

Полезные материалы по RISC-V

- Официальные ресурсы
- Учебные курсы и материалы
- Видеоматериалы
- Статьи и обзоры
- Литература
- Симуляторы, эмуляторы, наборы инструментов
- Opensource RISC-V processors from Academia

Официальные ресурсы

[Альянс RISC-V](#)

Официальный сайт альянса RISC-V - добровольного объединения российских компаний-разработчиков аппаратного и программного обеспечения на основе архитектуры RISC-V. Целью альянса является создание открытого сообщества разработчиков для представления и защиты общих интересов, популяризации архитектуры RISC-V, создания необходимых компетенций и содействия развитию экосистемы RISC-V в нашей стране. Ресурс содержит информацию о положениях, правлении и основных треках деятельности альянса.

[RISC-V International](#)

Сайт является основным интернет-ресурсом консорциума "RISC-V International" - открытого международного сообщества свободно распространяемой архитектуры RISC-V. Сообщество насчитывает свыше 3 тысяч компаний-участников из более чем 70 стран мира, активно взаимодействующих и вносящих вклад в развитие экосистемы RISC-V. Здесь вы найдете официальные документы консорциума: от стратегии развития сообщества до спецификации архитектуры набора команд. Также найдете полезную информацию о компаниях-участниках, анонсах мероприятий сообщества, различных менторских и амбассадорских программах. Не менее важным является открыто пополняемый список академических материалов и курсов по изучению экосистемы RISC-V.

[RISC-V Learn](#)

Ресурс открытого международного сообщества "RISC-V International", посвященный образованию и изучению экосистемы RISC-V; представлены методические и учебные материалы сообщества. Ресурс располагает обширной базой материалов и курсов по изучению предмета, среди которых: открытые и платные программы обучения, программы тренингов от партнеров, сборники свободных материалов вузов. Ресурс будет полезен всем, вне зависимости от уровня знаний и опыта и поможет достичь желанной цели, будь то получение новых навыков или карьерных возможностей.

[Базовый курс от RISC-V Foundation](#)

Курс начального уровня по основам работы с архитектурой RISC-V. В рамках курса поэтапно рассматриваются задачи настройки и запуска операционных систем Linux и Zephyr на популярных платформах RISC-V: QEMU, HiFive Unleashed и Microsemi PolarFire FPGA.

[RISC-V Exchange](#)

RISC-V Exchange – база материалов образовательных курсов по RISC-V от ведущих университетов мира. Курсы посвящены разработке аппаратных средств, программному обеспечению. На сайте также представлены всевозможные услуги и учебные предложения от сообщества RISC-V.

[RISC-V Specifications](#)

Сайт предоставляет официальную документацию и спецификации для архитектуры открытого набора команд RISC-V, например, такие как User-Level ISA Specification, Privileged ISA Specification, Debug Specification, ELF Specification и другие.

[Каталог плат от RISC-V сообщества](#)

Данный сайт является каталогом различных платформ и плат, основанных на архитектуре RISC-V. Этот ресурс предназначен для разработчиков, которые ищут готовые решения для создания устройств на основе RISC-V. Среди плат, представленных на сайте, можно найти различные типы, такие как отладочные платы, демонстрационные платы с СнК (SoC), платы расширения и многое другое. Некоторые из них могут быть использованы для создания встраиваемых систем, а другие - для построения более мощных вычислительных систем.

[RISC-V International Youtube](#)

YouTube-канал RISC-V International — это официальный канал международной организации RISC-V Foundation, которая является крупнейшим сообществом разработчиков и компаний, работающих с архитектурой RISC-V. На канале представлены различные видео, связанные с архитектурой RISC-V, включая конференции, вебинары, интервью и презентации. Видеоматериалы содержат информацию о новых разработках в области RISC-V, а также о технических аспектах и примерах применения архитектуры RISC-V.

[Образы RISC-V ядер](#)

На сайте представлен каталог компонентов, платформ и инструментов, связанных с архитектурой RISC-V. На этом ресурсе размещаются компоненты, которые могут быть использованы для создания устройств на основе архитектуры RISC-V, таких как ядра процессоров, библиотеки и драйверы. С помощью фильтров на сайте можно легко найти нужный компонент или платформу. Например, можно выбрать категорию ядер процессоров и найти список доступных ядер, включая информацию о спецификациях, документации и других связанных материалах. Аналогично можно найти библиотеки и драйверы для различных компонентов.

