

*Кто живет с Богом в сердце —
для того нет ничего невозможного.
Посвящается нашим родителям*

Введение

Данная монография предназначена для специалистов, работающих в области информационно-коммуникационных технологий, связи и создания центров обработки данных.

Центр обработки данных (ЦОД), или дата-центр (Data Center), понимается не в узком смысле слова, т. е. исключительно как помещение с инженерной инфраструктурой, предназначенное для размещения оборудования. Особое внимание в данной книге уделено именно «начинке» этого помещения, т. е. серверам, системам хранения данных, коммуникационному оборудованию. Рассмотрены принципы построения и архитектура ЦОД, а также «коробочные» и мобильные ЦОД. Авторы постарались проанализировать и обобщить многочисленные зарубежные и отечественные публикации о различных аспектах проектирования, построения и эксплуатации ЦОД с целью дать читателю системное представление о принципах построения и архитектуре современных ЦОД, а также об основных направлениях их дальнейшего развития.

Главная трудность при работе над данным изданием состояла в том, что ЦОД, и в особенности их содержимое, быстро совершенствуются. Это характерно для всей области информационно-коммуникационных (инфокоммуникационных) технологий. Причем обновления носят иногда качественный характер и требуют пересмотра идеологии построения как отдельных подсистем, так и ЦОД в целом. Поэтому литература по данной тематике должна ежегодно обновляться, а с тем, что ситуация, описанная в данной книге, фиксирует состояние дел на вполне конкретный период времени, авторам и читателю придется смириться.

Вторая проблема заключалась в том, что в условиях быстрого изменения ситуации отсутствуют строгая терминология, нормативная база, стандарты на ряд работ и оборудование. Мы ста-

рались решить эту проблему, давая определение каждому употребляемому нами понятию и термину. Все аббревиатуры расшифрованы в тексте, а иностранные переведены на русский язык. Кроме того, в конце книги приведен перечень используемых аббревиатур с их расшифровкой.

Несмотря на эти трудности, мы надеемся, что книга будет полезна разработчикам ЦОД и их отдельных подсистем хотя бы потому, что послужит систематизации уже накопленных знаний и опыта в области создания современных ЦОД и их возможностей в реализации инфокоммуникационных технологий.

Также данная книга будет полезна студентам вузов для направлений подготовки бакалавров: 11.03.02, 09.03.02; для направлений подготовки магистров: 11.04.02, 09.04.01; для направлений подготовки аспирантов: 05.13.01.

Разделы 4 и 6 монографии написаны при участии Мытенкова Сергея Сергеевича и Шведова Андрея Вячеславовича.

Авторы выражают благодарность компании «Код Безопасности» и лично Шаркову Анатолию Евгеньевичу и Коростелеву Павлу Владимировичу за предоставленные материалы в части защиты конфиденциальной информации в виртуальной среде.

Также авторы признательны Статьеву Вячеславу Юрьевичу, Ерину Леониду Тихоновичу, Новикову Андрею Алексеевичу, Матросову Валерию Михайловичу, Соколову Николаю Александровичу, Крупнову Александру Евгеньевичу за их помощь и советы при работе над материалом данной книги.

