Устаревание СКС — насколько велики риски?

(применительно к СКС машинного зала ЦОДа)

Ежегодный международный форум «ЦОД»
Москва, 3 сентября 2026 года

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

Резонные опасения заказчика в части устаревания СКС

СКС как средство организации физического уровня изначально рассчитано на длительный срок службы, т.е. правильно спроектированная и инсталлированная по всем правилам кабельная система не подвержена эффектам физического старения. В немалой степени данное полезное свойство является прямым следствием щадящих температурно-влажностных условиях объекта, на котором постоянно или в течение длительного времени находятся люди.

Однако, физическая долговечность не отменяет морального устаревания и при гарантии продолжительностью 15-25 лет ее риски вполне конкретны как для офиса (средняя продолжительность межремонтного срока службы достигла 17 лет), так и в ЦОДе (срок эксплуатации до модернизации 10-15 лет).

Острота вопроса дополнительно усиливается высокими капитальными затратами на создание СКС.



как однажды сказал ходжа насреддин за это время кто то обязательно сдохнет: я, ишак или падишах

Разновидности устаревания СКС



В общем случае различают около десятка механизмов устаревания сложных технических систем. Ограничимся рассмотрением только треъих, наиболее значимых для СКС.

Физическое устаревание СКС означает необратимое ухудшение первоначальных параметров системы из-за старения материалов, роста механических напряжений и т.д. Сказывается применительно к ЦОД в слабой степени из-за того, что кабели прокладывают преимущественно вне пределов горячей зоны, т.е. в областях с температурой 20-25С и контролируемой влажность , что резко замедляет деградационные процессы. С этим видом устаревания СКС можно не считаться в горизонте тех типовых 20-25 лет плановой эксплуатации ЦОДа.

Моральное устаревание предполагает техническую исправность СКС, но ее эксплуатация становится экономически невыгодной. Например, по причине того, что появились более функциональные аналоги построения физического уровня информационной системы. С этим видом устаревания можно не считаться: альтернатива СКС реализации физического уровня информационной системы на основе кабельных решений отсутствует.

Функциональным устареванием рассматривается как частный случай морального устаревания, при котором СКС перестает отвечать изменившимся требованиям со стороны более высоких уровней информационной системы из-за появления новых задач. Наиболее сложный для анализа случай, который требует дополнительного рассмотрения.

Риски морального устаревания СКС

Под моральным устареванием СКС обычно понимается потеря актуальности ее характеристик и архитектуры при сохранении полной физической работоспособности. Считается, что риски морального старения качественной СКС могут начать проявляться через 8–10 лет.

Внешние проявления морального устаревания

- несоответствие пропускной способности текущим задачам;
- появление новых несовместимых интерфейсов;
- отсутствие необходимого количества портов.

Нормативные документы не содержат ответы на поставленные вопросы.

Дополнительно усугубляет ситуацию отсутствие новых редакций стандартов, а также дополнений к ним на уровне TSB, Addendum и TR, которые обычно предшествуют процедурам полноценной актуализации нормативных документов.



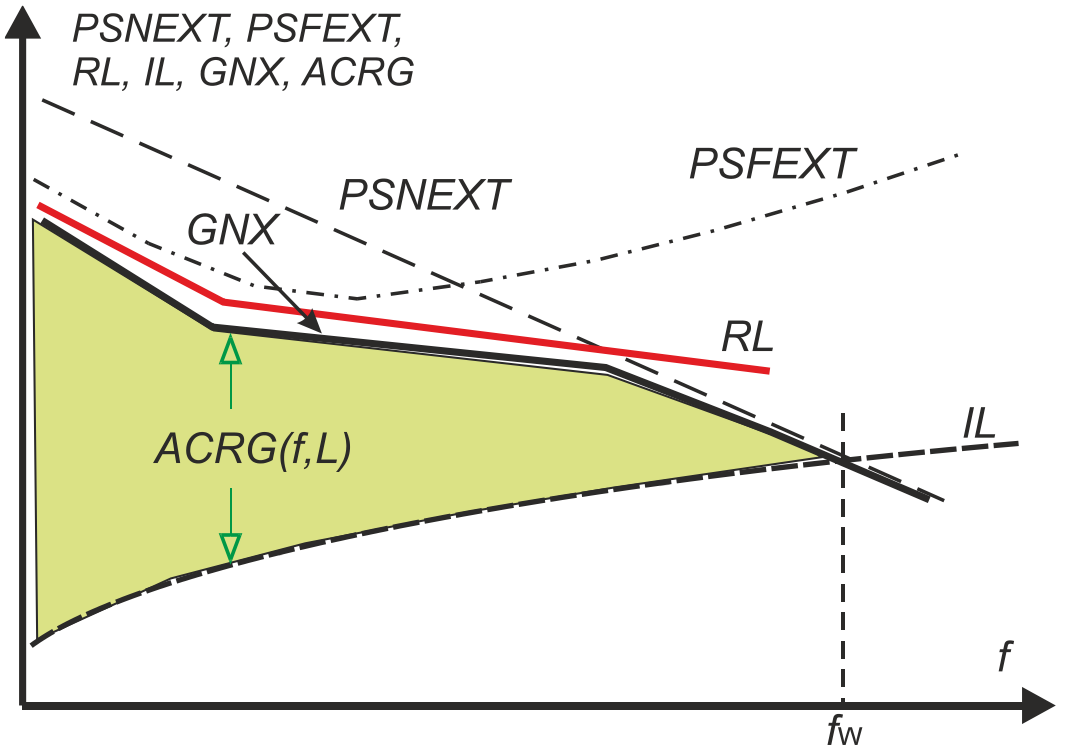
Отсутствие перспектив применения медножильной техники

