

Кабели связи для ЦОД

Общее собрание ассоциации Электрокабель. Семинар "Кабельная промышленность, экономика, наука, техника и производство"

Семенов Андрей Борисович, д.т.н., профессор кафедры Механизации, автоматизации и роботизации НИУ МГСУ и кафедры Многоканальных телекоммуникационных систем МТУСИ, andre52.55@mail.ru

Завидово, 25 февраля 2026 года

«Кто владеет
информацией –
тот владеет
миром»



У.Черчилль

Определение ЦОД и их разновидности

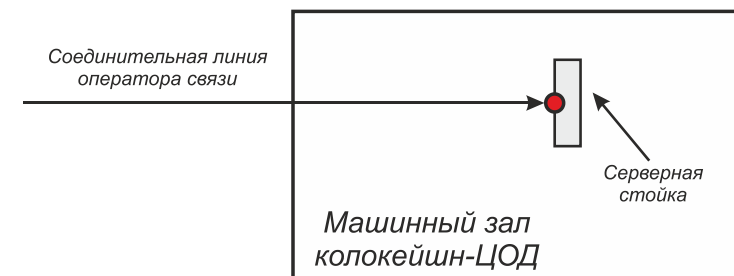
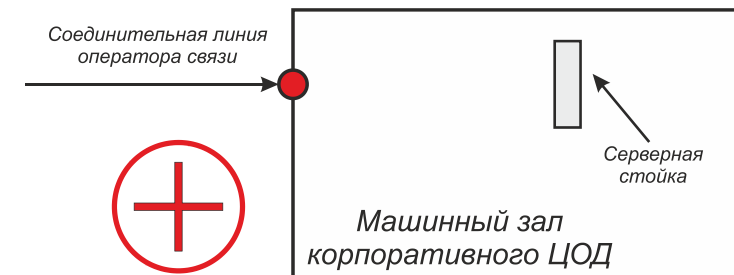
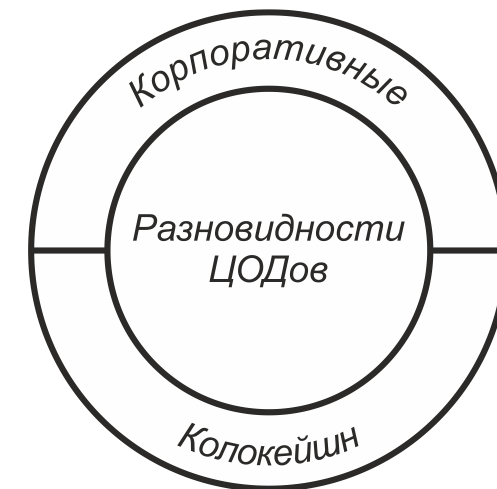
Под центром обработки данных (точнее центром хранения и обработки данных) в общем случае согласно ГОСТ Р 58812-2020 понимаем специализированный объект, представляющий собой связанную систему ИТ- и инженерной инфраструктуры, оборудование и части которых размещены в здании или помещении, подключенном к внешним сетям, как инженерным, так и телекоммуникационным.

В ЦОД размещается серверное оборудование, хранятся большие объемы данных, выполняется обработка и передачи цифровой информации, обеспечивающих непрерывную работу ИТ-инфраструктуры предприятий.

ЦОДы обычно делят на корпоративные и колокейшн. Услуга ЦОДа типа колокейшн сводится к предоставлению посадочных мест в стандартных (обычно 19-дюймовых) конструктивах в охраняемом помещении с определенным температурным режимом в сочетании с бесперебойным электроснабжением заданного качества.

В дальнейшем рассматриваются исключительно корпоративные ЦОДы, которые представляют собой сложные технические объекты и имеют в своем составе полноценную телекоммуникационную инфраструктуру, которую целесообразно выделить в отдельный самостоятельный класс.

Кроме того, колокейшн-ЦОДы количественно составляют около 20% от корпоративных, что позволяет о крайней мере в первом приближении ограничиться рассмотрением только последних.



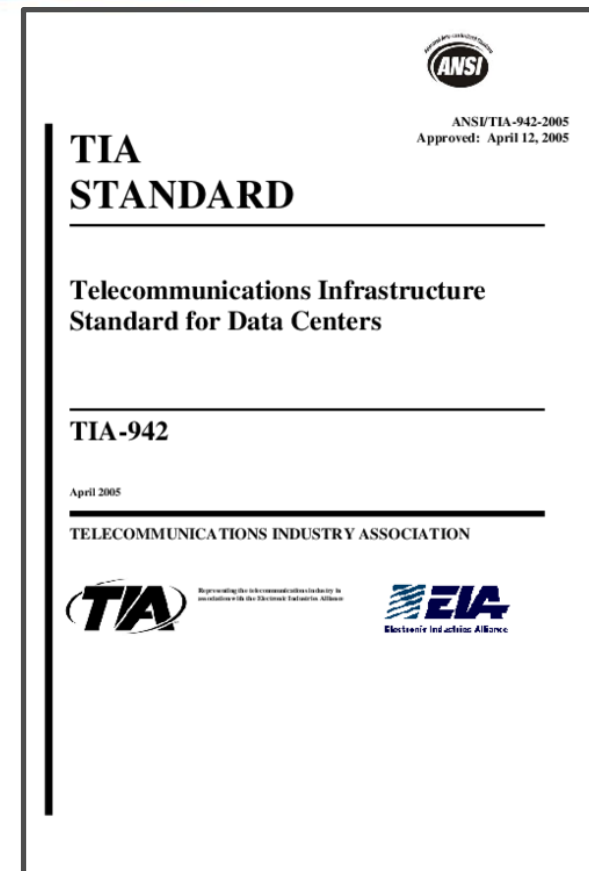
Стандартизация ЦОД

В качестве основного нормативного документа принят американский (ANSI) стандарт TIA-942. В России ЦОД оснащаются согласно требованиям для сооружений связи, а также ориентируются на требования TIA-942 и используют дополнительную документацию Uptime Institute, а также ГОСТы серии 34.

В последние годы появились

- ГОСТ Р 58811-2020 Центры обработки данных. Инженерная инфраструктура. Стадии создания
- ГОСТ Р 58812-2020 Центры обработки данных. Инженерная инфраструктура. Операционная модель эксплуатации. Спецификация
- ГОСТ Р 58486-2021. Слаботочные системы. Кабельные системы. Кабельные системы для высокопроизводительных сетей в центрах обработки данных. Основные положения
- ГОСТ Р 70139-2022 Центры обработки данных. Инженерная инфраструктура. Классификация (введение приостановлено до 31.12.2025)
- ГОСТ Р 70627-2023 Центры обработки данных. Инженерная инфраструктура. Документация. Техническая концепция. Требования к составу и содержанию

Фактически TIA-942 воспринимается во всем мире как единый стандарт, однако он несколько устарел. В то же время сейчас активно развивается стандарт BICSI 002 2019 Data Center Design and Implementation Best Practices, появившийся в 2010 г. В его создании участвовали более 150 экспертов, дополняет существующие стандарты TIA, CENELEC и ISO/IEC для центров обработки данных»

