

Цифровые речевые ВЧ каналы I

Энергетика цифровых ВЧ каналов

Применимую к любым типам цифровой аппаратуры ВЧ связи по ВЛ методику расчета возможной емкости/загрузки цифрового канала создать довольно сложно. Обусловлено это как различиями в самой аппаратуре, так и тем, что вопрос этот еще сравнительно новый, мало изученный, без достаточной эксплуатационной статистики и наработок.

Прямой перенос знаний построения таких каналов из области проводной связи в область ВЧ связи по ЛЭП – не возможен, поскольку сами среды передачи принципиально различны. Причем это распространяется не только на передаточные функции (амплитудные, частотные и фазовые) сред передачи, но и на генерируемые ими шумы и помехи.

Проблема усугубляется еще и тем, что различная сама по себе аппаратура формирования цифрового ВЧ канала по разному реагирует на дестабилизирующие факторы, присущие каналам по ВЛ.

В этих условиях решающее значение приобретает экспертная оценка производителя подобной аппаратуры, способного на основании знаний о специфике работы своего оборудования и накопленного опыта эксплуатации дать рекомендации по его применению.

Верность оценки производителя зависит как от имеющегося у него опыта работы с цифровыми ВЧ системами, так и от того, какие цели он преследует.

Если основная задача – выделиться среди равноценных производителей, то, скорее всего, будут указаны максимально достижимые характеристики, как правило, ничего общего с реальной эксплуатацией не имеющие.

Другая крайность – стремление обеспечить некоторые характеристики цифрового ВЧ канала вне зависимости от условий эксплуатации - приводит к неоправданному занижению емкости канала, и, соответственно, либо к его недозагрузке (снижению экономической эффективности), либо к отказу от его использования вообще.

Промежуточный (рациональный) подход должен основываться на желании производителя выполнить требования отраслевых руководящих документов в части готовности каналов связи к передаче информации. Причем, речь здесь должна идти не об общей надежности аппаратуры (например, наработке на отказ), а именно о функциональной надежности канала связи как такового.

Для каналов ВЧ связи эта надежность традиционно оценивается по допустимому запасу на затухание. Для этого определяются: выходная мощность передатчика **Рпер** в заданной конфигурации, минимальный уровень приема **Рпр.мин** удаленной аппаратуры, затухание ВЧ тракта **Атр** и возможный уровень гололеда **Аг**¹. Нормально функционирующим считается ВЧ тракт, для которого выполнено условие

$$\mathbf{Рпер} - \mathbf{Рпр.мин} - \mathbf{Атр} \geq \mathbf{Аг}$$

При переходе к оценке надежности цифровых ВЧ трактов разумно остаться в рамках привычных концепций, произведя перерасчет указанных параметров для новых условий и методов передачи.

¹ Расчетный требуемый запас по затуханию на гололед, но не менее 9 дБ.

Расчет уровня передачи $P_{пер}$

1) Сумма весов сигналов, включая пилот-сигналы:

$$S_v = [n_1 * 1.41 (1.0) + n_2 * 0.25 + n_3 * 0.35 + n_4 * 0.71 + n_5 * 1.0 + n_6 * 0.5 + n_7 * 1.4 + n_8 * 2.8], \text{ где:}$$

n_1	= Количество речевых каналов (S речь = 1.41)
n_2	= Количество каналов данных 50 Бод плюс количество каналов данных 100 Бод
n_3	= Количество каналов данных 200 Бод плюс количество каналов данных 300 Бод
n_4	= Количество каналов данных 600 Бод плюс количество надречевых каналов 1200 Бод
n_5	= Количество каналов данных 1200 Бод-V.23 плюс количество каналов данных 2400 Бод
n_6	= Количество пилот-сигналов ETL плюс количество собственных охранных сигналов NSD550 плюс количество охранных сигналов NSD70 (S пилот = 0,5)
n_7	= Количество AMX 2 кГц сигналов (S амх = 1.4)
n_8	= Количество AMX 4 кГц или 8 кГц сигналов (S амх = 2.8)

2) Уровень 0 dBm0 на ВЧ-выходе передатчика $P_{пер}$:

$$P_{пер} = L_{PEP} - 20 * \log (S_v)^2 \text{ [дБм]}, \text{ где:}$$

L_{PEP} [dBm]: доступная мощность передатчика

= +37 dBm для 5 Вт оборудования ETL505,

= +46 dBm для 40 Вт оборудования ETL540,

= +49 dBm для 80 Вт оборудования ETL580.

