

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

УТВЕРЖДЕНО

**ИО директора физтех-школы
радиотехники и компьютерных
технологий**

Д.А. Гаврилов

	Рабочая программа дисциплины (модуля)
по дисциплине:	Архитектура подсистемы памяти современных микропроцессоров
по направлению:	Информатика и вычислительная техника
профиль подготовки:	Компьютерные технологии и вычислительная техника Физтех-школа Радиотехники и Компьютерных Технологий кафедра информатики и вычислительной техники
курс:	4
квалификация:	бакалавр

Семестр, формы промежуточной аттестации: 8 (весенний) - Экзамен

Аудиторных часов: 60 всего, в том числе:

лекции: 30 час.

семинары: 30 час.

лабораторные занятия: 0 час.

Самостоятельная работа: 45 час.

Подготовка к экзамену: 30 час.

Всего часов: 135, всего зач. ед.: 3

Программу составил: А.С. Кожин, преподаватель

Программа обсуждена на заседании кафедры информатики и вычислительной техники 01.08.2022

Аннотация

Данный курс предназначен для углубленного изучения устройства подсистемы памяти современных микропроцессоров и ее влияния на производительность. В рамках курса будут рассмотрены проблема быстродействия памяти, организация многоуровневой кэш-памяти и влияние ее параметров и различных комплексных оптимизаций на производительность микропроцессора, история развития виртуальной памяти и технологии ускорения трансляции адресов, а также поддержка консистентности и когерентности в многоядерных и многопроцессорных системах с общей памятью. На примере коммерческих микропроцессоров студенты изучат архитектуру подсистемы памяти и факторы, повлиявшие на разработку отдельных аппаратных и программных элементов вычислительных систем. В результате прохождения курса, обучающиеся смогут самостоятельно обосновывать выбор технических решений при проектировании подсистемы памяти многоядерных микропроцессоров, а также будут обладать достаточными знаниями об устройстве современных микропроцессоров для эффективного программирования в области НРС, компиляторов и операционных систем.

Курс включает в себя теоретические и практические занятия. Для успешного освоения курса необходимо посещение занятий, своевременное выполнение практических заданий, самостоятельная работа с дополнительной литературой.

1. Цели и задачи

Цель дисциплины

представление передовых достижений в области архитектуры подсистемы памяти современных микропроцессоров и вычислительных комплексов на их основе, изучение особенностей организации, технологий проектирования и методов оптимизации.

Задачи дисциплины

Задачами курса являются формирование знаний и проектных навыков в области:

- архитектуры подсистемы памяти высокопроизводительных микропроцессоров, определяющей принципы и технологии ускорения доступа в системную память, технологии организации многоуровневой иерархии памяти;
- технологии поддержки когерентности (актуальности копий) данных в многоядерных и многопроцессорных системах с общей памятью;
- принципов и типов организации виртуальной памяти, моделей виртуальной памяти современных высокопроизводительных микропроцессоров;
- моделей консистентности памяти и синхронизации процессов.

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	ПК-1.1 Способен находить, анализировать и обобщать информацию об актуальных результатах исследований в рамках тематической области своей профессиональной деятельности

решать задачи, в том числе разрабатывать и исследовать математические модели изучаемых явлений и процессов, системно анализировать научные проблемы, получать новые научные результаты	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

3. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине (модулю)

В результате освоения дисциплины обучающиеся должны

знать:

- архитектуру подсистемы памяти современных микропроцессоров и технологии ее оптимизации;
- особенности построения иерархии кэш-памяти многоядерных микропроцессоров;
- методы синхронизации доступа в память многоядерных и многопроцессорных вычислительных систем;
- технологии поддержки виртуальной памяти в современных микропроцессорах;
- аппаратные технологии виртуализации вычислительных ресурсов и реализации защищенных режимов.

