

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Луганский национальный университет имени Владимира Даля»

Институт технологий и инженерной механики
Кафедра технологии машиностроения и инженерного консалтинга

УТВЕРЖДАЮ

Директор института технологий и
инженерной механики

Могильная Е.П.

2023 г.



РАБОЧАЯ ПРОГРАММА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

**«ВВЕДЕНИЕ В ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНЫЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ
СИСТЕМЫ»**

По направлению подготовки 15.03.01 Машиностроение

Профиль: «Технологии прототипирования машиностроительных объектов»

Луганск - 2023

Лист согласования РПУД

Рабочая программа учебной дисциплины «Введение в высокопроизводительные вычислительные системы» по направлению подготовки 15.03.01 Машиностроение. – 22 с.

Рабочая программа учебной дисциплины «Введение в высокопроизводительные вычислительные системы» составлена с учетом Федерального государственного образовательного стандарта высшего образования по направлению подготовки 15.03.01 Машиностроение, утвержденного приказом Министерства науки и высшего образования Российской Федерации от «9» августа 2021 года № 727.

СОСТАВИТЕЛЬ:

канд. техн. наук, доцент Киреев И.Ю.

Рабочая программа дисциплины утверждена на заседании кафедры технологии машиностроения и инженерного консалтинга «5» 09 2023 года, протокол № 1

Заведующий кафедрой технологии машиностроения
и инженерного консалтинга Ясуник С.Н.

Переутверждена: « » 20 г., протокол №

Рекомендована на заседании учебно-методической комиссии института технологий и инженерной механики «12» 09 2023 года, протокол № 1

Председатель учебно-методической комиссии
института технологий и инженерной механики Ясуник С.Н.

Структура и содержание дисциплины

1. Цели и задачи дисциплины, ее место в учебном процессе

Цель изучения дисциплины – сформировать у студентов систематизированные знания об архитектуре, принципах работы и областях применения высокопроизводительных вычислительных систем (ВВС) для решения задач в области машиностроения и прототипирования.

Задачи: изучить базовые принципы построения и классификацию ВВС, сформировать понимание архитектурных решений современных суперкомпьютеров (многопроцессорные, многомашинные, гибридные системы). Освоить основы технологии параллельного программирования (MPI, OpenMP). Изучить методы распараллеливания вычислительных алгоритмов, характерных для задач машиностроения (CAE-расчеты, МКЭ, CFD). Привить навыки практической работы с инструментами для разработки параллельных приложений.

2. Место дисциплины в структуре ООП ВО.

Дисциплина «Введение в высокопроизводительные вычислительные системы» входит в часть, формируемую участниками образовательных отношений. Она базируется на знаниях и компетенциях, полученных студентами при изучении следующих дисциплин: "Информатика и информационные технологии", "Электротехника и электроника", "Компьютерное моделирование объектов профессиональной деятельности".

Является основой для успешного освоения дисциплины " Разработка прикладного программного обеспечения" и написания выпускной квалификационной работы.

3. Требования к результатам освоения содержания дисциплины

| Код и наименование компетенции | Индикаторы достижений компетенции (по реализуемой дисциплине) | Перечень планируемых результатов |
|--|--|--|
| ОПК-4. Способен понимать принципы работы современных информационных технологий и использовать их для решения задач профессиональной деятельности | ОПК-4.1. Знает основные понятия в области информационных технологий. | Знать Основные понятия и терминологию информационных технологий архитектуру и классификацию вычислительных систем, принципы работы операционных систем и сетевых технологий, основы дискретной математики и математической логики Методы представления и хранения данных в вычислительных системах Современные тенденции развития IT-инфраструктуры в машиностроении |
| | | |

| | | |
|--|---|---|
| | ОПК-4.2. Знает методы, способы и возможности преобразования данных в информацию. | Знать: Методы сбора и предварительной обработки данных с производственного оборудования, алгоритмы преобразования данных в технологическую информацию принципы работы систем AD/CAM/CAE в контексте прототипирования, методы цифрового моделирования и симуляции производственных процессов технологии интернета вещей (IoT) в промышленности принципы работы систем SCADA и MES методы статистической обработки производственных данных, основы машинного обучения для анализа технологических процессов |
| | ОПК-4.3. Умеет использовать прикладные программные средства при подготовке производства и изготовлении изделий. | Уметь: Применять системы reverse engineering для обработки данных 3D-сканирования, использовать программные комплексы для роботизированных производственных ячеек, работать с системами виртуальной и дополненной реальности для проектирования, применять специализированное ПО для конкретных технологических процессов (литья, обработки давлением и т.д.) Автоматизировать передачу данных между CAD/CAM/CAE системами Организовывать коллективную работу над проектами в PDM-системах |
| | ОПК-4.4. Владеет методами анализа и обобщения результатов расчетов. | Владеть: Методами верификации и валидации результатов CAE-расчетов Методиками оценки погрешностей численного моделирования Техниками сравнительного анализа альтернативных конструктивных решений Методами статистической обработки результатов многовариантных расчетов |

