

**Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)»**

УТВЕРЖДЕНО

**Директор физтех-школы
радиотехники и компьютерных
технологий**

Д.А. Гаврилов

| | |
|----------------------------|--|
| | Рабочая программа дисциплины (модуля) |
| по дисциплине: | Архитектура вычислительных систем |
| по направлению: | Информатика и вычислительная техника |
| профиль подготовки: | Компьютерные технологии и вычислительная техника Физтех-школа Радиотехники и Компьютерных Технологий кафедра перспективных вычислительных технологий |
| курс: | 4 |
| квалификация: | бакалавр |

Семестры, формы промежуточной аттестации:

7 (осенний) - Дифференцированный зачет

8 (весенний) - Экзамен

Аудиторных часов: 60 всего, в том числе:

лекции: 60 час.

семинары: 0 час.

лабораторные занятия: 0 час.

Самостоятельная работа: 45 час.

Подготовка к экзамену: 30 час.

Всего часов: 135, всего зач. ед.: 3

Программу составил: П.В. Крюков, ассистент

Программа обсуждена на заседании кафедры перспективных вычислительных технологий 16.05.2023

Аннотация

Обзорный курс организации современных вычислительных систем, охватывающий архитектуру процессора общего назначения: организацию систем команд, шин управления и данных, АЛУ, памяти, интерфейсов ввода-вывода, виртуальную память, конвейеризацию. Рассматриваются современные многопоточные, графические системы, ускорители, и методы их организации в сверхбольшие вычислительные системы.

1. Цели и задачи

Цель дисциплины

Сформировать теоретические и практические знания в организации вычислительных систем, методологии их проектирования, анализа производительности и энергопотребления, а также дать навыки оптимизации программного обеспечения под вычислительные системы.

Задачи дисциплины

- Изучить теоретические основы организации вычислительных систем;
- ознакомиться с существующими способами организации вычислительных систем, изучить их достоинства и недостатки;
- овладеть навыками анализа производительности вычислительных систем, их оптимизации на базе результатов анализа.

2. Перечень формируемых компетенций

Освоение дисциплины направлено на формирование следующих компетенций:

| Код и наименование компетенции | Индикаторы достижения компетенции |
|---|---|
| УК-1 Способен осуществлять поиск, критический анализ и синтез информации, применять системный подход для решения поставленных задач | УК-1.2 Находит, критически анализирует и выбирает информацию, необходимую для решения поставленной задачи |
| ОПК-2 Способен использовать современные информационные технологии и программные средства при решении задач профессиональной деятельности, соблюдая требования информационной безопасности | ОПК-2.1 Способен применять современные вычислительную технику и сервисы сети Интернет в области (сфере) профессиональной деятельности |
| ОПК-3 Способен составлять и оформлять научные и (или) технические (технологические, инновационные) отчеты (публикации, проекты) | ОПК-3.3 Владеет методами визуального и графического представления результатов научной (научно-технической, инновационной технологической) деятельности в виде отчетов, научных публикаций |
| ПК-1 Способен ставить, формализовывать и решать задачи, в том числе разрабатывать и исследовать математические модели изучаемых явлений и процессов, системно анализировать научные проблемы, получать новые научные результаты | ПК-1.1 Способен находить, анализировать и обобщать информацию об актуальных результатах исследований в рамках тематической области своей профессиональной деятельности |
| | ПК-1.2 Способен выдвигать гипотезы, строить математические модели для описания изучаемых явлений и процессов, оценивать качество разработанной модели |
| | ПК-1.3 Способен применять теоретические и (или) экспериментальные методы исследований к конкретной научной задаче и интерпретировать полученные результаты |
| ПК-2 Способен самостоятельно или в качестве члена (руководителя) малого коллектива организовывать и проводить научные исследования и их апробацию | ПК-2.1 Знает принципы построения научной работы, методы сбора и анализа полученного материала, способы аргументации |
| | ПК-2.2 Способен планировать и проводить научные исследования самостоятельно или в качестве члена (руководителя) малого научного коллектива |

3. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине (модулю)

В результате освоения дисциплины обучающиеся должны

знать:

- Основные принципы организации вычислительных систем;
- основные существующие способы организации вычислительных систем, их классификацию, свойства и диапазоны применимости;
- основные понятия и характеристики вычислительных систем и их взаимосвязь.

