

Новая жизнь медных кабелей

Э.В. НОВИКОВ, М.М. ПТИЧНИКОВ, руководитель курсов «Технологическая связь» УИЦ Госакадемии нефти и газа

Широкое внедрение на современных телекоммуникационных сетях волоконно-оптической техники отодвинуло проблемы разработки и эксплуатации ЦСП, работающих по медным кабелям, на второй план. «Последней линией обороны» этих систем стали сети доступа, т. е. та часть ТфОП и ведомственных сетей, на которой в эксплуатации остаются огромные объемы медных кабелей и проводов. Действительно, реализация принципа «волокно к абоненту» требует решения очень многих как чисто технических, так и организационно-экономических задач, оставляя для меди немалое жизненное пространство. Однако и на соединительных линиях работает большое количество медных кабелей, которые еще долгое время могут служить средой передачи цифровых сигналов, принося значительный доход операторам и массу дополнительных услуг абонентам.

Немалый вред репутации так называемых медных линий принесло то, что, во-первых, практически все существующие кабели разрабатывались исключительно для аналоговых систем передачи, т. е. были сравнительно низкочастотными. А во-вторых, что ЦСП занимают гораздо более широкую полосу частот, чем АСП с такой же пропускной способностью. Поэтому первые ЦСП, внедряемые на наших сетях, заведомо были менее экономичными, чем АСП. В основном вследствие того, что участки переприема у них существенно короче, а регенераторы – гораздо сложнее и дороже усилителей АСП. Добавьте к этому необходимость использовать новые, более дорогие комплектующие изделия, усложнять конструкцию оконечного и промежуточного оборудования, увеличивать энергопотребление трактов и т. д. Сейчас это противоречие снимается использованием технологий xDSL, базирующихся на использовании многоуровневых сигналов, и, следовательно, еще более сложных регенераторов и т. п. Все перечисленные выше трудности, в конечном счете, успешно преодолеваются, системы с использованием различных модификаций xDSL сейчас не проектируют и не производят только самые ленивые и нерасторопные. А первые, далеко не самые оптимальные ЦСП, позволили накопить бесценный опыт разработки, производства, строительства и эксплуатации, без которого был бы невозможен нынешний расцвет цифровой техники, и проходить мимо которого непростительно.

Именно поэтому целый ряд технических решений, которые начали разрабатываться на первом этапе создания ЦСП, но по той или иной причине не получили должного развития, все же заслуживают внимания и могут оказаться полезными на дальнейших этапах разработки аппаратуры ЦСП. Тем более, они могут оказаться полезными в реалиях нашей современной сети связи, в которой медные кабели все еще занимают одно из доминирующих положений и, скорее всего, еще не скоро начнут сдаваться в металлолом. Одному из таких решений и посвящается данная публикация.

Мы уже говорили о том, что групповой сигнал ЦСП «по определению» является широкополосным. Одной из «больных» **точек проблем** ЦСП является согласование входных и выходных цепей аппаратуры с линией передачи, т. е. с кабелем, в весьма широком диапазоне частот. **Эта Проблема** актуальна даже для систем xDSL, не говоря уже о «классических» ИКМ-системах. Используемые в большинстве ЦСП **согласующие и симметрирующие трансформаторы** позволяют только частично решить **эту задачу согласования**.

Первые попытки ее решения были сделаны в ЦНИИС в процессе разработки так называемых «многократных» ЦСП, т. е. систем с удвоенной пропускной способностью, не укладывающихся в классическую плезиохронную иерархию. Работы эти проводились коллективом одной из научных лабораторий под руководством Э.В. Новикова. К их результатам мы и обращаемся в данной публикации.

Основным объектом согласования является регенератор, т. е. узел восстановления формы, амплитуды и временных соотношений цифрового сигнала. Регенераторы входят в состав практически всех узлов аппаратного комплекса ЦСП как на периферийных и сетевых узлах, так и на промежуточных станциях линий передачи. Устройство регенератора достаточно хорошо известно, поэтому в дальнейшем мы будем просто называть его функциональные узлы, необходимые для связного изложения проблемы.

Стоит также напомнить, что **сравнительно** недавно не существовало каких-либо мало-мальски приличных контрольно-измерительных приборов, и качество работы регенератора оценивалось по так называемой «глаз-диаграмме», т. е. усредненной осциллограмме выходного сигнала регулируемого корректирующего усилителя (РКУ), входящего в состав регенератора. «Глаз-диаграмма» представляет собой суммарную осциллограмму сигналов отдельных тактовых интервалов, представляющих сумму сигнала и помехи при передаче символов «+1», «-1» и «0». Визуально «глаз-диаграмма» представляет собой некоторое подобие глаза с засветкой его верхней и нижней областей и темным пространством («зрачком») посередине. Можно смело утверждать, что если величина этого «зрачка» превышает 30 % от общей высоты осциллограммы (в современной литературе можно встретить термин «q-фактор», т. е. $q \geq 0,3$), то можно считать, что данный регенератор работает в хороших условиях и может обеспечить восстановление сигнала. Этот метод совершенно неприемлем для оперативных измерений параметров передачи, несогласован с принятыми МСЭ-T рекомендациями G.821 и G.826, но очень полезен на этапе разработки и стендовых испытаний аппаратуры.

