



- ПОНЯТИЯ И ПРИНЦИПЫ ЗЕЛЕННОГО КОМПЬЮТИНГА: ТАКСОНОМИЯ, ЖИЗНЕННЫЙ ЦИКЛ, РЕСУРСЫ, АНАЛИЗ  
CONCEPTS AND PRINCIPLES OF GREEN COMPUTING: TAXONOMY, LIFE CYCLE, RESOURCES, GAP-ANALYSIS

- ЗЕЛЕНЕ «ЖЕЛЕЗО» И ПРОГРАММИРУЕМЫЕ СИСТЕМЫ: ЗЕЛЕНАЯ ЛОГИКА, ПЛИС, МП; ИЗМЕРЕНИЯ, ВЕРИФИКАЦИЯ  
GREEN HW AND PROGRAMMABLE SYSTEMS: GREEN LOGIC, FPGA, CPU, MEASUREMENTS, VERIFICATION

- ЗЕЛЕНАЯ ПО И ЧЕЛОВЕКО-МАШИННЫЙ ИНТЕРФЕЙС: ОСНОВЫ, МОДЕЛИ КАЧЕСТВА, МЕТРИКИ, РАЗРАБОТКА  
GREEN SW AND HUMAN-MACHINE INTERFACE: FOUNDATIONS, QUALITY MODELS, METRICS, DEVELOPMENT

- МОДЕЛИ И АЛГОРИТМЫ ДЛЯ ЗЕЛЕНАХ ИТ: N-ЗНАЧНАЯ ЛОГИКА, МАЛОРЕСУРСНАЯ КРИПТОГРАФИЯ, АЛГОРИТМЫ ОПТИМИЗАЦИИ  
MODELS AND ALGORITHMS FOR GREEN IT: N-VALUED LOGIC, LOW-RESOURCE CRYPTOGRAPHY, ALGORITHMS OF OPTIMIZATION



University of Ioannina



МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ



## ЗЕЛЕНАЯ ИТ-ИНЖЕНЕРИЯ Том 1. Принципы, модели, компоненты

## GREEN IT-ENGINEERING Volume 1. Principles, models, HW&SW



## ЗЕЛЕНАЯ ИТ-ИНЖЕНЕРИЯ Том 1. Принципы, модели, компоненты

Лекционный материал

## GREEN IT-ENGINEERING Volume 1. Principles, models, HW&SW



2014



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

# **ЗЕЛЕНАЯ ИТ-ИНЖЕНЕРИЯ**

**Том 1. Принципы, компоненты, модели**

**Под редакцией В.С. Харченко**

**Проект  
TEMPUS-GREENCO 530270-TEMPUS-1-2012-1-UK-TEMPUS-JPCR  
Green Computing and Communication**

2014



Двохтомне видання (Том 1. Принципи, моделі, компоненти; Том 2. Системи, індустрія, суспільство) вміщує лекційний матеріал з теоретичних і практичних аспектів зеленої ІТ-інженерії для магістерських, докторантських (PhD) курсів і тренінг-модулів, розроблених за проектом TEMPUS-GREENCO Green Computing and Communication (530270-TEMPUS-1-2012-1-UK-TEMPUS-JPCR). Перший том базується на результатах досліджень та розробок принципів, моделей, методів і алгоритмів для побудови зелених (енергозберігаючих) комп'ютерних систем. Описуються базові поняття і таксономічна схема зеленого комп'ютерингу, принципи ресурсозбереження і гар-аналізу при модернізації (озелененні) систем, пропонуються методи зменшення енергоспоживання апаратно-програмних засобів на основі FPGA і мікропроцесорів для вбудованих і мобільних систем, методи моделювання, розробки та верифікації зелених компонент і систем.

Для студентів, аспірантів та викладачів університетів відповідних спеціальностей, інженерів та дослідників у сфері енергоефективних, екологічних і безпечних інформаційних технологій та систем.

**Рецензенти:** Мохор Владимир Владимирович, начальник отдела Института проблем моделирования в энергетике имени Г.Е. Пухова НАН Украины, доктор технических наук, профессор;

Alex Yakovlev, Professor of Computing System Design Department, University of Newcastle-upon-Tyne (Great Britain), Doctor of Science on Engineering;

Сидоренко Николай Федорович, главный инженер ИТ СКБ «Полисвит» (Харьков, Украина), заслуженный изобретатель Украины, кандидат технических наук, доцент.

Харченко В.С.

**ISBN 978-966-662-378-5**

**348 Зелена ІТ-інженерія. В 2-х томах. Том 1. Системи, індустрія, соціум** / Под ред. Харченко В.С. – Министерство образования и науки Украины, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». - 2014. – 594 с.

Двухтомник (Том 1. Принципы, модели, компоненты; Том 2. Системы, индустрия, социум) содержит лекционный материал по зеленой ИТ-инженерии для магистерских, докторантских (PhD) курсов и тренингов, разработанных в проекте TEMPUS-GREENCO Green Computing and Communication (530270-TEMPUS-1-2012-1-UK-TEMPUS-JPCR). Первый том базируется на результатах исследований и разработки принципов, моделей, методов и алгоритмов для построения зеленых (энергоэффективных) компьютерных систем. Описываются базовые понятия и таксономическая схема зеленого компьютеринга, принципы ресурсосбережения и гар-анализа при модернизации (озеленении) систем, предлагаются методы уменьшения энергопотребления аппаратно-программных средств на основе FPGA и микропроцессоров для встроенных и мобильных систем, методы моделирования, разработки и верификации зеленых компонент и систем.

Для студентов университетов, аспирантов и преподавателей университетов соответствующих специальностей, инженеров и исследователей в области энергоэффективных, экологических и безопасных ИТ и систем.

Библ. – 434 наименований, рисунков – 252, таблиц – 119.

Рекомендовано к изданию Ученым советом Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт» (протокол № 1 от 24 сентября 2014 года).

УДК 004.504(045)

**ISBN 978-966-662-378-5**

© Харченко В.С.

© Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ»

## СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

ДПС – динамики программных систем  
 ЕР - естественный ресурс  
 ИВ – Интернет вещей (Internet of Things, IoT)  
 ИТ (ИС) – информационная технология (система)  
 КЛБ – конфигурируемый логический блок (Look Up Table, LUT)  
 КМ (ОМ) – компьютерный мир (окружающий мир)  
 МКП – малоресурный криптографический примитив  
 МКПО (МКИПО) – модель качества ПО (в использовании)  
 МНПО – модель надежности ПО  
 МРУ – малоресурсное устройство  
 ОД (РД) – объект диагностирования (рабочее диагностирование)  
 ПАМС – система послеаварийного мониторинга  
 ПЛИС – программируемая логическая интегральная схема  
 ПО – программное обеспечение  
 ЧМИ (ЗЧМИ) – (зеленый) человеко-машинный интерфейс

CUDA (Compute Unified Device Architecture) – программно-аппаратная архитектура параллельных вычислений  
 ERF (Energy Reuse Factor) – коэффициент повторного использования энергии  
 FIT (Fault Insertion Test) – тест, основанный на засеве дефектов  
 FMEDA (Failure Mode, Effect and Diagnostics Analysis) – анализ видов, последствий и диагностирования отказов  
 FPGA (Field Programmable Gate Array) – программируемая пользователем схема  
 GAMES (Green Active Management of Energy in IT Service Centres) – энергетический менеджмент в центрах предоставления ИТ-сервисов  
 GEC (Green Energy Co-Efficient) – коэффициент зеленой энергии  
 GGA (Green Gap Analysis) – зеленый Gap-анализ  
 GPGPU (General Purpose Graphics Processing Unit) – графический процессор общего назначения  
 GPU (Graphics Processing Unit) – графический процессор видеокарты  
 GS3M (Generic Sustainable Software Star Model) модель устойчивого ПО "звезда"  
 HDL (Hardware Description Language) – язык описания аппаратуры  
 ITSS (IT Sustainability Set) – множество сущностей устойчивого развития  
 LLS (Logic-Level Simulation) – симуляция на уровне логических элементов  
 MEI (Power IT-System Metric) – энергетическая метрика ИТ-системы  
 MPI (Message Passing Interface) – интерфейс передачи сообщений  
 MSS (Multi-State System) – система с многоуровневой работоспособностью  
 PDCA (Plan-Do-Check-Act) – «Планирование-Выполнение-Контроль-Действие»  
 PUE (Power Usage Effectiveness) – метрика эффективности использования энергии  
 R&D (Research & Development) – исследование и разработка  
 RFID (Radio Frequencies Identification) – идентификация меток радиочастоты  
 SAF-файла (Signal Activity File) – файл активности сигналов  
 SCA/CR (Static Code Analysis/Code Review) – статический анализ/обзор кода  
 TS (Timing Simulation) – симуляция с учетом временных параметров

## ВВЕДЕНИЕ

### СОДЕРЖАНИЕ ВВЕДЕНИЯ

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ .....	3
ВВЕДЕНИЕ .....	4
0.1 Цивилизационные вызовы и информационные технологии: фактор двойственности .....	5
0.1.1 Энергетика .....	5
0.1.2 Экология .....	7
0.1.3 Безопасность .....	7
0.1.4 Причины двойственности ИТ-систем .....	10
0.2 Зеленые информационные технологии в узком и широком смысле ..	11
0.3 Задачи развития зеленых ИТ .....	13
0.3.1 Компоненты .....	13
0.3.2 Системы, сети и инфраструктуры .....	14
0.3.3 Модели .....	15
0.4 Зеленая ИТ-культура .....	16
0.5 Проект Green Computing and Communication.....	17
0.5.1 Предпосылки.....	17
0.5.2 Концепция.....	21
0.5.3 Консорциум .....	22
0.5.4 Задачи.....	22
0.6 Общие сведения о книге.....	23
0.6.1 Почему «зеленая ИТ-инженерия»?.....	23
0.6.2 Структура и содержание.....	24
0.6.3 Авторский коллектив.....	29
0.6.4 Благодарности.....	31

## **0.1 Цивилизационные вызовы и информационные технологии: фактор двойственности**

Среди вызовов, с которыми столкнулась современная цивилизация, ключевыми являются вызовы, связанные с дефицитом энергоресурсов, экологическими проблемами и безопасностью. Нехватка энергоресурсов и ресурсов вообще обусловлена ростом потребления населением и интенсивным развитием производства. Техногенная деятельность человечества увеличивает нагрузку на окружающую среду и увеличивает экологические риски. Развитие атомной энергетики, авиационных и ракетно-космических комплексов, транспортных и медицинских систем напрямую связаны с обеспечением безопасности.

Эти глобальные процессы происходят на фоне экстрадинамичного развития технологий. Среди них информационные технологии или ИТ (иногда говорят информационные и коммуникационные технологии, выделяя как самостоятельную сетевую составляющую) занимают особое место и в технологической гонке находятся в лидирующей группе. Поэтому возникают естественные вопросы: связаны ли ИТ с указанными цивилизационными вызовами, а если связаны, то как?

Предваряя анализ, можно сказать, что информационные технологии, оказывая в целом позитивное влияние на поиск ответов на указанные вызовы, создают специфические проблемы, которые в конечном итоге могут, если не перекрыть позитивы, то заметно нивелировать их. Это обстоятельство может быть определено как фактор двойственности.

### **0.1.1 Энергетика**

ИТ не существуют сами по себе, они «наполняют» компьютерные системы, сети и инфраструктуры или в более широком контексте цифровой мир – киберпространство. Информационные технологии реализуются посредством ИТ-систем, которые осуществляют хранение, отображение, преобразование и передачу информации в интересах пользователей или других систем. Такие ИТ-системы являются обязательной частью энергетических систем, которые обеспечивают генерацию, преобразование и доставку различных видов энергии, в первую очередь, электрической.

**Зеленая энергетика и ИТ.** Появившаяся в последние десятилетия «зеленая энергетика», осуществляющая производство электроэнергии из возобновляемых источников (ветровая, приливная, солнечная и другие), прочно заняла свое место под «солнцем» в прямом и переносном смысле и сейчас является приоритетным сектором индустрии высокоразвитых и развивающихся стран, ведущих компаний. Характерным примером

является компания «Siemens», изменившая несколько лет назад генеральное направление своего развития, переключившись на так называемые «умные» (smart) и «зеленые» (green) технологии, включая ИТ (умные дома и городские инфраструктуры, солнечная и ветровые генераторы энергии, электромобили).

В энергосистемах ИТ реализуют функции мониторинга, обработки информации и управления и непосредственно влияют на технический уровень энергосистем как традиционных, так зеленой энергетики. Следовательно, без ИТ невозможно эффективно ответить на вызовы в области сохранения и увеличения объема энергоресурсов. Однако, с каждым годом информационные технологии в этом контексте приобретают самостоятельную роль, поскольку ИТ-системы становятся все более активным потребителем энергии. По данным разным источников на их долю приходится до 3% общего объема потребляемой энергии.

В абсолютном исчислении это составляет колоссальные объемы, сопоставимые с потреблением энергии крупнейшими европейскими экономиками. Например, современная облачная ИТ-инфраструктура, включающая центр обработки данных (data center) и несколько тысяч компьютеров, потребляет ежедневно 10-15 мегаватт. Эти и приведенные далее факты были опубликованы в презентациях на конференции «Green IT: Как сэкономить с помощью экологических технологий» в марте 2013г. ([http://events.cnews.ru/events/green\\_it\\_kak\\_sekonomit\\_s\\_pomoschyu\\_ekologichnyh\\_tehnologii.shtml](http://events.cnews.ru/events/green_it_kak_sekonomit_s_pomoschyu_ekologichnyh_tehnologii.shtml)).

