

УДК 004.31

Д.С. Адамович, С.Б. Калинин

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова, Санкт-Петербург, Россия

ОСНОВНЫЕ ТИПЫ ПРОЦЕССОРНЫХ АРХИТЕКТУР, ПРИНЦИПЫ ИХ ПОСТРОЕНИЯ И РЕАЛИЗАЦИИ

Аннотация. Приведено сравнение процессорных микроархитектуры CISC и RISC, двух технологий, первая из которых имеет сложные инструкции, но применяет меньше циклов с меньшим или одной количеством инструкций. Описывается возможное соперничество между архитектурой набора команд ARM и возникшей в 2010 году архитектурой RISC-V, ведущим разработчиком которой, возможно, станет компания MIPS, которая изменила свою бизнес-модель. RISC-V – процессорная архитектура с открытым набором команд, которая по сравнению с другими архитектурами бесплатная, простая, модульная и расширяемая. Также ставится вопрос о замене архитектуры процессора x86 на ARM, которая поддерживается компанией Apple, и по прогнозам, будет занимать лидирующие позиции. Так компании Apple и Microsoft из-за более низких затрат и меньших требований к питанию переходят с процессорной архитектуры Intel на ПК на базе ARM.

Ключевые слова: Процессорная архитектура, RISC, CISC, x86, ARM, Intel, AMD.

D.S. Adamovich, S.B. Kalinin

Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI», Saint Petersburg, Russia

MAIN TYPES OF PROCESSOR ARCHITECTURES, PRINCIPLES OF THEIR CONSTRUCTION AND IMPLEMENTATION

Abstract. A comparison is made between CISC and RISC processor microarchitectures, two technologies, the former of which has complex instructions but uses fewer cycles with fewer or one instruction count. It describes a possible

rivalry between the ARM instruction set architecture and the RISC-V architecture that emerged in 2010, the lead developer of which may be MIPS, which has changed its business model. RISC-V is an open instruction set processor architecture that is free, simple, modular, and extensible compared to other architectures. The question is also raised about replacing the x86 processor architecture with ARM, which is supported by Apple and is expected to take a leading position. So Apple and Microsoft are moving from Intel processor architecture to ARM-based PCs due to lower costs and lower power requirements.

Keywords: Processor architectures, RISC, CISC, x86, ARM, Intel, AMD.

Введение

Мир процессоров – это сложная отрасль, и лишь несколько разработок от нескольких компаний могут конкурировать в области высоких показателей производительности. Обычно вершиной производительности являются Intel или AMD, и они обе производят процессоры x86 и используют технологию *CISC* (*Complete Instruction Set Computing*). Также существуют процессоры ARM, которые с точки зрения вычислительной архитектуры основаны на концепциях *RISC* (*Reduced Instruction Set Computer*). Помимо этого архитектура RISC-V становится конкурентоспособной перед предложениями ARM и уже увеличивается количество компаний, которые обращают внимание на эту процессорную архитектуру с открытым исходным кодом.

Процессоры ARM, которые в основном позиционируют себя как процессоры для мобильных устройств сейчас вышли на новый уровень. Таким образом, встает вопрос, сумеют ли они заменить процессоры x86, главный минус которых заключается в более сложном и длительном наборе необходимых для работы команд [1]?

Архитектура процессов: CISC и RISC, сходства и различия

В архитектуре RISC есть простые инструкции, которые могут выполняться за один такт компьютера. В результате пользователю часто требуется выполнить несколько инструкций для выполнения определенной задачи. Эту же задачу можно выполнить с меньшим/одной количеством инструкций на процессоре CISC, то есть, для выполнения одной инструкции CISC может потребоваться несколько тактов компьютера. Например, умножение двух чисел в процессоре CISC может быть реализовано с помощью одной инструкции. В то время как умножение на процессорах RISC не совершается одной командой. В таблице 1 представлено сравнение двух технологий.