4. Структура и содержание дисциплины

4.1. Объем учебной дисциплины и виды учебной работы

| Вид учебной работы | Объем часов (зач. ед.) | |
|--|------------------------------------|------------------------------------|
| | Очная форма | Заочная форма |
| Общая учебная нагрузка (всего) | 144 (4,0 зач. ед) | 144 (4,0 зач. ед) |
| Обязательная аудиторная учебная нагрузка (всего) в том числе: | 72 | 16 |

| | | |
|---|-----------|------------|
| Лекции | 36 | 8 |
| Семинарские занятия | - | - |
| Практические занятия | 36 | 8 |
| Лабораторные работы | - | - |
| Курсовой проект | - | - |
| Другие формы и методы организации образовательного процесса - РГР | + | - |
| Самостоятельная работа студента (всего) | 72 | 128 |
| Форма аттестации | экзамен | экзамен |

4.2. Содержание разделов дисциплины

Тема 1. Введение. Понятие BBC

Примеры задач в машиностроении, требующих BBC: CFD-расчеты, прочностной анализ сложных сборок, моделирование процессов сварки и литья, цифровые двойники

Тема 2. Основные понятия параллелизма

Закон Амдала. Почему инженерные пакеты ускоряются на многопроцессорных системах

Тема 3. Кластеры как основная архитектура для инженерных расчетов.

Определение, Ключевая идея, Ключевые компоненты кластера, Системы с общей (SMP) и распределенной памятью

Тема 4. Программные модели параллелизма.

MPI, OpenMP и их использование в инженерном ПО.

Тема 5. Системы управления вычислительными ресурсами.

Планировщики заданий. Принципы работы SLURM.

Тема 6. Основы работы в операционной системе Linux.

Командная строка, файловая система, текстовые редакторы.

Тема 7. Работа с планировщиком SLURM.

Написание скриптов для постановки задач в очередь (`sbatch`), мониторинг задач (`squeue`).

Тема 8. Запуск и управление расчетами в инженерных пакетах

ANSYS Mechanical/FLUENT, LS-DYNA, OpenFOAM на кластере. Анализ результатов и лог-файлов.

4.3. Лекции

| № п/п | Название темы | Объем часов | |
|---------------|---|----------------|------------------|
| | | Очная форма | Заочная форма |
| 1 | Введение. Понятие BBC. | 4 | 1 |
| 2 | Основные понятия параллелизма | 4 | 1 |
| 3 | Кластеры как основная архитектура для инженерных расчетов | 4 | 1 |
| 4 | Программные модели параллелизма | 4 | 1 |
| 5 | Системы управления вычислительными ресурсами | 4 | 1 |
| 6 | Основы работы в операционной системе Linux. | 4 | 1 |
| 7 | Работа с планировщиком SLURM | 8 | 1 |
| 8 | Запуск и управление расчетами в инженерных пакетах | 4 | 1 |
| Итого: | | 36 | 8 |

4.4. Практические занятия

Практические занятия учебным планом не предусмотрены

4.5. Лабораторные работы

| № п/п | Название темы | Объем часов | |
|----------|---|----------------|------------------|
| | | Очная форма | Заочная форма |
| 1 | Знакомство с архитектурой высокопроизводительного кластера и системой управления заданиями | 4 | 1 |
| 2 | Параллельная обработка данных для анализа результатов прототипирования | 5 | 1 |
| 3 | Введение в технологии параллельного программирования (OpenMP) | 5 | 1 |
| 4 | Моделирование тепловых полей в прототипе детали с использованием вычислительного кластера | 5 | 1 |
| 5 | Сравнительный анализ производительности последовательных и параллельных алгоритмов при решении задач механики | 6 | 2 |
| 6 | Интеграция НРС-расчетов в процесс цифрового прототипирования. Автоматизация рабочего процесса | 6 | 2 |
| Итого: | | 36 | 8 |

4.6. Самостоятельная работа студентов

| № п/п | Название темы | Вид СРС | Объем часов | |
|----------|---|--|----------------|------------------|
| | | | Очная форма | Заочная форма |
| 1 | Введение. Понятие ВВС. | Поиск, анализ, структурирование и изучение информации по темам. Подготовка к зачету | 16 | 26 |
| 2 | Основные понятия параллелизма | | 16 | 26 |
| 3 | Кластеры как основная архитектура для инженерных расчетов | | 12 | 22 |
| 4 | Программные модели параллелизма | | 10 | 20 |
| 5 | Системы управления вычислительными ресурсами | | 18 | 30 |
| | Основы работы в операционной системе Linux. | | | |
| | Работа с планировщиком SLURM | | | |
| Итого: | | | 72 | 128 |

4.7. Курсовые проекты. Учебным планом не предусмотрено выполнение курсового проекта.

4.8. Расчетно-графические работы. Учебным планом предусмотрено выполнение РГР (темы представлены в ФОС).

5. Образовательные технологии

Для достижения планируемых результатов освоения дисциплины «Введение в высокопроизводительные вычислительные системы» используются следующие образовательные технологии:

– традиционные объяснительно-иллюстративные технологии, которые обеспечивают доступность учебного материала для большинства студентов,

системность, отработанность организационных форм и привычных методов, относительно малые затраты времени;

- информационно-коммуникационная технология, в том числе визуализация, создание электронных учебных материалов;

- использование электронных образовательных ресурсов при подготовке к лекциям, практическим и лабораторным занятиям;

- технология проблемного обучения, в том числе в рамках разбора проблемных ситуаций;

- технология развивающего обучения, в том числе постановка и решение задач от менее сложных к более сложным, развивающих компетенции студентов.

