

Одномодовые СКС в ЦОД — некоторые особенности применения

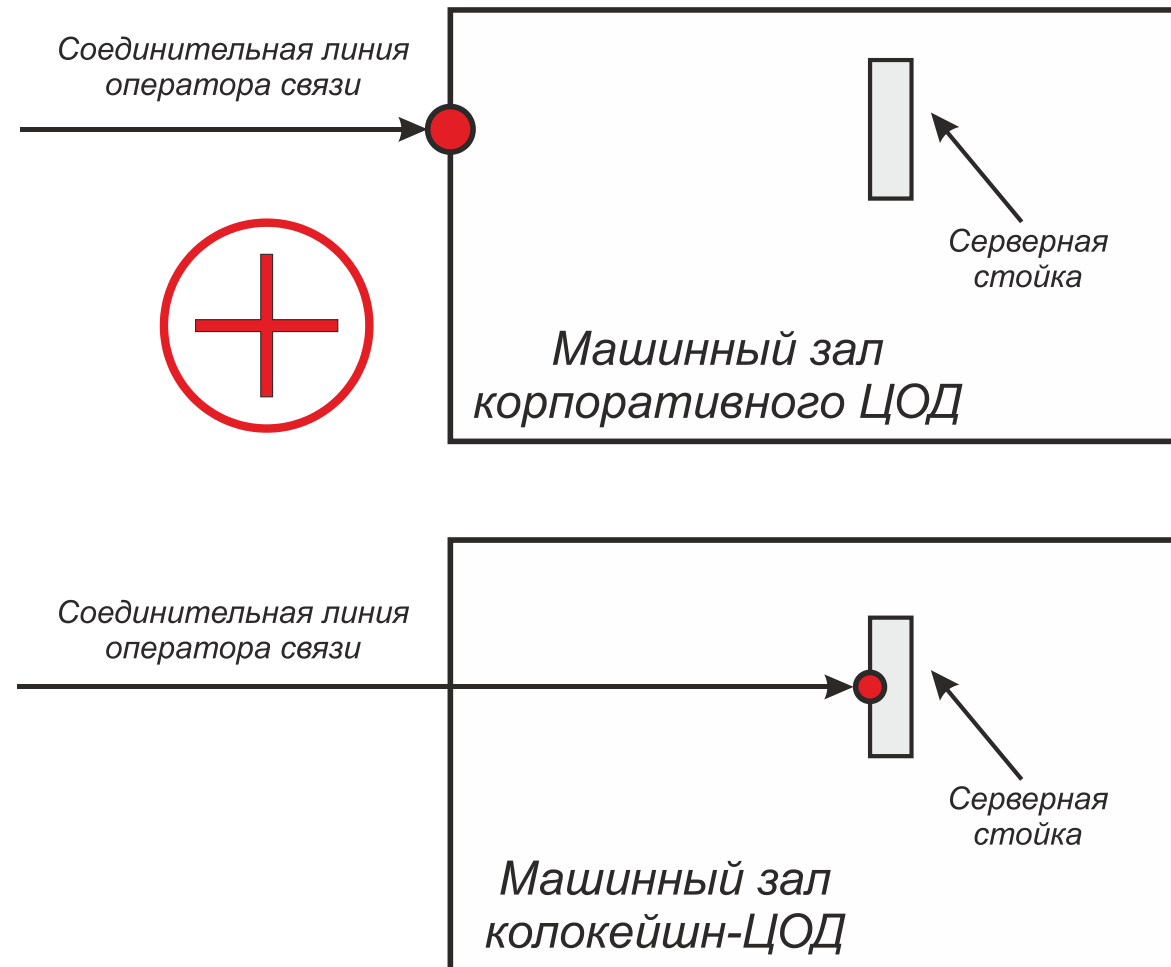
Ежегодный международный форум ЦОД
Москва, 4 сентября 2025 года

Семенов Андрей Борисович, д.т.н., профессор МГСУ и МТУСИ

ЦОДы как объекты массового применения отличаются большим разнообразием и классифицируются по различным признакам. В данном случае ограничимся их делением на корпоративные и колокейшн и будем рассматривать только их корпоративную разновидность. Под корпоративными ЦОДами понимаются объекты, создание которых финансируется различными организациями с целью удовлетворения собственных потребностей.

С точки зрения дальнейшего рассмотрения важно следующее

- инфраструктура рассматриваемых объектов не предназначена для сдачи в аренду сторонним заказчикам, что оказывает значимое влияние на применяемые технические и технологические решения;
- все сказанное далее относится только к тем ЦОДам, в машинном зале которых монтируется по меньшей мере несколько десятков серверных стоек (объекты как минимум малого масштаба по классификации ИКС-холдинга).



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).

