

1.1 Эквивалентная схема кабеля

Кабель может быть описан длинным рядом 4-полюсников. Каждый 4-полюсник содержит 4 элемента: омическое сопротивление R , индуктивность L , ёмкость C и проводимость G . R представляет собой омическое сопротивление провода, а L -индуктивность кабеля. G - представляет проводимость материала изоляции между проводами. C - описывает ёмкость между проводами или между проводами и экраном. Для электрической линии эти параметры заданы в величинах, отнесённых к единице длины кабеля, к 1 м или 1 км. Они называются погонными параметрами.

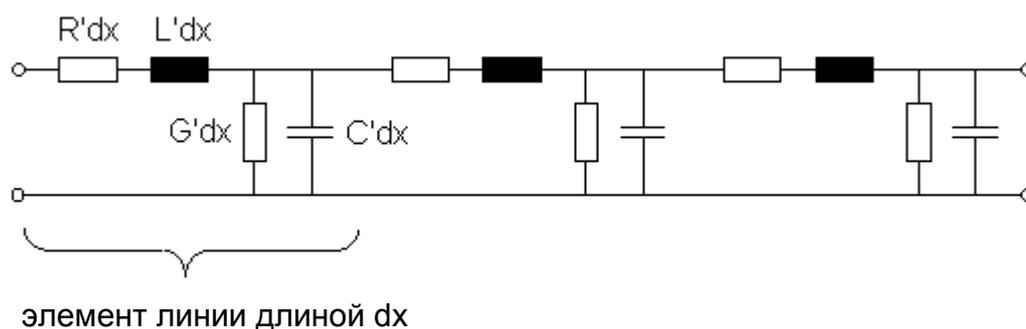


рис 1. Эквивалентная схема кабеля

1.2 Искажение сигнала

Импульсы, распространяющиеся по кабелю, искажаются по двум причинам. Чем дальше они распространяются по кабелю, тем больше увеличивается их ширина и уменьшается амплитуда. Увеличение ширины импульсов вызывается эффектом, связанным с непрерывностью амплитудно-частотной и фазовой характеристик кабеля.

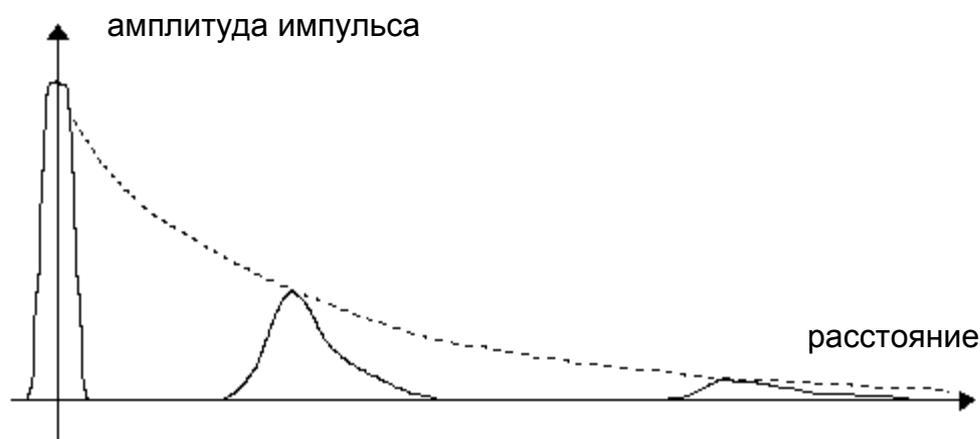


рис 2. Искажение импульса при распространении по кабелю.

