрами общего назначения, скалярами в векторных регистрах, или векторами. Данное значение представляет собой шестнадцатиричное число, составленное из разрядов, каждый из которых отвечает за поддержку своего формата

|        |   |
|--------|---|
| 0x0001 | поддержка 8–разрядных целых                     |
| 0x0002 | поддержка 16–разрядных целых                    |
| 0x0004 | поддержка 32–разрядных целых                    |
| 0x0008 | поддержка 64–разрядных целых                    |
| 0x0010 | поддержка 128–разрядных целых                   |
| 0x0020 | поддержка вещественных чисел одинарной точности |

|        |   |
|--------|---|
| 0x0040 | поддержка вещественных чисел двойной точности                       |
| 0x0080 | поддержка вещественных чисел четырёхкратной точности                |
| 0x0100 | необязательная поддержка 8-разрядных целых                          |
| 0x0200 | необязательная поддержка 16-разрядных целых                         |
| 0x0400 | необязательная поддержка 32-разрядных целых                         |
| 0x0800 | необязательная поддержка 64-разрядных целых                         |
| 0x1000 | необязательная поддержка 128-разрядных целых                        |
| 0x2000 | необязательная поддержка вещественных чисел одинарной точности      |
| 0x4000 | необязательная поддержка вещественных чисел двойной точности        |
| 0x8000 | необязательная поддержка вещественных чисел четырёхкратной точности |

Таблица 4.0.4. Тип непосредственно заданного операнда для одноформатных команд

|    |  |
|----|--|
| 0  | нет аргументов или многоформатная команда  |
| 1  | 4-разрядное знаковое целое число   |
| 2  | 8-разрядное знаковое целое число   |
| 3  | 16-разрядное знаковое целое число  |
| 4  | 32-разрядное знаковое целое число  |
| 5  | 64-разрядное знаковое целое число  |
| 6  | 8-разрядное знаковое целое число, сдвигаемое на указанное количество разрядов  |
| 7  | 16-разрядное знаковое целое число, сдвигаемое на указанное количество разрядов   |
| 8  | 16-разрядное знаковое целое число, сдвигаемое на 16 разрядов   |
| 9  | 32-разрядное знаковое целое число, сдвигаемое на 32 разрядов   |
| 17 | 4-разрядное беззнаковое целое число  |
| 18 | 8-разрядное беззнаковое целое число  |
| 19 | 16-разрядное беззнаковое целое число   |
| 20 | 32-разрядное беззнаковое целое число   |
| 21 | 64-разрядное беззнаковое целое число   |
| 33 | 4-разрядное знаковое целое число, преобразуемое в вещественное число   |
| 34 | 8-разрядное знаковое целое число, преобразуемое в вещественное число   |
| 35 | 16-разрядное знаковое целое число, преобразуемое в вещественное число  |
| 39 | 16-разрядное знаковое целое число, сдвигаемое на указанное количество разрядов, и преобразуемое затем в вещественное число |
| 64 | вещественное число половинной точности   |
| 65 | вещественное число одинарной точности  |
| 66 | вещественное число двойной точности  |

Команды перехода перечислены на с. 21. Все прочие категории команд перечислены в последующих таблицах.

## 4.1. Список многоформатных команд

Следующий список команд охватывает общепринятые команды, которые можно закодировать в большинстве форматов или во всех форматах, предназначенных для многоформатных команд.

Таблица 4.1.1. Список многоформатных команд

| Команда | OP1 | Операндов-источников | Описание                      |
|---------|-----|----------------------|-------------------------------|
| nop     | 0   | 0                    | Нет операции.                 |
| move    | 1   | 1                    | Копирование значения.         |
| store   | 2   | 1                    | Сохранение значения в памяти. |

|                       |       |   |   |
|-----------------------|-------|---|---|
| prefetch              | 3     | 1 | Предвыборка из памяти.  |
| sign_extend           | 4     | 1 | Расширить меньшее целое знаком до 64 разрядов.  |
| add                   | 8     | 2 | $\text{src1} + \text{src2}$ .   |
| sub                   | 9     | 2 | $\text{src1} - \text{src2}$ .   |
| sub_r                 | 10    | 2 | $\text{src2} - \text{src1}$ .   |
| compare               | 11    | 2 | Сравнение. Использует коды условий, см. с. 41.  |
| mul                   | 12    | 2 | $\text{src1} \cdot \text{src2}$ .   |
| mul_hi_s              | 13    | 2 | $(\text{src1} \cdot \text{src2}) \gg \text{OS}$ , знаково (только для целых чисел).   |
| mul_hi_u              | 14    | 2 | $(\text{src1} \cdot \text{src2}) \gg \text{OS}$ , беззнаково (только для целых чисел).  |
| mul_ex_s              | 15    | 2 | Перемножить элементы с чётными номерами векторов, состоящих из знаковых целых чисел, для получения результатов двойного размера.    |
| mul_ex_u              | 16    | 2 | Перемножить элементы с чётными номерами векторов, состоящих из беззнаковых целых чисел, для получения результатов двойного размера. |
| div                   | 17    | 2 | $\text{src1} / \text{src2}$ (необязательно для целочисленных векторов).   |
| rem                   | 18    | 2 | Остаток от деления (необязательно для целочисленных векторов).  |
| min                   | 20    | 2 | Знаковый минимум.   |
| max                   | 21    | 2 | Знаковый максимум.  |
| min_u                 | 22    | 2 | Беззнаковый минимум для целых чисел, минимум из абсолютных величин для вещественных.  |
| max_u                 | 23    | 2 | Беззнаковый максимум для целых чисел, максимум из абсолютных величин для вещественных.  |
| and                   | 32    | 2 | $\text{src1} \& \text{src2}$ .  |
| and_not               | 33    | 2 | $\text{src1} \& (\sim \text{src2})$ .   |
| or                    | 34    | 2 | $\text{src1}   \text{src2}$ .   |
| xor                   | 35    | 2 | $\text{src1} \wedge \text{src2}$ .  |
| shift_left            | 36    | 2 | $\text{src1} \ll \text{src2}$ .   |
| shift_rightu          | 37    | 2 | $\text{src1} \gg \text{src2}$ , с расширением нулём.  |
| shift_rights          | 38    | 2 | $\text{src1} \gg \text{src2}$ , с расширением знаком.   |
| rotate                | 39    | 2 | Вращать влево, если $\text{src2}$ положительно, и вправо — если отрицательно.   |
| extract_bit           | 40    | 2 | Выделить разряд. $(\text{src1} \gg \text{src2}) \& 1$ .   |
| set_bit               | 41    | 2 | Установить разряд. $\text{src1}   (1 \ll \text{src2})$ .  |
| clear_bit             | 42    | 2 | Сбросить разряд. $\text{src1} \& \sim (1 \ll \text{src2})$ .  |
| toggle_bit            | 43    | 2 | Инвертировать разряд. $\text{src1} \wedge (1 \ll \text{src2})$ .  |
| mul_add               | 46    | 3 | $\pm \text{src1} \pm \text{src2} \cdot \text{src3}$ (необязательно).  |
| add_add               | 47    | 3 | $\pm \text{src1} \pm \text{src2} \pm \text{src3}$ (необязательно).  |
| userdef55 – userdef62 | 55–62 | 2 | Зарезервировано для определяемых пользователем команд.  |
| undef                 | 63    | 2 | Неопределённый код. Гарантированно возбуждает прерывание (trap) во всех будущих реализациях.  |

## 4.2. Список малых команд

В одном 32-разрядном слове кода помещается две малых команды. Если малая команда не может спариваться ни с чем иным, то она спаривается с малой пор.

Если не оговорено иное, то операнды малых команд — 64-разрядные. RD — регистр-приёмник, и, в большинстве случаев, также и первый из регистров-источников. RS может быть одним из регистров r0-r15, v0-v15, либо непосредственно заданной расширенной знаком 4-разрядной константой. Команды с указателем в RS используют в качестве указателя r0-r14, когда RS — от 0 до 14, и указатель стека (r31), когда RS равно 15.

Поскольку адрес команды должен быть кратен четырём, то невозможно перейти на вторую команду из пары малых команд. Если прерывание или ловушка возникли при выполнении малой команды, то обработчик

прерывания должен запомнить, какая из двух малых команд была прервана.

Таблица 4.2.1. Список малых команд, работающих с регистрами общего назначения

| Команда      | ОП1 | Описание   |
|--------------|-----|--|
| nop          | 0   | Нет операции.  |
| move         | 1   | RD = расширенная знаком константа из поля RS.  |
| add          | 2   | RD += расширенная знаком константа из поля RS.   |
| sub          | 3   | RD -= расширенная знаком константа из поля RS.   |
| shift_left   | 4   | RD <<= беззнаковая константа из поля RS.   |
| shift_rightu | 5   | RD >>= беззнаковая константа из поля RS (расширение нулём).  |
| move         | 8   | RD = регистровый операнд RS.   |
| add          | 9   | RD += регистровый операнд RS.  |
| sub          | 10  | RD -= регистровый операнд RS.  |
| and          | 11  | RD &= регистровый операнд RS.  |
| or           | 12  | RD  = регистровый операнд RS.  |
| xor          | 13  | RD ^= регистровый операнд RS.  |
| move         | 14  | Прочитать RD из находящегося в памяти операнда, имеющего заданный полем RS (RS = r0-r14, r31) указатель. |
| store        | 15  | Записать RD в находящийся в памяти операнд, имеющий заданный полем RS (RS = r0-r14, r31) указатель.      |

Таблица 4.2.2. Список малых команд, работающих с векторными регистрами

| Команда    | ОП1 | Описание   |
|------------|-----|--|
| clear      | 16  | Очистить регистр RD, установив его длину равной нулю.                                  |
| move       | 17  | RD = знаковое 4-разрядное целое из RS, преобразованное в скаляр одинарной точности.    |
| move       | 18  | RD = знаковое 4-разрядное целое из RS, преобразованное в скаляр двойной точности.      |
| move       | 19  | RD = RS. Копировать вектор любого типа.  |
| add        | 20  | RD += RS, вектор из вещественных чисел одинарной точности.                             |
| add        | 21  | RD += RS, вектор из вещественных чисел двойной точности.                               |
| sub        | 22  | RD -= RS, вектор из вещественных чисел одинарной точности.                             |
| sub        | 23  | RD -= RS, вектор из вещественных чисел двойной точности.                               |
| mul        | 24  | RD *= RS, вектор из вещественных чисел одинарной точности.                             |
| mul        | 25  | RD *= RS, вектор из вещественных чисел двойной точности.                               |
| add_cps    | 28  | Получить размер сжатого образа для RD и прибавить его к регистру общего назначения RS. |
| sub_cps    | 29  | Получить размер сжатого образа для RD и вычесть его из регистра общего назначения RS.  |
| restore_cp | 30  | Восстановить векторный регистр RD из сжатого образа, на который указывает RS.          |
| save_cp    | 31  | Сохранить векторный регистр RD в сжатый образ, на который указывает RS.                |

### 4.3. Список одноформатных команд

Эти команды имеются преимущественно в одном или нескольких форматах.

Таблица 4.3.1. Список одноформатных команд, работающих с регистрами общего назначения

| Команда   | Формат | ОП1 | Описание   |
|-----------|--------|-----|--|
| bitscan_f | 1.0    | 1   | Сканировать разряды вперёд. Найти номер самого младшего разряда RS, равного единице (необязательна). |



|            |     |    |  |
|------------|-----|----|--|
| bitscan_r  | 1.0 | 2  | Сканировать разряды назад. Найти номер самого старшего разряда RS, равного единице (необязательна).  |
| round_d2   | 1.0 | 3  | Округлить RS к ближайшей меньшей степени числа 2.  |
| round_u2   | 1.0 | 4  | Округлить RS к ближайшей большей степени числа 2.  |
| move       | 1.1 | 0  | Переслать 16-разрядную расширенную знаком константу в регистр общего назначения RD.  |
| move_u     | 1.1 | 1  | Переслать 16-разрядную расширенную нулём константу в регистр общего назначения RD (может использоваться в качестве первого шага загрузки 32-разрядной константы, если не поддерживаются команды двойного размера). |
| add        | 1.1 | 2  | Прибавить 16-разрядную расширенную знаком константу к RD.  |
| sub        | 1.1 | 3  | Вычесть 16-разрядную расширенную знаком константу из RD.   |
| subr       | 1.1 | 4  | Вычесть RD из 16-разрядной расширенной знаком константы.   |
| mul        | 1.1 | 5  | Умножить RD на 16-разрядную расширенную знаком константу.  |
| div        | 1.1 | 6  | Поделить RD на 16-разрядную расширенную знаком константу.  |
| add        | 1.1 | 7  | Сдвинуть 16-разрядную расширенную знаком константу влево на 16 разрядов и прибавить к RD.  |
| move       | 1.1 | 16 | $RD = IM2 \ll IM1$ . Знаково расширить IM2 до 64 разрядов и сдвинуть результат влево, на количество разрядов, указанное беззнаковым значением в IM1.   |
| add        | 1.1 | 17 | $RD += IM2 \ll IM1$ . Знаково расширить IM2 до 64 разрядов, сдвинуть результат влево, на количество разрядов, указанное беззнаковым значением в IM1, и прибавить то, что получилось, к RD.                         |
| and        | 1.1 | 18 | $RD \&= IM2 \ll IM1$ . Знаково расширить IM2 до 64 разрядов, сдвинуть результат влево, на количество разрядов, указанное беззнаковым значением в IM1, и выполнить поразрядное И с RD.                              |
| or         | 1.1 | 19 | $RD  = IM2 \ll IM1$ . Знаково расширить IM2 до 64 разрядов, сдвинуть результат влево, на количество разрядов, указанное беззнаковым значением в IM1, и выполнить поразрядное ИЛИ с RD.                             |
| xor        | 1.1 | 20 | $RD ^= IM2 \ll$ . Знаково расширить IM2 до 64 разрядов, сдвинуть результат влево, на количество разрядов, указанное беззнаковым значением в IM1, и выполнить поразрядное ИСКЛЮЧАЮЩЕЕ ИЛИ с RD.                     |
| abs        | 1.8 | 0  | Абсолютная величина целого числа. Использовать насыщение, если IM1 = 1.  |
| shift_add  | 1.8 | 1  | Сдвинуть и сложить. $RD += RS \ll IM1$ (сдвинуть вправо, расширив нулём, если IM1 отрицательно).   |
| read_spe   | 1.8 | 32 | Прочитать содержимое специального регистра RS в POH RD.  |
| write_spe  | 1.8 | 33 | Записать содержимое POH RS в специальный регистр RD.   |
| read_cpb   | 1.8 | 34 | Прочитать содержимое регистра возможностей RS в POH RD.  |
| write_cpb  | 1.8 | 35 | Записать содержимое POH RS в регистр возможностей RD.  |
| read_perf  | 1.8 | 36 | Прочитать счётчик производительности.  |
| read_perfs | 1.8 | 37 | Прочитать счётчик производительности, используя сериализацию.  |
| read_sys   | 1.8 | 38 | Прочитать содержимое системного регистра RS в POH RD.  |
| write_sys  | 1.8 | 39 | Записать содержимое POH RS в системный регистр RD.   |
| load_hi    | 2.6 | 0  | Загрузить 32-разрядную константу в старшую часть регистра общего назначения. Младшая часть зануляется. $RD = IM2 \ll 32$ .   |
| insert_hi  | 2.6 | 1  | Вставить 32-разрядную константу в старшую часть регистра общего назначения, оставляя младшую часть без изменения. $RD = (RS \& 0xFFFFFFFF)   (IM2 \ll 32)$ .   |