Частотные параметры отдельных помеховых составляющих и затухания представлены на эскизе и позволяют определить шенноновскую пропускную способность симметричного канального тракта как

$$W(L) = 4 \cdot 0,6 \cdot \int_0^{f_w} \log_2[1 + ACRG(f, L)]df,$$

где

$$ACRG(f, L) = GNX(f, L) - IL(f, L)$$

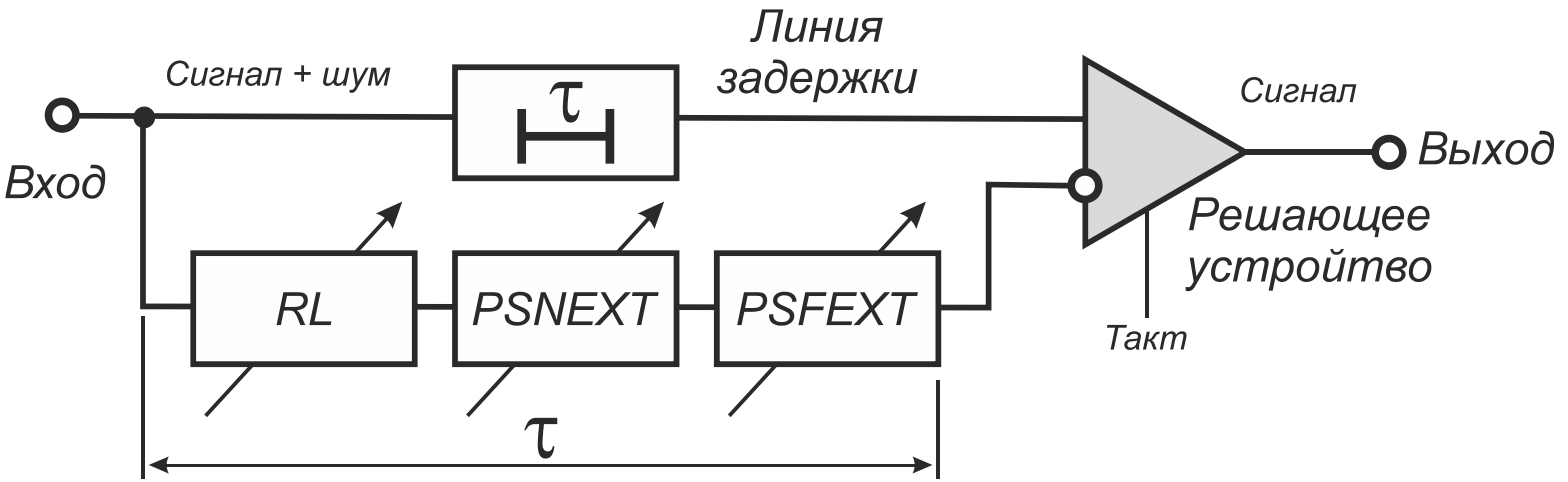


Уравнение для определения верхней граничной частоты кабельного тракта

$$GNX(f, L) - IL(f, L) = 0 \quad dB.$$

Обработка принимаемого сигнала

В процессе приема многоуровневого сигнала сетевой интерфейс выполняет его обработку до решающего устройства для подавления отдельных помеховых составляющих. Для этого в момент настройки приемника в линию подается тестовый сигнал и фиксируется создаваемая им переходная помеха на ближний и дальний концы, а также сигнал обратного отражения. При поступлении



Блоки подавления отдельных составляющих помехи

сигнала приемник формирует модель этой помехи, которая вычитается из суммы сигнала с шумом, в результате чего резко улучшается отношение сигнала к шуму и происходит соответствующее уменьшение

$$W = \int_{f_d}^{f_u} \log_2[1 + GPSAACR(f)]df$$

вероятности ошибки как основного из ключевых параметров, определяющих качество передачи информации.

В результате формируется схема классической коррекции, которая не затрагивает тепловой шум, что не позволяет расширять полосу пропускания сигнала как основное средство наращивания пропускной способности канала связи.

Категория 9 в обозримой перспективе разрабатываться не будет из-за отсутствия техническх возможностей!