уметь:

- строить иерархию подсистемы памяти микропроцессора в зависимости от заданных требований;
- выбирать структуру и характеристики кэш-памяти для нахождения оптимального соотношения между временем доступа, пропускной способностью и площадью кэша.
- определять количество уровней таблицы страниц в зависимости от размера страницы и разрядностей адресных пространств;
- пользоваться семафорами для предоставления корректного доступа нескольких процессов к общим данным;
- строить таблицу переходов состояний для выбранного протокола когерентности;
- анализировать механизм когерентности на наличие гонок.

владеть:

- навыками проектирования подсистемы памяти с учетом выбранных характеристик;
- навыками оптимизации подсистемы памяти микропроцессора для достижения минимального времени доступа;
- навыками верификации выбранного протокола когерентности.

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	Кэш-память современных микропроцессоров	5	5		10
2	Виртуальная память и ее поддержка в современных микропроцессорах	10	10		13
3	Организация доступа в распределенную общую память	10	10		12
4	Виртуализация вычислительных ресурсов	5	5		10
Итого часов		30	30		45
Подготовка к экзамену		30 час.			
Общая трудоёмкость		135 час., 3 зач.ед.			

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

Семестр: 8 (Весенний)

1. Кэш-память современных микропроцессоров

- а. Базовые принципы организации кэш-памяти
- б. Иерархия кэш-памяти современных многоядерных микропроцессоров
- с. Распределенная кэш-память (NUCA)

2. Виртуальная память и ее поддержка в современных микропроцессорах

Базовые формы структурной организации виртуальной памяти
 Развитая структура виртуальной памяти
 Особенности организации виртуальной памяти современных микропроцессоров

3. Организация доступа в распределенную общую память

Консистентность памяти и синхронизация процессов
 Механизмы поддержки когерентности памяти и их отладка
 Поддержка когерентности памяти в современных микропроцессорах

4. Виртуализация вычислительных ресурсов

Понятие и общие принципы виртуализации вычислительных ресурсов
 Аппаратная поддержка виртуализации

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

- необходимое оборудование для лекций и практических занятий: компьютер и проектор,
- необходимое программное обеспечение: MS Office Power Point.

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. Компьютерная архитектура. Количественный подход [Текст] : [учеб. пособие для вузов] / Дж. Хеннесси, Д. Паттерсон ; пер. с англ. М. В. Таранчевой ; под ред. А. К. Кима .— 5-е изд. — М. : ТЕХНОСФЕРА, 2016 .— 936 с.

Дополнительная литература

1. Архитектура компьютера [Текст] : [учеб. пособие для вузов] / Э. Таненбаум, Т. Остин ; [пер. с англ. Е. Матвеев] .— 6-е изд. — СПб. : Питер, 2014 .— 816 с
2. Архитектура компьютеров и её реализация [Текст] : учебное пособие / Х. Крейгон ; пер. с англ. К. Г. Финогенов ; под ред. Л. Н. Королева .— М. : Мир, 2004 .— 416 с.

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

1.
<http://ocw.mit.edu/courses/electrical-engineering-and-computer-science/6-823-computer-system-architecture-fall-2005/lecture-notes/>
2. <https://class.coursera.org/comparch-2012-001/class/index>

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

На лекционных занятиях используются мультимедийные технологии, включая демонстрацию презентаций.

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

Посещение лекций и самостоятельная работа с литературой.

Самостоятельная работа включает в себя чтение и конспектирование рекомендованной литературы, просмотр интернет-ресурсов по тематике курса, решение задач, заданных преподавателем, подготовку к ответам на контрольные вопросы.

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 информатики и вычислительной техники
курс:	4
квалификация:	бакалавр
Семестр, формы промежуточной аттестации: 8 (весенний) - Экзамен	
Разработчик:	А.С. Кожин, преподаватель

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 подсистемы памяти современных микропроцессоров» обучающийся должен:

знать:

- архитектуру подсистемы памяти современных микропроцессоров и технологии ее оптимизации;
- особенности построения иерархии кэш-памяти многоядерных микропроцессоров;
- методы синхронизации доступа в память многоядерных и многопроцессорных вычислительных систем;
- технологии поддержки виртуальной памяти в современных микропроцессорах;
- аппаратные технологии виртуализации вычислительных ресурсов и реализации защищенных режимов.

