



- ENERGY SAVING OF PARALLEL COMPUTER ARCHITECTURES AND CLASSICAL PARALLEL PROGRAMMING TECHNOLOGIES

- ENERGY SAVING BASED ON OPTIMIZATION OF ALGORITHMS, HARDWARE ENERGY CONSUMPTION AND UNIFORM PROCESSOR LOAD

- THE USE OF NETWORK TECHNOLOGY FOR THE ORGANIZATION OF CLOUD STRUCTURES CONSIDERING ENERGY EFFICIENCY

- CLOUD INFRASTRUCTURE AND ENERGY EFFICIENCY



University of Ioannina



МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ



## ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫЕ КЛАСТЕРНЫЕ И ОБЛАЧНЫЕ ВЫЧИСЛЕНИЯ И ТЕХНОЛОГИИ

Практикум

## ENERGY-EFFICIENT CLUSTER AND CLOUD COMPUTING AND TECHNOLOGY



2016



**Министерство образования и науки Украины  
Национальный аэрокосмический университет  
им. Н.Е. Жуковского «ХАИ»**

**Д.К. Андрейченко, И.А. Батраева, Г.Г. Наркайтис,  
А.А. Ерофтиев, М.С. Портенко,  
Д.А. Шахрай, Д.В. Мельничук, Г.М. Афанасьев**

## **Энергоэффективные кластерные и облачные вычисления и технологии**

### **Energy-efficient cluster and cloud computing and technology**

#### **Практикум**

**Под редакцией А.Г. Федоровой и В.С. Харченко**

**Проект  
*GREENCO-530270-Tempus-1-2012-1- UK-Tempus-JPCR***

УДК 004.492:519.6(076.5)  
ББК 32.973.26-018.2:22.19Я73  
Э65

Викладено матеріали практичної частини курсу PhD5 «Енергоефективні кластерні та хмарні обчислення і технології», підготовленого для докторантів (аспірантів за проектом GREENCO-530270-Tempus-1-2012-1-UK-Tempus-JPCR. Його предметною областю є оптимізація алгоритмів математичного моделювання для паралельних обчислювальних систем і хмарних інфраструктур з урахуванням критерію енергоспоживання.

Розглянуто задачі, пов'язані з кінцево-елементним моделюванням у математичній фізиці, з аналізом і синтезом керованих комбінованих динамічних систем. Надано приклади оптимізації алгоритмів комп'ютерного моделювання на паралельних обчислювальних системах, а також проаналізовано методи динамічного балансування обчислювального навантаження на кластерних системах з розподіленою пам'яттю. Розглянуто технології побудови хмар на різних платформах, запропоновано методи оцінювання енергоспоживання хмарних сховищ. Надано навчальну програму курсу, опис лабораторних робіт, методичні рекомендації для самостійного вивчення матеріалів курсу.

Для докторантів і магістрантів, що навчаються за напрямками, пов'язаними з комп'ютерними науками та інформаційними технологіями, комп'ютерною і програмною інженерією, математичним забезпеченням та адмініструванням обчислювальних систем, методами і засобами розроблення складного програмного забезпечення. Може бути корисно для викладачів відповідних курсів.

**Рецензенти:** В.В. Мохор, доктор технических наук, профессор, директор Института проблем моделирования в энергетике НАН Украины  
В.М. Панкратов, доктор технических наук, профессор, заместитель директора Института проблем точной механики и управления РАН

**Енергоэффективные кластерные и облачные вычисления и технологии. Практикум.** / Андрейченко Д.К., Батраева И.А., Наркайтис Г.Г., Ерофтиев А.А., Портенко М.С., Шахрай Д.А., Мельничук Д.В., Афанасьев Г.М. - Под ред. А.Г. Федоровой и В.С. Харченко. – Харьков: Национальный аэрокосмический университет имени Н.Е. Жуковского «ХАИ». - 2016. - 199 с.

ISBN 978-966-662-706-6

Изложены материалы практической части курса PhD5 «Енергоэффективные кластерные и облачные вычисления и технологии», подготовленного для докторантов (аспирантов) по проекту GREENCO-530270-Tempus-1-2012-1-UK-Tempus-JPCR. Его предметной областью является оптимизация алгоритмов математического моделирования для параллельных вычислительных систем и облачных инфраструктур с учетом критерия энергопотребления.

Рассмотрены задачи, связанные с конечно-элементным моделированием в математической физике, анализом и синтезом управляемых комбинированных динамических систем. Даны примеры оптимизации алгоритмов компьютерного моделирования на параллельных вычислительных системах, а также проанализированы методы динамической балансировки вычислительной нагрузки на кластерных системах с распределенной памятью. Описаны технологии построения облаков на различных платформах, предложены методы оценивания и снижения энергопотребления облачных хранилищ.

Приводится учебная программа курса, дается описание лабораторных работ, методические рекомендации для самостоятельного изучения материалов курса.

Для аспирантов университетов, обучающихся по направлениям, связанным с компьютерными науками и информационными технологиями, компьютерной и программной инженерией, математическим обеспечением и администрированием вычислительных систем, методами и средствами разработки сложного программного обеспечения. Может быть полезно для преподавателей соответствующих курсов.

Илл. 27. Табл. 20. Библиогр.: 79 назв.

Рекомендовано к изданию ученым советом Национального аэрокосмического университета имени Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт» (протокол № 1 от 16 сентября 2015 г.).

УДК 004.492:519.6(076.5)

ISBN 978-966-662-706-6

© Андрейченко Д.К., Батраева И.А., Наркайтис Г.Г., Ерофтиев А.А., Портенко М.С., Шахрай Д.А., Мельничук Д.В., Афанасьев Г.М.



## СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

SMP – симметричные мультипроцессорные системы  
MPI – Message Passing Interface (интерфейс передачи сообщений)  
OpenMP – Open Multi-Processing (открытый стандарт распараллеливания)  
IMKL – Intel Math Kernel Library (базовая библиотека математических прикладных программ Intel)  
BLAS – Basic Linear Algebra Subprograms (базовые подпрограммы линейной алгебры)  
LAPACK – Linear Algebra Package (библиотека с методами для решения задач линейной алгебры)  
МКЭ – метод конечных элементов  
КДС – Комбинированная динамическая система  
ФДН – Формулы «дифференцирования назад»  
ПИД – Пропорционально-интегрирующе-дифференцирующий регулятор  
ВКБ – метод Вентцеля-Крамерса-Бриллюэна

ВМ – виртуальная машина  
ОС – операционная система  
ЦОД – центр обработки данных  
ПО – программное обеспечение

## ВВЕДЕНИЕ

Постоянное увеличение парка компьютерной техники и возрастание доли парниковых газов в атмосфере, вызванных её эксплуатацией, делает весьма актуальной задачу сокращения энергозатрат. Такое сокращение может достигаться различными способами.

1. *Разработка оборудования со сниженным энергопотреблением.* Так, например, одним из способов построения центров обработки данных, которые потребляют в среднем до 537-860 Вт/кв. м площади стало использование в серверных платформах серверов с повышенным энергосбережением, которые начали выпускаться производителями с 2011 года. По данным компании IBM [1], до 36% затрат на ЦОД составляют расходы на энергообеспечение; компания «Ситроникс» [2] сообщает о 50-процентной доле электроэнергии в общей сумме операционных расходов ЦОД. Следовательно, при постоянном росте тарифов на электроэнергию компании заинтересованы в энергоэкономичных серверах, составляющих основу ЦОД. Начиная с 2013 года, компании-производители серверов могут сертифицировать свои изделия по программе Energy Star. По информации Environmental Protection Agency (EPA) [3], серверы с рейтингом Energy Star более чем на 30% эффективнее «обычных» серверов. По результатам тестирования, проведенного компаниями EPA, HP и Microsoft, некоторые модели позволяют на 54% сократить расходы электроэнергии без снижения производительности. Еще одно направление — повышение энергоэффективности модулей памяти DIMM. Снизить энергопотребление можно также заменой традиционных встроенных жестких дисков серверов на твердотельные накопители (SSD) по мере снижения стоимости последних.

