

УДК 657

ОРГАНИЗАЦИЯ УПРАВЛЕНЧЕСКОГО УЧЕТА ПО ФОРМИРОВАНИЮ ОПТИМИЗАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ЦЕНТРОВ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ С УЧЕТОМ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ И ЭКОНОМИЧЕСКИХ РИСКОВ

¹ И.Б. Елистратова, ² Н.Г. Пикузо

¹ ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет телекоммуникации и информатики», Новосибирск, email: irina_borisovna@bk.ru

² Автономная некоммерческая образовательная организация высшего образования Центросоюза Российской Федерации «Сибирский университет потребительской кооперации», Новосибирск, email: npikuzo@mail.ru

Аннотация. В статье представлен всесторонний анализ теоретических положений, которые лежат в основе структурных и функциональных аспектов современных центров обработки данных (ЦОД). Организация управленческого учета позволит не только понимать эволюцию этих центров, но и признавать их прогресс, достигнутый за счет интеграции современных технологий, таких как искусственный интеллект, который способствует оптимизации процессов и улучшает управление энергопотреблением. Целью исследования является разработка оптимальной архитектуры ЦОД с интегрированной системой управления, построенной на внедрении искусственного интеллекта. Задачи исследования заключаются в исследовании стратегического управления ЦОД, анализе важнейших проблем управления ресурсами в ЦОД и обоснования интегрированного стратегического метода управления ресурсами ЦОД. В статье решаются фундаментальные исследовательские задачи, направленные на разработку управленческого учета прогностической оптимизационной модели стратегического управления ЦОД с учетом неопределенности и экономических рисков. Применение глобальных метрик, таких как PUE и CVaR, позволило интегрировать экономические и операционные параметры в модель ЦОД. Эти метрики являются ключевыми для точного анализа работы ЦОД и для дальнейшего формирования обоснованного стратегического шаблона для обучения нейронных сетей. Подробно описанный физико-математический аппарат охватывает критически важные аспекты работы ЦОД, включая потребление энергии, теплопередачу и распределение вычислительных нагрузок. Основным результатом исследования является разработанная имитационная модель ЦОД. Разработанная модель, позволяющая точно контролировать эти процессы, является фундаментальным требованием для оптимизации энергоэффективного функционирования ЦОД. Переход от теоретической модели к практической осуществляется за счет внедрения имитационной модели ЦОД, которая позволяет моделировать различные операционные сценарии. Данная модель позволяет провести объективное исследование эффективности предлагаемых стратегий управления в ЦОД. Это исследование не только охватывает актуальные вопросы управления ЦОД, но и предоставляет основу для дальнейшей интеграции инновационных технологий, повышая устойчивость, экономическую эффективность и надежность функционирования.

Ключевые слова: центры обработки данных, управленческий учет, модель энергопотребления; модель теплообмена, модель нагрузки, экономические риски.

ORGANIZATION OF MANAGEMENT ACCOUNTING FOR THE FORMATION OF AN OPTIMIZATION MODEL OF A DATA CENTER, TAKING INTO ACCOUNT UNCERTAINTY AND ECONOMIC RISKS

¹ I.B. Elistratova, ² N.G. Pikuzo

¹ FGBOU VO «Siberian State University of Telecommunications and Informatics», Novosibirsk, email: Irina_borisovna@bk.ru

² Siberian University of Consumer Cooperatives, Novosibirsk, email: npikuzo@mail.ru

Abstract. This article presents a comprehensive analysis of the theoretical principles underlying the structural and functional aspects of modern data centers. Developing management accounting systems will not only help understand the evolution of these centers but also recognize their progress through the integration of modern technologies, such as artificial intelligence, which facilitates process optimization and improves energy management. The aim of this study is to develop an optimal data center architecture with an integrated management system built on the implementation of artificial intelligence. The objectives of this study include investigating strategic data center management, analyzing the most important resource management issues in data centers, and substantiating an integrated strategic method for data center resource management. This article addresses fundamental research challenges aimed at developing management accounting systems for a predictive optimization model for strategic data center management, taking into account

uncertainty and economic risks. The use of global metrics such as PUE and CVaR enabled the integration of economic and operational parameters into the data center model. These metrics are key to accurately analyzing data center performance and subsequently formulating a sound strategic template for training neural networks. A detailed physical and mathematical framework covers critical aspects of data center operation, including energy consumption, heat transfer, and computing load distribution. The main result of the study is the developed data center simulation model. The developed model, which enables precise control of these processes, is a fundamental requirement for optimizing the energy-efficient operation of data centers. The transition from theoretical to practical implementation is achieved through the implementation of a data center simulation model, which allows for the modeling of various operational scenarios. This model enables an objective study of the effectiveness of proposed data center management strategies. This study not only addresses current data center management issues but also provides a basis for the further integration of innovative technologies, increasing sustainability, cost efficiency, and operational reliability.

Keywords: data centers, management accounting, energy consumption model; heat exchange model, load model, economic risks.

Дата поступления статьи в редакцию: 14.10.2025

Дата принятия статьи в печать: 17.11.2025

Введение

В наше время, когда данные становятся все более ценными, их обработка приобретает ключевое значение для многих организаций и государственных учреждений. Центры обработки данных (ЦОД) предоставляют надежное хранение и мощные вычислительные ресурсы для обработки данных.

Несмотря на огромное количество источников, многие из них ограничены и часто фокусируются на отдельных аспектах, например, только на энергосбережении или безопасности ЦОД. Большинство исследований посвящено традиционным методам управления и оптимизации, поэтому анализ существующих достижений позволяет определить перспективные направления дальнейших исследований в области стратегического управления ЦОД.

Выбор определенной стратегии управления ЦОД зависит от многих факторов, включая бизнес-потребности, финансовые ограничения, технические возможности и многие другие. Очень важно учитывать экономическую составляющую при разработке стратегии управления ЦОД. Информация о затратах на строительство, приобретение оборудования и содержание ЦОД может быть получена из системного бухгалтерского управленческого учета. Принятые управленческие решения на основе данной информации могут значительно влиять на рентабельность бизнеса. Оценка и оптимизация затрат является неотъемлемой частью стратегии управления ЦОД в экономическом аспекте.