уметь:

- Использовать полученные теоретические и практические знания для анализа функциональности, производительности, энергопотребления и стоимости вычислительных систем;
- выбирать оптимальные архитектурные и микроархитектурные решения, удовлетворяющие требованиям поставленной задачи;
- предлагать аппаратные и программные оптимизации существующих вычислительных систем.

владеть:

- Основными понятиями проектирования и анализа вычислительных систем;
- навыками самостоятельного изучения и исследования вычислительных систем;
- навыками работы с системой команд RISC-V, средствами программного моделирования архитектуры.

4. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам (разделам) с указанием отведенного на них количества академических часов и видов учебных занятий**4.1. Разделы дисциплины (модуля) и трудоемкости по видам учебных занятий**

| № | Тема (раздел) дисциплины | Трудоемкость по видам учебных занятий, включая самостоятельную работу, час. | | | |
|-----------------------|--|---|----------|-----------------|----------------|
| | | Лекции | Семинары | Лаборат. работы | Самост. работа |
| 1 | Вычислительные системы как предмет исследования. Базовые понятия и направления исследований. | 4 | | | 3 |
| 2 | Архитектуры системы команд, основные реализации | 6 | | | 4 |
| 3 | Микроархитектура конвейерных микропроцессоров | 8 | | | 4 |
| 4 | Подсистема памяти и ввода-вывода | 12 | | | 4 |
| 5 | Параллелизм на уровне команд | 14 | | | 12 |
| 6 | Параллелизм на уровне потоков | 10 | | | 10 |
| 7 | Вычислительные системы как предмет исследования. Базовые понятия и направления исследований. | 6 | | | 8 |
| Итого часов | | 60 | | | 45 |
| Подготовка к экзамену | | 30 час. | | | |
| Общая трудоёмкость | | 135 час., 3 зач.ед. | | | |

4.2. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам (разделам)

1. Вычислительные системы как предмет исследования. Базовые понятия и направления исследований.

Вычислительные системы как предмет исследования. Исторический очерк. Определение производительность, методы измерения. Закон Амдала. Элементная база. Тенденции в области микропроцессоров: степень интеграции, площадь на кристалле, тактовая частота, производительность, энергопотребление, надежность, стоимость.

2. Архитектуры системы команд, основные реализации

Архитектуры системы команд. Структура команды. Многоадресные и одноадресные системы команд. Безадресная система команд. Стек для вычисления выражений. Способы адресации. RISC и CISC системы. Система команд RISC-V. Простейшие вычислительные машины. Тракт управления и тракт данных. Вычислительные системы с микрокодом. Процедурный механизм.

Понятие процедуры. Требование к процедурному механизму. Способы передачи параметров и возврат значения. Описатель процедуры, вызов и возврат. Рекурсивный вызов процедуры.

3. Микроархитектура конвейерных микропроцессоров

Основные принципы конвейеризации. Эффективность конвейера. Конфликты по данным и методы их разрешения. Конфликты по ресурсам и методы их разрешения. Конфликты по управлению. Влияние условных переходов на производительность конвейера. Основные методы предсказания условных переходов. Предикатное исполнение.

