

Надежность: ВОЛС против ВЧ

По странному стечению обстоятельств, а скорее из-за увлеченности всем новым, две взаимодополняющие технологии построения систем связи в энергетике: оптическая и высокочастотная, постепенно входят в жесткую конфронтацию. То и дело слышатся высказывания, предрекающие ВЧ связи короткий всего 3-5 лет срок жизни. Ни разделение функциональных возможностей технологий, ни очевидные достоинства каждой из них при передаче требуемых объемов информации на заданные расстояния, ни стоимостные показатели, наконец, в расчет не принимаются.

Осталось только убедиться в более высокой надежности и безопасности передаваемой по ВОЛС-ВЛ информации, и можно забыть о столько лет верой и правдой служащей энергетике ВЧ связи...

О ВОЛС-ВЛ

Наиболее распространенной технологией прокладки оптических кабелей в большой энергетике считается подвеска OPGW (ОКГТ) кабелей, то есть замена обычных ГТ, тросами, содержащими в себе оптические волокна. Обусловлено это высокой надежностью ОКГТ по сравнению с другими видами ВОЛС-ВЛ, независимостью ОКГТ решений от класса напряжения ВЛ, а так же возможностью использования технологии в любых климатических зонах.

В среднем доля ОКГТ кабелей на ВОЛС-ВЛ составляет 70...75% и продолжает расти, доля ОКСН кабелей равна 15...20% (снижается), ОКН кабелей - около 10%. Остальные четыре вида прокладки ВОЛС-ВЛ по тем или иным причинам используются редко. При строительстве новых ВЛ доля ОКГТ превышает 80%. Ограничивает применение ОКГТ дороговизна установки, увеличение нагрузок на опоры, и необходимость отключения ВЛ на время прокладки и монтажа. При реконструкции существующих ВЛ доля ОКГТ не превышает 45%.

Инсталляции ВОЛС-ВЛ ОКГТ имеют наибольшую стоимость, требуют применения сложного технологического оборудования для подвески и монтажа, и значительных затрат на проектирование. В Таблице 1 показаны относительные стоимости (в условных единицах за километр) прокладки ВОЛС-ВЛ, при использовании качественных комплектующих, том или ином составе работ и тщательности их выполнения.

Таблица 1

Работа	ОКГТ				ОКСН				ОКН			
	Макс.	Сред	Сред	Мин.	Макс.	Сред	Сред	Мин.	Макс.	Сред	Сред	Мин.
ОК с 24 ОВ	5,4	5,4	5,4	5,4	4,8	4,8	4,8	4,8	4,8	4,8	4,8	4,8
Принадлежности	1,14	1,14	0,91	0,91	1,14	1,14	0,91	0,91	1,14	1,02	0,80	0,80
Обследование	2,84	1,42	1,42		2,27	1,14	1,14		1,71	0,85	0,85	
Дизайн, ТУ и ТТ	0,57	0,28	0,28		0,57	0,28	0,28		0,57	0,28	0,28	
Проектирование	2,27	2,27	1,42	1,42	2,27	2,27	1,42	1,42	2,27	1,14	0,57	0,57
Надзор	1,14	1,14	0,57	0,57	1,14	1,14	0,57	0,57	0,57	0,57	0,40	0,40
Подвеска	5,68	3,41	2,84	2,84	4,55	2,84	2,56	2,56	2,84	1,71	1,71	1,71
Монтаж и тестирование	1,14	1,14	0,85	0,85	1,14	1,14	0,85	0,85	1,71	1,71	0,85	0,85
Всего	20,18	16,20	13,70	11,99	17,91	14,78	12,56	11,14	15,63	12,11	10,29	9,15

Структура затрат, приведенная в таблице, отличается от традиционно используемой при сравнении стоимостей ВОЛС-ВЛ и ВЧ связи. Почему стандартные методики не точны, и что скрывается за каждой позицией описано в работах [1 ... 4]. В общем случае структуру затрат по созданию ВОЛС-ВЛ необходимо дополнить следующими, в каждом случае индивидуально вычисляемыми, позициями:

Эксплуатация	бюджет будущей эксплуатации ВОЛС-ВЛ, включающий услуги сторонних организаций + материалы, либо создание собственных структур по эксплуатации. Причем, помимо авторского надзора проектировщика, надзор за строительством ВОЛС-ВЛ должна выполнять именно та организация, которая впоследствии будет ее эксплуатировать
Планирование	составление графика работ, расходы на отключение линии, исходя из скорости строительства 8 ... 10 км ВОЛС-ВЛ в неделю ¹ , землеотвод, потрав посевов и т.д.
Обучение	обучение собственных и привлекаемых специалистов. Только профессионалы, оснащенные новыми знаниями и техникой, при соответствующей организации работ, способны гарантировать качество проекта. Увеличение стоимости строительства впоследствии окупится снижением затрат на эксплуатацию. Ошибки строительства, особенно скрытые, проявляющиеся не сразу (штрафные санкции здесь не помогут), требуют большого времени и усилий на устранение, и, что совершенно недопустимо, длительной остановки связи.
Оборудование	Система тактовой синхронизации. Система управления

Очевидно, что стоимость ошибки при оценке надежности проектируемой системы ВОЛС-ВЛ очень высока, и многократно превышает стоимость ошибки в ВЧ связи.

Безусловно, построить ВОЛС-ВЛ можно и в полтора, и в два раза дешевле². Но почти наверняка такая система не будет удовлетворять требованиям по качеству, долговечности (срок службы не менее 25 лет) и масштабируемости. ВОЛС-ВЛ должна выдерживать как минимум 1 ... 2 модернизации или реконструкции (из-за удвоения передаваемой информации каждые 18 месяцев, или в 65000 раз за 25 лет по сравнению с нагрузкой на момент запуска ВОЛС).

Нормативным документом, определяющим общие технические требования к ВОЛС и ВОЛС-ВЛ на этапе проектирования, строительства и их эксплуатации, являются Правила [5].

Расчеты надежности ВОЛС и ВОЛС-ВЛ основаны на обширных статистических данных о повреждаемости ОК, РК и сигнальных кабелей, уложенных в грунт, а так же обрывах ГТ на ВЛ всех классов напряжений. Оценки средней плотности отказов подземных кабелей колеблются в пределах от 0,19 до 0,35 на 100 км, в зависимости от того, учитываются при подсчете повреждения от природных явлений и влияния ВЛ электрифицированных ЖД, или нет.

В случае ВОЛС-ВЛ типа ОКГТ используемые оценки плотности отказов не менее широки: от 0,03 до 0,25 на 100 км, в зависимости от того, что необходимо доказать. Например, в Правилах [5] используются значения 0,03 ... 0,08 из чего делается вывод о том, что ВОЛС-ВЛ, подвешенные на ВЛ напряжением 110 кВ и выше, по параметрам надежности полностью соответствуют перспективной цифровой сети связи.