В выступлениях сотрудников компании Intel отмечалось, что за пять лет с 2006 по 2011 производительность серверов выросла в 18 раз, при этом расходы на электроэнергию снизились на 93%. Это достигается за счет изменения характеристик т.н. термопакетов процессоров, и возможности менять тактовую частоту ядер процессора.

2. *Построение оптимальных с точки зрения энергосбережения конфигураций оборудования для вычислительных систем, дата-центров и т.п.* Например, немаловажным источником энергосбережения оказываются расходы на охлаждение ЦОД. В старых ЦОД использовались холодильники, сейчас предлагается использовать системы с охлажденной водой, или, если это позволяют природные условия, пользоваться внешним холодным воздухом. Например, в настоящее время, многие международные компании, такие как Google,

Google, Yahoo, Facebook, Microsoft, стали размещать свои дата-центры в Исландии, так как её умеренный климат и наличие геотермальных источников позволяет в несколько раз снизить затраты на энергообеспечение [4, 5].

Также энергоэффективность можно регулировать с помощью подбора нужной для данного предприятия архитектуры ЦОД, учитывая задачи и объемы данных, которые будут храниться в нем.

С точки зрения качественной оценки энергопотребления в настоящее время разработаны различные метрики, позволяющие оценить энергоэффективность ЦОДов. Основными разработчиками в этой области являются компании Uptime Institute, Green Grid, Server Technology. Компанией Green Grid [6] предлагаются метрики эффективности использования энергии (Power Usage Effectiveness, PUE) и эффективности инфраструктуры ЦОД (Data Center Infrastructure Efficiency, DCIE):

Эффективность использования энергии = общая мощность оборудования/мощность ИТ-оборудования

В общую мощность оборудования входит не только мощность ИТ-оборудования (серверов, дисковых хранилищ, мониторов и т.п.), но и то, что потребляется источниками бесперебойного питания, системами охлаждения и вентиляции, освещения и т.д.

Эффективность инфраструктуры (DCIE) – величина, обратная к PUE

$$DCIE = 1/PUE = \text{Мощность ИТ-оборудования} / \text{Общая мощность оборудования} \times 100\%$$

Эти метрики позволяют оценить, насколько эффективно построено обслуживание ЦОД с точки зрения энергопотребления, принято считать, что PUE должно быть меньше двух, а в лучшем случае равно единице.

Другим известным разработчиком метрик является компания UPTIME INSTITUTE [7]. Основой предложенных метрик являются так называемые множители:

- непроизводительного потребления инфраструктуры площадки (Site Infrastructure Power Overhead Multiplier, SI-POM) = потребление ЦОД на общем счетчике/общее потребление переменного тока в месте подключения для всего ИТ-оборудования;

- непроизводительного потребления ИТ-оборудования (IT Hardware Power Overhead Multiplier, H-POM) = нагрузка оборудования переменного тока в месте подключения/вычислительная нагрузка оборудования постоянного тока.

Компания Server Technology предлагает оборудование, разработанное по технологии POPS, которая позволяет измерять основные метрики для ЦОД любых масштабов.

*3. Разработка программного обеспечения, позволяющего с большей эффективностью решать вычислительные задачи любого типа.*

Когда речь заходит о разработке и эксплуатации программного обеспечения, говорить об оценке снижения энергопотребления становится гораздо сложнее. Разработанная компанией Green Grid [6] и принятая в 2014 году к использованию метрика, которая называется мера энергопродуктивности ЦОД (Data Center energy Productivity, DceP) и определяется как

$$\text{DceP} = \text{полезная работа} / \text{общее энергопотребление ЦОД},$$

до настоящего времени вызывает споры. Это объясняется тем, что полезность работы может определяться каждой компанией по-своему (например, количество продаж, объем вычислений и т.д.) [8]. Поэтому с точки зрения экономии энергии при эксплуатации ПО можно предложить оценивать скорость работы ПО при решении поставленных задач, исходя из того, что при оптимизации алгоритмов вычислений и обработки данных снижается средняя энергозатрата на одну задачу. Это и можно рассматривать как повышение энергоэффективности работы.

*4. Разработка конфигураций систем на базе существующего программного обеспечения, которые дают возможность организовывать обработку данных с наименьшими затратами энергии.* Существует достаточно большая номенклатура ПО, которое может быть установлено в различных конфигурациях на базе различных программно-аппартных платформ, и соответственно, требовать разного количества энергии. К сожалению, нельзя напрямую связывать требования к энергоэффективности и архитектуру системы. Это связано с тем, что:

1) как было отмечено выше, не существует общепринятых метрик для измерения энергоэффективности конфигураций программного обеспечения, которые позволили бы связать количество потраченной энергии и успешность решения поставленной задачи;

2) так как любая информационная система (вычислительный узел, ЦОД, хранилище данных) по своему основному назначению – сервис, предназначенный для выполнения требований пользователя по безопасности данных, эффективности и скорости обслуживания, то компании-поставщики сервиса будут удовлетворять бизнес-требования заказчика по конфигурированию программного обеспечения, даже, если это приведет к лишним энергозатратам с точки зрения конфигурации ПО.

Поэтому можно говорить о выборе экономных конфигураций только

в контексте выбора оптимальной по энергосбережению, при выполнении бизнес-требований пользователя. Далее рассматриваются третий и четвертый способы снижения энергозатрат с точки зрения их применения к параллельным вычислениям и облачным технологиям.

В данном пособии изложены материалы практической части курса для докторантов (аспирантов) PhD5 «Энергоэффективные кластерные и облачные вычисления и технологии», подготовленного для аспирантов по проекту GREENCO-530270-Tempus-1-2012-1-UK-Tempus-JPCR.

В первом разделе рассматриваются аспекты оптимизации ПО для параллельных высокопроизводительных вычислительных систем, в том числе по энергопотреблению. Приведены лабораторные работы (1-4) по методам классических технологий параллельного программирования. Во втором разделе рассматриваются задачи оптимизации ПО, используемого для моделирования на кластерных системах с распределенной памятью, узлы которых укомплектованы энергоэффективными сопроцессорами-ускорителями. Работы (5-8) предусматривают выполнение индивидуальных исследовательских заданий.

В третьем разделе приведены лабораторные работы, позволяющие приобрести навыки развертывания основных компонент облаков, облачных платформ (работы 9-12), в четвертом – работы, посвященные измерению энергопотребления в облаках различных конфигураций (13-17), что позволяет определить условия конфигурирования с наименьшим энергопотреблением с учетом бизнес-требований пользователя.

В каждой работе описываются цели и задачи, необходимый теоретический материал, требования к отчету, приводятся типовые задания для ее выполнения. Пособие подготовили сотрудники Саратовского национального исследовательского государственного университета имени Н.Г. Чернышевского: заведующий кафедрой математического обеспечения вычислительных комплексов и информационных систем докт. физ.-мат. наук, доцент Андрейченко Д.К., заведующий кафедрой технологий программирования канд. физ.-мат. наук Батраева И.А., доцент этой кафедры канд. физ.-мат. наук Наркайтис Г.Г., старший преподаватель кафедры информатики и программирования Портенко М.С., аспирант Ерофтиев А.А., студенты Шахрай Д.А., Мельничук Д.В., Афанасьев Г.М. Редактирование выполнено зав. кафедрой информатики и программирования, деканом факультета компьютерных наук и информационных технологий этого университета канд. физ.-мат. наук, доцентом А.Г. Федоровой и заведующим кафедрой компьютерных систем и сетей докт. техн. наук, профессором В.С. Харченко (Национальный аэрокосмический университет имени Н.Е. Жуковского «ХАИ»).



## ABSTRACT

UDC 004.94; 519.6

Energy-efficient cluster and cloud computing and technologies. Practicum / Andreichenko D.K., Batraeva I.A., Narkaytis H.H., Eroftiev A.A., Portenko M.S., Shahrar D.A., Melnichuk D.V., Afanasiev G.M. – Edited by Fedorova A.G. and Kharchenko V.S. – Kharkiv: National Aerospace University named after N. E. Zhukovsky “KhAI”. – 2016. – 199 p.