Таблица 1 – Сравнение технологий CISC и RISC

CISC	RISC
Транзисторы используются для хранения сложных инструкций	Транзистор используются для большего количества регистров
Инструкция длиннее одного слова	Инструкция меньше одного слова
Выполнение инструкции за несколько тактов	Выполнение инструкции за один такт
Большой объем кода	Меньше объем кода

Выполнение более простой инструкции RISC потребляет меньше энергии, чем инструкция CISC. Процессоры CISC стараются минимизировать количество инструкций на программу за счет тактовых импульсов компьютера на инструкцию. RISC использует противоположный подход, применяя простые инструкции, которые могут выполняться за один такт, но с большим количеством инструкций. Формула 1 показывает взаимосвязь между производительностью компьютера, количеством циклов на инструкцию и количеством инструкций на программу [2, 3].

$$\frac{\text{time}}{\text{program}} = \frac{\text{time}}{\text{cycle}} \times \frac{\text{cycles}}{\text{instruction}} \times \frac{\text{instruction}}{\text{program}} \quad (1)$$

Из формулы 1 есть два способа повысить производительность – минимизировать количество инструкций на программу или уменьшить количество циклов на инструкцию. В целом подход RISC позволяет снизить общее энергопотребление за счет снижения производительности. Однако грань различий сужается. В ARM добавлены более сложные инструкции (увеличенное энергопотребление). Для повышения производительности процессора, Intel разбивает часть своего кода операции на микрооперации, подобные RISC, чтобы снизить энергопотребление.

Архитектура RISC-V – новая, открытая и гибкая система команд

Подавляющее большинство смартфонов работают на чипах, основанных на архитектуре ARM, тогда как архитектура x86 доминирует среди ноутбуков, компьютеров и серверного оборудования. Но в США, Европе и особенно в Азии быстрыми темпами растет число компаний, которые обращают внимание на процессорную архитектуру с открытым исходным кодом под названием RISC-V [4].

Открытость и бесплатность RISC-V позволяет даже стартапам разрабатывать собственные чипы без дорогостоящих лицензионных сборов, необходимых для использования проприетарных архитектур. Например, если пользователь захочет создать собственный ARM-процессор, то ему придется заплатить авансовый сбор от 1 до 10 миллионов долларов, а также выплачивать роялти в размере 0,5 – 2% с продаж. Очевидно, из-за этого производить ARM-чипы могут только достаточно крупные компании, а это в том числе тормозит их развитие. RISC-V, возникшая в 2010 году, представляет собой модульную архитектуру, которая позволяет разработчикам создавать все, что они хотят, на базе основного набора инструкций [5].

По сравнению с ARM и x86, RISC-V имеет следующие преимущества:

1. Бесплатная: имеет открытый исходный код, нет платы за IP;

2. Простая: намного меньше других коммерческих *ISA (Instruction Set Architecture)*;

3. Модульная: имеет небольшую стандартную базу *ISA* с несколькими стандартными расширениями;

4. Расширяемая: конкретные функции могут быть добавлены на основе расширений.

Благодаря своей бизнес-модели RISC-V становится все более популярной архитектурой для создания чипов в таких компаниях, как Seagate и Western Digital Corporation. Интересуется такими чипами и китайский гигант электронной коммерции Alibaba, и даже правительственные организации, такие как *DARPA (Управление Перспективных Исследовательских Проектов Министерства Обороны США)* [6, 7, 8].

Таким образом, ARM может ощущать конкуренцию RISC-V. На сегодняшний день и для архитектуры набора команд ARM, и для RISC-V прилагаются значительные усилия, чтобы внедрить их в области высокопроизводительных вычислений.

MIPS архитектура и ее взаимодействие с RISC-V

Компания Wave Computing и ее дочерняя компания MIPS Technologies, разработчик архитектуры процессоров MIPS, недавно вышли из защиты от банкротства, переименовались в MIPS и изменили бизнес-модель. Как сообщает *Electronic Engineering Journal*, новая компания сосредоточится на разработке процессорных ядер RISC-V и откажется от дальнейшей разработки собственной архитектуры MIPS [9].