|              |     |    |   |
|--------------|-----|----|---|
| add_unsigned | 2.6 | 2  | Прибавить расширенную нулём 32-разрядную константу к регистру общего назначения.  |
| sub_unsigned | 2.6 | 3  | Вычитать расширенную нулём 32-разрядную константу из регистра общего назначения.  |
| add_hi       | 2.6 | 4  | Прибавить 32-разрядную константу к старшей части регистра общего назначения. $RD = RS + (IM2 \ll 32)$ .                         |
| and_hi       | 2.6 | 5  | Поразрядное И старшей части регистра общего назначения с 32-разрядной константой. $RD = RS \& (IM2 \ll 32)$ .                   |
| or_hi        | 2.6 | 6  | Поразрядное ИЛИ старшей части регистра общего назначения с 32-разрядной константой. $RD = RS \mid (IM2 \ll 32)$ .               |
| xor_hi       | 2.6 | 7  | Поразрядное ИСКЛЮЧАЮЩЕЕ ИЛИ старшей части регистра общего назначения с 32-разрядной константой. $RD = RS \wedge (IM2 \ll 32)$ . |
| address      | 2.6 | 32 | $RD = RS + IM2$ , RS может быть THREADP (28), DATAP (29), или IP (30).  |

Таблица 4.3.2. Список одноформатных команд, работающих с векторными регистрами и регистрами разного типа

| Команда         | Формат | OP1,<br>OP2 | Описание   |
|-----------------|--------|-------------|--|
| set_len         | 1.2    | 0           | $RD$ = векторный регистр RT со значением длины, указанным в RS.  |
| get_len         | 1.2    | 1           | Записать длину векторного регистра RS в регистр общего назначения RD.  |
| set_num         | 1.2    | 2           | Заменить длину векторного регистра на RS·OS.   |
| get_num         | 1.2    | 3           | Получить длину векторного регистра, делённую на размер операнда.   |
| compress        | 1.2    | 4           | Сжать вектор RT длины RS до вектора половинной длины и половинного размера элемента: двойная точность → одинарная точность, 64-разрядное целое → 32-разрядное целое, и т.п.  |
| compress_ss     | 1.2    | 5           | Сжать целочисленный вектор RT длины RS до вектора половинной длины и половинного размера элемента, знаково и с насыщением (необязательна).   |
| compress_us     | 1.2    | 6           | Сжать целочисленный вектор RT длины RS до вектора половинной длины и половинного размера элемента, беззнаково и с насыщением (необязательна).  |
| expand          | 1.2    | 7           | Расширить вектор RT длины RS/2 и половинного размера элемента до вектора длины RS с полного размера элемента: половинная точность → одинарная точность, 32-разрядное целое → 64-разрядное целое (с расширением знаком), и т.п. |
| expand_us       | 1.2    | 8           | Расширить вектор RT длины RS/2 и половинного размера элемента до вектора длины RS с полного размера элемента: 32-разрядное целое → 64-разрядное целое (с расширением нулём), и т.п.  |
| compress_sparse | 1.2    | 9           | Сжать разреженный вектор с элементами, указанными разрядами маски, в непрерывный вектор. RS = длина входного вектора (необязательна).  |
| expand_sparse   | 1.2    | 10          | Расширить непрерывный вектор до разреженного вектора, позиции в котором указаны разрядами маски. RS = длина результирующего вектора (необязательна).   |
| extract         | 1.2    | 11          | Выделить один элемент из вектора RT, начинающийся со смещения RS·OS и имеющий размер OS, в скаляр, находящийся в векторном регистре RD.  |
| insert          | 1.2    | 12          | Заменить один элемент вектора RD, начинающийся со смещения RS·OS, скаляром из RT.  |

|              |     |    |   |
|--------------|-----|----|---|
| broadcast    | 1.2 | 13 | Разослать первый элемент вектора RT во все элементы вектора RD, имеющего длину, указанную в RS.   |
| bits2bool    | 1.2 | 14 | Младшие n разрядов из RT распаковываются в булев вектор RD длины RS, с одним разрядом в каждом элементе, где $n = RS / OS$ .  |
| bool2bits    | 1.2 | 15 | Булев вектор RT длины RS упаковывается в младшие n разрядов RD, беря разряд с номером 0 в каждом элементе, $n = RS / OS$ . Длина RD должна быть достаточна для хранения, по меньшей мере, n разрядов.   |
| bool_reduce  | 1.2 | 16 | Логический вектор RT длины RS сворачивается, посредством комбинирования разрядов номер 0 всех элементов. Результатом является скалярное целое, в котором разряд №0 является поразрядным И всех разрядов с номером 0, а разряд №1 — поразрядными ИЛИ. Остальные разряды зарезервированы для последующего использования.  |
| shift_expand | 1.2 | 18 | Сдвинуть вектор RT влево на RS байтов и увеличить длину вектора на RS. Младшие RS байтов в RD будут нулями.   |
| shift_reduce | 1.2 | 19 | Сдвинуть вектор RT вправо на RS байтов и уменьшить длину вектора на RS. Младшие RS байт вектора RT теряются.  |
| shift_up     | 1.2 | 20 | Сдвинуть вектор RT влево на RS элементов. Младшие RS элементов вектора RD будут нулями, а старшие RS элементов из RT — теряются.  |
| shift_dn     | 1.2 | 21 | Сдвинуть вектор RT вправо на RS элементов. Старшие RS элементов вектора RD будут нулями, а младшие RS элементов из RT — теряются.   |
| div_ex_s     | 1.2 | 24 | Разделить вектор RS, состоящий из целых чисел двойного размера, на знаковые целые числа из RT. Размер элемента RS равен $2 \cdot OS$ . Деление выполняется на элементы вектора RT (размер элемента которого равен OS), имеющие чётные номера. Частные сохраняются в элементах вектора RD, имеющих чётные номера, а остатки — в элементах с нечётными номерами (для векторов — необязательно). |
| div_ex_u     | 1.2 | 25 | То же, но для беззнаковых целых (для векторов — необязательно).   |
| sqrt         | 1.2 | 26 | Квадратный корень (для вещественных чисел, необязательно).  |
| add_c        | 1.2 | 28 | Сложить с переносом. Вектор имеет два элемента. Старший элемент используется как перенос и на входе, и на выходе (необязательно).   |
| sub_b        | 1.2 | 29 | Вычесть с заёмом. Вектор имеет два элемента. Старший элемент используется как заём и на входе, и на выходе (необязательно).   |
| add_ss       | 1.2 | 30 | Сложить целочисленные векторы, со знаковым насыщением (необязательно).  |
| add_us       | 1.2 | 31 | Сложить целочисленные векторы, с беззнаковым насыщением (необязательно).  |
| sub_ss       | 1.2 | 32 | Вычесть целочисленные векторы, со знаковым насыщением (необязательно).  |
| sub_us       | 1.2 | 33 | Вычесть целочисленные векторы, с беззнаковым насыщением (необязательно).  |
| mul_ss       | 1.2 | 34 | Умножить целочисленные векторы, со знаковым насыщением (необязательно).   |
| mul_us       | 1.2 | 35 | Умножить целочисленные векторы, с беззнаковым насыщением (необязательно).   |
| shl_ss       | 1.2 | 36 | Сдвинуть влево целочисленные векторы, со знаковым насыщением (необязательно).   |

|               |       |    |   |
|---------------|-------|----|---|
| shl_us        | 1.2   | 37 | Сдвинуть влево целочисленные векторы, с беззнаковым насыщением (необязательна).   |
| add_oc        | 1.2   | 38 | Сложить с проверкой переполнения (необязательна).   |
| sub_oc        | 1.2   | 39 | Вычитать с проверкой переполнения (необязательна).  |
| subr_oc       | 1.2   | 40 | Обратное вычитание с проверкой переполнения (необязательна).  |
| mul_oc        | 1.2   | 41 | Умножить с проверкой переполнения (необязательна).  |
| div_oc        | 1.2   | 42 | Деление с проверкой переполнения (необязательна).   |
| input         | 1.2   | 48 | Прочитать из порта ввода. RD = векторный регистр, RT = адрес порта, RS = длина вектора (привилегированная команда).   |
| output        | 1.2   | 49 | Записать в порт вывода. RD = являющийся векторным регистром операнд-источник, RT = адрес порта, RS = длина вектора (привилегированная команда).                           |
| gp2vec        | 1.3 B | 0  | Переслать значение из регистра общего назначения RS в находящийся в векторном регистре RD скаляр.   |
| set_bits_x    | 1.3 B | 1  | Установить все разряды, кроме одного. $RD = RS   \sim (1 \ll IM1)$ .  |
| clear_bits_x  | 1.3 B | 2  | Сбросить все разряды, кроме одного. $RD = RS \& (1 \ll IM1)$ .  |
| make_sequence | 1.3 B | 3  | Создать вектор, состоящий из RS последовательных чисел. Первое значение равно IM1.  |
| mask_length   | 1.3 B | 4  | Создать маску с true в первых RS байтах. Разряды опций — в IM1.   |
| vec2gp        | 1.3 B | 8  | Переслать значение первого элемента векторного регистра RS в регистр общего назначения RD.  |
| bitscan_f     | 1.3 B | 9  | Сканировать разряды вперёд. Найти индекс самого младшего разряда регистра RS, равного единице (для векторов необязательна).   |
| bitscan_r     | 1.3 B | 10 | Сканировать разряды назад. Найти индекс самого старшего разряда регистра RS, равного единице (для векторов необязательна).  |
| float2int     | 1.3 B | 12 | Преобразование вещественного значения в целочисленное значение, имеющее тот же размер операнда. Режим округления указывается в IM1.                                       |
| int2float     | 1.3 B | 13 | Преобразование целочисленного значения в вещественное значение, имеющее тот же размер операнда.   |
| round         | 1.3 B | 14 | Округлить вещественное число к целочисленному значению в вещественном представлении. Режим округления указывается в IM1.  |
| round2n       | 1.3 B | 15 | Округлить к ближайшему кратному числа $2^n$ . $RD = 2^n \cdot \text{round}(2^{-n} \cdot RS)$ . $n$ — знаковая целочисленная константа, находящаяся в IM1 (необязательна). |
| abs           | 1.3 B | 16 | Абсолютная величина целого числа. Если IM1 = 1, то используется насыщение.  |
| popcount      | 1.3 B | 17 | Подсчитать количество разрядов регистра RS, равных 1.   |
| broadcast     | 1.3 B | 18 | Разослать 8-разрядную константу во все элементы регистра RD, имеющего длину, указанную в регистре RS (31 в поле RS даёт скалярный результат).                             |
| fp_category   | 1.3 B | 19 | Проверить, принадлежат ли вещественные числа категориям, указанным константой.  |
| byte_reverse  | 1.3 B | 20 | Обратить порядок байтов в каждом элементе вектора.  |
| bit_reverse   | 1.3 B | 21 | Обратить порядок разрядов в каждом элементе вектора (необязательна).  |
| truth_tab2    | 1.3 B | 24 | Булева функция от двух переменных, заданная таблицей истинности.  |
| read_spev     | 1.3 B | 30 | Прочитать специальный регистр RT в векторный регистр RD, имеющий длину RS.  |