1.3 Импеданс (Волновое сопротивление)

Если сигнал распространяется по кабелю в форме электрической волны, напряжение и ток волны находятся постоянно в одном отношении друг к другу. Это отношение называется **импедансом Z_L** или **волновым сопротивлением**. Импеданс может быть представлен:

$$Z_L = \sqrt{\frac{R' + j\omega L'}{G' + j\omega C'}}$$

Если в кабеле нет потерь ($R=0$, $G=0$), формула упрощается

$$Z_L = \sqrt{\frac{L'}{C'}}$$

Действительная величина Z_L остаётся независимой от частоты. Если частота становится очень высокой, то $\omega L \gg R$ и $\omega C \gg G$. Следовательно, импеданс является также постоянным для высоких частот.

Для величины импеданса справедливы следующие аппроксимации:

- длинный тонкий проводник: L велико, C мало, Z_L велико
- короткий толстый проводник: L мало, C велико, Z_L мало

1.4 Коэффициент отражения

Если участок кабеля имеет сопротивление Z_X , которое отличается от волнового сопротивления кабеля, например, на конце кабеля, часть энергии импульса будет отражаться на этом участке кабеля. Отношение между отражённой частью и частью импульса, распространяющегося за неоднородность, может быть описано посредством **коэффициента отражения r** (Z_L = волновое сопротивление кабеля, Z_X = сопротивление на источнике дефекта):

$$r = \frac{Z_X - Z_L}{Z_X + Z_L}$$

Обычно коэффициент отражения является комплексным параметром, т.е. отражение меняет не только амплитуду импульса, но и форму. Если коэффициент отражения чисто действительный, имеет место только изменение амплитуды импульса с сохранением его формы.

Относительно коэффициента отражения различают три простых специальных случая: согласование (если кабель нагружен на волновое сопротивление), разомкнутый конец и короткое замыкание.

Можно легко рассчитать, какой вид отражения можно ожидать на определённом ответвлении.

Чтобы определить коэффициент отражения, необходимо знать сопротивление в точке x текущего положения импульса и сопротивление в точке $x+dx$.

На однородном участке кабеля, сопротивление Z_L в точке x , равно сопротивлению Z_x в точке $x+dx$, тогда:

$$r = \frac{Z_x - Z_L}{Z_x + Z_L} = \frac{Z_L - Z_L}{Z_L + Z_L} = \frac{0}{2 \cdot Z_L} = 0$$

Как правило, нельзя считать участки кабеля, свободными от всех отражений. Производство, хранение, и прокладка кабеля всегда приводит к небольшим вариациям его характеристик. Эти вариации вызывают небольшие отражения.

1.5 Согласование

Если импульс не отражается от конца кабеля, значит цепь нагружена согласованно.

Если сопротивление нагрузки имеет величину, равную волновому сопротивлению, то можно использовать формулу указанную выше. Импульс не отражается.

Согласование: $Z_x = Z_L$, $\Rightarrow r = 0$

1.6 Разомкнутый конец

Если кабель на конце разомкнут или оборван, импульс будет отражаться с полной амплитудой и без изменения формы.

Отклик (эхо), вызываемое дефектом, имеет ту же полярность, что и передаваемый импульс.

$$r = \frac{Z_x - Z_L}{Z_x + Z_L} = \frac{\infty - Z_L}{\infty + Z_L} \approx \frac{\infty}{\infty} = 1$$

разомкнутый конец: Z_x бесконечно велико $\Rightarrow r = 1$

1.7 Короткое замыкание

Если кабель замкнут на конце накоротко, импульс будет отражаться с полной амплитудой и неизменной формой, но с противоположной полярностью.

$$r = \frac{Z_x - Z_L}{Z_x + Z_L} = \frac{0 - Z_L}{0 + Z_L} = \frac{-Z_L}{+Z_L} = -1$$

короткое замыкание: $Z_x = 0 \Rightarrow r = -1$

1.8 Ответвление

Если импульс распространяется в ответвление кабеля, результирующее сопротивление Z_x равно параллельному соединению входных сопротивлений Z_L двух кабелей.

$$Z_x = \frac{Z_L \cdot Z_L}{Z_L + Z_L} = \frac{Z_L^2}{2 \cdot Z_L} = \frac{1}{2} Z_L$$

Т.о., сопротивление, которое встречает импульс в месте разветвления, равно половине волнового сопротивления кабеля.