Разработка стратегической прогностической оптимизационной модели для распределительных сетей ЦОД, адаптированной к динамичным изменениям в современном распределении энергии и управлении данными, позволяет повышать энергоэффективность и устойчивость системы. Данная модель оптимизирует взаимодействие между центрами обработки данных и распределительными сетями с фокусом на достижении углеродной нейтральности. Влияние разработанной модели на углеродную нейтральность в энергосистеме проявляется через повышение энергоэффективности ЦОД, оптимизацию обработки данных, снижение сетевых потерь и улучшенную координацию с генерацией возобновляемой энергии, способствующую поддержанию углеродной нейтральности.

Результаты исследования

1. Модель энергопотребления ЦОД

Основные характеристики энергопотребления

Энергопотребление центра обработки данных в основном состоит из трех составляющих: серверов, оборудования для кондиционирования воздуха и вспомогательного оборудования. На долю серверов и оборудования для кондиционирования воздуха обычно приходится более 90% от общего энергопотребления. Общее энергопотребление ЦОД в процессе эксплуатации может быть выражено следующей формулой [1-5]:

$$P_{DC}^{d,s,se,t} = \frac{P_{Ser}^{d,s,se,t} + P_{ACS}^{d,s,se,t}}{\eta_{DC}}, \quad (1)$$

где $P_{DC}^{d,s,se,t}$ – общее активное энергопотребление ЦОД на узле d в момент времени t ;

$P_{Ser}^{d,s,se,t}$ и $P_{ACS}^{d,s,se,t}$ – активная мощность серверов и оборудования для кондиционирования воздуха в ЦОД соответственно;

η_{DC} – коэффициент энергоэффективности ЦОД, представляющий отношение потребляемой мощности ИТ-оборудования и оборудования для кондиционирования воздуха к общему активному энергопотреблению ЦОД.

Энергопотребление серверов. В данной модели предполагается, что все серверы в ЦОД имеют одинаковые характеристики, а информационная нагрузка равномерно распределена между всеми включенными серверами в течение любого периода времени. Если мощность простоя одного сервера при отсутствии задач составляет $P_{Ser_i}^d$, а пиковая мощность – $P_{Ser_p}^d$, то характеристики энергопотребления при различных условиях эксплуатации могут быть описаны следующим образом [1-5]:

$$P_{Ser}^{d,s,se,t} = n_{Ser_on}^{d,s,se,t} \cdot P_{Ser_i}^d + (P_{Ser_p}^d - P_{Ser_i}^d) \cdot n_{Ser_on}^{d,s,se,t} \cdot \phi_d, \quad (2)$$

$$\phi_d = \frac{D_{d,s,se,t}}{n_{Ser_on}^{d,s,se,t} \cdot \mu_d}, \quad (3)$$

$$0 \leq n_{Ser_on}^{d,s,se,t} \leq (1 - \phi) \cdot n_{Ser}^d, \quad (4)$$

$$0 \leq \frac{D_{d,s,se,t}}{n_{Ser_on}^{d,s,se,t} \cdot \mu_d} \leq U_{max}, \quad (5)$$

где $P_{Ser}^{d,s,se,t}$ – энергопотребление серверов на узле d в период t ;

ϕ_d – средний коэффициент использования сервера;

$n_{Ser_on}^{d,s,se,t}$ – количество включенных серверов в период t ;

$D_{d,s,se,t}$ – объем задач в ЦОД;

μ_d – скорость обработки данных сервером;

n_{Ser}^d – общее количество серверов;

ϕ – резервный коэффициент сервера;

U_{max} – максимальный коэффициент использования процессора для одного сервера.

Уравнения (2)–(5) описывают формулу расчета энергопотребления сервера, ограничения на количество включенных серверов и использование процессора в ЦОД.

Энергопотребление оборудования для кондиционирования воздуха. Для поддержания необходимого температурного режима эксплуатации серверов и прочего оборудования в центре обработки данных требуется установка значительного количества оборудования для кондиционирования и охлаждения воздуха. Система кондиционирования преобразует электрическую энергию в низкотемпературную внутреннюю энергию с использованием компрессора, и её эксплуатационные характеристики могут быть выражены следующей формулой [1-5]:

$$P_{ACS}^{d,s,se,t} = \frac{H_{ACS}^{d,s,se,t}}{\eta_{ACS}}, \quad (6)$$

$$0 \leq P_{ACS}^{d,s,se,t} \leq P_{ACS_R}^d, \quad (7)$$

где $H_{ACS}^{d,s,se,t}$ — мощность охлаждения ЦОД;

η_{ACS} — коэффициент энергоэффективности оборудования для кондиционирования воздуха;

$P_{ACS_R}^d$ — установленная мощность оборудования для кондиционирования воздуха в ЦОД.

В целях организации бухгалтерского управленческого учета, расходы, связанные с энергопотреблением, относятся к переменным затратам — чем больше используется электроэнергии, тем выше энергоэффективность оборудования.

Модель теплообмена ЦОД

Характеристики тепловой среды

В процессе эксплуатации центра обработки данных значительная часть электрической энергии, потребляемой ИТ-оборудованием, преобразуется в тепловую и рассеивается в окружающей среде. Неконтролируемый рост температуры в серверной комнате может привести к ускоренному износу или выходу из строя серверов и другого оборудования. Для адекватного описания эксплуатационных характеристик ЦОД требуется детальное моделирование и анализ его тепловой среды.

Теплоотдача

Поскольку серверы ЦОД обычно размещены внутри зданий, уравнение теплового баланса ЦОД, с учетом характеристик теплового накопления зданий и закона сохранения энергии, можно записать следующим образом [1-5].

$$\Delta H_{In_DC}^{d,s,se,t} = \rho_{Air} \cdot C_{Air} \cdot V_d \cdot \Delta T_{In_DC}^{d,s,se,t}, \quad (8)$$

где $\Delta H_{In_DC}^{d,s,se,t}$ — изменение мощности охлаждения ЦОД между периодом времени t и смежными периодами;

$\Delta T_{In_DC}^{d,s,se,t}$ — изменение температуры в ЦОД;

ρ_{Air} , C_{Air} и V_d обозначают плотность воздуха, удельную теплоемкость воздуха и объем пространства ЦОД соответственно.