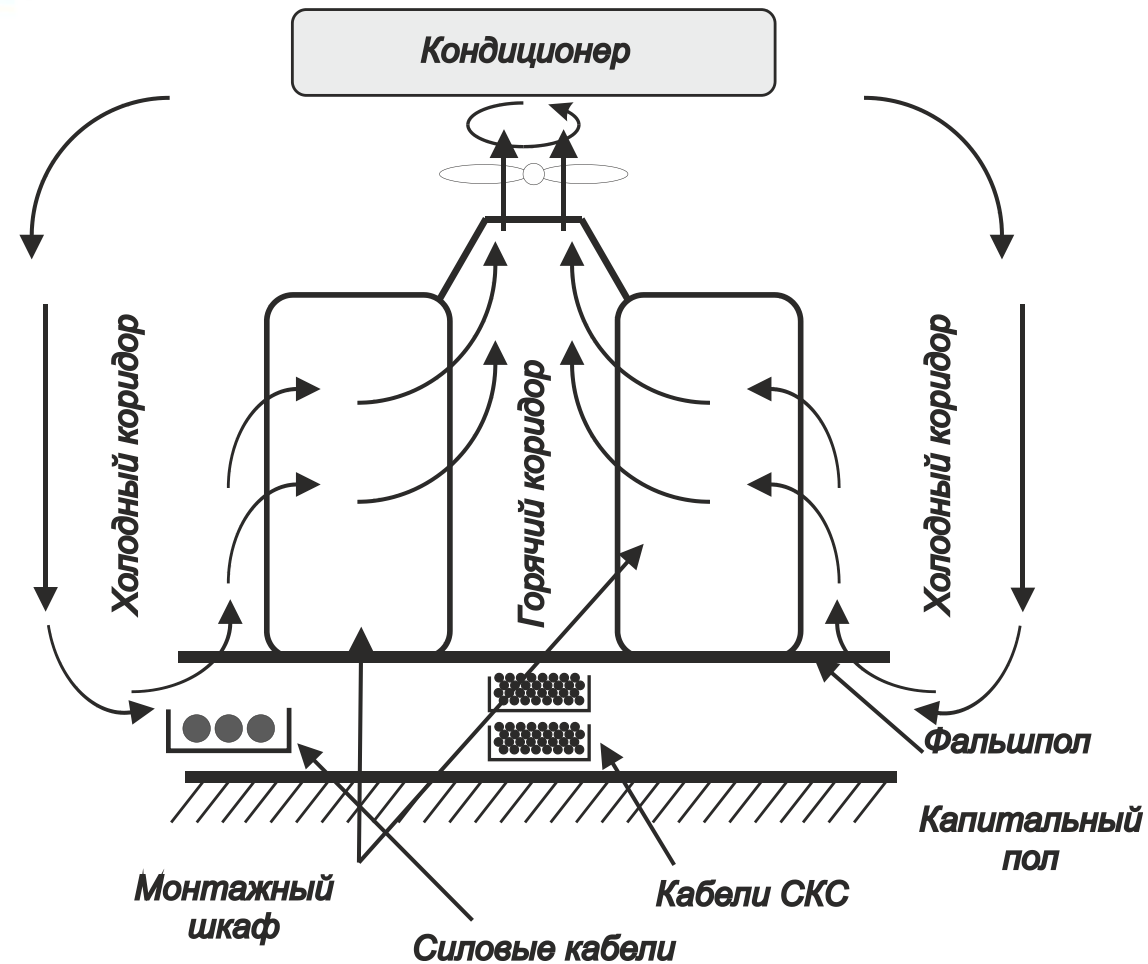


Главными средствами наращивания быстродействия ЦОД являются:

- увеличение производительности отдельных серверов, систем массовой памяти и коммутаторов различного назначения, объединяющих эти устройства в единую систему;
- переход на модель облачных вычислений, позволяющих распараллеливать вычислительные процессы.

Все это приводит к резкому увеличению потребления электроэнергии и необходимости утилизации выделяющегося при этом тепла. Основным средством решения этой задачи является система воздушного охлаждения, которая для наращивания эффективности реализуется на т.н. "горячих" и "холодных" коридорах.

Основная идея этого технического решения состоит в устранении возможности смешивания нагретого и охлажденного воздуха, находящегося в пространствах горячего и холодного коридоров, соответственно. Это достигается изоляцией путей распространения соответствующих воздушных потоков. При реализации системы происходит чередование холодного и горячего коридоров.



Информационная инфраструктура машинного зала как ключевого компонента ЦОД реализуется по проверенной временем модели OSI взаимодействия открытых систем. Физический уровень инфраструктуры в соответствии с требованиями профильных стандартов (ANSI/TIA-942B, ISO/IEC 11801-5:2017 и ГОСТ Р 59486-2021) выполняется в виде структурированной кабельной системы (СКС).

Перечисленные нормативные документы определяют возможность применения при построении СКС медножильной и волоконно-оптической элементной базы, причем последняя представлена одномодовой и многомодовой разновидностями.

Проблему выбора типа СКС несколько упрощает тот факт, что максимальная пропускная способность наиболее совершенных на сегодняшний день медножильных кабельных трактов класса G ограничена величиной 40 Гбит/с, что уже не соответствует не только перспективным, но и даже текущим требованиям (100 – 200 Гбит/с).

Электропроводная техника находит в ЦОД крайне ограниченное применение и присутствует в реальных системах только в виде т.н. DAC-кабелей или активных кабельных сборок. Они представляют собой кабели с предустановленными на них модулями группы xSFP (англ. active cable). Максимальная длина подобных изделий не превышает 5 м, а область их использования фактически ограничена соединением портов активного сетевого оборудования в пределах одной серверной стойки, что востребовано, например, при реализации структур типа top of rack.



Особенности отдельных помеховых составляющих медножильных трактов

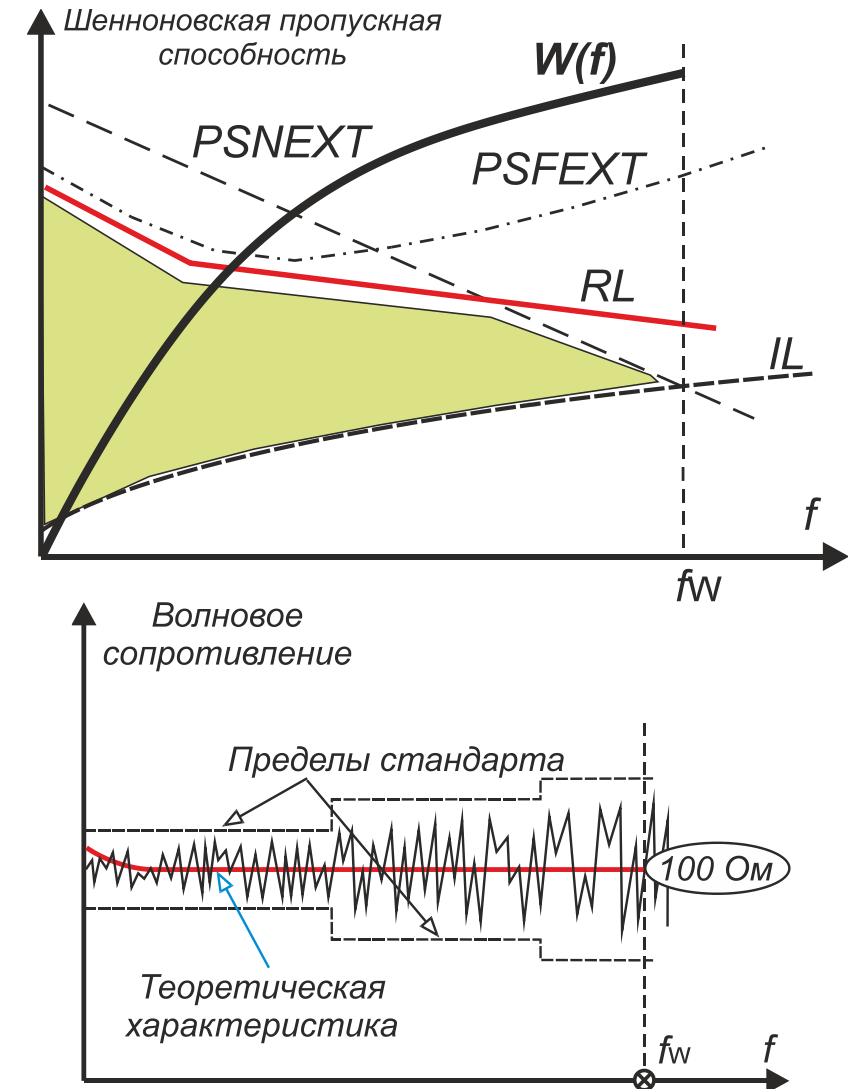
Для медножильных трактов

- верхнюю граничную частоту f_w определяет переходная помеха ближнего конца;
- главным фактором, ограничивающим предельную скорость передачи, являются обратные отражения.