Коэффициент отражения может быть рассчитан по формуле:

$$r = \frac{Z_x - Z_L}{Z_x + Z_L} = \frac{\frac{1}{2} Z_L - Z_L}{\frac{1}{2} Z_L + Z_L} = \frac{-\frac{1}{2} Z_L}{+\frac{3}{2} Z_L} = -\frac{1}{3}$$

Идеальное ответвление не меняет формы импульса при его отражении. При этом отражается 30% амплитуды импульса.

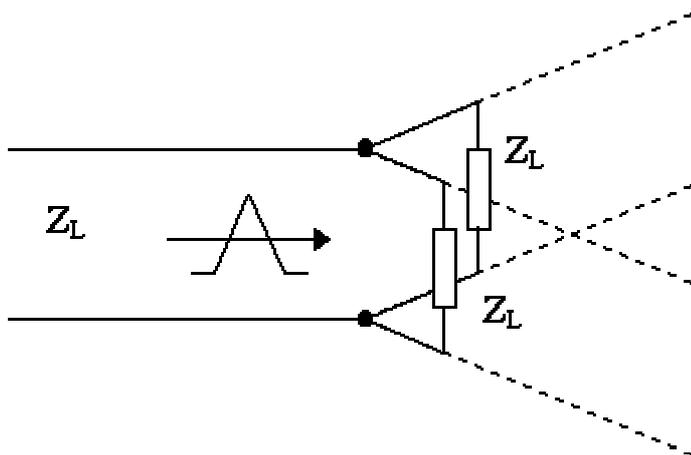


рис 3. Импульс, отражённый от ответвления

Слабое отрицательное отражение можно наблюдать при любом виде параллельного соединения. Если сопротивление соединяется параллельно с волновым сопротивлением кабеля, результирующая величина будет всегда меньше волнового сопротивления, даже если параллельное сопротивление очень велико.

Открытый **Т-коннектор** внутри коаксиальной линии, обычно очень трудно идентифицировать. Если одно гнездо Т-коннектора открыто, то его можно рассматривать как параллельный открытый конец (см. следующий рисунок). Параллельный открытый конец не вызывает отражения.

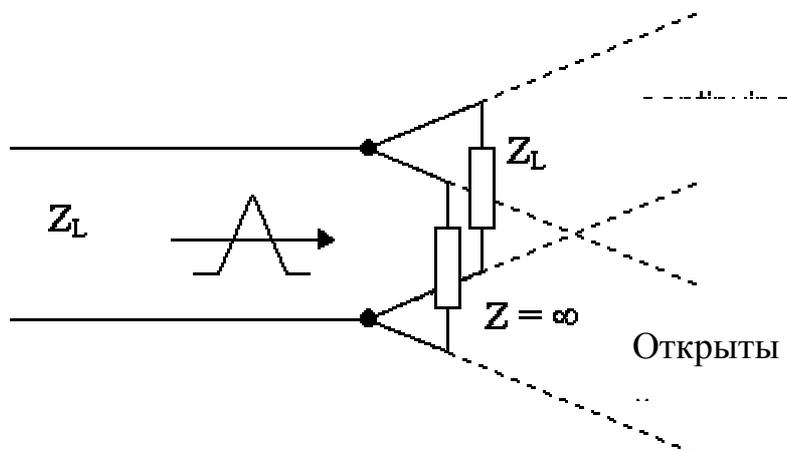


рис 4. Импульс, отражённый от открытого Т-коннектора

Величина сопротивления параллельного соединения в этом случае не влияет на результирующее сопротивление:

$$Z_x = \frac{\infty \cdot Z_L}{\infty + Z_L} \approx \frac{\infty \cdot Z_L}{\infty} = Z_L$$

Если импульс попадает на открытый Т-коннектор, то сопротивление, которое он встречает, близко к волновому сопротивлению кабеля. Идеальный Т-коннектор не отражает импульсов.