[RISC-V Software Repos](#)

Репозитории программного обеспечения RISC-V, которое поддерживается RISC-V International. На странице размещены исходные источники для многих проектов с открытым исходным кодом. Так, например, на сайте представлены такие инструменты как: симулятор RISC-V spike, платформа архитектурного тестирования riscof, эталонная реализация бинарного интерфейса супервизора RISC-V - opensbi и др.

Учебные курсы и материалы

[Архитектуры процессорных систем](#) (НИУ МИЭТ)

Открытый, свободно распространяемый сборник материалов курса "Архитектуры процессорных систем", читаемого в Национальном исследовательском университете МИЭТ. Целью курса "Архитектуры процессорных систем" является изучение устройства и способов организации процессоров и систем под их управлением.

[Архитектура и язык ассемблера RISC-V](#) (МГУ имени М. В. Ломоносова)

В курсе прослеживается связь между конкретной организацией процессора и общими принципами построения вычислительных систем. Планируется решение задач на языке ассемблера с последующей проверкой в системе EJudge. В учебном процессе используются эмулятор, среда разработки и визуализатор выполнения кода RISC-V.

[Введение в FPGA и Verilog](#) (НИУ МФТИ)

Открытый репозиторий, в котором хранятся задания к лабораторным работам, задачи семинаров, слайды презентаций, заметки и другие материалы для курса "Введение в FPGA и Verilog". В том числе есть ссылки на записи лекций на YouTube.

[Computer Architectures and Operating Systems](#) (НИУ ВШЭ)

Курс, созданный для тех, кто хочет погрузиться в изучение архитектуры, основанной на наборе команд RISC-V, и научиться программированию на языке ассемблера под данную архитектуру. Также курс предоставит практические знания об основах организации операционной системы и системном программировании. Знания, полученные в рамках данного курса, будут полезны тем, кто в дальнейшем планирует заниматься разработкой под архитектуру RISC-V или машинным обучением в рамках системного программного обеспечения.

[Школа синтеза цифровых схем](#)

Образовательная инициатива, которая включает в себя подборку тематических материалов для быстрого освоения современных подходов к проектированию цифровых микросхем. Программа разработана на основе курса Массачусетского Технологического института (MIT): он расширен до семестра и дополнен материалами уровня университетского лабораторного практикума по реконфигурируемым микросхемам FPGA. Программа также содержит элементы курсов компьютерной архитектуры и микроархитектуры процессорных ядер, предоставляя базовые навыки использования профессиональных средств проектирования микросхем ASIC.

[Системы на кристалле на базе IP ядер RISC V](#) (компания Macro Group Ltd)

Запись вебинара по продуктам Xilinx, посвященный свободным IP ядрам. На вебинаре рассматривают какими бывают свободные процессорные IP-ядра, где их взять и как правильно выбрать. Также рассматривается пример реализации системы на кристалле на основе процессорного ядра RISC-V и отладочной платы ARTY на базе ПЛИС Xilinx Artix-7.

[Introduction to RISC-V](#) (The Linux Foundation)

Открытый курс, объясняющий аспекты понимания экосистемы сообщества RISC-V, спецификаций на RISC-V и способа их курирования и разработки, а также рассматривающий технические аспекты работы с RISC-V (как со стороны разработчика, так и со стороны конечного пользователя). Кроме того, в курсе рассказывается о выгоде, которую люди и организации могут извлечь из RISC-V, и предлагается внести самому свой вклад в него: применить RISC-V ISA в действии с помощью симулятора, загружающего операционную систему Linux. Курс подразумевает собой общий обзор сообщества RISC-V, а также то, как начать работу с RISC-V ISA, курс может дать основные знания, которые необходимы для эффективного участия в сообществе RISC-V, внесения вклада в спецификации ISA или для разработки широкого спектра программных проектов RISC-V. После завершения курса обещается лучшее понимание терминологии, ресурсов и рабочего процесса, которые понадобятся для завершения пути к RISC-V.

[Software Engineering Basics for Embedded Systems](#) (The Linux Foundation)

Бесплатный курс обучения - "Основы разработки программного обеспечения для встраиваемых систем". Курс представляет собой введение в проектирование высококачественных систем и программного обеспечения для всех, кто хочет создавать безопасные или критически важные системы. Учащиеся должны иметь некоторый предшествующий опыт разработки программного обеспечения или интеграции продуктов, в идеале в проектах с открытым исходным кодом.