уметь:

- строить иерархию подсистемы памяти микропроцессора в зависимости от заданных требований;
- выбирать структуру и характеристики кэш-памяти для нахождения оптимального соотношения между временем доступа, пропускной способностью и площадью кэша.
- определять количество уровней таблицы страниц в зависимости от размера страницы и разрядностей адресных пространств;
- пользоваться семафорами для предоставления корректного доступа нескольких процессов к общим данным;
- строить таблицу переходов состояний для выбранного протокола когерентности;
- анализировать механизм когерентности на наличие гонок.

владеть:

- навыками проектирования подсистемы памяти с учетом выбранных характеристик;
- навыками оптимизации подсистемы памяти микропроцессора для достижения минимального времени доступа;
- навыками верификации выбранного протокола когерентности.

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

Темы практических заданий:

1. Кэш-память.
2. Виртуальная память.
3. Консистентность памяти.
4. Поддержка когерентности памяти с помощью снупирования.
5. Поддержка когерентности памяти с помощью когерентных справочников.

Перечень типовых вопросов для подготовки к текущему контролю

1. Принципы временной и пространственной локальности. Многоуровневая иерархия памяти.
2. Структура и адресация кэш-памяти. Ассоциативность кэш-памяти. Размещение и поиск данных в кэш-памяти.
3. Конвейерное исполнение записей. Буфер записи. Политики записи.
4. Вытеснение данных и политики замещения.
5. Типы промахов в кэш-память. Производительность кэш-памяти.
6. Влияние основных параметров кэш-памяти на ее производительность и потребляемую мощность.
7. Оптимизации кэш-памяти (подклейка записей, Victim кэш, Critical Word First/Early Restart, prefetching и др.).
8. Shared кэш и Private кэш. LLC. Политика размещения данных в многоуровневой кэш-памяти (inclusive, exclusive, non-inclusive) и ее влияние на производительность микропроцессора.
9. Методы повышения производительности inclusive кэш-памяти (TLA, NCID).
10. Распределенная кэш-память (NUCA).
11. Сети-на-кристалле (Network-on-Chip). Использование кольцевых шин для доступа в распределенную кэш-память.
12. Виртуальное и физическое адресные пространства. Абсолютная адресация. Динамическая трансляция адресов. Страничная и сегментная организации виртуальной памяти. Фрагментация памяти. Вызов страниц по требованию.
13. Линейная таблица страниц. Выделение страниц и трансляция адресов.
14. Формат элемента таблицы страниц.
15. Замещение страниц. Многоуровневые таблицы страниц. Хранение таблицы страниц.
16. Ускорение трансляции адресов с помощью TLB. Структура TLB. Поддержка страниц разных размеров.
17. Использование идентификаторов процессов для ускорения смены контекстов.
18. Инверсные таблицы страниц (Hashed Page Table).
19. Кэш-память с виртуальной адресацией. Алиасинг. Решение проблемы алиасинга с помощью инклюзивного кэша второго уровня.
20. Страничная организация виртуальной памяти архитектуры x86. Использование идентификаторов процессов PCID для ускорения смены контекстов.
21. Physical Address Extension (PAE).

22. Виртуальная память микропроцессоров архитектуры x86-64.
23. Модели консистентности памяти.
24. Семафоры. Неблокирующие методы синхронизации. Метод синхронизации на общей памяти. Барьерные операции.
25. Построение систем на общей памяти. UMA и NUMA системы.
26. Проблема когерентности памяти. Snoopy cache. Механизмы поддержания когерентности Write Invalidate и Write Update.
27. Протоколы когерентности.
28. Масштабируемость протоколов когерентности и использование когерентных справочников. Частичный по памяти и полный по памяти справочник.
29. Когерентность памяти в многоядерных микропроцессорах с общим кэшем последнего уровня. Влияние политик размещения данных в многоуровневой кэш-памяти на механизм когерентности.
30. Аппаратная поддержка виртуализации вычислительных ресурсов.