Определение минимального уровня приема $P_{пр.мин}$

Определение уровня помех $P_{пом}$

С учетом интересующих нас параметров минимальный уровень приема определяется как:

$$P_{пр.мин} = P_{пом} + C_{Штреб} + 10 * \log (DF_p) \text{ [дБм]}$$

Для аналоговых ВЧ каналов, реализованных на аппаратуре ETL500, в которых наименее помехозащищенным является речевой канал, отраслевыми требованиями заданы значения $C_{Штреб} = 26$ дБ (для каналов ТМ, как правило, $C_{Штреб} = 16$ дБ), и DF_p (расчетная шумовая полоса) = 2.1 кГц, поскольку служебный речевой канал занимает полосу частот 300 ... 2400 Гц.

Чтобы использовать это выражение для оценки работоспособности цифрового ВЧ канала, необходимо учесть некоторые специфические моменты:

- Во-первых, надо знать, для какой шумовой полосы приведены скоростные характеристики цифрового канального формирователя. Большинство производителей нормируют свойство своих изделий в шумовой полосе $DF_m = 4$ кГц (для устройств AMX доступны характеристики в полосах $DF_m = 4$ и 2.1 кГц).

$$P_{пр.мин} = P_{пом} + C_{Штреб} + 10 * \log (DF_p) + [10 * \log (DF_m / DF_p)] \text{ [дБм]}^3$$

или

$$P_{пр.мин} = P_{пом} + C_{Штреб} + 10 * \log (DF_m) \text{ [дБм]}$$

² $20 * \log (S_v) = d_{PEP}$

³ мы предпочитаем использовать именно эту формулу, так как в противном случае объем таблицы, приведенной на странице 5 (Зависимость скорости передачи от отношения сигнал/шум и полосы модуляции), многократно возрастет.

- Во-вторых, надо учесть природу шума, генерируемого ВЛ.

Большинство производителей указывают скоростные характеристики своих изделий по результатам измерений с белым шумом. Шум ВЛ – шум «короны» - принципиально отличается от белого шума тем, что изначально имеет ярко выраженную периодическую импульсную природу (стример), на выходе узкополосных цепей описываемую пик-фактором или отношением максимальной амплитуды помехи к ее среднему значению.

Реальное значение пик-фактора шума зависит от очень многих параметров: класса ВЛ, схемы присоединения, погоды, высоты над уровнем моря, загрязненности воздуха и проводов, и т.д. (см. работы Г.В. Микуцкого, В.С. Скитальцева, Ю.П. Шкарина и др.).

Как аппаратура реагирует на импульсный характер шума, зависит от ее технических особенностей. Для цифровых ВЧ каналов, построенных на устройствах АМХ предлагается использовать следующую полуэмпирическую оценку величины влияния пик-фактора шума «короны»⁴:

$$R_{пр.мин} = R_{пом} + C_{Штреб} + 10 \cdot \log(D_{Fp}) + [10 \cdot \log(D_{Fm}/D_{Fp}) + K_{сп} * U_{вл}/110]$$

, где $K_{сп}$ – учитывающий схему подключения аппаратуры к ВЛ

схема присоединения	средняя фаза – земля	крайняя фаза – земля	Внутри-фазный тракт
$K_{сп}$	1,76	1,32	3,20

- В-третьих, надо учесть такую характерную особенность трактов ВЧ связи, построенных на ВЛ, как не монотонность (волнистость) амплитудно-частотной характеристики в пределах полосы пропускания, обусловленную многократными отражениями сигналов от концов ВЛ.

Здесь многое зависит от того, как рассчитывается затухание ВЧ тракта. Если по приближенным методикам, то, как правило, полученное значение затухания является максимальным/усредненным, уже включающим в себя «волнистость». Если по точным методикам, то для устройств АМХ «волнистость» следует учесть следующим образом

$$R_{пр.мин} = R_{пом} + C_{Штреб} + 10 \cdot \log(D_{Fp}) + [10 \cdot \log(D_{Fm}/D_{Fp}) + K_{сп} * U_{вл}/110 + 0.5 * A_{отр.разм}] \text{ [дБм]}$$

, где $A_{отр.разм}$ – размах неравномерности АЧХ в интересующем диапазоне частот ВЧ канала.

Таким образом, например, **дополнительное уменьшение $[10 \cdot \log(D_{Fm}/D_{Fp}) + K_{сп} * U_{вл}/110 + 0.5 * A_{отр.разм}]$** в запасе по перекрываемому затуханию или эквивалентное увеличение $R_{пр.мин}$ для ВЛ 500 кВ, средняя фаза – земля, с неравномерностью АЧХ обусловленной отражениями 3 дБ и характеристиками аппаратуры, приведенными для полосы 4 кГц вместо 2.1 кГц, составит:

$$[10 \cdot \log(4.0/2.1) + 1.76 * 500/110 + 0.5 * 3] = 12.3 \text{ [дБ]}$$

⁴ Получена на основе анализа не очень большого опыта установок, выполненных нашей компанией

А, например, для ВЛ 110 кВ, крайняя фаза – земля, с неравномерностью АЧХ обусловленной отражениями 5 дБ и характеристиками аппаратуры, приведенными для полосы 2.1 кГц:

$$[10 \cdot \log (2.1/2.1) + 1.32 \cdot 110/110 + 0.5 \cdot 5] = 3.8 \text{ [дБ]}$$

Перечисленные факторы являются основной причиной по которой существующие цифровые каналы в основном построены на ВЛ 110 кВ, длиной не более 130 км, с подключением «фаза-фаза». Дополнительное уменьшение запаса по перекрываемому затуханию при этом, как правило, не превышает 2 дБ.