[Building a RISC-V CPU Core](#) (The Linux Foundation)

Данный курс знакомит с основами цифровой схемотехники и азами микроархитектуры процессоров. Программа подходит начинающим разработчикам, так как не требует предварительного знания основ цифрового дизайна. В ходе курса студенты будут выполнять лабораторные работы, в рамках которых они пройдут путь от имплементации логических вентилей до создания собственного простого, но полноценного RISC-V процессора, используя бесплатную онлайн среду разработки Markerchip.

[Building Applications with RISC-V and FreeRTOS](#) (The Linux Foundation)

Вводный курс, предназначенный для разработчиков, интересующихся RISC-V и операционными системами реального времени (RTOS). В рамках материала данного курса и лабораторных работ слушатели получают навыки интеграции RISC-V и FreeRTOS, а также узнают, как применять open-source процессоры и RTOS в различных встраиваемых приложениях. Курс требует предварительного знания основ встраиваемых систем и процессоров, а также хорошего понимания того, как компилируется и запускается код, написанный на языке C.

[RISC-V Toolchain and Compiler Optimization Techniques](#) (The Linux Foundation)

Данный курс предназначен для людей, которые работают с поставщиками RISC-V процессоров, а также для разработчиков, использующих отладочные платы на базе этой процессорной архитектуры. Курс включает в себя введение в наборы инструментов компиляции и основы кросс-компиляции. Слушатели познакомятся с популярными наборами инструментов компиляции LLVM и GCC. Этот курс также поможет приобрести навыки оптимизации приложений с точки зрения кода и производительности. Предполагается, что для понимания материала курса необходимо, чтобы слушатель уже был знаком с разработкой приложений на C/C++ и процессом их компиляции, инструментом git и установкой пакетов в ОС Linux.

[Microcontroller Applications with RISC-V](#) (The Linux Foundation)

Данный вводный курс дает базовый опыт проектирования и разработки встраиваемых приложений на основе микроконтроллеров с RISC-V ядрами. Курс подходит людям, которые уже разрабатывали приложения на основе систем вроде Arduino Uno, а также любителям. В рамках курса слушатели познакомятся с программным пакетом Five Freedom Studio, который предназначен для создания встраиваемых систем на базе RISC-V процессоров. Предполагается, что слушатели знакомы с языком C и основами цифровой схемотехники.

[Foundations of RISC-V Assembly Programming](#) (The Linux Foundation)

Вводный курс, который знакомит с RISC-V ассемблером, необходимым для задач низкоуровневой разработки, такими как отладка и нахождение критичных для производительности участков приложения. Материал предназначен для программистов, которые хотят понимать, какие инструкции в действительности будут исполняться процессором для разработанного ими кода. В

этом курсе обсуждается набор инструментов RISC-V GNU, архитектура набора инструкций RISC-V (ISA), псевдоинструкции и директивы ассемблера, интерфейс прикладного программирования, взаимодействие с C-библиотеками, дизассемблирования и многое другое. Основные понятия, такие как циклы, условия и функции, изучаются путем разработки программ на ассемблере, работающих на RISC-V в среде Linux.

[Computer Architectures and Operating Systems](#) (НИУ ВШЭ)

Курс "Компьютерные архитектуры и операционные системы" читается для студентов второго курса НИУ ВШЭ направления Data Science. Целью курса является введение в основы работы операционных систем и аппаратуры. Курс разделен на две части. Первая посвящена компьютерным архитектурам и языку ассемблера. Данный материал преподается на основе архитектуры набора команд RISC-V и соответствующего языка ассемблера. Вторая часть рассказывает об организации операционных систем и системном программировании на базе ОС Linux и языка C.

[Complex Digital Systems](#) (MIT)

Курс "Complex Digital Systems" Массачусетского технологического института (MIT) посвящен основам проектирования сложных цифровых систем и содержит такие материалы, как презентации лекций, описания домашних заданий, описания тестовых заданий и итоговые проекты. Кроме того, курс также содержит ссылки на другие полезные ресурсы, связанные с изучением цифровых систем и электроники. Этот курс может быть полезен всем, кто интересуется цифровыми системами и их применениями.

[Computation Structures](#) (MIT)

Этот курс знакомит с архитектурой цифровых систем, подчеркивая структурные принципы, общие для широкого спектра технологий. Он охватывает такие темы, как многоуровневые стратегии реализации, определение новых примитивов и их механизация с использованием элементов более низкого уровня. Он также включает анализ потенциального параллелизма, ограничений приоритета и показателей производительности, конвейерных и многомерных систем, проблем проектирования наборов инструкций и архитектурной поддержки современных программных структур.