Есть все основания говорить о том, что без системных решений в этой области цифры будут стремительно расти, учитывая то, какими темпами развиваются информационные технологии, как все глубже они пронизывают все стороны жизни современного общества, вытесняя привычные решения и предоставляя новые услуги для населения.

**Энергокритичные системы.** Кроме того, что существует отдельный класс систем, которые могут быть названы критичными по энергии (energy critical). В таких системах время полезного функционирования (время жизни) зависит от встроенных средств энергоснабжения – автономные роботы, космические аппараты, беспилотные системы. В подобных системах могут вводиться режимы принудительного пониженного энергопотребления для увеличения времени активной работы в «обмен» на уменьшение числа выполняемых функций или деградацию их характеристик. Следовательно, в таких системах ИТ-средства должны, с одной стороны, управлять энергорежимами всего оборудования, с другой, – минимизировать собственное энергопотребление, балансируя в пространстве характеристик «функциональность-надежность (безопасность)-энергия».

### 0.1.2 Экология

Не менее чувствительным является вклад ИТ, рассматриваемых не как интеллектуальный инструмент в достижении позитивных экологических целей (системы мониторинга окружающей среды, управления переработкой отходов и др.), а как объект, который может создавать экологические проблемы.

Здесь есть несколько аспектов, которые связаны с процессами разработки, применения и утилизации ИТ-систем. Производство современных микрочипов (процессоров, однократно программируемых и перепрограммируемых устройств, цифровых и аналоговых микросхем для радиоэлектронных систем), всей линейки устройств компьютерной техники, включая мониторы, принтеры, устройства памяти является экологически критичным и требует серьезных капиталовложений для соответствия положениям стандартов и законов и компенсации рисков.

Для такого производства используются вредные материалы, что порождает затем проблему утилизации. Ежегодно на 5% увеличивается объем так называемого электронного мусора (e-waste) – мировой свалки отработавшей компьютерной техники. В процессе функционирования, некоторых из них, например, принтеров, выделяется озон, который оказывает негативное воздействие на человека.

Опосредованный вклад ИТ в выброс  $\text{CO}_2$  и связанный с этим парниковый эффект составляет по разным оценкам 2-2,5%; он возрастет почти вдвое к 2020г. до 4% и станет эквивалентен выхлопу авиационных двигателей мирового парка самолетов. По существующим оценкам каждый запрос в сети Интернет имеет свою негативную  $\text{CO}_2$ -метрику, составляющую десятые грамма – совсем малый, казалось бы уровень, однако при умножении на количество пользователей и обращений получаются колоссальные цифры.

Таким образом, фактор двойственности для информационных технологий в контексте экологических проблем также имеет место и требует учета.

### 0.1.3 Безопасность

Еще один аспект – влияние ИТ на безопасность критических объектов или, как их еще называют, объектов с высокой ценой отказа. Вопросы функциональной (safety) и информационной (security) безопасности ИТ-систем, конечно же, являются еще одной стороной рассматриваемой проблемы – роли ИТ в устойчивом и безопасном развитии цивилизации. Они представляют собой, с одной стороны, инструмент, осуществляющий управление функциями различных технических или организационно (социо)-технических комплексов,



передачу, хранение и обработку информации, а также средство достижения высокой надежности и безопасности этих комплексов, с другой, – ИТ-системы являются объектом обеспечения указанных свойств.

Проявление фактора двойственности для ИТ-систем здесь очень характерно. Их безотказная работа обеспечивает (должна обеспечить) эффективность комплекса в целом и снижает (должна снижать) до приемлемого уровня риски отказов, аварий или ситуаций, связанных с финансовыми или иными потерями. Однако, с другой стороны, отказы самих ИТ-систем могут привести к увеличению вероятности непредотвращения или возникновения таких ситуаций.

Примерами являются компьютерные системы управления реакторными установками АЭС, бортовые системы управления самолетами, пилотируемыми космическими аппаратами, системы обработки информации и управления медицинским оборудованием, банковские информационно-аналитические системы и др., которые, как уже указывалось выше, принято называть критическими (по безопасности, выполняемой миссии или бизнесу).

**Системы аварийной защиты реакторов.** Отказ системы аварийной защиты реактора может привести либо к неостанову при недопустимом превышении температуры, давления в реакторном пространстве, сейсмических колебаниях и др., что чревато катастрофическими последствиями, либо к ложному его глушению и стать причиной серьезных материальных потерь из-за высокой стоимости восстановительных работ.

Каждый пятый отказ оборудования атомных станций связан с отказами информационно-управляющих систем. Однако, благодаря высокой кратности резервирования и реализации жесткой системы государственного регулирования, интегрированной в мировую систему нормирования и проверки выполнения требований по безопасности, эти системы в последние годы не являлись прямыми причинами аварийных или предаварийных ситуаций.

**Авиационные системы.** В авиационных системах подобные отказы обуславливают отмены рейсов, вынужденные аварийные посадки, разрушения и катастрофы с человеческими жертвами. Известно, что наиболее частой причиной аварий в авиации является человеческий фактор. Однако следует учитывать, что во многих ситуациях, этот фактор «срабатывает» в условиях отказов оборудования или тогда, когда ИТ-системы не могут подсказать пилоту или реализовать автоматически правильные решения в сложных погодных условиях, иных ситуациях в силу своего несовершенства или недостаточной надежности.

**Ракетно-космические системы.** Отказы системы управления ракеты-носителя или космического аппарата для пилотируемого проекта аналогичны по своим последствиям отказам авиационных ИТ-систем. Для непилотируемых комплексов они приводят к материальным потерям, срыву миссии в рамках важных научных программ. Классический пример – авария ракеты-носителя «Ariane-5» вследствие отказа системы навигации (из-за программного дефекта, проявившегося в особых условиях функционирования, которые не были верифицированы и учтены при переносе модуля из предыдущей версии, многократно использованной в проекте «Ariane-4»). Она детально проанализирована в докладе комиссии Европейского космического агентства ESA (<http://www.ima.umn.edu/~arnold/disasters/ariane5rep.html>).

Влияние надежности и безопасности компьютерных систем обработки информации и управления на безопасность ракет-носителей и космических аппаратов год от года растет: в 2000-е годы около 20 процентов аварий были вызваны их отказами. Эта статистика для трех последних лет космонавтики стала еще более удручающей.

**Медицинские системы.** Для систем управления медицинским оборудованием отказы аппаратных или программных средств приводят к получению искаженной информации, следствием чего может быть неверно поставленный диагноз и/или принятое оперативное решение, а также реализация процедур, опасных для здоровья или жизни пациента вообще, выполняемых под управлением компьютерной системы.

Примером такой ситуации явился отказ, вызванный дефектом программных средств, приведший к переоблучению и летальному исходу нескольких пациентов при использовании медицинской системы «Theras-25». Понятно, что по мере «вторжения» информационных технологий в медицинские системы, которые реализуют управляющие функции (даже под контролем врачей), влияние рассматриваемого фактора будет возрастать.

**Банковские системы.** Следствием отказов банковских информационно-аналитических систем, биржевых ИТ-систем являются материальные потери, исчисляемые миллионами долларов, утрата репутации банками или биржевыми игроками [4].

Необходимо отметить, что для таких систем, кроме традиционных отказов, вызванных отказами аппаратных средств (серверов, компьютеров центров обработки данных (data centers), поддерживающих облачные технологии), или программными дефектами, большая часть ситуаций, связанных с нарушением или блокированием выполнения функций, обусловлена несанкционированными и, как правило, целенаправленными действиями (атаками) на ресурсы этих систем. Эта составляющая, похоже, будет становиться преобладающей для ИТ-

систем для разных приложений и вносить особую специфику в разработку и применение зеленых, экологических и безопасных технологий.

### **0.1.4 Причины двойственности ИТ-систем**

Краткий анализ позволяет сделать понятный вывод: применение ИТ в контексте рассмотренных цивилизационных вызовов (энергетического или энергоресурсного, экологического и безопасного) имеет две стороны – позитивную и негативную или, в некотором смысле, проблемную.

В энергетическом секторе ИТ стали мощным потребителем электроэнергии, в экологическом – дополнительной причиной увеличения выброса CO<sub>2</sub> и источником электронного мусора, в области функциональной безопасности – фактором аварийно опасных отказов. Можно указать общую причину для всех вызовов: она обусловлена, прежде всего, возрастанием зависимости всех систем от информационных технологий.

Двойственность ИТ-систем для критических приложений связана, прежде всего, их сложностью, большим числом и разнообразием компонентов. Это увеличивает энергопотребление, усложняет жизненный цикл, требуя рассмотрения всех его фаз, включая утилизацию.

Растет вероятность отказа и это требует принятия адекватных мер. В частности, встраивания средств диагностирования, обеспечивающих своевременное и точное определение причины и места отказа, более глубокого, многократного и versionного резервирования, а также оперативной автоматической реконфигурации и замены отказавших компонентов при исчерпании резерва. Однако, увеличение избыточности ведет к росту энергопотребления, возрастание затрат на переработку и т.д.

Кроме того, с точки зрения безопасности эта двойственность объясняется тем, что большая часть компонентов являются программными средствами и/или средствами, которые аппаратно реализуют программно разработанные функции. Это увеличивает риски отказов, вызванных проявлением проектных дефектов и уязвимостей, не выявленных при верификации. Их снижение требует дополнительных затрат, в том числе и энергетических (даже тогда, когда речь идет о программной реализации).

Еще одна причина двойственности состоит в том, что такие системы могут являться объектом воздействий (физической или информационной природы; целенаправленных или непредумышленных, детерминированных или случайных), которые также могут привести

либо к отказам в надежном смысле, либо к блокированию функций или ресурсов системы, что эквивалентно по последствиям отказу. Кроме того, вследствие таких воздействий может изменяться информационное окружение системы, что в итоге увеличивает риски подобных отказов. Для их снижения нужны дополнительные меры (шифры, системы защиты и компенсации последствий), что также непременно ведет к увеличению энергозатрат и других ресурсов.

Таким образом, двойственность ИТ-систем обуславливает необходимость всестороннего и комплексного рассмотрения всех аспектов (энергетического, экологического и безопасного – в контексте функциональной и информационной безопасности) во взаимосвязи и взаимозависимости.

## **0.2 Зеленые информационные технологии в узком и широком смысле**

Исходя из рассмотренного выше, ИТ-системы являются одновременно средством и объектом энергосбережения. В данной книге основное внимание уделяется, прежде всего, анализу информационных технологий и ИТ-систем как объектов энергосбережения и рассмотрению методов снижения энергопотребления и повышения энергоэффективности при учете требований к другим характеристикам – производительности, надежности, безопасности. Информационные технологии являются частью соответствующих энергосберегающих, экологических и безопасных технологий. На рис.0.1 такие технологии выделены пунктирными линиями различных типов. Далее более детально будут проанализированы терминологические и методологические аспекты информационных технологий, которые получили наименование «зеленых».

В узком смысле – это, прежде всего, энергосберегающие и энергоэффективные информационные технологии и ИТ-системы. На рис.0.1 такому узкому понятию зеленых ИТ соответствует левая сплошная окружность. В широком смысле понятие зеленых ИТ включает также составляющие экологичности и безопасности. На рис.0.1 такому понятию соответствует три объединенных внутренних окружности со сплошной заливкой.

При более детальном анализе могут быть выделены различные подтехнологии, соответствующие непересекающимся и пересекающимся частям энергосберегающих, экологических и безопасных ИТ (рис.0.2). В частности, область 1 соответствует ИТ, общим для энергосберегающей и экологичной составляющих, т.е. таким технологиям, которые обеспечивают снижение энергопотребления ИТ-системами и при этом не

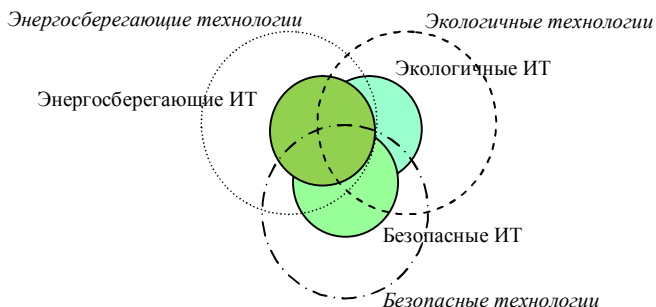


Рис.0.1. Энергосберегающие, экологичные и безопасные технологии

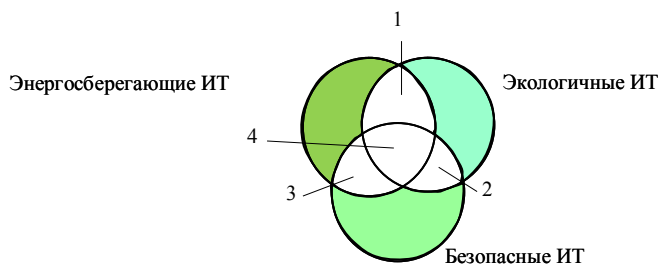


Рис.0.2. Энергосберегающие, экологичные и безопасные ИТ

используют (или используют минимальное количество) вредных (неэкологических) материалов. Примером могут быть сенсорные сетевые технологии, компонентами которых являются сенсоры из экологически безопасных материалов.