Однако, как правило, на Т-коннекторе нарушается симметрия кабеля. Экран размыкается; и открытое гнездо действует подобно параллельному присоединению небольшой ёмкости. Неидеальный Т-коннектор можно наблюдать на рефлектограмме.

1.9 Омическое отражение

Разъёмное соединение обычно может считаться действительным последовательным сопротивлением.

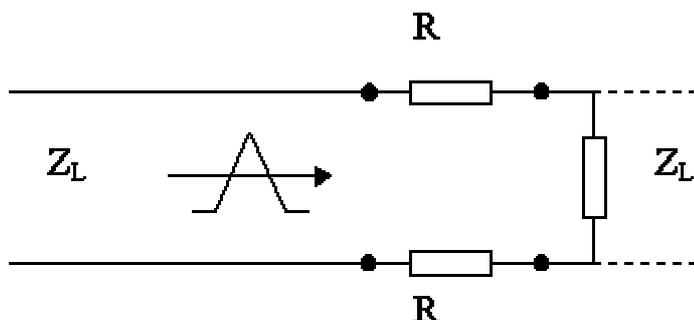


рис 5. Импульс, отражённый от разъёмного соединения

При известном сопротивлении контакта R коэффициент отражения может быть рассчитан по формуле:

$$Z_x = R + Z_L + R = Z_L + 2R$$

$$r = \frac{Z_x - Z_L}{Z_x + Z_L} = \frac{Z_L + 2R - Z_L}{Z_L + 2R + Z_L} = \frac{R}{Z_L + R}$$

Как правило, R очень мало по сравнению с Z_L . Т.о., соединитель вызывает очень небольшое (но всегда положительное) отражение.

1.10 Омическое короткое замыкание

Омическое короткое замыкание между двумя проводами даёт такой же эффект, как параллельное соединение.

Сопротивление дефекта подключено параллельно с непрерывным кабелем. Можно наблюдать небольшое отрицательное отражение. Амплитуда отражения зависит от степени шунтирования.

1.11 Емкостной дефект (шунтирующая ёмкость)

Изменение ёмкости между проводами кабеля может служить общим примером дефекта, искажающего форму импульса. Шунтирующая ёмкость приводит к ярко выраженному дифференцированию сигнала.