[Computer Laboratory RISC-V Implementation](#) (University of Cambridge)

Данный курс - "Электронный дизайн, коммуникации и компьютерная архитектура" - разработан в Кембриджском университете. Студенту предлагается спроектировать процессор на основе архитектуры RISC-V с использованием языка описания аппаратуры Verilog и протестировать его функциональность на плате FPGA. На веб-странице представлены подробные инструкции по выполнению упражнения, требования к дизайну процессора и тестовые наборы для проверки его работы. Цель упражнения - углубить понимание студентами работы и архитектуры процессоров и дать практические навыки разработки цифровых систем.

[Computer Organization and Design RISC-V Edition](#) (York University)

В основе данного курса лежит книга Дэвида Паттерсона и Джона Хеннесси "Компьютерная организация и проектирование RISC-V Edition. Аппаратно-программный интерфейс". В этом курсе вы узнаете: как программы переводятся с языка высокого уровня, такого как C, C++, Java, на более низкий уровень языка, который машина понимает правильно; об аппаратном и программном интерфейсе и о том, что на самом деле означает производительность программы; о запуске программы, насколько точно программа выполняется с той скоростью, с какой выполняется

задача или процессы в рамках этой программы; как разработчики аппаратных средств повышают производительность.

[Computer Architectures and Engineering](#) (The University of California, Berkeley)

В рамках данного курса рассказывается, как программное обеспечение взаимодействует с аппаратной платформой и как тенденции в технологиях, приложениях и экономике приводят к постоянным изменениям в этой области. В курсе рассматриваются различные формы параллелизма: на уровне инструкций, на уровне данных, на уровне потоков, на уровне шлюзов, и как их можно использовать в совокупности с различными архитектурами вычислительной техники.

[Compilation of RISC-V courses](#) (компания Maven Silicon)

Курсы Maven Silicon содержат в себе всю информацию, которая необходима для RTL-разработки процессорных систем на архитектуре RISC-V. В них подробно объясняют архитектуру набора команд RISC-V RV32I с примерами, знакомят с полным маршрутом разработки RTL, языком описания аппаратуры Verilog HDL, статическом временном анализе и методологией верификации UVM.

[Computer Architectures](#) (Czech Technical University)

Курс знакомит с архитектурой вычислительной системы и с функциональностью ее типичных подсистем. Акцент делается на разъяснении взаимосвязи аппаратных компонентов с поддержкой программного обеспечения, главным образом на более низком уровне взаимодействия операционной системы с драйверами устройств, работой с виртуальной памятью и т.д.

[Architectures of Computer Systems](#) (Czech Technical University)

В данном курсе рассматриваются принципы проектирования процессоров с подробным изучением конвейерной обработки команд и иерархии памяти. Слушатель изучит различия между RISC и CISC архитектурами, обучится принципам обработки команд как в скалярных, так и в суперскалярных процессорах, разработке которых посвящена большая часть курса. Входным порогом является базовое знание ассемблера и языка C, комбинационных и последовательностных схем.

[Advanced Computer Architectures](#) (Czech Technical University)

Курс расширяет знания студентов о современных компьютерных архитектурах.

Особое внимание уделяется проблеме параллелизма:

- реализации параллелизма в аппаратных средствах,
- использованию методов параллельного программирования,
- архитектурам современных компьютеров, использующих параллелизм на уровне инструкций и потоков,
- расширенной потоковой обработке инструкций, памяти и периферийной подсистеме.

Акцент делается на понимании взаимных зависимостей аппаратного и программного обеспечения, понимании общих принципов выполнения инструкций в суперскалярном процессоре и разработке программного обеспечения с эффективным использованием доступных аппаратных ресурсов.

[RVfpga: Complete Courses in Computer Architecture & SoC Design](#) (компания Imagination Technologies)

Курс RVfpga — это комплексный онлайн-курс, предназначенный для студентов и любителей, заинтересованных в изучении проектирования на базе ПЛИС с использованием RISC-V. Помимо лекций, в состав курса входят лабораторные работы, которые демонстрируют, как собрать SoC RISC-

V из ядра и других “строительных” блоков, как портировать его на FPGA и как впоследствии запрограммировать.