С учетом того, что здания ЦОД представляют собой замкнутые структуры без окон, внутреннее тепло в них определяется следующими факторами: мощностью теплообмена $H_{Out_in}^{d,s,se,t}$ обусловленной разницей температур между внутренней и внешней сторонами стен; тепловой мощностью серверов $H_{Ser}^{d,s,se,t}$ тепловой мощностью вспомогательного оборудования $H_{Aux_equ}^{d,s,se,t}$ и охлаждающей мощностью системы кондиционирования $H_{ACS}^{d,s,se,t}$ эти параметры могут быть выражены следующим образом:

$$\Delta H_{In_DC}^{d,s,se,t} = H_{Out_in}^{d,s,se,t} + H_{Ser}^{d,s,se,t} + H_{Aux_equ}^{d,s,se,t} - H_{ACS}^{d,s,se,t} \quad (9)$$

Метод расчета каждого компонента уравнения приведен ниже [1-5]:

1. Мощность теплообмена через стену прямо пропорциональна площади стены здания ЦОД и разнице температур на её внутренней и внешней сторонах. Она может быть рассчитана по следующему уравнению:

$$H_{Out_in}^{d,s,se,t} = k_{wall} \cdot S_{wall} \cdot (T_{Out_DC}^{d,s,se,t} - T_{In_DC}^{d,s,se,t}), \quad (10)$$

где $T_{Out_DC}^{d,s,se,t}$ — внутренняя температура ЦОД;

$T_{In_DC}^{d,s,se,t}$ — внешняя температура окружающей среды;

S_{wall} — площадь стены здания ЦОД, контактирующей с внешней средой;

k_{wall} – коэффициент теплообмена стены.

2. Тепловая мощность активного сервера зависит от его потребления энергии и коэффициента тепло-выделения k_{Ser} , рассчитываемого по формуле:

$$H_{Ser}^{d,s,se,t} = k_{Ser} \cdot P_{Ser}^{d,s,se,t} \quad (11)$$

3. Тепловая мощность вспомогательных систем, таких как освещение и системы электроснабжения в ЦОД, складывается из потерь в режиме холостого хода и операционных потерь. Данные потери рассчитываются по следующему выражению:

$$H_{Aux_equ}^{d,s,se,t} = k_{NL} \cdot P_{Rated}^d + k_{Run} \cdot P_{Ser}^{d,s,se,t}, \quad (12)$$

где k_{NL} и k_{Run} – коэффициенты тепловыделения в режиме холостого хода и в рабочем режиме соответственно;

P_{Rated}^d – это общая потребляемая мощность ЦОД, определяемая как:

$$P_{Rated}^d = n_{Ser}^d \cdot P_{Ser_p}^d + P_{ACS_R}^d \quad (13)$$

Основываясь на параметрах теплового рассеивания и изменениях температуры здания, уравнения 8-13 интегрируются и дискретизируются для формирования уравнения теплового баланса ЦОД, действительного в любой момент времени:

$$\begin{aligned} & (H_{Out_in}^{d,s,se,t} + H_{Ser}^{d,s,se,t} + H_{Aux_equ}^{d,s,se,t} - H_{ACS}^{d,s,se,t}) \cdot \Delta t = \\ & \rho_{Air} \cdot C_{Air} \cdot V_d \cdot (T_{In_DC}^{d,s,se,t} - T_{In_DC}^{d,s,se,t-1}) \end{aligned} \quad (14)$$

Ограничения температуры окружающей среды в ЦОД

Для обеспечения безопасности и стабильности работы оборудования в центрах обработки данных критически важно поддерживать температуру внутри помещений в установленных пределах. Температурные ограничения задаются следующими уравнениями:

$$T_{In_DC_min} \leq T_{In_DC}^{d,s,se,t} \leq T_{In_DC_max}, \quad (15)$$

$$|T_{In_DC}^{d,s,se,t} - T_{In_DC}^{d,s,se,t-1}| < \Delta T_{In_DC}, \quad (16)$$

где $T_{In_DC_max}$ и $T_{In_DC_min}$ обозначают установленные верхние и нижние пределы температуры в помещениях ЦОД соответственно;

ΔT_{In_DC} – максимально допустимое изменение температуры между соседними временными интервалами.

Расходы, связанные с покупкой и обслуживанием оборудования с целью оптимизации тепловой мощности активного сервера и вспомогательных систем, также относятся к переменным расходам, так как напрямую связана с электропотреблением и площадью стен здания ЦОД.

Модель вычислительной нагрузки в зависимости от QoS

Эксплуатация дата-центра в значительной степени зависит от их способности к гибкому управлению распределением нагрузки данных и передаче информационных задач в различные географические локации. Нагрузки в ЦОД могут быть классифицированы на три категории [3]: временно-зависимые данные (TSDL), пространственно-переносимые данные (STDЛ) и жесткая нагрузка данных (RDL).

Временно-зависимые данные (TSDL) представляют собой задачи, которые имеют фиксированный объём данных, но гибкие временные рамки для их обработки в пределах заданного интервала. Такие задачи, как пакетная обработка данных, включая автономный анализ больших данных, особенно характерны для центров обработки данных. Для планирования выполнения задач TSDL система распределения ресурсов может начинать обработку в момент времени t и откладывать её выполнение на период $[t + 1, T]$. Математически это можно описать следующим образом [1-5]:

$$D_{TSDL0}^{d,s,se,t} = \beta_{TSDL} \cdot D_0^{d,s,se,t}, \quad (17)$$

$$D_{TSDL}^{d,s,se,t} = D_{TSDL0}^{d,s,se,t} + \sum_{t'=1}^{t-1} D_{TSDLT}^{d,s,se,tt'} - \sum_{t''=t+1}^T D_{TSDLT}^{d,s,se,tt''}, \quad (18)$$

$$0 \leq D_{TSDLT}^{d,s,se,t't} \leq D_{TSDL0}^{d,s,se,t}, \quad (19)$$

$$\sum_{t'=t+1}^T D_{TSDLT}^{d,s,se,t't} \leq D_{TSDL0}^{d,s,se,t}, \quad (20)$$

где $D_0^{d,s,se,t}$ — общий объём данных, поступивший в ЦОД;

β_{TSDL} — доля TSDL в общем объеме данных;

$D_{TSDL0}^{d,s,se,t}$ — начальный объем TSDL;

$D_{TSDLT}^{d,s,se,t't}$ — объём данных, переданный в период t до t' ;

$D_{TSDL}^{d,s,se,t}$ — объём данных TSDL в конце планирования.