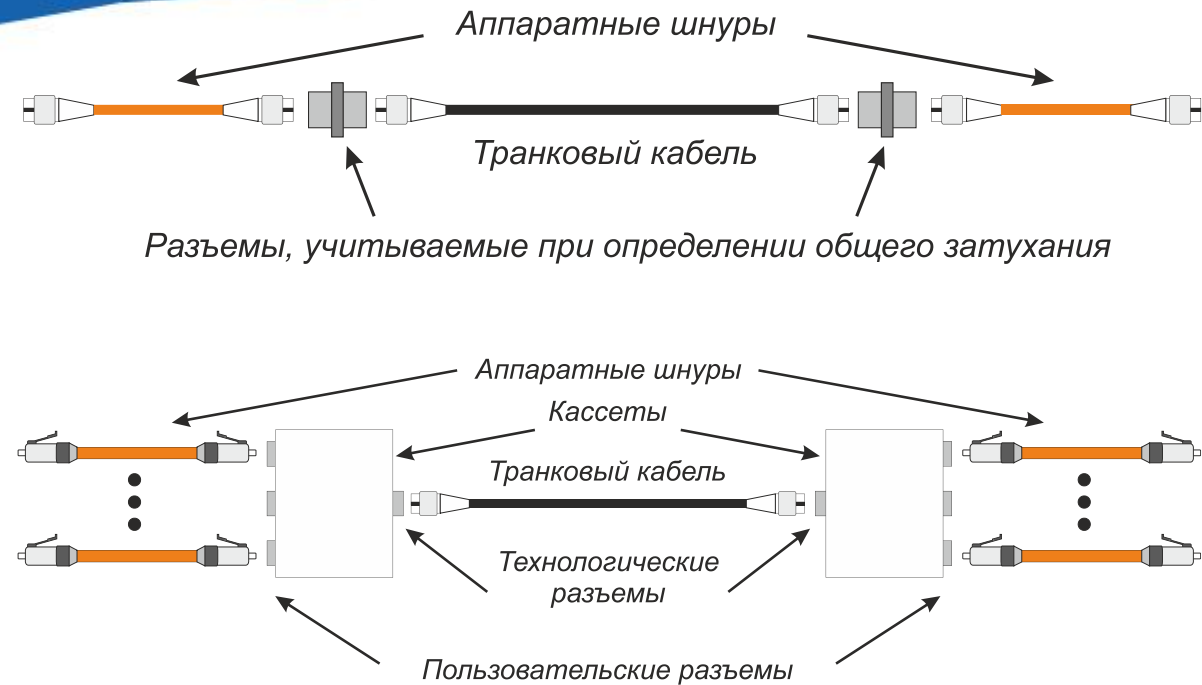
Электропроводная техника находит в ЦОД крайне ограниченное применение и присутствует в реальных системах только в виде т.н. DAC-кабелей или активных кабельных сборок. Они представляют собой кабели с предустановленными на них модулями группы xSFP (англ. active cable). Максимальная длина подобных изделий 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.



Стационарные линии СКС машинного зала ЦОД

СКС офисного назначения и СКС машинного зала ЦОД значительно отличаются друг от друга, что, собственно, стало причиной выделения последней в отдельный класс кабельных систем. Одно из таких отличий: характеристики стационарных линий и трактов нормируются по правилам магистральных уровней проводки, т.е. с привязкой к конкретным приложениям. Предельные значения тех или иных параметров заимствуются из спецификаций активного сетевого оборудования, которые разрабатываются IEEE или содержатся в документации MSA консорциумов его производителей. В линейную часть соответствующих моделей закладываются т.н. двухконнекторные тракты. Применения механических сплайсов и сварных сростков в линейной части соответствующей канонической структуры не предусматривается.

В массовой практике строительства ЦОД волоконно-оптические линии строятся в подавляющем большинстве случаев по модульно-кассетной схеме. Ее популярность обусловлена целым комплексом причин как проектного, так и эксплуатационного характера. Таковыми становятся быстрота реализации за счет применения исключительно претерминированных компонентов заводского изготовления, легкостью адаптации к фактическим потребностям активного оборудования простой заменой окончечных кассет и т.д.

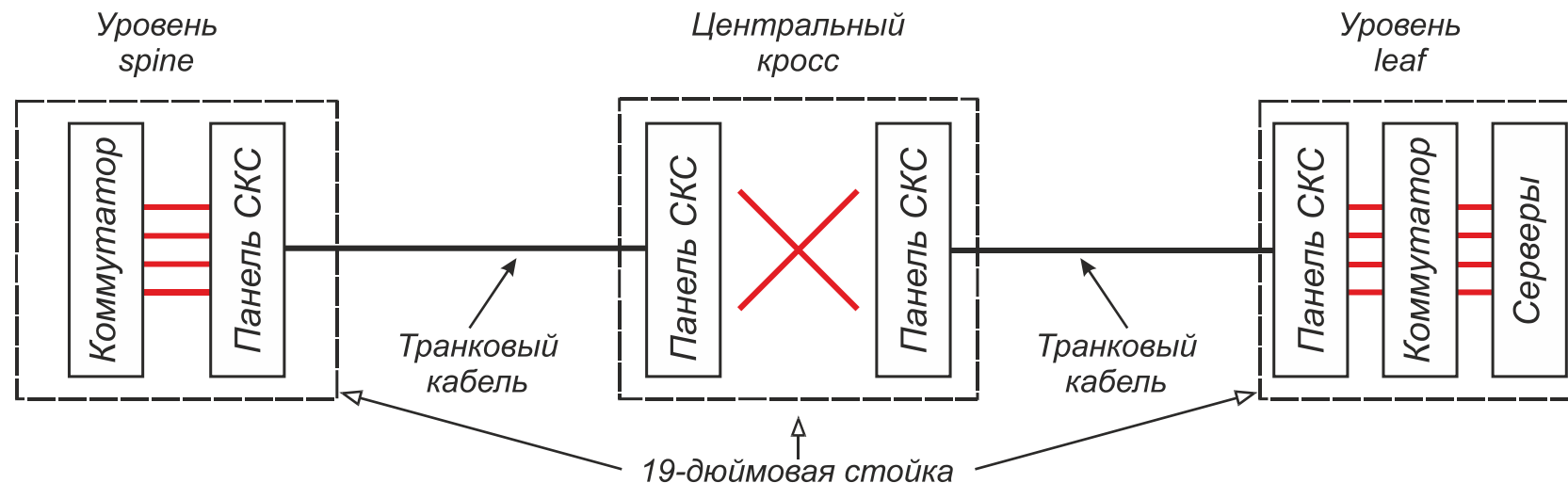


Количество коннекторов в кабельных трактах СКС машинного зала ЦОД

Указанные выше преимущества куплены ценой появления в цепи передачи сигнала двух дополнительных разъемов, которые изначально не предусматриваются стандартами. Формальная допустимость введения этих разъемов обосновывается их отнесением к технологическим.

Глубина обработки запроса, поступающего в ЦОД, серьезно ограничивается общей задержкой передачи сигнала между двумя серверами. Значимо уменьшить величину этого параметра вполне возможно отказом от 3-уровневого построения информационной инфраструктуры ЦОД с заменой ее на 2-уровневую, которая известна как spine-leaf. В канонической форме исполнения архитектура spine-leaf отличается очень малой гибкостью в части изменения конфигурации, что делает ее эксплуатацию крайне неудобной. Для устранения этого недостатка в структуру вводится центральный кросс, что показано на эскизе в правой части слайда. Это немедленно в общем случае удваивает как количество кассет, так и разъемных соединителей, т.е. тракт превращается уже в 8-коннекторный.

