

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАСЧЕТА ТЕПЛОТЫДЕЛЕНИЙ ИНФОРМАЦИОННО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ В ПРОЦЕССЕ ОБРАБОТКИ РАЗНОРОДНЫХ И ДИНАМИЧЕСКИ ИЗМЕНЯЮЩИХСЯ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ ЗАДАЧ

Носовец А.А.¹, Никитин А.А.¹

Научный руководитель – кандидат технических наук, доцент Никитин А.А.¹

¹Университет ИТМО
nosovetsaa@mail.ru

Работа выполнена в рамках темы НИРМА № 625117 «Эффективность систем жизнеобеспечения зданий в условиях переменных нагрузок».

Введение

Экспоненциальный рост энергопотребления центрами обработки данных (ЦОД), обусловленный ежегодным масштабированием ресурсоемких обрабатываемых информационно-технологическим оборудованием (ИТО) вычислительных задач, включающий обучение и инференс моделей глубокого машинного обучения, процессы генеративного искусственного интеллекта и криптографические операции. Согласно оценкам международного энергетического агентства (IEA), глобальное энергопотребление ЦОД может превысить 1700 ТВт·ч к 2035 году, что сопоставимо с 4,4% мирового спроса на электроэнергию [1]. При этом на системы кондиционирования воздуха (СКВ), обеспечивающие отвод тепла от информационно-технологического оборудования, приходится до 30% всей потребляемой электроэнергии в центре обработки данных [2].

Традиционные методы и подходы по повышению энергетической эффективности центров обработки данных, такие как рекуперация избыточного тепла, применение технологии «free cooling», виртуализация серверов, направлены на оптимизацию отдельных компонентов и процессов [3]. Существующие подходы к оценке тепловыделений от ИТО преимущественно основываются на упрощенных линейных зависимостях между нагрузкой вычислительных ресурсов и генерируемой тепловой мощностью. Вышеуказанные методы и подходы не позволяют корректно учитывать, описывать и своевременно реагировать на возникающие динамические тепловые процессы при обработке разнородных и изменяющихся во времени вычислительных задач, что приводит к работе СКВ либо с избыточным запасом мощности, что вызывает увеличение потребления электроэнергии, локальное переохлаждение определенных зон и как следствие повышение коэффициента эффективности использования энергии (PUE), либо с недостаточным запасом, что приводит к локальным точкам перегрева и кратному снижению эксплуатационных характеристик аппаратного оборудования.

Основная часть

Ключевым аспектом работы является формирование и научное обоснование упрощенной математической модели, основанной на подходе, связывающем информационную энтропию Клода Шеннона с термодинамическими процессами на принципе Рольфа Ландауэра и позволяющей количественно рассчитывать тепловыделения от информационно-технологического оборудования в зависимости от архитектурных особенностей используемых аппаратных средств, динамики тепловых процессов, неоднородности вычислительных задач для более эффективного распределения энергетических ресурсов используемыми системами микроклимата в центрах обработки данных. Принцип Рольфа Ландауэра сформулированный в 1961 году,

устанавливает взаимосвязь между информационной энтропией Шеннона и термодинамическими процессами, гласящим, что стирание одного бита информации сопровождается минимальным тепловыделением [4].

Предлагаемая математическая модель включает несколько взаимосвязанных компонентов:

1. Блок информационной энтропии, оценивающий изменение информационной энтропии Шеннона при обработке разнородных вычислительных задач;
2. Термодинамический блок, реализующий принцип Ландауэра для расчёта минимального тепловыделения при необратимых логических операциях;
3. Классификатор типов вычислительных нагрузок (целочисленные, вычисления с плавающей точкой, копирование данных и т.д.), каждому из которых аппроксимируется профиль скорости стирания информации;
4. Блок динамики нагрузки, описывающий временную зависимость частоты операций и соответствующее изменение температуры компонентов;
5. Эмпирический коэффициент эффективности, представленный в формате корректирующего множителя для согласования теоретической границы Ландауэра с эмпирическими измерениями тепловыделения архитектуры компонентно – аппаратной составляющей информационно-технологического оборудования.

Вышеописанная структура обеспечивает интеграцию взаимосвязи информационной и термодинамической энтропий с прикладными инженерными методами анализа и расчета тепловых процессов в центрах обработки данных [5].

Выводы

Проведенное исследование позволило сформировать упрощенную математическую модель расчета тепловыделений информационно-технологического оборудования при обработке разнородных и динамически изменяющихся вычислительных задач.

Предложенная модель позволяет учитывать динамический характер вычислительной нагрузки, ее разнородность и генерацию тепловыделений от ИТО, что способствует более точному распределению энергетических ресурсов, повышению энергоэффективности функционирования климатических систем жизнеобеспечения и служит основой для формулирования и разработки адаптивных алгоритмов управления системами микроклимата ЦОД.

Литература

1. IEA [Электронный ресурс]: Reports. – URL: <https://www.iea.org/reports/electricity-2024> (дата обращения: 14.01.2026).
2. Zhang Q. et al. A survey on data center cooling systems: Technology, power consumption modeling and control strategy optimization //Journal of Systems Architecture. – 2021. – Т. 119. – С. 102253.
3. Носовец А. А., Никитин А. А., Информационная энтропия как инструмент повышения энергоэффективности центров обработки данных // Инженерия сегодня. Проблемы, тенденции, перспективы. – 2025. – С. 63-67.
4. Berut A. et al. Experimental verification of Landauer’s principle linking information and thermodynamics //Nature. – 2012. – Т. 483. – №. 7388. – С. 187-189.
5. Niyogi P. Introduction to computational fluid dynamics. – Pearson Education India, 2006.