Сегодня MIPS не получает особой огласки, в основном потому, что она больше не используется для игровых консолей или суперкомпьютеров. Тем не менее, архитектура по-прежнему остается одной из самых популярных в отрасли. Она широко используется для различных микроконтроллеров,

бытовой электроники, коммуникационного оборудования и различных устройств с низким энергопотреблением.

MIPS практически невозможно догнать ARM, когда дело касается производительности и отраслевой поддержки, поэтому новый MIPS решил изменить свою бизнес-модель. Отныне MIPS будет разрабатывать архитектуру на основе RISC-V и соответствующие ядра центрального процессора. В целом, лицензионный характер бизнеса MIPS не изменится, но поскольку RISC-V – это архитектура с открытыми стандартами, поддерживаемая десятками компаний, MIPS не придется поддерживать экосистему в одиночку, как было раньше, что сделает ее бизнес более устойчивым.

Предполагается, что, возможно, MIPS станет одним из ведущих разработчиков RISC-V, которая станет конкурентоспособной архитектурой по сравнению с предложениями ARM.

Собирается ли ARM заменить x86?

Архитектура ARM сейчас твердо стоит на ногах: она имеет поддержку в лице Apple, занимает 95% рынка смартфонов и каждый третий чип в мире базируется именно на ней. Более того Apple выпустила свой первый немобильный процессор, процессор Apple Silicon M1, который работает быстрее, чем настольные процессоры Intel, и почти так же быстро, как AMD Ryzen 5000 [10]. Исходя из этого, встает вопрос, заменит ли ARM x86? Дать точный ответ на этот вопрос невозможно, но Intel, который выпускает процессоры x86, уже много лет не может соответствовать закону Мура. Это не значит, что x86 уйдет с лидирующих позиций в ближайшее время, но ясно, что ARM имеет больший потенциал, чем просто мобильная архитектура – клеймо, которое больше не действует, учитывая текущее направление развития отрасли. Преимущества архитектур RISC очевидны, и с учетом того, насколько усовершенствован чип Apple M1, будущее отрасли выглядит многообещающим.

Современный рынок ARM процессоров для ПК

По оценкам на сегодняшний день Apple, MediaTek и Qualcomm будут занимать лидирующие позиции по доходам на рынке процессоров для ноутбуков на базе ARM. Согласно новым данным исследовательской компании Strategy Analytics после девятикратного роста выручки в 2020 году рынок процессоров для ноутбуков на базе ARM вырастет более чем в три раза и может достичь 949 миллионов долларов. Предполагается, что поставки процессоров на ARM могут вырасти больше чем в два раза и составить более 10 процентов от общего объема поставок процессоров для ПК. С большей вероятностью, Apple получит почти 80% выручки за счет своего Apple Silicon M1. MediaTek, с другой стороны, займет второе место благодаря своему ранее лидирующему на рынке процессору Chromebook для ПК. А Qualcomm, несмотря на тесное партнерство с Microsoft, скорее всего пока не сможет повлиять на рынок ноутбуков. Компания вкладывает большие средства в вычислительную технику, и результаты этой работы мы увидим, возможно, только лишь в 2023 году. В ближайшем будущем Qualcomm может сосредоточиться на Chromebook, чтобы получить долю от MediaTek [11].

Выход из x86: почему Apple и Microsoft выбирают ПК на базе ARM?

Компании Apple и Microsoft отказываются от процессорной архитектуры Intel и переходят на ПК на базе ARM. Основными причинами этого перехода являются более низкие затраты, снижение требований к питанию и общая платформа, позволяющая запускать приложения на смартфонах, планшетах и ПК. В свою очередь, эта универсальная платформа позволит быстрее внедрять инновации в области программного и аппаратного обеспечения и приведет к повышению производительности конечных пользователей. И Apple, и Microsoft планируют обратить вспять неуклонное снижение своих поставок ПК и снова увидеть рост продаж.