Исходными постулатами такого подхода являются допущения:

П.4.1. ВОЛС-ВЛ состоит из ОК на опорах ВЛ и обслуживаемых оконечных и промежуточных станций, содержащих комплексы аппаратуры для восстановления и регенерации передаваемых информационных сигналов. Вероятность отказа современной аппаратуры низка, ремонтпригодность гарантирована изготовителем и время восстановления незначительно. Поэтому надежность ВОЛС определяется надежностью ОК и опор ВЛ.

¹ Скорость строительства ВОЛС в городской черте оценивается по разному. Для подземной прокладки приводится цифра 60 метров в неделю, для укладки в канализацию 2 км в день. А с учетом всех обстоятельств и способов прокладки рекомендуют использовать значение 2 км в неделю [8].

² В [7] указывается, что стоимость СМР обычно составляет (100 ... 110) % от стоимости ОК.

П4.4. В начальный период использования ВОЛС-ВЛ, до 2010 года, пока не получены надежные эксплуатационные показатели надежности ОК, следует принимать во внимание экстраполированные показатели надежности ОК, приравнивая их соответствующим эксплуатационным показателям надежности подвески стальных³ грозозащитных тросов.

Плотность отказов грозозащитных тросов в результате обрывов и падения опор на 100 км ВЛ в год приведена в табл. П.4.1.

Напряжение ВЛ, кВ	Плотность отказов, m_g
110	0,08
220	0,05
330	0,04
500	0,03

П4.5. Среднее время восстановления ОК на ВЛ 110 кВ и выше принято равным 10 час.

В тоже время в документе [7] приводятся несколько иные данные:

В начальный период использования ВОЛП-ВЛ, до 2010 года, пока не получены надежные эксплуатационные показатели надежности ОКГТ, следует принимать во внимание экстраполированные показатели надежности ОКГТ, приравнивая их к соответствующим эксплуатационным показателям надежности грозозащитных тросов.

Плотность отказов грозозащитных тросов в результате обрывов на 100 км ВЛ в год приведена в таблице 5.9.

Таблица 5.9 - Плотность отказов грозозащитных тросов в результате обрывов

Напряжение ВЛ, кВ	Плотность отказов, m_g
110	0,22... 0,25
220	0,06 ... 0,09
330	0,05 ... 0,08
500	0,03 ... 0,06

Нормативное время восстановления на ВЛ напряжением 110 и 220 кВ составляет 12,4 часа, а на ВЛ-300 и ВЛ-500 - 6,2 часа.

В этих условиях интересно сравнить, приводимые в различных источниках, данные по интенсивностям отказов m_g (Таблица 2) и временам восстановления t_v .

Таблица 2

Источник	[5]		[7]		[9] ⁴	
	m_g	t_v	m_g	t_v	m_s	t_v
110 кВ	0,08	10	0,22 ... 0,25	12,4	0,0085	13,8
220 кВ	0,05	10	0,06 ... 0,09	12,4	0,0085	13,8
330 кВ	0,04	10	0,05 ... 0,08	6,2	0,0085	13,8
500 кВ	0,03	10	0,03 ... 0,06	6,2	0,0085	13,8
Подземный кабель в трубе, колодце, шахте, лотке	0,196	7,25	0,34	7,25	0,213	8

³ Известно, что в большинстве случаев ОКГТ имеет внешний повив или полностью алюминиевый, то есть ОКГТ больше похож на провод марки АС, или смешанный сталь-алюминиевый.

⁴ В отчете компании ALF приведены усредненные данные о повреждаемости ОКГТ кабелей, не связанные с повреждаемостью ГТ, полученные на основе опыта эксплуатации 45000 км кабелей в течение 1986 ... 1998 годов на ВЛ всех классов напряжений. Для ОКСН кабелей $m=0,0081$.

Особое недоумение вызывает приведенное в [5] время восстановления ОКГТ, равное 10 часам (в том числе время подъезда 3.5 часа), которое используется для расчетов надежности ВОЛС-ВЛ и в этом документе и во многих других как действительное. На самом деле 10 часов – это расчетное время, необходимое для того, чтобы обеспечить коэффициент готовности ВОЛС-ВЛ длиной 13900 км равный 0,985 при наработке между отказами 670 часов, то есть цифра ничего общего с реальностью не имеющая. В принципе, то же касается и плотности отказов: для требуемого коэффициента готовности длиной ВЛ не менее 0.985, значение плотности отказов ВЛ 100 км не должно превышать 0,094 [10]. Именно поэтому в Правилах используются минимальные значения плотностей отказов ГТ.

В [7] под временем восстановления имеется в виду нормированное среднее время восстановления повреждений **фазовых** проводов, а не ОКГТ. Плотность повреждений фазных проводов для ВЛ 110 кВ составляет 0,17 ... 0,19, для ВЛ 220 кВ - 0,05 ... 0,07 и 500 кВ - 0,03 ... 0,05.

Величины, приведенные в [9], имеют практическое наполнение – это усредненные параметры по отказам и восстановлению ОКГТ за длительные сроки эксплуатации различных конструкций кабелей в разнообразных географических, климатических и техногенных условиях. Причем под временем восстановления имеется в виду усредненное время полного восстановления ВОЛС-ВЛ с учетом использования стратегии оптимального обслуживания. Восстановление по временной схеме занимает не более 2 часов. Плотности отказов специальных конструкций ОКГТ кабелей (самых дорогих) значительно отличаются от усредненных. Так ОКГТ «СкайЛайт» второго поколения имеет $m_s=0,02$ на 100 км.

Поскольку эти плотности отказов не связаны с повреждаемостью ГТ, то полный поток отказов ОКГТ должен вычисляться, как сумма повреждаемостей ГТ и ОК-ГТ

$$m = m_g + m_s$$

Основные параметры надежности ОКГТ длиной L (но не ВОЛС-ВЛ) можно определить по приведенным ниже формулам:

$$K_g = \frac{8766 - m * t_v}{8766} \quad K_{ng} = 1 - K_g \quad K_{gL} = \frac{8766 - m * t_v * \frac{L}{l}}{8766}$$

$$T_l = \frac{8766 - m * t_v}{m} = \frac{K_g * t_v}{1 - K_g} \quad T_L = \frac{8766 - m * t_v * \frac{L}{l}}{m}$$

Где K_g и K_{ng} коэффициенты готовности и неготовности некоторой референсной ВЛ, для которой приводятся плотность отказов и время восстановления
 l и L длина референсной (обычно 100 км) и реальной ВЛ
 K_{gL} коэффициент готовности реальной ВЛ
 T_l и T_L наработки на отказ референсной и реальной ВЛ

При использовании стратегии оптимального восстановления для определения K_{ng} можно использовать методику расчета [17] или упрощенное выражение

$$K_{ng.o} = \frac{(t_v - 0.7 * t_{trans})}{T_l + t_v}$$

где t_{trans} время подъезда.

Реально надежность ВОЛС-ВЛ ОКГТ определяется не только обрывами ГТ или собственными повреждениями оптического кабеля (ОК-ВЛ).

Прежде всего, при создании протяженных ВОЛС-ВЛ может возникнуть необходимость использования промежуточных оптических усилителей, регенераторов или мультиплексоров.