Результаты расчетов

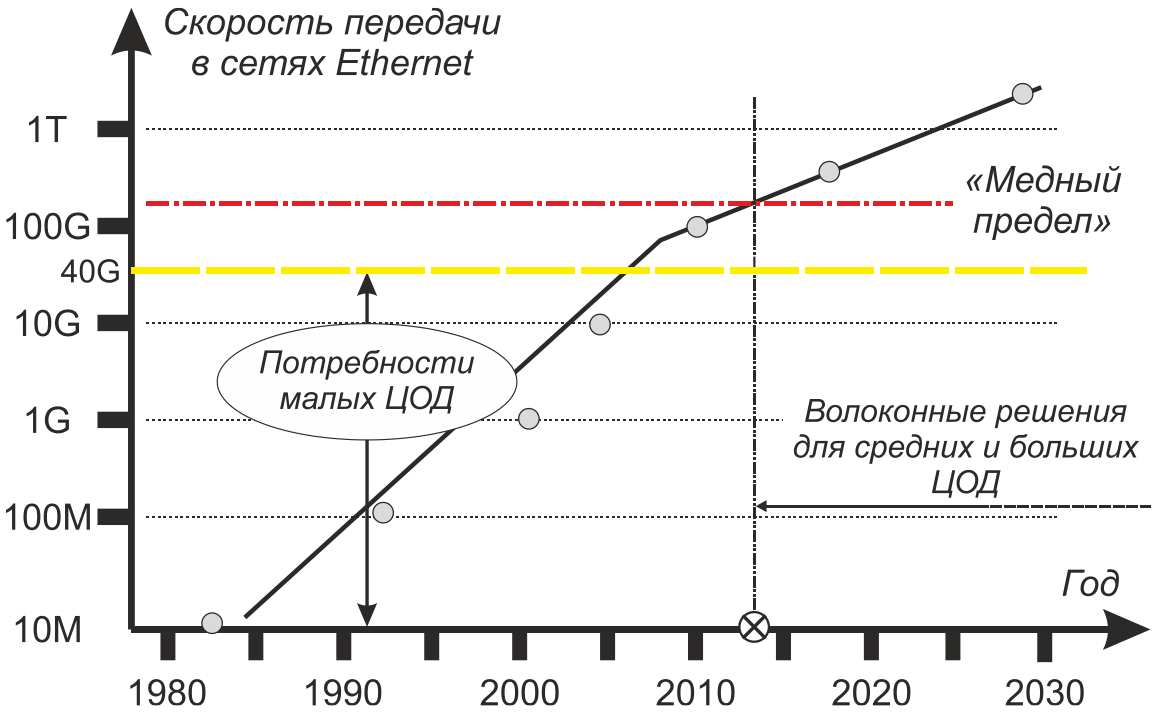
Длина, м	30	40	50	60	70	80	90	100
W, Гбит/с	110	98	73	69	61	52	47	42

Результаты 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.

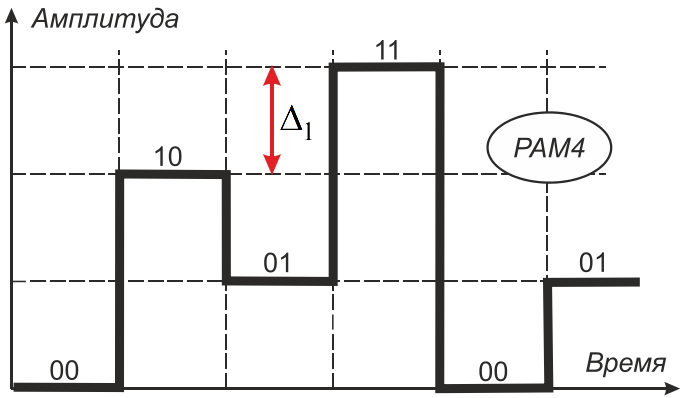
Вывод. Медножильные решения из-за своей принципиальной узкополосности в ЦОД объективно не имеют перспектив для дальнейшего применения.

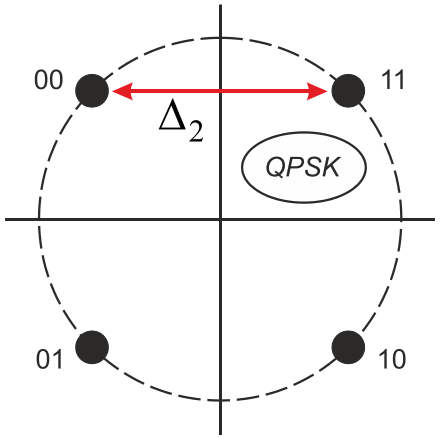


Средства замедления морального устаревания СКС машинного зала ЦОДа

Риски морального устаревания ЦОДа вполне конкретны и определяются постоянным ростом скоростей передачи. Несмотря на замедление скорости этого процесса, что наглядно проявилось уже в начале прошлого десятилетия XXI века и было вызвано в первую очередь ограничения по быстродействию микроэлектронной элементной базы, признаков полного прекращения не наблюдается из-за того, что функции основного средства наращивания скорости берет на себя параллельная передача в различных вариантах ее реализации. Определенный эффект дает также переход на многоуровневые схемы формирования линейного сигнала (в первую очередь коды вида PAM4, более перспективным является применение амплитудно-фазовой модуляции, хотя это такой сигнал сложнее для обработки на приеме).

Δ_1





Сравнение амплитудной и фазовой модуляции показывает преимущество фазовой по устойчивости к воздействию помех. Данный факт непосредственно вытекает из величин расстояния между теми соседними уровнями, которые соответствуют передаваемым сигналам.

$$\Delta_2 > \Delta_2$$

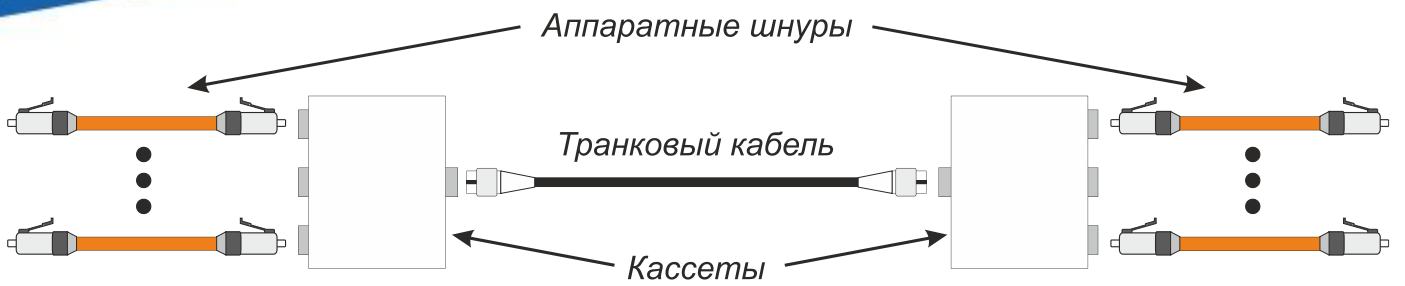
Возможности адаптации СКС для работы на более высоких скоростях передачи

Возможность бесшовного наращивания скоростей передачи обеспечивается принятым в СКС машинного зала модульно-кассетным принципом построения стационарных линий.