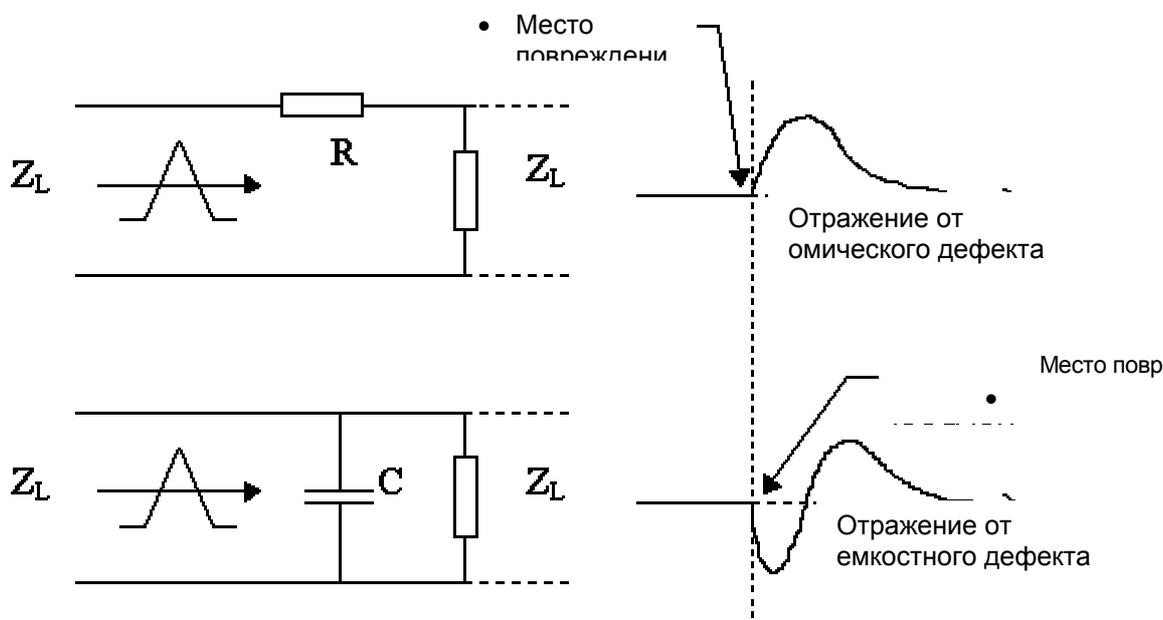


рис 6. Различие между отражением от омического и ёмкостного дефекта

1.12. Потери энергии при многократных отражениях

Как правило, на рефлектограмме электрической линии можно наблюдать несколько отражений. Это затрудняет классификацию отражений на большом расстоянии.

На каждом дефекте импульс испытывает отражение, амплитуда зондирующего импульса уменьшается на каждом дефекте. Разомкнутый конец, который обычно вызывает большое отражение, может отобразиться с малой амплитудой, если ему предшествовало много малых отражений.

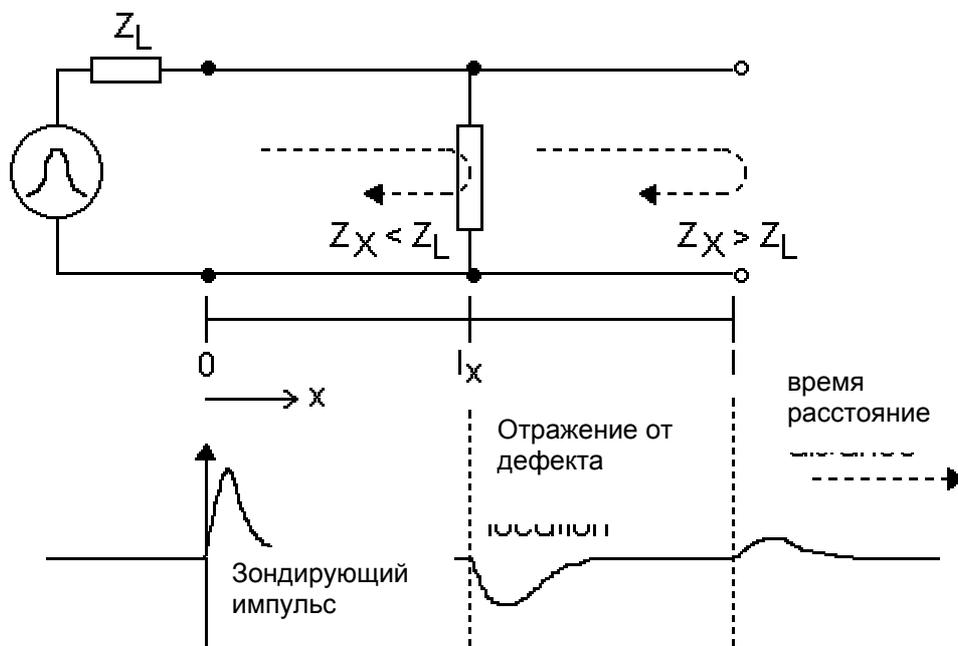


рис 7. Рефлектограмма дефектного кабеля

1.13 Скорость сигнала и время распространения импульса

Импульс распространяется в кабеле со **скоростью сигнала v** , которая является характеристикой кабеля. Эта скорость может быть примерно описана через относительную диэлектрическую проницаемость материала изоляции и вычислена по формуле:

$$v \approx \frac{1}{\sqrt{\epsilon_r}} \cdot c$$

В этой формуле c обозначает скорость света в вакууме ($c=2,9979$ м/мкс).