В рамках перечисленных технологий основными методами обучения являются: работа в команде; самостоятельная работа; проблемное обучение.

6. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины:

а) основная литература:

1. Гергель В.П. Теория и практика параллельных вычислений. - М.: Интернет-Университет Информационных Технологий, 2007.

2. Эндрю Таненбаум, Герберт Бос. Современные операционные системы. - 4-е изд. - Питер, 2015. (Главы о параллелизме).

3. Quinn M.J. Parallel Programming in C with MPI and OpenMP. – McGraw-Hill, 2004.

б) дополнительная литература:

1. Официальная документация по MPI: <https://www.mpi-forum.org/docs/>

2. Официальная документация по OpenMP: <https://www.openmp.org/specifications/>

3. Документация планировщика SLURM: <https://slurm.schedmd.com/documentation.html>

в) Интернет-ресурсы:

Министерство образования и науки Российской Федерации – <http://минобрнауки.рф/>

Федеральная служба по надзору в сфере образования и науки – <http://obrnadzor.gov.ru/>

Портал Федеральных государственных образовательных стандартов высшего образования – <http://fgosvo.ru>

Федеральный портал «Российское образование» – <http://www.edu.ru/>

Информационная система «Единое окно доступа к образовательным ресурсам» – <http://window.edu.ru/>

Федеральный центр информационно-образовательных ресурсов – <http://fcior.edu.ru/>

Электронные библиотечные системы и ресурсы

Электронно-библиотечная система «Консультант студента» – <http://www.studentlibrary.ru/cgi-bin/mb4x>

Электронно-библиотечная система «StudMed.ru» – <https://www.studmed.ru>

Научная электронная библиотека Elibrary – Режим доступа: URL: <http://elibrary.ru/>

Справочная правовая система «Консультант Плюс» – Режим доступа: URL: <https://www.consultant.ru/sys/>

Информационный ресурс библиотеки образовательной организации

Научная библиотека имени А. Н. Коняева – Режим доступа: URL: <http://biblio.dahluniver.ru/>

7. Материально-техническое и программное обеспечение дисциплины

Освоение дисциплины «Введение в высокопроизводительные вычислительные системы» предполагает использование академических аудиторий, соответствующих действующим санитарным и противопожарным правилам и нормам.

Прочее: рабочее место преподавателя, оснащенное компьютером с доступом в Интернет.

Программное обеспечение:

| Функциональное назначение | Бесплатное программное обеспечение | Ссылки |
|----------------------------------|---|---|
| Офисный пакет | Libre Office 6.3.1 | https://www.libreoffice.org/ https://ru.wikipedia.org/wiki/LibreOffice |
| Операционная система | UBUNTU 19.04 | https://ubuntu.com/ https://ru.wikipedia.org/wiki/Ubuntu |
| Браузер | Firefox Mozilla | http://www.mozilla.org/ru/firefox/fx |
| Браузер | Opera | http://www.opera.com |
| Почтовый клиент | Mozilla Thunderbird | http://www.mozilla.org/ru/thunderbird |
| Файл-менеджер | Far Manager | http://www.farmanager.com/download.php |
| Архиватор | 7Zip | http://www.7-zip.org/ |
| Графический редактор | GIMP (GNU Image Manipulation Program) | http://www.gimp.org/ http://gimp.ru/viewpage.php?page_id=8 http://ru.wikipedia.org/wiki/GIMP |
| Редактор PDF | PDFCreator | http://www.pdfforge.org/pdfcreator |
| Аудиоплеер | VLC | http://www.videolan.org/vlc/ |

8. Оценочные средства по дисциплине

Паспорт

фонда оценочных средств по учебной дисциплине

«Введение в высокопроизводительные вычислительные системы»

Перечень компетенций (элементов компетенций), формируемых в результате освоения учебной дисциплины (модуля) или практики

| № п / п | Код контролируемой компетенции | Формулировка контролируемой компетенции | Индикаторы достижений компетенции (по реализуемой дисциплине) | Контролируемые темы учебной дисциплины, практики | Этапы формирования (семестр изучения) |
|---------|--------------------------------|---|---|--|---------------------------------------|
| 1 | ОПК-4 | Способен понимать принципы работы современных информационных технологий и использовать их для решения задач профессиональной деятельности | ОПК 4.1. Знает методы, способы и возможности преобразования данных в информацию. | Тема 1. Введение. Понятие ВВС Тема 2. Основные понятия параллелизма Тема 3. Кластеры как основная архитектура для инженерных расчетов. Тема 4. Программные модели параллелизма. | 8 |
| | | | ОПК-4.2. Знает методы, способы и возможности преобразования данных в информацию. | Тема 4. Программные модели параллелизма. Тема 5. Системы управления вычислительными ресурсами. Тема 6. Основы работы в операционной системе Linux. | 8 |
| | | | ОПК-4.3. Умеет использовать прикладные программные средства при подготовке производства и изготовлении изделий. | Тема 6. Основы работы в операционной системе Linux. Тема 7. Работа с планировщиком SLURM. Тема 8. Запуск и управление расчетами в инженерных пакетах | 8 |
| | | | ОПК-4.4. Владеет методами анализа и обобщения результатов расчетов. | Тема 6. Основы работы в операционной системе Linux. Тема 7. Работа с планировщиком SLURM. Тема 8. Запуск и управление расчетами в инженерных пакетах | 8 |