Определение требуемого отношения *СШтреб*

Следующим шагом для определения минимальной принимаемой мощности должно быть вычисление **СШтреб**.

По приведенным ниже таблицам это сделать достаточно просто, надо только определить агрегатную скорость цифрового ВЧ канала.

Для аппаратуры АМХ она вычисляется следующим образом:

$$C_{гр} = n1 \cdot C_p + C_{д} + C_m,$$

где **n1** – количество речевых интерфейсов,

C_p – скорость передачи речевых данных.

Для АМХ500 рекомендуемое значение **C_p** = 7.2 кБит/с,

для АМХР **C_p** = 4.8 кБит/с,

C_д – сумма скоростей подканалов передачи данных [кБит/с],

C_m – коэффициент избыточности, зависящий от типа используемого мультиплексора.

Для АМХ500 **C_m** = 0.4 кБит/с,

для АМХР – это может быть как **C_m** = 0.4 кБит/с, так и

C_m = 0.8 кБит/с.

Стандартное значение для АМХР **C_m** = 0.8 кБит/с.

Таким образом, **C_{гр}** цифрового канала в полосе модуляции 3.1 кГц с загрузкой 2 речевых канала + 2 канала данных 1.2 кБит/с

для АМХ500 составит **C_{гр}** = 2*7.2 + 2*1.2 + 0.4 = 17.2 → 18.4⁵ кБит/с,

для АМХР – **C_{гр}** = 2*4.8 + 2*1.2 + 0.8 = 12.8 → 14.4 кБит/с,

а требуемые отношения сигнал/шум⁶:

СШтреб = 27.8 дБ для АМХ500 и

СШтреб = 23.8 дБ для АМХР соответственно (в полосе 2.1 кГц).

Дальнейшая процедура определения допустимого запаса по перекрываемому затуханию аналогична принятой для аналоговых ВЧ каналов⁷.

⁵ Округление вверх

⁶ в шумовой полосе 2.1 кГц (см. таблицу на странице 5)

⁷ Надо иметь в виду что, поскольку большинство мультиплексоров в таких устройствах работают в синхронном режиме, то энергетические и скоростные характеристики цифрового ВЧ канала надо рассчитывать для наихудшего из двух направлений передачи – именно оно будет определять максимальную агрегатную скорость цифрового ВЧ канала.

Скоростные характеристики⁸ АМХ500 и АМХР при вероятности ошибки цифрового канала 10⁻⁶