Задачи согласования широкополосных вводов аппаратуры хорошо известны в радиотехнике, в частности в радиолокации и при создании широкополосных каналов радиосвязи и радиовещания. Они решаются путем использования специальных широкополосных линейных трансформаторов (ШТЛ).

Подобные трансформаторы различной конструкции, изготовленные на кольцевых ферритовых сердечниках с высокими значениями магнитной проницаемости μ , использовались при макетировании линейных регенераторов.

Обмотки ШТЛ представляют собой цепи с распределенными параметрами («длинные линии»), выполненные на базе отрезков коаксиальных или симметричных кабелей с волновым сопротивлением, обеспечивающим согласование входного и выходного сопротивлений регенератора с импедансом кабельной линии. ШТЛ предназначен для трансформации волнового сопротивления линии при условии минимизации отражения сигнала в расчетном диапазоне частот.

Несколько парадоксально звучит, но если в обычном трансформаторе связь между обмотками осуществляется через магнитопровод, то в ШТЛ ее фактически нет. Для понимания процессов, происходящих в ШТЛ, можно рассмотреть простейший трансформатор, состоящий из двух обмоток. В одной из них, размещенной на магнитопроводе, вся энергия сигнала концентрируется внутри коаксиальной или симметричной пары. Эта энергия будет перемещаться по линии в режиме бегущей волны. Схема включения ШТЛ между источником сигнала (линией) и нагрузкой (входом регенератора) показана на рис. 1. Входы первичной (она намотана на ферритовое кольцо) и вторичной обмоток параллельно подключены к источнику сигнала, а выходы соединены последовательно и подключены к нагрузке. В этом случае каждая обмотка – это четырехполюсник, построенный на базе отрезка коаксиального или симметричного кабеля. Магнитопровод ШТЛ определяет только шунтирующее действие индуктивности первичной обмотки.

Вторичная (или фазовая) обмотка может располагаться вообще вне магнитопровода. Она имеет малую величину электрической протяженности x .

$$x = 2\pi l_n / \lambda, \quad (1)$$

где l_n – физическая длина отрезка кабеля, используемого в качестве обмотки, λ – длина волны сигнала. Спектр цифрового сигнала, как правило, занимает полосу от

нескольких кГц до тактовой частоты f_T . Поток E_1 , например, лежит в полосе от 15 до 2048 кГц. Целесообразно в качестве λ выбрать длину волны центральной составляющей спектра, которая в данном случае будет равна 1024 кГц. Учитывая, что l_n не превышает нескольких метров, можно смело утверждать, что электрическая протяженность x будет незначительной. Этим объясняется малое реактивное сопротивление обмотки в области низких частот, что в свою очередь определяет малую величину фазового сдвига сигнала в этой области.

Итак, нижняя граница полосы пропускания ШТЛ будет определяться индуктивной составляющей реактивного сопротивления обмотки, а верхняя – характеристикой самого кабеля. Расширение полосы пропускания ШТЛ, в конечном счете, повлияет на групповую скорость распространения импульсного сигнала в сторону его более компактного распределения, а также позволит оптимизировать условия согласования ШТЛ с нагрузкой. Волновое сопротивление обмоток ШТЛ R_B определяется выражением:

$$R_B = \sqrt{R_1 \cdot R_2}, \quad (2)$$

где R_1 – сопротивление источника, а R_2 – сопротивление нагрузки ШТЛ.

При расчете физической протяженности обмоток ШТЛ можно руководствоваться формулой:

$$l_x = x \cdot \lambda / 2\pi, \quad (3)$$

где x – электрическая протяженность обмотки, λ – длина волны электромагнитного сигнала.

В соответствии с существующими стандартами волновое сопротивление симметричных кабелей, предназначенных для работы в составе ЦСП, равно 120 Ом, коаксиальных – 75 Ом. На их основе могут строиться ШТЛ. Работа ШТЛ в режиме бегущей волны обеспечивается параллельным подсоединением первичной обмотки к источнику сигнала и последовательным соединением вторичной обмотки и нагрузки.

В трехобмоточном ШТЛ, изготовленном на базе 75-омного коаксиального кабеля, его входное сопротивление будет равно 25 Ом, а выходное – 225 Ом. Волновое сопротивление собственно ШТЛ при этом составит согласно формуле (2) $\sqrt{25 \cdot 225} = 75$ Ом, что обеспечивает согласование импедансов ШТЛ и источника сигнала. Выходное сопротивление при этом составит около 17 кОм, что позволяет подключить выход ШТЛ практически к любой нагрузке – линии или микросхеме.