Возникает противоречие между практикой построения кабельных трактов и принятой схемой нормированием их параметров в стандартах. Решение этого противоречия возлагается на производителя СКС.



Качество передачи информации по кабельным трактам СКС

Заданное качество передачи информации по каналу связи (в независимости от его построения) достигается при выполнении двух необходимых и достаточных условий.

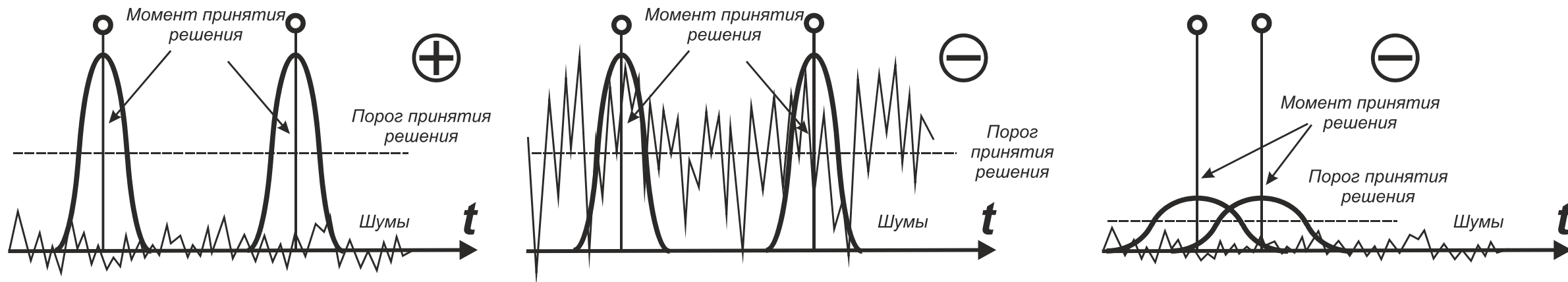
Необходимые условия – соблюдение протокольных ограничений и наличие физической связи передатчика и приемника.

Достаточные условия

- определенное отношение сигнала к шуму;
- определенный уровень дисперсионных искажений.

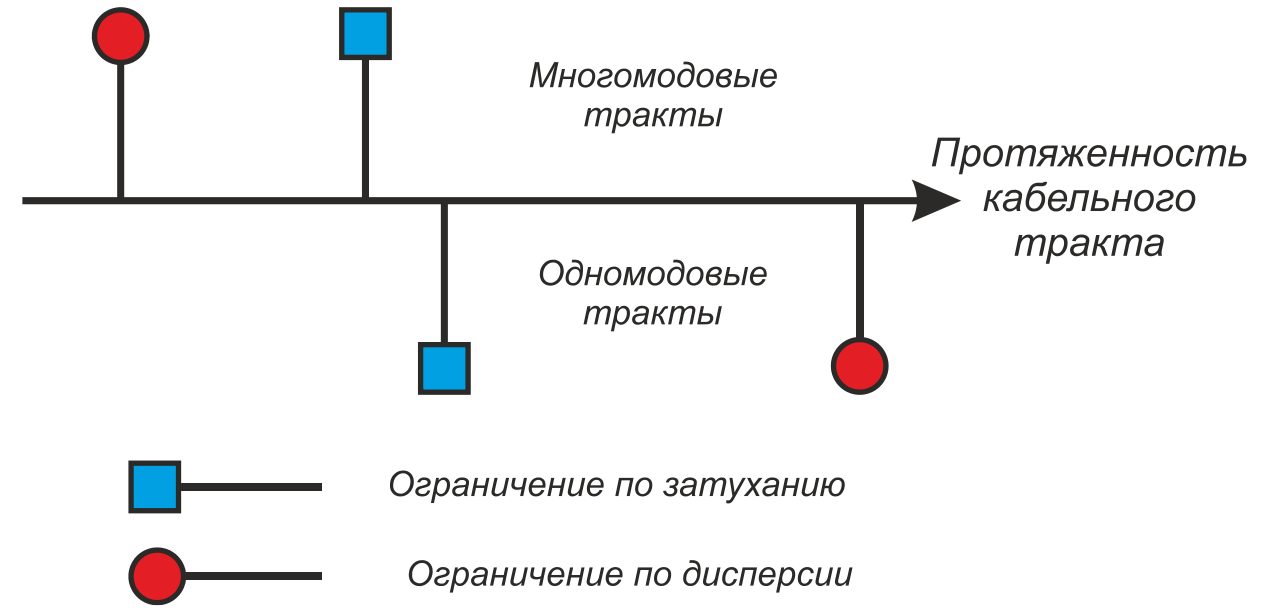
В графической форме эти условия показаны в нижней части слайда.

Все прочие параметры носят факультативный характер и при необходимости м.б. тем или иным образом сведены к упомянутым выше.



Контролируемые параметры оптических линий СКС машинного зала ЦОД

Качество передачи информации по волоконно-оптическим кабельным трактам определяется тремя параметрами: затуханием, дисперсией и обратными отражениями. Они действуют независимо, а конкретное значение определяется минимальной величиной по всей совокупности параметров. В схематической форме применительно к СКС в части ограничений по затуханию и дисперсии это демонстрирует схема в правой части слайда.



Дисперсионные искажения в случае одномодовых трактов, в отличие от многомодовых, можно не принимать во внимание. Сказываются такие факторы как

- предельно небольшие длины трактов (среднее значение этого параметра в ЦОД составляет 30 м при коэффициенте вариаций примерно 0,4);
- работа сетевых интерфейсов на длине волны 1310 нм.

Поэтому сосредоточимся на затухании и обратных отражениях. Необходимость особого внимания к ним обусловлена существенным увеличением количества разъемов в составе тракта передачи из-за применения модульно-кассетной техники и введения центрального кросса в структуры spine-leaf.