1 Определение, история создания, стандарты, нормативная база, архитектура ЦОД

1.1. Определение и особенности современных ЦОД

Во Введении отмечалось, что терминология и классификация понятий, относящихся к ЦОД, не всегда однозначны. Только в феврале 2020 года Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии (Росстандарт) утвердило два новых национальных стандарта, касающихся центров обработки данных: ГОСТ Р 58811-2020 «Центры обработки данных. Инженерная инфраструктура. Стадии создания» и ГОСТ Р 58812-2020 «Центры обработки данных. Инженерная инфраструктура. Операционная модель эксплуатации. Спецификация». Эти стандарты вступают в силу с 1 августа 2020 г. Тем не менее существует американский стандарт TIA/EIA-942 (см. подробнее раздел 1.3.1), который определяет ЦОД как «здание (или его часть), основная функция которого состоит в том, что в нем находятся машинный зал и вспомогательные (подсобные) помещения для него». В свою очередь, под машинным залом (computing room) понимается «архитектурное пространство, предназначенное главным образом для того, чтобы размещать в нем оборудование для обработки данных». Под это определение подпадает даже одна стойка с серверным оборудованием, размещенная в отдельном помещении. Существует также, на наш взгляд, более точное определение того, что в настоящее время понимают под ЦОД, — это «инженерно-технический комплекс, предназначенный для размещения вычислительных ресурсов обработки и хранения информации, а также предоставления клиентам разнообразных бизнес-услуг». Но сюда следует добавить достаточно сложную и специфическую коммуникационную среду, с



Рис. 1. Распределение энергопотребления типичного ЦОД

одной стороны, интегрирующую вычислительные ресурсы, а с другой — обеспечивающую связь с внешними сетями, включая информационно-телекоммуникационную сеть Интернет. Современный ЦОД — это сложный комплекс инженерного оборудования, которое обеспечивает работу вычислительной подсистемы и подсистемы хранения информации. В правильно сконструированном ЦОД эти подсистемы составляют единый высокоэффективный комплекс. Под эффективностью мы будем понимать относительно низкое энергопотребление вспомогательных систем, высокую надежность, доступность к вычислительным ресурсам, безопасность, управляемость, ремонтпригодность и масштабируемость.

Энергетическая эффективность ЦОД определяется коэффициентом энергоэффективности — PUE (Power Utilization Efficiency), определяемым как отношение полной мощности, потребляемой ЦОД, к мощности, потребляемой информационно-технологическим оборудованием (ИТО). Энергопотребление типичного российского ЦОД по данным на 2012 год распределялось следующим образом: примерно 60 % шло на основные процессы (ИТО), около 35 % — на охлаждение, около 5 % — на потери в источниках бесперебойного питания (ИБП), до 3 % — на освещение и нужды прочих потребителей электроэнергии (рис. 1), что соответствует $PUE = 1,65...1,80$.

В последние годы компания Google, ЦОДы которой считаются одними из самых крупных и совершенных в мире (см. рис. 2, на котором изображен один из ЦОД компании), не публикует данные ни о мощности, ни о PUE своих ЦОД, но по последним



Рис. 2. ЦОД компании Google в штате Джорджия, США

данным 2013 года они имели $PUE = 1,13$, что выше результатов 2010 года, в котором этот показатель равнялся $1,16$.

Казалось бы, изменение коэффициента энергоэффективности незначительно. Но очевидно, что при потреблении мощности в сотни мегаватт снижение PUE даже на сотую долю дает громадную экономию средств, затрачиваемых на энергообеспечение фирменных ЦОД.

В 2015 г. одним из наиболее совершенных по энергоэффективности считался ЦОД правительства Нидерландов (Гронинген) с $PUE = 1,12$. Ожидается, что Норвежский ЦОД Lefdal Mine Datacenter (см. подробнее раздел 5.4.3), размещенный в шахте и охлаждаемый водой из фьорда, строительство которого завершилось в мае 2017 г., будет иметь $PUE = 1,1$. Однако данные о его реальной энергоэффективности пока не опубликованы.

Энергоэффективность типичного российского ЦОД составляет примерно $1,3...1,5$. У открытого в декабре 2017 г. одного из самых совершенных российских ЦОД Сбербанка в Сколково (рис. 3) $PUE = 1,3$. По данным российской компании AYAKS Engineering, проектировавшей и создавшей инженерные системы ЦОД, принадлежащего Федеральной налоговой службе и введенного в строй в мае 2015 г. в Дубне, его минимальный PUE составляет $1,11$, а максимальный — $1,5$.

На базе крупных высокоэффективных ЦОД реализуются такие современные технологии, как grid-вычисления, облачные вычисления, обработка Больших Данных, генерация криптовалют.