В [7] отдельно рассчитываются длины участков регенерации по широкополосности (L_B)

$$L_B = \frac{4.4 \cdot 10^5}{\sigma \cdot \Delta\lambda \cdot B} \quad L_{PMD} = \left(\frac{4.4 \cdot 10^5}{\sigma_{PMD} \cdot B} \right)^2 \quad L_{D} = \frac{10^{11}}{\sigma_D \cdot B^2}$$

σ_D и σ (пс/нм*км)	дисперсия и суммарная дисперсия SM оптического волокна
σ_{PMD} (пс/км ^{0.5})	поляризационно-модовая дисперсия SM оптического волокна
$\Delta\lambda$, (нм)	ширина спектра источника излучения
B (МГц)	широкополосность цифровых сигналов, передаваемых по оптическому тракту, с учетом перспективы развития и модернизации

и по затуханию (L_α), где

$$L_{\alpha \text{ макс}} < \frac{A_{\text{макс}} - M - n_{pc} \cdot \alpha_{pc}}{\alpha_{ок} + \alpha_{нс} / L_{стр} + \alpha_m \cdot n_m} \quad - \text{максимальная проектная длина участка регенерации}$$

$$L_{\alpha \text{ мин}} > \frac{A_{\text{мин}}}{\alpha_{ок} + \alpha_{нс} / L_{стр} + \alpha_m \cdot n_m} \quad - \text{минимальная проектная длина участка регенерации}$$

$L_{стр}$ (км)	среднее значение строительной длины кабеля на участке регенерации
$\alpha_{ок}$ (дБ/км)	километрическое затухание в оптическом волокне ОКГТ
$\alpha_{нс}$ (дБ)	среднее значение затухания на стыке между строительными длинами кабеля на участке регенерации
n_{pc}	число разъёмных оптических соединителей на участке регенерации, с учетом переходов через ПС и кроссового оборудования
α_{pc} (дБ)	затухание мощности оптического излучения разъёмного оптического соединителя
n_m	число оптических муфт на участке регенерации, с учетом переходов ВЛ-ВЛ и ВЛ-КЛ
α_m (дБ)	затухание мощности оптического излучения в муфте
$A_{\text{макс}}, A_{\text{мин}}$ (дБ)	максимальное и минимальное значения перекрываемого затухания аппаратуры ВОЛС, обеспечивающее к концу срока службы значение коэффициента ошибок не более 10^{-10}
M (дБ)	системный запас на участке регенерации 2 ... 6 дБ

Обязательным требованием является выполнение условия $L_{B, PMD, D} > L_{\alpha \text{ макс}}$. Если же $L_{B, PMD, D} < L_{\alpha \text{ макс}}$, то необходимо либо применять другое ОКГТ, либо снижать скорость передачи, либо использовать другое оптическое оборудование. В крайнем случае, можно перейти на

системы спектрального уплотнения WDM и другие. Современные дорогие мультиплексоры могут обеспечить участки регенерации от 130 до 180 км.

Если длина участка регенерации меньше требуемой длины ВОЛС-ВЛ, то необходимо использовать оптический усилитель или регенератор. Так же можно выполнить заход на промежуточную ПС, установив на ней мультиплексор. При использовании усилителей должно выполняться условие: оптическое ОСШ не может быть меньше 13 дБ [18].

Результирующий коэффициент готовности оптического ОК-ВЛ тракта составит

$$K_{g.okgt} = K_{g(L-L_{GW})} * K_{g.L_{GW}} * K_{g.pc}^{n_{pc}} * K_{g.m}^{n_m} * K_{g.reg}^{n_{reg}} * K_{g.mux}^{n_{mux}} * A_{sys}, \text{ или более точно}$$

$$K_{g.okgt} = 1 - \left(K_{ng(L-L_{GW})} + K_{ng.L_{GW}} + n_{pc} * K_{ng.pc} + n_m * K_{ng.m} + n_{reg} * K_{ng.reg} + n_{mux} * K_{ng.mux} + (1 - A_{sys}) \right)$$

, где n_{reg} , n_{mux} — число оптических регенераторов / усилителей и мультиплексоров соответственно

A_{sys} — понижающий коэффициент готовности от влияния внешних факторов, по которым отсутствует статистика отказов [14]

L_{GW} , $L - L_{GW}$ — длина участка ВОЛС с подземным кабелем и ОКГТ соответственно

Коэффициент готовности ВОЛС-ВЛ (с учетом оконечного оборудования)

$$K_{g.VOLS-VL} = K_{g.okgt} * K_{g.mux}^2$$

По данным [9] при повреждении ОКГТ грозowymi разрядами или в результате попаданий пулями /дробью часты случаи повреждения отдельных волокон ОК, при сохранении его работоспособности в целом. Поэтому возможно выполнения резервирования по волокнам одного и того же ОК. Коэффициент готовности сетевого тракта n_t -го порядка определяется как:

$$K_{ng.t} = 1 - (1 - K_{ng})^{n_t} \approx K_{ng}^{n_t}, \text{ при большом } n_t$$

При резервировании по схеме $n_w + n_r$ из n_t одинаково надежных волокон (ОВ одного ОК):

$$K_{ng.wr} = \frac{(n_w + n_r)}{n_w! (n_r + 1)!} * K_{ng}^{(n_r + 1)} + \frac{n_w}{n_w + n_r} * \frac{1}{(n_w + n_r) + \frac{T_L}{T_{wr}}}$$

где n_w и n_r — число рабочих и резервных волокон

T_{wr} — наработка на отказ устройства переключения на резерв

При резервировании по схеме n_w из n_t одинаково надежных волокон (параллельное соединение ОВ одного ОК):

$$K_{ng.wt} = \sum_{n_w}^{n_t} \left(\frac{n_t!}{n_w! (n_t - n_w)!} * K_g^{n_w} * K_{ng}^{n_t - n_w} \right)$$

При полном резервировании ОК-ВЛ тракта, в том числе по кольцевой схеме, когда $n_w = n_r = 1$, в общем виде получим

$$K_{okgt.res} = 1 - (1 - K_{g.okgt.1}) * (1 - K_{g.okgt.2}) * \dots$$

Обобщенный коэффициент готовности ВОЛС-ВЛ (с учетом оконечного оборудования)

$$K_{g.VOLS-VL.res} = K_{g.okgt.res} * K_{g.mux.res}^2$$

Что выбрать?