|      |       |    |  |
|------|-------|----|--|
| move | 1.3 C | 32 | Переслать 16–разрядную константу в 16–разрядный скаляр (необязательна).  |
| add  | 1.3 C | 33 | Сложить размноженную 16–разрядную константу с 16–разрядными элементами вектора (необязательна).  |
| and  | 1.3 C | 34 | Выполнить поразрядное И размноженной 16–разрядной константы с 16–разрядными элементами вектора (необязательна).  |
| or   | 1.3 C | 35 | Выполнить поразрядное ИЛИ размноженной 16–разрядной константы с 16–разрядными элементами вектора (необязательна).  |
| xor  | 1.3 C | 36 | Выполнить поразрядное ИСКЛЮЧАЮЩЕЕ ИЛИ размноженной 16–разрядной константы с 16–разрядными элементами вектора (необязательна).  |
| move | 1.3 C | 38 | $RD = IM2 \ll IM1$ . Расширить IM2 знаком до 32 разрядов и сдвинуть результат влево на беззнаковое значение IM1, чтобы получить 32–разрядный скаляр (необязательна). |
| move | 1.3 C | 39 | $RD = IM2 \ll IM1$ . Расширить IM2 знаком до 64 разрядов и сдвинуть результат влево на беззнаковое значение IM1, чтобы получить 64–разрядный скаляр (необязательна). |
| add  | 1.3 C | 40 | $RD += IM2 \ll IM1$ . Сложить размноженную сдвинутую знаковую константу с 32–разрядными элементами вектора (необязательна).  |
| add  | 1.3 C | 41 | $RD += IM2 \ll IM1$ . Сложить размноженную сдвинутую знаковую константу с 64–разрядными элементами вектора (необязательна).  |
| and  | 1.3 C | 42 | $RD \&= IM2 \ll IM1$ . Выполнить поразрядное И размноженной сдвинутой знаковой константы с 32–разрядными элементами вектора (необязательна).                         |
| and  | 1.3 C | 43 | $RD \&= IM2 \ll IM1$ . Выполнить поразрядное И размноженной сдвинутой знаковой константы с 64–разрядными элементами вектора (необязательна).                         |
| or   | 1.3 C | 44 | $RD  = IM2 \ll IM1$ . Выполнить поразрядное ИЛИ размноженной сдвинутой знаковой константы с 32–разрядными элементами вектора (необязательна).                        |
| or   | 1.3 C | 45 | $RD  = IM2 \ll IM1$ . Выполнить поразрядное ИЛИ размноженной сдвинутой знаковой константы с 64–разрядными элементами вектора (необязательна).                        |
| xor  | 1.3 C | 46 | $RD \hat{=} IM2 \ll IM1$ . Выполнить поразрядное ИСКЛЮЧАЮЩЕЕ ИЛИ размноженной сдвинутой знаковой константы с 32–разрядными элементами вектора (необязательна).       |
| xor  | 1.3 C | 47 | $RD \hat{=} IM2 \ll IM1$ . Выполнить поразрядное ИСКЛЮЧАЮЩЕЕ ИЛИ размноженной сдвинутой знаковой константы с 64–разрядными элементами вектора (необязательна).       |
| add  | 1.3 C | 48 | $RD += IM21 \ll 16$ . Сложить размноженную знаковую сдвинутую влево на 16 разрядов 16–разрядную константу с 32–разрядными элементами вектора (необязательна).        |
| add  | 1.3 C | 49 | $RD += IM21 \ll 16$ . Сложить размноженную знаковую сдвинутую влево на 16 разрядов 16–разрядную константу с 64–разрядными элементами вектора (необязательна).        |
| mov  | 1.3 C | 56 | Переслать преобразованную вещественную константу половинной точности в скаляр одинарной точности (необязательна).  |
| mov  | 1.3 C | 57 | Переслать преобразованную вещественную константу половинной точности в скаляр двойной точности (необязательна).  |
| add  | 1.3 C | 58 | Сложить размноженную вещественную константу половинной точности с каждым элементом вектора, состоящего из чисел одинарной точности (необязательна).                  |

|              |       |       |  |
|--------------|-------|-------|--|
| add          | 1.3 C | 59    | Сложить размноженную вещественную константу половинной точности с каждым элементом вектора, состоящего из чисел двойной точности (необязательна).  |
| mul          | 1.3 C | 60    | Перемножить размноженную вещественную константу половинной точности с каждым элементом вектора, состоящего из чисел одинарной точности (необязательна).  |
| mul          | 1.3 C | 61    | Перемножить размноженную вещественную константу половинной точности с каждым элементом вектора, состоящего из чисел двойной точности (необязательна).  |
| permute      | 2.5   | 2, 8  | Элементы вектора RT переставляются в пределах каждого блока размером RS байтов, индексы указаны в регистре RU. Каждый индекс отсчитывается относительно начала блока. Индекс вне диапазона порождают нули. Максимальный размер блока зависит от реализации.                                      |
| concatenate  | 2.5   | 2, 9  | Вектор RT длины RS и вектор RU длины RS склеиваются в вектор RD длины $2 \cdot RS$ .   |
| truth_tab3   | 2.5   | 3, 8  | Булева функция от трёх переменных, заданная таблицей истинности (необязательна).   |
| truth_tab4   | 2.5   | 4, 8  | Булева функция от четырёх переменных, заданная таблицей истинности (необязательна).  |
| mul_add      | 2.5   | 3, 9  | $RD = \pm RS \pm RT \cdot RU$ (необязательна, но рекомендуется).   |
| add_add      | 2.5   | 3, 10 | $RD = \pm RS \pm RT \pm RU$ (необязательна).   |
| add_add_add  | 2.5   | 3, 11 | $RD = \pm RS \pm RT \pm RU \pm IM2$ Сложить три векторных регистровых операнда и 16-разрядную константу IM2 (необязательна).   |
| add_add_add  | 2.5   | 4, 11 | $RD = \pm RD \pm RS \pm RT \pm RU$ Сложить четыре векторных регистровых операнда (необязательна).  |
| load_hi      | 2.7   | 16    | Сделать вектор из двух элементов. $dest[0] = 0$ , $dest[1] = IM2$ .  |
| insert_hi    | 2.7   | 17    | Сделать вектор из двух элементов. $dest[0] = src1[0]$ , $dest[1] = IM2$ .  |
| make_mask    | 2.7   | 18    | Создать вектор, в котором разряд №0 каждого элемента идёт из разрядов поля IM2, а оставшиеся разряды — из RS.  |
| replace      | 2.7   | 19    | Заменить элементы в RS константой IM2.   |
| replace_even | 2.7   | 20    | Заменить элементы в RS, имеющие чётные номера, константой IM2.   |
| replace_odd  | 2.7   | 21    | Заменить элементы в RS, имеющие нечётные номера, константой IM2.   |
| broadcast    | 2.7   | 22    | Разослать 32-разрядную константу во все элементы регистра RD, имеющего длину, указанную в регистре RS (31 в поле RS даёт скалярный результат).   |
| permute      | 2.7   | 33    | Элементы вектора RT переставляются в пределах каждого блока размером RS байтов. 4·n разрядов поля IM2 используется в качестве индекса, с 4 разрядами на каждый элемент в блоке размера n. Тот же шаблон используется в каждом блоке. Количество элементов в каждом блоке: $n = RS / OS \leq 8$ . |

Таблица 4.3.3. Список одноформатных команд с операндами, находящимися в памяти.

| Команда  | Формат | OP1, OP2 | Описание  |
|----------|--------|----------|---|
| store    | 2.7 B  | 48       | Сохранить 32-разрядную константу IM2 в находящемся в памяти операнде, имеющем базу RT и 8-разрядное смещение IM1 (необязательна). |
| fence    | 2.4.x  | 0, 8     | Барьер в памяти, по чтению, по записи, или полный (указывается OP3).  |
| cmp_swap | 2.8.x  | 1, 8     | Атомарное сравнение и обмен.  |

|                  |             |       |  |
|------------------|-------------|-------|--|
| read_insert      | 2.4.0 2.4.3 | 2, 8  | Заменить в векторе RD один элемент, начинающийся со смещения RS·OS, скалярным операндом, находящимся в памяти (необязательна).   |
| move_store       | 2.4.x       | 3, 8  | Условная пересылка и сохранение.<br>Разряды маски = 01 или 11: сохранить RU.<br>Разряды маски = 10: сохранить zero.<br>Разряды маски = 11: сохранить RD.<br>(необязательна).   |
| extract_store    | 2.4.0       | 3, 9  | Выделить один элемент из вектора RD, начинающийся со смещения RS·OS и имеющий размер OS, в находящийся в памяти операнд с базой RT и смещением IM2 (необязательна).  |
| extract_store    | 2.4.3       | 3, 9  | Выделить один элемент из вектора RD, начинающийся со смещения RS·OS и имеющий размер OS, в находящийся в памяти операнд с базой RT, масштабируемым индексом RU и беззнаковым лимитом $RU \leq IM2$ (необязательна).                                  |
| compress_store   | 2.4.1       | 3, 10 | Сжать вектор RD длины RS в вектор половинной длины и половинного размера элемента. Двойная точность → одинарная точность, 64-разрядное целое → 32-разрядное целое, и т.п. Сохранить в памяти с базой RT, смещением IM2, длиной RS/2 (необязательна). |
| add_store        | 2.4.x       | 4, 8  | Сложить RD и RU, сохранить результат в находящемся в памяти операнде (необязательна).  |
| sub_store        | 2.4.x       | 4, 9  | Вычесть RU из RD, сохранить результат в находящемся в памяти операнде (необязательна).   |
| mul_store        | 2.4.x       | 4, 10 | Перемножить RD и RU, сохранить результат в находящемся в памяти операнде (необязательна).  |
| read_memory_map  | 2.4.2       | 48, 8 | Прочитать карту памяти. RD = элемент карты, RT = указатель памяти, RS = длина вектора и отрицательный индекс как для источника, так и для приёмника (привилегированная).   |
| write_memory_map | 2.4.2       | 48, 9 | Записать карту памяти. RD = элемент карты, RT = указатель памяти, RS = длина вектора и отрицательный индекс как для источника, так и для приёмника (привилегированная).  |

## 4.4. Описание команд

В данном разделе описываются команды, для которых нужны специальные объяснения.

### Многоформатные команды

#### **nop**

Рекомендуется кодировать команды NOP в виде 32-разрядного слова, все разряды которого равны нулю. Процессору разрешается пропускать такого рода команды NOP на ранней стадии конвейера, и настолько быстро, насколько он может. Пара малых команд, в которой вторая команд — NOP, может рассматриваться как одна команда.

Эти команды NOP могут использоваться только как заполнители, но не для задержек.

#### **move**

Копирование значения из находящегося в памяти операнда, регистра, или непосредственно заданной константы в регистр. Если приёмник — векторный регистр, а источник — непосредственно заданная константа, то результат будет скаляром. Значение размножено не будет, поскольку нет никакого иного входного операнда, который бы указывал длину вектора. Если желателен вектор, то используйте команду broadcast.

Команда move с непосредственно заданным операндом — предпочтительный метод обнуления регистра.

Команда move имеет несколько дополнительных малых и одноформатных вариантов. Ассемблер, как правило, выберет самый короткий вариант, в который помещаются указанные операнды.

## store

Операнды–источники и операнды–приёмники меняются ролями, так что значение из RD записывается в находящийся в памяти операнд. Допускаются только форматы, которые указывают находящийся в памяти операнд (скалярный, либо векторный без размножения).

Размер находящегося в памяти операнда определяется полем размера операнда (OS), когда указан находящийся в памяти скалярный операнд, или длиной векторного регистра в RS, когда указан находящийся в памяти векторный операнд.

Аппаратура должна быть в состоянии обрабатывать размеры находящихся в памяти операндов, не являющиеся степенями двойки, не используя при этом дополнительной памяти (чтение и перезапись за пределами находящегося в памяти операнда — не допускаются, разве что обращение из других потоков блокировано во время выполнения операции, и подавляются исключения отсутствия доступа). Разрешается записывать операнд по кусочкам.

Замаскированная операция с разрядами маски №№ 0 и 1, равными нулю одновременно, запишет в память ноль.

Замаскированная операции с разрядом №0, равным 0, и разрядом №1, равным единице, для векторных регистров может поддерживаться, а может и не поддерживаться. Если поддерживается, то эта комбинация оставит ячейку памяти без изменения, и не может быть реализована как чтение, совмещённое с записью, поскольку это не было бы потокобезопасно.

## prefetch

Предвыборка находящегося в памяти операнда в кэш. Разные варианты могут указываться разрядами №№0–3 поля OP3 форматов 2.4 и 2.8.

## sign\_extend

Входным операндом может быть 8–разрядное, 16–разрядное, или 32–разрядное целое число. Это целое число расширяется знаком, чтобы получить 64–разрядный результат в регистре общего назначения или скаляр в векторном регистре. Если входной операнд — вектор, то в каждом 64–разрядном блоке используется только первый элемент. Вещественные типы использоваться не могут.

## min and max

$\text{min}(\text{src1}, \text{src2}) = \text{src1} < \text{src2} ? \text{src1} : \text{src2}$

$\text{max}(\text{src1}, \text{src2}) = \text{src1} < \text{src2} ? \text{src1} : \text{src2}$

Операнды рассматриваются как знаковые. Есть также версия для беззнаковых целых:

$\text{min\_u}(\text{src1}, \text{src2}) = \text{src1} < \text{src2} ? \text{src1} : \text{src2}$

$\text{max\_u}(\text{src1}, \text{src2}) = \text{src1} < \text{src2} ? \text{src1} : \text{src2}$

Когда беззнаковая версия применяется к вещественным операндам, она берёт абсолютные величины операндов, и имя команды изменяется:

$\text{min\_abs}(\text{src1}, \text{src2}) = \text{min}(\text{abs}(\text{src1}), \text{abs}(\text{src2}))$

$\text{max\_abs}(\text{src1}, \text{src2}) = \text{max}(\text{abs}(\text{src1}), \text{abs}(\text{src2}))$

Обработка вещественных операндов, являющихся нечислами (NaN), определяется разрядом №22 регистра маски или вещественного управляющего регистра. Если разряд №22 равен нулю, то, в соответствии с IEEE Standard 754-2008, результатом является не являющийся нечислом операнд. Если разряд №22 равен единице, то входной операнд, являющийся NaN, распространяется дальше.