В качестве рекомендуемой величины диэлектрической проницаемости воздуха можно принять 1. Для пластмасс значение диэлектрической проницаемости лежит в пределах от 2 до 4, а для воды - 80.

Обратная величина корня из диэлектрической проницаемости, которая входит в аппроксимационную формулу, может также использоваться для определения скорости сигнала. Эта величина описывает отношения скорости сигнала в кабеле к скорости света в вакууме. Это отношение обозначено как **коэффициент укорочения γ** .

Типовые значения коэффициентов укорочения для некоторых типов кабеля

Кабель РК-50-2-11	1.52
Кабель РК-100-7-1	1.20
Воздушная линия	1.00
Кабель П-270	3.00
Кабель П-274М	1.39
Кабель СБ. АБ	1.84

Подводя итог можно сказать:

Если импульс посылается в кабель, он распространяется со скоростью, которая является характеристикой кабеля, такой же уникальной, как волновое сопротивление. В месте, где сопротивление кабеля меняется, часть импульса отражается и возвращается к началу кабеля.

Полная длина пути зависит от затухания и дисперсии кабеля. Сигналы в начале линии могут быть зарегистрированы как функция времени. Результирующая зависимость является так называемой рефлектограммой. Время t_x необходимое импульсу для распространения от начала кабеля до неисправности и обратно, может быть измерено. Используя известную скорость сигнала (или значение γ) в кабеле, можно вычислить расстояние l_x между началом кабеля и неисправностью:

$$l_x = \frac{v}{2} \cdot t_x$$

Из соображений практичности вместе с γ часто используется величина $v/2$, связанная с коэффициентом укорочения отношением: $v/2 = c/(2 \cdot \gamma)$.

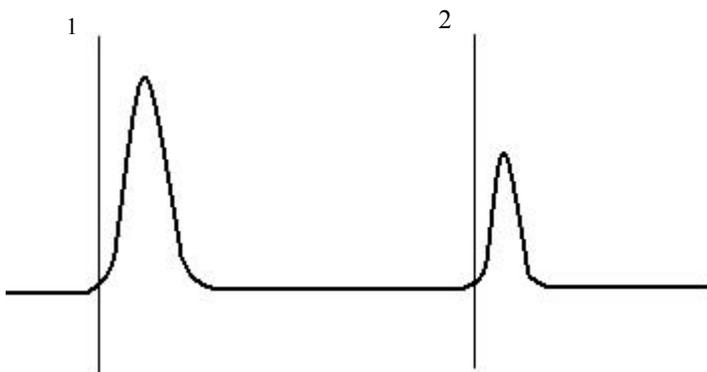
Если эта величина известна, её можно непосредственно подставить в предшествующую формулу.

2. Основные типы рефлектограмм металлических кабелей.

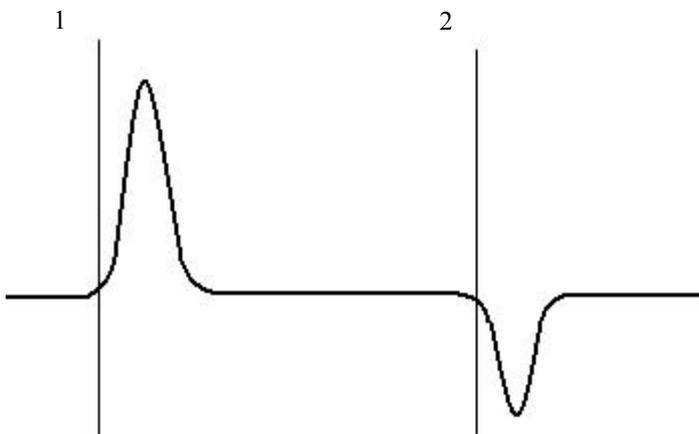
Среди всего разнообразия рефлектограмм металлических кабелей можно выделить несколько, наиболее полно описывающие возможные неисправности кабелей.