СШЧ	АМХ500								АМХР								СШЧ
	1.0 kHz	1.4 kHz	1.7 kHz	2.1 kHz	3.1 kHz	3.3 ⁹ kHz	7.0 kHz	СШЧ2.1	СШЧ2.1	3.1 ¹⁰ kHz	1.0 kHz	1.4 kHz	1.7 kHz	2.1 kHz	3.1 kHz	7.0 kHz	
12	2,4	3,6	4,4	4,4	5,6	5,6	6,4	14,8	14,8	4,8	2,4	3,6	4,8	4,8	6,0	6,0	12
13	2,8	4,0	4,8	4,8	6,4	6,4	8,0	15,8	15,8	4,8	2,4	3,6	4,8	4,8	6,0	8,4	13
14	2,8	4,4	5,2	5,2	7,2	7,2	9,6	16,8	16,8	7,2	2,4	4,8	4,8	4,8	7,2	9,6	14
15	3,2	4,8	5,6	5,6	8,8	8,8	11,2	17,8	17,8	7,2	3,6	4,8	6,0	6,0	8,4	10,8	15
16	3,6	5,2	6,4	6,4	9,6	9,6	14,4	18,8	18,8	9,6	3,6	4,8	6,0	6,0	9,6	14,4	16
17	4,0	5,6	6,8	6,8	10,4	10,4	16,0	19,8	19,8	9,6	3,6	6,0	7,2	7,2	10,8	15,6	17
18	4,0	6,0	7,2	7,2	11,2	11,2	17,6	20,8	20,8	9,6	3,6	6,0	7,2	7,2	10,8	18,0	18
19	4,4	6,4	8,0	8,0	12,0	12,0	19,2	21,8	21,8	12,0	4,8	6,0	8,4	8,4	12,0	19,2	19
20	4,8	6,8	8,4	8,4	13,6	13,6	22,4	22,8	22,8	12,0	4,8	7,2	8,4	8,4	13,2	22,8	20
21	5,2	7,2	8,8	8,8	14,4	14,4	24,0	23,8	23,8	14,4	4,8	7,2	8,4	8,4	14,4	24,0	21
22	5,2	7,6	9,6	9,6	15,2	15,2	25,6	24,8	24,8	14,4	4,8	7,2	9,6	9,6	15,6	25,2	22
23	5,6	8,0	10,0	10,0	16,0	16,8	27,2	25,8	25,8	14,4	6,0	8,4	9,6	9,6	15,6	27,6	23
24	6,0	8,4	10,4	10,8	16,8	17,6	30,4	26,8	26,8	16,8	6,0	8,4	10,8	10,8	16,8	30,0	24
25	6,4	8,8	10,8	11,6	18,4	19,2	32,0	27,8	27,8	16,8	6,0	8,4	10,8	12,0	18,0	32,4	25
26	6,4	9,2	11,2	12,4	19,2	20,0	33,6	28,8	28,8	19,2	6,0	9,6	10,8	12,0	19,2	33,6	26
27	6,8	9,6	11,6	12,8	20,0	20,8	35,2	29,8	29,8	19,2	7,2	9,6	12,0	13,2	20,4	34,8	27
28	7,2	10,0	12,0	13,6	20,8	21,6	38,4	30,8	30,8	19,2	7,2	9,6	12,0	13,2	20,4	38,4	28
29	7,6	10,4	12,4	14,4	21,6	22,4	40,0	31,8	31,8	21,6	7,2	10,8	12,0	14,4	21,6	39,6	29
30	7,6	10,8	12,8	14,8	23,2	23,2	41,6	32,8	32,8	21,6	7,2	10,8	13,2	14,4	22,8	42,0	30
31	8,0	11,2	13,2	15,6	24,0	24,0	43,2	33,8	33,8	24,0	8,4	10,8	13,2	15,6	24,0	43,2	31
32	8,4	11,6	13,6	16,0	24,8	24,8	46,4	34,8	34,8	24,0	8,4	12,0	13,2	15,6	25,2	46,8	32
33	8,4	12,0	14,4	16,8	25,6	25,6	48,0	35,8	35,8	24,0	8,4	12,0	14,4	16,8	25,2	48,0	33
34	8,8	12,4	14,8	17,2	25,6	26,4	49,6	36,8	36,8	24,0	8,4	12,0	14,4	16,8	25,2	49,2	34
35	8,8	12,8	15,2	18,0	26,4	27,2	51,2	37,8	37,8	26,4	8,4	13,2	15,6	18,0	26,4	51,6	35
36	8,8	12,8	15,2	18,4	26,4	28,0	54,4	38,8	38,8	26,4	8,4	13,2	15,6	18,0	26,4	54,0	36
37	8,8	12,8	15,2	19,2	27,2	28,8	56,0	39,8	39,8	26,4	8,4	13,2	15,6	19,2	27,6	56,4	37
38	8,8	12,8	15,2	19,2	27,2	28,8	57,6	40,8	40,8	26,4	8,4	13,2	15,6	19,2	27,6	57,6	38
39	8,8	12,8	15,2	19,2	28,8	28,8	59,2	41,8	41,8	28,8	8,4	13,2	15,6	19,2	28,8	58,8	39
40	8,8	12,8	15,2	19,2	28,8	28,8	62,4	42,8	42,8	28,8	8,4	13,2	15,6	19,2	28,8	62,4	40
41	8,8	12,8	15,2	19,2	28,8	28,8	64,0	43,8	43,8	28,8	8,4	13,2	15,6	19,2	28,8	63,6	41

⁸ Данные получены в лабораторных условиях на ВЧ канале, организованном на аппаратуре ETL500 с включенной функцией выравнивания группового времени задержки. Выключение функции выравнивания ГВЗ снижает скорости передачи до двух и более раз. Поэтому на ВЧ аппаратуре других типов, особенно аналоговой, получение указанных скоростей передачи практически не возможно.

Другим фактором, снижающим возможную скорость передачи, является полоса пропускания ВЧ канала. Она ни в коем случае не должна быть меньше указанной для модулятора. Обычно это 3.1 кГц. То есть ВЧ канал должен иметь полосу пропускания не уже 0.3 ... 3.4 кГц с неравномерностью ГВЗ не хуже 1 ... 2 мс.

⁹ Возможно только для ВЧ каналов реализованных на ETL500

¹⁰ АМХР-1 с модулятором первого типа. Сигнал-конвертер второго типа в АМХР-2 аналогичен модулятору, используемому в АМХ500. В качестве модулятора так же может использоваться FSK модем.

Обозначение АМХР-2/1.7 означает, что в устройстве используется модулятор второго типа с полосой модуляции 1.7 кГц (не имеет отношения к шумовой полосе, которая равна либо 4 кГц, либо 2.1 кГц – введено для сокращения объема Таблицы. Доступные скорости передачи пересчитаны в эти шумовые полосы).