4. Подсистема памяти и ввода-вывода

Организация оперативной памяти (DDR). Понятие «барьера памяти». Пространственная и временная локальность. Кэш-память, принципы её организации. Алгоритмы замещения данных. Математическая модель эффективности кэш-памяти. Многоуровневая кэш-память. Методы предварительной подкачки данных в подсистему кэшей. Когерентность кэшей. Протоколы обеспечения когерентности. Аппаратная поддержка примитивов синхронизации. Необходимость введения виртуальной памяти. Аппаратная поддержка виртуальной памяти. Организация таблиц трансляции. Страничное ассоциативное ЗУ. Виртуальная память для больших адресных пространств.

5. Параллелизм на уровне команд

Истинные и ложные зависимости по данным. Сложный случай конвейеризации. Принцип динамического планирования. Скорбординг. Алгоритм Томасуло. Внеочередное исполнение команд. Переименование регистров. Очередь выполнения и точное прерывание. Восстановление после ошибок предсказания. Внеочередное исполнение запросов к памяти, архитектура load/store. Предсказание зависимостей между командами. Архитектура сверхдлинного командного слова (VLIW). Программная конвейеризация. Векторно-конвейерные процессоры. Зацепление векторов.

6. Параллелизм на уровне потоков

Симметричные многопроцессорные системы. Массивно-параллельные структуры. Многоядерные микропроцессоры. Одновременная многопоточность. Введение в графические процессоры. Основные задачи, решаемые в графических сопроцессорах. Организация потоков команд и

данных в графическом сопроцессоре. Архитектура аппаратных ускорителей. Гетерогенные системы. Аппаратная поддержка виртуализации.

7. Вычислительные системы как предмет исследования. Базовые понятия и направления исследований.

Методы сокращения энергопотребления. Введение в архитектуру дата-центров. Современные направления исследований.

5. Описание материально-технической базы, необходимой для осуществления образовательного процесса по дисциплине (модулю)

Учебная аудитория, оснащенная мультимедиапроектором и экраном.
Персональная ЭВМ для выполнения домашних заданий.

6. Перечень рекомендуемой литературы

Основная литература

1. Архитектура компьютера и проектирование компьютерных систем [Текст] : [учеб. пособие для вузов] / Д. Паттерсон, Дж. Хеннесси ; [пер. с англ. Н. Вильчинский] .— 4-е изд. — СПб. : Питер, 2012 .— 784 с.
2. Архитектура компьютера [Текст] : [учеб. пособие для вузов] / Э. Таненбаум, Т. Остин ; [пер. с англ. Е. Матвеев] .— 6-е изд. — СПб. : Питер, 2014 .— 816 с
3. 3. Shen J., Lipasti M. Modern Processor Design: Fundamentals of Superscalar Processors. — Dubuque, IA, USA: McGraw-Hill Companies, Inc. 2005

Дополнительная литература

1. Hennessy J. L., Patterson D. A. Computer Architecture: A Quantative Approach. — 5th edition — San Francisco, CA, USA: Elsevier Science, 2011.
2. D. Harris S. Harris Digital Design and Computer Architecture, 2nd edition — 2013
3. Rogers, T. G., Aamodt, T. M., Fung, W. W. L. General-Purpose Graphics Processor Architectures. — Switzerland: Springer International Publishing, 2022.
4. Clidaras, J., Barroso, L. A. The Datacenter as a Computer: An Introduction to the Design of Warehouse-Scale Machines, Second Edition. — Switzerland: Springer International Publishing, 2022.

7. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети "Интернет", необходимых для освоения дисциплины (модуля)

- Курс Berkeley CS252: <https://inst.eecs.berkeley.edu/~cs152/sp23>
- Курс Princeton ELE/COS 475: http://eleclass.princeton.edu/classes/ele475/fall_2016/doku.php
- Материалы ETH Zurich: <https://www.youtube.com/c/OnurMutluLectures/videos>
- RISC-V ISA:
<https://github.com/riscv/riscv-isa-manual/releases/download/Ratified-IMA-FDQC/riscv-spec-20191213.pdf>

8. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине (модулю), включая перечень необходимого программного обеспечения и информационных справочных систем (при необходимости)