ISBN 978-966-662-706-6

The manual sets out the practical part of the course materials "Energy-efficient cluster and cloud computing and technology", prepared for the PhD and MSc-students of the project GREENCO-530270-Tempus-1-2012-1-UK-Tempus-JPCR.

Specialities of this manual are the issues of mathematical modeling optimization algorithms for parallel computing systems and building cloud infrastructures with the optimal power.

The problems associated with finite element modeling in mathematical physics, analysis and synthesis of controlled hybrid dynamic systems are discussed. Examples of optimization algorithms for computer simulation on parallel computer systems for the considered classes of problems, as well as the computational load dynamic balancing methods in the cluster distributed memory systems are described.

For problems related to the use of cloud computing, the technology of building a cloud on a variety of platforms are considered, methods of estimating energy built cloud storage are proposed.

The training course program, a description of laboratory work, guidelines for self-study course materials are given.

The manual is intended for graduate students of universities, studying in the areas related to computer science and information technology, such as computer and software engineering, software and administration of computer systems, methods and tools for the development of complex software, and can also be useful for lecturers of relevant courses.

Ref. – 79 items, figures – 27, tables – 20.

## CONTENT

ABBREVIATION .....	3
INTRODUCTION .....	4
1. ENERGY SAVINGS ON PARALLEL COMPUTER ARCHITECTURES AND CLASSICAL PARALLEL PROGRAMMING TECHNOLOGIES .....	8
1.1. Lab 1. The development of green software based on OpenMP parallel programming technology .....	8
1.2. ....Lab 2. Research of efficiency of parallel computing based on OpenMP in the development of green software .....	16
1.3. Lab 3. Green software development based on MPI parallel programming technology .....	22
1.4. Lab 4. Research of efficiency of parallel computing with MPI in the development of green software .....	26
2. ENERGY SAVINGS BASED ON OPTIMIZATION OF ALGORITHMS, UNIFORM PROCESSOR LOAD AND OPTIMIZE THE ENERGY CONSUMPTION OF HARDWARE.....	31
2.1. . Lab 5. Optimization of finite element solver to reduce the energy consumption for a cluster system .....	31
2.2. Lab 6. The implementation of MPI-MAP pattern for dynamic balancing of computational load on the cluster system .....	54
2.3. Lab 7. Research of efficiency of dynamic balancing the processing load on the cluster system.....	76
2.4. Lab 8. Parallelism of energy-efficient Intel Xeon Phi coprocessors-accelerators .....	112
3. THE USE OF NETWORK TECHNOLOGY FOR THE ORGANIZATION OF CLOUD STRUCTURES, TAKING INTO ACCOUNT ENERGY EFFICIENCY .....	124
3.1. Lab 9. Deploying Virtual Machine.....	124
3.2. Lab 10. Implementing RESTful web-services. ....	129
3.3. Lab 11. Configuring the network topology. ....	133
3.4. Lab 12. Deploying OpenStack preconfigured with Devstack ...	136
4. CLOUD INFRASTRUCTURE AND ENERGY EFFICIENCY .....	140
4.1. Lab 13. Research Hadoop platform power consumption based on OpenStack using different types of plug-ins .....	140
4.2. Lab 14. The study of energy consumption Nginx server based on OpenStack and Bare Metal .....	150

4.3. Lab 15. The study of energy consumption OpenStack storage .	155
4.4. Lab 16. Checking the network isolation of virtual machines and groups the security setting to the measurement of energy consumption ..	160
REFERENCES .....	163
APPENDIX A. COURSE PROGRAM .....	177
APPENDIX B. TUTORIAL RECOMMENDATIONS.....	189

## АНОТАЦІЯ

Енергоефективні кластерні та хмарні обчислення і технології. Практикум / Андрейченко Д.К., Батраєва І.О., Наркайтис Г.Г., Єрофтієв А.О., Портенко М.С., Шахрай Д.О., Мельничук Д.В., Афанасьєв Г.М. – За ред. А.Г. Федорової і В.С. Харченка. – Харків: Національний аерокосмічний університет імені Н.Е. Жуковського «ХАІ». - 2016. - 199 с. ISBN 978-966-662-706-6

Викладено матеріали практичної частини курсу «Енергоефективні кластерні та хмарні обчислення і технології», підготовленого для докторантів і магістрантів за проектом GREENCO-530270-Tempus-1-2012-1-UK-Tempus-JPCR. Його предметною областю є оптимізація алгоритмів математичного моделювання для паралельних обчислювальних систем і хмарних інфраструктур з урахуванням критерію енергоспоживання.

Розглянуто задачі, пов'язані з кінцево-елементним моделюванням у математичній фізиці, з аналізом і синтезом керованих комбінованих динамічних систем. Надано приклади оптимізації алгоритмів комп'ютерного моделювання на паралельних обчислювальних системах, а також проаналізовано методи динамічного балансування обчислювального навантаження на кластерних системах з розподіленою пам'яттю. Розглянуто технології побудови хмар на різних платформах, запропоновано методи оцінювання енергоспоживання хмарних сховищ. Надано навчальну програму курсу, опис лабораторних робіт, методичні рекомендації для самостійного вивчення матеріалів курсу.

Для докторантів і магістрантів, що навчаються за напрямом, пов'язаним з комп'ютерними науками та інформаційними технологіями, комп'ютерною і програмною інженерією, математичним забезпеченням та адмініструванням обчислювальних систем, методами і засобами розроблення складного програмного забезпечення. Може бути корисно для викладачів відповідних курсів.

Бібл. – 79 найменувань, рисунків – 27, таблиць – 20.

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ .....	3
ВСТУП .....	4
1. ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ НА ПАРАЛЕЛЬНИХ ОБЧИСЛЮВАЛЬНИХ АРХІТЕКТУРАХ І КЛАСИЧНІ ТЕХНОЛОГІЇ ПАРАЛЕЛЬНОГО ПРОГРАМУВАННЯ .....	8
1.1. Лабораторна робота № 1. Розроблення зеленого програмного забезпечення на основі технології паралельного програмування OpenMP 8	
1.2. Лабораторна робота № 2. Дослідження ефективності розпаралелювання обчислень на основі OpenMP при розробленні зеленого програмного забезпечення .....	16
1.3. Лабораторна робота № 3. Розроблення зеленого програмного забезпечення на основі технології паралельного програмування MPI ....	22
1.4. Лабораторна робота № 4. Дослідження ефективності розпаралелювання обчислень на основі MPI при розробленні зеленого програмного забезпечення .....	26
2. ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ НА ОСНОВІ ОПТИМІЗАЦІЇ АЛГОРИТМІВ, РІВНОМІРНОЇ ЗАГРУЗКИ ПРОЦЕСОРІВ І ОПТИМІЗОВАНОГО ЗА ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯМ АПАРАТНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ.....	31
2.1. Лабораторна робота № 5. Оптимізація кінцево-елементного вирішувача для скорочення енерговитрат на кластерній системі .....	31
2.2. Лабораторна робота № 6. Реалізація патерна MPI-MAP для динамічного балансування обчислювального навантаження на кластерній системі .....	54
2.3. Лабораторна робота № 7. Дослідження ефективності динамічного балансування обчислювального навантаження на кластерній системі....	76
2.4. Лабораторна робота № 8. Розпаралелювання обчислень на енергоефективних сопроцесорах-прискорювачах Intel Xeon Phi.....	112
3. ВИКОРИСТАННЯ МЕРЕЖНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ДЛЯ ОРГАНІЗАЦІЇ ХМАРНИХ СТРУКТУР З УРАХУВАННЯМ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ .....	124
3.1. Лабораторна робота № 9. Розгортання віртуальної машини. ....	124