Рассмотрим реальный проект. Между двумя ПС А и В необходимо организовать каналы передачи технологической информации и РЗА для защиты ВЛ 500 кВ (Рисунок 1). Решить задачу можно четырьмя способами. Создадим:

1. ВЧ тракта по ВЛ 500 кВ
2. ВОЛС-ВЛ ОКГТ тракта по ВЛ 500 кВ
3. ВОЛС-ВЛ ОКГТ тракта по ВЛ 220 кВ
4. ВОЛС-КЛ тракта по КЛ

Тракт	Состав	K_g
ВЧ 500 кВ	2*(ПК+ФП+КС+ВЧ3)+ВЛ500/53	$(K_{g.RK} * K_{g.FP} * K_{g.KC} * K_{g.LT})^2 * K_{g.500_53}$
ВОЛС-ВЛ ОКГТ 500 кВ	2Кр+500/53	$K_{g.pc}^2 * K_{g.VL500_53}$
ВОЛС-ВЛ ОКГТ 220 кВ	2Кр+220/5.6+Муф+Кл/16+Мукс+Кл/16+Муф+220/5.5+Мукс+220/17.6+Кр+220/26.3+Кр+220/22.6	$K_{g.pc}^4 * K_{g.m}^2 * K_{g.mux}^2 * K_{g.GW_32} * K_{g.VL220_77.6}$
ВОЛС-КЛ	2Кр+Кл/26.8+Мукс+Кл/9.4+Мукс+Кл/11+Кр+Кл/7+Кр+Кл/4+Кр+Кл/12.2+Мукс+220/28	$K_{g.pc}^5 * K_{g.mux}^3 * K_{g.GW_70.4} * K_{g.VL220_28}$

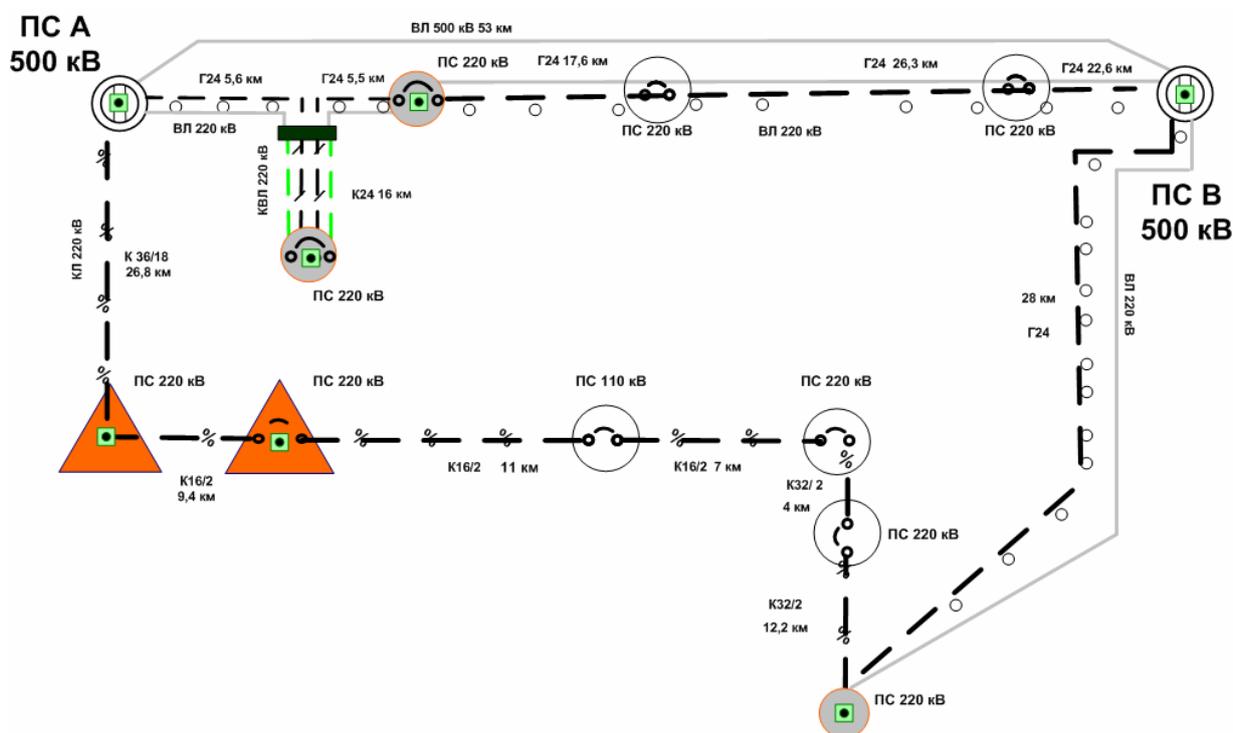


Рисунок 1. Схема прохождения ВЛ и КЛ

Коэффициент готовности ВЧ тракта можно рассчитать на основании данных, приведенных в [16], и данным компаний ОАО «Энергосетьпроект» (1) и ООО «АББ Энергосвязь» (2).

Элемент	K_{ngo} [16]	K_{ngo} (2)	K_{go}	K_{go} (2)
РК кабель	0,0000240		0,999976	
ФП	0,0001230	0,00001825	0,999877	0,99998175

КС	0,0000038		0,9999962	
ВЧЗ	0,0002900	0,00001342	0,99971	0,99998658

Элемент	K _{нг} [16]	K _{нг} (1)			K _г	K _г (1)
		m	t _v	K _{нг} (1)		
ВЛ 110 кВ	0,000120	0,17	12,4	0,00024	0,99988	0,99976
ВЛ 220 кВ	0,000098	0,07	12,4	0,00099	0,999902	0,999901
ВЛ 330 кВ	0,000098	0,05	6,2	0,000035	0,999902	0,999965
ВЛ 500 кВ	0,000073	0,03	6,2	0,000021	0,999927	0,999979

При длине РК кабеля 1000 м получаем четыре варианта построения ВЧ тракта

ВЧ тракт K _{г.ВЧ500}	I	II	III	IV
	K _{го} * K _г	K _{го} * K _{г(1)}	K _{го(2)} * K _г	K _{го(2)} * K _{г(1)}
ВЛ 110 кВ	0,9989988	0,998878426	0,9997611	0,99964062
ВЛ 220 кВ	0,9990208	0,999019757	0,9997831	0,999782059
ВЛ 330 кВ	0,9990208	0,999083356	0,9997831	0,999845706
ВЛ 500 кВ	0,9990458	0,999097489	0,9998081	0,999859850

Коэффициент готовности ОКГТ 500 кВ тракта вычисляется по формуле

$K_{г.о500} = K_{г.рc}^2 * K_{г.VL500_53} = K_{г.рc}^2 * K_{г.VL500}^{\frac{53}{100}}$, где компонент $K_{г.рc}^2$ введен с учетом того, что каждый оптический тракт начинается и оканчивается кроссовым оборудованием.