Являющийся NaN операнд, который не является распространяемым, породит ловушку, если установлен флаговый разряд №29.

## Поразрядные логические команды

Это следующие команды: and, and\_not, or, xor. Вещественные операнды обрабатываются точно так же, как и целочисленные.



## Команды манипуляции разрядами

Для манипуляции разрядами предоставляются следующие команды:

`extract_b`: выделить разряд с номером `src2` из `src1`

`set_b`: заменить в `src1` разряд с номером `src2` на 1

`clear_b`: заменить в `src1` разряд с номером `src2` на 0

`toggle_b`: инвертировать в `src1` разряд с номером `src2`

Вещественный операнд в `src1` рассматривается как целое число такого же размера. Индекс разряда в `src2`, независимо от типа операнда, интерпретируется как 8-разрядное беззнаковое целое число.

Эти команды могут быть реализованы с 8-разрядной непосредственно заданной константой для `src2`, вместо большей константы, которая потребовалась бы, если бы мы использовали команды `AND`, `OR`, `XOR` для манипулирования одиночными разрядами. Эти команды могут также использоваться с вещественными числами, в основном для манипулирования знаковым разрядом.

## `mul_add`

Совмещённые умножение и сложение.

$dest = \pm src1 \pm (src2 \cdot src3)$

Команда совмещённого умножения и сложения часто может значительно улучшить производительность вещественного кода.

Поддерживаются только форматы, допускающие три операнда.

Знаки операндов могут быть изменены, что указывается в разрядах №№0–3 поля `OP3` в форматах, использующих шаблон `E2`, включая дополнительный формат `2.5`, при этом

разряд 0: изменить знак у элементов вектора `src1` с чётными номерами

разряд 1: изменить знак у элементов вектора `src1` с нечётными номерами

разряд 2: изменить знак у элементов вектора `src2·src3` с чётными номерами

разряд 3: изменить знак у элементов вектора `src2·src3` с нечётными номерами

Команда делает возможным выполнение умножения–и–сложения, умножения–и–вычитания, умножения–и–обратного–вычитания, и т.п. Можно также выполнять умножение с чередующимися сложением и вычитанием, что полезно при вычислениях с комплексными числами. В других форматах, в которых поле `OP3` отсутствует, смены знака нет. Поддерживается дополнительная одноформатная версия `mul_add`, с четырьмя регистровыми операндами и полем `OP3`.

Поле `OP3` не используется как счётчик сдвига в форматах `2.5` и `2.9`.

Поддержка целочисленных операндов — необязательна. Поддержка вещественных операндов — обязательна, но желательна.

## `add_add`

Два сложения в одной команде.

$dest = \pm src1 \pm src2 \pm src3$

Поддерживаются только форматы, допускающие три операнда.

Знаки операндов могут быть изменены, что указывается в разрядах №№0–2 поля `OP3` в форматах, использующих шаблон `E2`, включая дополнительный формат `2.5`, при этом

bit 0: изменить знак `src1`

bit 1: изменить знак `src2`

bit 2: изменить знак `src3`

В других форматах, в которых поле `OP3` отсутствует, смены знака нет. Поддерживается дополнительная одноформатная версия `add_add`, с четырьмя регистровыми операндами и полем `OP3`.

Поле `OP3` не используется как счётчик сдвига в форматах `2.5` и `2.9`.

Желательна точность вещественных операндов, меньшая единицы самого младшего разряда численно самого большого операнда, но промежуточный результат не вычисляется с неограниченной точностью. Аппаратная реализация может подстроить экспоненты для всех операндов за первый такт, и использовать сеть сумматора цепи умножения.

Данную команду следует поддерживать, только если её можно реализовать так, чтобы она была быстрее двух последовательных команд сложения. Она может поддерживаться для целочисленных операндов, вещественных операндов, или и для тех, и для других. См. также команду `add_add_add` (с. 49).

## Команды сравнения

Команда сравнения сравнивает два операнда–источника и сохраняет результат в разряде №0 приёмника. Когда используются форматы 0.0-0.3 или 2.0-2.3, условие определяется добавочным кодом, сохранённым в третьем операнде–источнике. Форматы, использующие шаблон E2 (2.4, 2.5, 2.8, 2.9) кодируются иначе: код условия содержится в поле OP3. Шестнадцатиразрядное поле IM2 форматов 2.5 и 2.9 используется как второй операнд–источник, который не сдвигается на OP3.

Оставшиеся разряды результата копируются из регистра маски, или из численного управляющего слова, если маска не используется. Это подходит, когда результат используется как маска.

Коды условий определены в следующей таблице:

Таблица 4.4.1. Коды условий для команд сравнения

| Разряд | Смысл  |
|--------|--|
| 0      | Инвертирует условие.   |
| 1-2    | Определяет условие:<br>0 = меньше,<br>1 = равно,<br>2 = больше,<br>3 = неупорядочено.  |
| 3      | Для целочисленных операндов:<br>0 = знаковые операнды,<br>1 = беззнаковые операнды.<br>Для вещественных операндов:<br>данный разряд указывает результат, если один операнд, либо оба,<br>являются нечислами (NaN). |

Команды сравнения могут быть замаскированы. Разряд №0 результата равен разряду №1 регистра маски, если разряд №0 регистра маски равен нулю.

## Команды малого формата

### clear

Данная команда устанавливает длину векторного регистра равной нулю. Всё содержимое теряется. Регистр может затем рассматриваться как неиспользуемый.

### Операции push и pop

Команд push и pop нет. Регистр общего назначения R можно втолкнуть в стек с помощью следующей пары малых команд:

```
add sp,-8
store [sp],R
```

Регистр общего назначения R можно вытолкнуть из стека с помощью следующей пары малых команд:

```
move R,[sp]
sub sp,-8
```

Обратите внимание, что константа -8 может содержаться в 4–разрядном знаковом поле RS, а константа 8 — нет. Именно по этой причине мы прибавляем и вычитаем -8, а не выполняем обратные операции с +8.

Для этих последовательностей ассемблер может поддерживать макросы с именами push и pop.

## Сохранение и восстановление векторных регистров

При сохранении векторного регистра переменной длины мы не хотим сохранять максимальную длину, когда используется только часть регистра. Как следствие, мы имеем команды save\_cp и restore\_cp, предназначенные для сохранения и восстановления векторных регистров без использования большего объема памяти, нежели необходимо.

Обратите внимание, что формат сохранённого образа зависит от реализации. Как правило, команда `save_cp` сохранит длину вектора, за которой следует столько байтов, сколько указано длиной, а команда `restore_cp` прочтёт длину, а затем прочтёт столько байтов, сколько указано длиной.

Микропроцессору разрешается сжимать данный любым способом, который можно обработать достаточно быстро. Например, булев вектор, использующий только один разряд в каждом элементе, может, очевидно, быть сжат до гораздо меньшего размера. Образ неиспользуемого векторного регистра будет, как правило, содержать несколько нулевых байтов для длины.

Программному обеспечению никогда не следует использовать сохранённый образ ни для чего иного, нежели восстановление векторного регистра на той же модели микропроцессора, что сохранила его, поскольку формат образа несовместим у разных моделей.

Размер сохранённого образа можно прибавить к указателю командой `add_cps` или вычесть из указателя командой `sub_cps`. Поле RS задаёт указатель, которым может быть `r0–14` или `r31` (указатель стека).

Векторный регистр `V` можно сохранить в стеке (втолкнуть в стек) с помощью следующей пары малых команд:

```
sub_cps sp,V
save_cp [sp],V
```

Векторный регистр `V` можно восстановить из стека (вытолкнуть) с помощью следующей пары малых команд:

```
restore_cp V,[sp]
add_cps sp,V
```

Те же команды можно использовать для сохранения регистров при переключении задач. При сохранении таким способом, неиспользуемые векторные регистры будут использовать очень мало места.

Размер сжатого образа, указываемого командами `add_cps` и `sub_cps`, при использовании указателя стека должен быть кратным 8, чтобы сохранить должное выравнивание стека.

При переключении задач, когда, как правило, используется другой указатель команд, разрешается использовать меньший размер, не кратный 8. В этом случае для управления форматом сохранённого образа должен быть предоставлен управляющий регистр.

Команде `restore_cp` разрешается читать больше байтов, чем необходимо, вплоть до значения, равного максимальной длине вектора плюс 8 байт, и отбрасывать впоследствии, когда станет известна действительная длина, любые избыточные байты.

## Одноформатные команды, использующие регистры общего назначения и специальные регистры

### `read_spe`, `write_spe`

Чтение или запись специального регистра. Ниже указаны определённые на данный момент специальные регистры. Разрядность каждого равна 64. Эти регистры инициализируются их принятыми по умолчанию значениями в момент запуска программы.

Таблица 4.4.2. Список специальных регистров

| Номер специального регистра | Смысл                                       |
|-----------------------------|---|
| 0                           | Численный управляющий регистр (NUMCONTR).   |
| 1                           | Идентификатор (ID) марки микропроцессора    |
| 2                           | Номер версии микропроцессора.               |
| 28                          | Указатель блока окружения потока (THREADP). |
| 29                          | Указатель секции данных (DATAP).            |

### `read_cpb`, `write_cpb`

Чтение или запись регистра возможностей процессора. Эти регистры используются для указания возможностей процессора, таких, как поддержка необязательных команд и ограничения на длину вектора. Разрядность такого регистра равна 64. В момент запуска программы эти регистры инициализируются принятыми для них по умолчанию значениями.

Находящаяся в IM1 непосредственно заданная константа определяет детали операции:

Таблица 4.4.3. Смысл непосредственно заданной константы в командах `read_cpb` и `write_cpb`

| Номер разряда | Смысл   |
|---------------|---|
| 0             | 0: чтение/запись возможностей для типа операнда, указанного в разрядах №№5-7.<br>1: чтение типичных возможностей для всех типов операндов / запись возможностей для всех соответствующих типов операндов. |
| 1             | 0: чтение текущего значения регистра, которое, возможно, изменено.<br>1: чтение реальных возможностей аппаратуры (записывать нельзя).   |
| 5-7           | Тип операнда для возможностей.  |

Таблица 4.4.4. Список регистров возможностей

| Номер регистра возможностей | Смысл   |
|-----------------------------|---|
| 0                           | Максимальная длина вектора для команд общего назначения.  |
| 1                           | Максимальная длина вектора для команд перестановки.   |
| 2                           | Максимальная длина блока для команд перестановки.   |
| 3                           | Максимальная длина вектора для <code>compress_sparse</code> и <code>expand_sparse</code> .                              |
| 8                           | Поддержка необязательных команд, работающих с регистрами общего назначения. Каждый разряд отвечает за свою команду.     |
| 9                           | Поддержка необязательных команд, работающих со скалярами в векторных регистрах. Каждый разряд отвечает за свою команду. |
| 10                          | Поддержка необязательных команд, работающих с векторами. Каждый разряд отвечает за свою команду.                        |

Изменение значений максимальной длины вектора оказывает следующее влияние. Если максимальная длина уменьшается до величины, меньшей физически возможной, то любая попытка сделать более длинный вектор даст вектор с уменьшенной длиной. Поведение векторных регистров, у которых до уменьшения максимальной длины уже была большая длина, зависит от реализации. Если максимальная длина устанавливается равной значению, которое больше физически возможного, то любая попытка сделать вектор размера, большего физически возможного, вызовет ловушку, для облегчения эмуляции. Регистры возможностей с номерами 0–3 для целей эмуляции могут быть увеличены. Значение регистров возможностей с номерами 0–3 должно быть степенью двойки.

Регистры возможностей с номерами 8–9 могут модифицироваться, для тестовых целей или для того, чтобы сообщить программному обеспечению: „не используй конкретные команды“. То же значение будет возвращаться при чтении регистра. Попытка выполнить неподдерживаемую команду вызовет ловушку, независимо от значения регистра возможностей.

### **`read_sys`, `write_sys`**

Эти команды предназначены для обращения к различным регистрам, доступным только для чтения.

### **`read_perf`**

Прочсть внутренний счётчик тактов, количество выполненных команд, или иные связанные с производительностью счётчики.

### **`read_perfs`**

То же, что и `read_perf`. Данная команда сериализуется. Это означает, что она не может выполняться неупорядоченно.

### **`popcount`**

Команда `popcount` считает количество единичных разрядов в целом числе. Она может также использоваться для генерирования чётности.

### **bitscan\_f**

Сканировать разряды вперёд.

Найти индекс самого младшего единичного разряда, т.е. наибольшее  $X$ , для которого  $((1 \ll X) - 1) \& \text{src1}) == 0$ .

### **bitscan\_r**

Сканировать разряды назад.

Найти индекс самого старшего единичного разряда, т.е. наибольшее  $X$ , для которого  $(1 \ll X) \leq \text{src1}$ .

### **round\_d2**

Округлить к ближайшей степени двойки, т.е.  $1 \ll \text{bit\_scan\_reverse}(\text{src1})$ .

### **round\_u2**

Округлить к ближайшей большей степени двойки, т.е.

$(S \& (S-1)) == 0 ? S : 1 \ll (\text{bit\_scan\_reverse}(S) + 1)$ ,

где  $S = \text{src1}$ .

### **shift\_add**

Сдвинуть и сложить,  $\text{dest} = \text{src1} + (\text{src2} \ll \text{src3})$ ;  $\text{src1}$  использует тот же регистр, что  $\text{dest}$ ;  $\text{src3}$  — 8-разрядная знаковая непосредственно заданная константа.

Если  $\text{src3}$  — отрицательно, то будет выполняться сдвиг вправо.