3.2. Лабораторна робота № 10. Реалізація RESTful web-сервісів .....	129
3.3. Лабораторна робота № 11. Конфігурування мережної топології .....	133
3.4. Лабораторна робота № 12. Розгортання OpenStack із заданою конфігурацією з використанням Devstack .....	136
4. ХМАРНІ ІНФРАСТРУКТУРИ Й ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ .....	140
4.1. Лабораторна робота № 13. Дослідження енергоспоживання платформи Nadoor на базі OpenStack з використанням різних типів плагінів .....	140
4.2. Лабораторна робота №14. Дослідження енергоспоживання сервера Nginx на базі OpenStack і на Bare Metal.....	150
4.3. Лабораторна робота №15. Дослідження енергоспоживання сховищ OpenStack.....	155
4.4. Лабораторна робота №16. Перевірка мережної ізоляваності віртуальних машин і налаштування безпеки груп з вимірюванням енергоспоживання .....	160
ЛІТЕРАТУРА .....	163
ABSTRACT AND CONTENT.....	171
АНОТАЦІЯ ТА ЗМІСТ .....	174
ДОДАТОК А. НАВЧАЛЬНА ПРОГРАМА .....	177
ДОДАТОК Б. МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ ДО САМОСТІЙНОЇ РОБОТИ .....	189



## ПРИЛОЖЕНИЕ А. УЧЕБНАЯ ПРОГРАММА

### DESCRIPTION OF THE MODULE

TITLE OF THE MODULE	Code
Energy-efficient cluster and cloud computing and technology	

Teacher(s)	Department
<b>Coordinating:</b> Dr. Andreichenko Dmitry, Dr. Batraeva Inna, Dr. Narkaytis Herman <b>Others:</b>	Departement of Mathematical Support of Computer and Information Systems

Study cycle	Level of the module	Type of the module
PhD	A	Full-time tuition

Form of delivery	Duration	Langage(s)
Full-time tuition	One semester	Russian

Prerequisites	
<b>Prerequisites:</b> Informatics and Programming; Discrete Mathematics; The architecture of computer systems and computer networks; Operating systems and shells; Theoretical bases of parallel programming	<b>Co-requisites (if necessary):</b>

Credits of the module	Total student workload	Contact hours	Individual work hours
8	288	144	144

Aim of the module (course unit): competences foreseen by the study programme		
Knowledge of techniques to reduce power consumption and energy saving technologies applied to the problems: the construction of parallel computing systems, the use of parallel programming techniques and methods of optimization algorithms, mathematical and computer modeling for high-performance parallel computing systems. Energy savings using cloud technologies: knowledge of the principles, concepts and methods of cloud computing, introduction to cloud computing infrastructure, the study of security issues, scalability, deployment, backup in the context of cloud infrastructure, development of system administration skills for the development and maintenance of applications deployed in the cloud taking into account of energy saving technologies.		
Learning outcomes of module (course unit)	Teaching/learning methods	Assessment methods

At the end of course, the successful student will be able to: 1. To carry out the analysis of parallel computing systems with a view to optimizing energy consumption during their operation. For the purpose of energy conservation on symmetric multiprocessor systems with shared memory, develop parallel programs with OpenMP. For the purpose of energy conservation in the cluster distributed memory systems, to develop parallel programs based on MPI technology	Lectures Practicals and labs	Module Evaluation Questionnaire
2. Perform optimization algorithms for numerical analysis in order to optimize energy consumption for modern parallel High Performance Computing Systems. Perform dynamic load balancing of computing on cluster systems to optimize energy consumption during their operation. Apply algorithms providing dynamic load balancing of computing on cluster systems in the implementation of mathematical and computer modeling in the chosen subject area. Apply hardware, optimized for energy savings on cluster systems (Intel Xeon Phi), and develop parallel programs for him	Lectures Practicals and labs	Module Evaluation Questionnaire
3. Use network technology for the organization of cloud structures, taking into account energy efficiency	Lectures Practicals and labs	Module Evaluation Questionnaire
4. Cloud infrastructure and energy efficiency	Lectures Practicals and labs	Module Evaluation Questionnaire

Themes	Contact work hours							Time and tasks for individual work	
	Lectures	Consultations	Seminars	Practical work	Laboratory work	Placements	Total contact work	Individual work	Tasks
<b>Energy saving on parallel computer architectures and classical technologies of parallel programming</b>									
1. Energy-oriented analysis of parallel computing systems.	2						2	4	The implementation of the basic principles of «Green Computing» of leading manufacturers of modern parallel computing systems
2. An analogue of the energy metric for parallel programs	2						2	4	Energy metrics for computer hardware
3. OpenMP and energy saving on SMP	2				4		6	4	3.7. Investigation of possibilities of OpenMP technology in solving typical problems of mathematical physics
4. MPI and energy-saving on cluster systems with distributed memory	2				4		6	4	4.15. Features of MPI implementation technology from the major manufacturers

<b>Energy savings based on optimization of algorithms, uniform processor load and optimize the energy consumption of hardware</b>									
1. An example of a typical mathematical model and optimization of numerical analysis methods	2				2		4	4	Introduction to the boundary element method and its potential parallelization.
2. The parallelization of the test tasks on the spectrum of eigenvalues for vector Helmholtz equations in the complex spatial domain	2				2		4	4	
3. Optimization of numerical analysis algorithms in a clustered version of the finite element solver to reduce the energy costs of a cluster system	2				2		4	4	
4. Pattern MPI-MAP and reduced energy consumption based on dynamic balancing the processing load on the cluster systems	2				2		4	4	A parallel algorithm for parametric synthesis of the family of controlled HDS. Application pattern MPI-MAP to the simulation output vector functions of the hybrid dynamical systems with retarded links.
5. Dynamic model of controlled hybrid dynamical systems (HDS)	2				2		4	4	
6. Stability and parametric synthesis of controlled HDS	2				2		4	4	
7. MPI-MAP and parallelization of parametric synthesis	2				2		4	4	
8. MPI-MAP and parallelization of the simulation model the effect of non-linearities in the output vector function HDS	2				2		4	4	
9. An example of a mathematical model of the nonlinear system of mobile control object stabilization	2				2		4	4	
10. The efficiency of parallelization tasks of analysis and synthesis of controlled HDS based on OpenMP and MPI-MAP	2				2		4	4	
11. The efficiency of parallelization tasks of analysis and synthesis of controlled HDS on cluster systems with a large number of processors	2				2		4	4	
12. Energy savings at the level of the hardware. Intel MIC Architecture	2				2		4	4	Comparison of power consumption in computer modeling of engineering prob-
13. Intel MIC Support in software	2				2		4	4	
14. Parallelization of computations using Intel Xeon Phi energy-efficient coprocessors	2				2		4	4	

									lems with NVIDIA accel- erators and accelerator Intel Xeon Phi
<b>The use of network technology for the organization of cloud structures, taking into account energy efficiency</b>									
1. Linux-administration. Administration of network services. Using the Python language.	2				4		6	4	
2. Technical facilities for energy efficiency of today's data centers	2						2	2	
3. The architecture of the data center. Developments for flexibility, scalability	2						2	2	
4. Organization of the network infrastructure. Principles of deployment of virtual environments.	2				8		10	10	
<b>Cloud infrastructure and energy efficiency</b>									
1. The architecture of the virtualized data center. Cloud infrastructure; public clouds, private clouds, hybrid model	2						2	4	
2. Software tools for organization of cloud storage	2				8		10	10	
3. The strategy of the organization of data storage in the cloud. Manage local storage: location, scalability, operational and energy efficiency.	2				2 4		26	22	
4. System security of virtual systems. Vulnerabilities and organization of protection against them.	2				6		8	10	
5. Ensuring security in a cloud environment, taking into account energy efficiency requirements	2				4		6	8	
<b>Iš viso</b>	<b>54</b>				<b>90</b>		<b>144</b>	<b>144</b>	