В качественной форме этот эффект демонстрирует график в правой части слайда.

Значимо уменьшить величину обратных отражений при уровне техники, достигнутом на существующем этапе развития, не представляется возможным. В качестве эталона в данном вопросе можно принять коаксиальные кабели, для которых RL обычно не превышает 40 дБ.

Сам процесс изготовления витой пары предполагает скрутку отдельных изолированных проводников. Из-за несовершенства технологии процесс скрутки обязательно сопровождается вполне определенными деформациями симметричной электропроводной среды передачи и связанными с этим вариациями волнового сопротивления. Последние приводят к структурным возвратным потерям SRL, которые, в свою очередь, определяют возвратные потери всего кабельного тракта.



О возможности применения линий электропроводной связи в машинном зале ЦОД

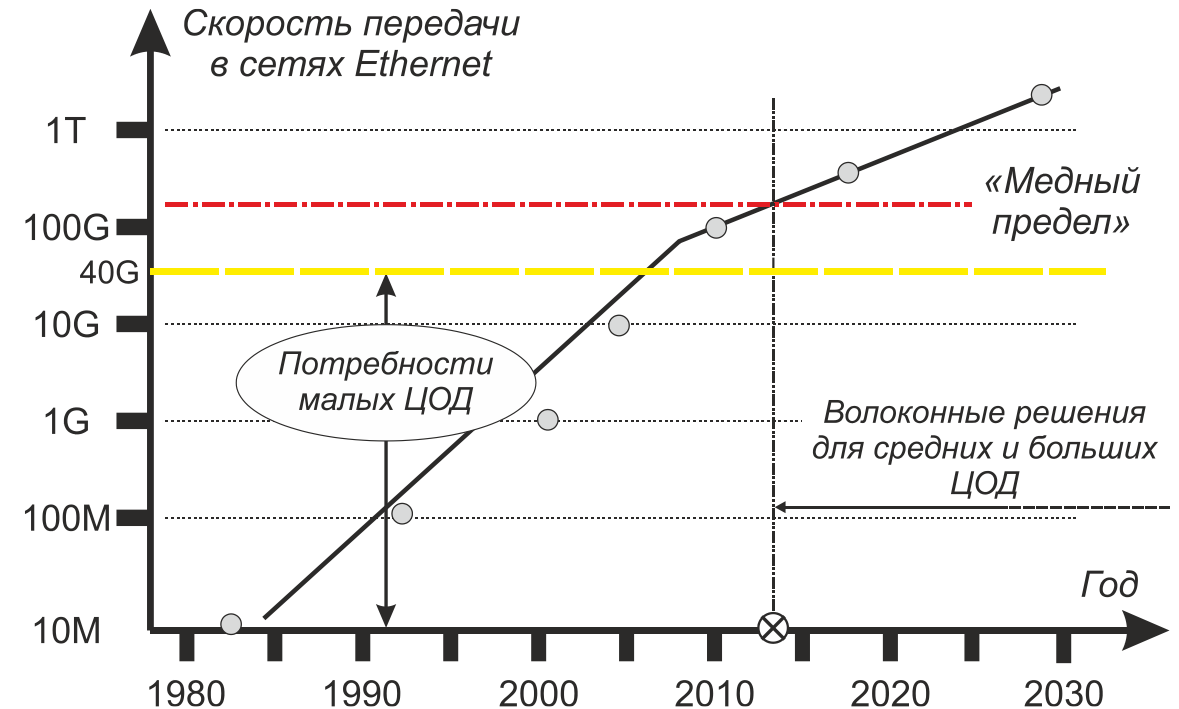
Результаты соответствующих расчетов приведены в таблице и демонстрируют потенциальную возможность достижения скорости 100 Гбит/с при сохранении тех запасов, которые необходимы для нормальной эксплуатации информационной системы. Это значение может быть названо “медным пределом” современных СКС.

По современным меркам 100 Гбит/с слишком мало, что фактически определяет типовую область применения симметричных кабельных трактов: микро-ЦОД.

В случае применения активных кабельных сборок (не пользуются популярностью, но возможны в микро-ЦОД) с длиной не свыше 10 м скорость м.б. увеличена до 200 Гбит/с.

Иначе говоря, линии связи машинного зала ЦОД могут быть реализованы только на волоконно-оптической элементной базе.

Длина, м	30	40	50	60	70	80	90	100
W, Гбит/с	110	98	73	69	61	52	47	42

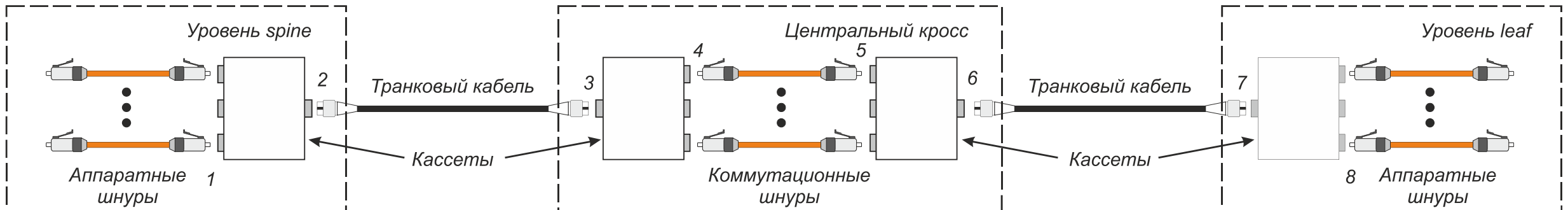
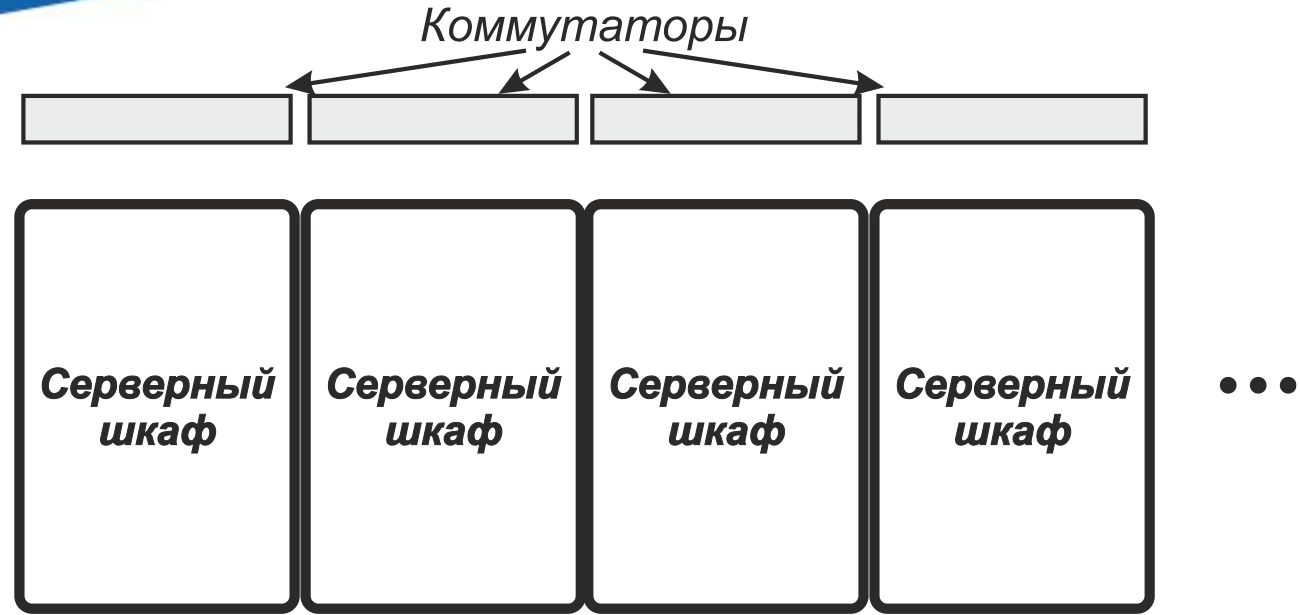