Потери в разъемах – 1(2)

Максимальные суммарные потери в разъемах по модели 2-коннекторной линии соглас-но ISO/IEC 11801-1:2017 установлены равными 1,5 дБ. При восьми соединителях в тракте такая величина достигается при допустимом затухании в одном разъеме не выше 0,19 дБ. Это немедленно влечет за собой то, что

Разновидность соединителя	MM/SM	Группа	Потери, дБ		Обратные отражения, дБ
			Средние	Макс.	
VSFF, групповой	SM/APC	Premium	0,15	0,35	60
VSFF, дуплексный	SM/UPC	Premium	0,05	0,15	55
VSFF, дуплексный	SM/UPC	Low Loss	0,15	0,20	55
VSFF, дуплексный	SM/APC	Premium	0,07	0,15	65
VSFF, дуплексный	SM/APC	Low Loss	0,15	0,25	65
VSFF, дуплексный	MM	-	0,05	0,15	25
MPO, 12-волоконный	SM/APC	Low Loss	0,1	0,25	60
MPO, 12-волоконный	SM/APC	Standard	0,2	0,7	60
MPO, 12-волоконный	MM/PC	Low Loss	0,08	0,25	25
MPO, 12-волоконный	MM/PC	Standard	0,10	0,50	25
MPO, 16-волоконный	SM/APC	Low Loss	0,15	0,35	60
MPO, 24-волоконный	SM/APC	Low Loss	0,15	0,35	60
MPO, 24-волоконный	SM/APC	Standard	0,25	0,35	60
MPO, 32-волоконный	MM/PC	Standard	0,25	0,60	25
LC, дуплексный	SM/UPC	Low Loss	0,05	0,15	55
LC, дуплексный	SM/UPC	Standard	0,08	0,20	55
LC, дуплексный	SM/APC	Low Loss	0,07	0,12	65
LC, дуплексный	SM/APC	Standard	0,12	0,25	65
LC, дуплексный	MM/PC	Standard	0,10	0,20	25

при задании параметров разъемов оптической подсистемы ЦОД необходимо ориентироваться исключительно на соединители группы ULL (англ. ultra low loss), что фиксируется введением соответствующих фирменных норм производителя СКС (внешний признак такого разъема – его отнесение к группе Elite, Premium и аналогичных им).

Потери в разъемах – 2(2)

Подборка параметров таких разъемов представлена в таблице на предыдущем слайде. Приведенные в ней данные свидетельствуют о

- наличии серийной элементной базы, которая выполняет обоснованные выше требование в части вносимого затухания;
- необходимость реализации групповых соединителей на изделиях с индивидуальными наконечниками для каждого из сращиваемых волокон;
- существовании определенных, хотя и довольно небольших рисков превышения того порогового значения, которое отведено стандартами на суммарное затухание разъемов кабельного тракта.

Для исключения рисков превышения предельных значений целесообразно предварительно тестировать сформированный тракт перед передачей его в штатную эксплуатацию.

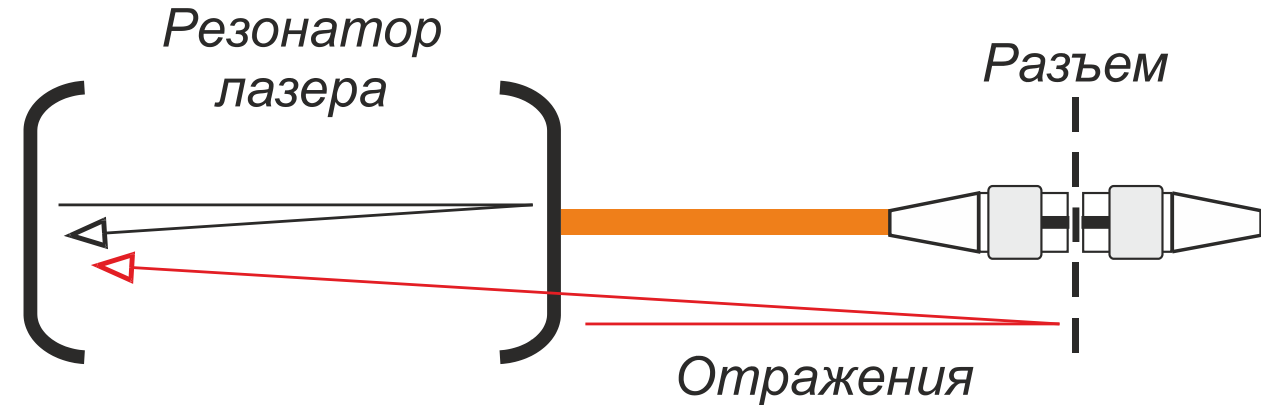


Обратные отражения в разъемах – 1(2)

Необходимость дополнительного жесткого контроля обратных отражений одномодовых оптических трактов кабельной системы машинного зала ЦОД обусловлена следующими особенностями рассматриваемой техники

- применением на скоростях 100 Гбит/с и выше многоуровневых кодов PAM4, отличающихся заметно меньшей помехоустойчивостью;
- высокой чувствительностью к обратному потоку энергии одномодовых лазеров с резонатором Фабри-Перо, которые применяются в оптических передатчиках с рабочей длиной волны 1310 нм по спецификации 400GBase-DR4 и аналогичных им;
- низким затуханием световодов на длине волны 1310 нм, что совместно с небольшой протяженностью тракта усиливает влияние обратных отражений на функционирование лазера (данный эффект в схематической форме демонстрирует эскиз в правой части слайда).

Опасность нарушения ограничений по параметру RL вызывается рисками значительного искажения формы импульса (вплоть до его дробления на две или даже более части), что сопровождается появлением ошибки передачи, т.е. качества функционирования канала связи.



Обратные отражения в разъемах – 2(2)

Для наихудшего случая 8 коннекторов в кабельном тракте (структуры spine-leaf с центральным кроссом) согласно данным, приведенным в таблице, минимально допустимый коэффициент обратного отражения отдельного разъема составляет 48 дБ. Это значение вполне достигается изделиями группы UPC при дополнительном условии скрупулезного выполнения регламентов в части проверки и очистке соединителя перед использованием.