В процессе самостоятельной работы обучающихся предполагается использование ОС Linux и программных средств работы с языком ассемблера RISC-V, а так же языками высокого уровня C и C++

9. Методические указания для обучающихся по освоению дисциплины (модуля)

Успешное освоение курса требует напряжённой самостоятельной работы студента. В программе

курса приведено минимально необходимое время для работы студента над темой.
Самостоятельная

работа включает в себя:

- Проработку учебного материала по конспектам лекций, учебной и научной литературе.
- Чтение дополнительных источников знаний, в том числе на иностранном языке.
- Подготовку вопросов преподавателям и ассистентам.
- Своевременное и самостоятельное выполнение домашних теоретических и практических заданий.

Рекомендуется обращать внимание на причины, приведшие к изобретению рассматриваемых методов и подходов, их сильные и слабые стороны,

Своевременное и качественное выполнение самостоятельной работы способствует успешному.

ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ (МОДУЛЮ)

| | |
|----------------------------|--|
| по направлению: | Информатика и вычислительная техника |
| профиль подготовки: | Компьютерные технологии и вычислительная техника Физтех-школа Радиотехники и Компьютерных Технологий кафедра перспективных вычислительных технологий |
| курс: | 4 |
| квалификация: | бакалавр |

Семестры, формы промежуточной аттестации:

7 (осенний) - Дифференцированный зачет

8 (весенний) - Экзамен

Разработчик: П.В. Крюков, ассистент

1. Компетенции, формируемые в процессе изучения дисциплины

| Код и наименование компетенции | Индикаторы достижения компетенции |
|---|---|
| УК-1 Способен осуществлять поиск, критический анализ и синтез информации, применять системный подход для решения поставленных задач | УК-1.2 Находит, критически анализирует и выбирает информацию, необходимую для решения поставленной задачи |
| ОПК-2 Способен использовать современные информационные технологии и программные средства при решении задач профессиональной деятельности, соблюдая требования информационной безопасности | ОПК-2.1 Способен применять современные вычислительную технику и сервисы сети Интернет в области (сфере) профессиональной деятельности |
| ОПК-3 Способен составлять и оформлять научные и (или) технические (технологические, инновационные) отчеты (публикации, проекты) | ОПК-3.3 Владеет методами визуального и графического представления результатов научной (научно-технической, инновационной технологической) деятельности в виде отчетов, научных публикаций |
| ПК-1 Способен ставить, формализовывать и решать задачи, в том числе разрабатывать и исследовать математические модели изучаемых явлений и процессов, системно анализировать научные проблемы, получать новые научные результаты | ПК-1.1 Способен находить, анализировать и обобщать информацию об актуальных результатах исследований в рамках тематической области своей профессиональной деятельности |
| | ПК-1.2 Способен выдвигать гипотезы, строить математические модели для описания изучаемых явлений и процессов, оценивать качество разработанной модели |
| | ПК-1.3 Способен применять теоретические и (или) экспериментальные методы исследований к конкретной научной задаче и интерпретировать полученные результаты |
| ПК-2 Способен самостоятельно или в качестве члена (руководителя) малого коллектива организовывать и проводить научные исследования и их апробацию | ПК-2.1 Знает принципы построения научной работы, методы сбора и анализа полученного материала, способы аргументации |
| | ПК-2.2 Способен планировать и проводить научные исследования самостоятельно или в качестве члена (руководителя) малого научного коллектива |
| | ПК-2.3 Способен проводить апробацию результатов научно-исследовательской работы посредством публикации научных статей и участия в конференциях |

2. Показатели оценивания компетенций

В результате изучения дисциплины «Архитектура вычислительных систем» обучающийся должен:

знать:

- Основные принципы организации вычислительных систем;
- основные существующие способы организации вычислительных систем, их классификацию, свойства и диапазоны применимости;
- основные понятия и характеристики вычислительных систем и их взаимосвязь.