Любой переход – это серьезное и рискованное бизнес-решение. Wikibon, занимающаяся исследованиями рынка, в 2020 году опубликовала статью, в которой прогнозирует начальное постепенное внедрение ПК на базе ARM, которое будет ускоряться в течение оставшейся части десятилетия. Кроме того, Wikibon видит значительный рост общих поставок ПК во второй половине этого десятилетия и прогнозирует, что оно составит около 300 миллионов ПК. В этом прогнозе есть два важных предостережения: предполагается, что поставщики x86 не изменят существенно свои стратегии проектирования и производства в начале этого десятилетия, и что Apple и Microsoft продолжат активно инвестировать в ПК на базе ARM и его программную экосистему.

На рисунке 1 показана проекция Wikibon по поставке ПК в период с 2009 по 2030 годы [12,13].

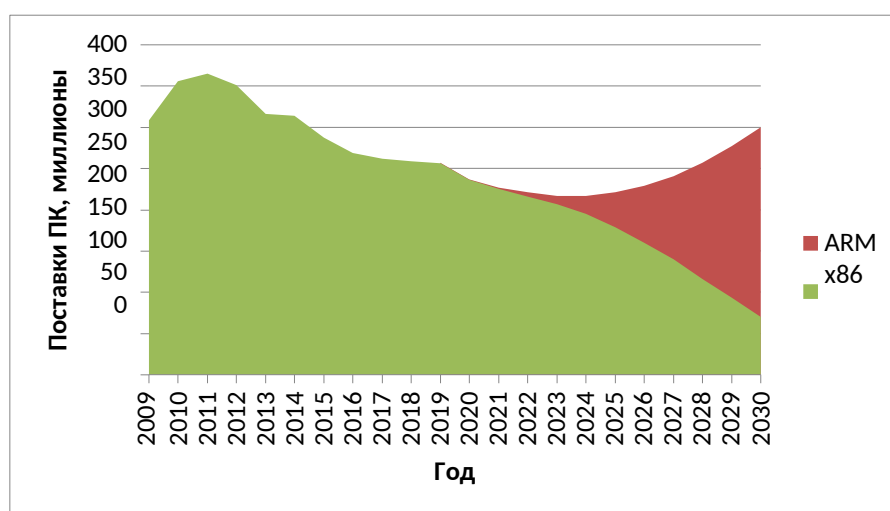


Рис. 1. Проекция по поставке ПК в период с 2009 по 2030 годы [13]

На рисунке 1 ось у показывает количество отгрузок ПК на базе x86 зеленым цветом, а ПК на базе ARM – красным. Microsoft также как и Apple уже представила ПК на базе ARM и обновила Windows 10, чтобы обеспечить необходимую поддержку. В период 2020 – 2024 годов поставки ПК показаны как неизменные, в то время как программное обеспечение для ПК на базе ARM улучшено. Wikibon прогнозирует, что рост компьютеров на базе ARM с 2024 года будет чрезвычайно быстрым, с появлением новых продуктов для ПК,

которые будут тоньше, мощнее, с меньшим нагревом и поддерживающие гетерогенные вычислительные архитектуры. В то же время Wikibon предполагает, что поставки компьютеров x86 значительно сократятся [13].

Не смотря на все преимущества ARM, при переходе с одной архитектуры на другую возникает ряд сложностей. Программное обеспечение разработано для определенной архитектуры, то есть пользователь не сможет запустить программу, разработанную для x86, на компьютере на базе ARM. Приложения и программное обеспечение должны быть скомпилированы для архитектуры процессора, на которой они работают. Исторический союз между процессорами и экосистемами (такими как Android на ARM и Windows на x86) означал, что совместимость никогда не вызывала особой озабоченности, поскольку приложениям не нужно было работать на нескольких платформах и архитектурах. Однако рост кроссплатформенных приложений и операционных систем, работающих на нескольких архитектурах ЦП, меняет эту картину.