Пример 1: Задано: ВЛ 220 кВ, присоединение средняя фаза – земля, неравномерность АЧХ обусловленная отражениями - 4 дБ. Затухание тракта - 13 дБ, нормируемый запас на гололед - 9 дБ. Характеристики модулятора цифровой аппаратуры приведены для шумовой полосы 2.1 кГц. Требуемая загрузка цифрового ВЧ тракта: 3 речевых канала + 2 канала данных 2.4 кБит/с (ширина спектра ВЧ канала 4 кГц).

Требуется определить: возможность построения цифрового ВЧ тракта с требуемой нагрузкой, и выбрать тип используемой аппаратуры.

Находим выходную мощность передатчика

$$P_{пер} = L_{РЕР} - 20 \cdot \log(2.8^{11} + 0.5) = L_{РЕР} - 10.4$$

и минимальную мощность приема

$$P_{пр.мин} = -28 + C_{Штреб} + 10 \cdot \log(2.1) + [10 \cdot \log(2.1/2.1) + 1.76 \cdot 220/110 + 0.5 \cdot 4] \\ = -19.3 + C_{Штреб}$$

Вычисляем требуемые отношения сигнал/шум для АМХ в полосе модуляции 3.1 кГц (для ETL500 + АМХ максимально доступная полоса модуляции составляет 3.3 кГц)

$$\text{для АМХ500} \quad C_{агр} = 3 \cdot 7.2 + 2 \cdot 2.4 + 0.4 = 26.8 \rightarrow 27.2^{12} \text{ кБит/с,}$$

$$\text{для АМХР} \quad C_{агр} = 3 \cdot 4.8 + 2 \cdot 2.4 + 2 \cdot 0.8^{13} = 20.8 \rightarrow 21.6 \text{ кБит/с, и}$$

$$C_{Штреб} = 39.8 \text{ дБ для АМХ500 и}$$

$$C_{Штреб} = 31.8 \text{ дБ для АМХР соответственно (в шумовой полосе 2.1 кГц).}$$

Тогда

$$P_{пр.мин} = -19.3 + 39.8 = 20.5 \text{ дБ для АМХ500 и}$$

$$P_{пр.мин} = -19.3 + 31.8 = 12.5 \text{ дБ для АМХР}$$

Исходя из требования

$$P_{пер} - P_{пр.мин} - A_{тр} \stackrel{3}{=} A_{г}$$

находим минимально допустимую выходную пиковую ВЧ мощность аппаратуры

$$P_{пер} \stackrel{3}{=} A_{г} + P_{пр.мин} + A_{тр} \text{ или}$$

$$L_{РЕР} \stackrel{3}{=} A_{г} + P_{пр.мин} + A_{тр} + S_v, \text{ что дает нам}$$

$$L_{РЕР} \stackrel{3}{=} 9 + 20.5 + 13 + 10.4 = 52.9 \text{ дБм для АМХ500 и}$$

$$L_{РЕР} \stackrel{3}{=} 9 + 12.5 + 13 + 10.4 = 44.9 \text{ дБм для АМХР}$$

Из полученного расчета видно, что реализовать заданный цифровой канал при использовании аппаратуры АМХ500 не представляется возможным.

На аппаратуре АМХР такой канал реализуется с помощью ETL541. Оставшийся запас по затуханию составляет 1.1 дБ.

Поскольку точность расчетов параметров ВЧ каналов, как правило, не превышает 5 ... 10 %, что только для затухания тракта 13 дБ дает погрешность вычисления большую (1.3 дБ), чем оставшийся запас по затуханию 1.1 дБ, то и на аппаратуре АМХР работа такого канала становится проблематичной.

Необходимо или снижать нагрузку, или использовать аппаратуру ETL581. Наибольший эффект даст удаление одного из речевых каналов¹⁴. Тогда для АМХР

$$C_{агр} = 2 \cdot 4.8 + 2 \cdot 2.4 + 1 \cdot 0.8 = 15.2 \rightarrow 16.8 \text{ кБит/с}$$

$$C_{Штреб} = 26.8 \text{ дБ}$$

$$P_{пр.мин} = -19.3 + 26.8 = 7.5 \text{ дБ}$$

$$L_{РЕР} \stackrel{3}{=} 9 + 7.5 + 13 + 10.4 = 39.9 \text{ дБм,}$$

То есть такой канал легко реализуется с помощью оборудования ETL541 + АМХР. Оставшийся запас по затуханию составляет 6,1 дБ, что превышает погрешность вычисления параметров ВЧ тракта.