Author	Year of issue	Title	No of periodical or volume	Place of printing. Printing house or internet link
<b>Compulsory literature</b>				
Pattinson C.	2011	Measuring the Energy Use of Thin and Thick Client Desktops		Proceedings 27th Annual UK Performance Engineering Workshop, Bradford, July 2011. ISBN 978-0-9559703-3-7
Pattinson C.	2011	JISC Final Report		Leeds Metropolitan University <a href="http://www.webarchive.org.uk/wayback/archive/20140615071056/http://www.jisc.ac.uk/media/documents/programmes/greeningict/finalreports/ThinCFinalReport.pdf">http://www.webarchive.org.uk/wayback/archive/20140615071056/http://www.jisc.ac.uk/media/documents/programmes/greeningict/finalreports/ThinCFinalReport.pdf</a>
Ishfaq Ahmad, Sanjay Ranka	2012	Handbook of Energy-Aware Computing and Green Computing. Vol. 1		Chapman and Hall/CRC
Гергель В. П.	2010	Теория и практика параллельных вычислений		М. : Интернет-Ун-Т Информ. Технологий : БИНОМ. Лаб. знаний
Гергель В. П.	2010	Высокопроизводительные вычисления для многопроцессорных многоядерных систем		М. : Изд-во Моск. ун-та
	2013	OpenMP Application Program Interface. Version 4.0 - July 2013		<a href="http://www.openmp.org/mp-documents/OpenMP4.0.0.pdf">http://www.openmp.org/mp-documents/OpenMP4.0.0.pdf</a>
	2013	MPI: A Message-Passing Interface Standard Version 3.0		<a href="http://www.mpi-forum.org/docs/mpi-3.0/mpi30-report.pdf">http://www.mpi-forum.org/docs/mpi-3.0/mpi30-report.pdf</a>
<b>Additional literature</b>				



Воеводин В. В., Воеводин В. В.	2004	Параллельные вычисления		СПб. : БХВ-Петербург, 2004
Антонов А. С.	2009	Параллельное программирование с использованием технологии OpenMP		М.: Изд-во МГУ
Hughes C., Hughes T.	2003	Parallel and Distributed Programming using C++		Addison-Wesley Professional
Антонов А.С.	2004	Параллельное программирование с использованием технологии MPI		М.: Изд-во МГУ
Корнеев В.Д.	2002	Параллельное программирование в MPI		Новосибирск: Изд-во ИВМиМГ СО РАН
Шпаковский Г.И., Серикова Н.В.	2002	Программирование для многопроцессорных систем в стандарте MPI		Минск: БГУ
	2014	Top 500 List – June 2014		<a href="http://www.top500.org/list/2014/06/">http://www.top500.org/list/2014/06/</a>
Tanenbaum A.S.	2007	Modern operating systems		Prentice Hall
	2014	Windows Development.		<a href="http://msdn.microsoft.com/en-us/library/ee663300(v=vs.85).aspx">http://msdn.microsoft.com/en-us/library/ee663300(v=vs.85).aspx</a>
	2014	Reference Manual for Intel® Math Kernel Library 11.2		<a href="https://software.intel.com/en-us/mkl_11.2_ref">https://software.intel.com/en-us/mkl_11.2_ref</a>
Frigo M., Johnson S.G.	2012	FFTW for version 3.3.2		<a href="http://www.fftw.org/fftw3.pdf">http://www.fftw.org/fftw3.pdf</a>
	2007	Automated Empirical Optimization of Software and ATLAS Project.		<a href="http://sourceforge.net/projects/math-atlas/files/Stable/3.10.2/atlas3.10.0.tar.bz2/download">http://sourceforge.net/projects/math-atlas/files/Stable/3.10.2/atlas3.10.0.tar.bz2/download</a>
	2014	MPICH User's Guide Version 3.1.2		<a href="http://www.mpich.org/static/downloads/3.1.2/mpich-3.1.2-userguide.pdf">http://www.mpich.org/static/downloads/3.1.2/mpich-3.1.2-userguide.pdf</a>
	2014	OpenMPI v. 1.6.1		<a href="http://www.open-">http://www.open-</a>

		Documentation.		<a href="http://mpi.org/doc/v1.8/">mpi.org/doc/v1.8/</a>
	2014	C++ AMP (C++ Accelerated Massive Parallelism)		<a href="http://msdn.microsoft.com/en-us/library/hh265137.aspx">http://msdn.microsoft.com/en-us/library/hh265137.aspx</a>
	2012	OpenMP Technical Report 1 on Directives for Attached Accelerators		<a href="http://www.openmp.org/mp-documents/TR1_167.pdf">http://www.openmp.org/mp-documents/TR1_167.pdf</a>
	2013	Intel® Xeon Phi™ Coprocessor (code-name Knights Corner)		<a href="http://software.intel.com/en-us/articles/intel-xeon-phi-coprocessor-codename-knights-corner">http://software.intel.com/en-us/articles/intel-xeon-phi-coprocessor-codename-knights-corner</a>
Vladimirov A., Karpushenko V	2013	Test-driving Intel Xeon Phi coprocessors with a basic N-body simulation.		<a href="http://goparallel.sourceforge.net/wp-content/uploads/2013/01/Colfax_Nbody_Xeon_Phi.pdf">http://goparallel.sourceforge.net/wp-content/uploads/2013/01/Colfax_Nbody_Xeon_Phi.pdf</a>
Saule E., Kaya K., Çatalyürek U.	2013	Performance Evaluation of Sparse Matrix Multiplication Kernels on Intel Xeon Phi		<a href="http://arxiv.org/pdf/1302.1078v1.pdf">http://arxiv.org/pdf/1302.1078v1.pdf</a>
	2014	User and Reference Guide for the Intel® C++ Compiler 15.0		<a href="https://software.intel.com/en-us/compiler_15.0_user_guide">https://software.intel.com/en-us/compiler_15.0_user_guide</a>
	2013	Using the Intel MPI Library on the Intel Xeon Phi Coprocessor Systems		<a href="http://software.intel.com/en-us/articles/using-the-intel-mpi-library-on-intel-xeon-phi-coprocessor-systems">http://software.intel.com/en-us/articles/using-the-intel-mpi-library-on-intel-xeon-phi-coprocessor-systems</a>
Patel J.U., Guercio S.J., Bruno A.E., Jones M.D., and Furlani T.R	2013	Implementing Green Technologies and Practices in a High Performance Computing Center		University at Buffalo, State University of New York. <a href="http://www.buffalo.edu/content/dam/www/ccr/pdfs/HPC_Green.pdf">http://www.buffalo.edu/content/dam/www/ccr/pdfs/HPC_Green.pdf</a>
	2016			<a href="http://www.spec.org/power/docs/SPEC-">http://www.spec.org/power/docs/SPEC-</a>

				Pow- er_and_Performance _Methodology.pdf
Carretero J., Diste- fano S., Petcu D., Pop D., Rauber T., Rünger G., and Singh D.E.	2015			Supercomputing Frontiers and Inno- vations. – Электрон. дан. – 2015. – Режим до- ступа: <a href="http://www.superfri.org/superfri/article/view/41/35">http://www.superfri.org/superfri/article/view/41/35</a>
	2016			University at Buffa- lo's. <a href="http://nyserda.ccr.buffalo.edu">http://nyserda.ccr.buffalo.edu</a>
	2015			Fujitsu-Siemens <a href="http://www.ictliteracy.info/rf.pdf/green_IT_global_benchmark.pdf">http://www.ictliteracy.info/rf.pdf/green_IT_global_benchmark.pdf</a>
Wu-chun Feng, Cameron K.W.	2016			Virginia Polytechnic Institute and State University. Элек- трон. дан. 2016. Режим доступа: <a href="http://www.green500.org">http://www.green500.org</a>
Кормен Т., Лей- зерсон Ч., Ривест Р., Штайн К.	2005			М.: Издательский дом «Вильямс»
Эндрюс Г. Р.	2003			М.; СПб.; Киев : Вильямс
	2015			<a href="http://www.mpi-forum.org/docs/mpi-3.1/mpi31-report.pdf">http://www.mpi-forum.org/docs/mpi-3.1/mpi31-report.pdf</a>
	2013			Intel <a href="http://software.intel.com/sites/products/documentation/doclib/stdxe/2013/composerxe/compiler/cpp-lin/index.htm">http://software.intel.com/sites/products/documentation/doclib/stdxe/2013/composerxe/compiler/cpp-lin/index.htm</a>
	2013			<a href="http://software.intel.com/sites/products/documentation-">http://software.intel.com/sites/products/docu-menta-</a>