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

Перечень контрольных вопросов для сдачи экзамена:

1. Структура и адресация кэш-памяти. Ассоциативность кэш-памяти. Политики чтения и записи. Многоуровневая кэш-память. Victim кэш.
2. Вытеснение данных и политики замещения.
3. Оптимизации кэш-памяти (конвейеризация, critical word first, prefetching и др.).
4. Shared кэш и Private кэш. LLC. Политика размещения данных в многоуровневой кэш-памяти (inclusive, exclusive, non-inclusive) и ее влияние на производительность микропроцессора.
5. Распределенная кэш-память (NUCA). Использование кольцевых шин для доступа в распределенную кэш-память. Распределенное (Intel) и центральное (IBM) арбитражное устройство доступа к кольцу.
6. Страничная, сегментная и странично-сегментная организация виртуальной памяти. Виртуальное и физическое адресные пространства.
7. Выделение страниц и трансляция адресов. Замещение страниц. Таблица страниц. Формат элемента таблицы страниц. Многоуровневые таблицы страниц.
8. Ускорение трансляции адресов с помощью TLB. Поддержка страниц разных размеров. Защита адресного пространства программы.
9. Кэш-память с виртуальной адресацией. Алиасинг. Инверсные таблицы страниц (Hashed Page Table).
10. Виртуальная память микропроцессоров архитектуры Intel 64. Режимы трансляции адресов архитектуры Intel 64 (32 bit, PAE, IA-32e). Сегменты. Использование идентификаторов процессов PCID для ускорения смены контекстов.
11. Модели виртуальной памяти архитектуры Intel Itanium (MAS, SAS). Регионы. Структура TLB (ITLB, DTLB). Использование VHP для ускорения трансляции адресов. Форматы VHP.
12. SMP системы. Модели консистентности памяти. Семафоры.
13. Неблокирующие методы синхронизации. Метод синхронизации на общей памяти. Барьерные операции.
14. UMA и NUMA системы. Понятие когерентности памяти. Snooping и Snarfing.
15. Протоколы когерентности. Основные и переходные состояния. Блокирующий кэш и неблокирующий кэш. Некешируемые обращения.
16. Гонки при обращениях к подсистеме памяти. Верификация протоколов когерентности.
17. Когерентность памяти в многоядерных микропроцессорах с общим кэшем последнего уровня. Влияние политик размещения данных в многоуровневой кэш-памяти на механизм когерентности.
18. Использование справочника (полного и усеченного) в многопроцессорных системах.
19. Виртуальные машины и гипервизор. Типы виртуализации. Области применения виртуализации. Современные средства виртуализации.

20. Технологии виртуализации Intel VT и AMD-V (Pacifica). Аппаратная виртуализация физической памяти и ввода-вывода. Реализация защищенного режима работы с помощью виртуальных машин.

Примеры билетов для проведения экзамена:

Билет 1.

1. Структура и адресация кэш-памяти. Ассоциативность кэш-памяти. Политики чтения и записи. Многоуровневая кэш-память. Victim кэш.
2. Технологии виртуализации Intel VT и AMD-V (Pacifica). Аппаратная виртуализация физической памяти и ввода-вывода. Реализация защищенного режима работы с помощью виртуальных машин.

Билет 2.

1. Вытеснение данных и политики замещения.
2. Виртуальные машины и гипервизор. Типы виртуализации. Области применения виртуализации. Современные средства виртуализации.

Критерии оценивания

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.

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.

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

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.

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.

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.

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.

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.

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.

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

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 экзамен обучающиеся могут пользоваться программой дисциплины.