Кассета в такой структуре выполняет функции скрытого корпусного адаптера, а ее наличие позволяет легко адаптировать кабельные тракты к схемам организации связи, принятым в сетевых интерфейсах с различным быстродействием.

При этом схема Base8, которая в настоящее время используется в качестве стандарта де-факто, при существующем уровне техники обеспечивает скорости передачи до 1,6 Тбит/с вне зависимости от выбранной схемы организации информационного обмена (SWDM и BiDi) – соответствующий расчет приведен в правой части слайда.

По состоянию н сегодняшний день созданы очень большие запасы по пропускной способности кабельного тракта.



SWDM: *4 волокна × однонаправленная передача × 4 бит/такт (код QAM16) ×*

×4 длины волны SWDM × 50 ГГц тактовой частоты = ***1,6 Тбит/с;***

BiDi: *8 волокон × двунаправленная передача × 4 бит/такт (код QAM16) ×*

× 2 длины волны BiDi × 50 ГГц тактовой частоты = ***1,6 Тбит/с****.*

Техническая эффективность волокон высоких категорий

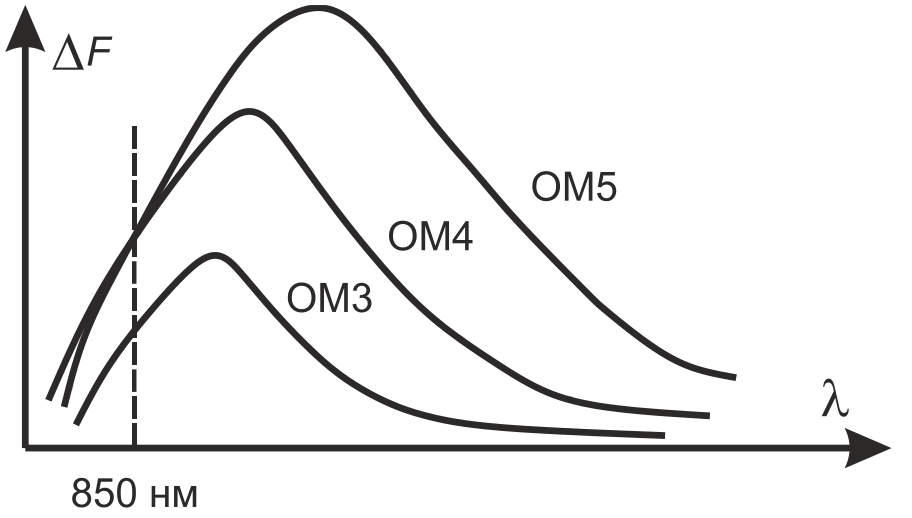
Одним из способов наращивания “иммунитета” кабельной системы к неизбежным эффектам морального устаревания является построение кабельной системы на волокнах высоких категорий.

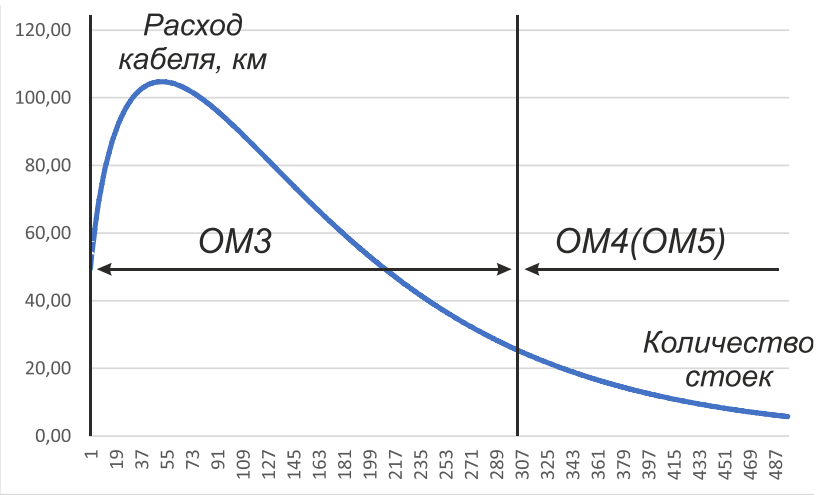
По состоянию на середине третьего десятилетия XXI века кабельная система основной массы ЦОДов моет быть реализована на оптических кабелях категории OM3 (см. график в нижней правой части слайда). Однако, этот график не учитывает постоянный рост средних скоростей. По мере освоения скоростного диапазона 800 Гбит/с значение кабелей высоких категорий (OM4 и особенно OM5) будет постепенно нарастать.

Если принять в качестве меры технической эффективности M произведение

$$M = V \times L,$$

где V – информационная скорость передачи, а L – предельная дальность связи, то волокно OM5 превосходит OM4 в 1,5 раза, а OM3 – почти в три раза. Т. обр., СКС машинного зала ЦОД со 150 стойками и более целесообразно начинать реализовывать уже сейчас на кабелях категории OM5.





Жизненный цикл корпоративного ЦОДа



Как и любой иной сложный инженерный объект корпоративный ЦОД в процессе своего жизненного цикла проходит несколько этапов. Обычно выделяют четыре этапа.

Этап проектирования и строительства для больших объектов традиционной конструкции занимает 1,5 – 2 года, а для небольших объектов продолжительность этого этапа сокращается до четырех – шести месяцев.