**Показатели и критерии оценивания компетенций,
описание шкал оценивания**

| № п/ п | Код контролируемой компетенции | Индикаторы достижений компетенции и (по реализуемой дисциплине) | Перечень планируемых результатов | Контролиру емые темы учебной дисциплины | Наименовани е оценочного средства |
|--------------|---|--|---|--|---|
| 1 | ОПК-4. Способен понимать принципы работы современных информационны х технологий и использовать их для решения задач профессиональн ой деятельности | ОПК-4.1. Знает основные понятия в области информацио нных технологий. | Знать Основные понятия и терминологию информационных технологий архитектуру и классификацию вычислительных систем, принципы работы операционных систем и сетевых технологий, основы дискретной математики и математической логики, методы представления и хранения данных в вычислительных системах | Тема 1 Тема 2 Тема 3 Тема 4 Тема 5 | Вопросы для комбинирова нного контроля усвоения теоретическо го материала (устно или письменно), задания к лабораторны м работам, тест, РГР, экзамен |
| | | ОПК-4.2. Знает методы, способы и возможност и преобразова ния данных в информаци ю. | Знать: Методы сбора и предварительной обработки данных с производственного оборудования, алгоритмы преобразования данных в технологическую информацию принципы работы систем AD/CAM/CAE в контексте прототипирования, принципы работы систем SCADA и MES | Тема 1 Тема 2 Тема 3 Тема 4 Тема 5 | Вопросы для комбинирова нного контроля усвоения теоретическо го материала (устно или письменно), задания к лабораторны м работам, тест, РГР, экзамен |
| | | ОПК-4.3. Умеет использоват ь прикладные программны е средства при подготовке производств а и | Уметь: Применять системы reverse engineering для обработки данных 3D- сканирования, применять специализированное ПО для конкретных технологических процессов (литья, | Тема 3 Тема 4 Тема 5 Тема 6 Тема 7 | Вопросы для комбинирова нного контроля усвоения теоретическо го материала (устно или письменно), задания к лабораторны |

| | | | | | |
|--|--|---|---|--|---|
| | | изготовлении и изделий. | обработки давлением и т.д.) Автоматизировать передачу данных между CAD/CAM/CAE системами | | м работам, тест, РГР, экзамен |
| | | ОПК-4.4. Владеет методами анализа и обобщения результатов расчетов. | Владеть: Методами верификации и валидации результатов CAE-расчетов Методиками оценки погрешностей численного моделирования Техниками конструктивных решений Методами статистической обработки результатов многовариантных расчетов | Тема 3 Тема 4 Тема 5 Тема 6 Тема 7 | Вопросы для комбинированного контроля усвоения теоретического материала (устно или письменно), задания к лабораторным работам, тест, РГР, экзамен |

Фонды оценочных средств по дисциплине «Введение в высокопроизводительные вычислительные системы»

Вопросы для комбинированного контроля усвоения теоретического материала (устно или письменно)

1. Дайте определение высокопроизводительным вычислениям (HPC). Какие задачи в области прототипирования машиностроительных объектов требуют применения HPC?
2. Опишите архитектуру кластера как основного типа ВВС. Перечислите и охарактеризуйте его ключевые компоненты (вычислительные узлы, коммуникационная сеть, система хранения, система управления).
3. Объясните разницу между параллелизмом на уровне инструкций (ILP), потоков (TLP) и на уровне задач (Task-level parallelism). Приведите примеры из области CAE-расчетов.
4. Что такое закон Амдала и как он влияет на планирование распараллеливания инженерных задач (например, прочностного расчета детали)?
5. Сравните архитектуры с общей (UMA) и распределенной (NUMA) памятью. В чем их преимущества и недостатки для задач моделирования?
6. Опишите модель параллельного программирования с общей памятью (OpenMP). Каковы ее основные директивы и для каких типов задач в прототипировании она наиболее эффективна?
7. Опишите модель параллельного программирования с передачей сообщений (MPI). В чем ее ключевое отличие от модели с общей памятью и когда ее применение предпочтительнее?