Рис. 3. Общий вид ЦОД Сбербанка в Сколково

1.2. История создания ЦОД

1.2.1. Первые электронно-вычислительные машины (ЭВМ)

Историю создания ЦОД следует, по-видимому, вести с появления первых компьютеров, что обычно связывается с разработками американских ученых и инженеров. Этот миф был разрушен в 1969 г., когда стала доступной информация о работах в нацистской Германии. Изобретателем первого в мире работающего программируемого компьютера был немецкий инженер Конрад Цузе, который не был профессионалом в вычислительной технике. Он поступил в Берлинский технический университет на факультет архитектуры и гражданского строительства в 1930 г., где увлекся математикой и физикой. Еще во время обучения он столкнулся с серьезной проблемой расчета конструкций, которые требовали решения огромных систем линейных уравнений. Их было очень трудно просчитать с помощью не только логарифмической линейки, но и с помощью механического калькулятора того времени.

В 30-х годах XX века Цузе и его друг Шреер в Берлинском Университете рассказали про построение электронного компью-



Рис. 4. Цузе (слева) и Шреер (справа) во время работы над Z-1

тера. Поскольку их устройство требовало около 2000 радиоламп и несколько тысяч ламп накаливания, их просто высмеяли. Вычислительные механизмы того времени строились с использованием вращающихся элементов и оперировали значениями в десятичной системе счисления. Особенностью построенной Цузе и Шреером (рис. 4) вычислительной машины V-1 (Z-1) — Versuchsmo­dell-1, т. е. «опытная модель», было то, что она занималась обработкой чисел в двоичной системе и для переключения использовались не реле, а металлические пластины.

Пластины вырезались Цузе и его друзьями вручную обычным лобзиком (2000 штук). Пластины перемещались в строго определенном направлении. Смещенные пластины, указывающие значения вычисляемых величин и математические операции, перемещали ряд других пластин, изменяющих регистр двоичных чисел и сохраняющих промежуточный результат. Позже Шреер предложил заменить пластины на электровакуумные лампы. Полученные данные позволяли производить другие преобразования. Задаваемый оператором алгоритм вычислений и был прототипом современной компьютерной программы.

Примечательной особенностью первого компьютера была клавиатура для ввода данных с мигающими лампочками для указания результатов. Работа над изобретением заняла более двух лет. В 1938 г. машина увидела свет. Она состояла из 20 000 элементов.



Рис. 5. ЭВМ Z-1 (V-1)

Основные характеристики Z-1 на электронных лампах, т. е. фактически первой ЭВМ (рис. 5), приведены ниже:

- частота: 1 Гц;
- вычислительный блок: обработка чисел с плавающей запятой;
- средняя скорость расчета: умножение — 10 секунд, сложение — 5 секунд;
- ввод данных: клавиатура, устройство считывания с перфоленты;
- вывод данных: ламповая панель (десятичное представление);
- память: 64 слова по 22 бита;
- вес: около 1000 кг.

В период Второй мировой войны Цузе переименовал свои первые три компьютера в Z-1, Z-2, Z-3 соответственно, чтобы избежать путаницы с ракетами V-1 и V-2 (Фау-1, Фау-2), разрабатываемыми Вернером фон Брауном для войны против Великобритании.

После поражения Германии во второй мировой войне Цузе остался в стране, где жил в небольших альпийских деревнях. В 1945 г. он разработал то, что назвал первым языком программирования для компьютеров. Многие идеи этого языка остались неизвестными целому поколению программистов. Только

в 1972 г. работа Цузе была издана целиком, и эта публикация заставила специалистов задуматься над тем, какое влияние мог бы оказать язык программирования Plankalkül, будь он известен раньше.