[Digital Design and Computer Architecture](#) (учебное пособие Sarah L. Harris и David Harris, материалы Harvey Mudd College)

Материалы учебного пособия, предназначены для начинающих разработчиков электроники и охватывают основы цифровой схемотехники, включая логические операции, булеву алгебру, комбинационные и последовательные цифровые схемы. Видеоуроки содержат материалы лекций и демонстрации на примерах, а также практические задания для проверки понимания материала. Курс предназначен для студентов, преподавателей и любителей электроники, которые хотят изучить основы цифровой электроники

Видеоматериалы

[Вебинары Альянса RISC-V. Открытая архитектура RISC-V.](#) Константин Владимиров (Syntacore)

Рассматриваются основные принципы архитектуры команда (ISA) RISC-V, а также ее преимущества, о базовом наборе, псевдооперациях, сжатых инструкциях и расширениях базового набора ISA.

[Вебинары Альянса RISC-V. Инструменты разработчика RISC-V.](#) Константин Владимиров (Syntacore).

На вебинаре рассказывается об основных инструментах для компиляции, компоновки и отладки приложений. Для того чтобы понять специфику разработки под RISC-V затрагиваются вопросы кросскомпиляции и такие понятия как ABI, sysroot и multilib. Рассматриваются симуляторы для запуска программ и демонстрируется запуск ядра Linux на системном QEMU.

[Вебинары Альянса RISC-V. Разработка специализированных инструкций RISC-V. Часть 1, часть 2.](#)

Евгений Примаков (НИЛ ЭСК МИЭТ).

Открытые реализации и расширяемость RISC-V позволяют по-новому взглянуть на встречающийся в индустрии подход к разработке специализированных процессоров. Вебинар посвящён краткому обзору процесса разработки кастомных инструкций процессора в пределах спецификации RISC-V. Затрагиваются вопросы полного цикла разработки: от RTL до GNU binutils.

[Machine-Readable Specifications of RISC-V ISA.](#) Alexander Kamkin, Andrei Tatarnikov.

В данном видео рассказывается о машиночитаемой спецификации архитектуры набора команд RISC-V ISA. Это попытка формализовать RISC-V ISA таким, образом, чтобы можно было автоматизировать такие задачи как проектирование CPU, автоматизация кросс-инструментальной разработки и различные виды верификации: функциональную проверку, проверку безопасности, проверку аппаратного и программного обеспечения. Автор также рассказывает о приложении для генерации тестовых программ, над которым они работают в институте системного программирования РАН

Статьи и обзоры

[Исследование технологии RISC-V.](#) Фролов В.А., Галактионов В.А., Санжаров В.В.

В данном исследовании были проанализированы существующие популярные системы команд процессора и сделаны выводы о перспективности направления RISC-V и других открытых систем команд CPU. В работе даются ответы на следующие вопросы: почему система команд процессора – это действительно важно? Почему именно RISC-V, чем он лучше остальных? Какие возможности RISC-V открывает для российских разработчиков и какие у него есть аналоги.

[Case Study for Running Memory-Bound Kernels on RISC-V CPUs.](#) Valentin Volokitin, Evgeny Kozinov, Valentina Kustikova, Alexey Liniov, Iosif Meyerov

В статье анализируется производительность двух устройств RISC-V при выполнении трех приложений, связанных с памятью: широко используемый STREAM-тест, алгоритм транспонирования плотных матриц и алгоритм размытия по Гауссу. Авторы показывают, что по сравнению с процессорами x86 и ARM устройства RISC-V по-прежнему будут уступать по времени вычислений, но очень хорошо использовать ресурсы. Демонстрируется, что хорошо разработанные методы оптимизации памяти для процессоров x86 повышают производительность процессоров RISC-V.

[RISC-V с нуля](#)

В данной статье исследуются различные низкоуровневые концепции (компиляция и компоновка, примитивные среды выполнения, ассемблер и многое другое) через призму архитектуры RISC-V и ее экосистемы. Автор знакомит читателей с экосистемой RISC-V и приводит подробные инструкции как настроить цепочки инструментов, чтобы запустить простую программу на C на эмулированном оборудовании RISC-V

[Начинаем изучать RISC-V](#)

Статья "Начинаем изучать RISC-V" представляет собой введение в открытую ISA архитектуру RISC-V. Она объясняет, что это такое, какие преимущества она имеет перед другими архитектурами и какие возможности она предоставляет для создания микропроцессоров. Статья написана доступным языком и предназначена для широкой аудитории, интересующейся архитектурой компьютеров и процессоров.

[Разбираемся в архитектурах: x86, ARM и RISC-V](#)

Данный материал является обзором архитектур процессоров x86, ARM и RISC-V. В статье рассмотрены их отличия, преимущества и недостатки, а также применение в различных устройствах. Описаны особенности архитектур, такие как размер инструкций, режимы адресации и управление энергопотреблением. В заключении приведены рекомендации при выборе процессора для конкретных задач.