Причины тренда на увеличение протяженности стационарных линий в машинном зале

Выделим две причины появления линий большой протяженности в машинном зале ЦОД

- применение конфигураций типа top of rack, которые можно рассматривать как распространение принципов классической централизованной оптической архитектуры на новую область.
- рост популярности структур spine-leaf, нормальная эксплуатация которых требует введения центрального кросса.

В обоих случаях можно говорить о новом исполнении централизованной оптической архитектуры, известной с середины 90-х гг. прошлого века.

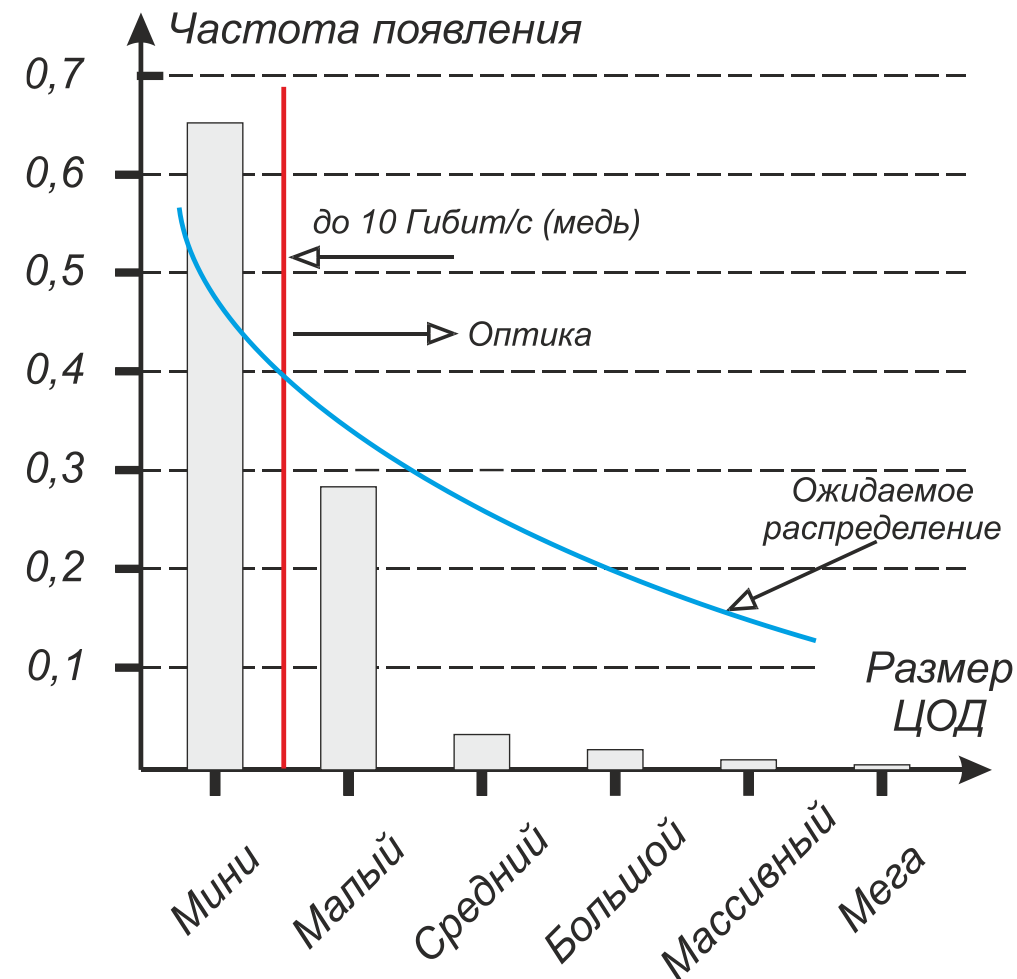


Классификация ЦОД

Согласно классификации ИКС-холдинга полную совокупность корпоративных ЦОДов делят на шесть основных категорий по количеству стоек. Распределение объектов по масштабам ожидаемо носит экспоненциальный характер, т.е. основной объем прибыли в соответствии с правилом “золотой середины” дадут объекты среднего масштаба с несколькими десятками стоек.

Одновременно фактический объем вводимых в штатную эксплуатацию ЦОДов указывает на серьезный дефицит и определяет высокие темпы роста этого сегмента рынка – примерно 15% в год с удвоением количества вновь вводимых объектов к 2030 году.

В качестве хорошего косвенного подтверждения этого положения можно сослаться на то, что некоторые девелоперы отказываются от строительства жилья в пользу ЦОД, что гарантированно обеспечивает быстрый возврат инвестиций.



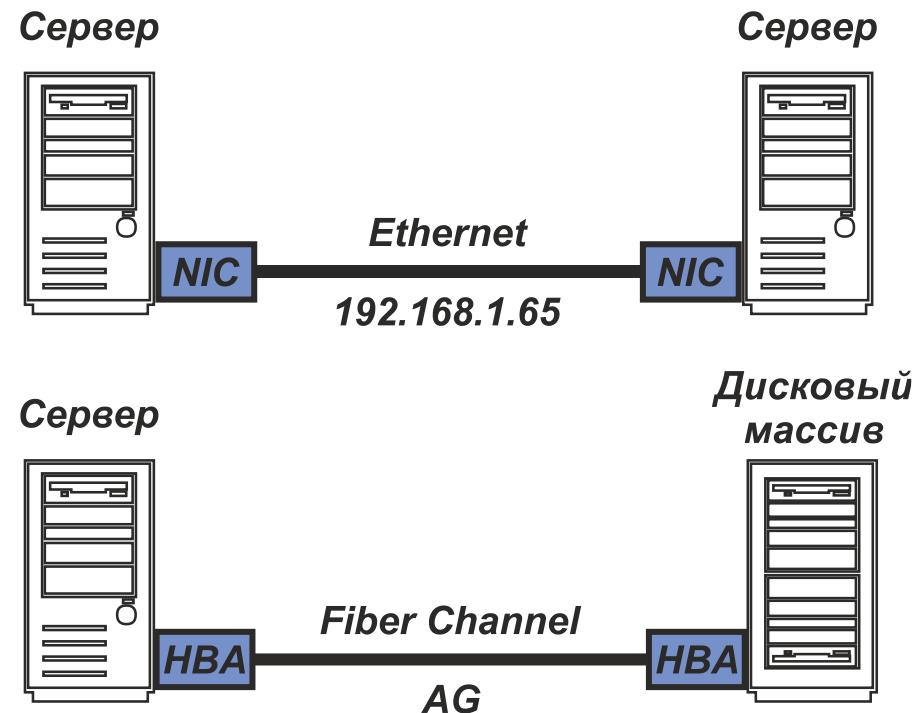
LAN и SAN как потребители ресурсов кабельной системы машинного зала ЦОД

Наряду с локальной сетью в машинном зале ЦОД организуется также сеть массовой памяти SAN. Используется для хранения мало востребованных данных. Характерна для банковских структур, т.е. встречается далеко не в каждом Корпоративном ЦОД.