Нельзя, однако, забывать о том, что после нескольких циклов подключения-отключения разъемов с прямой торцевой поверхностью наконечника из-за механических микрповреждений оптически активной поверхности волокна параметр RL падает до уровня РС, т.е. практически гарантированно выходит за пределы допустимого. Данный эффект фактически форсированно приводит к необходимости применения в одномодовой СКС угловых разъемов APC, что увеличивает затраты на ее реализацию и дополнительно усложняет эксплуатацию.

Минимальная рекомендуемая IEEE величина параметра обратного отражения разъема в зависимости от количества разъемов в одномодовом оптическом тракте (сетевой интерфейс 400GBase-FR4 по спецификации IEEE802.3bs)

Количество разъемов в тракте	Минимально допустимое значение RL, дБ
1	37
2	42
4	45
6	47
8	48
10	49

угловых разъемов APC, что увеличивает затраты на ее

Энергетический потенциал высокоскоростных оптических интерфейсов

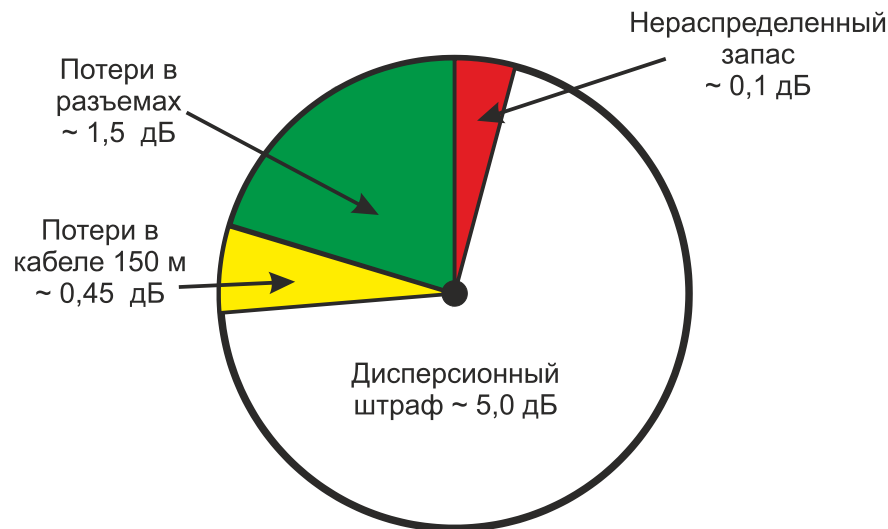
Под энергетическим потенциалом E волоконно-оптического сетевого интерфейса понимается минимальная гарантированная величина затухания кабельного тракта, при которой интерфейс обеспечивает заданное качество передачи информации.

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

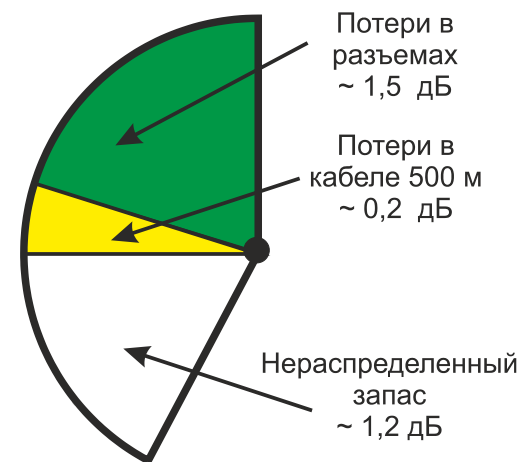
многомодовой техники характерны величины E порядка 6,8 – 7,5 дБ, то для 500-метровых одномодовых интерфейсов 400G Base-DR4 производители указывают значения порядка 3,0 дБ.

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

Многомодовые линии



Одномодовые линии

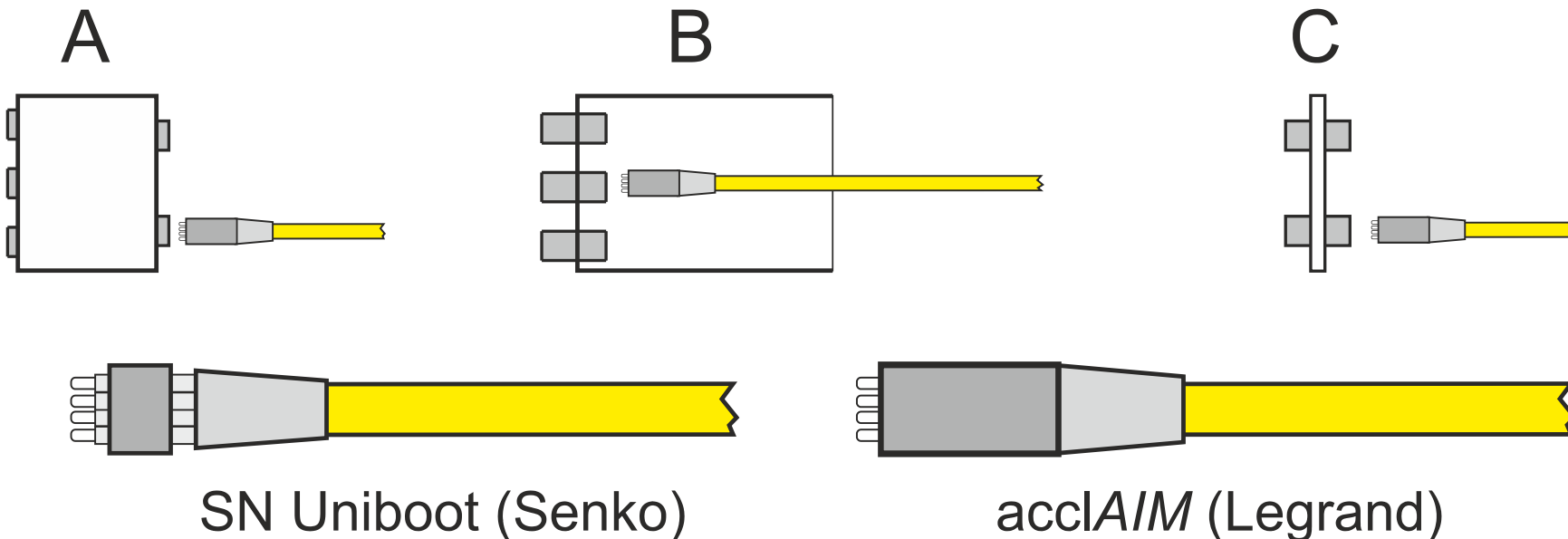


Уменьшение количества разъемов в тракте

Влияние структуры типового тракта СКС машинного зала ЦОД на качество передачи информации может быть уменьшено за счет