				tion/doclib/mkl_sa/11/mkl_userguide_inx/mkl_userguide_inx.pdf
	2015			<a href="http://www.openmp.org/mp-documents/openmp-4.5.pdf">http://www.openmp.org/mp-documents/openmp-4.5.pdf</a>
Андрейченко Д.К., Велиев В.М., Ерофтиев А.А., Портенко М.С.	2015			Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского <a href="http://library.sgu.ru/uch_lit/1255.pdf">http://library.sgu.ru/uch_lit/1255.pdf</a>
Андрейченко Д.К., Ирмагов П.В., Ирмагова М.С., Щербаков М.Г.	2010		Т. 10. Вып. 3	Изв. Сарат. ун-та. Нов. сер. Сер. Математика. Механика. Информатика.
Lehouck R.B., Sorensen D.C., Yang C.	1997			<a href="http://li.mit.edu/Archive/Activities/Archive/CourseWork/Ju_Li/MITCourses/18.335/Doc/ARPACK/Lehoucq97.pdf">http://li.mit.edu/Archive/Activities/Archive/CourseWork/Ju_Li/MITCourses/18.335/Doc/ARPACK/Lehoucq97.pdf</a>
Джордж А., Лю Дж	1984			М.: Мир,
	2009			CSC – IT Center for Science <a href="http://www.csc.fi/english/pages/elmer">www.csc.fi/english/pages/elmer</a>
Davis T.A.	2009			Dept. of Computer and Information Science and Engineering Univ. of Florida <a href="http://www.cise.ufl.edu/research/sparse/umfpack">www.cise.ufl.edu/research/sparse/umfpack</a>
Davis T.A.	2008			Dept. of Computer and Information Science and Engineering Univ. of Florida <a href="http://www.cise.ufl.edu/research/sparse">www.cise.ufl.edu/research/sparse</a>

	2007			<a href="http://hsl.rl.ac.uk">http://hsl.rl.ac.uk</a>
	2009			User Guide ( <a href="http://mumps.ensci.fr">http://mumps.ensci.fr</a> , <a href="http://graal.ens-lyon.fr/MUMPS">http://graal.ens-lyon.fr/MUMPS</a> ).
	2014			Microsoft <a href="http://msdn.microsoft.com/ru-ru/library/dd504870.aspx">http://msdn.microsoft.com/ru-ru/library/dd504870.aspx</a>
Андрейченко Д.К., Андрейченко К.П.	2000		№ 3	Изв. РАН. Теория и системы управления
Андрейченко Д.К., Андрейченко К.П.	2013			Саратов: ООО «Издательский Дом «Райт-Экспо»», ISBN 978-5-4426-0018-6
Андрейченко Д.К., Андрейченко К.П.	2008		№ 4	Изв. РАН. Теория и системы управления..
Андрейченко Д.К., Андрейченко К.П., Комарова М.С.	2012		№ 4	Изв. РАН. Теория и системы управления
Андрейченко Д.К., Андрейченко К.П., Комарова М.С.	2012		№ 5(54)	Доклады Академии военных наук
Андрейченко Д.К., Ерофтиев А.А., Мельничук Д.В.	2014			Компьютерные науки и информационные технологии. Материалы Междунар. науч. конф. – Саратов: Издат. центр «Наука» ISBN 978-5-9999-2100-0
Андрейченко Д.К., Андрейченко К.П., Кононов В.В.	2013		Т. 13 вып. 4, ч. 1	Изв. Сарат. ун-та. Нов. сер. Сер. Математика. Механика. Информатика
Тыртышников Е.Е.	2006			М

Флетчер К	1988			М.: Мир
Коул Дж	1972			М.: Мир
Хайрер Э., Нерсетт С., Ван- нер Г.	1990			М.: Мир
Хайрер Э., Ван- нер Г.	1999			М.: Мир
Банди Б.	1988			М.: Радио и связь
Tang Jiali, Ren Gexue	2009		Vol. 14	Tshinghua Science and Technology
Андрейченко Д.К.	2000		Т. 40. № 7	Ж. вычисл. матем. и матем. физ
Vladimirov A., Karpushenko V.	2013			Stanford University, Colfax International <a href="http://goparallel.sourceforge.net/wp-content/uploads/2013/01/Colfax_Nbody_Xeon_Phi.pdf">http://goparallel.sour ceforge.net/wp- con- tent/uploads/2013/01 /Colfax_Nbody_Xeo n_Phi.pdf</a>
Saule E., Kaya K., Çatalyürek U.	2013			Ohio State Universi- ty <a href="http://arxiv.org/pdf/1302.1078v1.pdf">http://arxiv.org/pdf/1 302.1078v1.pdf</a>



## **ПРИЛОЖЕНИЕ Б. МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЕ**

### **Пояснения к учебной программе**

Самостоятельную работу над дисциплиной «Энергоэффективные кластерные и облачные вычисления и технологии» следует начинать с изучения учебной программы, которая приведена в Приложении. Эта программа включает следующие элементы.

**Объект изучения** – современные параллельные высокопроизводительные вычислительные системы, в том числе и с энергосберегающим аппаратным обеспечением, а также технологии параллельного программирования; современные технологии и инфраструктура для облачных вычислений, в том числе и оптимизированные по энергопотреблению.

**Предмет изучения** – Концепции, принципы, общие методы, технологии разработки и оптимизации программного обеспечения для современных параллельных высокопроизводительных вычислительных архитектур и для инфраструктуры облачных вычислений, в том числе и оптимизации по энергопотреблению.

**Требования к исходным знаниям и навыкам, которые необходимо иметь перед началом изучения:**

- базовые знания в области информатики, программирования, систем управления базами данных, операционных систем, компьютерных сетей, теоретических основ параллельного программирования
- знания, полученные в результате изучения курсов по методике разработки программного обеспечения, математических методов защиты информации, информационной безопасности, разработке Web-приложений, тестированию программного обеспечения.

### **Целью изучения дисциплины**

является формирование у обучающихся необходимого объема теоретических и практических знаний о технологиях высокопроизводительных вычислений и технологиях облачных вычислений; знакомство слушателей с инструментальными средствами данных технологий; изучение вопросов, связанных с разработкой параллельных алгоритмов, эффективным распараллеливанием вычислений, использованием стандартных библиотек поддержки высокопроизводительных вычислений и оптимизации программного обеспечения для современных параллельных вычис-

лительных систем, в том числе и по энергопотреблению; изучение вопросов безопасности, масштабирования, развертывания, резервного копирования в контексте облачной инфраструктуры; освоение навыков системного администрирования для разработки и сопровождения приложений, развертываемых в облаках, а также используемых на современных параллельных высокопроизводительных вычислительных системах; подготовка обучаемого к профессиональной деятельности, связанной с облачными технологиями и технологиями высокопроизводительных вычислений.