8. Что такое «гибридная модель» программирования (MPI + OpenMP)? Объясните, какую выгоду она может принести при расчете крупной сборки в CAE-пакете.
9. Объясните понятия «ускорение» (Speedup) и «эффективность» (Efficiency) параллельной программы. Какие факторы ограничивают линейное ускорение?
10. Что такое «узкое место» (bottleneck) в параллельной программе? Приведите пример возможного узкого места в задаче CFD-моделирования.
11. Какую роль выполняет планировщик заданий (на примере Slurm) в HPC-кластере? Опишите основные директивы в скрипте для Slurm.
12. Что такое контейнеризация (например, с использованием Docker/Singularity) и какова ее роль в HPC для обеспечения воспроизводимости расчетов и управления программными зависимостями?
13. Опишите типы файловых систем, используемых в HPC (локальные, сетевые NFS, параллельные Lustre/GPFS). Почему для задач прототипирования, связанных с обработкой больших данных, важны параллельные файловые системы?
14. Что такое «трансфер данных» в контексте HPC-кластера и какие инструменты для этого используются (SCP, Rsync)? Почему это критично при работе с результатами 3D-моделирования?
15. Опишите полный цикл проведения виртуальных испытаний прототипа на HPC-кластере: от подготовки модели до анализа результатов.
16. Как принципы HPC используются в современных CAE-пакетах (ANSYS, LS-DYNA, Siemens NX, OpenFOAM) для решения задач прочности, термообработки и динамики?
17. Каковы вычислительные особенности методов конечных элементов (МКЭ) и конечных объемов (МКО), делающие их идеальными кандидатами для распараллеливания?
18. Объясните, что такое параметрические исследования и оптимизация топологии. Как HPC-кластер позволяет эффективно проводить такие исследования?
19. Какова роль HPC в концепции «Цифрового двойника»? Какие новые требования к вычислительным системам возникают в связи с этим.
20. Каковы современные тенденции и вызовы в развитии HPC (гетерогенные архитектуры, энергоэффективность, искусственный интеллект) и как они могут повлиять на технологии прототипирования в машиностроении?

Критерии и шкала оценивания по оценочному средству –
комбинированный контроль усвоения теоретического материала

| Шкала оценивания (интервал баллов) | Критерий оценивания |
|---------------------------------------|---|
| 5 | Ответ дан на высоком уровне (студент в полном объеме осветил рассматриваемую проблематику, привел аргументы в пользу своих суждений, владеет профильным понятийным (категориальным) аппаратом и т.п.) |
| 4 | Ответ дан на среднем уровне (студент в целом осветил рассматриваемую проблематику, привел аргументы в пользу своих суждений, допустив некоторые неточности и т.п.) |

| | |
|---|---|
| 3 | Ответ дан на низком уровне (студент допустил существенные неточности, изложил материал с ошибками, не владеет в достаточной степени профильным категориальным аппаратом и т.п.) |
| 2 | Ответ дан на неудовлетворительном уровне или не представлен (студент не готов, не выполнил задание и т.п.) |

Лабораторные работы. Цели и задачи.

Лабораторная работа №1

Тема: «Знакомство с архитектурой высокопроизводительного кластера и системой управления заданиями»

Цель: Ознакомиться с основными компонентами HPC-кластера, получить практические навыки работы в Linux-среде кластера и освоить базовые операции с системой управления заданиями Slurm.

Задачи:

1. Изучить логическую структуру кластера (head-узел, вычислительные узлы, система хранения данных).
2. Освоить базовые команды Linux для навигации по файловой системе и управления файлами.
3. Научиться подключаться к головному узлу кластера с помощью SSH-клиента.
4. Освоить написание простейшего скрипта для системы управления заданиями Slurm.
5. Отправить тестовое задание на вычисление (например, вывод информации о узле) в очередь и изучить его вывод.

Лабораторная работа №2

Тема: «Параллельная обработка данных для анализа результатов прототипирования»

Цель: Научиться использовать возможности кластера для ускорения обработки больших массивов данных, получаемых в результате сканирования или моделирования прототипов.

Задачи:

1. Получить набор данных (например, файлы с координатами точек 3D-скана детали или результаты замеров).
2. Написать скрипт на языке Python для обработки этих данных (например, вычисление статистики, фильтрация шума, аппроксимация).
3. Модифицировать скрипт для использования библиотеки `multiprocessing` или `joblib` для внутреннего распараллеливания.
4. Запустить задание на нескольких ядрах одного вычислительного узла с помощью Slurm.
5. Сравнить время выполнения обработки на 1, 2, 4 и 8 ядрах и проанализировать эффективность распараллеливания.

Лабораторная работа №3

Тема: «Введение в технологии параллельного программирования (OpenMP)»

Цель: Получить базовые навыки распараллеливания вычислительно сложных задач на многоядерных системах с использованием директив OpenMP.

Задачи:

1. Написать последовательную программу на языке C/C++ или Fortran, реализующую алгоритм, характерный для машиностроения (например, численное интегрирование для расчета площади сложной поверхности, перемножение матриц).
2. Изучить базовые директивы OpenMP (``parallel``, ``for``, ``sections``).
3. Модифицировать последовательную программу, добавив директивы OpenMP для распараллеливания циклов.
4. Скомпилировать программу с поддержкой OpenMP.
5. Запустить программу на одном вычислительном узле, варьируя число используемых потоков. Построить график ускорения в зависимости от количества потоков.

Лабораторная работа №4

Тема: «Моделирование тепловых полей в прототипе детали с использованием вычислительного кластера»

Цель: Провести расчет стационарного температурного поля для упрощенной модели машиностроительной детали с использованием методов параллельных вычислений.