- сокращения количества коннекторов за счет отказа от традиционных кассет в пользу т.н. адаптерных кассет (позиция В);
- переход на разъемы группы VSFF с индивидуальными наконечниками для каждого волокна;
- применения разъемов с угловыми наконечниками APC.

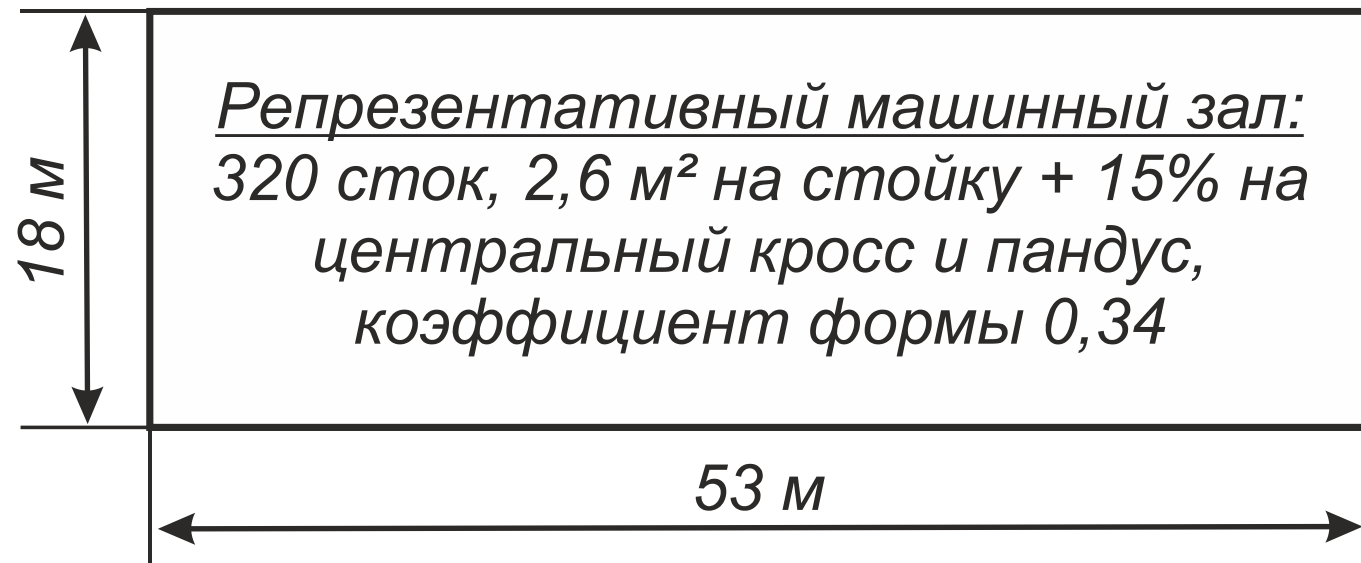
Реализация этих мероприятий, в свою очередь, потребует определенной коррекции компонентного состава СКС за счет включения в него новых продуктов.



Оценка предельной протяженности тракта передачи в машинном зале ЦОД

В качестве прототипа СКС для ЦОД были использованы офисные кабельные системы, у которых нормируются 100-метровая предельная протяженность симметричных трактов и 300-метровая для волоконно-оптических.

Столь большие протяженности трактов избыточны для типового ЦОД, который при существующей и известных перспективных системах охлаждения **ВСЕГДА** будет отличаться геометрической компактностью.



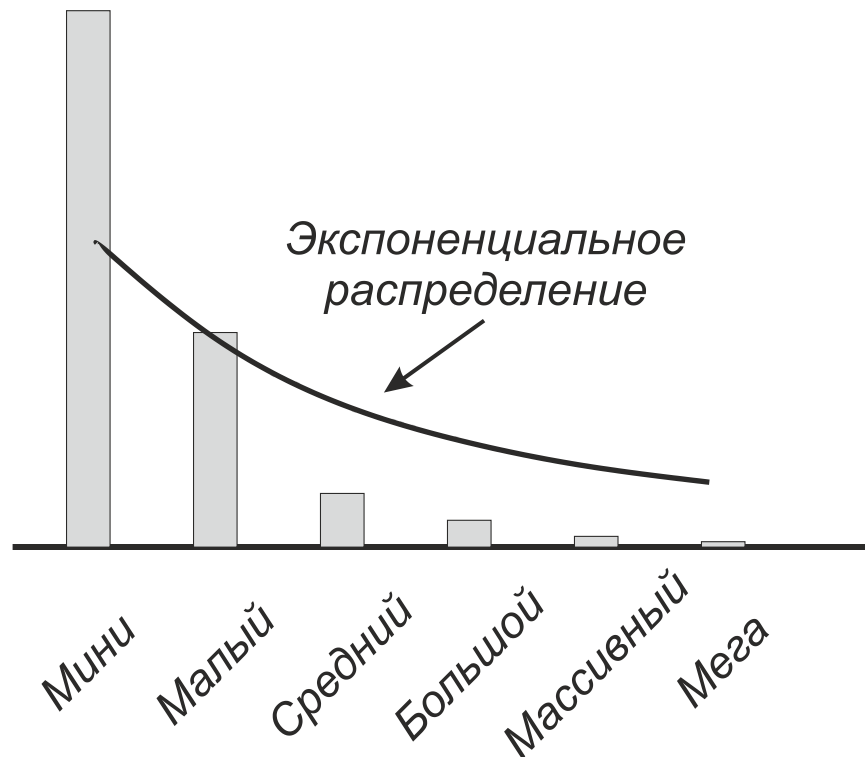
Расчет по приведенной на слайде модели показывает, что ожидаемая максимальная протяженность тракта не превысит 71 м (получена как полупериметр машзала прямоугольной в плане формы в виде оценки сверху), т.е. при нормировании характеристик можно смело сокращать предельную протяженность волоконно-оптической линии с 300 м до 70 – 150 м.