В 1950–1960 годах Цузе были созданы новые компьютеры на реле Z-5 и Z-11, а затем Z-22 на электронных лампах и Z-23 — на транзисторах. Одной из последних его разработок были компьютеры Z-25 и Z-31. Скончался Цузе в декабре 1995 г.

1.2.2. Первая ЭВМ США

В США первый компьютер «Марк 1» (рис. 6), известный как ASCC (Automatic Sequence Controlled Calculator), был создан в 1941 г. по заказу Военно-морского флота США. Генеральным подрядчиком выступила компания IBM.



Рис. 6. Первый компьютер США «Марк 1»

Разработкой устройства занимались пять инженеров, которыми руководил американский офицер Говард Эйкен. Разработчики не учли преимуществ двоичной системы счисления, которой пользуется большинство современных компьютеров мира, и заставили машину оперировать десятичными числами. Ввод информации в устройство выполнялся при помощи перфокарт.

Параметры компьютера:

- длина примерно 17 м;
- высота свыше 2,5 м;

- вес около 4,5 тонн;
- 765 000 деталей;
- 800 км соединительных проводов;
- 15-метровый вал, обеспечивающий синхронизацию основных вычислительных элементов;
- электрический двигатель мощностью 4 кВт.

«Марк 1» умел работать с числами, длина которых составляла до 23 разрядов. На вычитание и сложение тратилось всего 0,3 секунды, на умножение — 6 секунды, на деление — 15,3 секунды, на выполнение тригонометрических функций и вычисление логарифмов — более минуты. В то время это позволяло за один день выполнять расчеты, на которые ранее потребовалось бы полгода.

1.2.3. Первые ЭВМ в СССР

Первой ЭВМ в СССР (1950 г.) считается разработка под названием «МЭСМ», (Малая электронная счетная машина). Устройство (рис. 7) было создано на Украине, в лаборатории вычислительной техники киевского Института электротехники. Проект реализовывался под руководством академика Сергея Лебедева.



Рис. 7. ЭВМ МЭСМ

ЭВМ имела параметры:

- площадь примерно 60 квадратных метров;
- быстродействие 3000 операций в минуту;
- 6000 электронных ламп;

- потребляемая мощность 25 кВт;

Она выполняла сложение, вычитание, деление, умножение и сдвиг с учетом сравнения по абсолютной величине, знака, передачи чисел с магнитного барабана, передачи управления и сложения команд.

Пока Лебедев строил свою машину в Киеве, в Москве образовалась своя группа электротехников. Электротехник Исаак Брук и изобретатель Вашир Рамеев, оба сотрудники Энергетического института им. Кржижановского, еще в 1948 г. подали в патентное бюро заявку на регистрацию проекта собственной ЭВМ. К 1950 г. Рамеева поставили во главе особой лаборатории, где буквально за год была собрана М-1 — ЭВМ значительно менее мощная, чем МЭСМ (выполнялось всего 20 операций в секунду), но зато и меньшая по размерам (около 5 метров квадратных). Ее 730 ламп потребляли 8 кВт энергии.

1.2.4. Эпоха больших вычислительных машин — мейнфреймов и вычислительных центров

На смену единичным экземплярам сравнительно малых по размерам и по вычислительным возможностям ЭВМ вскоре пришли серийно выпускаемые большие электронно-вычислительные



Рис. 8. Американский Univac 1 — Универсальный автоматический компьютер 1

машины, размещаемые в специально оборудованных помещениях — вычислительных центрах, которые мы будем отличать от современных ЦОД. Они представляли собой одну или несколько больших ЭВМ, каждая из которых занимала помещение величиной с крупный спортзал. Первые ЭВМ как в США, так и в СССР были созданы для использования в атомной и ракетной промышленности. Одним из самых первых коммерческих компьютеров был «Универсальный Автоматический Компьютер 1» (Universal Automatic Computer 1), или Univac 1, использовавшийся американским Бюро переписи в марте 1951 г. (рис. 8). Но в 60-е годы XX века такие компании, как IBM, начали предоставлять клиентам доступ к своим системам на почасовой основе для выполнения задач по обработке данных.