¹¹ 2.8 – АМХ в полосе 4 кГц, 0.5 – пилот-сигнал ETL500, для ВЛ 220 кВ $R_{пом} = -28$ дБ

¹² округление вверх (по таблице на странице 5)

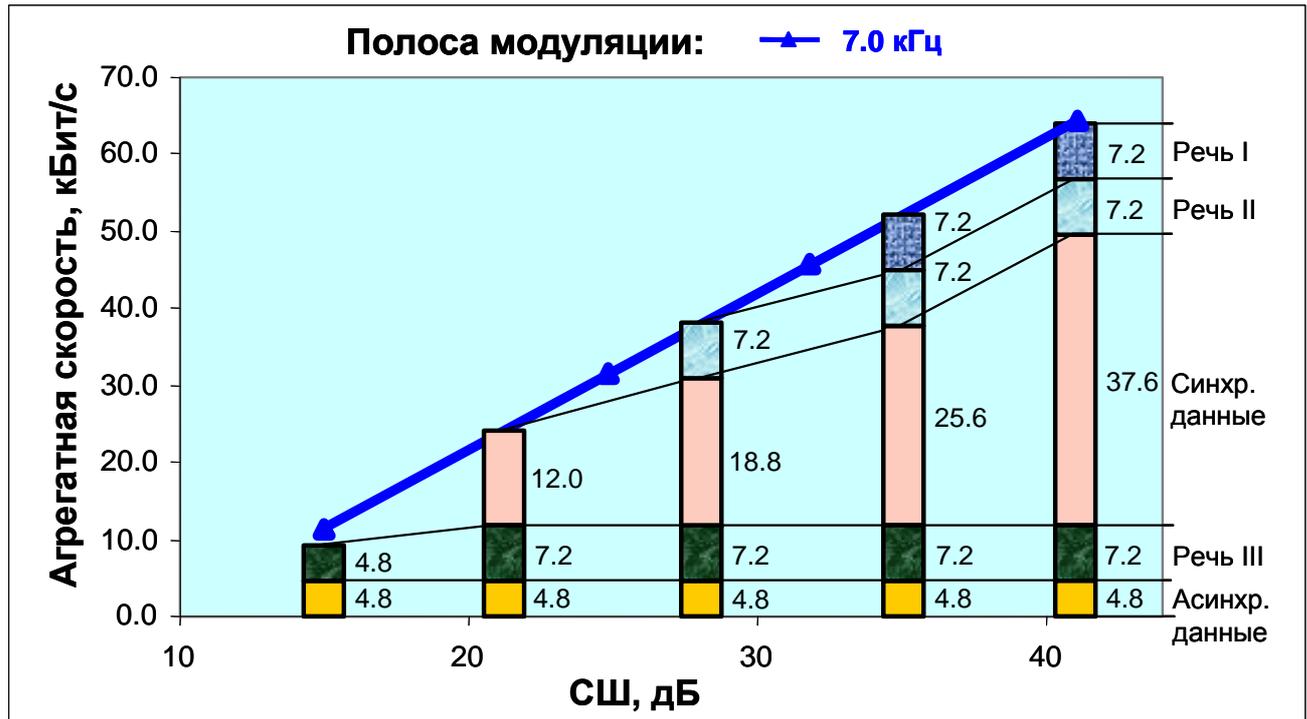
¹³ оптимальный по стоимости мультиплексор в АМХР содержит две речевых карты, поэтому для реализации трех речевых каналов мультиплексоры включаются каскадно

¹⁴ при этом удаляется второй каскадно включенный мультиплексор

Эффективная загрузка цифрового ВЧ канала

Если цифровой ВЧ канал используется в том числе для передачи данных, то целесообразно использовать такое свойство устройств АМХ как адаптация агрегатной скорости¹⁵ под реальные условия распространения сигнала по ВЧ каналу.

Принцип механизма адаптации достаточно прост: меняются условия передачи \Rightarrow меняется агрегатная скорость \Rightarrow меняется загрузка цифрового канала – происходит перераспределение функций по выбранному пользователем алгоритму.



На приведенном рисунке при уменьшении агрегатной скорости (верхняя толстая линия) за счет уменьшения скорости передачи синхронных данных уменьшается загрузка канала в целом.

Изменять скорости передачи речевых каналов, из-за стремительного ухудшения их качества (будет показано позже), не следует. В устройстве АМХР, если агрегатной скорости не хватает, речевые каналы просто отключаются. В АМХ500, кроме того, что речевой канал может отключаться, есть возможность изменения его скорости передачи, которая может понадобиться для изначально хороших каналов связи, когда стартовая скорость передачи речи составляет более 7.2 кБит/с (например, 16 кБит/с).