На этапе основной фазы эксплуатации (период до 10 – 15 лет) обычно выделяют фазы вывода объекта на проектную мощность к концу четвертого года, и штатной эксплуатации, на которой объект работает с полной или близкой к ней проектной нагрузкой.

Момент завершения основной фазы обычно совпадает с наступлением морального устаревания систем электроснабжения и кондиционирования как ключевых компонентов инженерной инфраструктуры. Возможность их модернизации должна быть предусмотрена исходным проектом, так как ее выполнение позволяет примерно удвоить продолжительность эксплуатации объекта. Более того, имеется ряд практических примеров того, как модернизация системы электроснабжения улучшает параметры объекта.

Вывод ЦОДа из эксплуатации, который заканчивается его демонтажом (утилизацией) или перепрофилированием имеющейся архитектурной инфраструктуры, происходит обычно через 20 – 25 лет после начала эксплуатации. Этот этап начинается в тот момент, когда дальнейшая модернизация перестает быть экономически целесообразной.

Разновидности модернизации

СКС подавляющего большинства ЦОДов реализуется по традиционной структуре с привлечением модульно-кассетной схемы построения кабельного тракта. Модернизации такой проводки может выполняться по двум направлениям.

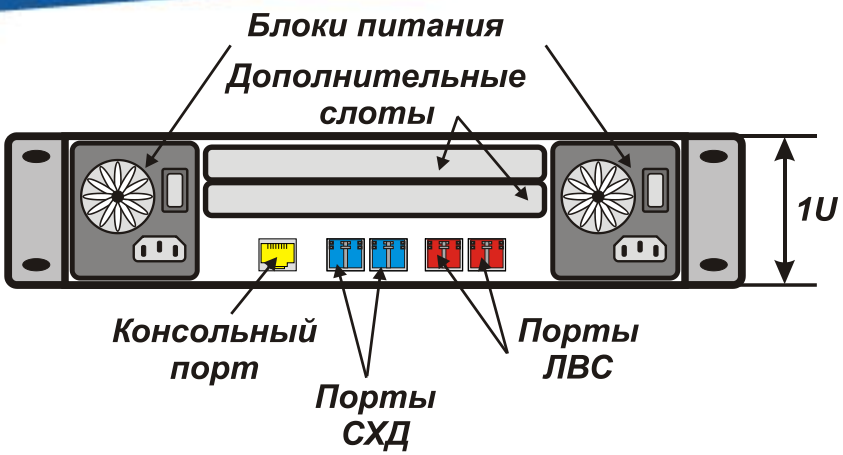
Под модернизацией в малом понимается простая замена оконечных кассет с целью согласования возможностей кабельной системы по передаче сигналов с фактическим потребностями информационной и телекоммуникационной структуры.

Модернизация в большом предполагает замену линейной части и выполняется перекладкой транковых кабелей.

Эффективность текущей эксплуатации ЦОДа (в широком смысле этого термина без конкретизации критериев) в общем случае возрастает, если информационная проводка изначально максимально полно адаптирована к модернизации как в большом, так и в малом.



Решение задачи нехватки количества портов



Данная задача решается в процессе проектирования, а требуемое предельное количество портов легко оценивается с учетом текущего уровня техники.

Рассматривается 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 серверной стойки 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.

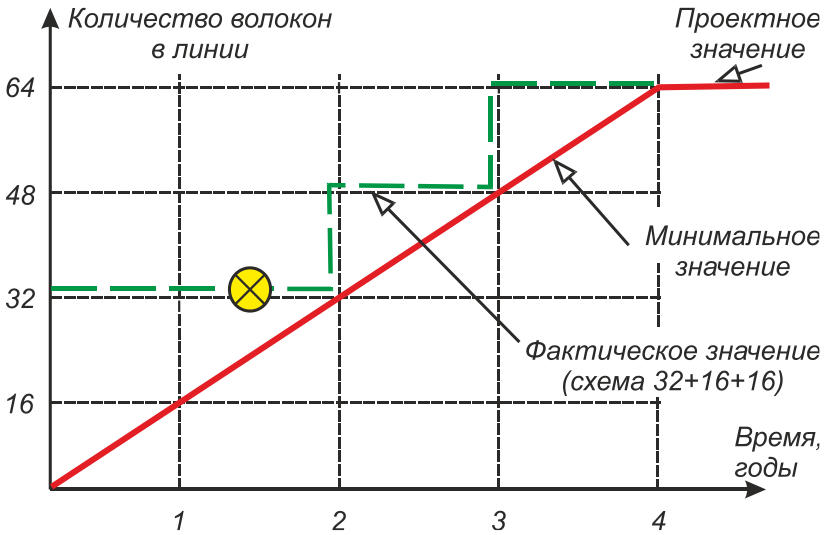
Существующие оптические полки с конструктивной плотностью 48 портов/1U не влияют на скорость морального устаревания СКС машинного зала.