Большие электронно-вычислительные машины

В СССР наиболее распространенным их представителем стала БЭСМ-6 (рис. 9), выпускавшаяся с 1968 г. по 1987 г. и имевшая характеристики на уровне своих зарубежных аналогов. Эти ЭВМ получили также название мэйнфреймов. Изначально этот термин употреблялся для обозначения типовых процессорных стоек, но позже под ним стали понимать высокопроизводительные компьютеры с огромным (по тем временам) запасом оперативной памяти, предназначенные для обработки и хранения большого объема данных. Ввод данных в такие машины осу-

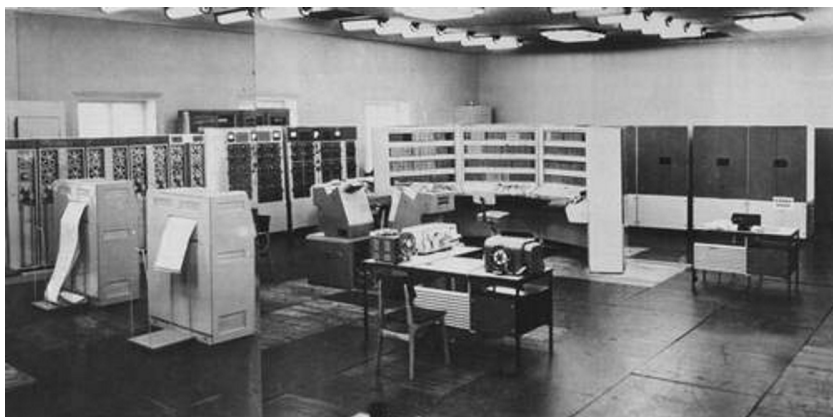


Рис. 9. Советский мэйнфрейм — ЭВМ БЭСМ-6

ществлялся с помощью перфокарт, которые подготавливались на специальных устройствах, а позже — с электронных терминальных устройств. Выводилась информация путем печати на бумажных лентах. В тех случаях, когда выходная информация служила входной для иных устройств (например, станков с числовым программным управлением), она выводилась на специальные перфорированные ленты.

Уже на уровне мэйнфреймов размещение в одном или нескольких близко расположенных помещениях вычислительных средств большой мощности стимулировало развитие некоторых концепций, используемых и в современных ЦОД. К ним можно отнести расположение оборудования в стойках, использование фальшполов, прокладку кабелей в специальных коробах и т. д. Кроме того, первые системы охлаждения, вентиляции, источников бесперебойного и гарантированного питания, контроля доступа, пожарной и охранной сигнализации, пожаротушения первоначально создавались для помещений, в которых располагались мэйнфреймы, а уже затем получили развитие в ЦОД.

Появление клиент-серверной архитектуры и усложнение ее структуры привело к переходу от одного компьютера в виде мэйнфрейма к тому, что мы можем назвать первыми ЦОД. Это были помещения, в которых размещалось некоторое число серверов, используемых для вычислений и хранения данных (позже появились специализированные системы хранения данных — СХД), а также набор инженерных систем, обеспечивающих работоспособность этого оборудования.

К 1980 г. подобные центры начинают появляться на многих предприятиях и компаниях крупного, среднего и даже малого бизнеса, где они используются и в настоящее время. Разумеется, в небольших ЦОД их оптимизация по энергопотреблению не имеет принципиального значения. Иное дело крупные современные ЦОД, в которых на одной площади сосредоточены мощные серверы, осуществляющие обработку информации, СХД и активное сетевое оборудование, отвечающее как за обмен данными с внешним миром, так и за передачу данных внутри ЦОД. Такие ЦОД обязательно включают сложные инженерные системы, обеспечивающие его жизнедеятельность. Сюда входят прежде всего так называемые подсистемы HVAC (от английских слов Heating,