**В результате ее изучения обучаемые должны  
знать:**

- основные понятия и терминологию технологий высокопроизводительных вычислений;
- области применения технологий высокопроизводительных вычислений;
  - базовые технологии разработки программного обеспечения для современных параллельных высокопроизводительных вычислительных систем;
- методы оптимизации алгоритмов и программного обеспечения для современных параллельных высокопроизводительных вычислительных систем, в том числе и для оптимизации энергопотребления;
- основные понятия и терминологию облачных технологий;
- области применения облачных технологий;
- базовые технологии необходимые для построения облачных платформ;
- вопросы безопасности, масштабирования, развертывания, резервного копирования в контексте облачной инфраструктуры с учетом энергоэффективности;

**уметь:**

- использовать современные технологии параллельного программирования для разработки и оптимизации программного обеспечения для параллельных высокопроизводительных вычислительных систем;
- формулировать требования к разработке программного обеспечения для высокопроизводительных вычислительных систем, в том числе и для оптимизации энергопотребления;
- формулировать требования к организации проектов, связанных с облачными технологиями;
- использовать современные информационные технологии для организации распределенных вычислительных систем;

**владеть:**

- навыками разработки программного обеспечения для современных параллельных высокопроизводительных вычислительных систем;
- навыками оптимизации алгоритмов и программного обеспечения для современных параллельных высокопроизводительных вычислительных систем, в том числе и для оптимизации энергопотребления;
- навыками системного администрирования для разработки и сопровождения приложений, развертываемых в облаках.
- навыками разработки программного обеспечения облачных систем;
- навыками системного администрирования для разработки и сопровождения приложений, развертываемых в облаках

**Вследствие изучения дисциплины аспиранты обязаны:**

*1) Теоретический компонент*

- получить представления о проблемах, связанных с сокращением энергопотребления при использовании параллельных высокопроизводительных вычислительных систем, а также в области облачных вычислений;
- иметь представление о современных технологиях параллельного программирования и методах оптимизации программного обеспечения для современных параллельных высокопроизводительных вычислительных систем, в том числе и для оптимизации энергопотребления;
- иметь представление о безопасности, масштабировании, развертывании, резервном копировании в контексте облачной инфраструктуры с учетом энергоэффективности

*2) Познавательный компонент*

- знать фундаментальные положения в области зеленых технологий;
- знать фундаментальные положения в области параллельных вычислительных технологий;
- знать фундаментальные положения в области технологий облачных вычислений;
- знать современные технологии параллельного программирования;
- знать методы оптимизации программного обеспечения для современных параллельных высокопроизводительных вычислительных систем;
- знать методы оптимизации облачной инфраструктуры.

*3) Практический компонент*

- получить представление о методах распараллеливания вычислений при разработке программного обеспечения;
- уметь применять технологии параллельного программирования;
- уметь использовать современные информационные технологии

для организации распределенных вычислительных систем.

*4) Исследовательский компонент*

- разрабатывать математические модели процессов и объектов по теме научно-исследовательской работы, методы их исследования, выполнять их сравнительный анализ;
- разрабатывать алгоритмы компьютерного моделирования для соответствующего класса математических моделей, выполнять теоретическую оценку трудоемкости и эффективности разработанных алгоритмов;
- по результатам вычислительного эксперимента проводить сравнение теоретической и фактической трудоемкости и эффективности предложенных алгоритмов;
- проводить оптимизацию разработанных алгоритмов для их реализации на современных параллельных высокопроизводительных вычислительных системах, а также для выполнения облачных вычислений, в том числе и оптимизацию по энергопотреблению.

*Структура и содержание модулей.* Дисциплина включает четыре модуля:

**МОДУЛЬ 1. Энергосбережение на параллельных вычислительных архитектурах и классические технологии параллельного программирования**

**Лекции**

ТЕМА 1. Энерго-ориентированный анализ параллельных вычислительных систем.

ТЕМА 2. Аналог энергетической метрики для программ, оптимизированных для параллельных вычислительных архитектур.

ТЕМА 3. Энергосбережение на симметричных мультипроцессорных системах с общей памятью. OpenMP

ТЕМА 4. Энергосбережение на кластерных системах. MPI

**Лабораторные работы**

**Лабораторная работа №1. Разработка зеленого программного обеспечения на основе технологии параллельного программирования OpenMP (2 часа)**

Цель работы: ознакомление с основными возможностями технологии параллельного программирования OpenMP для симметричных мультипроцессорных систем с общей памятью.

**Лабораторная работа №2. Исследование эффективности распараллеливания вычислений на основе OpenMP при разработке зеле-**

### **ного программного обеспечения (2 часа)**

Цель работы: исследование теоретически возможного и фактического ускорения вычислительного процесса при распараллеливании вычислений на основе технологии OpenMP.

### **Лабораторная работа №3. Разработка зеленого программного обеспечения на основе технологии параллельного программирования MPI (2 часа)**

Цель работы: ознакомление с основными возможностями технологии параллельного программирования MPI для кластерных систем с распределенной памятью.

### **Лабораторная работа №4. Исследование эффективности распараллеливания вычислений на основе MPI при разработке зеленого программного обеспечения (2 часа)**

Цель работы: исследование теоретически возможного и фактического ускорения вычислительного процесса при распараллеливании вычислений на основе технологии MPI.

## **МОДУЛЬ 2. Энергосбережение на основе оптимизации алгоритмов, равномерной загрузки процессоров и оптимизированного по энергопотреблению аппаратного обеспечения**

### **Лекции**

ТЕМА 1. Пример типовой математической модели и оптимизация методов численного анализа.

ТЕМА 2. Распараллеливание тестовой задачи о спектре собственных значений для векторных уравнений Гельмгольца в сложной пространственной области.

ТЕМА 3. Оптимизация алгоритмов численного анализа в кластерной редакции конечно-элементного решателя для сокращения энергозатрат на кластерной системе.

ТЕМА 4. Паттерн MPI-MAP и сокращение энергозатрат на основе динамической балансировки вычислительной нагрузки на кластерных системах.

ТЕМА 5. Динамические модели управляемых комбинированных динамических систем (КДС).

ТЕМА 6. Устойчивость и параметрический синтез управляемых КДС.

ТЕМА 7. Оптимизация алгоритмов на основе проекционного метода Галеркина за счет жестко устойчивых методов численного интегрирования.

ТЕМА 8. MPI-MAP и распараллеливание задач анализа и синтеза управляемых КДС.

ТЕМА 9. Пример математической модели нелинейной системы

стабилизации подвижного объекта управления

ТЕМА 10. Эффективность распараллеливания задач анализа и синтеза управляемых КДС на основе OpenMP и MPI-MAP.

ТЕМА 11. Эффективность распараллеливания задач анализа и синтеза управляемых КДС на кластерных системах с большим числом процессоров.

ТЕМА 12. Энергосбережение на уровне аппаратного обеспечения. Архитектура Intel MIC.

ТЕМА 13. Поддержка Intel MIC на уровне программного обеспечения.

ТЕМА 14. Распараллеливание вычислений с использованием энергоэффективных сопроцессоров-ускорителей Intel Xeon Phi.

### **Лабораторные работы**

**Лабораторная работа №5. Оптимизация конечно-элементного решателя для сокращения энергозатрат на кластерной системе (7 часов)**

Цель работы: исследование эффективности применения библиотек поддержки высокопроизводительных вычислений; сравнение эффективности распараллеливания вычислений при использовании различных алгоритмов численного анализа и библиотек поддержки высокопроизводительных вычислений; сравнение теоретически возможного и фактического ускорения вычислительного процесса.

**Лабораторная работа №6. Реализация паттерна MPI-MAP для динамической балансировки вычислительной нагрузки на кластерной системе (7 часов)**

Цель работы: сравнение эффективности статических и динамических методов балансировки вычислительной нагрузки; реализация паттерна MPI-MAP, сборка необходимых для выполнения дальнейшего компьютерного моделирования параллельных библиотек поддержки высокопроизводительных вычислений.

**Лабораторная работа №7. Исследование эффективности динамической балансировки вычислительной нагрузки на кластерной системе (7 часов)**

Цель работы: сравнение теоретически возможного и фактического ускорения вычислительного процесса при компьютерной реализации задач анализа и синтеза управляемых КДС; сравнение эффективности последовательной версии программ и параллельных версий на основе OpenMP при относительно небольшом числе используемых процессоров; сравнение эффективности последовательной версии программ и параллельных версий на основе MPI-MAP на кластерных системах при использовании большого числа процессоров.

**Лабораторная работа №8. 2.4. Распараллеливание вычислений на энергоэффективных сопроцессорах-ускорителях Intel Xeon Phi (7 часов)**

Цель работы: сравнение эффективности распараллеливания вычислений на основе технологий параллельного программирования OpenMP и MPI на центральных процессорах и на энергоэкономных сопроцессорах-ускорителях вычислений Intel Xeon Phi при решении задач анализа и синтеза управляемых комбинированных динамических систем.