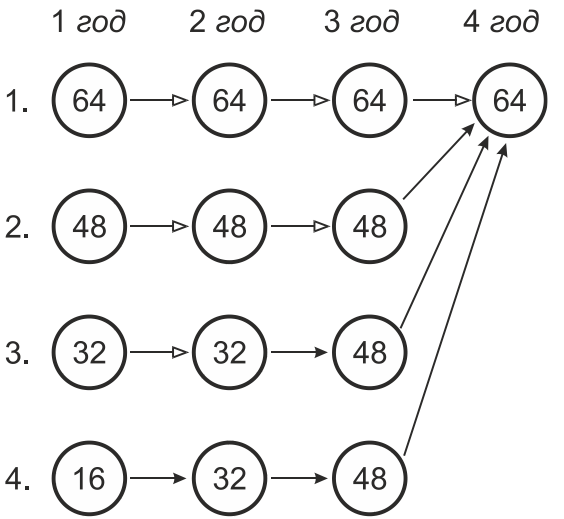
Схема эксплуатации “по потребности” СКС корпоративного ЦОДа

В процессе роста нагрузки на ЦОД и на кабельную систему, как его часть, количество волокон и транковых кабелей вместе с кассетами оптических кроссов наращивают организацией новых линий в плановом порядке так, чтобы общее количество цепей передачи или волокон удовлетворяло потребности сети на всем планируемом периоде эксплуатации ЦОДа. Иначе говоря, точка, отображающая количество волокон в типовой линии кабельной системы, в любой наперед заданный момент времени должна находиться не ниже прямой, задающей минимальное значение этого параметра в системе координат время – количество волокон.

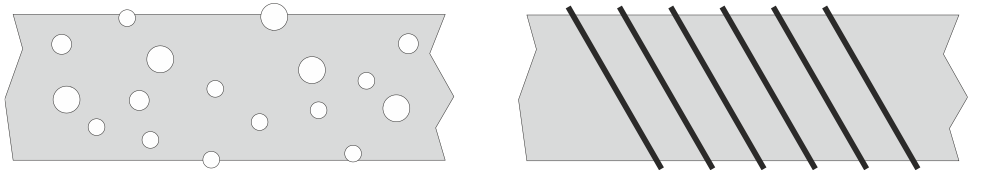
Можно показать, что прямая экономия капитальных затрат на СКС в случае обращения к стратегии “по потребности” с учетом т.н. дисконтирования (падение стоимости денег с течением времени) составляет примерно 3-5 %.

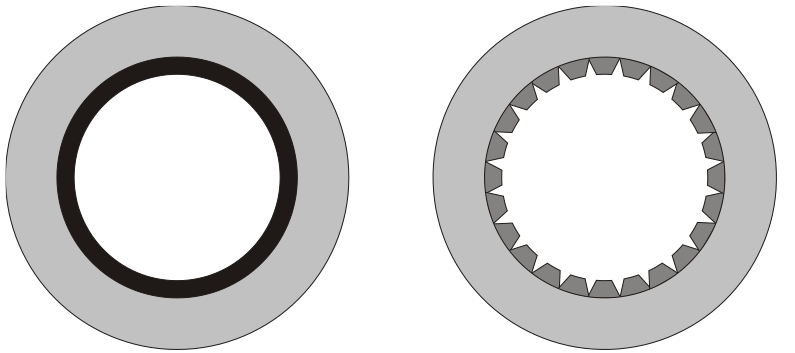
Необходимое условие реализации такой схемы – грамотное исполнение системы кабельных лотков.





Технология пневматической прокладки как средство реализации метода эксплуатации “по потребности”



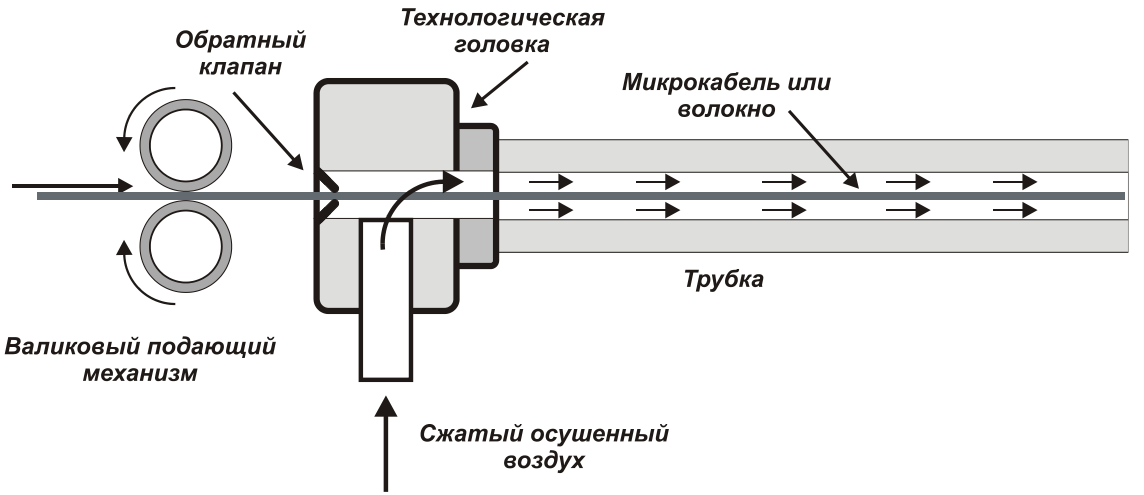


Суть метода пневматической прокладки заключается в том, что изначально прокладываются только т.н. трубчатые кабели, сердечник которых содержит одну или несколько полых трубок (трубчатый блок). В эти трубки по мере необходимости с помощью предварительно осушенного сжатого воздуха, азота или иного газа задуваются волоконные световоды в облегченных вторичных защитных покрытиях или микрокабели с несколькими волокнами.

Технология позволяет реализовать метод эксплуатации “по потребности” и распределить во времени довольно большие затраты на транковые кабели.

С технической точки зрения технология выгодна высокой скоростью прокладки волокна/микрокабелей (десятки метров в минуту) и простотой замены волокна одного типа на другое.

Несмотря на высказывание о распространении области действия метода на область ЦОДов, примеры использования метода в проектах неизвестны.