Таким образом, высокая “дальнобойность” одномодовой техники в рассматриваемой области построения кабельных систем **РЕАЛЬНО НЕ ВОСТРЕБОВАНА**

Изгибостойкое волокно для СКС машинного зала ЦОД – 1(2)

Особенность машинного зала ЦОД – его предельно малые геометрические размеры, необходимость достижения которых фактически диктует система охлаждения. Одновременно из-за большого количества серверов и высокой конструктивной плотности оборудования возникает проблема большего или меньшего уровня серьезности соблюдения радиуса изгиба коммутационных шнуров, причем с течением времени острота этой проблемы будет нарастать.

Модельная конфигурация группы ODF

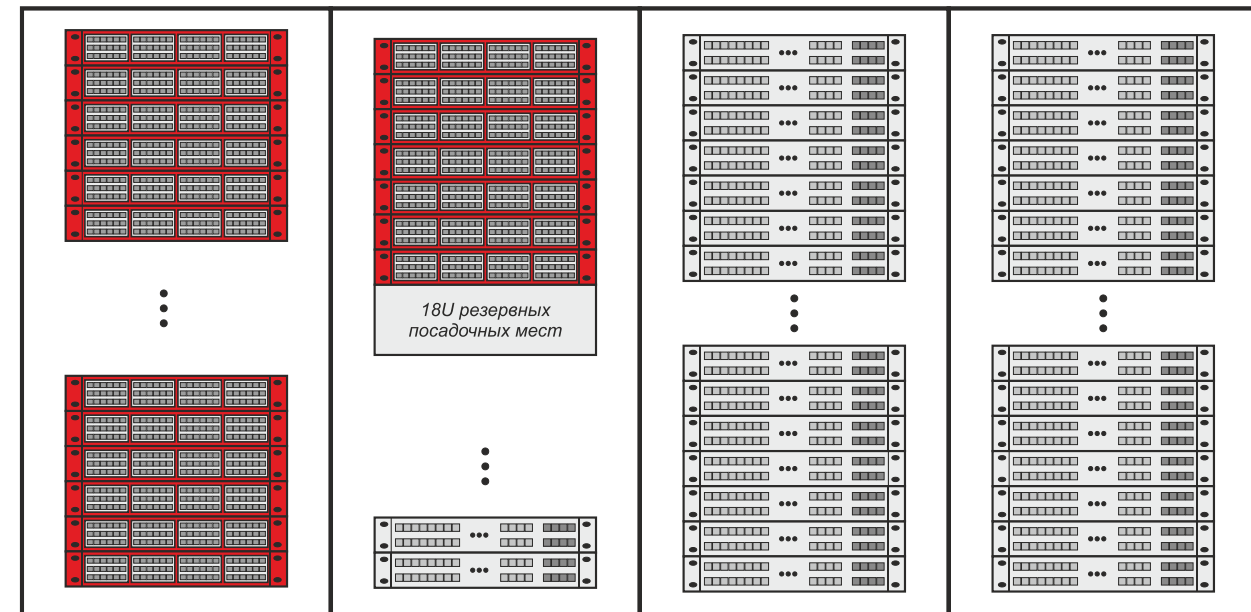


54 оптические
полки

34 оптические
полки + 2
коммутатора ЛВС

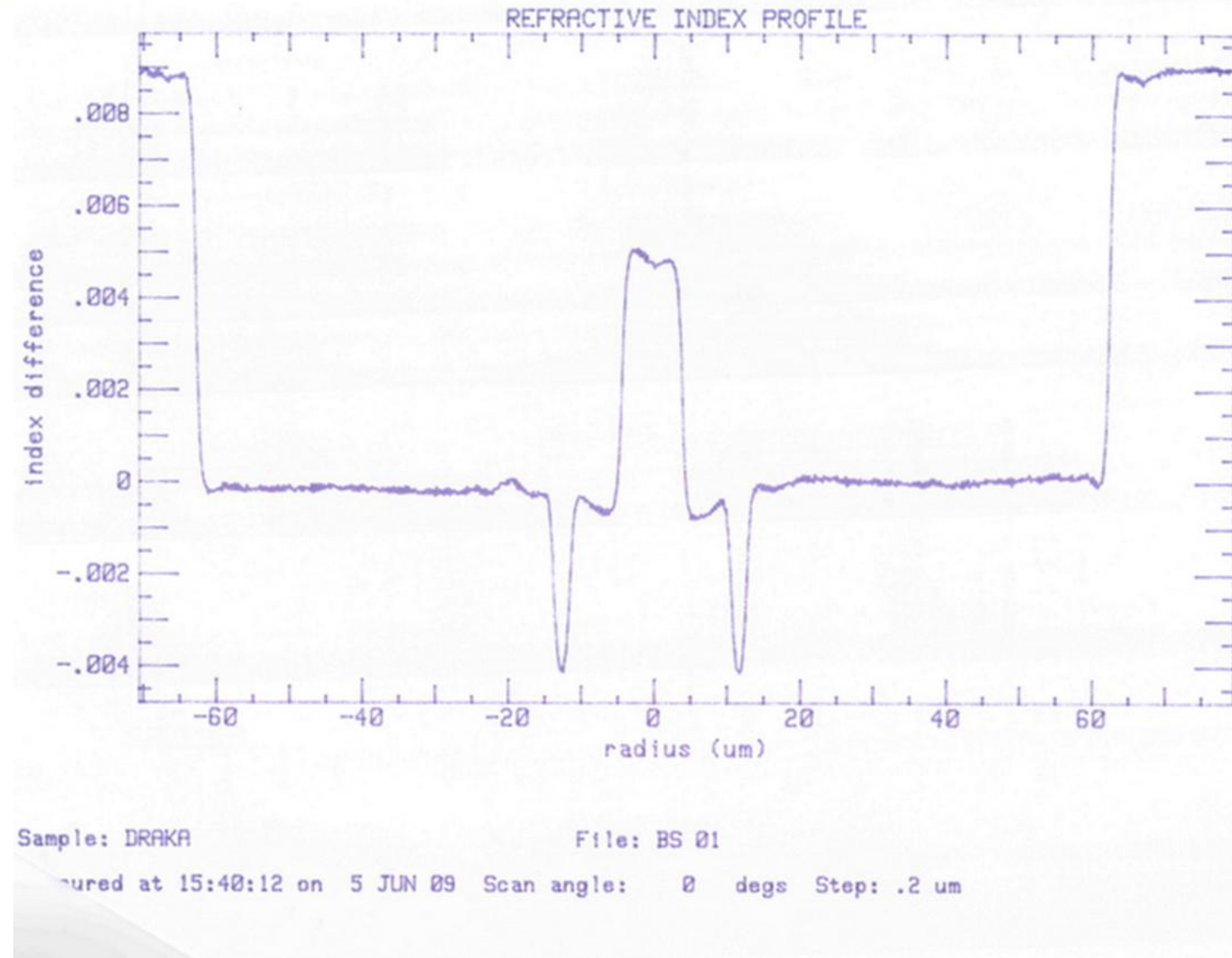
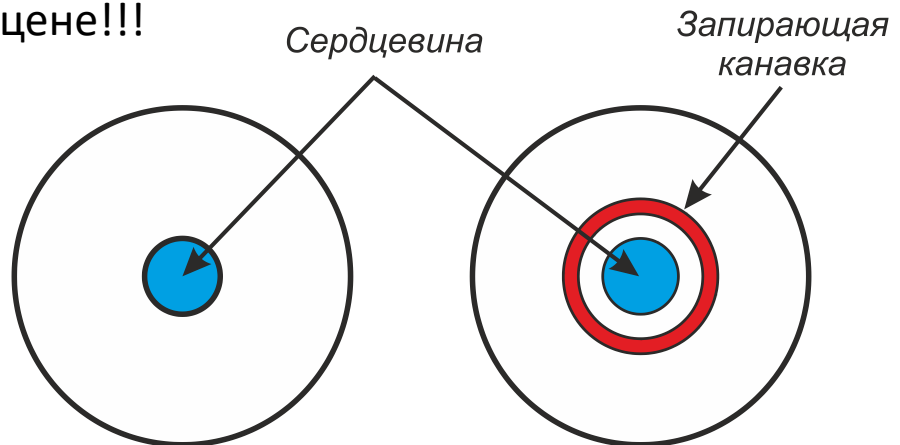
54 коммутатора
ЛВС

54 коммутатора
ЛВС



Изгибостойкое волокно для СКС машинного зала ЦОД – 2(2)

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!!!



Мы следуем за рынком ©

С.Г. Акопов, технический директор представительства компании Corning в России

Рынок открывают дилетанты, закрывают профессионалы

Чем мутнее вода, тем крупнее рыба

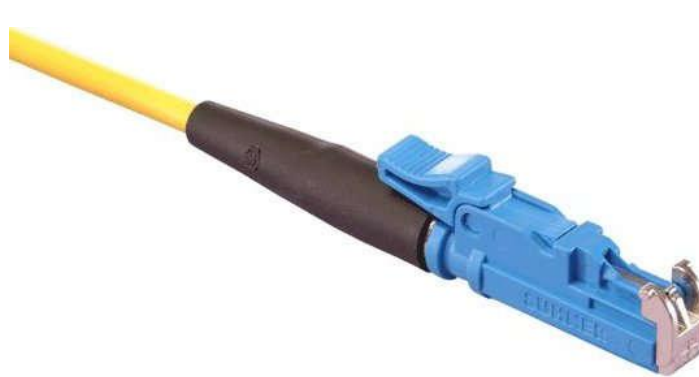
Два последних выражения найдены на просторах Интернета

Типы серийных дуплексных оптических разъемов группы SFF

LX.5 (США)



F-3000 (Европа)



LC (США)



MU (Япония)