Задачи:

1. Реализовать последовательную версию программы для решения уравнения теплопроводности методом конечных разностей на регулярной сетке.
2. Разработать алгоритм разбиения расчетной сетки на области для параллельного счета между несколькими процессами.
3. Модифицировать программу, используя библиотеку MPI (Message Passing Interface) для обмена граничными условиями между процессами.
4. Провести расчет на разном количестве MPI-процессов (2, 4, 8).
5. Визуализировать полученное температурное поле и проанализировать производительность (ускорение, эффективность) параллельной реализации.

Лабораторная работа №5

Тема: «Сравнительный анализ производительности последовательных и параллельных алгоритмов при решении задач механики»

Цель: Закрепить навыки оценки эффективности параллельных вычислений на примере решения системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ), возникающей при методе конечных элементов (МКЭ).

Задачи:

1. Сгенерировать тестовую матрицу большого размера, характерную для задач МКЭ.
2. Решить СЛАУ с использованием последовательного алгоритма (например, метода Гаусса или метода Якоби).
3. Решить ту же СЛАУ с использованием параллельной библиотеки (например, решателя из пакета PETSc или параллельной версии метода Якоби).
4. Провести серию расчетов, варьируя размер задачи и количество задействованных процессов/ядер.
5. Построить графики зависимости времени решения от размера задачи и количества процессов. Рассчитать и проанализировать показатели ускорения и эффективности.

Лабораторная работа №6

Тема: «Интеграция HPC-расчетов в процесс цифрового прототипирования. Автоматизация рабочего процесса»

Цель: Научиться создавать автоматизированные рабочие цепочки для проведения виртуальных испытаний прототипов на кластере.

Задачи:

1. Разработать сценарий (shell-скрипт), который автоматически выполняет последовательность действий:

Генерирует входные данные для коммерческого или открытого пакета CAE (например, файл для ANSYS Mechanical или CalculiX) на основе параметрической модели.

Запускает расчетный солвер через систему Slurm.

Дождивается окончания расчета и извлекает из выходных файлов ключевые результаты (например, максимальное напряжение, деформацию).

2. Реализовать сценарий, который проводит параметрическое исследование, запуская серию расчетов с разными входными параметрами (например, с разной величиной нагрузки на деталь).

3. Собрать результаты всех запусков в единый отчет (например, в CSV-файл).

4. Построить график зависимости выходного параметра (напряжения) от входного (нагрузки) на основе полученных данных.

Критерии и шкала оценивания по оценочному средству – лабораторные работы

| Шкала оценивания (интервал баллов) | Критерий оценивания |
|---------------------------------------|---|
| 5 | Задание выполнено на высоком уровне (студент в полном объеме осветил рассматриваемую проблематику, привел аргументы в пользу своих суждений, владеет профильным понятийным (категориальным) аппаратом и т.п.) |
| 4 | Задание выполнено на среднем уровне (студент в целом осветил рассматриваемую проблематику, привел аргументы в пользу своих суждений, допустив некоторые неточности и т.п.) |

| | |
|---|---|
| 3 | Задание выполнено на низком уровне (студент допустил существенные неточности, изложил материал с ошибками, не владеет в достаточной степени профильным категориальным аппаратом и т.п.) |
| 2 | Задание выполнено на неудовлетворительном уровне или не представлен (студент не готов, не выполнил задание и т.п.) |

Тест

I. Выберите один правильный ответ

1. Основное архитектурное решение для современных суперкомпьютеров, используемых для инженерных расчетов, – это:

- а) Мейнфреймы
- б) Кластеры
- в) Векторные процессоры
- г) Одиночные серверы максимальной конфигурации

Правильный ответ: б) Кластеры

2. Закон, который ограничивает максимальное ускорение параллельной программы из-за доли последовательных вычислений, называется законом:

- а) Мура
- б) Амдала
- в) Густафсона
- г) Фитса

Правильный ответ: б) Амдала

3. Технология параллельного программирования, использующая директивы компилятора для распараллеливания на многоядерных системах с общей памятью, – это:

- а) MPI
- б) CUDA
- в) OpenMP
- г) POSIX Threads

Правильный ответ: в) OpenMP

4. Система управления заданиями, наиболее распространенная в современных HPC-кластерах, – это:

- а) Windows Task Scheduler
- б) Apache Hadoop
- в) Slurm
- г) Microsoft Excel

Правильный ответ: в) Slurm

5. При решении какой из перечисленных задач машиностроения применение HPC будет НАИМЕНЕЕ эффективным?

- а) Расчет прочности сложной сборки методом конечных элементов
- б) Оптимизация аэродинамической формы кузова автомобиля
- в) Ведение базы данных чертежей
- г) Моделирование литейных процессов

Правильный ответ: в) Ведение базы данных чертежей

II. Выберите несколько правильных ответов

6. Какие из перечисленных компонентов являются ОБЯЗАТЕЛЬНЫМИ для вычислительного кластера?

- а) Высокоскоростная сеть (Infiniband)
- б) Система хранения данных
- в) Планировщик заданий
- г) Графические станции для каждого узла

Правильный ответ: а, б, в

7. Какие из перечисленных технологий используются для распараллеливания вычислений на CPU?

- а) OpenMP
- б) MPI
- в) CUDA
- г) DirectX

Правильный ответ: а, б

8. Какие преимущества дает использование НРС-кластеров в технологиях прототипирования?