уметь:

- Использовать полученные теоретические и практические знания для анализа функциональности, производительности, энергопотребления и стоимости вычислительных систем;
- выбирать оптимальные архитектурные и микроархитектурные решения, удовлетворяющие требованиям поставленной задачи;
- предлагать аппаратные и программные оптимизации существующих вычислительных систем.

владеть:

- Основными понятиями проектирования и анализа вычислительных систем;
- навыками самостоятельного изучения и исследования вычислительных систем;
- навыками работы с системой команд RISC-V, средствами программного моделирования архитектуры.

3. Перечень типовых (примерных) вопросов, заданий, тем для подготовки к текущему контролю

Примерные темы домашних заданий:

1. Написать рекурсивную функцию на RISC-V ассемблере, которая, например, вычисляет выражение, записанное в обратной польской записи.
2. Сравнить модели предсказателя переходов в симуляторе на разных ассемблерных программах.
3. Исследовать свойства кэшей на своем компьютере с помощью C++ программы.
4. Сравнить производительность разных способов внеочередного исполнения команд с помощью механистической модели

За каждое задание студент получает оценку в соответствии с таблицей критерия оценивания.

4. Перечень типовых (примерных) вопросов и тем для проведения промежуточной аттестации обучающихся

Перечень контрольных вопросов для сдачи дифференцированного зачета в осеннем семестре:

1. История вычислительной техники. Основные принципы развития.
2. Уровни абстракции вычислительной техники. Модель вычислений. Машина фон Неймана.
3. Сегменты рынка вычислительной техники и обусловленные этим отличия компьютеров. Цели, задачи и методы разработки вычислительной техники.
4. Производительность вычислительной системы и факторы, её определяющие. Методология измерений: бенчмарки, усреднение, учёт схемотехнических параметров.
5. Архитектура системы команд (ISA). Основные методы классификации ISA. Стековая архитектура. Однооперандные, двухоперандные, трёхоперандные архитектуры.
6. Принципы кодирования команд. RISC и CISC подходы. Порядок байтов (little/big endian). Выравнивание адресов (alignment).
7. Команды передачи управления и их классификация. Процедурный механизм.
8. Понятие микроархитектуры. Микрокодовая микроархитектура. Однотактная микроархитектура
9. Конвейеризация. Производительность конвейера. Виды конфликтов между командами, выполняемыми в конвейере.
10. Конфликты по данным и способы их разрешения.
11. Конфликты по управлению и способы их разрешения.
12. Методы предсказания условных переходов.
13. Принципы организации оперативной памяти.
14. Свойства пространственной и временной локальности.
15. Подсистема кэшей, принципы её организации.
16. Методы предварительной подкачки данных в кэш-память.
17. Когерентность кэшей, её задача и принципы работы.
18. Примитивы синхронизации и их аппаратная поддержка
19. Виртуальная память и её аппаратная поддержка.

Примеры задач для дифференцированного зачёта:

1. В следующем коде укажите все зависимости по данным их тип:

1. ADDI x1 <= x0, 4
2. SW x1 => 8(x2)
3. SLLI x3 <= x1, 1
4. ADD x3 <= x2, x3

5. $LW \times 1 \leq 0(x3)$

2. Увеличение ёмкости предсказателя переходов означает, что вероятность использовать одну ячейку для двух переходов (aliasing) уменьшается, чем повышается точность предсказания. Приведите примеры поведения двух условных переходов, для которых использование одной 1-битовой ячейки значительно а) хуже б) лучше, чем использование двух.