Если воспользоваться данными из [5, 6, 7, 14] $K_{г.рc} = 0,995 \dots 0,999$, $m_{500} = 0,03$ и $t_{v500} = 6,2 \dots 10$ часов, получим ($x_{min} * y_{min}; x_{max} * y_{min}; x_{min} * y_{max}; x_{max} * y_{max}$)

$K_{г.о500} = (0,99 \dots 0,998) * (0,999977 \dots 0,999986)$	0,990002	0,997978	0,990011	0,997987
---	----------	----------	----------	----------

Для расчета третьего и четвертого вариантов из [5, 6, 7, 14] примем $K_{г.рc} = K_{г.м} = 0,995 \dots 0,999$, $K_{г.мux} = 0,995$, $m_{220} = 0,07$ и $t_{v220} = 10 \dots 12,4$ часов, $m_{GW} = 0,213$ и $t_{vGW} = 8$ часов, получим

$K_{г.о220} = (0,97 \dots 0,994) * 0,99 * 0,99994 * (0,999914 \dots 0,999931)$	0,960551	0,983954	0,960567	0,98397
$K_{г.оGW} = (0,975 \dots 0,995) * 0,985 * 0,99986 * (0,999969 \dots 0,999975)$	0,960532	0,979995	0,960537	0,980001

При взаимном резервировании первого-первого, первого и третьего, первого и четвертого, третьего и четвертого вариантов получим

$K_{г.ВЧ500} \parallel K_{г.ВЧ500}$	0,9999991	0,99999987	0,99999987	0,99999998
$K_{г.ВЧ500} \parallel K_{г.о220}$	0,9999624	0,99999447	0,9999847	0,99999775
$K_{г.ВЧ500} \parallel K_{г.оGW}$	0,9999623	0,99999447	0,9999809	0,9999972
$K_{г.о220} \parallel K_{г.оGW}$	0,99844303	0,99936733	0,99921106	0,99967942

То есть надежности отдельно взятых оптических трактов значительно ниже надежности ВЧ тракта. Надежность резервированного ОКГТ тракта выше надежности не резервируемого ВЧ тракта, полностью выполненного на российской ВЧ обработке, но ниже надежности не резервируемого ВЧ тракта, выполненного с использованием ФП и ВЧЗ хорошего качества. Любые варианты резервирования с участием ВЧ трактов более надежны, чем отдельно взятые или резервируемые оптические тракты.

Реальная ситуация может быть еще хуже, так как при расчетах не учитывался системный коэффициент ухудшения параметров оптического тракта. Наиболее очевидная его смысловая нагрузка – это вероятность ошибки при конфигурировании / работах на

промежуточных мультиплексорах. По данным [15] ошибки из-за человеческого фактора превышают 50% общего числа происходящих в энергетике отказов.

Если исходить из того, какими должны быть свойства современных оптических и опто-электронных компонентов $K_{g,pc} = 0,9995 \dots 0,9999$, $m_{500} = 0,03$ и $t_{v500} = 6,2 \dots 10$ часов, получим

$K_{g,o500} = (0,999 \dots 0,9998) * (0,999977 \dots 0,999986)$	0,998977	0,999777	0,998986	0,999786
---	----------	----------	----------	----------

Для расчета третьего и четвертого вариантов примем $K_{g,pc} = K_{g,m} = 0,9995 \dots 0,9999$, $K_{g,mux} = 0,99995$, $m_{220} = 0,07$ и $t_{v220} = 10 \dots 12,4$ часов, $m_{GW} = 0,213$ и $t_{vGW} = 8$ часов, и получим

$K_{g,o220} = (0,997 \dots 0,9994) * 0,9999 * 0,99994 * (0,999914 \dots 0,999931)$	0,996756	0,999152	0,996773	0,999169
$K_{g,oGW} = (0,9975 \dots 0,9995) * 0,99985 * 0,99986 * (0,999969 \dots 0,999975)$	0,997185	0,999182	0,997191	0,999188

При взаимном резервировании первого-первого, первого и третьего, первого и четвертого, третьего и четвертого вариантов коэффициенты готовности составят

$K_{g,VC500} \parallel K_{g,VC500}$	0,99999909	0,99999987	0,99999987	0,99999998
$K_{g,VC500} \parallel K_{g,o220}$	0,99999690	0,99999955	0,99999921	0,99999988
$K_{g,VC500} \parallel K_{g,oGW}$	0,99999731	0,99999961	0,99999923	0,99999989
$K_{g,o220} \parallel K_{g,oGW}$	0,99999087	0,99999737	0,99999766	0,99999933

То есть надежности отдельно взятых оптических трактов по-прежнему ниже надежности не резервируемого ВЧ тракта. Однако надежность резервированного ОКГТ тракта значительно выше надежности не резервируемого ВЧ тракта. Любые варианты резервирования с участием ВЧ трактов более надежны, чем отдельно взятые или резервируемые оптические тракты.

Здесь так же как и в первом случае ситуация может значительно ухудшиться из-за ошибок обслуживающего персонала или администраторов сети.

Несомненным является следующий факт: за редким исключением ВОЛС-ВЛ тракт является сложным и составным. ВЧ тракт – простым. Соответственно уровень ошибок в ВЧ системе всегда будет ниже, чем в оптической. Это может оказаться решающим аргументом при выборе системы связи для построения каналов передачи технологической информации и РЗА.

С другой стороны ВЧ каналы никогда не смогут обеспечить передачу таких объемов информации, как ВОЛС-ВЛ системы. Информации так же необходимой для функционирования энергосистем.

Кажущееся противоречие легко разрешимо, если следовать простым правилам

- При создании основных каналов передачи технологической информации, особенно каналов РЗА, в первую очередь необходимо рассматривать использование прямых простых ВЧ каналов, имеющих наивысшую надежность
- Если на ВЛ существует прямой или составной ВОЛС-ВЛ тракт, имеющий не более 1-2 промежуточных мультиплексоров, его можно использовать, как основной. Резервный канал обязательно должен быть ВЧ. Создание для целей резервирования специализированного ВОЛС-ВЛ тракта, включая создание / замыкание «кольца», ни экономически, ни с точки зрения надежности для целей РЗА не оправдано

- Если на территории энергосистемы создается кольцевая или многокольцевая ВОЛС-ВЛ система передачи информации, ее необходимо «просечь ребрами жесткости» основных технологических ВЧ каналов. ВОЛС-ВЛ ресурс должен использоваться как второй и третий уровни резервирования.
- Если использование ВЧ связи по каким-либо причинам не возможно, то для обеспечения совместимой надежности должно выполняться тройное или четверное резервирование ВОЛС-ВЛ систем

Это не так просто

Приведенные правила отнюдь не являются слишком жесткими. Скорее это даже реверанс в сторону ВОЛС-ВЛ технологии. Поскольку реализация многих параметров используемых при расчете надежности ВОЛС-ВЛ трактов требует осуществления сложных административных и организационно-технических мероприятий.

Коэффициент готовности любой системы зависит от двух факторов: надежности компонентов и времени, требуемого для их обслуживания или восстановления. И если вопрос надежности компонентов в общем случае легко решается за счет использования аппаратуры или системных решений известных с большим опытом установок компаний (иными словами: чисто финансово). То вопрос уменьшения времени восстановления не так однозначен.

Существующие нормы на время восстановления необслуживаемых объектов составляют $T_{в.нрп} < 2,5$ час (в том числе время подъезда 2 часа); обслуживаемых объектов - $T_{в.орп} < 0,5$ час или даже 10 минут [10]; время восстановления ОК - $T_{в.ок} < 10$ час (в том числе время подъезда 3,5 часа), срок службы аппаратуры – не менее 20 лет. Они не включают в себя время обнаружения аварии, отыскание причин возникновения аварии, доставку запасных частей, получение допуска на проведение работ, разборку рабочих схем, после восстановительное тестирование, сборку схем, введение в работу.