На рисунках представлены несколько типичных рефлектограмм металлических кабелей.

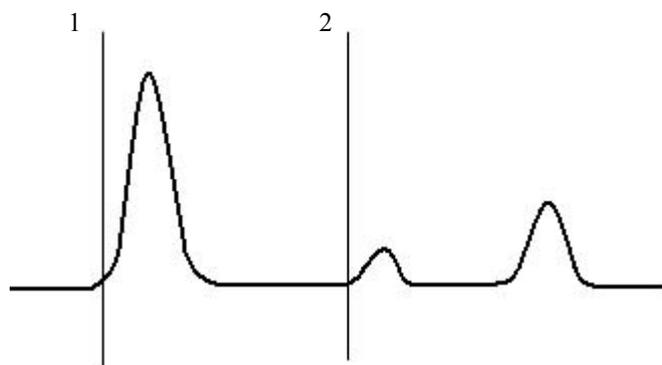
1. На рефлектограмме представлен случай отражения сигнала от точки большого сопротивления (второй курсор), что соответствует обрыву кабеля. Состояние, описываемое рефлектограммой, получило название характерного обрыва (COMPLIT OPEN).



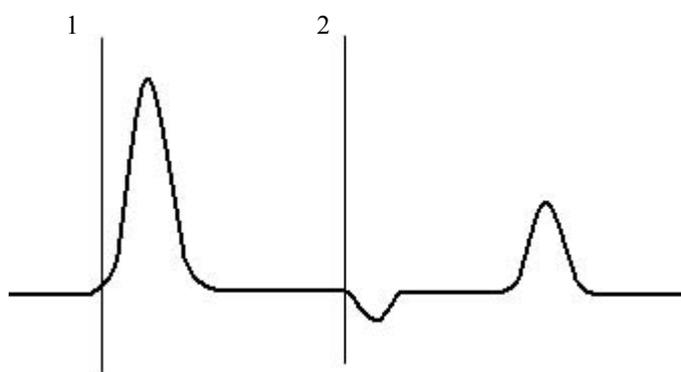
2. Отражение со сменой полярности сигнала соответствует короткому замыканию в кабеле, малому сопротивлению неоднородности. Такое состояние получило название характерного короткого замыкания (DEAD SHORT).



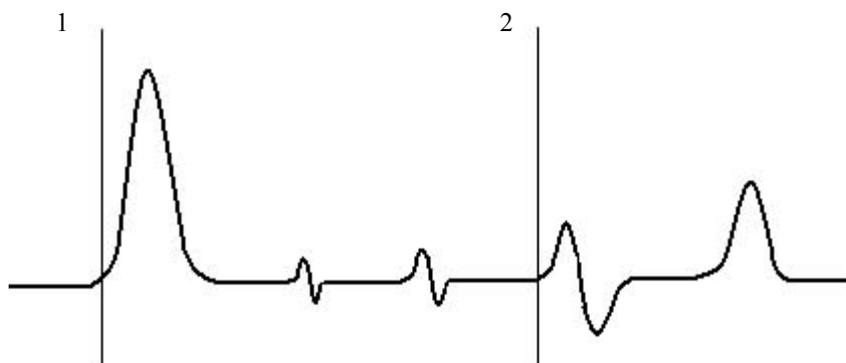
3. На данной рефлектограмме представлен вариант частичного обрыва (второй курсор) (PARTIAL OPEN), за которым следует полный обрыв.