[Исследователи тестируют экспериментальный суперкомпьютер RISC-V](#)

Группа исследователей из Болонского университета и Cinesa изучила экспериментальный кластер суперкомпьютеров RISC-V с восемью узлами и 32 ядрами. Демонстрация показала, что даже несколько скромных SoC Freedom U740 от SiFive могут запускать приложения для суперкомпьютеров при относительно низком энергопотреблении. Более того, кластер работал хорошо и поддерживал базовый стек высокопроизводительных вычислений.

Подробнее об исследовании и его результатах в статье.

[О русскоязычном издании учебника «Цифровая схемотехника и архитектура компьютера: RISC-V»](#)

Русскоязычное издание учебника, ставшее отправной точкой для обучения проектированию процессоров на ПЛИС и архитектуре RISC-V во многих вузах, будет полезно студентам, инженерам, а также широкому кругу читателей, интересующихся современной схемотехникой. В учебнике вас проведут, начиная от логических элементов и двоичных чисел, заканчивая работой с готовым RISC-V процессором.

[Ассемблер RISC-V для начинающих](#)

Если вы не знаете ни одного ассемблера, или не имеете большого опыта кодинга, то ассемблер RISC-V может быть одним из лучших вариантов для того, чтобы погрузиться в эту тему. Данная статья поможет разобраться с чего начать свой путь. Архитектура RISC-V обладает современным и простым набором команд, спроектированным с учетом современных требований, она придумана специально для того, чтобы быть простой в изучении и вместе с тем, практически эффективна для реализации высокопроизводительных микропроцессоров.

[A Survey on RISC-V-Based Machine Learning Ecosystem](#)

В данной статье рассматривается экосистема для машинного обучения на основе RISC-V, используемой для классификации систем на кристалле (SoC) и ядер ЦП. Более того, часть этой работы посвящена таким проблемам, как энергоэффективность и надежность при разработке приложений с открытым исходным кодом (OSH) в области искусственного интеллекта (AI) и машинного обучения (ML), что обосновано необходимостью найти вычислительную мощность для более совершенных и ресурсоемких алгоритмов и приложений AI и в создании аппаратных ускорителей, связанных с машинным обучением.

Литература

[Organization and Design: The Hardware/Software design](#)

В книге показана взаимосвязь между аппаратными средствами и программным обеспечением. По мнению авторов, в течение следующего десятилетия большинству программистов придется разбираться в аппаратно-программном интерфейсе, если они хотят, чтобы программы эффективно работали на параллельных компьютерах. Аудитория этой книги включает в себя тех, у кого мало опыта в языке ассемблера или логическом дизайне, которым необходимо понимать, как устроен компьютер и почему он работает так, как работает.

[The RISC-V Reader: An Open Architecture Atlas](#)

The RISC-V Reader — это краткое введение и справочник для разработчиков встраиваемых систем, включает набор инструкций с подробным описанием каждой из них. Архитектура RISC-V используется как в простых микроконтроллерах, так и в серверах для быстрых облачных вычислений. Десять глав знакомят с полным набором инструкций RISC-V, а программировать читатели могут начать уже после 2 главы. В книге показано, как RISC-V собрал в себе лучшие идеи прошлых архитектур, избегая при этом их ошибок.

[Digital Design and Computer Architecture, RISC-V Edition](#)

В книге представлен современный подход к разработке цифровых устройств. Авторы начинают с цифровых логических элементов, переходят к разработке комбинационных и последовательностных схем, а затем используют эти базовые блоки как основу для самого сложного: разработки настоящего процессора RISC-V. По всему тексту приводятся примеры на языках SystemVerilog и VHDL. В издание вошли новые материалы о системах ввода/вывода применительно к процессорам общего назначения как для ПК, так и для микроконтроллеров.

Русский перевод: [Цифровая схемотехника и архитектура компьютера: RISC-V](#)

[An Introduction to Assembly Programming with RISC-V](#)

Учебник по программированию на языке ассемблера RISC-V. В качестве примеров используется код, использующий набор инструкций архитектуры RISC-V. В первой части книги читатель обзорно

познакомится с тем, как устроен компьютер и как исполняются программы, а затем начнет знакомство с языком ассемблер. Во второй части фокус переходит к разработке пользовательских программ, т.е. тех, которые работают с данными, хранящимися в регистрах процессора и основной памяти. В третьей части внимание уделяется программированию на системном уровне, включая взаимодействие с периферией и устойчивостью системы к случайным или злонамеренным ошибкам в коде.