Область 2 соответствует аналогичной комбинации для безопасных и экологических ИТ, а область 3 – технологиям, позволяющим обеспечивать безопасность, минимизируя энергопотребление. Область 4 является общей для всех трех типов информационных технологий.

При более детальном анализе могут быть выделены различные подтехнологии, соответствующие непересекающимся и пересекающимся частям энергосберегающих, экологических и безопасных ИТ (рис.0.2).

Кроме того, объединению этих трех групп ИТ соответствует так называемые «sustainable IT» или (экологически) устойчивые ИТ, которые являются следующим уровнем обобщения в данной области.

### 0.3 Задачи развития зеленых ИТ

Насколько многообразен мир информационных технологий и систем, настолько объемными и интересными являются задачи, связанные с зелеными ИТ. Эти задачи могут классифицированы по нескольким уровням: уровень компонентов, систем, сетей, ИТ-инфраструктур.

#### 0.3.1 Компоненты

Если говорить об уровне компонентов, то здесь выделяют две группы – аппаратных (технических) и программных средств. Они не являются простыми и также допускают детализацию в контексте зеленых ИТ.

**Аппаратные средства.** Для аппаратных средств, прежде всего, микросхем различного назначения и конструкции существуют решения, позволяющие уменьшить энергопотребление. Они базируются, в частности, на применении:

- специальных электронных схем, технологий и парадигм вычислений;
- режимов пониженного энергопотребления («спящих» и «полуспящих») для всего кристалла или его отдельных частей;
- схемотехнических проектных решений, минимизирующих число одновременно переключающихся элементов кристалла и таким образом уменьшающих броски тока;
- схем адаптации в резервированных структурах, каналы которых работают на предельном пониженном напряжении (в этом случае сбой, вызываемые нестабильной работой, парируются за счет структурной или иной избыточности);
- специальных настроек для программируемых кристаллов и др.

Аналогичные подходы применяются и для более сложных аппаратных компонент (модулей, каналов), где могут применяться разные варианты сочетаний методов.

**Программные средства.** Подходы, применяемые для программных средств, не столь однозначны, поскольку их влияние на энергосбережение оказывается опосредованно. Тем не менее понятие «зеленого программного обеспечения» (green software) утвердилось в научно-техническом лексиконе исходя из понимания того, что:

- каждый оператор, языковая конструкция, программный модуль могут иметь свою энергетическую метрику (т.е. характеризуется энергией, потребляемой платформой, на которой реализуется программа);
- разные программные решения отличаются объемом используемых ресурсов (не только энергетических) и могут быть оптимизированы (в том числе и по энергетическому критерию);



- поскольку энергопотребление или энергоэффективность становятся атрибутами качества программного обеспечения (ПО), для их оценки и обеспечения целесообразно использовать процессный подход;

- для оценивания энергетических вариантов ПО необходимо применять специальные аппаратно-программные решения, которые обеспечат точность измерений энергии, потребляемой при выполнении различных приложений.

Таким образом, для зеленого ПО важны задачи уточнения модели качества, в которую должны быть встроены характеристики, которые прямо и/или косвенно учитывают энергетическую составляющую, определения набора используемых метрик, разработки методов измерения соответствующих характеристик, оптимизации процессов и продуктов, получаемых на разных этапах жизненного цикла программного обеспечения по заданным критериям.

### 0.3.2 Системы, сети и инфраструктуры

**Системы и сети.** Для системного уровня характерны более сложные и комплексные задачи, которые учитывают специфику объектов, с которыми взаимодействуют ИТ-системы. Для встроенных систем и мобильных устройств энергетические ограничения часто являются критичными, что предопределило появление терминов «energy critical systems», «energy modulated computing», «resource constrained devices», а также множества задач, где критерий энергоэффективности является определяющим.

Для компьютерных сетей характерны задачи компонентного уровня и задачи оптимизации энергоресурсов при обмене данными. В какой-то степени они являются традиционными сетевыми задачами (прежде всего, оптимизации трафика), однако, определенная специфика в связи с прямыми энергозатратными критериями все-таки появляется.

Это особенно характерно для беспроводных сетевых технологий, где исключительно актуальными, с точки зрения зеленых ИТ, являются задачи минимизации числа и оптимизация размещения точек доступа, поиск и поддержка их энергосберегающих режимов.

Здесь важным и созвучным с экологическими проблемами является уменьшение времени и интенсивности вещания в беспроводных сетях.

**ИТ-инфраструктура.** Для кластерных систем и облачных инфраструктур дополнительной и ключевой задачей является снижение энергопотребления центрами обработки данных (дата-центрами), отвод и разное использование тепла, выделяемого в процессе вычислений.

Первая задача решается на компонентном и архитектурном уровнях путем:

- применения новых технологий, таких как Cloud-on-Chip, которые позволяют снизить энергозатраты, а точнее повысить энергоэффективность за счет внедрения следующего поколения чипов, специализированных под облачные вычисления;

- оптимизации режимов и алгоритмов работы платформ для облачных вычислений; в частности, оптимизации распределения задач по виртуальным ресурсам по комплексному критерию «производительность – надежность – энергозатраты»;

- разработки гибридных (облачных и мобильных) архитектур, которые обеспечивают более высокую энергоэффективность.

На смену традиционным воздушным системам охлаждения приходят жидкостные системы и здесь актуальны задачи поиска более совершенных конструкций, жидкостей, обладающих диэлектрическими свойствами, и подсистем отвода тепла.

### 0.3.3 Модели

Классификационными признаками для зеленых ИТ могут быть также типы моделей (алгоритмов), направленных на снижение энергопотребления и повышение энергоэффективности. Часть из них упоминалась выше и связана с оптимизацией алгоритмов функционирования с учетом энергетических критериев.

Существуют также ряд новых задач, которые формулируются и частично решаются на модельном уровне:

- разработка математического аппарата и методов зеленой логики для программируемых кристаллов (программируемых логических интегральных схем): речь идет о поиске электронного и логического базиса для естественно зеленых кристаллов (naturally green logic and chips) – по аналогии с базисами для естественно надежных цифровых систем (naturally reliable/dependable systems) и их возможной интеграции;

- совершенствование математических методов оптимизации систем с многоуровневой работоспособностью (деградацией и восстановлением – multi-state systems);

- развитие моделей и методов так называемой малоресурсной криптографии (light-weight cryptography) для энергетически критичных систем и др.

В целом можно говорить о таких оптимизационных задачах, в которых энергетических критериев становится либо целевой функцией, либо одним из обязательных и жестких ограничений.

## 0.4 Зеленая ИТ-культура

Отдельной задачей с ее различными составляющими является развитие зеленой ИТ-культуры, которая должна являться частью общей зеленой культуры, направленной на выполнение трех заповедей поведения человека, создаваемых и используемых им технологий и систем: «не навреди», «сохрани», «приумножь».

Зеленая культура, являясь частью общечеловеческой культуры (рис.0.3), направлена на формирование, распространение и утверждение ценностей, связанных с сохранением и приумножением всех составляющих окружающей среды.

Люди, работающие в сфере ИТ-технологий, или как их часто называют «айтишники» (таких специалистов в мире миллионы, а в Украине десятки тысяч), по своей ментальности склонны к поиску оптимальных решений, весьма педантичны и достаточно дисциплинированы. По этим причинам, они, может быть как никакие иные группы из инженерного сообщества, способны и должны быть активными носителями зеленой культуры и обогащать ее новыми идеями и активностями.

Как и представители любой профессиональной группы, они должны не только поддерживать принципы зеленой культуры, но и привносить в нее специфические позитивные элементы из ИТ-сферы.

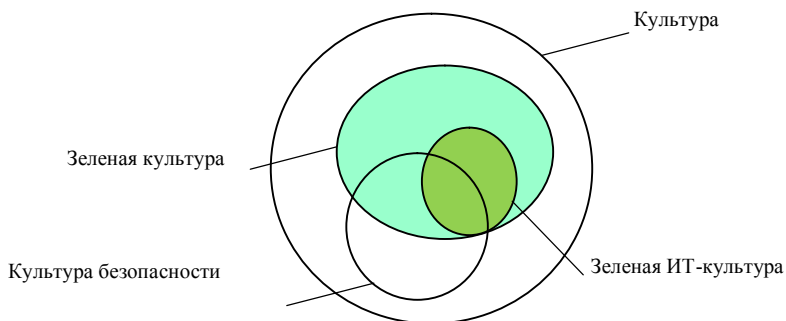


Рис.0.3. Зеленая культура и зеленая ИТ-культура

Следует заметить, что уже достаточно прочно утвердившееся в области создания и использования потенциально опасных систем понятие «культура безопасности» имеет общие части как с понятием «зеленая ИТ-культура», так и с понятием «зеленая культура» в целом. Здесь возможны параллели с рассмотренными ранее соотношениями понятий (рис.0.1 и 0.2).

Поэтому наполнение реальным содержанием понятия «зеленая ИТ-культура» является важной и интересной социотехнической и социокультурной задачей.

## **0.5 Проект Green Computing and Communication**

### **0.5.1 Предпосылки**

**Европейские проекты.** Интерес к зеленым информационным технологиям является естественным для специалистов, которые занимаются проблемами безопасности ИТ-систем или критического компьютеринга. Поэтому идея TEMPUS-проекта, посвященного зеленым ИТ, родилась в процессе выполнения предшествующих проектов (на рис.0.4 показана хронология и дана их краткая характеристика). Речь идет о двух проектах по европейской программе TEMPUS:

- MSc and PhD studies in aerospace critical computing (TEMPUS-MASTAC, 2006-2009);
- National software engineering network of centers of innovative academia-industry handshaking (TEMPUS-SAFEGUARD, 2010-2013).

В первом из них были разработаны учебные курсы для специалистов в области гарантоспособных (надежных и безопасных) компьютерных систем для аэрокосмических и других критических, с точки зрения функциональной безопасности, приложений.

В частности, разработаны курсы для магистров и докторантов, связанные с отказоустойчивыми системами на программируемой логике и микропроцессорах, гарантоспособными сервис-ориентированными системами и их моделированием, формальными методами разработки и анализа функциональной безопасности и экспертизе критического ПО.

Во втором – проблемы безопасности были рассмотрены шире – не только на системном, а и на инфраструктурном уровне (уровне «системы систем» «system of systems»).

Примером критических инфраструктур являются энергосистемы, состоящие из электростанций (в том числе и АЭС), систем преобразования, передачи и распределения электроэнергии.

Кроме того, расширилась целевая группа, на которые был направлен проект: магистерские и докторские (аспирантские) курсы были дополнены тренингами для специалистов в области функциональной безопасности разных предметных областей.

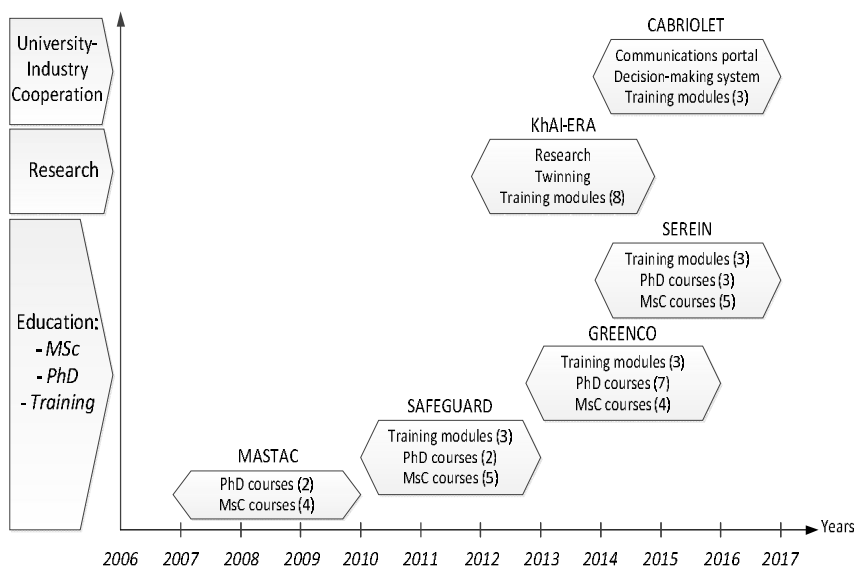


Рис.0.4. Проект GreenCo в хронологии европейских проектов  
(V. Kharchenko, C. Phillips, A. Boyarchuk et al. FPGA-based critical computing:  
TEMPUS and FP7 projects // Proceedings of WS EWME2014, Tallinn, May 14-16, 2014)

**Исследования и разработки.** Параллельно с выполнением указанных проектов на кафедре компьютерных систем и сетей Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ» были начаты разработки и исследования в области:

- энергоэффективных проектов с использованием технологии FPGA (в частности, систем с диверсной синхронизацией, минимизирующей число переключений элементов кристалла, и средств измерения энергопотребления при выполнении различных программ, позволяющих селективировать части проекта);
- адаптивных беспроводных сетей с точками доступа, изменяющими свои функциональные и энергетические параметры в зависимости от числа и размещения абонентов;
- безопасности интеллектуальных энергосетей и др.

Они проводились также в рамках параллельно стартовавшего проекта KhAI-ERA по европейской программе FP7 (2011-2014). Проект в части встроенных систем (Topic C. Dependable embedded systems for aerospace and medicine) выполнялся исследовательской группой по гарантоспособным вычислениям кафедры компьютерных систем и сетей ХАИ совместно с центром биомедицинских ИТ (Tallinn University of Technology, Эстония).