По методикам расчета надежности компании EventHelix (Таблица 3) ожидаемое время восстановления MTTR, прежде всего, зависит от того, где расположен комплект ЗИП, и есть ли на объекте квалифицированный допущенный персонал.

Таблица 3

Местоположение ЗИП	Тип обслуживания ПС	Ожидаемое MTTR
100% ЗИП на ПС	24 часовое наличие квалифицированного, обученного, со всеми правами допуска и доступа персонала	30 минут
100% ЗИП на ПС	Квалифицированный, со всеми правами допуска и доступа персонал находится в шаговой доступности 24 часа в день	2 часа
100% ЗИП на ПС	Регулярные часы работы 7 дней в неделю	14-18 часов
100% ЗИП на ПС	Регулярные часы работы только в рабочие дни	3 дня
ЗИП отсутствует. Доставляется курьерской службой.	Персонал прибывает после обнаружения дефекта или вместе с ЗИП	1 неделя
ЗИП отсутствует. Доставляется почтой или другим способом	Персонал работает в сторонней организации. Требуется получение всех допусков	2 недели

Учитывая существующее в современной энергетике положение вещей с запчастями и отсутствием на объектах квалифицированного в этой области персонала, ожидаемое время восстановления не может быть менее 3 ... 7 дней.

Даже если принять время обнаружения аварии равным нулю (реально оно может быть и 8 часов, и 24 часа, и более), отыскание причин возникновения аварии может занять продолжительное время, которое напрямую зависит от квалификации персонала, обслуживающего объект. А если мы говорим о сложных составных трактах, то это время вряд ли может быть меньше 2 ... 12 часов. К тому же, если объект не обслуживаемый, то к этому времени необходимо добавить время прибытия на место возникновения аварии.

Получение допуска на проведение работ – 4 ... 8 часов, разборка рабочих схем – 0,5 ... 2 часа, после восстановительное тестирование – 2 ... 24 часа, сборка схем – 0,5 ... 2 часа, введение в работу / опробование – 1 час.

Существенно улучшить ситуацию может использование техники обладающей встроенными системами диагностики с большой глубиной детализации, и удаленным мониторингом событий, а не состояний. Тогда при возникновении аварии не важно где: на местном или на удаленном объекте, или в тракте, обслуживаемому персоналу с минимальной задержкой (10-15 минут) поступит информация о возникновении, типе и месте аварии, причине возникновения аварии, указании техники, блоков или узлов, вызвавших аварийную ситуацию; рекомендации по сохранению работоспособности системы, варианты быстрее устранения аварийной ситуации, или оптимального перехода на резервный маршрут (это может быть выполнено автоматически), и т.д. В этом случае, даже если на объекте отсутствует 100% ЗИП, время его доставки минимизируется.

Здесь будет уместно упомянуть о двух специфических особенностях современной цифровой техники:

- К ней не применима стратегия оптимального восстановления, поскольку просто отсутствуют параметры наблюдения (такие, как затухание в волокне или ВЧ тракте). Поэтому не смотря на встроенные системы диагностики, и способность цифровых систем самостоятельно устранять некоторые виды аварий, их выход из строя характеризуется понятием «внезапной смерти». В этих условиях единственной возможностью сокращения времени восстановления является быстрая локализация факторов возникновения аварии, и автоматизация процессов переключения на резервные пути передачи
- Термин наработка на отказ МТBF может применяться только к устройству в целом. К отдельным модулям должен применяться термин наработка до отказа - МТTF. Принципиальное отличие состоит в том, что понятие МТBF применимо только к ремонтнопригодным изделиям, и в случае аварии устройства его восстановление заключается в простой замене дефектных модулей. Однако сами модули не являются ремонтнопригодными (по крайней мере, в условиях эксплуатации), и их выход из строя означает для эксплуатации полную и окончательную потерю.

Время прибытия на место аварии зависит от двух факторов: местоположения объекта, и расположения ремонтных бригад / технического персонала. В зарубежной литературе, посвященной обслуживанию ВОЛС-ВЛ систем, рекомендуется обеспечить асфальтированный подъезд к каждой опоре ВЛ, входящей в трассу ОКГТ/ОКСН. Для ВОЛС-ВЛ, проходящих вдоль автомобильных или железных дорог, это не проблема. Хотя даже здесь могут быть трудности. При средней скорости автомобильного транспорта за городом 50 ... 60 км/час пункты расположения ремонтных бригад не могут находиться дальше 100 ... 150 км от места аварии. А вот в городе, где средняя скорость не превышает 10 ... 20 км/час,

а в час-пик может быть и того меньше, обеспечить время прибытия ремонтников 2 .. 3 часа проблематично. Тем более, что в этот норматив входит время на сборки (например, в любое время суток оформление нарядов и получение запчастей или оборудования на складе).

Несложный анализ показывает, что реальное время восстановления, которое необходимо учитывать при расчетах надежности, составляет 24 ... 72 часа или больше.

При оценке готовности системы так же необходимо учитывать время на проведение профилактических работ и плановое обслуживание. Если тракт или систему раз в год необходимо выводить в обслуживание на 8 часов, то у них в принципе не может быть коэффициент готовности выше 0,999.

Из Рисунок 2 видно, что для того, чтобы обеспечить коэффициент неготовности (простоя) равный 0,0005 (или $K_g=0.9995$), наработка на отказ устройства или системы не может быть меньше 5 лет, а в более общем случае – меньше 20 ... 70 лет.