- а) Ускорение проведения виртуальных испытаний
- б) Возможность проводить параметрические исследования
- в) Полное исключение необходимости создания физических прототипов
- г) Снижение стоимости вычислительного оборудования

Правильный ответ: а, б

Критерии и шкала оценивания по оценочному средству – *тест*

| Шкала оценивания | Критерий оценивания |
|------------------|---|
| 5 | Тесты выполнены на высоком уровне (правильные ответы даны на 90-100% тестов) |
| 4 | Тесты выполнены на среднем уровне (правильные ответы даны на 75-89% тестов) |
| 3 | Тесты выполнены на низком уровне (правильные ответы даны на 50-74% тестов) |
| 2 | Тесты выполнены на неудовлетворительном уровне (правильные ответы даны менее чем на 50% тестов) |

Темы расчетных работ

1. Параллельный расчет прочностных характеристик решетчатой структуры (Lattice Structure) для 3D-печати

Задача: Разработать параллельную программу (с использованием MPI или OpenMP) для вычисления эффективного модуля Юнга и прочности элементарной ячейки решетчатой структуры в зависимости от ее геометрических параметров.

Акцент ВВС: Распараллеливание однотипных расчетов для множества вариантов ячеек, анализ ускорения.

2. Оптимизация размещения деталей на платформе станка для групповой 3D-печати с использованием параллельных вычислений

Задача: Реализовать параллельную версию алгоритма Nesting (упаковки) для оптимального размещения нескольких деталей в рабочей камере принтера, минимизируя общее время печати и поддерживая технологические зазоры.

Акцент BBC: Распараллеливание переборных алгоритмов или использование параллельных вычислений для оценки множества вариантов компоновки.

3. Моделирование тепловых полей в процессе селективного лазерного сплавления (SLM) на многопроцессорной системе

Задача: Создать упрощенную параллельную модель распространения тепла при сканировании лазером по порошковому слою. Визуализировать результат для анализа термических напряжений.

Акцент BBC: Решение многомерной задачи теплопроводности методом конечных разностей на распределенной сетке (декомпозиция области).

4. Параллельная генерация и оптимизация структур заполнения (Infill) для FDM 3D-печати

Задача: Разработать программу, которая параллельно генерирует различные типы заполнения (соты, линии, гироиды) для сложной детали и оценивает их жесткость/массу, выбирая оптимальный вариант.

Акцент BBC: Обработка разных сечений или сегментов детали на разных ядрах процессора.

5. Анализ и предсказание деформаций при 3D-печати методом конечных элементов с использованием GPU

Задача: Реализовать на CUDA или OpenCL ключевые вычислительные ядра (kernel) для решения системы линейных уравнений метода конечных элементов (МКЭ), возникающей при расчете усадки и деформаций детали после печати.

Акцент BBC: Использование архитектуры GPU для ускорения самых ресурсоемких операций МКЭ.

6. Параллельная обработка данных с датчиков в реальном времени для мониторинга процесса прототипирования

Задача: Создать программу, имитирующую параллельный сбор и обработку данных с нескольких датчиков (температура, вибрация, видеопоток) для выявления аномалий в процессе 3D-печати.

Акцент BBC: Многопоточность (std::thread, OpenMP) для одновременной обработки потоков данных, организация межпоточного взаимодействия.

7. Высокопроизводительное преобразование и подготовка больших облаков точек (Point Cloud) для обратного инжиниринга

Задача: Разработать параллельный алгоритм для фильтрации, сглаживания и упрощения большого облака точек, полученного при 3D-сканировании физического прототипа.

Акцент BBC: Распараллеливание операций над независимыми точками или кластерами точек с использованием OpenMP.

8. Сравнительный анализ эффективности параллельных реализаций алгоритмов топологической оптимизации

Задача: Реализовать базовый алгоритм топологической оптимизации (например, метод SIMP) с использованием различных технологий параллелизма (MPI, OpenMP) и провести сравнительный анализ времени выполнения и масштабируемости на многоядерном процессоре.

Акцент BBC: Прямое сравнение технологий параллельного программирования на примере конкретной инженерной задачи.

9. Параллельное моделирование поддержек (Support Structures) для SLA/DLP 3D-печати

Задача: Создать программу, которая для сложной геометрии детали параллельно рассчитывает контактные точки и генерирует структуры поддержек, минимизируя их объем и обеспечивая устойчивость.

Акцент BBC: Декомпозиция поверхности детали на регионы для их независимой параллельной обработки.

10. Кластерный расчет траекторий движения роботизированного манипулятора для гибридного прототипирования

Задача: Разработать параллельное приложение (с использованием MPI) для одновременного расчета и верификации множества вариантов траекторий движения робота, совмещающего, например, аддитивное производство и механическую обработку.

Акцент BBC: Организация работы кластера, где каждый узел рассчитывает свой сценарий, с последующей консолидацией результатов.