**МОДУЛЬ 3. Использование сетевых технологий для организации облачных структур с учетом энергоэффективности.**

**Лекции**

ТЕМА 1. Linux-администрирование. Администрирование сетевых служб. Использование языка Python.

ТЕМА 2. Технические средства для обеспечения энергоэффективности современных центров обработки данных.

ТЕМА 3. Архитектура дата-центров. Разработки для гибкости, масштабируемости

ТЕМА 4. Организация сетевой инфраструктуры. Принципы развертывания виртуальных сред.

**Лабораторные работы**

**Лабораторная работа №9. Развертывание виртуальной машины (4 часа)**

*Цель работы:* на основе образа установочного диска ОС Ubuntu развернуть виртуальную машину и приобрести навыки настройки и работы с ней.

**Лабораторная работа №10. Реализация RESTful web-сервисов (4 часа)**

*Цель работы:* реализовать на языке Питон типовой web-сервис с заданными функциями с использованием фреймворка Flask.

**Лабораторная работа №11. Конфигурирование сетевой топологии (4 часа)**

*Цель работы:* настроить топологию сети с заданными параметрами.

**МОДУЛЬ 4. Облачные инфраструктуры и энергосбережение.**

**Лекции**

ТЕМА 1. Архитектура виртуализированного центра обработки данных. Облачные инфраструктуры; публичные облака, частные облака, гибридная модель.

ТЕМА 2. Стратегия организации хранилища данных в облаке. Управление глобальным хранилищем данных: расположение, масштабируемость, операционная и энергоэффективность.

ТЕМА 3. Программные средства организации облачных хранилищ.

ТЕМА 4. Обеспечение безопасности в облачной среде с учетом требований энергоэффективности.

ТЕМА 5. Вопросы системной безопасности виртуальных систем. Уязвимости и организация защиты от них.

### **Лабораторные работы**

**Лабораторная работа №12. Развертывание OPENSTACK с заданной конфигурацией, с использованием DEVSTACK (8 часов)**

*Цель работы:* научиться разворачивать OpenStack с помощью проекта DevStack с заданной конфигурацией.

**Лабораторная работа №13. Исследование энергопотребления платформы Nadoor на базе OpenStack с использованием разных типов плагинов (8 часов)**

*Цель работы:* изучить энергопотребление платформы Nadoor на базе OpenStack при работе с различными установленными поверх OpenStack плагинами.

**Лабораторная работа №14. Исследование энергопотребления сервера Nginx на базе OpenStack и на Bare metal (8 часов)**

*Цель работы:* изучить энергопотребление Nginx на базе OpenStack и на BareMetal.

**Лабораторная работа №15. Исследование энергопотребления хранилищ данных OpenStack (8 часов)**

*Цель работы:* выбрать конфигурацию OpenStack с наименьшим энергопотреблением при использовании различных типов хранилищ данных для заданной модельной ситуации.

**Лабораторная работа №16. Проверка сетевой изолированности виртуальных машин и настройка безопасности групп с измерением энергопотребления (10 часов)**

*Цель работы:* настройка средств безопасности с использованием OpenStack Neutron. Изучение уровня энергопотребления серверов в зависимости от количества запущенных виртуальных машин..

### **Методы оценки**

*Отчетность по дисциплине* включает отчеты по каждому виду лабораторного занятия, а также ответы на типовые вопросы и решение типовых задач.



## СОДЕРЖАНИЕ

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ .....	3
ВВЕДЕНИЕ .....	4
1. ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ НА ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ АРХИТЕКТУРАХ И КЛАССИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПАРАЛЛЕЛЬНОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ.....	8
1.1. Лабораторная работа № 1. Разработка зеленого программного обеспечения на основе технологии параллельного программирования OpenMP .....	8
1.2. Лабораторная работа № 2. Исследование эффективности распараллеливания вычислений на основе OpenMP при разработке зеленого программного обеспечения .....	16
1.3. Лабораторная работа № 3. Разработка зеленого программного обеспечения на основе технологии параллельного программирования MPI .....	22
1.4. Лабораторная работа № 4. Исследование эффективности распараллеливания вычислений на основе MPI при разработке зеленого программного обеспечения .....	26
2. ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ НА ОСНОВЕ ОПТИМИЗАЦИИ АЛГОРИТМОВ, РАВНОМЕРНОЙ ЗАГРУЗКИ ПРОЦЕССОРОВ И ОПТИМИЗИРОВАННОГО ПО ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЮ АППАРАТНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ.....	31
2.1. Лабораторная работа № 5. Оптимизация конечно- элементного решателя для сокращения энергозатрат на кластерной системе .....	31
2.2. Лабораторная работа № 6. Реализация паттерна MPI-MAP для динамической балансировки вычислительной нагрузки на кластерной системе .....	54
2.3. Лабораторная работа № 7. Исследование эффективности динамической балансировки вычислительной нагрузки на кластерной системе .....	76
2.4. Лабораторная работа № 8. Распараллеливание вычислений на энергоэффективных сопроцессорах-ускорителях Intel Xeon Phi .....	112
3. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СЕТЕВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ОРГАНИЗАЦИИ ОБЛАЧНЫХ СТРУКТУР С УЧЕТОМ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ .....	124
3.1. Лабораторная работа № 9. Развертывание виртуальной	

машины. ....	124
3.2. Лабораторная работа № 10. Реализация RESTful web-сервисов. ....	129
3.3. Лабораторная работа № 11. Конфигурирование сетевой топологии. ....	133
3.4. Лабораторная работа № 12. Развертывание OpenStack с заданной конфигурацией, с использованием Devstack .....	136
4. ОБЛАЧНЫЕ ИНФРАСТРУКТУРЫ И ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ .140	
4.1. Лабораторная работа № 13. Исследование энергопотребления платформы Nadoor на базе OpenStack с использованием разных типов плагинов.....	140
4.2. Лабораторная работа №14. Исследование энергопотребления сервера Nginx на базе OpenStack и на Bare Metal.....	150
4.3. Лабораторная работа №15. Исследование энергопотребления хранилищ OpenStack .....	155
4.4. Лабораторная работа №16. Проверка сетевой изолированности виртуальных машин и настройка безопасности групп с измерением энергопотребления .....	160
ЛИТЕРАТУРА .....	163
ABSTRACT AND CONTENT .....	171
АНОТАЦІЯ ТА ЗМІСТ .....	174
ПРИЛОЖЕНИЕ А. УЧЕБНАЯ ПРОГРАММА .....	177
ПРИЛОЖЕНИЕ Б. МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЕ .....	189

Андрейченко Дмитро Костянтинович  
Батраєва Інна Олександрівна  
Наркайтис Герман Германович  
Єрофтієв Андрій Олександрович  
Портенко Марина Сергіївна  
Шахрай Дар'я Олександрівна  
Мельничук Дмитро Вадимович  
Афанасьєв Георгій Михайлович

## **ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІ КЛАСТЕРНІ ТА ХМАРНІ ОБЧИСЛЕННЯ І ТЕХНОЛОГІЇ**

**Практикум**  
(російською мовою)

Редактори Федорова А.Г. і Харченко В.С.

Комп'ютерна верстка  
Харченко Л.Д.

Зв. план, 2016

Підписаний до друку 23.02.2016

Формат 60x84 1/16. Папір офс. №2. Офс. друк.

Умов. друк. арк. 11,57. Уч.-вид. л. 11,01. Наклад 200 прим.

Замовлення 2. Ціна вільна

---

Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського

"Харківський авіаційний інститут"

61070, Харків-70, вул. Чкалова, 17

<http://www.khai.edu>

Віддруковано ФОП Лисенко І. Б.

61070, Харків-70, вул. Чкалова, 17, моторний корпус, к. 147

Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи в державний реєстр  
видавців, виготовлювачів і розповсюджувачів видавничої продукції

ДК №2607 от 11.09.06 р.