### **address**

Вычислить адрес относительно указателя, сложив 32-разрядную расширенную знаком константу с регистром общего назначения или специальным регистром. Регистром-указателем может быть  $\text{r0-r27}$ ,  $\text{THREADP}$  (28),  $\text{DATAP}$  (29),  $\text{IP}$  (30) или  $\text{SP}$ (31).

### **cmp\_swap**

Команда атомарного сравнения и обмена, используемая для синхронизации и безблокировочного разделения данных между потоками;  $\text{src1}$  и  $\text{src2}$  — регистровые операнды;  $\text{src3}$  — находящийся в памяти операнд, который должен быть выровнен по естественному адресу. Все операнды рассматриваются как целочисленные, независимо от указанного типа операнда. Операция выполняется так:

```
temp = src3;
if (temp == src1) src3 = src2;
return temp;
```

Если необходимо, могут быть реализованы и другие атомарные команды (в формате 2.8 с  $\text{OP1} = 1$  и увеличивающимися значениями в  $\text{OP2}$ ).

## **Одноформатные команды с РОН в качестве входного операнда и векторным регистром в качестве выходного, или наоборот**

### **gp2vec**

Значение регистра общего назначения копируется в находящийся в векторном регистре скаляр. Длина будет равна размеру операнда. Никаких преобразований типа не выполняется.

### **vec2gp**

Первый элемент векторного регистра копируется в регистр общего назначения. Если указан целочисленный тип, имеющий разрядность, меньшую 64, то значение знаком расширяется до 64 разрядов. Если указан тип „вещественное число одинарной точности“, то значение расширяется нулём до 64 разрядов. Никаких преобразований типов не выполняется.

### **set\_len**

Устанавливает длину векторного регистра равной количеству байт, указанному в регистре общего назначения. Если указанная длина больше длины, максимально допустимой для указанного типа операнда, то будет использоваться максимальная длина.

Если выходной вектор длиннее входного, то дополнительные элементы будут нулями. Если выходной вектор — короче входного, то лишние элементы будут отброшены.

### **get\_len**

Получает длину векторного регистра (в байтах). Результат сохраняется в регистре общего назначения.

### **set\_num**

То же, что и set\_len, но длина умножается на размер операнда.

### **get\_num**

То же, что и get\_len, но длина делится на размер операнда.

### **mask\_length**

Сделать булев вектор, для того, чтобы замаскировать первые  $n$  элементов вектора, где  $n = RS /$  (размер операнда). Выходной вектор RD будет иметь ту же длину, что и входной вектор RD. RS указывает длину части, которая разрешается маской. IM1 содержит следующие разряды опций:

разряд №0 = 0: разряд №0 будет равен 1 в первых  $n$  элементах результата, и 0 — в остальных;

разряд №0 = 1: разряд №0 будет равен 0 в первых  $n$  элементах результата, и 1 — в остальных;

разряд №1 = 1: разряд №1 всех элементов результата равен 1;

разряд №2 = 1: копировать разряд №1 каждого элемента из входного вектора RD;

разряд №3 = 1: копировать разряд №1 каждого элемента из численного управляющего регистра;

разряд №4 = 1: копировать оставшиеся разряды из входного вектора RD;

разряд №5 = 1: копировать оставшиеся разряды из численного управляющего регистра.

Разряды результата, не установленные никакой из этих опций, будут нулями.

### **make\_sequence**

Сделать вектор, длина которого равна RS байтов. Количество элементов равно  $RS /$  (размер операнда). Первый элемент равен IM1, следующий элемент — IM1+1, и т.д. Поддержка вещественных чисел — необязательна.

## **Другие одноформатные команды, которые могут изменять длину вектора**

### **bits2bool**

Расширить смежные разряды векторного регистра до булева вектора, с одним разрядом в каждом элементе

### **bool2bits**

Преобразовать булев вектор из  $n$  элементов в  $n$  непрерывных разрядов векторного регистра. Длина результирующего вектора будет равна степени двойки, достаточной для хранения  $n$  разрядов.

### **shift\_expand**

Длина вектора увеличивается на указанное количество байтов, посредством сдвига всех байтов вправо и добавления нулевых младших байтов. Если получившаяся длина больше максимальной длины вектора для указанного типа операнда, то старшие байты теряются.

### **shift\_reduce**

Длина вектора уменьшается на указанное количество байтов, посредством сдвига всех байтов вправо. Если получившаяся длина меньше нуля, то результатом будет вектор нулевой длины. Указываемый тип операнда — игнорируется.

### **compress**

Элементы вектора преобразуются к элементам половинного размера. Длина результирующего вектора будет равна половине длины входного вектора. Поле ОТ указывает тип операнда входного вектора. Вещественные числа двойной точности преобразуются в числа одинарной точности. Целочисленные элементы преобразуются к половинному размеру отбрасыванием старших разрядов. Поддержка следующих преобразований необязательна: одинарная точность в половинную, четырёхкратная точность в двойную, 8-разрядное целое в 4-разрядное.

Если длина входного вектора отличается от длины, указанной в RS, то перед сжатием длина преобразуется к длине в RS.

### **compress\_ss**

То же, что и compress. Целые числа трактуются как знаковые, и сжимаются с насыщением. Вещественные операнды использоваться не могут. Данная команда необязательна.

### **compress\_us**

То же, что и compress. Целые числа трактуются как беззнаковые, и сжимаются с насыщением. Вещественные операнды использоваться не могут. Данная команда необязательна.

### **expand**

Это операция, обратная к compress. Результирующий вектор имеет указанную длину, а входной вектор — половинную длину. Поле ОТ указывает тип операнда выходного вектора. Вещественные числа одинарной точности преобразуются в числа двойной точности. Целые числа преобразуются в числа двойного размера расширением знаком. Поддержка следующих преобразований необязательна: половинная точность в одинарную, двойная точность в четырёхкратную, 4-разрядное целое в 8-разрядное.

Если длина входного вектора отличается от  $RS/2$ , то перед расширением она преобразуется. Если получившаяся длина превышает максимальную длину вектора для указанного типа операнда, то лишние элементы теряются.

### **expand\_us**

То же, что expand. Целые числа расширяются знаком. Вещественные операнды использоваться не могут.

## **Одноформатные команды, которые могут перемещать данные горизонтально из одного вектора в другой**

Для очень длинных векторов задержка этих команд может зависеть от расстояния перемещения (указанного в RS).

### **extract**

Выделить один элемент вектора в скаляр, находящийся в векторном регистре. Находящийся вне диапазона индекс порождает нулевой результат. Может использоваться размер операнда, равный 16 байтам, даже если этот размер никак иначе не поддерживается.

### **insert**

Заменить один элемент вектора, вставив скаляр в позицию, указанную индексом. Находящийся вне диапазона индекс оставит вектор без изменения. Может использоваться размер операнда, равный 16 байтам, даже если этот размер никак иначе не поддерживается.

## **shift\_up**

Сдвинуть элементы вектора влево на количество элементов, указанное в RS. Младшие RS элементов приёмника становятся нулями, а старшие RS элементов источника — теряются.

Данная команда отличается от shift\_expand тем, что величина сдвига указывается как количество элементов, а не количество байтов, и тем, что длина вектора не изменяется.

## **shift\_dn**

Сдвинуть элементы вектора вправо на количество элементов, указанное в RS. Старшие RS элементов приёмника становятся нулями, а младшие RS элементов источника — теряются.

Данная команда отличается от shift\_reduce тем, что величина сдвига указывается как количество элементов, а не количество байтов, и тем, что длина вектора не изменяется.

## **permute**

Эта команда переставляет элементы вектора. Вектор делится на блоки, размером по RS байтов каждый. Размер блока должен быть степенью двойки и кратен размеру операнда. Элементы могут произвольно меняться местами в каждом блоке, но не между блоками. Каждый элемент результирующего вектора является копией элемента входного вектора, выбранного соответствующим индексом в индексном векторе. Индексы отсчитываются от начала того блока, которому принадлежат, так что индекс, равный нулю, выберет первый элемент блока входного вектора, и вставит его в соответствующую позицию результирующего вектора. Один и тот же элемент входного вектора может быть скопирован во много элементов результирующего вектора. Индекс, находящийся вне диапазона, в качестве результата даст нуль. Индексы интерпретируются как целые числа, независимо от типа операнда.

У команды permute есть две версии. Первая версия указывает индексы в векторе той же длины и того же размера элемента, что и входной вектор.

Вторая версия указывает индексы как 32-разрядную непосредственно заданную константу, с 4 разрядами на элемент. Эта константа разбивается на самое большее 8 элементов, по 4 разряда в каждом. Если блоки имеют более 8 элементов, то, для заполнения блока, последовательность из 8 элементов повторяется. В этой версии команды permute один и тот же шаблон индексов будет применён ко всем блокам.

Максимальный размер блока для команды permute зависит от реализации и задаётся специальным регистром. Причина этого ограничения на размер блока состоит в том, что сложность аппаратуры растёт квадратично с ростом размера блока. Полная перестановка возможна, если длина вектора не превышает максимального размера блока. Если RS больше максимального размера блока, то порождается ловушка.

Есть два способа комбинирования результатов многократных команд перестановки. Один метод заключается в использовании находящихся вне диапазона индексов, чтобы порождать нули для неиспользуемых элементов, а затем применять операцию поразрядного ИЛИ результатов. Другой метод состоит в использовании масок для комбинирования результатов.

Команды перестановки полезны для переупорядочивания данных, транспонирования матриц, и т.п.

Когда размер блока достаточно велик, чтобы содержать всю таблицу, команды перестановки могут также использоваться для параллельного просмотра таблицы.

Наконец, команды перестановки могут использоваться для сбора и рассеивания данных в пределах области, не большей длины вектора или размера блока.

## **broadcast**

Копирует первый элемент входного вектора во все элементы выходного вектора. Если максимальная длина вектора более 16 байт, то поддерживается размер элемента, равный 16 байтам (128 разрядов), даже если этот размер никак иначе не поддерживается.

## **Иные одноформатные векторные команды**

### **Арифметика с насыщением**

Сюда относятся команды add\_ss, add\_us, sub\_ss, sub\_us, mul\_ss, mul\_us, shl\_ss, shl\_us.

Эти команды используются для арифметических операций с насыщением. Выход за верхнюю границу даст максимальное значение для заданного размера операнда. Выход за нижнюю — минимальное значение.

Поддержка данных команд необязательна.



## Сложение с переносом и вычитание с заёмом

Это команды `add_c`, `sub_b`. В них `dest` и `src1` являются векторами из двух целых чисел, а `src2` — вектор из целых чисел, в котором используется только первый элемент.

`add_c`:

```
sum = src1[0] + src2[0] + (src1[1] & 1)
dest[0] = bit 0-63 of sum
dest[1] = bit 64 of sum
```

`sub_b`:

```
sum = src1[0] - src2[0] - (src1[1] & 1)
dest[0] = bit 0-63 of sum
dest[1] = bit 64 of sum
```

Поддержка этих команд необязательна. Более длинные векторы — не поддерживаются. См. с. 51 по поводу иных вариантов для более длинных векторов.

## Арифметические команды с проверкой переполнения

Это команды `add_oc`, `sub_oc`, `subr_oc`, `mul_oc`, `div_oc`.

Данные команды для арифметических вычислений используют элементы векторов, имеющие чётные номера. Каждый следующий элемент вектора, имеющий нечётный номер, используется для обнаружения переполнения. Если первый операнд-источник является скаляром, то результирующий операнд будет вектором из двух элементов.

Условия переполнения указываются следующими разрядами:

разряд №0. беззнаковое целочисленное переполнение(перенос)

разряд №1. знаковое целочисленное переполнение

разряд №2. вещественное переполнение

разряд №3. недопустимая вещественная операция

Значения распространяются так, чтобы к результат переполнения операции и обоим входным операндам применяется поразрядное ИЛИ.

Данные команды необязательны.

## Расширенное деление

Это команды `div_ex_s`, `div_ex_u`.

Они необязательны, и могут поддерживаться и для скаляров, и для векторов; только для скаляров; или не поддерживаться вовсе.

## `byte_reverse`

Данная команда обращает порядок байтов в целом числе. Она может использоваться при чтении и записи двоичных файлов данных с обратным порядком байтов.

## `read_spev`

Значение поля `RT` указывает специальный регистр, который нужно прочесть. Приёмник является векторным регистром, длина которого указана в `RS`.

На данный момент определены следующие специальные регистры:

Таблица 4.4.5. Специальные регистры, которые можно прочесть  
в векторы

| Номер специального регистра | Смысл  |
|-----------------------------|--|
| 0                           | Численный управляющий регистр (NUMCONTR). Это значение рассылается во все элементы регистра-приёмника с указанными размером операнда и длиной. |
| 1                           | Имя процессора. Результат является заканчивающейся нулём строкой в кодировке UTF-8, содержащей торговую марку и имя модели микропроцессора.    |

## replace

Все элементы из src1 заменяются целочисленной или вещественной константой из src2.

При использовании без маски константа просто рассылается, чтобы сделать вектор того же размера, что и src1. При использовании с маской элементы из src1 заменяются выборочно. В зависимости от разряда №1 маски, невыбранные элементы обнуляются или остаются без изменений.

## make\_mask

Сделать маску из разрядов 32-разрядной целочисленной константы src2. Каждый разряд из src2 идёт в разряд №0 одного элемента результата. Оставшиеся разряды каждого элемента берутся из src1. Длина результата — та же, что и у src1. Если в векторе более 32 элементов, то двоичный шаблон из src2 повторяется..