Перечень контрольных вопросов для сдачи экзамена в весеннем семестре:

1. Методы внеочередного исполнения команд.
2. Основные принципы архитектуры load/store.
3. Архитектура сверхдлинного командного слова (VLIW), её особенности.
4. Основные принципы векторизации. Программные методы векторизации. Отличие SIMD от векторных команд.
5. Одновременная многопоточность, критерии её эффективности и способы имплементации.
6. Отличия графических процессоров от процессоров общего назначения. Классы решаемых задачи.
7. Архитектура аппаратных ускорителей, основные существующие решения.
8. Аппаратная поддержка виртуализации.
9. Энергопотребление вычислительной системы и факторы, её определяющие. Экстремум функций производительности и энергопотребления.
10. Основные принципы организации высокопроизводительных систем и дата-центров.

Примеры билетов для проведения экзамена:

Билет 1.

1. Методы внеочередного исполнения команд.
2. Основные принципы организации высокопроизводительных систем и дата-центров.

Билет 2.

1. Основные принципы архитектуры load/store.
2. Энергопотребление вычислительной системы и факторы, её определяющие. Экстремум функций производительности и энергопотребления.

Критерии оценивания

Оценка отлично (10) выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины, проявляющему интерес к данной предметной области, продемонстрировавшему умение уверенно и творчески применять их на практике при решении конкретных задач, свободное и правильное обоснование принятых решений.

Оценка отлично (9) выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины и умение уверенно применять их на практике при решении конкретных задач, свободное и правильное обоснование принятых решений.

Оценка отлично (8) выставляется студенту, показавшему систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины и умение уверенно применять их на практике при решении конкретных задач, правильное обоснование принятых решений, с некоторыми недочетами.

Оценка хорошо (7) выставляется студенту, если он твердо знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но недостаточно грамотно обосновывает полученные результаты.

Оценка хорошо (6) выставляется студенту, если он твердо знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но допускает в ответе или в решении задач некоторые неточности.

Оценка хорошо (5) выставляется студенту, если он в основном знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но допускает в ответе или в решении задач достаточно большое количество неточностей.

Оценка удовлетворительно (4) выставляется студенту, показавшему фрагментарный, разрозненный характер знаний, недостаточно правильные формулировки базовых понятий, нарушения логической последовательности в изложении программного материала, но при этом он освоил основные разделы учебной программы, необходимые для дальнейшего обучения, и может применять полученные знания по образцу в стандартной ситуации.

Оценка удовлетворительно (3) выставляется студенту, показавшему фрагментарный, разрозненный характер знаний, допускающему ошибки в формулировках базовых понятий, нарушения логической последовательности в изложении программного материала, слабо владеет основными разделами учебной программы, необходимыми для дальнейшего обучения и с трудом применяет полученные знания даже в стандартной ситуации.

Оценка неудовлетворительно (2) выставляется студенту, который не знает большей части основного содержания учебной программы дисциплины, допускает грубые ошибки в формулировках основных принципов и не умеет использовать полученные знания при решении типовых задач.

Оценка неудовлетворительно (1) выставляется студенту, который не знает основного содержания учебной программы дисциплины, допускает грубейшие ошибки в формулировках базовых понятий дисциплины и вообще не имеет навыков решения типовых практических задач.

5. Методические материалы, определяющие процедуры оценивания знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности

Дифференцированный зачет проводится по итогам текущей успеваемости и сдачи заданий, предусмотренной программой дисциплины, а также путём организации специального опроса в устной и письменной форме.

При проведении дифференцированного зачета обучающемуся предоставляется 2 задачи, решение которых подразумевает ответ на один из типовых вопросов по темам курса, 40 минут на подготовку решения и развёрнутого обоснования. Опрос обучающегося проводится в течение 30 минут.

Во время проведения дифференцированного зачета обучающиеся могут пользоваться материалами конспектов, монографиями, научным статьями.

Экзамен проводится в устной форме.

При проведении устного экзамена обучающемуся предоставляется 1 час на подготовку. Опрос обучающегося по билету на устном экзамене не должен превышать двух астрономических часов.

Во время проведения дифференцированного зачета и экзамена обучающиеся могут пользоваться материалами конспектов, монографиями, научным статьями.