В ходе выполнения проектов TEMPUS также шел обмен идеями с коллегами из университетов и исследовательских центров Украины (Хмельницкий национальный университет, Одесский национальный политехнический университет, Институт проблем моделирования в энергетике НАНУ), Ньюкасла, Лондона (Великобритания), Неаполя, Пизы (Италия), Турку (Финляндия), Стокгольма (Швеция).

Следует подчеркнуть, что одним из пионеров в области формирования и развития идей зеленого программного обеспечения и зеленых ИТ не только в Украине, а и в мире является профессор Сидоров Н.А. (Национальный авиационный университет, Киев). Первые его работы, связанные с повторным использованием и утилизацией ПО, были опубликованы в конце 80-х – начале 90-х годов и формировали зеленые ценности в программной инженерии. Далее эти идеи были развиты и представлены в серии статей по экологии программного обеспечения и зеленым ИТ (журнал «Инженерия программного обеспечения», 2010-2014гг). В этих работах не только представлены элементы методологии программных экосистем, а и описаны практические примеры ее внедрения в инженерии и учебном процессе факультета компьютерных наук НАУ.

**Магистерские программы.** В процессе формирования идеи подготовки проекта, посвященного зеленым ИТ, изучался опыт национальных, европейских и американских университетов в данной области. К этому времени были разработаны магистерские программы по отдельным направлениям зеленых ИТ в нескольких университетах США, а также лидирующем в этой области британском университете Лидса (School of Computing and Creative Technologies, Leeds Metropolitan University, руководитель профессор Colin Pattinson).

В Лидсе два модуля Green Computing Strategies и Green Computing Technologies являются частью реализуемой в течение последних лет магистерской программы Sustainable Computing. Соответствующие разделы в ряде дисциплин были введены при подготовке специалистов и магистров профессором Н.А. Сидоровым в рамках концепции зеленого факультета.

**Научно-технические издания.** К моменту написания предложений по проекту TEMPUS-GreenCo (2011г.) фактически отсутствовали не только учебные издания, а изданные полномасштабные монографии. К этому времени было опубликовано несколько книг, которые касались частных вопросов в области зеленых ИТ, прежде всего, снижения энергопотребления и теплоотвода от оборудования дата-центров.

Это можно объяснить приведенными выше цифрами по энергопотреблению такими центрами и началом активного развития и внедрения облачных технологий в конце прошлого десятилетия. Следует отметить несколько изданий, таких как:



- Toby Velte, Anthony Velte, Robert Elsenpeter. Green IT: Reduce Your Information System's Environmental Impact While Adding to the Bottom Line, McGraw Hill Companies, 2008. – 281p.;

- John Lamb. The Greening of IT: How Companies Can Make a Difference for the Environment, IBM Press, 2009. – 305p.;

- Greg Schulz. The Green and Virtual Data Center Hardcover, Taylor & Francis Group, 2009. – 367p.;

- Marty Poniatowski. Foundation of Green IT: Consolidation, Virtualization, Efficiency, and ROI in the Data Center, Prentice Hall, 2009. – 352 p.

В части из них рассматривались проблемы экономии ресурсов ИТ-офисов, и речь шла не только об энергетических, а и иных ресурсах, включая расходные материалы (бумага, картриджи и т.д.). В ряду первых книг следует отметить издание по зеленым ИТ для «чайников»:

- Carol Baroudi, Jeffrey Hill, Arnold Reinhold, Jhana Senxian. Green IT For Dummies, Wiley Publishing Inc., 2009. – 349p.

Информация по этим и другим изданиям дана на сайте <http://www.amazon.com/Books-about-Green-Cloud-Computing/lm/R230D9RE43WJKA>).

В более позднее время было издано несколько книг (коллективных монографий):

- Harnessing green IT: principles and practices/ San Murugesan, G. R. Gangadharan (edits), John Wiley and Sons Ltd, 2012. – 389 p.;

The Green Computing Book/ Wu-chun Feng (edit.), Taylor & Francis Group, 2014. – 337 p.

Первую из них отметим особо, поскольку она наиболее полно покрывает всю проблематику зеленых ИТ. Интересно отметить, что основные разделы этой книги оказались созвучны с перечнем курсов, которые были включены в проект TEMPUS-GreenCo. Вторая книга продолжает ряд изданий по зеленым дата-центрам.

Следует сказать, что будущие участники проекта начали проникаться идеями культуры безопасности и зеленой культуры задолго до его подготовки. Это происходило в рамках:

- сообщества конференции DESSERT (Dependable Systems, SERVICES and Technologies), стартовавшей в 2006 году, и образованного двумя годами позже DESSERT-Клуба,

- кооперации с НПП «Радий» и Государственным НТЦ ядерной и радиационной безопасности, других организаций, работающих в сфере атомной энергетики и авиации (НТСКБ «Полисвит»).

Для них понятие культуры безопасности было частью профессионального менталитета и естественным образом трассировалось с зеленой культурой.

### 0.5.2 Концепция

**Вертикальная интеграция и адаптивность.** В Украине и других постсоветских странах магистерские программы в области зеленых ИТ к моменту подачи проекта отсутствовали, хотя некоторые вопросы энергосбережения для ИТ-систем изучались в объеме отдельных тем, проводились исследования и разработки, которые не были объединены единой парадигмой. Поэтому концептуальным решением было не только обобщить имеющийся опыт национальной и западных высших школ, адаптировать и разработать соответствующие курсы, а и создать и внедрить уникальную, по нашему мнению, образовательную программу в этой области, которая:

- имела бы вертикально-интегрированную трехуровневую структуру «магистратура-докторантура-инженерный тренинг-центр»;
- покрывала основные домены ИТ-систем: от кристалла процессора или программируемого кристалла до облачных инфраструктур;
- учитывала жизненный цикл зеленых ИТ;
- включала не только инженерные, а и социальные аспекты зеленых ИТ;
- естественным образом продолжала проекты и программы в области критического компьютеринга и ИТ-безопасности, которые выполнялись кафедрой компьютерных систем и сетей ХАИ и их партнерами;
- вписывалась в парадигму устойчивого развития и конкретизировала ее применительно к зеленым ИТ;
- могла адаптироваться под различные информационные технологии и домены.

Создаваемое методическое обеспечение для проекта включает лекционные материалы, практикумы (лабораторные исследования, мини-проекты, семинары, тренинги), тесты, рекомендации по самостоятельному изучению курсов.

**Инновационность.** Еще одним концептуальным положением проекта является его инновационность, поскольку:

- курсы строятся на основе результатов исследований и разработок его авторов, представляющих университеты и научные центры разных стран;
- получаемые результаты должны быть частью развивающейся кооперации с ИТ-индустрией и другими сферами и способствовать созданию start-up и spin-off компаний;
- разрабатываемые магистерские и докторские курсы, а также тренинговая часть проекта ориентируется на получение коммерческого успеха посредством предоставления услуг по дистанционному образованию, вебинаров и т.д.;
- сформированные и систематизированные в рамках проекта знания и технологии должны развиваться далее в проектной деятельности по созданию энергоэффективных и безопасных систем.

### 0.5.3 Консорциум

Концепция, основные задачи и структура проекта TEMPUS-GreenCo (Green Computing and Communication) были разработаны кафедрой компьютерных систем и сетей ХАИ совместно с коллегами из Ньюкаслского университета (грантхолдер – профессор Chris Phillips). Проект подавался в феврале 2012г., был одобрен в сентябре и стартовал в декабре 2012г. со сроком завершения декабря 2015г.

Структура консорциума сформировалась исходя из схемы  $(4 + 1) \times 3$ , т.е. в проект его основными разработчиками были приглашены по 5 участников от стран Евросоюза, Украины и Российской Федерации. Каждая из сторон включает группы 4 университетов и 1 академического института. При этом также учитывались требования к обеспечению регионального и доменного покрытия.

В консорциум вошли:

а) от Евросоюза:

- University of Newcastle upon Tyne, UK,
- Leeds Metropolitan University, UK,
- Zilinska Univerzita v Ziline, Slovakia,
- University of Ioannina, Greece,
- Institute of Information Science and Technologies, National Research

Council of Italy;

б) от Украины:

- National Aerospace University “KhAI”,
- Odessa National Polytechnic University,
- Donbass State Technical University,
- Uzhgorod National University,
- G.Ye. Pukhov Institute for Modelling in Energy Engineering, National Academy of Science of Ukraine,
- Ministry of Education and Science of Ukraine;

в) от Российской Федерации:

- Belgorod State Technological University,
- North-Caucasus State Technical University,
- Perm National Research Polytechnic University,
- Saratov State University,
- Institute of Problems of Precision Mechanics, Russian Academy of

Sciences.

### 0.5.4 Задачи

**Задачами** проекта являются:

а) разработка 4 учебных курсов для магистров:

- Основы зеленых ИТ,
- Технологии зеленого компьютеринга,

- Технологии зеленых коммуникаций,
- Технологии зеленых регуляторов и робототехники;
- б) разработка 7 учебных курсов для аспирантов (докторантов):
- Стандарты в области зеленых ИТ,
- Исследования и разработки в области зеленых FPGA-систем,
- Исследования и разработки в области зеленых мобильных систем,
- Исследования и разработки в области беспроводных систем и сетей,
- Исследования и разработки в области зеленого ПО,
- Исследования и разработки в области зеленых облачных технологий,
- Исследования и разработки в области смарт-грид систем;

в) разработка 3 тренинг-курсов:

- Техники и утилиты для зеленого компьютеринга,
- Техники и утилиты для зеленых коммуникаций,
- Техники и утилиты для кооперации и менеджмента в области зеленых ИТ.

Магистерские курсы формируют понятийную базу зеленых ИТ и дают обзор существующих технологий в области энергосберегающего компьютеринга, сетевых решений и решений для АСУ ТП и робототехнических систем.

Докторантская часть включает курсы по исследованиям и разработкам по наиболее «горячим» направлениям зеленых ИТ на уровне кристаллов, систем, сетей и инфраструктур. Кроме того, здесь изучается нормативная база в данной и смежных областях.

Тренинг-модули ориентируются на прикладные аспекты – инженерные методики и инструментальные средства для разработки, внедрения и менеджмента для зеленых ИТ-систем.

**Структура и взаимосвязь курсов** представлена на рис. 0.5.

Кроме разработки учебных курсов еще одной важной задачей проекта является разработка концепции и создание двух центров подготовки докторантов, так называемых PhD-инкубаторов (в Украине – на базе ХАИ, в Российской Федерации – на базе Белгородского государственного технологического университета). В данной книге этот вопрос в явном виде не рассматривается. Однако, излагаемые темы, с одной стороны, базируются и на результатах исследований, проводившихся аспирантами и докторантами партнерских университетов и институтов, с другой, – могут быть отправной точкой для исследований и разработок в области зеленых ИТ.

## 0.6 Общие сведения о книге

### 0.6.1 Почему «зеленая ИТ-инженерия»?

Название книги связано с общим замыслом проекта, направленного на системное изучение аспектов зеленых ИТ. Ранее нами использовались термины «зеленые ИТ», «зеленые ИТ-системы», которые еще будут далее

обсуждаться и более строго вписываться в концепцию зеленых технологий.

Современные ИТ включают аппаратные (программируемые), программные, сетевые (коммуникационные) и инфраструктурные (системные) средства, которые образуют самостоятельную и в большой степени самодостаточную научно-технологическую отрасль в инженерии.

Поэтому, на наш взгляд, термин ИТ-инженерия целесообразно использовать как объединяющий для существующих сейчас и утвердившихся терминов «компьютерная инженерия» (computer engineering), «программная инженерия» (software engineering), а также относительно новых «сетевая (коммуникационная) инженерия» (networking или communication engineering) и «инфраструктурная инженерия» (system of system или infrastructure engineering).

Указанные понятия не являются полностью ортогональными (независимыми). Подтверждением является то, что системное программирование, программируемые средства (микропроцессоры, микроконтроллеры, FPGA), программирование и интеграция встроенных приложений, мобильных устройств, киберфизических систем и др., включая процессы разработки тестирования и верификации, традиционно относятся к компьютерной инженерии несмотря на существование направления «программная инженерия». Однако все эти направления, пересекаясь, дополняют друг друга.

Поэтому используя термин «ИТ-инженерия», логично использовать его производную – «зеленая ИТ-инженерия».

## 0.6.2 Структура и содержание

**Структура.** Данная книга имеет целью предоставить теоретические и прикладные материалы для лекционной части курсов проекта TEMPUS-GreenCo. Структура книги отражает структуру, представленную на рис. 0.5, и состоит из 36 разделов, разделенных на восемь частей, которые, в свою очередь, формируют на два тома (рис.0.6).

Сплошными линиями показаны логические связи от первой части (основные понятия и принципы) к другим разделам, пунктирными – связи между частями внутри томов и между томами.

Каждый из разделов завершается выводами, вопросами для самоконтроля и списком литературы. Ссылки на литературу нумеруются в пределах раздела.

**Характеристика содержания.** Первая часть посвящена изложению основных понятий и принципов зеленых ИТ и объединяет разделы 1-3.