## fp\_category

Входной аргумент — вещественный вектор. Выходной — булев вектор, указывающий, принадлежит ли входной аргумент какой-либо из указанных разрядами непосредственно заданного операнда категорий:

Таблица 4.4.6. Смысл разрядов в fp\_category

| Номер разряда | Смысл  |
|---------------|--|
| 0             | Инвертировать результат.   |
| 1             | Ноль.  |
| 2             | Денормализованное.   |
| 3             | Нормализованное.   |
| 4             | Бесконечность.   |
| 5             | Нечисло (NaN).   |
| 6             | Знаковый разряд.   |
| 7             | Копировать оставшиеся разряды из маски или численного управляющего регистра. |

## Команды для таблиц истинности

Это команды truth\_tab2, truth\_tab3, truth\_tab4.

Эти команды могут вычислять заданные таблицами истинности произвольные булевы функции двух, трёх, или четырёх входных векторных булевых аргументов. Результат в разряде №0 каждого элемента вектора является произвольной булевой функцией разряда №0 соответствующих элементов каждого из входных операндов. Разряд №0 результата равен разряду из таблицы истинности, выбранному скомбинированными разрядами аргументов. Остальные разряды вектора-результата копируются из регистра маски, если таковой есть, или, в противном случае, из первого входного операнда.

У truth\_tab2 аргументы — в RD и RS, результат — в RD, а 4-разрядная таблица истинности — в IM1.

У truth\_tab3 аргументы — в RS, RT и RU, результат — в RD, а 8-разрядная таблица истинности — в IM2.

У truth\_tab4 аргументы — в RD, RS, RT и RU, результат — в RD, а 16-разрядная таблица истинности — в IM2.

У truth\_tab4 размер операнда должен быть не менее 16 разрядов. Команды truth\_tab3 и truth\_tab4 — необязательны.

Команды truth\_tab3 и truth\_tab4 в качестве дополнительного операнда могут использовать маску, в соответствии с обычной функцией последней.

Эти команды могут использоваться в качестве универсальных команд для манипулирования и комбинирования булевых векторов и масок.

Аппаратная реализация может использовать существующие модули сдвига, сдвигая таблицу истинности на количество разрядов, указанное скомбинированными разрядами входных операндов.

## add\_add\_add

Складывает четыре аргумента. Последний операнд может быть регистровым операндом или 16-разрядным знаковым непосредственно заданным операндом. Знаки операндов могут инвертироваться, что указывается разрядами 0–3 поля OP3:

разряд №0: изменить знак src1  
разряд №1: изменить знак src2  
разряд №2: изменить знак src3  
разряд №3: изменить знак src4  
По поводу деталей см. с. 40.  
Данная команда — необязательна.

## 4.5. Распространённые операции, для которых нет специальных команд

В данном разделе обсуждаются некоторые распространённые операции, которые не реализованы как отдельные команды, и то, как закодировать эти операции программно.

### Смена знака

Для целочисленных операндов осуществляйте её обратным вычитанием из нуля. Для вещественных операндов используйте команду `toggle_b` над знаковым разрядом.

### Команда `abs` для вещественных чисел

Для получения абсолютной величины вещественного числа используйте `clear_b` для очистки знакового разряда.

### Not

Чтобы инвертировать все разряды целого числа, выполните ИСКЛЮЧАЮЩЕЕ ИЛИ с -1. Для инвертирования булева значения выполните ИСКЛЮЧАЮЩЕЕ ИЛИ с 1.

### Вращение через перенос

Вращение через перенос используется редко, а распространённые реализации могут быть очень неэффективны. Вращение влево через перенос можно заменить командой `add_c` с одним и тем же регистром в обоих операндах-источниках.

### Горизонтальное векторное сложение

Команда сложения всех элементов вектора была бы полезна, но такая команда не поддерживается, ибо такая она была бы сложной командой с переменной задержкой, зависящей от длины вектора.

Сумму всех элементов вектора можно вычислить, повторно складывая младшую и старшую половины вектора. Данный метод иллюстрируется следующим примером, находящим горизонтальную сумму вектора, состоящего из 32-разрядных целых чисел. Синтаксис языка ассемблера описан на с. ??.

```
v0 = my_vector    // мы хотим вычислить горизонтальную сумму этого вектора
r0 = get_len(v0)  // длина вектора (в байтах)
r0 = roundu2.64(r0) // округлить к ближайшей большей степени двойки
v0 = set_len(v0, r0) // настроить длину вектора
// Цикл вычисления горизонтальной суммы для v0
LOOP: // метка
    // Вектор половинной длины.
    r1 = shift_rightu.64(r0, 1)
    // Получить старшую половину вектора.
    v1 = shift_reduce(v0, r1)
    // Сложить старшую и младшую половины
    v0 = add.32(v1, v0) // результат имеет ту же длину, что и первый операнд
    // Половинная длина для следующей операции.
    r0 = r1
    // повторять, пока вектор содержит более одного элемента
```

```

    compare_unsign_jmpabove(r1, 4, LOOP)
// Теперь сумма является скаляром, находящимся в v0.

```

Тот же самый метод может использоваться и для других горизонтальных операций. Может вызвать проблемы то, что команда `set_len` вставляет равные нулю элементы, если длина вектора не равна степени двойки. Особенно беспокоиться нужно, если операция не допускает равных нулю дополнительных элементов, например, если операция использует умножение или нахождение наименьшего элемента. Возможное решение состоит в маскировании неиспользуемых элементов на первой итерации. Следующий пример находит наименьший элемент в векторе из вещественных чисел:

```

v0 = my_vector           // найти наименьший элемент в этом векторе
r0 = get_len(v0)         // длина вектора (в байтах)
r1 = roundu2.64(r0)      // округлить к ближайшей большей степени двойки
r1 = shift_rightu.64(r1, 1) // половина длины
v1 = shift_reduce(v0, r1) // старшая часть вектора
r2 = sub.64(r0, r1)       // длина вектора v1
// использовать маску, поскольку два операнда могут иметь различные длины
v0 = set_len(v0, r1)      // уменьшить длину вектора v0
v2 = v0                   // произвольный вектор с длиной r1
v2 = mask_length.32(v2, r2, 0x22) // создать маску для v1
v0 = min.f(v0, v1, mask=v2) // получить минимум, замаскировав неиспользуемые элементы
cmp_unsign_jmpbeloweq(r1, 4, ENDOFLOOP) // проверить, не закончилось ли уже
// Цикл для вычисления горизонтального минимума из элементов v0.
LOOP: // метка
    // Вектор половинной длины.
    r2 = shift_rightu.64(r1, 1)
    // Получить старшую половину вектора.
    v1 = shift_reduce(v0, r2)
    // Вычислить минимум из старшей и младшей половины.
    v0 = min.f(v1, v0) // результат имеет ту же длину, что и первый операнд
    // Половинная длина для следующей операции.
    r1 = r2
    // повторять, пока вектор содержит более одного элемента
    compare_unsign_jmpabove(r2, 4, LOOP)
ENDOFLOOP:
// Теперь минимум является скаляром, находящимся в v0.

```

## Арифметика высокой точности

Библиотеки функций для арифметики высокой точности для сложения чисел с очень большим количеством разрядов обычно используют длинную последовательность команд сложения с переносом. Более эффективным методом для вычислений с большими числами является использование векторного сложения и метода ускоренного переноса. Следующий алгоритм вычисляет  $A + B$ , где  $A$  и  $B$  — большие целые числа, представленные в виде двух векторов, по  $n \cdot 64$  разрядов в каждом, где  $n < 64$ .

```

v0 = A                   // первый вектор, n*64 bits
v1 = B                   // второй вектор, n*64 bits
v2 = carry_in            // скаляр в векторном регистре
v0 = add.64(v0, v1)       // сумма без промежуточных переносов
v3 = compare.64(v0, v1, 8) // породить перенос = (SUM < B) (сравнение --- беззнаковое)
v4 = compare.64(v0, -1, 0xA) // распространить перенос = (SUM == -1)
v3 = bool2bits(v3)        // породить перенос, сжатый до битового поля
v4 = bool2bits(v4)        // породить перенос, сжатый до битового поля
// CA = CP ^ (CP + (CG<<1) + CIN) // распространить дополнительный перенос
v3 = shift_left.64(v3, 1) // сдвинуть влево порождённые переносы
v2 = add.64(v2, v4)
v2 = add.64(v2, v3)
v2 = xor.64(v2, v4)

```

```

v1 = bits2bool(v2)          // расширить дополнительный перенос на вектор
v0 = sum.64(v0,v1)          // прибавить поправку к сумме
r0 = get_num(v0)            // n = количество элементов в векторах
v3 = gp2vec.64(r0)          // копировать в векторный регистр
v2 = shift_rightu.64(v2,v3) // итоговый перенос
// v0 = сумма, v2 = итоговый перенос

```

Если числа А и В длиннее, чем максимальная длина вектора, то алгоритм повторяется. Если длина вектора — больше, чем  $64 \cdot 8$  байт, то вычисление дополнительного переноса вовлечёт более 64 разрядов, что снова потребует алгоритма работы с большими числами.

## 4.6. Неиспользуемые команды

Неиспользуемые команды и опкоды (коды операций) можно разбить на три типа:

- 1) Опкод зарезервирован для последующего использования. Попытка его выполнения вызовет ловушку (синхронное прерывание), которая может использоваться для порождения сообщения об ошибке или для эмуляции неподдерживаемой команды.
- 2) Опкод гарантированно генерирует ловушку, не только в текущей версии, но и всех последующих. Он может использоваться как заполнитель неиспользуемых частей памяти или как указание на ошибку, после которой невозможно восстановиться. Его можно также использовать для эмуляции специфичных для пользователя команд.
- 3) Ошибка игнорируется, и ловушки не возникает. Это может использоваться для последующих расширений, улучшающих производительность или функциональность, но которые можно безопасно игнорировать, когда они не поддерживаются.

Реализованы все три типа, и тип 1 — наиболее распространён.

Команды пор с ненулевыми значениями в неиспользуемых полях принадлежат типу 3. Эти команды игнорируются.

Команды `prefetch` и `fence` без находящегося в памяти операнда, с ненулевыми значениями в неиспользуемых полях, или с неопределёнными значениями в ОРЗ принадлежат типу 3. Эти команды игнорируются.

Неиспользуемые разряды в масках и численном управляющем регистре имеют тип 3. Эти разряды игнорируются.

Команды `trap` (в том числе условные) с ненулевыми значениями в неиспользуемых полях или неиспользуемыми значениями в любом поле имеют тип 2. Эти команды гарантированно порождают ловушку. Специальная версия команды `trap` предназначена для использования в качестве заполнителя неиспользуемых или недоступных частей памяти кода.

Команда `undef` имеет тип 2. Она гарантированно порождает ловушку на всех системах, и может использоваться для целей тестирования и эмуляции.

Команды `userdef__` имеют тип 1. Эти команды зарезервированы для определения пользователем и для целей конкретных приложений.

Для команд с ошибочной кодировкой следует предпочесть их поведение, как в типе 1. Сюда включаются коды команд с ненулевыми значениями в неиспользуемых полях, неподдерживаемыми типами операндов, или любыми другими двоичными шаблонами с неопределённым смыслом в каком-либо поле. Как вариант, в этих случаях может допускаться поведение типа 3. Если это так, то команде следует вести себя так, как будто она закодирована корректно.

Все прочие опкоды неявно определены как имеющие тип 1, и могут использоваться для последующих расширений.

Малым системам, без операционных систем и без поддержки ловушек, следует определить иное поведение.

# Глава 5. Другие детали реализации

## 5.1. Порядок байтов

Организация памяти использует прямой порядок байтов (от младшего к старшему). Для чтения и записи файлов данных с обратным порядком байтов предоставляются команды смены порядка байтов.

### Обоснование

Если бы использовалась организация с обратным порядком байтов, то способ хранения вектора в памяти зависел бы от размер элемента. Например, предположим, что у нас есть 128-разрядный векторный регистр, содержащий четыре 32-разрядных целых числа, обозначенные A, B, C, D. При использовании прямого порядка байтов, они хранились бы в памяти в следующем порядке:

где A0 — самый младший байт числа A, а D3 — самый старший байт числа D. При использовании же обратного порядка мы бы имели

A3, A2, A1, A0, B3, B2, B1, B0, C3, C2, C1, C0, D3, D2, D1, D0.

Этот порядок изменился бы, если бы тот же самый векторный регистр был организован, например, как восемь целых чисел, по 16 разрядов в каждом, или как два целых числа, по 64 разряда в каждом. Иными словами, нам бы потребовались разные команды чтения и записи для разных способов организации вектора.

Прямой порядок байтов более распространён по большому количеству причин, многократно обсуждавшихся в иных местах.

## 5.2. Реализация стека вызовов

Есть разные методы сохранения адресов возврата при вызовах функций: регистр связи, отдельный стек вызовов, или унифицированный стек, и для адресов возврата, и для локальных данных. Здесь мы обсудим достоинства и недостатки каждого из этих методов.

### Регистр связи

Некоторые системы для хранения адреса возврата используют регистр связи. Преимущество регистра связи состоит в том, что листовые функции могут вызываться без сохранения чего-либо в стеке, что экономит пропускную способность кэша в программах с большим количеством вызовов листовых функций. Недостаток состоит в том, что каждой нелистой функции нужно перед вызовом другой функции сохранять регистр связи в стеке, и восстанавливать его перед возвратом.