Симуляторы, эмуляторы, наборы инструментов

[Jupiter](#)

Кроссплатформенный компилятор и симулятор исполнения ассемблерного кода для архитектуры RISC-V с открытым исходным кодом. Поддерживает все инструкции по работе с целыми числами, числами с плавающей запятой одинарной и двойной точности, атомарными инструкциями, умножением и делением. Симулятор создавался для учебных целей, имеет интуитивно понятный графический интерфейс, может использоваться через командную строку. Может работать с несколькими файлами, что дает возможности выстраивать структуру проекта.

[Venus](#)

Симулятор исполнения ассемблерного кода для архитектуры RISC-V с открытым исходным кодом. Поддерживает все инструкции стандарта RV32IM. Реализовано пошаговое выполнение кода, точки останова, подсветка синтаксиса, просмотр машинного кода и исходных инструкций рядом друг с другом, вывод значений в регистрах и по адресам в памяти.

[Spike](#)

Симулятор исполнения ассемблерного кода для архитектуры RISC-V с открытым исходным кодом. Реализует функциональную модель, поддерживающую несколько аппаратных потоков. Поддерживает большое количество функций из стандарта RISC-V ISA. Реализован интерактивный режим отладки, возможна отладка с использованием gdb.

[RARS](#)

Сборщик и симулятор исполнения ассемблерного кода под архитектуру RISC-V с открытым исходным кодом. Представляет удобное окружение разработки для людей, только знакомящихся с RISC-V. Реализует стандарт RISC-V IMFDN Base (riscv32 и riscv64). Реализован отладчик, возможность просмотра машинного кода и исходных инструкций рядом друг с другом, сборка проекта из нескольких файлов.

[Ripes / \(Web-RIPES\)](#)

Графически симулятор для изучения ассемблера RISC-V, есть возможность программирования на языке C, с потактовой симуляцией программы и с иллюстрацией обновления каждой стадии конвейера. Так же добавлен эмулятор cache памяти с настройкой архитектуры кэша, политик замещения. [Web-реализация симулятора RIPES](#) простых ядер RISC-V на основе цифровых схем может точно учитывать микроархитектурные особенности: конвейер, кэши, суперскалярность и прочее. В состав эмулятора входят набор 32 и 64-битных ядер, как одноцикловых, так и многостадийных суперскалярных.

[RISC-V Interpreter](#)

Популярный интерпретатор RISC-V Корнельского университета, оснащенный простым и понятным интерфейсом.

[QtRvSim](#)

Симулятор процессора RISC-V для образовательных целей, разработан образовательным проектом Computer Architectures в Чешском техническом университете. Git со всех необходимым для установки и инструкцией по сборке и пакетам. Кроме того, QtRVSim экспериментально доступен для WebAssembly и может быть запущен в большинстве браузеров без установки.

[rv8](#)

Симулятор RISC-V для x86-64, включающий высокопроизводительный двоичный транслятор x86-64, симулятор пользовательского режима, полнофункциональный системный эмулятор, инструмент двоичного анализа ELF и метаданные ISA.

[RISC-V ALE](#)

Онлайн-эмулятор по сборке RISC-V. Страница с интерактивной онлайн-средой обучения: есть терминал, запуск и отладка, возможность загрузки файлов, настройки. Также представлены упражнения или учебное пособие, чтобы начать изучать язык ассемблера RISC-V.

[riscv-easy-as-pi](#)

Инструкция по настройке набора инструментов для компиляции и сборки исполняемых файлов для RISC-V, который будет запускаться на одноплатном компьютере RPi. В качестве компилятора используется набор GNU, а для программирования и отладки целевой платформы – openOCD.

Opensource RISC-V processors from Academia

[VexRiscv](#)

В этом репозитории размещена 32-разрядная реализация процессора RISC-V, совместимая с FPGA, написанная на SpinalHDL. Описание аппаратного обеспечения этого процессора выполнено с использованием программно-ориентированного подхода.

[PicoRV32](#)

Репозиторий с файлами PicoRV32 - ядро процессора, которое реализует набор команд RISC-V RV32IMC. Оно может быть сконфигурировано как ядро RV32E, RV32I, RV32IC, RV32IM или RV32IMC и, при необходимости, содержит встроенный контроллер прерываний. Этот процессор предназначен для использования в качестве вспомогательного процессора в конструкциях FPGA и ASIC.