Эти уравнения описывают механизм распределения нагрузки для задач TSDL, определяя ограничения на долю используемой мощности, баланс до и после выполнения, временные ограничения передачи и общие ограничения на передачу нагрузки в пределах временного интервала.

Пространственно-переносимые данные. Пространственно-переносимая загрузка данных (STDL) характеризуется фиксированным временем выполнения задачи, однако она может быть гибко перемещена между ЦОД, расположенными в различных географических точках в зависимости от потребностей. Примерами таких данных служат потоковое видео, веб-браузинг, аудио- и видеозвонки, онлайн-покупки, которые не выдвигают строгих требований к вычислительной мощности или качеству связи.

Математическую модель управления планированием STDL можно описать следующим образом [6]:

$$D_{STDL0}^{d,s,se,t} = \beta_{STDL} \cdot D_0^{d,s,se,t}, \quad (21)$$

$$D_{STDL}^{d,s,se,t} = D_{STDL0}^{d,s,se,t} - \sum_{d' \neq d, d' \in \Omega_{DC}} D_{STDLS}^{dd',s,se,t}, \quad (22)$$

$$\begin{cases} -M_{VM} \cdot n_{VM}^{dd',s,se,t} \leq b_{DC}^L \cdot D_{STDLS}^{dd',s,se,t} \leq M_{VM} \cdot n_{VM}^{dd',s,se,t} \\ -M_{VM} \cdot n_{VM}^{d'd,s,se,t} \leq b_{DC}^L \cdot D_{STDLS}^{dd',s,se,t} \leq M_{VM} \cdot n_{VM}^{d'd,s,se,t} \end{cases} \quad (23)$$

$$0 \leq \sum_{d' \neq d, d' \in \Omega_{DC}} n_{VM}^{dd',s,se,t} \leq n_{VM}^d, \quad (24)$$

$$0 \leq \sum_{d' \neq d, d' \in \Omega_{DC}} \max(0, D_{STDLS}^{dd',s,se,t}) \leq D_{STDLO}^{d,s,se,t} \quad (25)$$

где β_{STDL} – доля STDL в общем объеме данных;

$D_{STDLO}^{d,s,se,t}$ – начальный объем данных STDL;

$D_{STDLS}^{dd',s,se,t}$ – объем данных, перемещенных между ЦОД;

$n_{VM}^{dd',s,se,t}$ – количество виртуальных машин, необходимых для миграции данных;

b_{DC}^L – мощность одной задачи данных;

M_{VM} – мощность одного набора виртуальных машин;

n_{VM}^d – количество виртуальных машин в ЦОД.

Уравнения (21)–(25) задают долю мощности STDL, ограничения баланса миграции задач, пропускную способность оптического волокна между ЦОД, доступность VM, а также общие ограничения на переносимость STDL.

Жёсткая нагрузка данных (RDL). В данной категории данных заложены строгие требования к времени обработки или качеству информации, что делает их неспособными участвовать в планировании ресурсов системы в ответ на колебания спроса. Примеры жёсткой нагрузки включают реально-временные удалённые операции, обработку сигналов в системах управления безопасностью электроснабжения и аналогичные задачи.

Операционные характеристики RDL определяются следующим уравнением:

$$D_{RDL}^{d,s,se,t} = (1 - \beta_{TSDL} - \beta_{STDL}) \cdot D_0^{d,s,se,t} \quad (26)$$

где $D_{RDL}^{d,s,se,t}$ – объём жёсткой нагрузки данных на момент времени t .

Общая нагрузка данных ЦОД с учетом отклика на спрос. Согласно уравнениям 17–26, общая информационная нагрузка, которую ЦОД должен обработать в каждый временной период, представлена следующей суммой [6]:

$$D_{d,s,se,t} = D_{TSDL}^{d,s,se,t} + D_{STDL}^{d,s,se,t} + D_{RDL}^{d,s,se,t} \quad (27)$$

Общая нагрузка включает в себя объёмы временно-чувствительной нагрузки, пространственно-переносимой нагрузки, а также жёсткой нагрузки данных соответственно.

Модель ЦОД в условиях углеродной нейтральности

Для обеспечения реализации стратегической прогностической оптимизационной модели в условиях углеродной нейтральности, в данную модель описания функционирования ЦОД включена модель для расчета выгод углеродной нейтральности для распределительных систем, включающих центры обработки данных. Кроме того, учтено влияние неопределенности на достижение целей стратегической прогностической оптимизационной модели и предлагается модель оценки рисков потерь углеродной нейтральности на CVaR, что способствует разработке последующих моделей.

Как описано в работе [3], выбросы углерода в распределительных системах с участием центров обработки данных в основном происходят из двух источников: прямые выбросы от распределенных источников энергии в системе и косвенные выбросы от приобретения электроэнергии у вышестоящих энергосистем. Учитывая минимальные выбросы от возобновляемых источников энергии, таких как ветро- и солнечная энергия, данный анализ сосредотачивается на воздействии внешних закупок электроэнергии на выбросы углерода, в частности на изменения в потреблении энергии.

В современной энергетической инфраструктуре, где основным источником остается тепловая генерация, выгоды стратегической прогностической оптимизационной модели в достижении углеродной нейтральности количественно оцениваются через стоимость углеродного налога, отражающего действующие политики управления выбросами углерода [6]. В рамках модели стоимость выбросов углерода C_t , за определенный период t , рассчитывается путем умножения закупленной электроэнергии от главной сети $P_{Trans}^t \cdot \Delta t$, интенсивности выбросов углерода e_{THG} и ставки углеродного налога CC^C по следующей формуле:

$$C_t^C = CC^C e^{THG} P_{Trans}^t \Delta t. \quad (28)$$

Очевидно, что при определенном уровне нагрузки, если интегрированное планирование способствует повышению энергоэффективности, закупка электроэнергии у главной сети будет снижена, и затраты на углеродный налог сократятся. Наоборот, если планировочная стратегия этому не способствует придется платить больше за выбросы углерода, что соответственно увеличит совокупные эксплуатационные расходы системы.

Оценка риска углеродной нейтральности с использованием CVaR. В условиях высокой неопределённости, обусловленной прерывистостью выхода RES, флуктуациями нагрузки и ошибками в прогнозировании, планирование в рамках ИИП часто сталкивается с проблемами. Для количественной оценки риска потерь системы в различных сценариях применяется методика на основе CVaR. CVaR для функции цели $l(x, y)$ с оптимизационной переменной x и случайной переменной y подчиняющейся распределению вероятностей $p(y)$ может быть выражен как:

$$CVaR = \left\{ \frac{1}{1 - \sigma} \int l(x, y) p(y) dy \mid l(x, y) \geq \alpha \right\} \quad (29)$$

Здесь α соответствует значению VaR, которое является минимально возможным.

Для более точного выражения CVaR вводится вспомогательная функция $F_\sigma(x, \alpha)$:

$$F_\sigma(x, \alpha) = \alpha + \frac{1}{1 - \sigma} \int [l(x, y) - \alpha]^+ p(y) dy \mid y \in R \quad (30)$$

Основными факторами неопределенности в системе являются спрос на данные/электроэнергию и температура окружающей среды. Исходя из актуальных исследований, предполагается, что скорость ветра распределяется по закону Вейбулла, тогда как спрос на данные/электроэнергию и температура подчиняются усечённому нормальному распределению.

Для преобразования задач стохастической оптимизации в задачи детерминированной оптимизации используются классические методы сценариев вероятностей, включая симуляцию Монте-Карло и кластеризацию методом К-средних. Эти методы позволяют генерировать и сокращать сценарии, обеспечивая формирование общего набора сценариев системы $\Omega_S = \{SC_s, s = 1, 2, \dots, SS\}$, где SS – количество сценариев, и определение вероятности каждого из сценариев p_s .

Аналитическое выражение для оценочного значения CVaR в вероятностных сценариях определяется следующим образом:

$$F_\sigma(x, \alpha) = \alpha + \frac{1}{1 - \sigma} \sum_{s=1}^S \{[p_s(l(x, y_s) - \alpha)]^+\} \quad (31)$$

Исходя из совместного использования уравнений 28 – 31, при уровне доверия σ значение CVaR углеродной нейтральности в системе равно [6]:

$$C^{C-CVaR} = \alpha^C + \frac{1}{1 - \sigma} \sum_{s \in \Omega_S} p_s [C_s^C - \alpha^C]^+ \quad (32)$$

В данном уравнении α^C отражает потенциальные затраты на риск углеродной нейтральности, которые могут возникнуть в системе в условиях неопределенности. В рамках практического планирования,

для достижения научно обоснованного баланса между ожидаемыми выгодами и рисками, в модели это интегрируется в целевую функцию вместе с традиционными экономическими показателями, формируя оптимизационную модель, которая учитывает риски углеродной нейтральности.

В условиях углеродной нейтральности необходимо одновременно максимизировать ожидаемые экономические и экологические выгоды системы и минимизировать ожидаемые затраты на риски, связанные с неопределенностью. Учитывая взаимные ограничения между выгодами и затратами при соблюдении стандартов качества электроснабжения, разрабатывается целевая функция модели, интегрирующая факторы углеродной нейтральности и CVaR [6]:

$$\min C = (1 - \gamma) \cdot (C_I + C_O + C_C) + \gamma \cdot (C_{IO_CVaR} + C_{C_CVaR}) \quad (33)$$

Данная функция включает в себя ожидаемые затраты системы, связанные с выбросами углерода $C_I + C_O + C_C$, и суммарные рискованные потери $C_{IO_CVaR} + C_{C_CVaR}$, где взвешивание двух аспектов определяется коэффициентом γ . При низких значениях γ доминирует стремление к максимизации ожидаемых выгод за счет увеличения рискованных затрат. При высоких значениях γ акцент делается на минимизации рисков, даже за счет потенциального снижения выгод системы. Регулирование параметра γ предоставляет возможность лицам, принимающим решения, находить оптимальный баланс между ожидаемыми доходами и рисками, что позволяет сформировать наиболее эффективный интегрированный план действий. В данном уравнении переменные C_I, C_O, C_C и C_{IO_CVaR} представляют собой соответственно годовые инвестиционные затраты, эксплуатационные расходы, издержки, связанные с углеродными выбросами, и экономические затраты, связанные с рисками системы.

Расходы на организацию моделей вычислительной нагрузки в зависимости от QoS и моделей ЦОД в условиях углеродной нейтральности напрямую связаны с электропотреблением — чем выше электропотребление, тем выше нагрузка на оборудование и, во втором случае, выше углеродный налог.

Параметрические ограничения модели

Этап планирования. На стадии планирования, в условиях ограничений общего бюджета инвестиций и доступности пространства, критично важно ввести ограничения на максимальную мощность, которую могут иметь различные устройства в системе. Уравнения (4)–(6) задают следующие ограничения: максимально допустимая мощность для расширения трансформаторных подстанций, выбор типов линий для расширения электросетей, а также максимальная мощность установки оборудования в ЦОД, включая распределенные источники энергии, серверы, виртуальные машины и системы кондиционирования воздуха. Эти ограничения математически выражаются следующим образом [6-11]:

$$0 \leq P_{TF_add} \leq P_{TF_A_max}, \quad (34)$$

$$0 \leq \sum_{m \in \Omega_{line}} x_{Line}^{ij,m} \leq 1 \quad \forall ij \in \Omega_F, \quad (35)$$

$$0 \leq n_X^d \leq \chi_{DC}^d \cdot n_{X_max}^d, \quad (36)$$

где $P_{TF_A_max}$ — это максимальная расширяемая мощность подстанции;

$n_{X_max}^d$ — максимальная конфигурируемая мощность устройства X.

Ограничения со стороны генерации энергии. Генерация энергии в системе распределительной сети с использованием распределенных источников энергии регулируется их установленной мощностью и максимальным прогнозируемым выходом. Соответствующее ограничение выражается уравнением [6-11]:

$$0 \leq P_{WTG}^{i,s,se,t} \leq P_{WTG_F}^{i,s,se,t}, \quad (37)$$

где $P_{WTG_F}^{i,s,se,t}$ — прогнозируемый выход ветровой турбины в момент времени t.

$P_{WTG}^{i,s,se,t}$ — фактический выход ветровой турбины в момент времени t.

Ограничения со стороны сети. Для обеспечения стабильности качества напряжения в распределительной сети важно контролировать колебания напряжения на каждом узле в процессе эксплуатации. Это достигается через условие:

$$V_i^{\min} \leq V_{i,s,se,t} \leq V_i^{\max}, \quad (38)$$

где $V_{i,s,se,t}$ – амплитуда напряжения на узле i в момент времени t ;

$V_i^{\max}$ и $V_i^{\min}$ – максимально и минимально допустимые значения напряжения на узле i соответственно.

Баланс мощности на узлах. Выходная мощность каждого узла в распределительной сети должна быть равна входной мощности [6]:

$$\begin{cases} \sum_{ji \in \Omega_F} (P_{ij,s,se,t} - I_{ji,s,se,t}^2 r_{ji}) + P_{i,s,se,t}^{WTG} = \sum_{ik \in \Omega_F} (P_{ik,s,se,t} + g_i U_{i,s,se,t}^2) + P_{i,s,se,t}^{DC} + P_{i,s,se,t}^L \\ \sum_{ji \in \Omega_F} (Q_{ji,s,se,t} - I_{ji,s,se,t}^2 x_{ji}) + Q_{i,s,se,t}^{WTG} = \sum_{ik \in \Omega_F} (Q_{ik,s,se,t} + b_i U_{i,s,se,t}^2) + Q_{i,s,se,t}^{DC} + Q_{i,s,se,t}^L \end{cases}, \quad (39)$$

где $P_{ji,s,se,t}$ и $Q_{ji,s,se,t}$ – активная и реактивная мощности соответственно, проходящие через линию ji в момент времени t ;

$P_{i,s,se,t}^L$ и $Q_{i,s,se,t}^L$ – активная и реактивная мощности нагрузки на узле i в момент времени t ;

$Q_{i,s,se,t}^{WTG}$ и $Q_{i,s,se,t}^{DC}$ – реактивные мощности ветровой турбины и центра обработки данных соответственно, измеряемые на узле i в момент времени t ;

Для повышения эффективности расчетов применяется линейная модель, что позволяет сократить пространство решений для оптимизационных задач за счет внутренних аппроксимаций и, одновременно, может расширить решаемое пространство оригинальной неконвексной модели энергопотока до включения недопустимых областей [6].

Ограничения энергопотока в энергосети. Эксплуатация распределительной системы с ЦОД должна соответствовать ограничениям энергопотока в энергосети [6]:

$$\begin{aligned} V_{i,s,se,t} - V_{j,s,se,t} = 2P_{ij,s,se,t} \left(x_{ij,m}^{L-R} R_{ij}^0 + \sum_{m \in \Omega_l} x_{ij,m}^{\text{Line}} R_{ij,m} \right) + \\ + 2Q_{ij,s,se,t} (x_{ij,m}^{L-R} X_{ij}^0 + \sum_{m \in \Omega_l} x_{ij,m}^{\text{Line}} X_{ij,m}), \end{aligned} \quad (40)$$

$$x_{ij,m}^{L-R} = 1 - \sum_{m \in \Omega_l} x_{ij,m}^{\text{Line}}, \quad (41)$$

$R_{ij,m}$ и $X_{ij,m}$ – сопротивление и реактивное сопротивление линии ij ;

$x_{ij,m}^{L-R}$ – вспомогательная переменная, указывающая на статус модернизации линии ij ;

Ограничения пропускной способности линий. Активная/реактивная мощность, проходящая через каждую линию распределительной сети, не должна превышать ее номинальную пропускную способность, поэтому [11]:

$$P_{ij,s,se,t}^2 + Q_{ij,s,se,t}^2 \leq x_{ij,m}^{L-R} (S_{ij}^{(no)max})^2 + \sum_{m \in \Omega_l} x_{ij,m}^{\text{Line}} (S_{ij,m}^{max})^2, \quad (42)$$

где $S_{ij}^{(no)max}$ и $S_{ij,m}^{max}$ – пропускная способность линии ij до и после модернизации соответственно.

Ограничения на мощность покупки электроэнергии. В связи с ограниченной пропускной способностью распределительного трансформатора, приобретаемая системой мощность от вышестоящей энергетической системы в каждый отдельный момент времени должна удовлетворять следующим условиям [6]:

$$0 \leq P_{s,se,t}^{Trans} \leq (P^{TF-add} + P^{TF-OR}), \quad (43)$$

где P^{TF-OR} — начальная номинальная мощность распределительного трансформатора до его расширения.

Ограничения со стороны потребителя. В рамках упрощения аналитической задачи представленного исследования предполагается, что все ЦОД эксплуатируют идентичные модели серверов. В процессе эксплуатации задачи обработки данных распределяются между активными серверами на принципе равномерности. Определение времени обработки задач на каждом сервере можно выразить следующим образом [11]:

$$T_{d,s,se,t}^{Queue} = \frac{1}{\mu_d - \frac{D_{d,s,se,t}}{n_{d,s,se,t}^{ser-on}}} \quad (44)$$

$$T_{d,s,se,t}^{Handle} = \frac{1}{\mu_d}, \quad (45)$$

$$T_{d,s,se,t}^{Queue} + T_{d,s,se,t}^{Handle} \leq T_{Delay}, \quad (46)$$

где $T_{d,s,se,t}^{Queue}$ — время ожидания задач в очереди;

$T_{d,s,se,t}^{Handle}$ — время их обработки;

T_{Delay} — максимальное время задержки, допустимое для пользователя.

Дополнительно, в контексте эксплуатации ЦОД необходимо учитывать разнообразные операционные ограничения, обеспечивающие надежную загрузку данных пользователей.

Метрики энергоэффективности. Коэффициент эффективности использования энергии (PUE)— важный индикатор энергоэффективности центров обработки данных. Он отражает долю энергии, потребляемой информационно-технологическим оборудованием, по отношению к общему энергопотреблению данных учреждений [8]. Формула для расчёта PUE представляется как:

$$PUE = \frac{E_{DC}}{E_{IT}}, \quad (48)$$

где E_{IT} — потребление энергии ИТ-оборудованием, включающим серверы, сетевые устройства, системы хранения и другие периферийные устройства, используемые для управления, обработки, хранения или передачи данных в центре обработки данных.

E_{DC} — общее энергопотребление центра, включая ИТ-оборудование и инфраструктурные системы, такие как электроснабжение, освещение и системы кондиционирования.

Нижние значения PUE указывают на более высокую эффективность использования энергии, причём идеальное значение равно 1.0, что свидетельствует о том, что вся потребляемая энергия направляется на работу ИТ-оборудования. Этот показатель получил международное признание как стандарт для оценки энергоэффективности центров обработки данных.

2. Динамическая модель нагрузки на телекоммуникационные и вычислительные мощности ЦОД

Управление рабочей нагрузкой ЦОД

Повышение энергоэффективности в центрах обработки данных может быть достигнуто в основном с помощью двух ключевых стратегий: консолидации ресурсов и DVFS [7-12]. Консолидация ресурсов подразделяется на виртуализацию серверов и консолидацию рабочей нагрузки. Виртуализация, широко используемая техника, снижает энергопотребление за счет консолидации рабочих нагрузок на минимальном количестве физических серверов. Этот процесс использует живую миграцию ВМ для динамического распределения ресурсов сервера и памяти в зависимости от изменяющихся требований к качеству обслуживания.

Консолидация рабочей нагрузки, аналогично, концентрирует задачи центра обработки данных на нескольких серверах, что позволяет отключать неиспользуемые серверы для экономии энергии. Боль-

шинство стратегий консолидации ориентированы на оптимизацию серверов, поскольку отключение сетевых компонентов обычно избегается из-за возможного негативного влияния на производительность. Эти методы консолидации требуют использования систем автоматического управления питанием (APM) для динамического включения или выключения компонентов центра обработки данных в ответ на изменения нагрузки.

Техники DVFS, в свою очередь, уменьшают энергопотребление путем регулирования либо входного напряжения, либо частоты переключения компонентов центра обработки данных. Этот подход требует совместимого оборудования и реализации стандарта Advanced Configuration and Power Interface (ACPI). DVFS применяется как в серверах, так и в сетевых коммутаторах, чтобы снизить частоту работы и при этом поддерживать необходимую пропускную способность, минимизируя потребление энергии [12]. Кроме того, такие техники, как DCEERS, оптимизируют энергоэффективность, регулируя набор активных ресурсов в соответствии с текущей рабочей нагрузкой, что гарантирует использование только необходимых ресурсов в любой момент времени.

Классификация рабочих нагрузок в современных центрах обработки данных

Современные центры обработки данных поддерживают широкий спектр услуг, включая веб-хостинг, видео по запросу (VoD), обмен контентом и облачные вычисления [7,12]. Эти услуги существенно различаются по своим вычислительным и коммуникационным требованиям. Рабочие нагрузки в центрах обработки данных можно условно разделить на три типа [9]:

1. Сбалансированные нагрузки.
2. Вычислительно-интенсивные нагрузки (CIW).
3. Нагрузки, требующие интенсивной обработки данных (DIW).

Сбалансированные нагрузки генерируются приложениями, которым требуется как вычислительная мощность, так и сетевые ресурсы, например, геоинформационные системы.

Вычислительно-интенсивные нагрузки (CIW) обычно создаются приложениями для высокопроизводительных вычислений (HPC), которые требуют значительных вычислительных ресурсов, но имеют минимальные потребности в коммуникации. В центрах обработки данных, обслуживающих CIW, меры по повышению энергоэффективности в основном сосредоточены на сетевых коммутаторах, поскольку серверы должны оставаться активными для удовлетворения высоких вычислительных требований.

Нагрузки, требующие интенсивной обработки данных (DIW), создаются такими приложениями, как обмен контентом и VoD. DIW требуют высокой пропускной способности и низкой задержки для эффективной передачи данных, при этом их вычислительные потребности относительно невелики. В таких случаях стратегии повышения энергоэффективности сосредоточены на оптимизации использования серверов, так как коммутаторы должны оставаться активными для обработки значительных объемов передаваемых данных.

3. Модель ЦОД с учетом экономических рисков

Модель калькулирования «усеченной» себестоимости

В основе модели калькулирования «усеченной» себестоимости находится принцип разделения общих текущих затрат отчетного периода по признаку их взаимосвязи с производством на производственные (прямые, условно-постоянные) и периодические и калькулирование неполной, ограниченной себестоимости по объектам калькулирования. При организации управленческого учета по варианту «усеченной» себестоимости часть текущих расходов не включается в себестоимость, а возмещается общей суммой из выручки валовой прибыли. К этой части расходов относятся условно-постоянные расходы, которые учитываются в бухгалтерском учете на счете 26 «Общехозяйственные расходы» и мало зависят от деловой активности ЦОД. Финансовый результат при калькулировании неполной (усеченной) себестоимости, когда общехозяйственные расходы сразу списываются на счет результатов, напрямую будет зависеть от изменения переменных расходов на электропотребление ЦОД. Использование модели калькулирования «усеченной» себестоимости и математические расчеты электропотребления позволят определить оптимальные решения для деятельности ЦОД.

Основные признаки классификации экономических рисков

На законодательном уровне в Российской Федерации установлено, что ведение любой предпринимательской деятельности связано с рисками. В Гражданском кодексе Российской Федерации п. 1 ст. 2

дано определение предпринимательской деятельности: «Предпринимательская деятельность — это самостоятельная, осуществляемая на свой риск деятельность, направленная на систематическое получение прибыли от пользования имуществом, продажи товаров, выполнения работ или оказания услуг лицами, зарегистрированными в этом качестве в установленном законом порядке».

С целью правильной оценки риска необходимо создать классификацию видов различных рисков. Сложность составления наиболее полной классификации связана с появлением новых рисков в связи с дальнейшим экономическим развитием организации. Выделяют основные признаки классификации рисков:

- по времени возникновения (ретроспективные, текущие и перспективные);
- по основным факторам возникновения (политические, экономические, социальные, экологические, профессиональные);
- по видам моделей ЦОД (энергосбережения, теплообмена, вычислительной нагрузки в зависимости от QoS, от условий углеродной нейтральности и т.д.);
- по методам распределения ресурсов в ЦОД (методы на основе виртуализации, методы с учетом тепловых показателей, методы с учетом сетевых показателей);
- по рабочим нагрузкам в современных ЦОД (сбалансированные нагрузки, вычислительно-интенсивные нагрузки (CIW), нагрузки, требующие интенсивной обработки данных (DIW));
- по характеру учета и по характеру последствий (внешние (инфляционный, процентный, валютный, налоговый) и внутренние (уровень деловой активности руководства, выбор маркетинговой стратегии, сбытовой, налоговой политики и т.д.));
- по сфере возникновения (производственные, коммерческие, финансовые, страховые и другие);
- по ряду других признаков.