Если бы мы приняли решение использовать регистр связи, то им должен был бы быть специальный регистр, а не один из регистров общего назначения. Регистру связи не нужно поддерживать все вещи, которые можно делать с регистром общего назначения. Если регистр связи включается как один из регистров общего назначения, то у программиста возникнет соблазн сохранить регистр связи в другом регистре, а не в стеке, и затем, в конце функции, перейти по адресу, хранящемуся в том другом регистре. Это, конечно, работать будет, но мешает способам, которыми предсказываются возвраты. Модуль предсказания ветвления использует специальный механизм для предсказания возвратов, отличающийся от механизма, используемого для предсказания иных переходов и ветвлений. Данный механизм, называемый буфером стека возврата, представляет собой небольшой кольцевой кэш, запоминающий адреса последних вызовов. Если функция выполняет возврат переходом по адресу, содержащемуся в регистре, отличном от регистра связи, то она будет использовать ошибочный механизм предсказания, что вызовет большие задержки из-за неверного предсказания последующей серии возвратов. Буфер стека возврата также будет перепутан, если регистр связи используется для косвенного перехода или в иных целях.

Единственные команды, необходимые для регистра связи, помимо команд вызова и возврата, — команды push и pop. Мы можем уменьшить количество команд в нелистовых функциях, сделав комбинированную команду для “втолкнуть регистр связи, а затем вызвать функцию”, которая может использоваться для первого

вызова функции в нелистовой функции, и другую команду, для “вытолкнуть регистр связи, а затем выполнить возврат”, чтобы заканчивать нелистовую функцию. Однако это нарушает принцип, согласно которому мы хотим избежать сложных команд, чтобы упростить дизайн конвейера.

Единственный выигрыш в производительности, который мы получаем от использования регистра связи, состоит в экономии пропускной способности кэша из-за отсутствия сохранения адреса возврата для вызовов листовых функций. Выигрыш этот не повлияет на производительность в приложениях, в которых пропускная способность кэша — узкое место. Производительность команды возврата не оказывает влияния на пропускную способность кэша, поскольку может положиться на предсказание в буфере стека возврата.

Недостаток использования регистра связи заключается в том, что компилятор должен по-разному рассматривать листовые и нелистовые функции, и в том, что нелистовым функциям нужны дополнительные команды для сохранения и восстановления регистра связи из стека.

Следовательно, мы не будем использовать в архитектуре ForwardCom регистр связи.

## **Отдельный стек вызовов**

Мы можем иметь два стека: стек вызовов для адресов возврата, и стек данных, для локальных данных каждой функции. Программы без рекурсивных функций будут, как правило, иметь весьма ограниченную глубину стека вызовов, так что весь стек вызовов, или, по крайней мере, его „горячая“ часть, может храниться на кристалле, что улучшит производительность, ибо для операций вызова и возврата не нужно будет ни операций с памятью, ни операций с кэшем, — по крайней мере в критичном наиболее глубоко вложенном цикле программы. Также упростится предсказание адресов возврата, так как находящийся на кристалле кольцевой стек и буфер стека возврата будут одной и той же структурой.

Стек вызовов может быть реализован как кольцевой стек регистров на кристалле. Стек вызовов сбрасывается в память при переполнении. Команда возврата после такого события переполнения будет использовать значение на кристалле, а не значение в памяти, до тех пор, пока значение на кристалле не будет перезаписано новыми вызовами. Следовательно, событие сброса вряд ли должно возникать более одного раза в самой внутренней части программы.

Указатель для стека вызовов не должен быть регистром общего назначения, поскольку программисту редко нужно обращаться непосредственно к нему. Прямая манипуляция стеком вызовов нужна только при событии раскрутки стека (после исключения или long jump), либо при переключении задач.

У функции нет лёгкого способа обращения к адресу возврата, с которого она была вызвана. Сведения о вызывающем могут быть переданы явно, как параметр функции, в тех редких случаях, когда это необходимо. У сокрытия адреса возврата внутри процессора имеется достоинство с точки зрения безопасности: это мешает переписывать адрес возврата в случае программных ошибок или злонамеренных атак переполнением буфера.

Недостаток наличия отдельного стека вызовов состоит в том, что оно делает управление памятью более сложным, так как имеется два стека, которые потенциально могут переполниться. Для программ без рекурсивных функций размер стека вызова можно точно предсказать, используя метод, описанный на с. ??.

Отдельный стек вызовов может быть реализован в архитектуре ForwardCom. Размер накристалльного буфера стека и другие детали будут зависеть от реализации.

## **Унифицированный стек вызова для адресов возврата и локальных данных**

Многие имеющиеся системы используют один и тот же стек и для адресов возврата, и для локальных данных. Данный метод может использоваться с архитектурой ForwardCom, поскольку прост в реализации.

## **Заключение для ForwardCom**

Система ForwardCom может использовать отдельный стек вызовов или унифицированный стек, но не регистр связи. Аппаратная реализация команд вызова и возврата зависит от того, имеется ли один или два стека. Система с двумя стеками будет использоваться для больших процессоров, которым важны производительность и безопасность, тогда как система с унифицированным стеком может использоваться в малых процессорах, где предпочтительнее простота. Микропроцессор ForwardCom не должен поддерживать обе системы, но должно программное обеспечение. Определённые на с. ?? соглашения вызова сделают программное обеспечение совместимым как с процессорами, имеющими один стек, так и с процессорами, имеющими два. Хвостовые вызовы могут быть эффективно реализованы одной командой перехода, независимо от типа стека.

### 5.3. Вещественные ошибки и исключения

Исключения для вещественных ошибок по умолчанию — запрещены, но их можно разрешить с помощью разрядов 26–29 численного регистра управления или регистра маски. Разрешённые исключения отлавливаются как ловушки (синхронные прерывания).

Проблема в том, что исключение, вызванное одним элементом вектора, вызовет прерывание обработки всего вектора. В случае ловушек, вызванных одним элементом вектора, поведение программы, использующей вещественные векторы, будет зависеть от длины вектора. Мы можем положиться на порождение и распространение значений NAN и INF, вместо ловушек, если мы хотим устойчивых результатов на разных процессорах с разными длинами векторов.

Значения NAN будут распространяться по последовательности вещественных вычислений. Значение NAN может содержать двоичный шаблон диагностической информации, называемый полезной нагрузкой, и этот двоичный шаблон распространяется к результату. Проблема возникает, когда комбинируются два значения NAN, например,  $\text{NAN1} + \text{NAN2}$ . Стандарт IEEE standard (754-2008) указывает лишь, что к результату распространяется один из двух операндов со значением NAN, что нарушает фундаментальный принцип коммутативности сложения. Результат может быть неустойчивым, когда компилятор меняет местами два операнда. Другая проблема со стандартом IEEE состоит в том, что значения NAN, согласно этому стандарту, не распространяются через операции  $\max$  и  $\min$ .

Здесь предлагается отклониться от этого неудачного стандарта, и выдавать, при комбинировании операндов NAN, комбинацию, с помощью поразрядного ИЛИ, полезных нагрузок значений NAN, что сделает распространение значений NAN более полезным и устойчивым. Разные разряды в NAN могут использоваться для указания разных сообщений об ошибках. Если в последовательности вычислений возникло много разных ошибочных условий, то все эти условия можно отследить в окончательном результате. Данное более хорошее распространение значений NAN разрешается установкой разряда 22 в численном регистре управления или в регистре маски.

Реализация будет использовать лишь один разряд в полезной нагрузке NAN для каждого условия ошибки. Тихое NAN имеет установленный разряд мантиссы с номером *количество\_разрядов* – 1, тогда как остальные разряды доступны для любых полезных сведений. Если более хорошее распространение значений NAN разрешено разрядом 22 численного управляющего регистра или регистром маски, то процессор ForwardCom помещает диагностическую информацию в полезную нагрузку. Разряд мантиссы с номером *количество\_разрядов* – 2 указывает на неверную арифметическую операцию, такую, как  $0/0$ ,  $0 \cdot \infty$ ,  $\infty - \infty$ , и т.п. Разряд с номером *количество\_разрядов* – 3 указывает на квадратный корень из отрицательного числа или иные комплексные результаты. Оставшиеся разряды полезной нагрузки доступны для других целей, таких, как библиотеки функций.

Другие методы порождения сообщений об ошибках в библиотеках функций обсуждаются на с. ??.

### 5.4. Обнаружение целочисленного переполнения

Нет общепринятого стандартного метода обнаружения переполнения в целочисленных вычислениях. Обнаружение переполнения в операциях со знаковыми целыми числами в некоторых языках, вроде C++, — реально ночной кошмар (см., например, [stackoverflow.com/questions/199333/how-to-detect-integer-overflow-in-c-c](https://stackoverflow.com/questions/199333/how-to-detect-integer-overflow-in-c-c)).

Было бы приятно иметь надёжный способ обнаружения целочисленного переполнения, и, вероятно, распространения его через последовательность вычислений, аналогичную распространению NAN для вещественных вычислений, так, чтобы ошибки можно было проверять в конце последовательности вычислений, а не после каждой операции. Компиляторы могли бы поддерживать этот метод, предлагая обнаружение переполнения блоком `try/catch`. Если аппаратура предложит разумный метод, то более вероятно, что компиляторы поддержат обнаружение целочисленного переполнения.

Предлагались следующие методы:

- 1) Использовать несколько свободных разрядов регистров маски для обнаружения и распространения переполнения и других ошибок. У данного метода есть большое количество проблем, препятствующих неупорядоченному выполнению. Регистр маски будет использоваться не только как аргумент каждой команды, но и как результат. Каждая команда будет затем иметь два результата, а не один, что немного усложнит планировщик неупорядоченного выполнения, и вызовет нежелательные зависимости, когда один и тот же регистр маски используется для многих команд, которые иначе были бы независимы.



- 2) Использовать элементы векторного регистра с нечётными номерами для нормальных вычислений над целыми числами, а следующие элементы с чётными номерами — для сведений о переполнении. Сведения о переполнении распространяются вместе с вычисленными значениями. Данный метод будет эффективен для скалярных целочисленных вычислений, но расточителен для векторов, поскольку половина элементов вектора используется только для этой цели.
- 3) Использовать один элемент вектора для разрядов переполнения всех других элементов. Этот метод может быть заманчивым, поскольку тратит не столь много места, сколь предыдущий метод, но он уступает по производительности, из-за задержки переноса разрядов переполнения в дальнюю часть длинного вектора.
- 4) Добавить в векторные регистры дополнительные разряды для сведений о переполнении. У всех векторных регистров будет иметься один дополнительный разряд переполнения на каждые 32 разряда полезных данных. Эти разряды переполнения сохраняются, когда векторный регистр сохраняется и восстанавливается командами `save_cr` и `restore_cr`, но они теряются, когда вектор сохраняется как нормальные данные. Поведение разрядов переполнения управляется следующими разрядами численного управляющего регистра или регистра маски:
  - разряд №2: обнаруживать беззнаковое целочисленное переполнение;
  - разряд №3: обнаруживать знаковое целочисленное переполнение;
  - разряд №4: обнаруживать вещественное переполнение (экспериментально);
  - разряд №5: обнаруживать недопустимые вещественные операции (экспериментально);
  - разряд №6: распространять сведения о переполнении из входных операндов, применяя поразрядное ИЛИ результата текущей команды с разрядами переполнения всех входных векторных регистровых операндов; нужно предоставить дополнительную команду для выделения разрядов переполнения из векторного регистра.
- 5) В случае целочисленного переполнения порождать ловушку. Использовать регистр маски или численный управляющий регистр, как в методе 4. Разряд №7 разрешает ловушку при условиях, указанных разрядом №2 (беззнаковое целочисленное переполнение) или №3 (знаковое целочисленное переполнение). Данный метод требует несколько большего кода, но подвержен проблеме, заключающейся в том, что, как объяснялось в предыдущем разделе для вещественных ошибок, поведение векторного кода при возникновении ловушки зависит от длины вектора.

Метод 2 здесь экспериментально поддерживается необязательными командами `add_oc` и т.п., описанными на с. 48.

Поддержка метода 4 может быть рассмотрена, поскольку она была бы более эффективной и полезной. Цена реализации метода 4 состоит в том, что в векторных регистрах нам нужно на 3% больше разрядов; команды `save_cr` и `restore_cr` будут более сложными; а компилятор должен проверять переполнение перед сохранением векторов в памяти обычным способом.

Метод 5 следует поддерживать. Он полезен для целочисленного кода в регистрах общего назначения и и для проверки, что переполнение не возникает в векторных регистрах.

Этими методами не следует обнаруживать переполнение в команд арифметики с насыщением и в командах сдвига.

## 5.5. Многопоточность

Дизайн `ForwardCom` делает возможным реализацию очень больших векторных регистров, для обработки больших наборов данных. Однако есть практические ограничения на то, насколько сильно мы можем повысить производительность, используя большие векторы. Во-первых, фактические структуры данных и алгоритмы часто ограничивают длину вектора, которая может использоваться. И, во-вторых, большие векторы означают большие физические расстояния на полупроводниковом кристалле, и большие транспортные задержки.

Дополнительный параллелизм можно получить, выполняя несколько потоков на каждом ядре ЦП. Дизайну следует допускать несколько ЦП на кристалле, или несколько ядер ЦП на одном и том же физическом кристалле.

Коммуникация между потоками и синхронизация потоков могут быть проблемами для производительности. Системе следует иметь эффективные средства для этих целей, включая спекулятивную синхронизацию.

Вероятно, не стоит допускать много потоков, одновременно разделяющих одно и то же ядро ЦП и кэш первого уровня (что Intel называет гиперпоточностью), ибо это могло бы разрешить потоку с низким приоритетом забрать ресурсы у потока с высоким приоритетом, и для операционной системы сложно определить, какие потоки могли бы конкурировать за одни и те же ресурсы выполнения, если они выполняются на одном и том же ядре ЦП.

## 5.6. Свойства безопасности

Безопасность включена в базовый дизайн и аппаратуры, и программного обеспечения. Она включает в себя следующие возможности.