Опыт макетирования показал, что волновое сопротивление ШТЛ может варьироваться в широких пределах при использовании для его обмоток кабелей типа ТРП («лапша» - на жаргоне связистов) или отдельных проводов. При этом величина волнового сопротивления Z_B определяется диаметром проводов, шагом обмотки и другими конструктивными характеристиками трансформатора.

Разброс величины электрической протяженности обмотки ШТЛ вызывает достаточно заметные изменения как амплитуды, так и формы импульсов цифрового сигнала. (Это иногда бывает даже полезным).

Наличие фазовой обмотки неизбежно ведет к увеличению габаритов ШТЛ, а также к возможному возникновению нежелательных паразитных связей и наводок при монтаже оборудования. Можно попытаться заменить фазовую обмотку некоторым ее эквивалентом, представляющим короткий плоский провод (ленту), намотанный на отдельный магнитопровод. Следующим этапом совершенствования ШТЛ можно считать полный отказ от использования магнитопроводов, функции которых выполняются длинными линиями с распределенными параметрами. Дополнительное расширение полосы пропускания ШТЛ можно обеспечить подключением к входам и выходам длинных линий отрезков однопарного симметричного кабеля. Отрезки этого корректирующего кабеля подключаются параллельно входу линии при разомкнутом противоположном конце (емкостная коррекция) и последовательно с нагрузкой при замкнутом противоположном конце (индуктивная коррекция). При необходимости такие

вставки легко согласуются с ШТЛ на магнитопроводах при их подключении как перед кабельной линией, так и после нее.

Варианты использования кабельной линии в качестве ШТЛ показаны на рис.1 и 2. Отрезки кабеля могут включаться последовательно (рис. 1), составив в сумме несколько километров при вполне удовлетворительном качестве «глаз-диаграммы». Возможна схема, когда одна пара проводов используется в качестве среды передачи, а другие работают как фазовые линии, причем последние могут использоваться как при однократном, так и при n-кратном включении их в схему. Волновое сопротивление основной линии при этом будет равно Z_B/n , $Z_B/(n-1)$, ..., Z_B в местах соединения строительных длин. Напряжение на отрезках фазовых линий будет изменяться от величины nU/Z_B на первом участке до U/Z_B на оконечном. Таким образом, амплитуда сигнала может изменяться от nU_1 до U_1 при неизменном значении тока в жилах кабеля.

Опыт экспериментальной проверки работы ШТЛ различных типов подтвердил вышесказанное.

Испытания макетов проводились на стенде, на котором линия связи имитировалась семью барабанами, на каждом из которых находилась строительная длина кабеля МКС 4x4x1,2 (около 500 м), и одним барабаном с кабелем ЗКА (около 1000 м). Коммутация пар, четверок и различных кабелей производилась дужками в стандартных кабельных боксах. Такое решение позволяло в широких пределах менять как длину участка регенерации, так и конфигурацию имитатора кабельного участка. В качестве испытательного сигнала использовалась псевдослучайная импульсная последовательность $2^{15} - 1$ или различные 16-символьные кодовые слова со скоростью передачи 2048 и 8448 кбит/с и амплитудой на выходе генератора, равной 2,5 В. Напоминаем, что штатная длина регенерационного участка для такого кабеля и этих скоростей передачи равна $5 \pm 0,5$ км (для ИКМ-30 и ИКМ-120).

Опыты показали, что с помощью ШТЛ на передающем и приемном концах линии, легко осуществляется трансформация формы исходного прямоугольного импульса испытательного сигнала, вариации его амплитуды, значительно упростились условия согласования линии, источника и приемника сигналов. В ряде случаев сигнал на выходе ШТЛ, установленном на дальнем конце линии длиной несколько километров, имел амплитуду, достаточную для его уверенной индикации на экране осциллографа, причем «глаз-диаграмма» имела хорошее раскрытие. В случае подключения регенератора к линии без ШТЛ ослабление сигнала таково, что на выходе линейного трансформатора на дальнем конце рассмотреть «глаз-диаграмму» просто невозможно.

При имитации линии рядом последовательно соединенных барабанов с кабелем возможно получить вполне удовлетворительную «глаз-диаграмму» даже для линии длиной 20 км.

Разумеется, полученные результаты нельзя считать чистыми, так как сигнал в ряде случаев проходил по соединенным последовательно парам одного и того же кабеля. Опыты требуют продолжения, в частности, необходимо организовать имитацию помех, вводимых в соседние пары или четверки, а также наводимых извне, что является обязательным условием работы реальной линии.

Физический смысл данного явления нуждается в осмыслении. Мы надеемся, что кто-либо из читателей сталкивался с подобным или имеет свою точку зрения и готов поделиться с нами.

Целью данной публикации является привлечение внимания разработчиков аппаратуры ЦСП к проблеме использования ШТЛ для построения линейных трактов на медных кабелях, как при использовании любой современной технологии передачи, так и при реконструкции действующих линий. Ждем ваших отзывов и предложений.