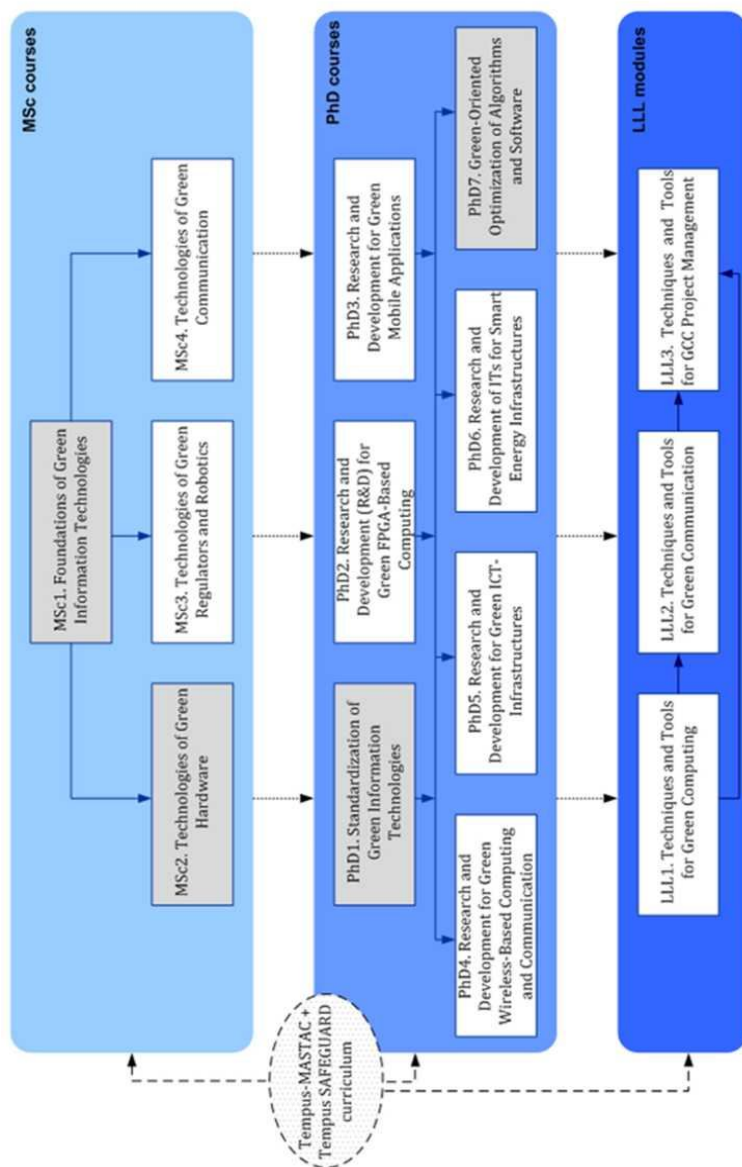


Рис.0.5. Проект GreenCo в хронологии европейских проектов (V. Kharchenko, A. Gorbenko, V. Sklyar, C. Phillips. Green Computing and Communications in Critical Application Domains: Challenges and Solutions // Proceedings of the 9th Conference DT2013, Zilina, May 28-30, 2013)



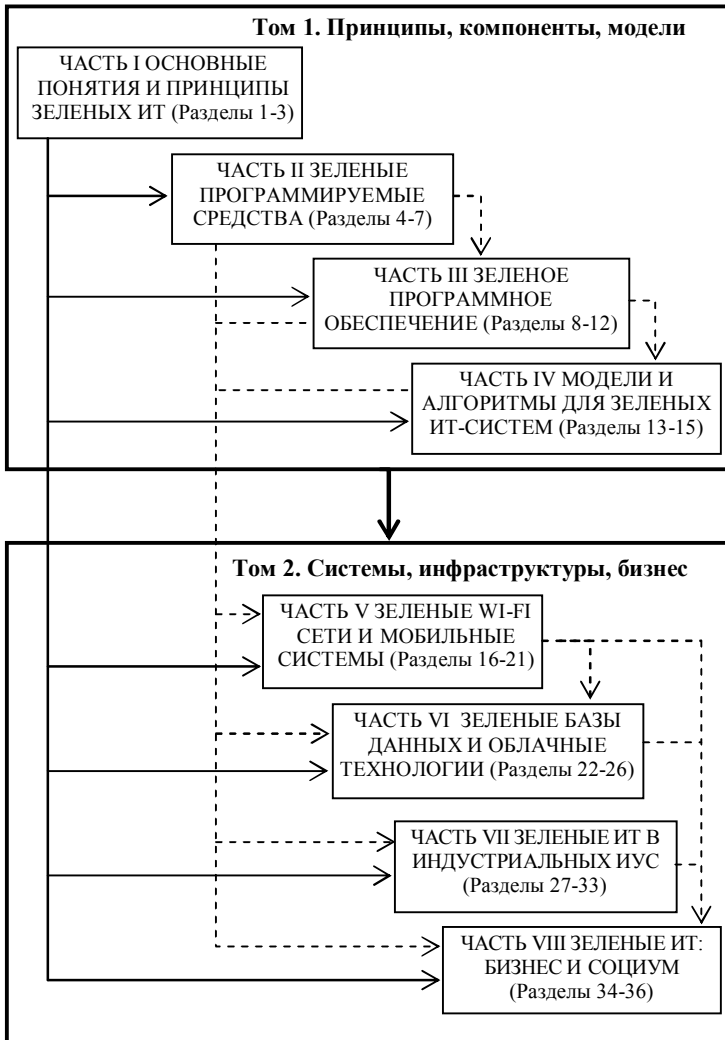


Рис. 0.6. Структура книги

В первом разделе обсуждается терминология и таксономическая схема зеленого компьютеринга, метрики энергосбережения и энергоэффективности, излагается Манифест зеленых ИТ. Во втором разделе рассматривается ресурсный подход и основанные на нем методы

вычислений, в третьем – стандарты, относящиеся к области зеленых ИТ и принципы анализа ИТ-систем при модернизации в интересах энергоэффективности.

Во второй части описываются результаты, относящиеся к аппаратным и программируемым компонентам, а именно: зеленой программируемой логике на основе технологии FPGA и энергоэффективным отказоустойчивым базисам (раздел 4); экспериментам по анализу и повышению энергоэффективности FPGA проектов (с использованием настроек среды Quartus II и специальных решений) и программно-аппаратной архитектуры CUDA, которая позволяет выполнять вычисления с использованием графических процессоров NVIDIA, поддерживающих технологию GPGPU (раздел 5); методам и средствам измерений энергопотребления в FPGA, микропроцессорах и мобильных устройствах (раздел 6); методикам верификации FPGA проектов с учетом требований по энергопотреблению (раздел 7).

В третью часть вошли разделы, посвященные зеленому программному обеспечению, а именно: обсуждению основных понятий и методов зеленой программной инженерии (раздел 8); анализу эволюции моделей качества ПО в контексте стандарта ISO25010, включая оценки характеристик моделей, относящихся к зеленым аспектам, и прогнозу их развития (раздел 9); рассмотрению энергетического подхода к разработке и выбору разработанного ранее ПО (раздел 10); совершенствованию принципов разработки и описанию метрик для оценивания зеленого ПО (раздел 11); анализу методов создания и оценивания качества экологических человеко-машинных интерфейсов, которые обеспечивают адаптацию к состоянию оператора (раздел 12).

Разделы, образующие часть IV, описывают математические модели и методы улучшения энергоэффективности ИТ-систем на основе аппарата многозначной логики и логического дифференциального исчисления (раздел 13), методы так называемой малоресурсной криптографии (раздел 14), а также методы оптимизации алгоритмов для параллельных вычислений с учетом ресурсных ограничений (раздел 15).

В пятую часть (том 2) вошли разделы, посвященные зеленым сетевым и мобильным технологиям. В разделе 16 описываются методы снижения энергозатрат в компьютерных сетях, включая различные алгоритмы управления трафиком и создания сетей, толерантным к временным задержкам. Раздел 17 систематизирует решения (интерфейсы, протоколы, платформы) в области энергоэффективных и так называемых всепроникающих сенсорных сетей, используемых для экологического мониторинга и других приложений.

В разделах 18 и 19 приводятся экспериментальные результаты и предлагаемые решения по адаптивным беспроводным сетям на основе управления шириной окна доступа, энергетическими характеристиками с

учетом количества, размещения и типов абонентов и использования мобильных точек. Разделы 20, 21 посвящены зеленым технологиям для мобильных систем: первый из них – обзору программно-аппаратных решений для снижения энергопотребления и разработке ПО, поддерживающего энергосберегающие режимы в мобильных устройствах; второй – анализу и исследованию характеристик гибридных мобильно-облачных систем.

Технологии зеленых баз данных (раздел 22) и облачных технологий (разделы 23-26) описываются в шестой части. В первом разделе данной части проведен анализ методов оптимизации операций и приведены результаты экспериментального оценивания разных вариантов хранения иерархических данных в БД по критериям производительности и затрат. В последующих разделах описываются принципы построения зеленых облачных ИТ-инфраструктур (раздел 23); анализируются энергосберегающие дата-центры и облачные решения на основе платформы OpenStack (раздел 24); описываются гибридные облачные архитектуры на основе пиринговых сетей и исследуются их математические модели, а также формулируется концепция распределенной Cloud-системы, объединяющей технологии Grid (распределенной децентрализованной) и Cloud (централизованной системы с поддержкой технологии виртуализации) (раздел 25); предлагаются методы планирования безопасных и энергоэффективных вычислений в гибридном облаке при разных вариантах его организации (раздел 26).

Седьмая часть описывает индустриальные ИТ-системы, реализующие зеленые технологии в разных приложениях: беспроводных системах мониторинга и управления энергосистемами и инфраструктурами (раздел 27); пакетах для проектирования энергоэффективных АСУ с примерами их применения для систем цементного производства (раздел 28); энергоэффективных системах управления холодильными агрегатами на основе применения законов управления дробного порядка (раздел 29); информационно-управляющих системах для энергообеспечения университета (раздел 30); системе управления электропитанием магнитных элементов линейного ускорителя электронов на основе энергоэффективных микроконтроллеров MSP430 (раздел 31); АСУ переработки твердых отходов (раздел 32); энергоэффективных отказоустойчивых бортовых системах автоматического управления летательных аппаратов (раздел 33).

Завершающая восьмая часть включает материалы по экономическим и социальным аспектам зеленых ИТ. В разделе 34 описаны существующие решения для зеленых веб-систем и дан обзор веб-ресурсов, поддерживающих зеленые технологии и зеленую культуру. Раздел 35 дает описание основ экономического анализа разработки, производства и

применения зеленых ИТ-систем. В заключительном разделе 36 описываются модели и направления кооперации университетских кафедр и ИТ-индустрии, включая совместные разработки в области зеленых информационных технологий.

Каждый из томов завершается заключением, в котором уточняются связи изложенного материала с учебными курсами.

### **0.6.3 Авторский коллектив**

Материалы книги подготовлены участниками консорциума, а также представителями других университетов Украины, которые принимали участие в семинарах по проекту, а также конференции DESSERT и ИТС «КриКТехС». При указании авторов разделов их ученая степень и ученое звание, а также организация описываются только при первом упоминании.

Разработка концепции, структуры и научное редактирование книги выполнено д.т.н., профессором Харченко В.С. (кафедра компьютерных систем и сетей ХАИ); им также написаны введение, предисловие ко второму тому, заключение к обоим томам и раздел 1 (часть I, том 1); п.1.3.3 и подраздел 1.6 – написаны совместно с к.т.н. Сиорой А.А. и с д.т.н., профессором Скляром В.В. (НПП «Радий», ХАИ) соответственно. Второй раздел написан к.т.н., доцентом Дрозд Ю.В., д.т.н., профессором Дроздом А.В., д.т.н., профессором Антошук С.Г. и Дроздом М.А. (Одесский национальный политехнический университет), раздел 3 – к.т.н., доцентом Гонтовым С.В. (Донбасский государственный технический университет, Алчевск) и Харченко В.С.

Четвертый раздел (часть II) подготовлен д.т.н., профессором Тюриным С.Ф., Каменских А.Н. (Пермский национальный исследовательский политехнический университет) и Харченко В.С. Раздел 5 подготовили Дрозд А.В., к.т.н., доценты Защелкин К.Я. и Олешук О.В., а также Калининченко В.В. и Милейко С.И. (Одесский национальный политехнический университет). Д.т.н., профессор Горбенко А.В., к.т.н., доценты Мазуренко А.В., Тарасюк О.М. (ХАИ) написали раздел 6, раздел 7 – к.т.н., доцент Одарущенко О.Н., к.т.н. Ивасюк А.О., к.т.н., доцент Стрюк А.Ю., Бульба Е.Н. (НПП «Радий», Кировоград-Полтава).

Восьмой раздел (часть III) написали д.т.н., профессор Маевский Д.А. и Маевская Е.Д. (Одесский национальный политехнический университет), раздел 9 – к.т.н., доцент Гордеев А.А., Гармидаров П.П. (Университет банковского дела Национального банка Украины) и Харченко В.С., раздел 10 – д.т.н., профессор Мищенко В.О. (Харьковский национальный университет имени В.Н. Каразина), раздел 11 – Гонтовой С.В. и Кривцов А.Ю. (Донбасский государственный технический университет, Алчевск), раздел 12 – к.т.н. Орехова А.А.(ХАИ) и Харченко В.С.