Сеть хранения данных (англ. Storage Area Network, SAN) — представляет собой архитектурное решение для подключения к серверам таких внешних устройств хранения данных как дисковые массивы, ленточные библиотеки, оптические приводы и аналогичной им техники. Сам процесс доступа организуется таким образом, чтобы операционная система распознавала подключённые ресурсы как локальные.

В отличие от локальных сетей при формировании сетей хранения данных используется большое количество низкоуровневых протоколов

- Fibre Channel;
- iSCSI (англ. Internet Small Computer System Interface);
- FCoE, транспортировка FCP/SCSI поверх «чистого» Ethernet;
- FICON, транспорт через Fibre Channel (используется только мейнфреймами);
- ATA over Ethernet, транспорт ATA через Ethernet.



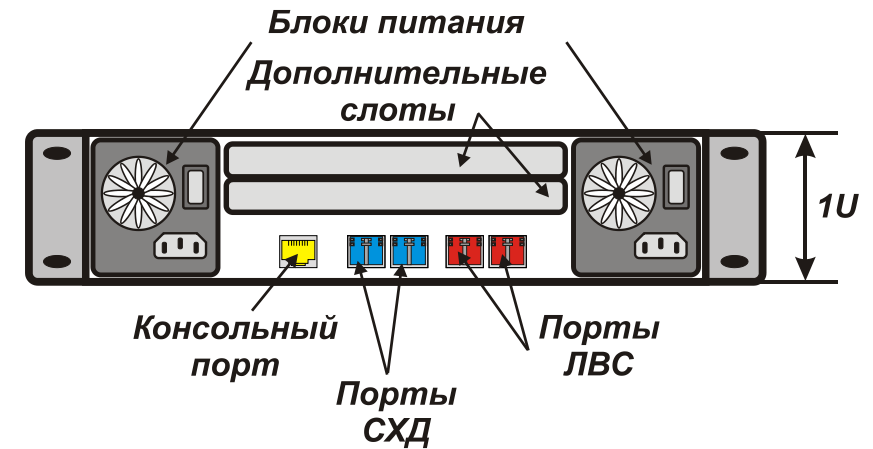
NIC - Network Interface Adapter
HBA - Host Bus Adapter

При задании параметра конструктивной плотности можно исходить из наиболее жесткого случая применения серверов типа pizza-box с корпусом высотой 1U и панелей СКС с плотностью конструкции 48 портов/1U. Каждый сервер имеет 4 порта (резервирование) для подключения к ЛВС и СХД. Тогда количество n серверов с 5-портовым интерфейсом (2 порта ЛВС, 2 порта СХД и консольный порт LAN-KVM) связано с высотой N шкафа уравнением

$$n + \frac{2n}{48} + \frac{2n}{48} + n = N$$

Первый член в левой части описывает количество серверов, второй – количество панелей ЛВС, третий – количество панелей СХД, четвертый – количество панелей консольных портов

Решение уравнения в целых числах дает $n = 38$ при $N = 42$ и $n = 43$ при $N = 48$. Иначе говоря, для обслуживания 38 серверов при дуплексной схеме организации связи потребуется 38 устройств x 4 порта x 2 волокна = 304 волокна, т.е. четыре оптических полки с 48 дуплексными портами каждая.



Параллельная передача как способ преодоления "скоростного тупика" современной электроники

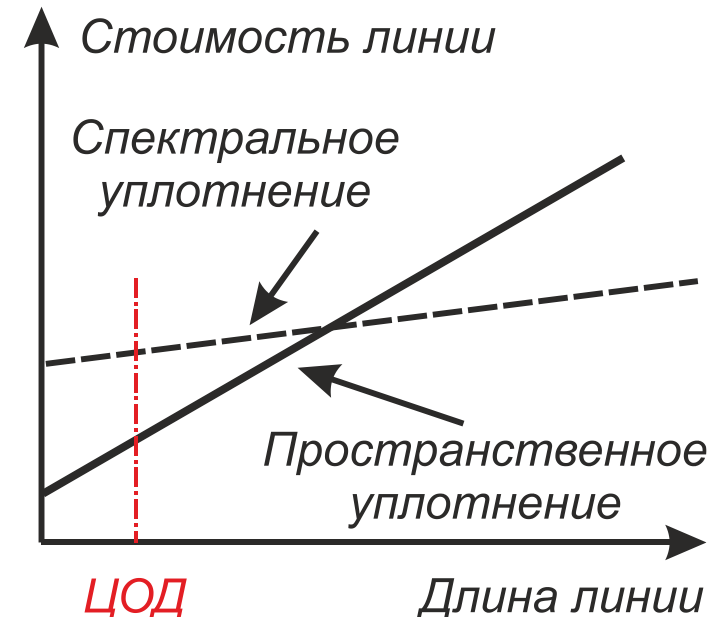
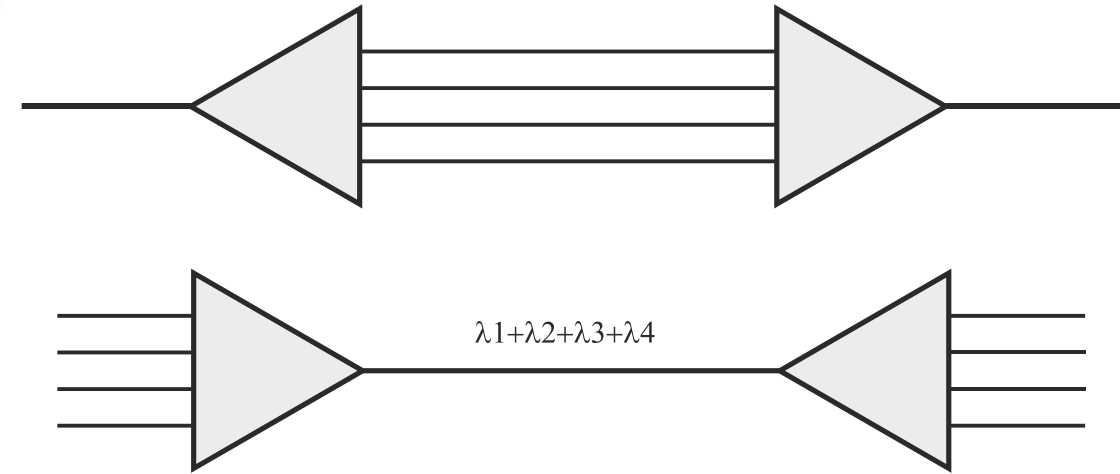
Ограниченное быстродействие современной электроники препятствует наращиванию скорости передачи по каналу связи. Для преодоления этого недостатка потенциально м.б. использовано несколько приемов. Реально для решения этой задачи привлекают

- многоуровневое кодирование;
- блочные коды, которые минимально увеличивают скорость линейного сигнала по сравнению с исходным;
- параллельную передачу.

В основе идеи параллельной передачи лежит замена одного моноканала несколькими менее быстродействующими с разделением по ним сообщения на передающем конце с последующим восстановлением исходного сигнала на приемном. Может быть реализована по различным схемам.