Резервирование как решение проблема устаревания СКС машинного зала ЦОДов



ЦОДы как объекты массового применения выполняют функцию опорных элементов современной информационной инфраструктуры и в этом качестве должны сохранять штатную работоспособность в режиме 24/7/365(366). Любая модернизация ЦОДа неизбежно по крайней мере на короткий период времени сокращает вычислительную производительность объекта и поэтому крайне нежелательна.

Соответственно, проект построения всего ЦОДа и отдельных по крайней мере основных его составных частей должен учитывать это обстоятельство. Данное положение в неявном виде зафиксировано в стандартах через требование резервирования в различных формах его исполнения. Наличие резервных ресурсов

- помогает нивелировать последствия внезапных отказов техники;
- позволяет частично выводить ее из эксплуатации для выполнения планового ремонта и ***модернизации***.

Фактически введение обоснованного резервирования на уровне СКС означает ее эффективную защиту от морального устаревания.

Техническая основа реализации этой возможности – применение техники ведущих производителей

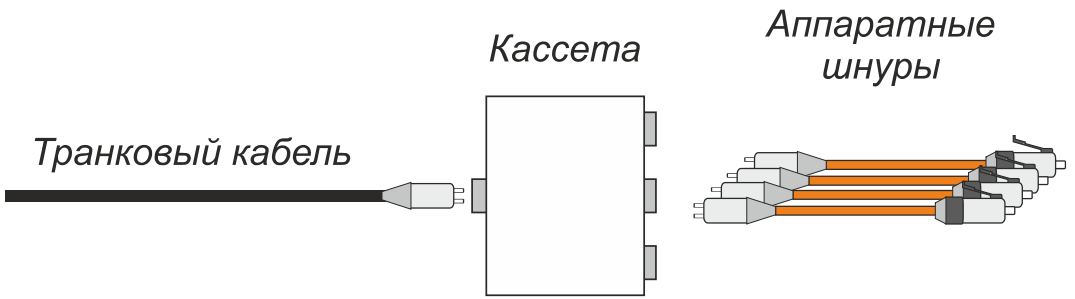
- с запасами по коэффициенту широкополосности у кабелей;
- низким уровнем потерь (порядка 0,16 – 0,17 дБ) в разъемных соединителях;
- наличие в составе штатной элементной базы оптических разъемов группы VSFF.

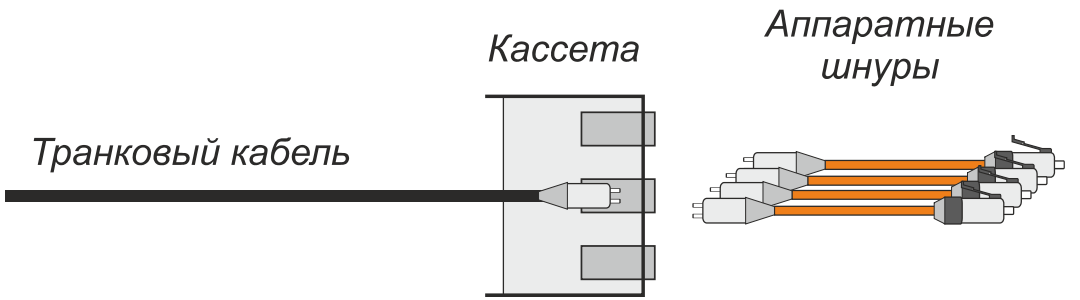
Новые типы разъемов как стимул реализации эксплуатации “по потребности” СКС

Разъемы группы VSFF (разработки Senko и US Conec) в случае модульно-кассетной семы построения СКС машинного зала позволяют легко адаптировать существующий транковый кабель к используемым схема передачи информации, причем зачастую даже без схемы кассеты.

В случае использования транковых кабелей с этими типами разъемов появляются перспективы двойного сокращения количества коннекторов в тракте, что позволяет радикально решить проблему малого энергетического потенциала сетевых интерфейсов.

Интересное следствие практического внедрения разъемов группы VSFF: при существующем уровне техники они позволяют реализовать только схему Base8. Таким образом, массовый интерес отрасли к ним можно интерпретировать как доказательство того, что начало массового освоения скоростного диапазона 3,2 Тбит/с откладывается по меньшей мере до 2035-40 года и отсутствия морального устаревания используемых в настоящее время решений.