Mac от Apple на базе ARM, Google Chrome и Microsoft Windows на ARM – все это современные примеры, когда программное обеспечение должно работать как на ARM, так и на архитектурах Intel. Компиляция нативного программного обеспечения для обоих является вариантом для новых приложений и разработчиков, желающих вложить средства в перекомпиляцию. Чтобы заполнить пробелы, эти платформы также полагаются на эмуляцию кода. Другими словами, перевод кода, скомпилированного для одной архитектуры ЦП, для работы на другой. Это менее эффективно и снижает производительность по сравнению с собственными приложениями, но в настоящее время возможна хорошая эмуляция для обеспечения работы приложений.

Стоит отметить, что для компании Apple это уже не первый опыт по замене архитектуры. Так в середине-конце 2000-х годов компания прекратила свое сотрудничество с Power PC (микропроцессорной RISC архитектурой) в пользу Intel. В причинах перехода компания тогда обозначила низкий уровень производительности, а также проблемы с энергопотреблением и выработкой

тепла. Поэтому Apple определенно знает, как осуществить переход на ARM и при необходимости сможет предоставить разработчикам инструменты, которые помогли бы им пересобрать свои приложения для Mac на новой архитектуре. Так же, как и с Power PC, Apple предлагает использование инструментов Universal и Rosetta, которые позволят адаптировать код программы, но приложения станут работать с меньшей производительностью и не смогут поддерживать новые аппаратные возможности [14,15].

Заключение

RISC и CISC – это две технологии, противоположные семейства, неразрывно связаны со дня их появления. RISC фокусируется на низкой производительности, высоком энергопотреблении, небольших размерах и в основном используется для мобильных устройств, а CISC фокусируется на настольных, высокопроизводительных и потребительских рынках.

По мере того, как технологии продолжают совершенствоваться и поддержка RISC-V увеличивается, разработчикам остается выбор между платной архитектурой процессора или бесплатной, которая не имеет ограничений. Однако то, что что-то является бесплатным, не означает, что оно возьмет на себя инициативу. В любом случае ARM ощущает конкуренцию с RISC-V и на сегодняшний день и для архитектуры набора команд ARM, и для RISC-V прилагаются значительные усилия, чтобы внедрить их в области высокопроизводительных вычислений.

До 2020 года на рынке процессоров была следующая ситуация: для настольных компьютеров использовались процессоры x86, которые являлись более мощными, чем их конкуренты ARM, которые обладали меньшим энергопотреблением и применялись в мобильных устройствах. Но все изменилось, когда Apple выпустил свой процессор Apple Silicon M1, который стал прорывом на современном технологическом рынке. Он потребляет меньше энергии и обладает высокой производительностью.

На сегодняшний день процессоры ARM в лице Apple являются определенным лидером, но утверждать, что они сумеют заменить процессоры x86 с 100% вероятностью нельзя даже с учетом их планов по созданию 2-нм процесса, который планируется на 2023 год. Не стоит забывать, что AMD и Intel – это две лидирующие компании, которые являются поставщиками процессоров x86 и, несмотря на их соперничество, не собираются сдавать своих лидирующих позиций.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации №075-01024-21-02 от 29.09.2021 (проект FSEE-2021-0014).

Список использованной литературы

1. Mallo S. The Challenges of Lecture Delivery of Arm X86, Cisc and Risc in the Teaching of Coursecsc303 (Computer Architecture) in the University of Jos, Nigeria: an Overview // International Journal of Advanced Engineering and Management Research. 2022. V. 7. P. 148 – 159. URL: <http://dx.doi.org/10.51505/IJAEMR.2022.7212> (дата обращения 23.08.2022).