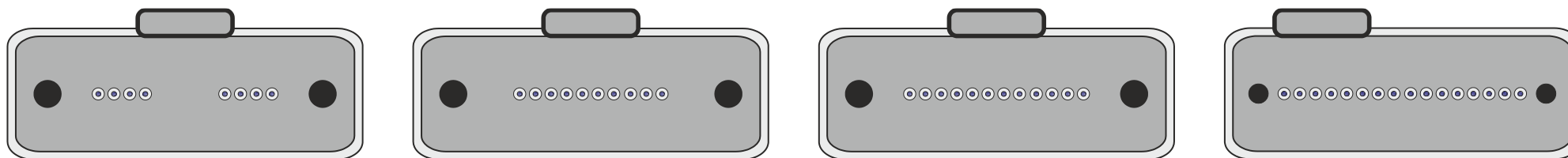
До уровня практического использования доведены

- пространственное мультиплексирование;
- спектральное мультиплексирование;
- модовое мультиплексирование (в ЦОДах не применяется).



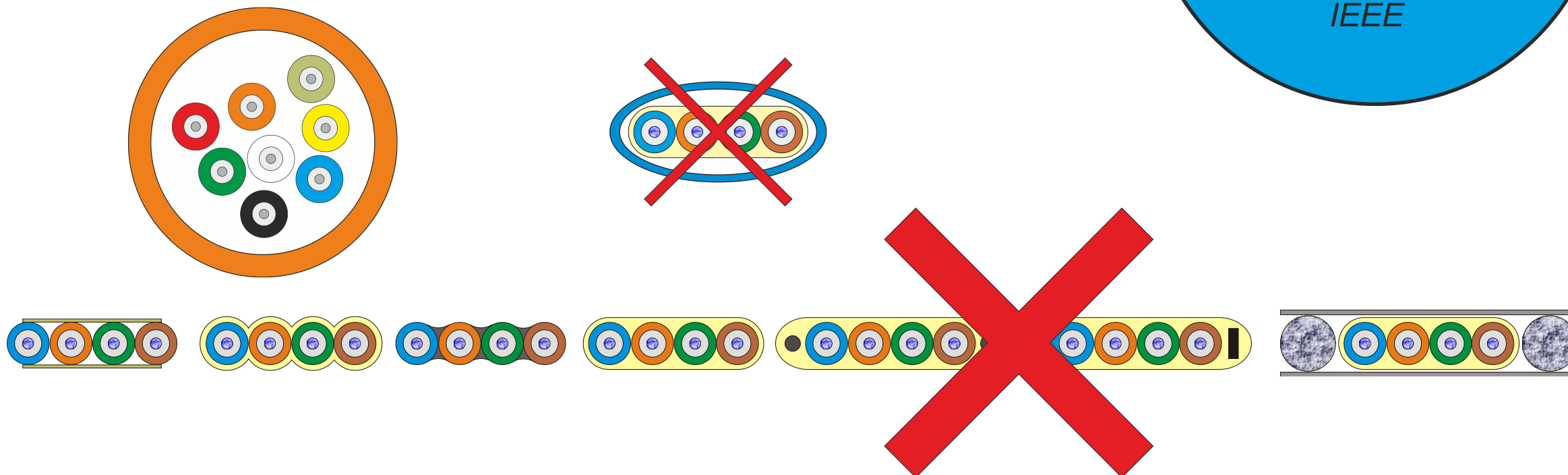
Количество волокон транковых кабелей

Оптические разъемы МРО/МТР в своей исходной форме рассчитаны на соединение $12 \times n$ волокон (где n указывает на количество рядов волокон и меняется в интервале от 1 до 6). На практике обычно задействуется 8 из них, что соответствующим образом учитывается в раскладке по посадочным местам видки МРО/МТР. Данный подход известен под названием схема Base8 и фактически определяет количество волокон транковых кабелей в 8 или 16 штук.



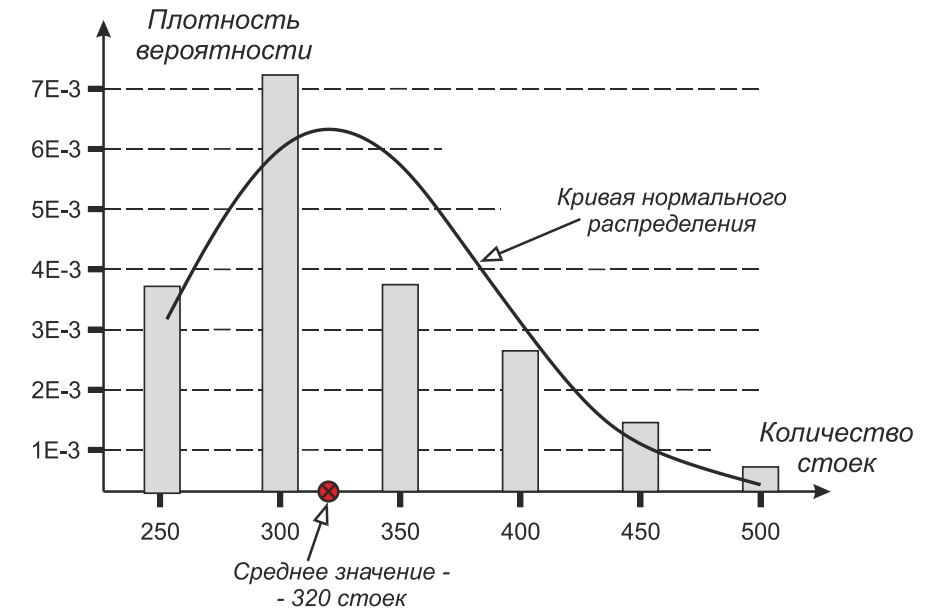
Конструктивное исполнение транковых кабелей

Транковый кабель представляет собой обычное изделие внутренней прокладки. С учетом больших запасов по параметру skew, а также ограниченной предельной протяженности имеет смысл отказаться от неудобных ленточных конструкций в пользу обычных. С учетом практически 100-процентного применения претерминированных сборок можно улучшить массогабаритные показатели изделия и применять в составе конструкции волокно в первичном защитном покрытии 250 мкм и даже менее.



Предельное значение длины стационарной линии

Необходимо дополнительно принять во внимание достаточно большой разброс чиста стоек. При среднем значении этого параметра 320 стоек его среднеквадратичное отклонение σ , согласно собранной статистике, составляет 19,1%. Из данных гистограммы следует, что это распределение по крайней мере в первом приближении соответствует нормальному. Согласно правилу “трех сигм” в машинном зале в пределе будет находиться примерно 500 стоек, что соответствует предельному значению, называемому экспертами. В предположении сохранения у такого машинного зала типовых пропорций длина/ширина 1:0,34 протяженность стационарных линий согласно методу полупериметра вырастет до 88,9 м, что без какого-либо запаса соответствует 90-метровому лимиту классических СКС. С другой стороны, нормирование на 300 м нерационально. Выход видится в нормировании по приложению, что соответствует последним тенденциям в отрасли.