Возьмем предыдущий **Пример 1**. Максимально достижимое отношение сигнал/шум для рассматриваемой ВЛ и комбинации устройств ETL541 + АМХР составит

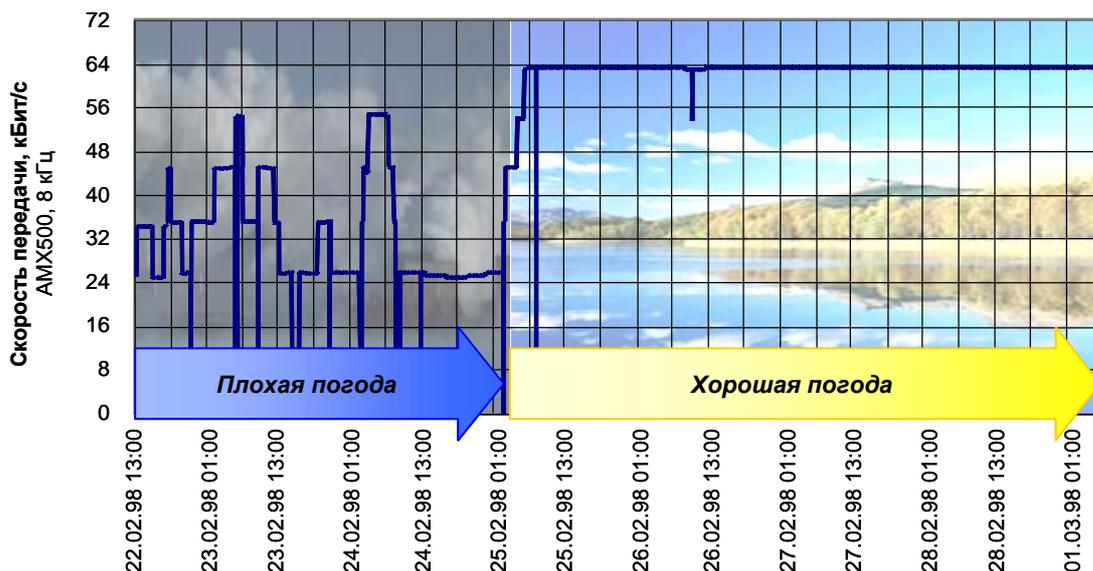
$$\text{СШ}_{\text{требмакс}} = \text{Рпер} - \text{Атр} - (\text{Рпом} + 10 \cdot \log(\text{DF}) + \text{Ксп} \cdot \text{Увл}/110 + 0.5 \cdot \text{Аволн.разм}) = 46 - 10.4 - 13 - (-19.3) = 41.9 \text{ дБ}$$

А максимальная агрегатная скорость - $\text{Сагр} = 28.8^{16}$ кБит/с, что на 12.0 кБит/с больше, полученной в **Примере 1** скорости.

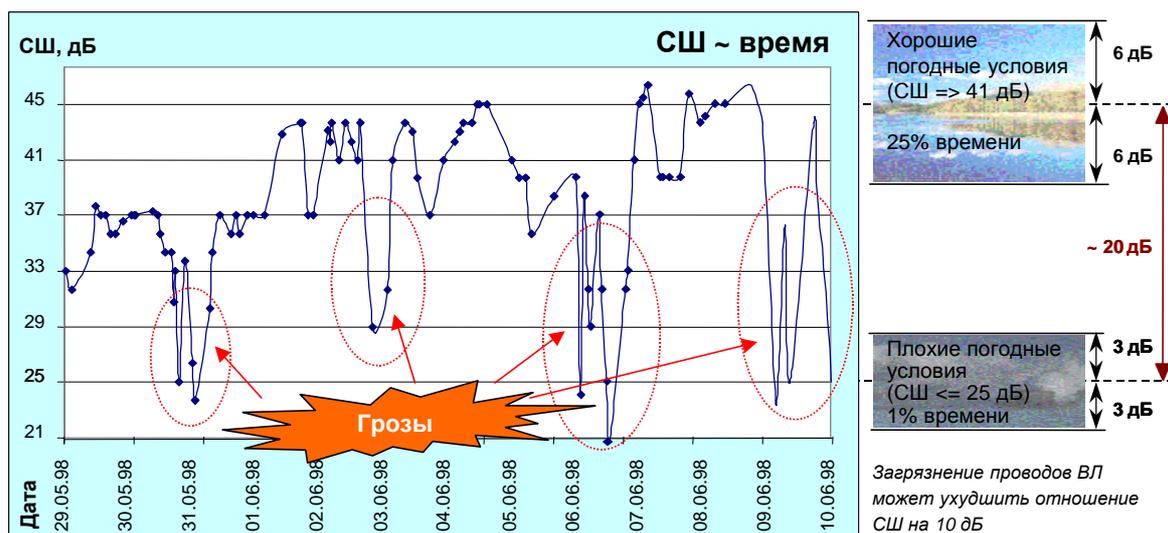
¹⁵ не все модуляторы и мультиплексоры можно использовать в режиме адаптации: они должны иметь сопряженные шаги перестройки по частоте, иначе даже при хорошем отношении СШ канал может перестать функционировать, когда мультиплексор потеряет синхронизацию из-за того, что не распознает скорость – частоту синхронизации, выданную модулятором.