Раздел 13 (часть IV) написан к.т.н., доцентом Зайцевой Е.Н., к.т.н., профессором Левашенко В.Г. (Жилинский университет), раздел 14 –

д.т.н., профессором Потием А.В. (ХАИ), раздел 15 – д.ф.-м.н., профессором Андрейченко Д.К. (Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского).

Д.т.н., профессор Нестеренко С.А., к.т.н., доцент Шапорин Р.О. и Нестеренко Ю.С. (Одесский национальный политехнический университет) написали подразделы 16.1-16.4 раздела 16 (часть V, том 2), подраздел 16.5 написала к.т.н., доцент Лукашенко В.В. (Национальный авиационный университет, Киев). К.т.н., доцент Плахтеев А.П., к.т.н., профессор Орехов А.А. (ХАИ) и Плахтеев П.А. (Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет) подготовили раздел 17, Горбенко А.В., Тарасюк О.М. – разделы 18, 21, Яновский М.Э. (ХАИ) и Харченко В.С. – раздел 19, д.т.н., профессор Туркин И.Б., Вдовитченко А.В. и Аль-Кхшаб Синан Самир (ХАИ) – раздел 20.

Подразделы 22.1 (п.22.1.1), 22.2 (часть VI) написали совместно д.ф.-м.н., профессор Буй Д.Б., д.ф.-м.н., професор, академик НАН Украины Редько В.Н, к.ф.-м.н. Сильвейструк Л.Н. (Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко), к.ф.-м.н. Кахута Н.Д. (Университет экономики и права «Крок», Киев) и д.ф.-м.н., д.т.н., профессор Скобелев В.Г. (Институт проблем математики и механики НАН Украины, Донецк), пп.22.1.2, 22.3, 22.4 –к.т.н., доцент Фурманов А.А., Смусенок С.А. и Трубилко А.В. (ХАИ). Раздел 23 написан Меленцом А.В. совместно с Харченко В.С., раздел 24 – Г.Г. Наркайтисом (Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского), раздел 25 – Яновским М.Э., Яновской О.В. (ХАИ), раздел 26 – к.т.н., с.н.с. Поночовным Ю.Л. (Полтавский национальный технический университет имени Юрия Кондратюка) и Харченко В.С.

К.т.н., доцент Брежнев Е.В. совместно с Погребаком Н.М. и Химиченко В.И. (ХАИ) подготовил раздел 27 (часть VII). Сотрудники Белгородского государственного технологического университета имени В.Г. Шухова д.т.н., профессор Рубанов В.Г., к.т.н., доцент Бажанов А.Г. и д.т.н., профессор Магергут В.З. написали раздел 28; Рубанов В.Г. и Каригов Е.Б. – раздел 29; Рубанов В.Г., к.т.н., доцент Белоусов А. В. и Кошлич Ю.А. – раздел 30. К.т.н., доценты Шамраев А.А. и Коваленко А.А. (Харьковский национальный университет радиоэлектроники) написали раздел 31. К.т.н., доцент Юрченко Ю.Б. (ХАИ) совместно с Харченко В.С. написали раздел 32, д.т.н., профессор Кондратенко Ю.П., к.т.н. Козлов А.В. (Черноморский государственный университет имени Петра Могилы) – раздел 33.

Раздел 34 (часть VIII) написали к.т.н. Боярчук А.В. (ХАИ) и Харченко В.С., раздел 35 – к.т.н., доцент Узун Д.Д. (ХАИ), раздел 36 – д.т.н., профессор Скляр В.В., Харченко В.С. совместно со Старовым А.А. - выпускником кафедры компьютерных систем и сетей ХАИ, ныне аспирантом университета Stony Brook University, Нью-Йорк, США.

### 0.6.4 Благодарности

Большую помощь при материалов книги и разработке курсов оказали партнеры по проекту Professor Chris Phillips, Professor Alexandr Romanovsky, Professor Alex Yakovlev (University of Newcastle-upon-Tyne, UK), Professor Colin Pattinson, Dr Ah-Lian Kor (Leeds Metropolitan University, UK), Dr Mario Fusani, Professor Stefania Gnesi, Professor Felicita Di Giandomenico (Institute of Information Science and Technologies, National Research Council of Italy, Pisa), Professor Evangelos Evangelou, Dr Iosif Androulidakis, Dr Theodoros Koukoulis (University of Ioannina, Greece), Professor Vitaly Levashenko, Dr Elena Zaitseva (Zilinska Univerzita v Ziline, Slovakia).

Выражаем также благодарность коллегам по проекту, а также участникам:

- постоянно действующего международного научно-технического семинара «КриКТехС» на базе кафедры компьютерных систем и сетей ХАИ, на котором вопросы зеленых и безопасных технологий рассматривались регулярно на протяжении десяти лет;

- профильных секций конференции DESSERT (Sevastopol, 2012, 2013; Kiev, 2014);

- международных семинаров по зеленому и безопасному компьютерингу (1-4<sup>th</sup> WS GreenSCom, Kharkiv, 2012; Žilina, 2013, 2014; Belgorod, 2013);

- семинаров и школ по проекту TEMPUS-GreenCo (Sevastopol, 2012; Kiev, 2013; Krompachy, 2014; Odessa, 2014) за плодотворное обсуждение результатов, которые изложены в книге.

Рецензирование издания выполнили д.т.н., профессор Мохор В.В. (Институт проблем моделирования в энергетике имени Г.Е. Пухова НАН Украины), Professor Alex Yakovlev (University of Newcastle-upon-Tyne), к.т.н., доцент Сидоренко Н.Ф. (НТСКБ «Полисвит»).

Научный редактор и авторы книги выражают благодарность рецензентам за ценную информацию, методическую помощь и конструктивные предложения, которые высказывались в процессе обсуждения материала.

Персональная признательность научного редактора за креативность и плодотворные дискуссии при формировании и реализации идей в области зеленой ИТ-инженерии коллегам по кафедре ХАИ и ряду проектов д.т.н., профессору Горбенко А.В., д.т.н., профессору Сляру В.В. и к.т.н., доценту Брежневу Е.В., а также одесским коллегам – д.т.н., профессору Дрозду А.В. и д.т.н., профессору Маевскому Д.А. и д.т.н., профессору Тюрину С.Ф. (Пермский ГИПУ)

Кроме того, хотелось бы отметить важность анализа работ, опубликованных до начала проекта и в процессе его выполнения д.т.н., профессором Н.А. Сидоровым (Национальный авиационный

университет) и д.т.н., профессором В.О. Мищенко (Харьковский национальный университет им. В.Н. Каразина).

Авторы выражают также благодарность Харченко Л.Д. за большую работу по технической подготовке рукописи и компьютерной верстки, к.т.н. Боярчуку А.В. и Ильяшенко О.А. – за помощь в поддержке коммуникаций с авторским коллективом двухтомника, Лысенко И.Б. – за многолетнюю конструктивную, качественную и оперативную работу по изданию книг и всех материалов по проектам TEMPUS, а также Татьяне Козиной – за разработку прекрасного дизайна обложек всех проектных книг.

Авторский коллектив и все участники проекта признательны студентам и аспирантам университетов, которые не только прониклись идеями зеленой ИТ-культуры, а и развернули работу по новым инициативным проектам. Это касается, в частности, организаторов и участников студенческой лаборатории по беспроводным и мобильным технологиям, открытой на кафедре компьютерных систем и сетей ХАИ в начале 2014 года, а также слушателей кафедрального студенческого клуба Student Safety and Security System Club.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

**Результаты.** В первом томе книги изложены материалы, относящиеся к основам зеленых ИТ – базовым понятиям, принципам и моделям. Ключевыми являются:

- понятия зеленого компьютеринга, зеленых информационных технологий, зеленой ИТ-инженерии,
- понятия зеленого (аппаратного и программного) обеспечения и др.,
- соответствующие показатели, прежде всего, показатель энергосбережения, энергоэффективность, определяющая приращение производительности или иных важных показателей на единицу энергозатрат.

Важными принципами зеленого компьютеринга и зеленой ИТ-инженерии являются обеспечение баланса:

- по этапам жизненного цикла зеленых ИТ-систем;
- по зеленым характеристикам и другим техническим характеристикам ИТ-систем;
- применяемых методов и мер, направленных на разработку и внедрение зеленых ИТ и ИТ-систем.

Эти принципы позволяют разработать и реализовать методики оптимизации проектируемых и озеленения модернизируемых систем.

Анализ и разработка методов и технологий, относящихся к:

- аппаратным и программируемым средствам на основе технологии FPGA, микропроцессоров и мобильных устройств,
- зеленому программному обеспечению, включая базовые элементы программной инженерии,
- созданию экологичных человеко-машинных интерфейсов,

дали возможность сформировать множество проектных и оценочных решений на компонентном и подсистемном уровнях.

Продемонстрировано использование, в интересах зеленых ИТ, аппарата многозначной логики и логического дифференциального исчисления, а также методов малоресурсной (lightweight) криптографии и оптимизации алгоритмов для параллельных вычислений с учетом ресурсных ограничений. Это позволяет сделать вывод о важности реализации концепции зеленого компьютеринга на этапах разработки математических моделей и алгоритмов.

**Использование материала для курсов.** Материалы разделов первого тома образуют часть трехуровневой образовательной структуры по



зеленым ИТ: магистратура-докторантура-инженерные тренинги. В таблице приведено соответствие разделов данного тома и курсов, разработанных в рамках проекта TEMPUS-GreenCo.

Практические вопросы каждого из курсов излагаются в отдельных учебных пособиях. Методическое обеспечение в целом включает лекционные материалы, практикумы (лабораторные исследования, мини-проекты, семинары, тренинги), тесты, рекомендации по самостоятельному изучению курсов. Некоторые разделы используются в нескольких учебных курсах (или модулях).

Кроме того, на их основе могут формулироваться новые задачи и развиваться исследования в магистерских и кандидатских (докторских) диссертациях в рамках создаваемых PhD- инкубаторов. В ходе проекта были защищены диссертации по темам, относящимся, в частности, к:

- оцениванию качества человеко-машинных интерфейсов,
- отказоустойчивым базисам на основе зеленой логики,
- применению многозначной логики и моделей многоуровневой деградацией к оптимизации энергозатрат и ресурсов в целом,
- программно-аппаратной поддержке для адаптивных энергосберегающих беспроводных сетей и др.

В таблицах ниже представлено соответствие разделов и курсов проекта для первого и второго томов книги.

Таблица соответствия разделов и курсов проекта (том 1)

Части и разделы книги		Магистерские курсы				Докторантские курсы							Тренинг- курсы		
		MC1 Foundations	MC2 Green Computing	MC3 Green Communication	MC4 Green Regulators	PC1 Standards Green IT	PC2 R&D Green FPGA	PC3 R&D Green Mobs	PC4 R&D Green Wi-Fi	PC5 R&D Green SW	PC6 R&D Green Cloud	PC7 R&D Smart Grid	TC1 T&T Green Computing	TC2 T&T Green Communication	TC3 T&T Management
Введение		+													
Часть I	Раздел 1	+			+										
	Раздел 2	+													
	Раздел 3	+				+									+
Часть II	Раздел 4		+				+								
	Раздел 5						+						+		
	Раздел 6							+					+		
	Раздел 7												+		
Часть III	Раздел 8	+								+					
	Раздел 9									+					+
	Раздел 10									+			+		
	Раздел 11									+			+		
	Раздел 12									+					
Часть IV	Раздел 13	+													
	Раздел 14			+								+		+	
	Раздел 15		+												

Таблица соответствия разделов и курсов проекта (том 2)

Части и разделы книги		Магистерские курсы				Докторантские курсы							Тренинг- курсы		
		MC1	MC2	MC3	MC4	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6	PC7	TC1	TC2	TC3
Часть V	Раздел 16			+					+					+	
	Раздел 17			+					+					+	
	Раздел 18								+					+	
	Раздел 19								+						
	Раздел 20		+				+							+	
	Раздел 21						+								
Часть VI	Раздел 22										+				
	Раздел 23										+				
	Раздел 24										+			+	
	Раздел 25			+							+				
	Раздел 26										+				+
Часть VII	Раздел 27											+		+	
	Раздел 28				+										+
	Раздел 29				+									+	
	Раздел 30											+			+
	Раздел 31		+										+		
	Раздел 32				+										+
	Раздел 33		+										+		
Часть VIII	Раздел 34										+				+
	Раздел 35	+													+
	Раздел 36														+

АНОТАЦІЯ

УДК 004:504(045)

**Зелена ІТ-інженерія. У 2х томах. Том 1. Принципи, компоненти, моделі** / За ред. Харченка В.С. – Міністерство освіти і науки України, Національний аерокосмічний університет ім. М.Е. Жуковського «ХАІ». - 2014. – 594 с.

**ISBN 978-966-662-378-5**

Двохтомне видання (Том 1. Принципи, моделі, компоненти; Том 2. Системи, індустрія, суспільство) презентує лекційний матеріал, який вміщує теоретичні та практичні складові зеленої ІТ-інженерії для магістерських, докторантських (PhD) курсів і тренінг-модулів, які розроблені за проектом TEMPUS-GREENCO Green Computing and Communication (530270-TEMPUS-1-2012-1-UK-TEMPUS-JPCR).