Исторический факт. Несмотря на заметно худшие технические (в первую очередь эксплуатационные) параметры по сравнению с конкурирующими разработками примерно одного года разработки, дуплексный разъем LC занимает доминирующее положение на рынке. Это наглядный пример того, что соображения получения прибыли зачастую имеют решающее значение в процессе выбора того или иного технического решения, которое фактически навязывается потребителю.

1. СКС машинного зала ЦОД как средство построения физического уровня информационной инфраструктуры может быть реализована на серийной одномодовой элементной базе с выдвижением специальных дополнительных требований средней степени жесткости.
2. При достигнутом на сегодняшний день уровне параметров с учетом ближайших и среднесрочных перспектив ее развития отсутствуют аргументы по безусловной необходимости применения при построении СКС одномодовой техники.
3. Вне зависимости от типа разъемного соединителя коммутационного оборудования одномодовой (фактически также многомодовой) СКС его целесообразно применять в исполнении APC.
4. Внедрение одномодовых решений потребует от производителя СКС определенной коррекции компонентного состава выпускаемого продукта.
5. Вопрос о применении одномодовой ЦОД машинного зала на практике часто решается с привлечением аргументов, достаточно далеких от технической целесообразности.
6. Одномодовые решения для построения СКС машинного зала ЦОД фактически представляют собой технику предельных параметров. Этот факт значительно наращивает требования к профессиональной квалификации персонала и ощутимо затрудняет текущую эксплуатацию кабельной системы.