[Neorv32 Processor](#)

Комплементарный пакет, основанный на RISC-V ЦП, вместе с периферийным интерфейсом, встроенной памятью и программной средой, составляющий полномасштабную платформу SnK с возможностью настройки для различных FPGA, плат и toolchain-ов. Основной акцент используемого процессора сделан на безопасность исполнения и баланс между малым размером и производительностью. Работает "из коробки" и, благодаря открытой документации, подходит как начинающим, так и продвинутым пользователям FPGA/RISC-V.

[RiscvOrca](#)

Пакет разработки, написанный на VHDL и содержащий оптимизированное для FPGA ядро RISC-V на основе архитектуры набора команд RV32IM. Существует возможность преобразования пакета до стандартного ядра RV32I/RV32E. Проект подходит для тестирования FPGA, а также полезен в качестве базиса для более сложных проектов на основе архитектуры RISC-V.

[Vroom](#)

Новейшая высокопроизводительная реализация ядра RISC-V на основе архитектуры набора команд RV64-IMAFDCHBK(V). К основным целям и преимуществам проекта можно отнести высокую частоту выполнения инструкций за такт, поддержку многоядерности и двусторонней одновременной многопоточности. Проект находится на стадии активной разработки с подробной документацией и описанием текущего прогресса и ближайших шагов команды разработчиков.

[SonicBOOM](#)

Out-of-Order Machine (BOOM) — синтезируемое и параметризуемое ядро RISC-V на основе архитектуры набора команд RV64GC с открытым исходным кодом, написанное на языке описания аппаратуры Chisel. Ядро BOOM в первую очередь оптимизирован для ASIC, но также приспособлен для использования на FPGA.

[Serv](#)

Ядро на основе архитектуры набора команд RV31I, претендующее на звание самого маленького в мире RISC-V процессора. Проект располагает открытым исходным Verilog кодом, подробным мануалом, инструкцией для быстрого старта и серией обучающих роликов, подходящих как опытным пользователям, так и для первого знакомства с архитектурой RISC-V. Версия разработки не является окончательной, но уже получила награды и признание среди научных инженерных кругов.

[OpenC910](#)

Высокопроизводительный 64-разрядный процессор, совместимый с RISC-V, основанный на наборе инструкций RV64GC и реализующий технологию XIE (XuanTie Instruction Extension). Основные направления проекта — обеспечение высокой производительности в потоке управления, вычислениях и частоте. Процессор использует современный 12-ступенчатый суперскалярный высокочастотный конвейер, включает в себя контроллеры прерывания CLINT и PLIC, поддерживает когерентность аппаратного кэша и многое другое.

[Noel-V](#)

Синтезируемая VHDL-модель процессора, реализующая архитектуру RISC-V на основе набора инструкций RV32/64IMAFDB*CH. Благодаря своей высокопроизводительной и отказоустойчивой конструкции, идеально подходит для спутников, планетоходов и других космических систем. Процессор может быть эффективно реализован на технологиях FPGA и ASIC, а пользователи для работы имеют доступ к обширной библиотеке существующего программного обеспечения и инструментов.

[vivado-risc-v](#)

Репозиторий содержит FPGA-прототип полнофункционального Linux-сервера RISC-V с онлайн-репозиторием Linux и ежедневным обновлением пакетов. Проект включает в себя сценарии и исходники для создания RISC-V ЧНК HDL, проекта Xilinx Vivado, FPGA bitstream и загрузочную SD-карту

с двоичным интерфейсом и открытым исходным кодом RISC-V. Проект используется в качестве эталонного решения для проверки поддержки RISC-V в Eclipse TCF.

[Building a RISC-V CPU Core](#)

Проект является открытым исходным кодом и содержит описание и код для пошаговой реализации процессора на основе архитектуры RISC-V. Реализация начинается с построения базового процессора, затем добавляются различные инструкции и компоненты, такие как арифметические операции, умножение, деление, память и ввод-вывод. В проекте использованы языки Verilog и C для описания аппаратной части и тестирования процессора соответственно. Проект предоставляет уникальную возможность понять, как работает процессор, и изучить основы архитектуры компьютера и цифровой электроники. Также он может быть использован в качестве основы для создания собственного процессора или углубленного изучения архитектуры RISC-V.

[XiangShan](#)

Высокопроизводительное процессорное ядро RISC-V с открытым исходным кодом. Проект Института вычислительных технологий Китайской академии наук. Репозиторий содержит статьи Института по теме исследований RISC-V, документацию на процессорное ядро, а также исходные коды HDL Verilog ядра, fpu, L2/L3 кэш подмодулей и инструментарий для симуляции работы ядра.