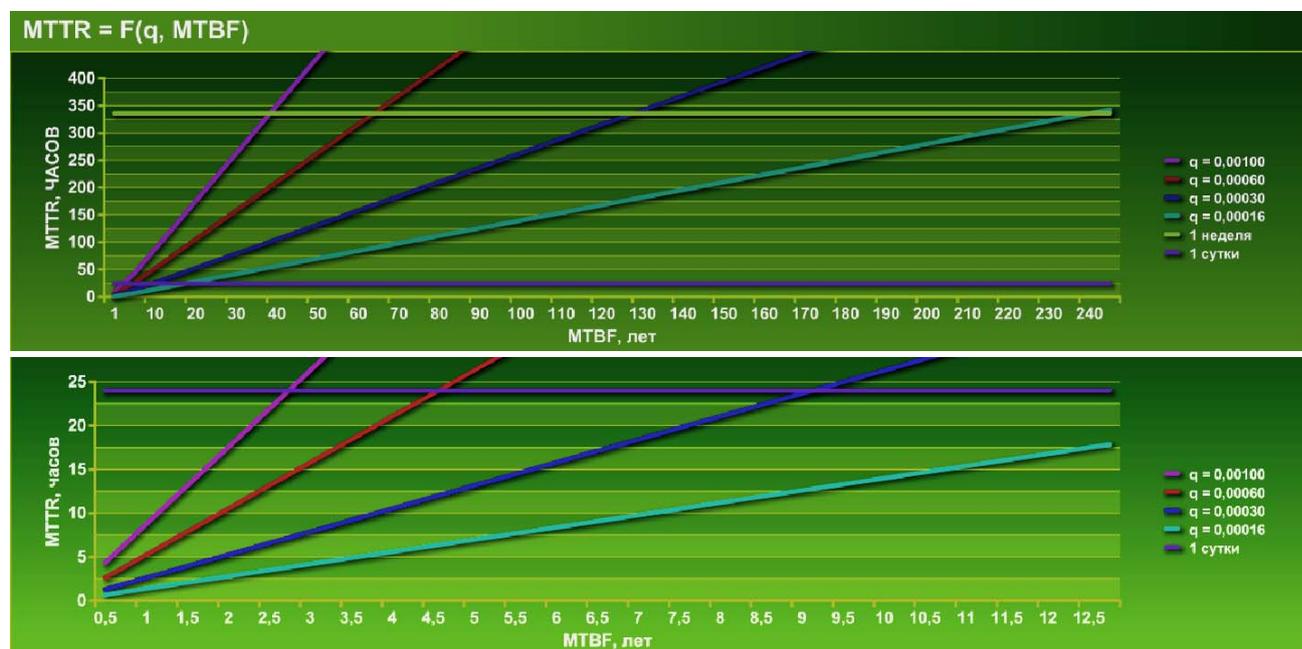


Рисунок 2. Зависимость максимального времени восстановления от наработки на отказ, и требуемого коэффициента готовности.

Для сложных составных трактов один только этот параметр (интервал обслуживания) может оказаться непреодолимым. Ведь за восемь или даже меньше часов необходимо проверить ВСЕ компоненты тракта, где бы они ни были расположены. При невозможности одновременной проверки, сроки обслуживания отдельных компонентов тракта должны быть строго согласованы, и быть существенно меньше по длительности.

С другой стороны, чтобы увеличить интервал обслуживания до 2 ... 4 лет (и повысить готовность системы), наработка на отказ узлов тракта должна составлять минимум 40 ... 80 лет (см. Рисунок 3) при соответственно 95% и 99% вероятности сохранения работоспособности системы⁵.

⁵ При времени эксплуатации равном наработке на отказ работоспособными остаются только 37% устройств.

Задача так же очень непростая. По данным компании «АББ Энергосвязь» свыше 70% отказов оборудования связано с его неправильной эксплуатацией. Из них более 67% составляют дефекты заземления и разводки кабелей, 12% - ошибки проектирования, и по 4% - ошибки персонала и системы питания. То есть достижение заданной готовности требует проведения на объектах, входящих в трассу канала, организационно-технических мероприятий непосредственно не связанных с проектом.

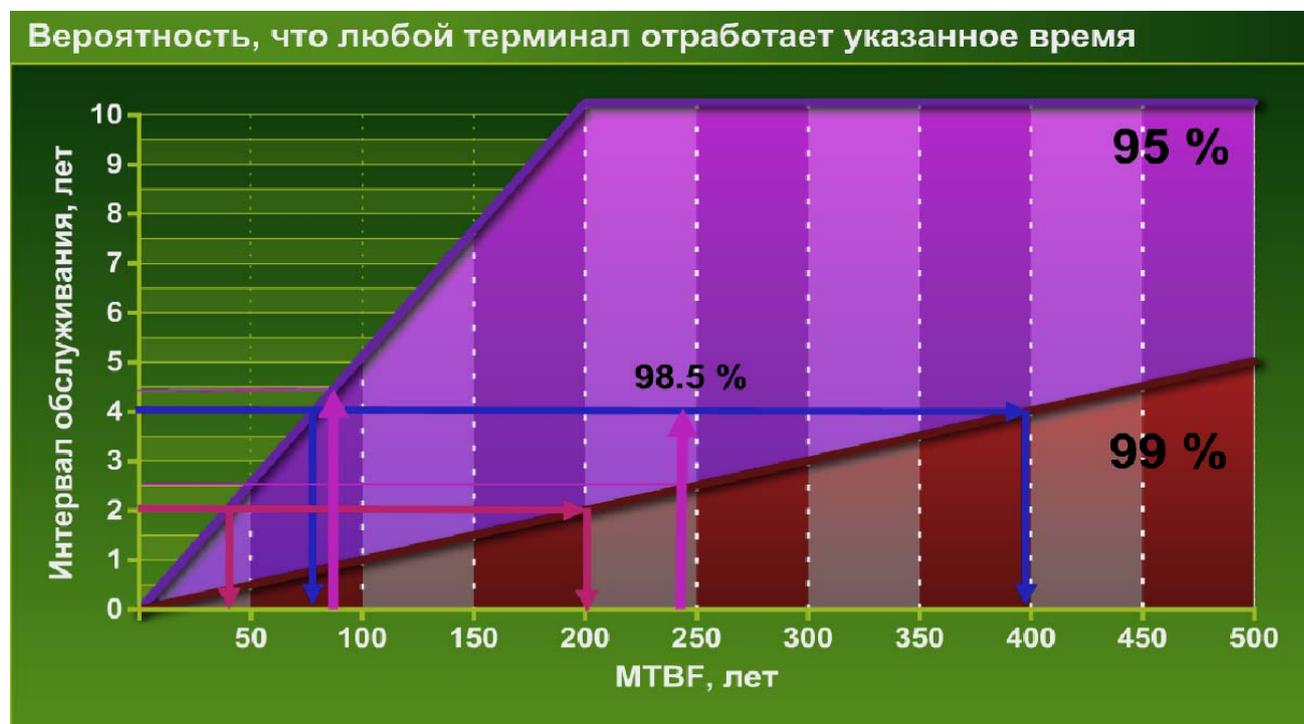


Рисунок 3. Рекомендуемый интервал обслуживания, как функция наработки на отказ и вероятности того, что устройство или система к этому времени будет полностью функционировать.

Вероятно, эти обстоятельства вынудили ЗАО «Компания Транстелеком» [14] для достижения заданной надежности своих оптических систем связи использовать для размещения аппаратуры защищенные служебные помещения, исключая влияние дополнительных внешних воздействий; а так же применить системы электропитания с четырехкратным резервированием (два независимых фидера питания, дизель-генератор и аккумуляторная батарея).

Более того, расчеты показали, что только при числе резервных путей более двух-трех можно достичь времени простоя менее 1.5 часа в год. При этом за основу были взяты мероприятия, позволившие достичь на Транссибирской ВОСП магистрали следующих параметров надежности: плотность отказов $m = 0.15$ на 100 км, $t_v = 7$ часов, $K_g = 0.99985$ (ниже требований [7] $K_g = 0.99989$), время простоя – 1.3 часа в год!

Высокая плотность отказов обусловлена прежде всего тем, что обрывы ГТ далеко не единственная причина повреждений ВЛ, способная вызвать повреждение ОКГТ (Таблица 4).

Таблица 4

Причины повреждений	Частота отказов, %
Перекрытие и разрушение изоляторов	57,0
Перекрытие с фазы на опору	3,8

Перекрытие с фазы на проезжающие механизмы	3,3
Обрыв грозозащитного троса	3,1
Падение фазы на землю	2,4
Набросы на фазу	1,8
Перекрытия на деревья	1,6
Прочие	27,0

В 2005 году ЗАО «Компания Транстелеком» опубликовала результаты пятилетней эксплуатации оптических систем в зоне центральной России [19]: 41600 км на опорах контактной сети и линий автоблокировки, 6760 км в полимерных трубопроводах, 3640 км – в грунте. Рассмотрим некоторые из них.