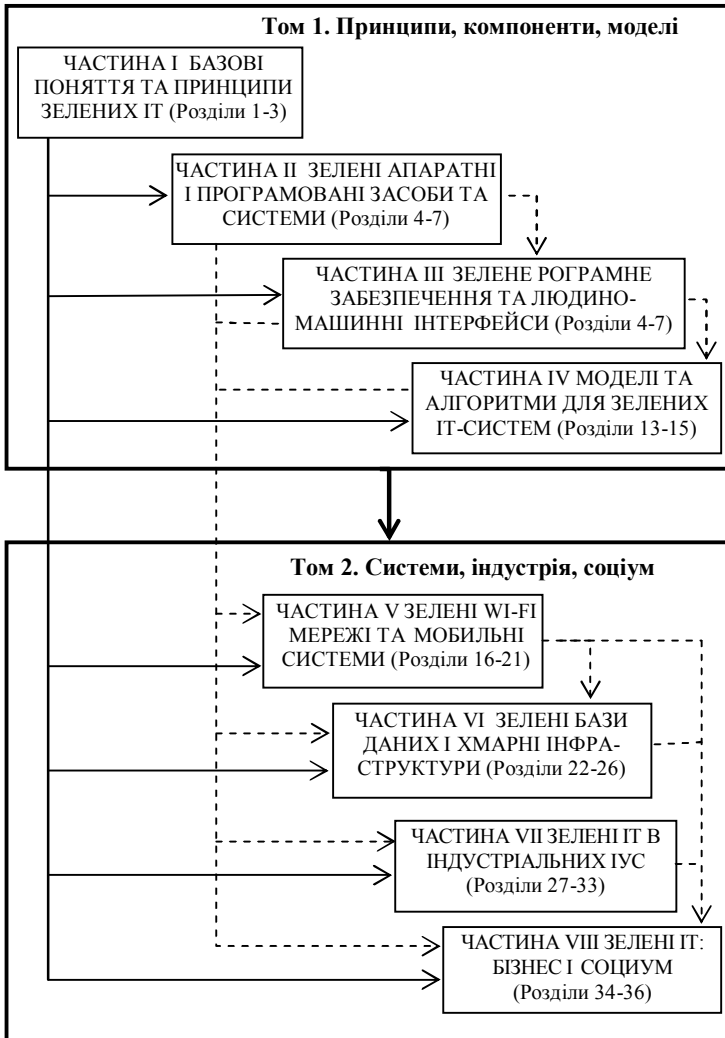
Перший том базується на результатах досліджень та розробок принципів, моделей, методів і алгоритмів для побудови зелених (енергозберігаючих) комп'ютерних систем. Описуються базові поняття і таксономічна схема зеленого комп'ютингу, принципи ресурсозбереження і гар-аналізу при модернізації (озелененні) систем, пропонуються методи зменшення енергоспоживання апаратно-програмних засобів на основі FPGA і мікропроцесорів для вбудованих і мобільних систем, методи моделювання, розробки та верифікації зелених компонент і систем.

Для студентів, аспірантів та викладачів університетів відповідних спеціальностей, інженерів та дослідників у сфері енергоефективних, екологічних і безпечних інформаційних технологій та систем.

Книга призначена для студентів, аспірантів та викладачів університетів відповідних спеціальностей, інженерів та дослідників у сфері енергоефективних, екологічних і безпечних інформаційних технологій та систем.

Бібл. – 434 найменування, рисунків – 252 таблиць – 119.

## Структура книги



## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ .....	3
ВСТУП .....	4
<b>ЧАСТИНА I ПРИНЦИПИ ЗЕЛЕНОГО КОМПЮТИНГУ .....</b>	<b>33</b>
РОЗДІЛ 1 ОСНОВНІ ПОНЯТТЯ І ПРИНЦИПИ ЗЕЛЕНОЇ ІТ-ІНЖЕНЕРІЇ .....	33
РОЗДІЛ 2 РЕСУРСНИЙ ПІДХІД ДО ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ .....	88
РОЗДІЛ 3 ПРИНЦИПИ АНАЛІЗУ ЗЕЛЕНИХ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ.....	140
<b>ЧАСТИНА II ЗЕЛЕНІ ПРОГРАМОВНІ ЗАСОБИ .....</b>	<b>159</b>
РОЗДІЛ 4 ЗЕЛЕНА ЛОГІКА І ВІДМОВОСТІЙКІ БАЗИСИ ДЛЯ FPGA .....	159
РОЗДІЛ 5 ЕКСПЕРИМЕНТИ З ЗЕЛЕНИМИ FPGA І ПРОЦЕСОРАМИ .....	194
РОЗДІЛ 6 ВИМІРЮВАННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ АПАРАТНО-ПРОГРАМНИХ КОМПОНЕНТІВ І МОБІЛЬНИХ ПРИСТРОЇВ .....	241
РОЗДІЛ 7 ВЕРИФІКАЦІЯ І ВАЛІДАЦІЯ FPGA СИСТЕМ В КОНТЕКСТІ ЗЕЛЕНИХ ТЕХНОЛОГІЙ.....	270
<b>ЧАСТИНА III ЗЕЛЕНІ ПРОГРАМНІ ЗАСОБИ.....</b>	<b>298</b>
РОЗДІЛ 8 ОСНОВИ ЗЕЛЕНОГО ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ	298
РОЗДІЛ 9 ЕВОЛЮЦІЯ МОДЕЛЕЙ ЯКОСТІ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ В КОНТЕКСТІ ЗЕЛЕНИХ ІТ .....	322
РОЗДІЛ 10 ЕНЕРГЕТИЧНИЙ ПІДХІД ДО РОЗРОБКИ І ВИБОРУ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ .....	389

---

РОЗДІЛ 11 ЕТАПИ РОЗРОБКИ ТА МЕТРИКИ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОГО ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ.....	419
РОЗДІЛ 12 ЕКОЛОГІЧНІ ЛЮДИНО-МАШИННІ ІНТЕРФЕЙСИ.....	444
<b>ЧАСТИНА IV ОПТИМІЗАЦІЯ АЛГОРИТМІВ ДЛЯ ЗЕЛЕНИХ ІТ</b>	<b>472</b>
РОЗДІЛ 13 ВИКОРИСТАННЯ МАТЕМАТИЧНИХ МЕТОДІВ ДЛЯ ЗЕЛЕНИХ ТЕХНОЛОГІЙ.....	472
РОЗДІЛ 14 РЕСУРСНА ОПТИМІЗАЦІЯ КРИПТОГРАФІЧНИХ АЛГОРИТМІВ.....	516
РОЗДІЛ 15 ОПТИМІЗАЦІЯ АЛГОРИТМІВ ДЛЯ ЗЕЛЕНОГО ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ВИСОКОПРОДУКТИВНИХ ОБЧИСЛЕНЬ.....	541
ЗАКЛЮЧЕННЯ.....	577

## ABSTRACT

UDC 004:504(045)

**Green IT-Engineering. One-volume edition, Vol.1. Principles, components models.** / Kharchenko V. (edit) – Department of Education and Science of Ukraine, National aerospace university named after N. Zhukovsky “KhAI”. - 2014. - 594 p.

**ISBN 978-966-662-378-5**

Two-volume edition (Volume 1. Principles, components, models. Volume 2. Systems, industry, society) presents lecture material including theoretical and practice issues of green IT-engineering for MSc-courses, PhD-Courses and training modules developed in frameworks of the project TEMPUS-GREENCO Green Computing and Communication (530270-TEMPUS-1-2012-1-UK-TEMPUS-JPCR).

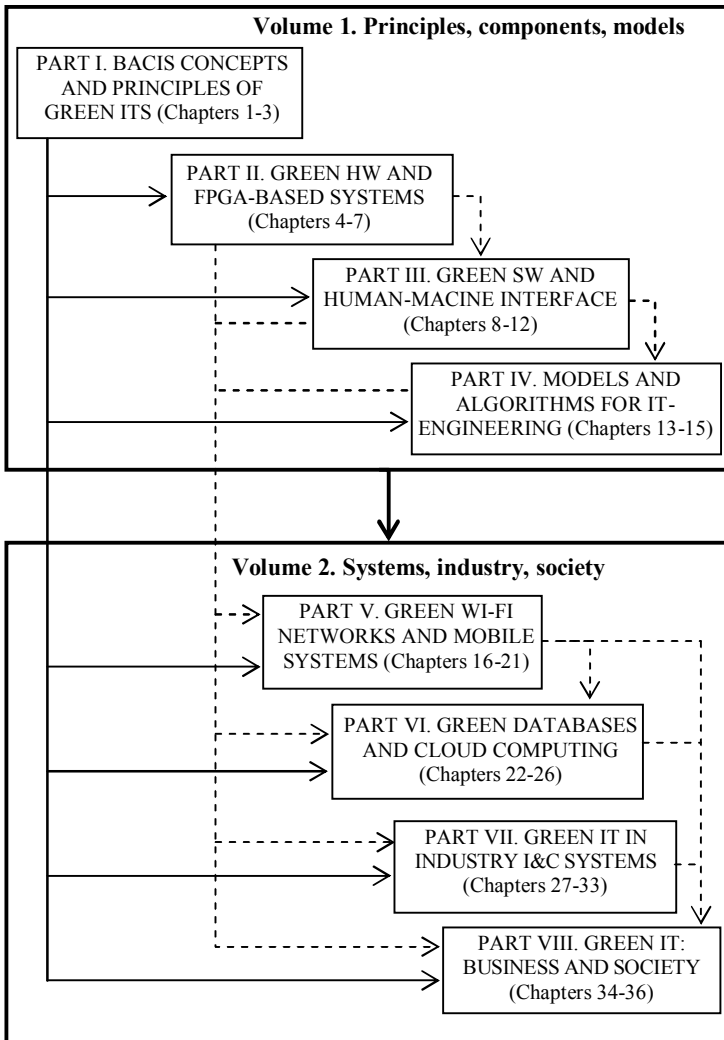
Volume 1 contains material based on the outcomes of analysis, research and development in the area of green (energy saving and energy effective) computer components and systems. The base concepts, principles and taxonomy of green computing and green IT-engineering are described. The methods and techniques of green hardware and software development and assessment for CPU- and FPGA-based embedded and mobile systems are proposed. The models and algorithms allowing save resource and power consumption at modeling, development and verification of FPGA design, high performance systems and lightweight cryptography systems are analysed.

A book is intended for MSc- and PhD-students and university lecturers of corresponding specialties, engineers and researchers in the area of energy saving, ecological and safe information technologies.

Ref. – 434 items, figures – 252, tables – 119.



Structure of the book



CONTENT

**VOLUME 1 PRINCIPLES, COMPONENTS, MODELS**

INTRODUCTION .....	4
<b>PART I PRINCIPLES OF GREEN COMPUTING .....</b>	<b>33</b>
CHAPTER 1 CONCEPTIONS, TAXONOMY AND PRINCIPLES OF GREEN IT-ENGINEERING IMPLEMENTATION .....	33
CHAPTER 2 RESOURCE-BASED APPROACH IN ITs.....	88
CHAPTER 3 PRINCIPLES OF GREEN IT-SYSTEM ANALYSIS. GREEN GAP-ANALYSIS FOR GREENING OF IT-SYSTEMS .....	140
<b>PART II GREEN HW AND PROGRAMMABLE SYSTEMS .....</b>	<b>159</b>
CHAPTER 4 GREEN LOGIC AND FPGA.....	159
CHAPTER 5 GREEN-ORIENTED EXPERIMENTS WITH FPGAS AND MICROCONTROLLERS .....	194
CHAPTER 6 MEASUREMENTS IN GREEN HW-SW SYSTEMS.....	241
CHAPTER 7 GREEN ISSUES OF VERIFICATION AND VALIDATION OF FPGA-BASED SYSTEMS .....	270
<b>PART III GREEN SW.....</b>	<b>298</b>
CHAPTER 8 FUNDAMENTALS OF GREEN SW .....	298
CHAPTER 9 QUALITY MODELS OF GREEN SW.....	322
CHAPTER 10 ENERGY-BASED APPROACH TO SW DEVELOPMENT.....	389
CHAPTER 11 STAGES AND METRICS FOR GREEN SW DEVELOPMENT .....	419
CHAPTER 12 GREEN HUMAN-MACHINE INTERFACES.....	444
<b>PART IV MODELS AND ALGORITHMS FOR GREEN IT-SYSTEMS.....</b>	<b>472</b>
CHAPTER 13 MODELS OF MULTI-VALUED LOGIC FOR GREEN ITs .....	472
CHAPTER 14 LIGHTWEIGHT CRYPTOGRAPHY PRINCIPLES, METHODS AND APPLICATIONS.....	516
CHAPTER 15 OPTIMIZATION OF ALGORITHMS FOR GREEN SW OF HIGH PERFORMANCE COMPUTING .....	541
CONCLUSION .....	577

**VOLUME 2 SYSTEMS, INFRASTRUCTURES, BUSINESS**

PREFACE.....	5
<b>PART V GREEN WI-FI AND MOBILE SYSTEMS AND NETWORKS .....</b>	<b>12</b>
CHAPTER 16 POWER-EFFICIENT METHODS OF TRAFFIC CONTROL IN HETEROGENEOUS COMPUTER NETWORKS.....	12