Это значит, что потенциально на данной ВЛ может быть реализован еще один канал передачи данных, причем достаточно скоростной, который может быть использован для электронной почты, чтения записей аварийных регистраторов и т.п.

Оправдано ли включение механизма адаптации или нет ответить достаточно просто. Ниже приведено два рисунка. Это результаты измерений на реальной ВЛ 380 кВ длиной 100 км. Первый рисунок – «зимний» - показывает скорость агрегатного канала устройства АМХ500 сначала - во время интенсивного образования гололеда, а затем – во время длительной оттепели.



Второй рисунок: та же ВЛ в период летних гроз. В обоих случаях время плохих погодных условий весьма ограничено (в среднем около 1% времени за год). Время же, в течение которого можно реализовать максимальную агрегатную скорость, составляет не менее 25% периода эксплуатации.



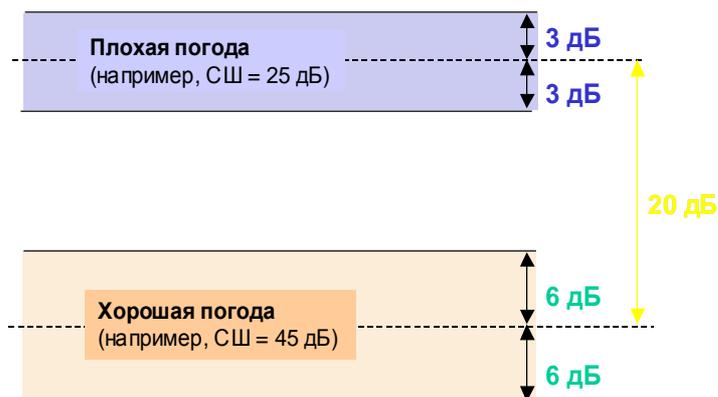
Или, другими словами, механизм адаптации позволяет ~50% времени иметь примерно в два раза большую емкость цифрового канала, чем без него.

¹⁶ округление вниз

Многочисленные экспериментальные данные показывают что, цифровые ВЧ каналы в значительно большей степени подвержены влиянию не медленных изменений параметров ВЧ тракта (таких как увеличение затухания из-за гололеда или изморози), а средне- и кратковременных. Таких как импульсные помехи при переключениях на ВЛ, туман, дожди, грозы (см. рисунки) и т.п. Эффект от долговременных и средних по длительности явлений зависит от конкретной реализации цифрового ВЧ канала.

Если канал построен на не адаптируемой под условия передачи аппаратуре, энергетический расчет выполнен по традиционной схеме с определением запаса по перекрываемому затуханию (запас на гололед), то АРУ, скорее всего, успеет обрабо-

тать медленные вариации амплитуды сигнала, и соединение останется устойчивым.



Однако дожди и грозы (разряды молний, грозовой фронт) могут привести к отключению такого канала на длительное время.

Связано это с тем, что грозы, практически не влияя на затухание ВЧ тракта, значительно увеличивают генерируемый ВЛ шум «короны» (часто превышает запас на гололед). Системы с фиксированной скоростью передачи справиться с ним не могут.

У адаптируемых систем (АМХ) такие явления разрыва соединения не вызывают.

Примечания (зависит от региона) :

Длительность режима «плохой погоды» не превышает 1% от общего времени
Длительность режима «хорошей погоды» превышает 25% от общего времени
Даже в хорошую погоду шум может повыситься на 10 дБ при загрязнении воздуха и проводов

При больших медленных вариациях затухания и уровня шумов у них может - и значительно - понизиться скорость передачи, но, тем не менее, такие важные каналы данных как АСКУЭ и ФОРЭМ (определяется пользователем) останутся в работе¹⁷.

Если же амплитуда сигнала или шумы канала меняются достаточно быстро ($\pm 1 \dots 2$ дБ/с), то в адаптируемом канале возникают пакетные ошибки (без разрыва соединения). Следствием этого могут быть:

- в телефонном канале во время разговора - шумовые вспышки или пропадание слов, и даже предложений; во время набора номера – ошибки набора,
- в канале данных - пакеты ошибок.

Кратковременные явления, такие как импульсные помехи при переключениях на ВЛ и разряд молнии, как правило вызывают разрыв соединения и запуск процедуры его переустановления (у разных производителей это может быть 5 ... 120 с, для АМХ – 10 ... 15 с). К такому же эффекту могут привести и случайные одночастотные помехи.

Таким образом, с учетом статистики продолжительности «плохой погоды» режим адаптации может значительно повысить среднюю долговременную скорость передачи данных в цифровом ВЧ канале, а что самое главное, обеспечить непрерывность передаваемых данных.

¹⁷ Возможны кратковременные сбои при переключении скорости