- Полученные параметры: коэффициент готовности в зоне МЖД $K_g = 0.9995$ на 100 км, время восстановления $t_v \leq 6$ часов, вероятность ошибки $\leq 10^{-9}$. Расчетная наработка на отказ – 1.37 года, плотность отказов – 0.7305.
- Наиболее весомые составляющие t_v : обнаружение и локализация отказа - 5.5%, подготовка транспортных средств, сбор и подготовка ремонтной бригады – 13.9%, ее доставка к месту аварии – 41.7%, время подготовки фронта работ – 13.9%, ремонт – 25%
- Зона эксплуатационно-технологического обслуживания (ЭТО) – 150 ... 200 км, линейного – 30 ... 50 км. Норма технологического обслуживания – 45 км/человек/месяц, то есть размер постоянно действующей в зоне ЭТО бригады – 3 ... 4 человека
- Затраты рабочего времени на обслуживание ЛКС – 78.6%, аппаратуры и систем питания – 21.4%
- Капитальные затраты на обслуживание ЛКС – 66%, аппаратуры и систем питания – 34%
- Эксплуатационные расходы на обслуживание ЛКС – 76% в 2002 ... 2003 годах и 83% в 2004 году, аппаратуры и систем питания – 24% в 2002 ... 2003 годах и 17% в 2004 году
- Трудозатраты на обслуживание каждого интерфейсного окончания – 0.5 человек/месяц
- Использование кольцевых структур (или обходов) для резервирования возможно только для сети с нагрузкой не более 50 ... 60%
- Параметры, которые необходимо получить: $K_g = 0.9998$ на 100 км воздушных линий и 0.99989 для кабельных, время восстановления $t_v \leq 5$ часов для воздушных линий и 5.3 часа для кабельных, плотность отказов $m = 0.192$ для воздушных линий и 0.181 для кабельных

Достигнутые по результатам эксплуатации параметры здесь так же ниже нормируемых, но близки к расчетным для ВОЛС, построенных на ВЛ 30 ... 35 кВ и подземных кабелях. Малое время восстановления, и как следствие высокая готовность, объясняются тем, что ЛКС проходят вдоль ЖД и автомобильных трасс, и малой зоной обслуживания ремонтных бригад 30 ... 50 км.

Заключение

Строительство ВОЛС-ВЛ требует грамотного технического и финансово-экономического анализа. Достижение указанных в руководящих документах параметров надежности требует выполнения сложных технических и организационных мероприятий, стоимость которых должна учитываться в смете на прокладку ВОЛС-ВЛ.

Приводимые в руководящих документах параметры надежности являются параметрами, которых необходимо достичь. Поэтому при расчетах надежности их использовать нельзя. Вместо них должны использоваться реальные значения.

Каждый ВОЛС-ВЛ проект уникален. Универсального подхода к решению задачи не существует. Использование при расчетах надежности только коэффициентов готовности ГТ или ФП приводит к значительному завышению надежности проектируемой ВОЛС-ВЛ. Всегда должны учитываться все составляющие ОКГТ или фазного оптического тракта.

Двойное резервирование ВОЛС-ВЛ не позволяет получить коэффициенты готовности, соизмеримые с готовностью ВЧ трактов. Поэтому кольцевые схемы ВОЛС-ВЛ должны «прорезаться» ребрами ВЧ каналов, обеспечивающих передачу технологического и РЗА трафиков.

Список литературы

1. Спиридонов В.Н. Двенадцать характерных ошибок при строительстве ВОЛС. Lightwave R.E. №1, 2005г.
2. Никольский К.К., Спиридонов В.Н. Причины ошибок при строительстве ВОЛС. Lightwave R.E., №3, 2005г.
3. ВОЛС на воздушных линиях электропередачи. Оптиктелеком, Технические заметки, НВО 005, 2003, <http://optictelcom.ru/>
4. "Высоковольтная" связь. Оптиктелеком, Технические заметки, НВО 003, 2003, <http://optictelcom.ru/>
5. РД 153-34.0-48.518-98. Правила проектирования, строительства и эксплуатации волоконно-оптических линий связи на воздушных линиях электропередачи напряжением 110 кВ и выше. – М.: РАО «ЕЭС России», 1999. –108 с.
6. СО 153-34.48.519-2002. Правила проектирования, строительства и эксплуатации волоконно-оптических линий связи на воздушных линиях электропередачи напряжением 0,4-35 кВ. МИНИСТЕРСТВО ЭНЕРГЕТИКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ, МИНИСТЕРСТВО РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ ПО СВЯЗИ И ИНФОРМАТИЗАЦИИ, 2003 г.
7. РД 45. 047-99. Линии передачи волоконно-оптические на магистральной и внутризоновых первичных сетях ВСС России. Техническая эксплуатация, Руководящий технический материал, Москва, 1990
8. Гладышевский М.А. Экономические перспективы использования WDM-технологии. Lightwave R.E., №2, 2004г.
9. Reliability of fiber optic cable systems: buried fiber optic cable optical groundwire cable all dielectric, self supporting cable. ALCOA FUJIKURA LTD., may 2001
10. Комарницкий Э.И. Надежность работы волоконно-оптических сетей связи и оперативное устранение аварий. Lightwave R.E., №4, 2005г.
11. Конструкции, прокладка, соединение и защита оптических кабелей связи. – Женева: МСЭ – Т. Сектор стандартизации МСЭ. 1994, -161 с.
12. Симичев Н.И., Ермашов А.А., Шмалько А.В. Цифровая сеть связи АО «Мосэнерго» - ИнформКурьер-Связь, 2000, №11.
13. Кеннет Э.Корнелисон, Майкл Л.Оглзби, Дж. Ник Уэр. Оптические кабели второго поколения, встроенные в грозозащитный трос (Обзор конструкции и характеристик) www.tt.ru
14. Здоровцов И.А., От чего зависит устойчивость связи? Connect! Мир связи, №5, 2001г.

15. Релейная защита и противоаварийная автоматика сети 220-750 кВ в 2006 году. СО-ЦДУ.
http://rza.so-cdu.ru/rza_2006_job.htm
16. Рекомендации по расчету надежности функционирования и обеспечения заданной надежности каналов связи для передачи информации системы противоаварийной автоматики, Энергосетьпроект, ОДП, 1981г.
17. Алексеев Е.Б., Концепция технической эксплуатации цифровых волоконно-оптических систем передачи по критерию надежности, ФОТОН-ЭКСПРЕСС, №2 (34), 2004 г.
18. Алексеев Е.Б., Стандартизация параметров ВОСП, Lightwave R.E., №2, 2003г.
19. Здоровцов И.А., Антонец В.Р., Помозов К.А., Здоровцов Ю.И., Методы оценки качества технического обслуживания волоконно-оптических линий передачи, ВКСС: Connect!, №6, 2005 г.