Категория волокна	Предельная длина тракта, м		Запас, %
	Расчетная	Гарантированная	
OM3	79	70	13
OM4	122	100	22
OM5	173	150	15

Объемы потребления и волоконность линейного кабеля

В расчеты закладывались следующие исходные данные:

- Общее количество стоек 42 U – 16 000 (оценка получена через полную мощность потребления 80 МВт и среднего значения мощности на стойку 5 кВт);
 - средняя загрузка стойки - 60%;
 - количество линий на 1U – 2,7 (2 на ЛВС и 2 в одной трети случаев на СХД);
 - распределение количества ЦОД по стойкам – экспоненциальное с показателем 0,9 (в сотнях стоек);
 - средняя длина линии – половина от максимальной и зависит от количества стоек.
 - минимальный размер ЦОД с построением СКС на волокне – 5 (95% всех объектов).

$$\varphi(x) = (\lambda / 100) \cdot e^{-\lambda N / 100}$$

Расчетное значение годового объема потребления кабеля – 23 тысячи км с возможным удвоением указанного значения к 2030 году (при ожидаемых темпах среднегодового роста 15%), из которых как минимум 50% будет поступать по импорту.

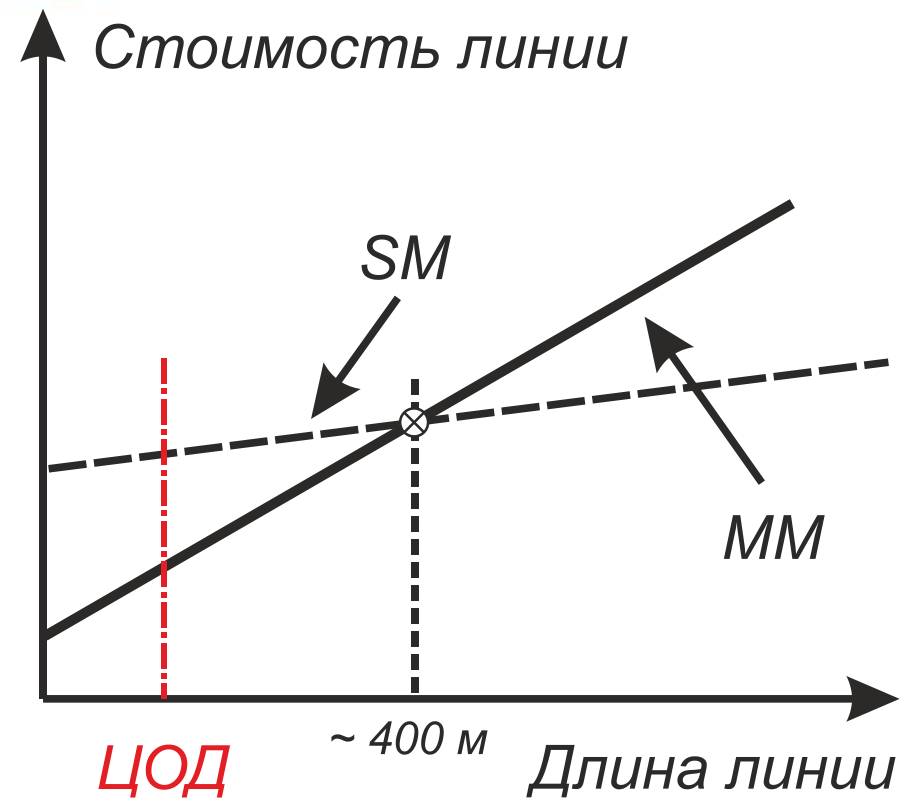
С учетом популярности схемы Base8 кабели должны иметь 8 или (в ограниченном количестве) 16 волокон.

SM vs MM

С функциональной точки зрения многомодовые и одномодовые решения идентичны, что позволяет свести технико-экономическое обоснование к простому ценовому сравнению решений. За счет объективно заметно более высокой стоимости приемопередатчиков оптического диапазона длин волн одномодовые решения заметно проигрывают многомодовым на тех небольших дальностях передачи, которые характерны для ЦОД.

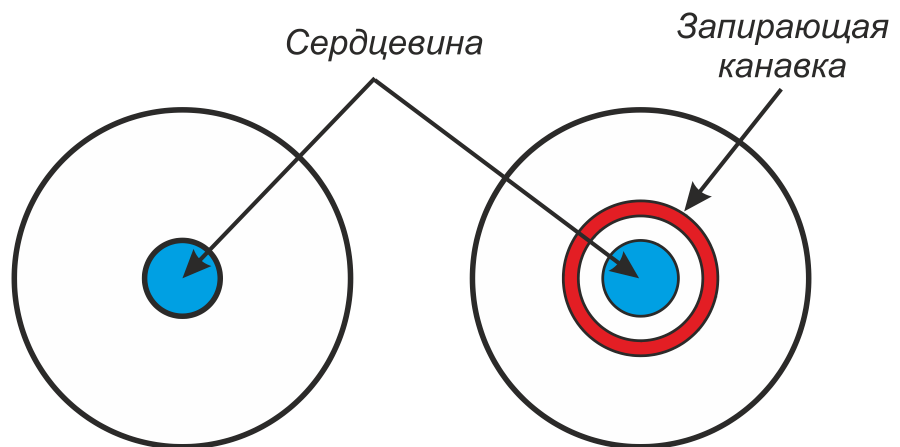
Ситуация для одномодовой техники заметно ухудшается его эксплуатационной капризностью, что дополнительно усиливается объективно низкой квалификацией обслуживающего персонала; Объективной теснотой машинного зала ЦОД – прямое следствие мероприятий по наращиванию эффективности функционирования системы воздушного охлаждения.

Переход на изгибостойкое волокно немедленно ухудшает экономику решения из-за его объективно более высокой стоимости.



Изгибостойкое волокно для СКС машинного зала ЦОД

Проблема рисков радиуса изгибов решаются применением изгибостойкого волокна, которое отличается от обычного введением в профиль показателя преломления запирающей канавки. Элементарные геометрические расчеты показывают, что количество легирующих добавок для формирования профиля показателя преломления (германий и фосфор для сердцевины и фтор и бор для канавки) возрастает примерно в 2,5 раза, что соответствующим образом сказывается на цене – SM-кабель во многом теряет свое ценовое преимущество!!!



Энергетический потенциал высокоскоростных оптических интерфейсов

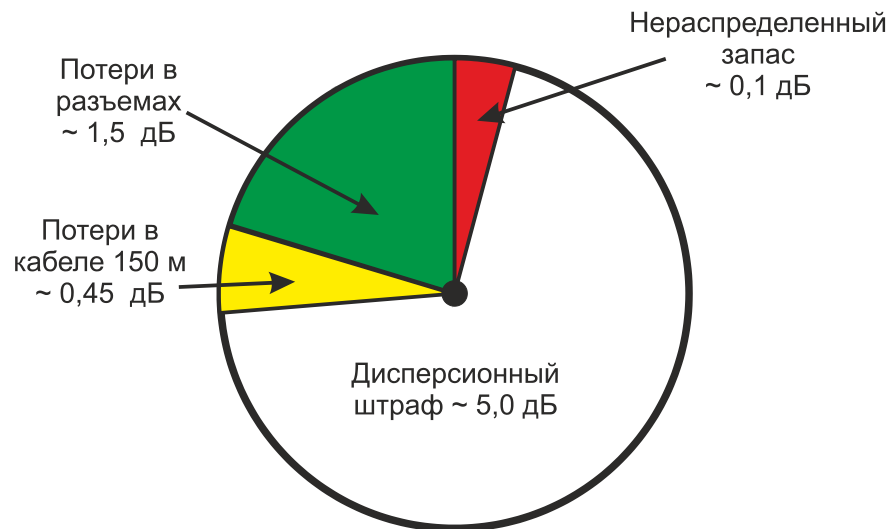
Под энергетическим потенциалом E волоконно-оптического сетевого интерфейса понимается минимальная гарантированная величина затухания кабельного тракта, при которой интерфейс обеспечивает заданное качество передачи информации.