Критерии и шкала оценивания по оценочному средству –
расчетные работы

| Шкала оценивания (интервал баллов) | Критерий оценивания |
|---------------------------------------|---|
| 5 | Задание выполнено на высоком уровне (студент в полном объеме осветил рассматриваемую проблематику, привел аргументы в пользу своих суждений, владеет профильным понятийным (категориальным) аппаратом и т.п.) |
| 4 | Задание выполнено на среднем уровне (студент в целом осветил рассматриваемую проблематику, привел аргументы в пользу своих суждений, допустив некоторые неточности и т.п.) |
| 3 | Задание выполнено на низком уровне (студент допустил существенные неточности, изложил материал с ошибками, не владеет в достаточной степени профильным категориальным аппаратом и т.п.) |
| 2 | Задание выполнено на неудовлетворительном уровне или не представлен (студент не готов, не выполнил задание и т.п.) |

Оценочные средства к итоговому контролю (экзамен)

1. Дайте определение высокопроизводительных вычислений (HPC). Объясните, какие задачи в цикле прототипирования машиностроительных объектов (от проектирования до виртуальных испытаний) требуют применения HPC.
2. Раскройте понятие «вычислительный кластер». Опишите его базовую архитектуру, перечислив и охарактеризовав ключевые аппаратные и программные компоненты.
3. Сформулируйте закон Амдала. Проиллюстрируйте на практическом примере из области CAE-расчетов (например, прочностной анализ), как этот закон ограничивает эффективность распараллеливания.
4. Опишите основные модели параллельных вычислений: с общей памятью (shared memory) и с распределенной памятью (distributed memory). Сравните их, указав преимущества, недостатки и типичные области применения в инженерных расчетах.
5. Охарактеризуйте технологию OpenMP. Объясните ее архитектурную модель, основные директивы и круг задач в прототипировании, для которых она наиболее подходит.
6. Охарактеризуйте технологию MPI (Message Passing Interface). В чем ее принципиальное отличие от OpenMP? Объясните, почему MPI является основой для распределенных вычислений в кластерах.
7. Что такое гибридная модель программирования (MPI + OpenMP)? Опишите ее потенциальные преимущества для расчета крупной сборки методом конечных элементов.
8. Раскройте роль планировщика заданий (на примере Slurm) в HPC-кластере. Опишите типовой сценарий его использования для запуска инженерного расчета (от написания скрипта до получения результатов).
9. Опишите полный жизненный цикл выполнения вычислительного задания на HPC-кластере на примере задачи моделирования термических напряжений в литой детали. Включите этапы: подготовка модели, написание скрипта управления, запуск, мониторинг и анализ результатов.
10. Объясните, как принципы HPC реализованы в современных инженерных пакетах (CAE), таких как ANSYS, LS-DYNA или OpenFOAM. Почему большинство современных солверов поддерживают параллельные вычисления?
11. Проанализируйте, как использование HPC-технологий влияет на процесс оптимизации и параметрических исследований в машиностроении. Приведите пример.
12. Что такое контейнеризация (Docker/Singularity) и какова ее роль в HPC? Объясните, как она помогает управлять программными зависимостями и обеспечивать воспроизводимость расчетов в рамках проекта по прототипированию.
13. Дайте определения ключевых метрик производительности параллельных программ: «ускорение» (Speedup) и «эффективность» (Efficiency). Какие факторы мешают достичь идеального (линейного) ускорения?

14. Опишите типы файловых систем, используемых в НРС (NFS, Lustre). Почему для задач, связанных с обработкой больших данных результатов 3D-моделирования, критически важны параллельные файловые системы?

15. Опишите современные тенденции в развитии НРС (гетерогенные архитектуры, энергоэффективность, конвергентные системы с ИИ) и их потенциальное влияние на технологии цифрового прототипирования.

Критерии и шкала оценивания по оценочному средству итоговый контроль
(экзамен)

| Шкала оценивания | Характеристика знания предмета и ответов |
|-------------------------|---|
| отлично (5) | Студент глубоко и в полном объеме владеет программным материалом. Грамотно, исчерпывающе и логично его излагает в устной или письменной форме. При этом знает рекомендованную литературу, проявляет творческий подход в ответах на вопросы и правильно обосновывает принятые решения, хорошо владеет умениями и навыками при выполнении практических задач. |
| хорошо (4) | Студент знает программный материал, грамотно и по сути излагает его в устной или письменной форме, допуская незначительные неточности в утверждениях, трактовках, определениях и категориях или незначительное количество ошибок. При этом владеет необходимыми умениями и навыками при выполнении практических задач. |
| удовлетворительно (3) | Студент знает только основной программный материал, допускает неточности, недостаточно четкие формулировки, непоследовательность в ответах, излагаемых в устной или письменной форме. При этом недостаточно владеет умениями и навыками при выполнении практических задач. Допускает до 30% ошибок в излагаемых ответах. |
| неудовлетворительно (2) | Студент не знает значительной части программного материала. При этом допускает принципиальные ошибки в доказательствах, в трактовке понятий и категорий, проявляет низкую культуру знаний, не владеет основными умениями и навыками при выполнении практических задач. Студент отказывается от ответов на дополнительные вопросы. |

Лист изменений и дополнений

| № п/п | Виды дополнений и изменений | Дата и номер протокола заседания кафедры (кафедр), на котором были рассмотрены и одобрены изменения и дополнения | Подпись (с расшифровкой) заведующего кафедрой (заведующих кафедрами) |
|----------|--------------------------------|--|---|
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |