Энергосбережение и энергоэффективность

УДК 697: 681.5

© Н. С. Пономарев, канд. физ.-мат. наук, доцент

© А. Ю. Мартянова, канд. техн. наук, доцент

© Ю. А. Дмитриев, аспирант

(Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет,
Санкт-Петербург, Россия)

E-mail: pnmrv17@mail.ru

DOI 10.23968/1999-5571-2021-18-2-166-172

© N. S. Ponomarev, PhD in Sci. Phys.-Math., Associate Professor

© A. Yu. Martianova, PhD in Sci. Tech., Associate Professor

© Yu. A. Dmitriev, post-graduate student

(Saint Petersburg State University
of Architecture and Civil Engineering,
St. Petersburg, Russia)

E-mail: pnmrv17@mail.ru

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОПОСТУПЛЕНИЙ ОТ СЕРВЕРНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

ASSESSMENT OF HEAT GAIN FROM SERVER EQUIPMENT

Блейд-серверная архитектура широко используется в качестве серверного оборудования для центра обработки данных. Предложены способы расчета тепlopоступлений от блейд-серверов на стадии проектирования и эксплуатации. В частности, способ расчета тепlopоступлений на стадии проектирования может быть использован для подбора оборудования системы кондиционирования. Способ расчета тепlopоступлений на стадии эксплуатации при текущей нагрузке ИТ-оборудования может быть полезен для анализа работы существующих систем кондиционирования или анализа энергоэффективности ИТ-оборудования в конкретной спецификации.

Ключевые слова: центр обработки данных, тепlopоступления, входная мощность, выходная мощность, энергоэффективность, машинный зал, холодный коридор, горячий коридор.

Blade server architecture is widely used as server hardware for datacenters. This article proposes methods for calculating thermal radiation from blade servers at the design and operation stages. In particular, the method for calculating heat gain at the design stage can be used to select equipment for the air conditioning system. The method for calculating heat gains at the operational stage with the current load of IT equipment can be useful for analyzing the operation of existing air conditioning systems or analyzing the energy efficiency of IT equipment in a specification.

Keywords: datacenter, heat gain, power input, power output, energy efficiency, machine room, cold aisle, hot aisle.

Центры обработки данных (ЦОД) — это объекты, предназначенные для размещения серверного и сетевого оборудования для обработки, хранения и распространения информации. Как правило, это достаточно крупные комплексы с размещением более 50 стоек ИТ-оборудования (комплексы с размещением до 50 стоек называют серверными) [1]. Несмотря на стремительное развитие ЦОД в последние десятилетия, возникают вопросы при проектировании систем инженерного обеспечения этих объектов.

Тепловыделения от ИТ-оборудования принимают равными величине потребляемой мощности с учетом коэффициентов запаса, одновре-

менности и загруженности [2, 3]. Под потребляемой мощностью подразумевается полная входная мощность, которая отличается от полезной выходной на величину эффективности блока питания ИТ-оборудования [4]. Полезная выходная мощность пропорциональна текущей вычислительной нагрузке серверов [5]. Таким образом, тепловыделения от ИТ-оборудования зависят не только от потребляемой мощности, но и от вычислительной нагрузки.

Целью данной работы является разработка метода расчета тепловыделения от ИТ-оборудования на стадии проектирования и во

время эксплуатации в зависимости от вычислительной загрузки этого оборудования.

На стадии проектирования для определения расчетных теплоступлений от ИТ-оборудования в машинном зале предлагается следующий порядок действий: сбор исходных данных; определение расчетных теплоступлений для каждого конкретного типа производителя ИТ-оборудования.

Исходными данными для определения теплоступлений от ИТ-оборудования являются:

- паспортные данные на оборудование: мощность блоков питания (в документах на ИТ-оборудование в основном указывается полезная выходная мощность);
- эффективность работы блоков питания (коэффициент мощности по стандарту 80 PLUS).

Для определения расчетных теплоступлений находят значение полной входной мощности при полной загрузке для конкретного шасси по формуле

$$P_{\text{вх},i} = 100 \cdot P_{\text{вых},i} \cdot n_{\text{б.п.}} \cdot \eta_{\text{б.п.},i}^{-1}, \text{Вт}, \quad (1)$$

где $P_{\text{вых},i}$ — полезная выходная мощность или паспортная мощность блоков питания для конкретного шасси, Вт; $P_{\text{вх},i}$ — полная входная мощность блоков питания для конкретного шасси, Вт; $n_{\text{б.п.}}$ — количество одновременно работающих блоков питания шасси при отсутствии одного из лучей электроснабжения по схеме резервирования ($N + N$), шт.; $\eta_{\text{б.п.},i}$ — эффективность одного блока питания по стандарту 80 PLUS (при 100 %-ном электропотреблении эффективность блока питания 91 %), %.

После определения полной входной мощности для каждого типа шасси найдем теплоступления при полной загрузке по формуле

$$Q_i = P_{\text{вх},i} \cdot k_o \cdot k_z, \text{Вт}, \quad (2)$$

где k_o — коэффициент одновременности и загрузки (принимается равным 0,8 по [2]); k_z — коэффициент запаса (принимается равным 1,2 по [2]).

В качестве примера рассмотрен один из машинных залов ЦОД, построенного в 2019 году в Санкт-Петербурге. Машинный зал состоит из 24 стоек с ИТ-оборудованием, установленных в два ряда по 12 штук. Такое расположение наиболее распространено и называется рядной архитектурой ЦОД. Все стойки расположены боком друг к другу и образуют горячий и холодный коридоры. ИТ-оборудование во всех стойках уста-

навливается так, чтобы отвод тепла осуществлялся в горячий коридор, а забор охлажденного воздуха производился из холодного.

Электроснабжение ИТ-оборудования машинного зала обеспечивается по особой I категории, поэтому в каждой стойке устанавливаются по два стоечных блока распределения питания (БРП), которые запитаны от двух независимых лучей электроснабжения (вводов — основного и резервного) [6]¹. Это необходимо для обеспечения бесперебойного электроснабжения в случае аварий на одном из лучей. В качестве ИТ-оборудования в каждой стойке установлены так называемые шасси с блейд-серверами². Блейд-сервер — это обычный сервер, за исключением того, что он не предназначен для автономной работы и поставляется в компактном корпусе для установки в специальное шасси, которое представляет собой короб с посадочными местами для блейд-серверов. Основная функция шасси — коммутация блейд-серверов в блейд-систему и электропитание от встроенных блоков питания.

Таким образом, в каждой стойке машинного зала установлено по одному шасси с блейд-серверами. При этом в 14 стойках установлены шасси производства Huawei, в остальных 10 — Lenovo. Шасси Lenovo и Huawei в своем комплекте имеют шесть блоков питания, из которых три получают электроснабжение от основного луча (ввода), а три другие — от резервного (резервирование $N + N$)^{3,4}. Кроме того, могут быть и другие схемы резервирования, например, $N + M$ или $N + 1$.

В рассматриваемом машинном зале блоки питания шасси Huawei имеют выходную мощность 3000 Вт каждый, а количество одновременно работающих при отсутствии одного из лучей электроснабжения — 3 из 6 (резервирование $N + N$). Блоки питания шасси Lenovo имеют выходную

¹ Стандарт TIA-942. Ред. 7.0. 2005 // LANDATA. URL: https://www.ups-info.ru/etc/tia_russkii.pdf (дата обращения: 23.02.2021).

² Patel P., Herrman B., Hughes J., Araujo D.N., de Cases M., Pham N., Matoglu E. Data center server packaging technology // IEEE 14th Topical Meeting on Electrical Performance of Electronic Packaging. 2005. Pp. 203–206.

³ Шасси корпоративного класса Flex System // Lenovo. URL: <https://www.lenovo.com/ru/ru/data-center/servers/flex-blade-servers/chassis/Flex-System-Enterprise-Chassis/p/77XS7PF7P10> (дата обращения: 23.02.2021).

⁴ Huawei E9000 Blade Server Data Sheet // Huawei. URL: <https://e.huawei.com/ru/material/datacenter/server/8d00ee21c8ab4dda93368b4f0e60e814> (дата обращения: 23.02.2021).

мощность 2500 Вт каждый и количество одновременно работающих при отсутствии одного из лучей электроснабжения также 3 блока из 6 (резервирование $N + N$). Эффективность всех блоков питания в соответствии со стандартом 80 PLUS соответствует уровню Platinum и при 100 %-ном электропотреблении составляет 91 %⁵.

Полная входная мощность для одного шасси Huawei в машинном зале составит

$$P_{\text{вх.Huawei}} = \frac{100 \cdot 3000 \cdot 3}{91} = 9890, \text{ Вт};$$

для одного шасси Lenovo

$$P_{\text{вх.Lenovo}} = \frac{100 \cdot 2500 \cdot 3}{91} = 8242, \text{ Вт}.$$

Теплопоступления для одного шасси Huawei в машинном зале составят

$$Q_{\text{Huawei}} = 9890 \cdot 0,8 \cdot 1,2 = 9494, \text{ Вт};$$

для одного шасси Lenovo

$$Q_{\text{Lenovo}} = 8242 \cdot 0,8 \cdot 1,2 = 7912, \text{ Вт}.$$

Суммарные теплопоступления от шасси в машинном зале равны

$$Q = Q_{\text{Huawei}} \cdot N_{\text{Huawei}} + Q_{\text{Lenovo}} \cdot N_{\text{Lenovo}} = 9494 \cdot 14 + 7912 \cdot 10 = 212\,036, \text{ Вт}, \quad (3)$$

где N_{Huawei} , N_{Lenovo} — количество шасси Huawei и Lenovo в машинном зале соответственно.

Во время эксплуатации или в других случаях, когда необходимо определить теплопоступления

⁵ Что такое сертификат 80 PLUS в описании блоков питания // CHIP : [онлайн-журнал]. URL: <https://ichip.ru/obzory/komplektuyushchie/chto-takoe-sertifikat-80-plus-736102> (дата обращения: 23.12.2020).

от уже функционирующего ИТ-оборудования, достаточно данных о его текущем потреблении мощности от стоечных блоков распределения питания.

В данной работе рассмотрен метод определения теплопоступлений в зависимости от текущей вычислительной загрузки блейд-серверов. На основании данных специализированного программного обеспечения^{6,7} проведена выборка потребления полезной выходной мощности блейд-серверами в зависимости от текущей вычислительной загрузки. На момент выборки текущая вычислительная нагрузка блейд-серверов не превышала 10 %. На рис. 1 и 2 представлена зависимость среднего значения потребляемой полезной выходной мощности от среднего значения вычислительной загрузки для блейд-серверов в одном шасси.

В результате аппроксимации данных, представленных на этих рисунках, получены следующие зависимости средней полезной выходной мощности от средней текущей вычислительной загрузки блейд-серверов в шасси Huawei:

$$P_{\text{вых Huawei}} = (6,4 \cdot \eta_{6,с \text{ Huawei}} + 500,6) \eta_{6,с \text{ Huawei}}, \text{ Вт}; \quad (4)$$

⁶ Center Server: удобное и эффективное управление серверами // VMware. URL: <https://www.vmware.com/ru/products/vcenter-server.html> (дата обращения: 23.02.2021).

⁷ Универсальная система мониторинга Zabbix — введение // Habr : [сайт]. URL: <https://habr.com/ru/post/73338/> (дата обращения: 23.02.2021).

Рис. 1. Зависимость потребляемой полезной выходной мощности от вычислительной загрузки для Huawei

Рис. 2. Зависимость потребляемой полезной выходной мощности от вычислительной загрузки для Lenovo

в шасси Lenovo

$$P_{вых\ Lenovo} = (6,4242 \cdot \eta_{6,с\ Lenovo} + 402,27) n_{6,с\ Lenovo}, \text{ Вт}, \quad (5)$$

где $\eta_{6,с\ i}$ — средняя текущая вычислительная нагрузка блейд-серверов в конкретном шасси, %; $n_{6,с\ i}$ — количество одновременно работающих блейд-серверов в конкретном шасси, шт.

Величина полной входной мощности при текущей вычислительной нагрузке для конкретного шасси определяется по формуле

$$P_{вх\ i} = 100 \cdot P_{вых\ i} \cdot \eta_{6,п\ i}^{-1}, \text{ Вт}. \quad (6)$$

Тогда теплоступления от шасси при текущей вычислительной нагрузке равны полной входной мощности без учета коэффициентов запаса, одновременности и загруженности, так как определяются фактические значения:

$$Q_i = P_{вх\ i} \cdot \eta_{6,п\ i}^{-1}, \text{ Вт}. \quad (7)$$

Для проверки полученных зависимостей проведены инструментальные измерения температуры и скорости воздуха на шасси. На основании измерений выполнены расчеты фактических теплоступлений. Для измерений выбраны шасси с блейд-серверами Lenovo и Huawei. На момент измерений средняя вычислительная нагрузка шасси Lenovo составила 1 %, для шасси Huawei — 10 %. Для всех расчетов принято минимальное значение эффективности блоков питания — 90 %. Измерения проводили прибором Testo 435-1 с помощью зонда для измерения скорости воздуха и температуры. Количество измерений

в каждой точке проведено 3 раза, время измерения в каждой точке 10 секунд⁸. Точки измерений температуры воздуха с фронтальной стороны шасси изображены на рис. 3 и 5, а с тыльной стороны — на рис. 4 и 6.

Система вентиляции не запущена, система кондиционирования работает в штатном режиме по подаваемому воздуху: температура — 20 °С, относительная влажность — 60 % в соответствии с [7]⁹.

Исходные данные для проведения измерений шасси Lenovo:

- площадь отверстий для вентиляторов охлаждения 8 штук по 80 мм² ($F_{ж,с} = 0,0043 \text{ м}^2$), 2 шт. — 2×40 мм² ($F_{ж,с} = 0,0024 \text{ м}^2$);
- площадь отверстий для вентиляторов блоков питания 6 штук — 2×40 мм² ($F_{ж,с} = 0,0023 \text{ м}^2$). Размеры зонда прибора Testo 435-1 соизмеримы с размерами отверстий.

Количество точек измерений температуры входящего воздуха с фронтальной стороны шасси определены исходя из количества уста-

⁸ ГОСТ 12.3.018–79. Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Системы вентиляционные. Методы аэродинамических испытаний. М.: Изд-во стандартов, 1981. 12 с.

⁹ ASHRAE TC9.9 Data Center Networking Equipment – Issues and Best Practices Whitepaper prepared by ASHRAE Technical Committee (TC) 9.9 Mission Critical Facilities, Data Centers, Technology Spaces, and Electronic Equipment. URL: https://www.ashrae.org/File%20Library/Technical%20Resources/Bookstore/ASHRAE_TC0909_Power_White_Paper_22_June_2016_REVISED.pdf (дата обращения: 23.02.2021).

Рис. 3. Шасси Lenovo с обозначением точек измерений температуры входящего в шасси воздуха с фронтальной стороны

новленных блейд-серверов и в соответствии с ГОСТ 12.3.018–79 для прямоугольных сечений со стороной более 200 мм (рис. 3).

В результате измерений температуры входящего воздуха с фронтальной стороны шасси Lenovo ее среднее значение составляет 21,2 °С.

Точки измерений с тыльной стороны: точки 1–8 — отверстия для вентиляторов охлаждения площадью 80 мм², точки 9–10 — отверстия для вентиляторов охлаждения площадью 2×40 мм², точки 11–16 — отверстия для вентиляторов охлаждения блоков питания площадью 2×40 мм² (рис. 4).

Рис. 4. Шасси Lenovo с обозначением точек измерений температуры и скорости выходящего из шасси воздуха с тыльной стороны

Результат измерений температуры и скорости с тыльной стороны шасси представлен в табл. 1.

На основании результатов измерений рассчитан объемный расход воздуха, проходящий через шасси, по формуле

$$L = V \cdot F_{\text{ж.с}} \cdot N \cdot 3600, \text{ м}^3/\text{ч}, \quad (8)$$

где V — скорость воздуха, м/с; $F_{\text{ж.с}}$ — площадь живого сечения отверстий для выходящего воздуха, м²; N — количество точек измерений.

Используя результаты расчета расхода воздуха, вычислим тепlopоступления от шасси по формуле

$$Q = \frac{L \cdot \rho \cdot c \cdot \Delta T}{3,6}, \text{ Вт}, \quad (9)$$

где L — объемный расход воздуха, м³/ч; ρ — плотность воздуха, кг/м³; c — удельная теплоемкость воздуха, кДж/(кг·К); ΔT — разность температур входящего и выходящего воздуха, К.

Результат вычислений по формулам (8) и (9) представлен в табл. 2, из которой видно, что суммарные тепlopоступления от шасси Lenovo составляют 3414,2 Вт.

Проведем сравнительный расчет суммарных тепlopоступлений от шасси Lenovo по формулам (5), (6), (7):

$$P_{\text{вых. Lenovo}} = (6,4242 \cdot 1 + 402,27) \cdot 7 = 2861, \text{ Вт};$$

Таблица 1

Результат измерений с тыльной стороны шасси Lenovo

Точки измерений	Средняя температура T , °С	Средняя скорость V , м/с
Lenovo		
1–8	37,8	3,8
9–10	33,9	5,8
11–16	32,3	2,1

Таблица 2

Результат вычислений объемного расхода и тепlopоступлений от шасси Lenovo

Точки измерений	Объемный расход L , м ³ /ч	Тепlopоступления Q , Вт
Lenovo		
1–8	470,6	2603,9
9–10	100,2	424,3
11–16	104,3	386,0
Сумма	675,1	3414,2

$$Q_{Lenovo} = P_{вх.Lenovo} = \frac{100 \cdot 2861}{90} = 3179, \text{ Вт.}$$

Исходные данные для проведения измерений шасси Huawei:

- площадь отверстий для вентиляторов охлаждения 80×80 мм, площадь живого сечения $F_{ж.с} = 0,0048 \text{ м}^2$ (количество 14 штук);
- площадь отверстий для вентиляторов блоков питания 75×30 мм, площадь живого сечения $F_{ж.с} = 0,0017 \text{ м}^2$ (количество 6 штук).

Количество точек измерений температуры входящего воздуха с фронтальной стороны шасси определены исходя из количества установленных блейд-серверов в соответствии с ГОСТ 12.3.018–79 для прямоугольных сечений со стороной более 200 мм (рис. 5).

В результате измерений температуры входящего воздуха с фронтальной стороны шасси Huawei выявлено, что ее среднее значение составляет 20,0 °С.

Точки измерений с тыльной стороны: точки 1–14 — вентиляторы охлаждения площадью 80×80 мм, точки 15–20 — вентиляторы охлаждения блоков питания площадью 75×30 мм (рис. 6).

Результат измерений температуры и скорости с тыльной стороны шасси представлен в табл. 3.

По формулам (8) и (9) вычислим значения объемного расхода и теплопоступлений. Результат вычислений представлен в табл. 4, из кото-

Рис. 5. Шасси Huawei с обозначением точек измерений температуры входящего в шасси воздуха с фронтальной стороны

рой видно, что суммарные теплопоступления от шасси Huawei составляют 4684,9 Вт.

Проведем сравнительный расчет суммарных теплопоступлений от Huawei по формулам (4), (6), (7):

$$P_{вых.Huawei} = (6,4 \cdot 10 + 500,6) \cdot 8 = 4517, \text{ Вт;}$$

Рис. 6. Шасси Huawei с обозначением точек измерений температуры и скорости выходящего из шасси воздуха с тыльной стороны

Таблица 3

Результат измерений с тыльной стороны шасси Huawei

Точки измерений	Средняя температура T , °С	Средняя скорость V , м/с
Huawei		
1–14	37,0	3,1
15–20	32,7	2,8

Таблица 4

Результат вычислений объемного расхода и теплопоступлений от шасси Huawei

Точки измерений	Объемный расход L , м³/ч	Теплопоступления Q , Вт
Huawei		
1–14	749,9	4249,7
15–20	102,8	435,2
Сумма	852,7	4684,9

$$Q_{Huawei} = P_{вх.Huawei} = \frac{100 \cdot 4517}{90} = 5019, \text{ Вт.}$$

Расхождение между значениями теплоступлений, определенными в процессе инструментальных измерений и рассчитанными по формулам (4), (6), (7), составляет не более 7 %.