- Гибкий и эффективный механизм защиты памяти.
- Необязательное разделение стека вызовов и стека данных, так что адреса возврата не могут быть скомпрометированы переполнением буфера.
- Каждый поток имеет своё собственное защищённое пространство памяти, за исключением совместимости с устаревшим программным обеспечением, требующим разделяемого пространства памяти для всех потоков приложения.
- Драйвера устройств и системные функции имеют тщательно контролируемые права доступа. Эти функции не имеют общего доступа к памяти приложения, имея доступ лишь к конкретному блоку памяти, который приложение может разделять с системной функцией при её вызове. Драйвер устройства имеет доступ лишь к конкретному диапазону портов ввода-вывода и системных регистров, указанному в заголовке исполняемого файла и контролируемому ядром системы.
- Обрушению драйвера устройства следует порождать не „синий экран смерти“, а сообщение об ошибке с закрытием приложения, его вызвавшего, и освобождение всех своих ресурсов.
- Прикладные программы имеют доступ только к конкретным ресурсам, указанным в заголовке исполняемого файла, и контролируемых системой.
- При использовании режима адресации со встроенной проверкой границ массива или условной ловушки проверка границ массивов — проста и эффективна.
- Различные необязательные методы проверки целочисленного переполнения.
- Нет „неопределённого“ поведения. Всегда имеется ограниченный набор допустимых реакций на ошибочное условие.

### Как улучшить безопасность приложений и систем

Ниже перечислено несколько методов улучшения безопасности. Эти методы могут быть полезны в приложениях и операционных системах для ForwardCom, когда важна безопасность.

#### Защита от переполнения буфера

Входные буферы должны быть защищены от переполнения. Если программная защита недостаточна, то вы можете для входного буфера выделить изолированный блок памяти. См. с. ??.

#### Защита массивов

Следует проверять границы массивов.

#### Защита от целочисленного переполнения

Используйте один из методов обнаружения целочисленного переполнения, упомянутых на с. 55.

## Защита памяти потока

Каждому потоку приложения следует иметь своё собственное защищённое пространство памяти. См. с. ??.

## Защита указателей кода

Указатели на функции и другие указатели на код — уязвимы для атак перехвата потока управления. Сюда входят атаки на следующее.

**Адреса возврата.** Адреса возврата, находящиеся в стеке, особенно уязвимы к атакам переполнения буфера. Используйте двухстековый дизайн для изоляции стека возврата от других данных.

**Таблицы переходов.** Многопутёвые ветвления `switch/case` часто реализуются как таблицы адресов перехода. Для этого следует использовать команду табличного перехода, с таблицей, помещённой в секцию `CONST`, с доступом только для чтения. См. с. 23.

**Таблицы виртуальных функций.** Языки программирования с объектным полиморфизмом, такие, как C++, используют таблицы указателей на виртуальные функции. Для них следует использовать команду табличного вызова, с таблицей, помещённой в секцию `CONST`, с доступом только для чтения. См. с. 23.

**Таблицы компоновки процедур.** Таблицы компоновки процедур, таблицы импорта, и символьное взаиморасположение в `ForwardCom` не используются. См. с. ??.

**Указатели на функции обратного вызова.** Если функция принимает в качестве параметра функцию обратного вызова, то вместо сохранения в памяти сохраните его в регистре.

**Конечные автоматы.** Если конечный автомат или аналогичный алгоритм реализуется с помощью указателей на функции, то поместите эти указатели на функции в константный массив, используйте в качестве индекса этого массива переменную, в которой хранится состояние, и проверяйте индекс на переполнение. Компилятору следует иметь поддержку определения массива относительных указателей на функции в разделе `CONST`, и обращения к ним через команду табличного вызова.

**Другие указатели на функции.** Большинство случаев использования указателей на функции охватывается описанными выше методами. Других случаев в высокобезопасных приложениях следует избегать, либо указатели следует поместить в защищённые области памяти или области с непредсказываемыми адресами (см. <http://dslab.epfl.ch/proj/cpi/>).

## Управление правами доступа прикладных программ

В заголовок исполняемого файла прикладной программы следует включать сведения о том, какого рода операции приложению разрешены. Сюда могут включаться разрешения на различную сетевую активность, обращение к конкретным чувствительным файлам, разрешение на запись исполняемых файлов и скриптов, разрешение на установку драйверов, разрешение на порождение других процессов, разрешение на связь с другими процессами, и т.д. Пользователю следует иметь простой способ проверки наличия этих прав. Мы можем реализовать систему для управления правами доступа также и скриптов. Скрипты веб-страниц следует запускать в песочнице.

## Управление правами доступа драйверов устройств

Многие операционные системы предоставляют драйверам устройств очень большие права. Вместо наличия бюрократической централизованной системы согласования драйверов устройств, нам следует иметь более тщательное управление правами доступа каждого драйвера устройства. Команда системного вызова в `ForwardCom` даёт драйверу устройства доступ только к ограниченной области прикладной памяти (см. с. 23). В заголовке исполняемого файла драйвера устройства следует иметь информацию о том, к каким портам и системным регистрам драйвер устройства имеет доступ. Пользователю следует иметь простой способ проверки наличия этих прав.

## **Стандартизованная процедура установки**

Защите от вредоносного программного обеспечения следует быть составной частью операционной системы, а не являться сторонним дополнением. Операционной системе следует предоставлять стандартизованный способ установки и удаления приложений. Системе следует отвергать запуск каких-либо программ, скриптов, или драйверов, которые не установлены с помощью этой процедуры. Это сделает для пользователя возможным просмотр прав, требуемых для всех устанавливаемых программ, и удаление любого вредоносного программного обеспечения, либо другого нежелательного программного обеспечения, с помощью обычной процедуры удаления.

## Глава 6. Программируемые специфичные для приложения команды

Вместо реализации огромного количества специальных команд для конкретных приложений, мы можем предоставить средства порождения определяемых пользователем команд, которые могут быть закодированы на языке описания аппаратуры, например, VHDL или Verilog.

Микропроцессор может иметь необязательную ПЛИС или подобную программируемую аппаратуру. Эта структура может использоваться для создания специфичных для приложений команд или функций, например, кодирования, шифрования, сжатия данных, обработки сигналов, обработки текстов, и т.п.

Если у процессора имеется несколько ядер, то каждое ядро может иметь свою собственную ПЛИС. Код определения аппаратуры для каждого ядра сохраняется в своём собственном кэше. Операционной системе следует предотвращать, насколько возможно долго, использование одного и того же ядра разными задачами, требующими разного аппаратного кода. Могут быть черты, позволяющие приложению монополизировать ПЛИС или её часть.

Если невозможно избежать использование одной и той же ПЛИС на одном и том же ядре несколькими приложениями, то код, также как содержимое всех ячеек памяти ПЛИС, должен сохраняться при переключении задач. Сохранение может быть реализовано как ленивое, т.е. содержимое переключается только тогда, когда второй задаче нужна структура ПЛИС, содержащая код первой задачи.

Должны быть команды для обращения к определённым пользователем функциям, включая средства ввода и вывода, и для адаптации задержки определённых пользователем функций.

# Глава 7. Микроархитектура и дизайн конвейера

Набор команд ForwardCom предназначен для облегчения стабильного и эффективного дизайна конвейера суперскалярного микропроцессора. Команды могут иметь один операнд–приёмник, вплоть до трёх или четырёх операндов–источников, регистр маски, и регистр, указывающий длину вектора. Последний операнд–источник может быть регистром, находящимся в памяти операндом, или непосредственно заданной константой. Все другие операнды — регистры, за исключением команд записи в память. Суммарное количество входных регистров команды, включая операнды–источники, маску, базовый указатель, индекс, и указание длины вектора, не может быть более пяти.

Никакая команда не может иметь более одного находящегося в памяти операнда. Никакая команда не может иметь и операнд–источник, находящийся в памяти, и непосредственно заданный операнд, хотя это может быть разрешено в последующих расширениях. Любые дополнительные поля непосредственно заданных операндов могут использоваться для разрядов опций.

Высокопроизводительный конвейер может быть спроектирован как суперскалярный, со следующими стадиями.

- Выборка. Выборка блоков кода из кэша команд, по одной строке кэша за раз, либо так, как определено механизмом предсказания ветвлений.
- Декодирование длин команд. Определение длины каждой команды и определение малых команд. Распределение первых  $P$  команд в свою полосу конвейера, где  $P$  — количество параллельных полос, реализованных в конвейере. Избыточные команды могут быть поставлены в очередь до следующего такта.
- Декодирование команды. Определение и классификация всех операндов, опкодов, и разрядов опций. Определение входных и выходных зависимостей.
- Размещение и переименование регистров.
- Очередь команд.
- Помещение команд в станцию восстановления. Планирование для вычислителя адресов.
- Вычисление адреса и длины находящегося в памяти операнда. Проверка прав доступа.
- Чтение операнда из памяти. Планирование для исполнительных модулей.
- Исполнительные модули.
- Восстановление или ветвление.

Ненужно разбивать команды на микрооперации, если чтение находящихся в памяти операндов выполняется на отдельной стадии конвейера, и командам разрешается оставаться в станции восстановления до тех пор, пока не будет прочитан находящийся в памяти операнд.

Каждой стадии конвейера в идеале следует требовать лишь одного такта. Командам, ожидающим операндов, следует оставаться в станции восстановления. Большинство команд в исполнительном модуле будет использовать лишь один такт. Умножению и вещественному сложению нужен конвейеризованный исполнительный модуль с несколькими стадиями. Деление и квадратный корень могут использовать отдельный конечный автомат.

Команды перехода, ветвления, вызова, и возврата также подпадают под этот дизайн конвейера.

Станция восстановления должна рассматривать все входные и выходные зависимости каждой команды. Каждая команда может иметь вплоть до пяти входных зависимостей и одну выходную.

Может быть много исполнительных модулей, так что возможен запуск нескольких команд в одном и том же такте, если их операнды независимы.

Эффективная неупорядоченная обработка требует переименования регистров общего назначения и векторных регистров, но ненужна для специальных регистров.

Сложных команд и микрокода в большинстве случаев следует избегать. У нас нет команд сохранения и восстановления всех регистров при переключении задач. Вместо этого необходимые команды сохранения и восстановления регистров реализованы как малые команды, чтобы уменьшить размер последовательности команд, сохраняющей все регистры.

Следующие команды умеренно сложны: `call`, `return`, `div`, `rem`, `sqrt`, `cmp_swap`, `save_cp`, `restore_cp`. Эти команды можно реализовать специальными конечными автоматами. То же применимо к ловушкам, прерываниям, и системным вызовам.

У некоторых современных ЦП есть „стековый модуль“, чтобы предсказывать значение указателя стека для команд `push`, `pop`, или `call`, когда предшествующие стековые операции запаздывают из-за операндов, которые ещё недоступны. Такая система ненужна, если у нас имеется двухстековый дизайн (см. с. 54). Даже при одностековом дизайне, в стековом модуле нужды мало, так как операции `push` и `pop` будут редки в критичной части кода, если придерживаться соглашений вызова, предлагаемых в настоящем документе (с. ??).

Предсказание ветвления важно для производительности. Мы можем реализовать четыре различных алгоритма предсказания ветвлений: один для обыкновенных ветвлений, один — для циклов, один — для косвенных переходов, и один — для возвратов из функций. У длинной формы команд ветвления имеется разряд опции для указания поведения цикла. В короткой форме команд ветвления места для такого разряда нет. Первоначальная догадка может состоять в предположении циклического поведения, если ветвление выполняет переход назад, и обычного ветвления, если ветвление выполняет переход вперёд. Если необходимо, это предположение может быть позднее скорректировано механикой предсказания ветвлений.

Код, следующий за ветвлением, спекулятивно выполняется, пока не определяется, было ли правильным предсказание. Мы можем реализовать возможности для одновременного спекулятивного выполнения обеих ветвей.

Дизайн `ForwardCom` позволяет большие микропроцессоры с очень длинными векторными регистрами, что требует специальных обсуждений дизайна. Макеты кристаллов векторных процессоров обычно делятся на „полосы данных“, так что вертикальная передача данных от элемента вектора в соответствующий (т.е. в той же полосе) элемент другого вектора быстрее горизонтальной передачи данных из одного элемента вектора в другую (т.е. в другой полосе) позицию того же вектора. Это означает, что команды, передающие данные горизонтально вдоль вектора, такие, как команды `broadcast` и `permute`, могут иметь более длинные задержки, нежели другие векторные команды. Планировщику нужно знать задержку команды, и это может быть проблемой, если задержка зависит от расстояния передачи данных по очень большим векторам. Эта проблема для таких команд решается указанием длины вектора или расстояния передачи данных в отдельном операнде, который всегда использует регистровое поле `RS`. Данные сведения могут быть избыточными, ибо длина вектора хранится в векторном регистровом операнде, но планировщику они нужны как можно раньше. Другие регистровые операнды обычно не готовы, пока не истечёт такт, на котором они пройдут через исполнительный модуль, тогда как длина вектора обычно известна раньше. Микропроцессор может прочесть регистр `RS` на стадии вычисления адреса, на которой он также читает любые указатели, индексные регистры, и длину вектора для находящихся в памяти операндов. Это позволяет планировщику прогнозировать задержку за несколько тактов. Набор команд для всех команд, включающих в себя горизонтальную передачу данных (сюда входят команды `broadcast` с операндом, находящимся в памяти, `permute`, `insert`, `extract`, и команды сдвига, и не входят команды рассылки непосредственно заданных констант), предоставляет дополнительные сведения о длине вектора или расстоянии передачи данных в поле `RS`.

Путь данных к кэшу данных и памяти должен быть как можно более широким, возможно, с отслеживанием максимальной длины вектора, поскольку обращения к кэшу и памяти — типичные узкие места.