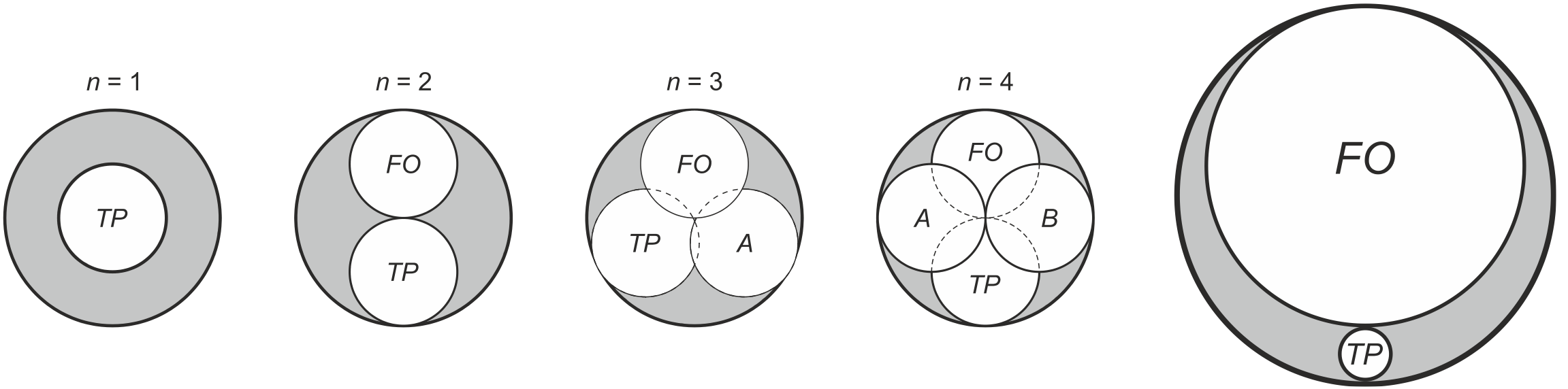


Модернизация через введение в состав СКС новых продуктов

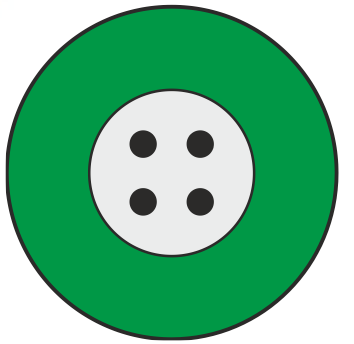
Под риском функционального устаревания будем понимать введение в состав СКС новых продуктов, наличие которых позволяет расширить перечень решаемых задач. Примеры таких продуктов

- построение физического уровня информационной инфраструктуры офиса по схеме PoLAN;
- введение в состав СКС решений класса “длинный Ethernet”;
- применение гибридных (комбинированных) кабелей и функционально законченного решения на их основе (популярны у ведущих западных вендоров) как средства построения физического уровня видеонаблюдения как типичной централизованной системы

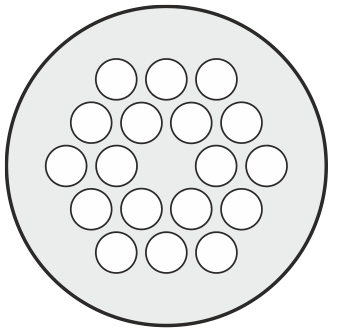
Данный подход вполне возможен в офисе, т.к. позволяет эффективно решить широкий класс задач через комбинацию оптических и медножильных решений, но не применим для СКС машинного зала ЦОД из-за доминирования в ней оптики (в этой СКС просто “нет места” для нового продукта, что демонстрирует эскиз).



Перспективы внедрения новых типов оптических волокон

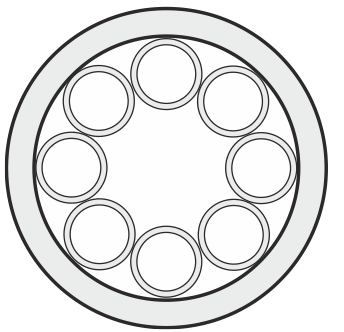


СКС в ЦОД может потребовать внедрения новых типов оптических волокон. Получение MCF-волокон стало возможным только после создания технологии внешнего парофазного осаждения. Впервые они получены в начале века японской компанией Sumitomo с использованием технологии Modified Chemical Vapor Deposition (MCVD) в процессе решения задачи доставки излучения накачки на волоконные лазеры и промежуточные оптические усилители, а уже затем были адаптированы для передачи информации. В настоящее время известны в многомодовом и одномодовом вариантах, причем последний следует рассматривать как более перспективный. Сказывается сравнительно небольшой эффективный диаметр модового поля (10 – 12 мкм у известных стандартных волокон), в результате чего обеспечение взаимной оптической изоляции отдельных сердцевин не доставляет серьезных проблем даже в случае отказа от формирования запирающих канавок в пользу наращивания расстояния между осями сердцевин).



Дают значимый выигрыш по массогабаритным показателям линейных кабелей.

В открытой коммерческой продаже появились первые образцы кабелей с многосердцевинными волокнами и аксессуары для работы с ними, в частности, разветвители.



Микроструктурированные, фотонно-кристаллические или дырчатые световоды (англ. hollow fiber) или HCF-волокна конструктивно отличаются тем, что свет распространяется в них преимущественно в газообразной среде. Это минимизирует дисперсию, существенно сдвигает в сторону больших мощностей нелинейные эффекты и значимо примерно на 30% уменьшает задержку как параметр delay или latency (3,33 нс/м против 4,9 нс/м у стандартного одномодового волокна. Очень перспективны для GPU-кластеров.

Заключение

1. Правильно спроектированная и реализованная СКС не испытывает эффектов всех видов устаревания на протяжении нормативного срока эксплуатации даже с учетом модернизации.
2. Для панелей СКС в серверной стойке высотой 42U – 47U достаточно зарезервировать пять посадочных мест под 48-портовые розетки оптических разъемов.
3. Эффективным средством защиты СКС машинного зала ЦОД со 150 и более стойками от морального устаревания уже в настоящее время является ее реализация на кабелях высоких категорий: OM4 и даже OM5.
4. В оптической СКС машинного зала целесообразно использовать малогабаритные разъемы группы VSFF, в т.ч. как эффективное средство поддержки процессов адаптации и модернизации.
5. Эксплуатация СКС машинного зала как средства построения физического уровня информационной инфраструктуры может быть построения с привлечением схемы “по потребности”, что фактически означает возможность ее текущей модернизации с целью устранения одного из проявлений устаревания.
6. Однородность СКС машинного зала по среде передачи эффективно защищает ее от эффектов функционального устаревания.
7. В СКС для GPU-кластеров возможно применение новых типов волокон: многосердцевинных и дырчатых.

Спасибо за внимание!