Вывод. На основании сравнительного анализа результатов теоретических расчетов теплоступлений от серверного IT-оборудования типа шасси с блейд-серверами и данных инструментальных измерений при идентичных исходных данных доказана адекватность использования расчетного метода для оценки энергоэффективности систем кондиционирования воздуха в процессе их эксплуатации в центрах обработки данных.

Библиографический список

1. Хомутский Ю. С. Почему центры обработки данных охлаждают отдельно. Общие требования и особенности СКВ ЦОД // Мир климата. 2017. № 104. С. 92–94.
2. Хомутский Ю. С. Подбор кондиционеров для ЦОД // Мир климата. 2018. № 109. С. 90–94.
3. Расмуссен Н. Расчет технических требований для общего охлаждения в центрах обработки данных : Информационная статья № 25 // APC by Schneider Electric. URL: https://download.schneider-electric.com/files?p_File_Name=NRAN-5TE6HE_R1_RU.pdf&p_Doc_Ref=SPD_NРАН-5TE6HE_RU&p_enDocType=White%20Paper (дата обращения: 23.02.2021).
4. Аббасова Т. С. Повышение энергетической эффективности центров обработки данных для телекоммуникационных систем // Сервис в России и за рубежом. 2009. № 2. С. 1–16.
5. Ганьжа С. Не PUE единым // Журнал сетевых решений LAN. 2014. № 5. URL: <https://www.osp.ru/lan/2014/05/13041191> (дата обращения: 17.02.2020).
6. Patel P., Herrman B., Hughes J., Araujo D. N., de Cases M., Pham N., Matoglu E. Data center server packaging technology // IEEE 14th Topical Meeting on

Electrical Performance of Electronic Packaging. 2005. Pp. 203–206.

7. Методические рекомендации по проектированию центров обработки данных НП «АВОК». М.: Минстрой России, 2019. 43 с.

References

1. Khomutskiy Yu. S. *Pochemu tsentry obrabotki dannykh okhlazhdayut ot del'no. Obshchie trebovaniya i osobennosti SKV TsOD* [Why data processing centers are cooled separately. General requirements and features of SKV TsOD]. *Mir klimata – Climate World*, 2017, no. 104, pp. 92–94.
2. Khomutskiy Yu. S. *Podbor konditsionerov dlya TsOD* [Selection of air conditioners for data centers]. *Mir klimata – Climate World*, 2018, no. 109, pp. 90–94.
3. Rasmussen N. *Raschet tekhnicheskikh trebovaniy dlya obshchego okhlazhdeniya v tsentrakh obrabotki dannykh* [Calculation of technical requirements for general cooling in data centers]. *Informatsionnaya stat'ya no. 25, APC by Schneider Electric* [Informational article no. 25, APC by Schneider Electric]. Available at: https://download.schneider-electric.com/files?p_File_Name=NRAN-5TE6HE_R1_RU.pdf&p_Doc_Ref=SPD_NРАН-5TE6HE_RU&p_enDocType=White%20Paper (accessed: 23.02.2021).
4. Abbasova T. S. *Povyshenie energeticheskoy effektivnosti tsentrov obrabotki dannykh dlya telekommunikatsionnykh sistem* [Improving the energy efficiency of data processing centers for telecommunications systems]. *Servis v Rossii i za rubezhom – Service in Russia and abroad*, 2009, no. 2, pp. 1–16.
5. Gan'zha S. *Ne PUE edinyim* [Not PUE unified]. *Zhurnal setevykh resheniy/LAN – Journal of Network Solutions/LAN*, 2014, no. 5. Available at: <https://www.osp.ru/lan/2014/05/13041191> (accessed: 17.02.2020).
6. Patel P., et al. *Data center server packaging technology*. IEEE 14-th Topical Meeting on Electrical Performance of Electronic Packaging. 2005, pp. 203–206.
7. *Metodicheskie rekomendatsii po proektirovaniyu tsentrov obrabotki dannykh NP «AVOK»* [Methodological recommendations for the design of data processing centers of NP «AVOK»]. Moscow, Minstroy Rossii Publ., 2019, 43 p.