2. Александров Н. Э., Асанбаев К. Ф., Торбеев Р. О., и др. Архитектуры микропроцессоров RISC и CISC // Научные достижения и открытия 2021 сборник статей XX Международного научно-исследовательского конкурса. 2021. С. 19 – 21.

3. Афонин И., Кабанчик Д. Современные процессорные архитектуры // Журнал СТА. 2020. №1. С.100 – 104. URL: <https://303421.selcdn.ru/soel-upload/iblock/5e4/5e4b7290d52534fb13c102062b4b0909/476354.pdf> (дата обращения: 23.08.2022).

4. Asanovic K., Patterson D. Instruction sets should be free: The case for risc-v. // EECS Department, University of California, Berkeley. 2014. URL: <https://www2.eecs.berkeley.edu/Pubs/TechRpts/2014/EECS-2014-146.pdf> (дата обращения: 23.08.2022).

5. Waterman A., Asanovi K. The RISC-V Instruction Set Manual, Volume I: Base User-Level ISA version 2.0. // University of California, Berkeley. 2017. URL: <https://www2.eecs.berkeley.edu/Pubs/TechRpts/2014/EECS-2014-54.pdf> (дата обращения: 23.08.2022).

6. Singh S., Sarang S. ISAMod: A Tool for Designing ASIPs by Comparing Different ISAs. // 34th International Conference on VLSI Design and 2021 20th International Conference on Embedded Systems (VLSID). 2021. P. 1 – 6. DOI: 10.1109/VLSID51830.2021.00005.

7. Sa B., Martins J., Pinto S. A First Look at RISC-V Virtualization from an Embedded Systems Perspective. 2021. DOI: doi.org/10.48550/arXiv.2103.14951.

8. Фролов В.А., Галактионов В.А., Санжаров В.В. Исследование технологии RISC-V. // Труды Института системного программирования РАН. 2020. Т. 32. Вып. 1. DOI: 10.15514/ISPRAS-2020-32(2)-7.

9. Wait, What? MIPS Becomes RISC-V [Электронный ресурс]. URL: https://www.eejournal.com/article/wait-what-mips-becomes-risc-v/?utm_source=feedburner&utm_medium=feed&utm_campaign=Feed%3A+EEJournalFeatureArticles+%28EE+Journal+Feature+Articles%29 (дата обращения: 18.04.2022).

10. Introducing the next generation of Mac [Электронный ресурс]. URL: <https://www.apple.com/newsroom/2020/11/introducing-the-next-generation-of-mac/> (дата обращения: 10.04.2022).

11. Report: Apple will capture 80% of ARM-based laptop market in 2021 [Электронный ресурс]. URL: <https://www.imore.com/report-apple-will-capture-80-arm-based-laptop-market-2021> (дата обращения: 20.12.2021).

12. Arm-based Notebook PC Processor Revenue Set to Grow Over Three-fold in 2021, Says Strategy Analytics [Электронный ресурс]. URL: <https://news.strategyanalytics.com/press-releases/press-release-details/2021/Arm-based-Notebook-PC-Processor-Revenue-Set-to-Grow-Over-Three-fold-in-2021-Says-Strategy-Analytics/default.aspx> (дата обращения: 17.12.2021).

13. Exiting x86: Apple & Microsoft Embrace Arm-based PC [Электронный ресурс]. URL: <https://wikibon.com/apple-microsoft-embrace-arm-based-pc/> (дата обращения: 19.12.2021).

14. Exiting x86: Why Apple and Microsoft are embracing the Arm-based PC [Электронный ресурс]. URL: <https://siliconangle.com/2020/06/26/exiting-x86-apple-microsoft-embracing-arm-based-pc/> (дата обращения: 20.12.2021).

15. Geden M., Rasmussen K. RegGuard: Leveraging CPU Registers for Mitigation of Control-and Data-Oriented Attacks. 2021. URL: <https://arxiv.org/pdf/2110.10769.pdf> (дата обращения: 23.08.2022).