

Новиков Э.В., Птичников М.М.

Новая жизнь медных кабелей.

Широкое внедрение волоконно-оптической техники на современных телекоммуникационных сетях отодвинуло на второй план проблемы разработки и эксплуатации ЦСП, работающих по медным кабелям. «Последней линией обороны» этих систем стали сети доступа, то есть та часть ТфОП и ведомственных сетей, на которой остаются в эксплуатации огромные объёмы 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 ещё немалое количество медных кабелей, которые ещё долгое время могут служить средой передачи цифровых сигналов, принося немалый 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, то есть 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 в эксплуатацию на наших сетях, заведомо были менее экономичными, чем АСП. В основном, вследствие того, что участки переприёма были 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, но эти технологии базируются на использовании многоуровневых сигналов, и, следовательно, ещё более сложных регенераторов, более дорогих комплектующих и т.п. Все перечисленные выше трудности, в конечном счёте, 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. Проходить мимо этого опыта было бы просто 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, всё 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 всё ещё занимают одно из доминирующих положений и, скорее всего, ещё не скоро начнут сдаваться в металлолом. Одному из таких решений и посвящается данная публикация.

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

Первые попытки решения были сделаны в ЦНИИС в процессе разработки так называемых «многократных» ЦСП, то есть 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 результатам его работ мы и обращаемся в данной публикации.

Основным объектом согласования является регенератор, то есть 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 мы в дальнейшем будем просто называть его функциональные узлы, необходимые для связного изложения проблемы.

Стоит также напомнить, что ещё совсем недавно не существовало каких-либо мало-мальски приличных контрольно-измерительных приборов, и качество работы регенератора оценивалось по так называемой «глаз-диаграмме», то есть усреднённой 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 тёмным 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», так вот, если $q \geq 0,3$), то можно считать, что данный регенератор работает в хороших условиях и может обеспечить восстановление сигнала. Метод совершенно неприемлемый для оперативных измерений параметров передачи, несогласованный с принятыми МСЭ-Т рекомендациями G.821 и G.826, но очень полезный на этапе разработки и стендовых испытаний аппаратуры.

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

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

Обмотки ШТЛ представляют собой цепи с распределёнными 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. Функцией такого трансформатора является трансформация волнового сопротивления линии при условии минимизации отражения сигнала в расчётном диапазоне частот.

Несколько парадоксально звучит, но если в обычном трансформаторе связь между обмотками осуществляется через магнитопровод, то в ШТЛ такой связи фактически нет. Для понимания процессов, происходящих в ШТЛ, можно рассмотреть простейший ШТЛ, состоящий из 2-х обмоток. В одной из них, размещённой 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 ШТЛ параллельно подключены к источнику сигнала. Выходы первичной и вторичной обмоток соединены последовательно и подключены к нагрузке. В этом случае каждая обмотка – это четырёхполюсник, построенный на базе отрезка коаксиального или симметричного кабеля. Магнитопровод ШТЛ определяет только шунтирующее действие индуктивности первичной обмотки.

Вторичная (её ещё называют фазовой) обмотка может располагаться вообще вне магнитопровода. Она имеет малую величину электрической протяжённости x .

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

где l_d – 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 кГц до 2048 кГц. Целесообразно в качестве λ выбрать длину волны центральной составляющей спектра, которая в данном случае будет равна 1024 кГц. Учитывая, что l_d не превышает нескольких метров, можно смело утверждать, что электрическая протяжённость x будет очень незначительна. 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 граница – характеристикой самого кабеля. Расширение полосы пропускания ШТЛ, в конечном счёте, 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 расчёте физической протяжённости обмоток ШТЛ можно руководствоваться формулой

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

Где: x – электрическая протяжённость 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 базе этих кабелей 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 трёхобмоточном 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 ШТЛ при этом составит около 17 кОм, что позволяет подключить выход ШТЛ практически к любой нагрузке – линии или микросхеме.

Опыт макетирования ШТЛ 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 протяжённости обмотки ШТЛ вызывает достаточно заметные изменения как амплитуды, так и формы импульсов цифрового сигнала. (Это иногда бывает даже полезным).

Наличие фазовой обмотки неизбежно ведёт к увеличению габаритов ШТЛ, а также к возможному возникновению нежелательных паразитных связей и наводок в монтаже оборудования. Можно попытаться заменить фазовую обмотку некоторым её эквивалентом, представляющим короткий плоский провод (ленту), намотанную на отдельный магнитопровод. Следующим этапом совершенствования ШТЛ можно считать полный отказ от использования магнитопроводов, функции которых выполняются длинными линиями с распределёнными 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 (ёмкостная коррекция) и последовательно с нагрузкой при замкнутом противоположном конце (индуктивная коррекция). При необходимости, такие вставки легко согласуются и с ШТЛ на магнитопроводах при их подключении как перед кабельной линией, так и после неё.

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, причём последние могут использоваться как при однократном, так и при их n -кратном включении в схему. Волновое сопротивление основной линии при этом будет равно $Z_{\text{в}}/n$, $Z_{\text{в}}/(n-1)$, ... $Z_{\text{в}}$ в местах соединения строительных длин. Напряжение на отрезках фазовых линий будет изменяться от величины $nU/Z_{\text{в}}$ на первом участке до $U/Z_{\text{в}}$ на оконечном. Таким образом, амплитуда сигнала может изменяться от величины nU_1 до U_1 при неизменной величине тока в жилах кабеля.

Опыт экспериментальной проверки работы ШТЛ различных типов подтвердил вышесказанное.

Испытания макетов проводились на стенде, на котором линия связи имитировалась 7-ю барабанами, на каждом из которых находилась строительная длина кабеля МКС 4x4x1,2 (около 500 м) и 1-м барабаном с кабелем ЗКА (около 1000 м). Коммутация пар кабелей, четвёрок 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 кбит/с и 8448 кбит/с и амплитудой на выходе генератора, равной 2,5 в. Напоминаем, что штатная длина регенерационного участка для этого кабеля и этих скоростей передачи равна $5 \text{ км} \pm 0,5 \text{ км}$ (ИКМ-30 и ИКМ-120).

Опыты показали, что с помощью ШТЛ на передающем и на приёмном концах линии легко осуществляется трансформация формы исходного прямоугольного импульса испытательного сигнала, вариации его амплитуды, значительно упрощались условия согласования линии, источника и приёмника 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, причём «глаз-диаграмма» имела достаточное 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 соединённых барабанов с кабелем стало возможным получение вполне удовлетворительной «глаз-диаграммы» даже для линии длиной 20 км.

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

Физический смысл данного явления нуждается в осмыслении. Авторы надеются, что кто-либо из наших читателей или 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. Ждём ваших отзывов и предложений!

Каков, по Вашему мнению, физический смысл наблюдаемого явления?

Сталкивались ли Вы в вашей работе с применением широкополосных трансформаторов, и как Вы оцениваете эффективность их использования?

Как Вы считаете, перспективны ли подобные разработки применительно к сетям Ethernet и другим сетям передачи данных?

Как Вы считаете, перспективны ли подобные разработки применительно к технологиям xDSL?

Считаете ли Вы целесообразным модернизацию существующих ЦСП плезиохронной иерархии, или проще заменить старые линейные тракты на оптоволокно или внедрить одну из технологий DSL, заметно сужающую спектр группового сигнала?