Необходимость улучшения экономических показателей одномодовых сетевых интерфейсов приводит к резкому снижению параметра E . Если для

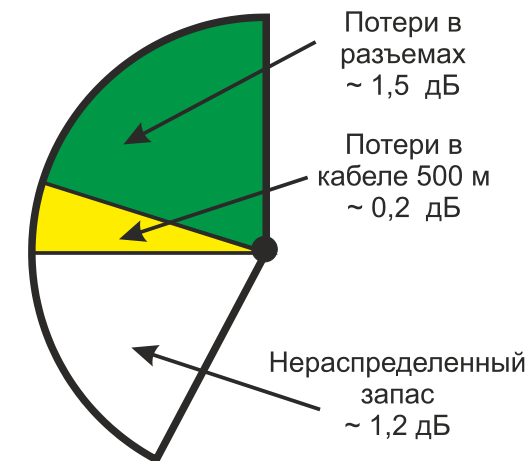
многомодовой техники характерны величины E порядка 6,8 – 7,5 дБ, то для 500-метровых одномодовых интерфейсов 400G Base-DR4 производители указывают значения порядка 3,0 дБ.

Распределение общих потерь в тракте максимальной протяженности по отдельным составляющим приведена на эскизе.

Многомодовые линии

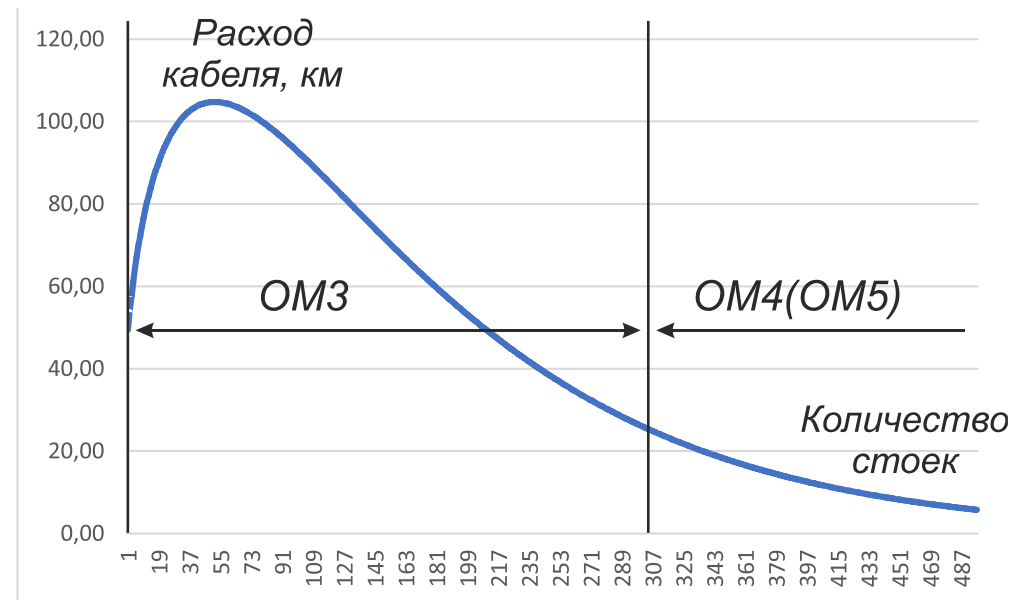


Одномодовые линии



Категории кабелей по широкополосности

Стандарты разрешают применение в машинном зале ММ оптических кабелей категорий OM3 – OM5. По мере роста категории улучшаются параметры широкополосности и, соответственно, расчет предельно допустимая протяженности тракта (стационарной линии). Принимая предельную дальность связи для категории OM3 в 70 м получаем, что примерно 80% ЦОД могут быть построены на кабелях категории OM3. При этом СКС для ЦОД с машинными залами на 350 и более стоек должны формироваться на кабелях категории не ниже OM4.

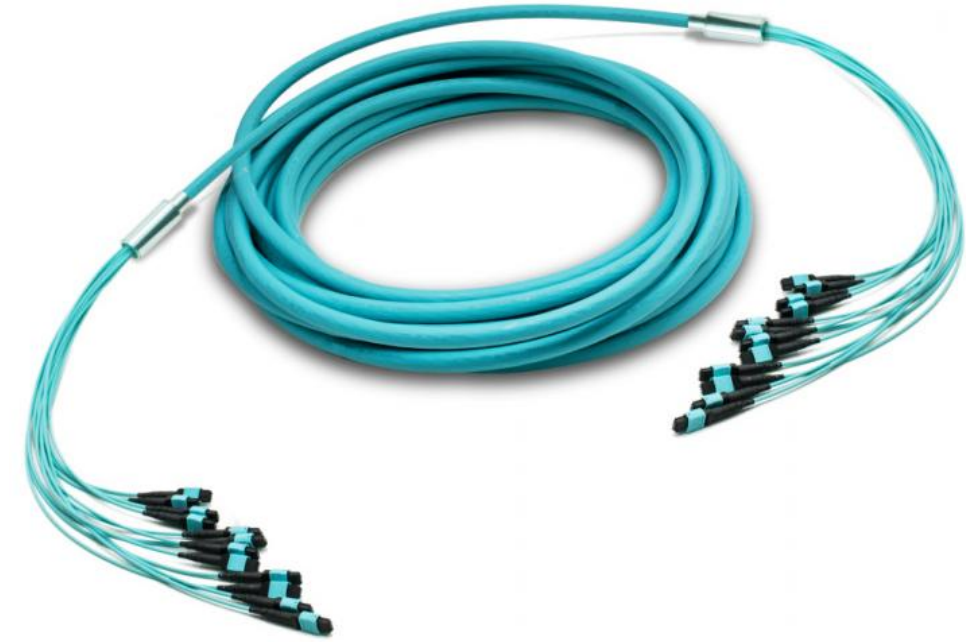


Реализация СКС по схеме модульно-кассетного решения

Модульно-кассетное решение предполагает наличие оконечных кассет и транковых кабелей. Его основными преимуществами считается:

- возможность отказа от выполнения в полевых условиях технически сложных и трудоемких процедур установки элементов оптических соединителей на линейные кабели;
- сведение монтажных работ к предельно простым чисто механическим операциям;
- гарантированное улучшение качественных показателей формируемого тракта и доведения их до уровня, заметно превышающего требования действующих стандартов;
- возможность исключения процедур измерений из перечня обязательных монтажных операций;
- простота и высокая скорость выполнения смены типа интерфейса и конфигурации линии по мере возникновения такой необходимости.

Важность последнего обстоятельства определяется тем, что любые монтажные работы с СКС машинного зала ЦОД нарушают герметичность системы холодных и горячих коридоров, что отрицательно влияет на функционирование активного сетевого оборудования, работающего в напряженном тепловом режиме из-за необходимости обеспечения максимально высокого быстродействия. Отсюда возникает потребность в минимизации продолжительности выполнения манипуляций на открытых полках кабельной системы.



Заключение

Представленный материал позволяет констатировать следующее

1. Отечественный рынок ЦОД демонстрирует определенные перспективы с точки зрения как объемов потребления оптических кабелей, так и своими 15-процентными темпами роста (прямое следствие недостаточного уровня информатизации в стране, который усугублен острым дефицитом самих ЦОД).
2. Общий объем рынка в натуральном выражении составляет примерно 25 тысяч км, из которых примерно 50% при выполнении некоторых дополнительных условий вполне может освоить отечественная промышленность.
3. При построении ЦОД хорошо востребованы транковые кабели протяженностью до 100 м и, соответственно, короткомеры
4. Физический уровень информационной инфраструктуры машинного зала ЦОД на 200 и более стоек целесообразно строить на многомодовых кабелях высоких категорий (реально не ниже OM4).