В современных условиях существует множество других признаков классификации рисков, которые не перечислены в списке. Одна из основных задач руководителей организации проанализировать риск и принять верное управленческое решение.

Поэтапная сдача работ позволит сэкономить на налоге на прибыль

В договоре по строительству ЦОД следует предусмотреть:

- поэтапную сдачу работ: определить окончание первого этапа работ (и каждого последующего) на следующий налоговый период, тем самым можно перенести срок оплаты по налогу на прибыль;
- определить стоимость каждого этапа работ чуть выше экономически обоснованных и документально подтвержденных расходов конкретного периода, окончательный доход зафиксировать ближе к завершению работ.

Договором по строительству ЦОД не предусмотрена поэтапная сдача работ, тогда доходы, относящиеся к налоговому периоду, нужно признавать в части до передачи заказчику. В учетной политике организации следует закрепить один из вариантов формирования доходов: пропорционально доле фактических расходов отчетного периода в общей сумме расходов и равномерно на основании данных учета.

Выводы

Основным результатом проведенного исследования является интегрированный стратегический подход к управлению центрами обработки данных, включающий анализ теоретических основ, архитектурных решений, инфраструктуры, безопасности и управления ресурсами. Данный подход является универсальным и может быть адаптирован к разнообразным типам и конфигурациям дата-центров. Исследование фокусируется на оптимизации энергоэффективности и повышении надежности управления ЦОД. Организация управленческого учета модели калькулирования «усеченной» себестоимости и математические расчеты электропотребления позволят найти оптимальные решения для более эффективной деятельности ЦОД.

Задача разработки стратегической прогностической оптимизационной модели для распределительных сетей и центров обработки данных формулируется как двухэтапная стохастическая оптимизационная модель. На первом этапе разрабатываются планы и принимаются решения, направленные на снижение инвестиционных затрат системы, оптимизацию расширения линий электропередачи, определение местоположения ЦОД и распределение физических и программных ресурсов (включая серверы, виртуальные машины и оборудование для охлаждения), а также размещение и определение мощности. Полученная схема планирования служит набором известных параметров для второго этапа, который представляет собой операционное моделирование, нацеленное на минимизацию суммы ежегодных эксплуатационных затрат и получение выгод от углеродной нейтральности.

На этом этапе оптимизируются стратегии эксплуатации центров обработки данных (включая миграцию информационной нагрузки, режимы работы серверов и работу оборудования для охлаждения) и распределительной сети для каждого временного периода. Результаты второго этапа используются для корректировки целевой функции первого этапа в виде «ожидаемых эксплуатационных затрат» и «выгод от углеродной нейтральности» с целью уточнения и корректировки схемы планирования.

Экономическая ситуация напрямую влияет на стратегическое управление ЦОД, и успешная стратегия должна учитывать эти факторы для обеспечения эффективной работы ЦОД в будущем. Каждый ЦОД требует индивидуального подхода в управлении, основанного на его уникальных характеристиках и типе операций. Дальнейшие исследования в этой области помогут оптимизировать стратегические решения и улучшить рентабельность ЦОД.

Литература

1. Beloglazov A., Buyya R. Energy efficient resource management in virtualized cloud data centers. In: Cluster, Cloud and Grid Computing (CCGrid), 2010 10th IEEE/ACM International Conference on. 2010. P. 826-831.
2. Bilal K., Khan S., Madani S., Hayat K., Khan M., Min-Allah N., Kolodziej J., Wang L., Zeadally S., Chen D. A survey on green communications using adaptive link rate // Clust. Comput. 2013. V. 16 (3). P. 575-589. DOI: 10.1007/s10586-012-0225-8 EDN: BBFIIG.
3. Ding Zhaohao, Cao Yujie, Zhang Sufang, et al., Coordinated operation for data center and power system in the context of energy internet: energy demand management model of data center, Proc. CSEE 42 – 09.2022– P. 3161-3177.
4. Chen H., Gao P., Liu K., Chen L., Huang W. Joint expansion planning for data centers and distribution networks based on conditional value-at-risk theory considering low carbon characteristics Electr. Power Syst. 2024.-Res., 229. DOI: 10.1016/j.eprsr.2024.110162 EDN: HASKZR.
5. Feng C., Wang Yi, Chen Q., et al., Review of energy management for data centers in energy internet // Electric Power Automat. Equip. 2020. V. 40 (07). P. 1-9.
6. Yang T., Jiang H., Hou Y., et al., Study on carbon neutrality regulation method of interconnected multi-datacenter based on spatio-temporal dual-dimensional computing load migration, Proc. CSEE 42 (01) -2022.– 164-177.
7. Kliazovich D., Bouvry P., Khan S. Dens: Data center energy-efficient network-aware scheduling. In: Green Computing and Communications (GreenCom), 2010 IEEE/ACM International Conference on Cyber, Physical and Social Computing (CPSCom), 2010. P. 69-75.
8. Liu Y., Wei X., Xiao J., Liu Z., Xu Y., Tian Y. Energy consumption and emission mitigation prediction based on data center traffic and PUE for global data centers // Global Energy Interconnection. 2020. V. 3 (3). P. 272-282. DOI: 10.1016/j.gloi.2020.07.008 EDN: JOCDVH
9. Shuja J., Bilal K., Madani S. A., Khan S. U. Data center energy efficient resource scheduling // Cluster Computing. 2014. V. 17 (4). P.1265-1277. DOI: 10.1007/s10586-014-0365-0 EDN: XAGPYN.
10. Valentini G.L., Lassonde W., Khan S.U., Min-Allah N., Madani S.A., Li J., Zhang L., Wang L., Ghani N., Kolodziej J., et al.: An overview of energy efficiency techniques in cluster computing systems // Clust. Comput. 2013. V. 16 (1). P. 3-15. DOI: 10.1007/s10586-011-0171-x EDN: TOHYUZ.
11. Wang L., Khan S., Dayal J. Thermal aware workload placement with task-temperature profiles in a data center // J. Supercomput. 2012. V. 61 (3). P. 780-803. DOI: 10.1007/s11227-011-0635-z EDN: MYIPRL.