CHAPTER 17 POWER-EFFICIENT SENSOR NETWORKS IN MONITIRING SYSTEMS .....	50
CHAPTER 18 QUALITY OF SERVICE AND POWER-EFFICIENCY OF WI-FI NETWORKS .....	80
CHAPTER 19 MODELS AND SOFTWARE FOR ADAPTIVE WI-FI NETWORKS.....	113
CHAPTER 20 SOFTWARE - HARDWARE DECISIONS FOR ENERGY-SAVING MOBILE DEVICES .....	137
CHAPTER 21 HYBRID MOBILE POWER-EFFICIENT SYSTEMS .....	187
<b>PART VI GREEN DATABASE AND CLOUD COMPUTING .....</b>	<b>200</b>
CHAPTER 22 OPTIMIZATION OF DATABASE FOR GREEN INFORMATION TECHNOLOGY .....	200
CHAPTER 23 ORGANIZATION AND REALIZATION OF GREEN CLOUD COMPUTING .....	236
CHAPTER 24 ENERGY SAVING DATA CENTRES AND OPENSTACK-BASED DECISIONS .....	272
CHAPTER 25 HYBRID MOBILE CLOUD SYSTEMS .....	289
CHAPTER 26 SCHEDULING OF SECURE AND GREEN CLOUD COMPUTING.....	314
<b>PART VII GREEN IT AND INDUSTRIAL INSTRUMENTATION AND CONTROL SYSTEMS .....</b>	<b>351</b>
CHAPTER 27 WI-FI TECHNOLOGIES FOR ENERGY-EFFICIENT INDUSTRY SYSTEMS AND INFRASTRUCTURES .....	351
CHAPTER 28 DEVELOPMENT OF INSTRUMENTATION AND CONTROL SYSTEMS USING GREEN IT AND SOFTWARE .....	381
CHAPTER 29 DEVELOPMENT OF ENERGY-EFFICIENT AUTOMATION SYSTEMS USING LAWS OF FRACTION ORDER CONTROL .....	423
CHAPTER 30 INSTRUMENTATION AND CONTROL SYSTEMS FOR ENERGY SAVING AND LIFE SUPPORT OF UNIVERSITY .....	464
CHAPTER 31 INDUSTRY APPLICATION OF ENERGY-EFFICIENT MICROCONTROLLER MSP430 .....	492
CHAPTER 32 ENERGY CRITICAL FAULT-TOLERANT ON-BOARD COMPUTER SYSTEMS .....	516
CHAPTER 33 COMPUTER-BASED CONTROL SYSTEM FOR POWER-SAVING WASTE REPROCESSING (ECOPYROGENESIS) .....	553
<b>PART VIII GREEN IT: BISENESS AND SOCIETY .....</b>	<b>583</b>
CHAPTER 34 GREEN WEB AND WEB FOR GREEN SOCIETY .....	583
CHAPTER 35 ECONOMIC ANALYSIS OF GREEN IT-BASED DECISIONS .....	608
CHAPTER 36 GREEN IT: UNIVERSITY AND INDUSTRY COOPERATION .....	634
CONCLUSION .....	668

## СОДЕРЖАНИЕ

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ .....	3
ВВЕДЕНИЕ .....	4
0.1 Цивилизационные вызовы и информационные технологии: фактор двойственности .....	5
0.2 Зеленые информационные технологии в узком и широком смысле ..	11
0.3 Задачи развития зеленых ИТ .....	13
0.4 Зеленая ИТ-культура .....	16
0.5 Проект Green Computing and Communication .....	17
0.6 Общие сведения о книге .....	23
 ЧАСТЬ I ПРИНЦИПЫ ЗЕЛЕНОГО КОМПЬЮТИНГА .....	33
РАЗДЕЛ 1 ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ПРИНЦИПЫ ЗЕЛЕНОЙ ИТ- ИНЖЕНЕРИИ .....	33
1.1 Логика следования и использования терминов и понятий .....	34
1.2 Зеленые технологии и зеленый бизнес .....	36
1.3 Зеленые технологии и концепция устойчивого развития .....	39
1.4 Таксономия зеленой ИТ-инженерии .....	52
1.5 Ценности и принципы реализации зеленой ИТ-инженерии .....	67
1.6 Социальная роль зеленых информационных технологий .....	75
Выводы и вопросы для самоконтроля .....	81
Литература .....	83
 РАЗДЕЛ 2 РЕСУРСНЫЙ ПОДХОД К ИНФОРМАЦИОННЫМ ТЕХНОЛОГИЯМ .....	88
2.1 Ресурсы и их развитие .....	89
2.2 Развитие зеленых технологий на основе ресурсного подхода .....	106
Выводы и вопросы для самоконтроля .....	129
Литература .....	134
 РАЗДЕЛ 3 ПРИНЦИПЫ GAP-АНАЛИЗА ЗЕЛЕННЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И СИСТЕМ .....	140
3.1 Понятие Gap-анализа .....	141
3.2 Цель и этапы зеленого Gap-анализа .....	142
3.3 Виды разрывов .....	144
3.4 Системы экологического управления производством .....	147
3.5 Средство анализа разрывов на основе стандарта ISO 14004-2004 .....	152
Выводы и вопросы для самоконтроля .....	156
Литература .....	158

ЧАСТЬ II ЗЕЛЕННЫЕ ПРОГРАММИРУЕМЫЕ СРЕДСТВА .....	159
РАЗДЕЛ 4 ЗЕЛЕНАЯ ЛОГИКА И ОТКАЗОУСТОЙЧИВЫЕ БАЗИСЫ ДЛЯ FPGA .....	159
4.1 Анализ методов энергосбережения для FPGA проектов .....	160
4.2 Анализ логики FPGA в контексте зеленых вычислений .....	161
4.3 Концепция зеленой программируемой логики .....	166
4.4 Программно-аппаратная реализация логических функций .....	168
4.5 Задача перераспределения функций и автоматных отображений между КЛБ для снижения энергопотребления .....	172
4.6 Подходы к самосинхронной реализации зеленой логики .....	178
Выводы и вопросы для самоконтроля .....	188
Литература .....	189
РАЗДЕЛ 5 ЭКСПЕРИМЕНТЫ С ЗЕЛЕНЫМИ FPGA И ПРОЦЕССОРАМИ.....	194
5.1 Эксперименты с зелеными FPGA.....	195
5.2 Исследование вычислительной и энергетической эффективности технологии CUDA .....	211
Выводы вопросы для самоконтроля .....	236
Литература.....	240
РАЗДЕЛ 6 ИЗМЕРЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ АППАРАТНО- ПРОГРАММНЫХ КОМПОНЕНТОВ И МОБИЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ.....	241
6.1 Энергоэффективность компьютерных систем .....	242
6.2 Актуальные задачи измерения потребляемой мощности аппаратных и программных средств.....	243
6.3 Методы и инструменты измерения энергопотребления .....	245
Выводы и вопросы для самоконтроля .....	266
Литература.....	269
РАЗДЕЛ 7 ВЕРИФИКАЦИЯ И ВАЛИДАЦИЯ.....	270
FPGA СИСТЕМ В КОНТЕКСТЕ ЗЕЛЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ.....	270
7.1 Основные определения и нормативная база .....	271
7.2 Методы контроля случайных отказов оборудования: зеленые аспекты .....	274
7.3 Методы исключения систематических отказов оборудования: зеленые аспекты .....	275
7.4 Анализ процессов верификации FPGA систем: зеленые технологии .....	276
7.5 Анализ процессов валидации FPGA систем: зеленые технологии.....	288
Выводы и вопросы для самоконтроля .....	295

Литература.....	295
ЧАСТЬ III ЗЕЛЕННЫЕ ПРОГРАММИРУЕМЫЕ СРЕДСТВА .....	298
РАЗДЕЛ 8 ОСНОВЫ ЗЕЛЕНОГО ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ .....	298
8.1 Что такое программное обеспечение?.....	299
8.2 Как программное обеспечение может стать «зеленым»? .....	302
8.3 Направление 1. Модель качества зеленого ПО. Метрики «Оттенков зеленого» .....	305
8.4 Направление 2. Зеленая программная инженерия .....	308
8.5 Направление 3. Надежность программного обеспечения.....	311
8.6 Направление 4. Устойчивость программного обеспечения .....	315
Выводы и вопросы для самоконтроля .....	318
Литература.....	319
РАЗДЕЛ 9 ЭВОЛЮЦИЯ МОДЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ В КОНТЕКСТЕ ЗЕЛЕННЫХ ИТ .....	322
9.1 Задача анализа моделей качества программного обеспечения.....	323
9.2 Методика структурно-семантического анализа МКПО.....	326
9.3 Элементы методики формирования отраслевых МКПО .....	345
9.4 Анализ наличия и вариантов включения характеристик зеленого программного обеспечения в модели качества.....	358
9.5 Жизненный цикл разработки зеленого ПО .....	364
9.6 Описание моделей качества .....	366
Выводы и вопросы для самоконтроля .....	383
Литература.....	385
РАЗДЕЛ 10 ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ПОДХОД К РАЗРАБОТКЕ И ВЫБОРУ ПО .....	389
10.1 Исходные положения.....	390
10.2 Вспомогательные задачи .....	393
10.3 Информационно-энергетическая оценка затрат процесса разработки ПО.....	394
10.4 Прогноз рисков и понятие сбалансированности в энергетическом анализе процессов разработки .....	399
10.5 Политика управления энергозатратами в компьютерных классах и лабораториях университета .....	407
10.6 Вычислительная работа и семантический фактор .....	414
Выводы и вопросы для самоконтроля .....	415
Литература.....	417

РАЗДЕЛ 11 ЭТАПЫ РАЗРАБОТКИ И МЕТРИКИ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОГО ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ .....	419
11.1 Энергопотребление информационных систем и метрики зеленого программного обеспечения .....	420
11.2 Этапы создания энергоэффективного программного обеспечения .....	423
11.3 Зеленые метрики .....	432
11.4 Инструменты для определения метрик .....	439
Выводы и вопросы для самоконтроля .....	441
Литература .....	442
РАЗДЕЛ 12 ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ЧЕЛОВЕКО-МАШИННЫЕ ИНТЕРФЕЙСЫ .....	444
12.1 Понятие экологических человеко-машинных интерфейсов .....	446
12.2 Модели качества человеко-машинных интерфейсов .....	447
12.3 Метрическая оценка качества интерфейсов .....	454
12.4 Оценка безопасности на основе риск-анализа .....	456
12.5 Оценка безопасности ЧМИ на основе марковских моделей .....	460
Выводы и вопросы для самоконтроля .....	467
Литература .....	470
ЧАСТЬ IV ОПТИМИЗАЦИЯ АЛГОРИТМОВ ДЛЯ ГРИН ИТ .....	472
РАЗДЕЛ 13 ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ В ОБЛАСТИ ЗЕЛЕННЫХ информационных ТЕХНОЛОГИЙ .....	472
13.1 Основные понятия многозначной логики .....	474
13.2 Анализ чувствительности .....	481
13.3. Анализ значимости .....	491
Выводы и вопросы для самоконтроля .....	513
Литература .....	514
РАЗДЕЛ 14 РЕСУРСНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ КРИПТОГРАФИЧЕСКИХ АЛГОРИТМОВ .....	516
14.1 Зеленые ИТ и малоресурсная криптография .....	517
14.2 Принципы проектирования малоресурсных криптографических примитивов .....	523
14.3 Оценка эффективности малоресурсных криптографических примитивов .....	526
14.4 Обзор решений в области малоресурсной криптографии .....	531
Выводы и вопросы для самоконтроля .....	536
Литература .....	537

РАЗДЕЛ 15 ОПТИМИЗАЦИЯ АЛГОРИТМОВ ДЛЯ ЗЕЛЕННОГО ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ.....	541
15.1 Высокопроизводительные системы и проблема снижения энергозатрат .....	542
15.2 Упрощение собственно математических моделей решаемых задач.....	544
15.3 Оптимизация методов численного анализа математических моделей с целью сокращения времени численного моделирования .....	546
15.4 Оптимизация алгоритмов численного анализа в кластерной редакции конечно-элементного решателя .....	561
15.5 Дальнейшие пути для сокращения затрат машинного времени .....	566
15.6 Использование оптимизированного для целей энергосбережения аппаратного обеспечения .....	567
Выводы вопросы для самоконтроля .....	573
Литература.....	575
Заключение.....	577
Анотація .....	581
Зміст .....	583
Abstract .....	585
Content .....	587



### **Авторы:**

В.С. Харченко, Д.К. Андрейченко, С.Г. Антошук,  
Е.Н. Бульба, П.П. Гармидаров, С.В. Гонтовой, А.В. Горбенко,  
А.А. Гордеев, А.В. Дрозд, М.А. Дрозд, Ю.В. Дрозд, Е.Н. Зайцева,  
К.Я. Защелкин, А.О. Ивасюк, В.В. Калининченко, А.Н. Каменских,  
А.Ю. Кривцов, В.Г. Левашенко, А.В. Мазуренко, Е.Д. Маевская,  
Д.А. Маевский, С.И. Милейко, В.О. Мищенко,  
О.Н. Одарущенко, О.В. Олещук, А.А. Орехова,  
А.В. Потий, А.А. Сиора, В.В. Скляр,  
О.М. Тарасюк, С.Ф. Тюрин

## **Зеленая ИТ-инженерия.**

### **Том 1. Принципы, компоненты, модели**

(російською мовою)

**Редактор**  
В.С. Харченко

Комп'ютерна верстка  
Л.Д. Харченко

Зв. план, 2014

Підписаний до друку 03.09.2014

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

Умов. друк. арк. 34,53. Уч.-вид. л. 36,25. Наклад 300 прим.

Замовлення 42. 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.