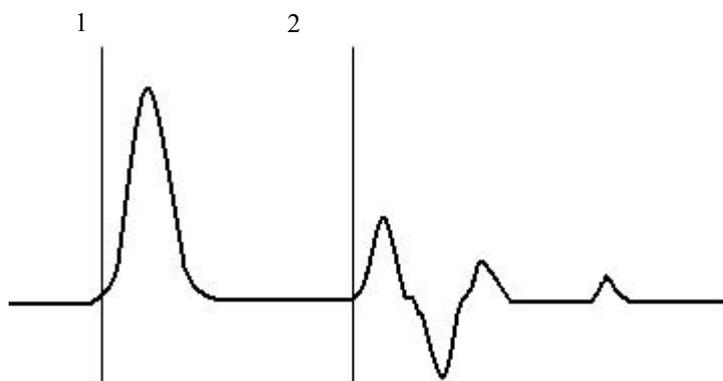
4. На рефлектограмме представлен случай, когда за частичным замыканием (PARTIAL SHORT), отмеченным вторым курсором, следует полный обрыв кабеля.



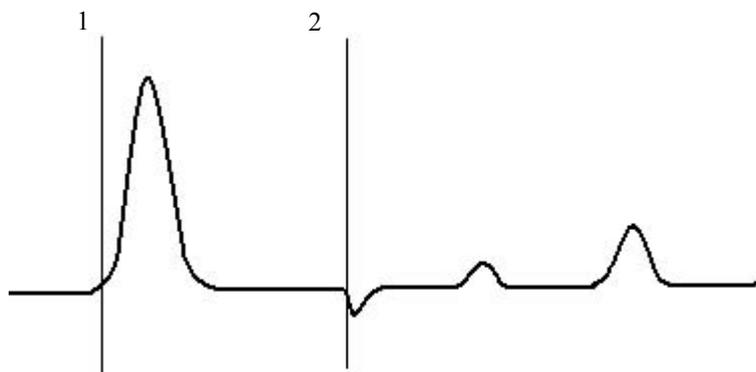
5. Данная рефлектограмма отражает три пайки на кабеле. Пайка, отмеченная вторым курсором, является дефектной, что хорошо видно по уровню отражения от неоднородности.



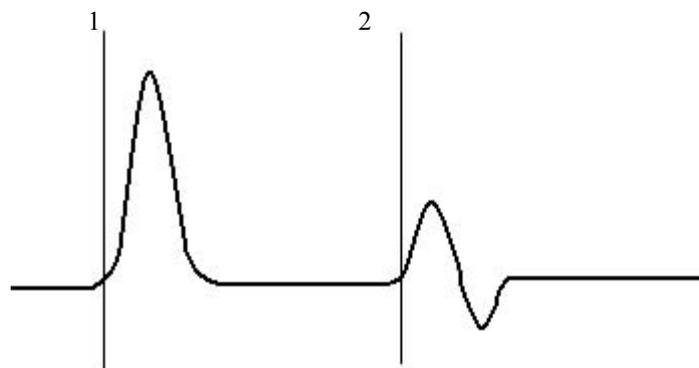
6. Наличие усилителя в линии приводит к повышенному отражению от усилителя. Сигнал от рефлектометра должен обрываться на усилителе, однако может возникнуть дополнительное отражение (фантомный образ) за усилителем.



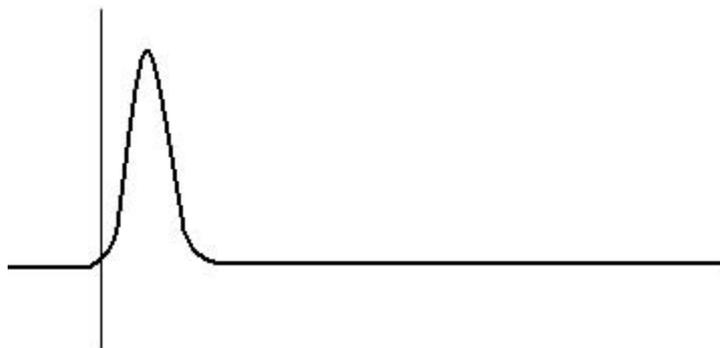
7. Наличие ответвителей может привести к ошибке измерения вследствие множественного отражения. На рефлектограмме второй курсор отмечает ответвитель. Два разнонаправленных отраженных сигнала отображают два сегмента ответвителя.



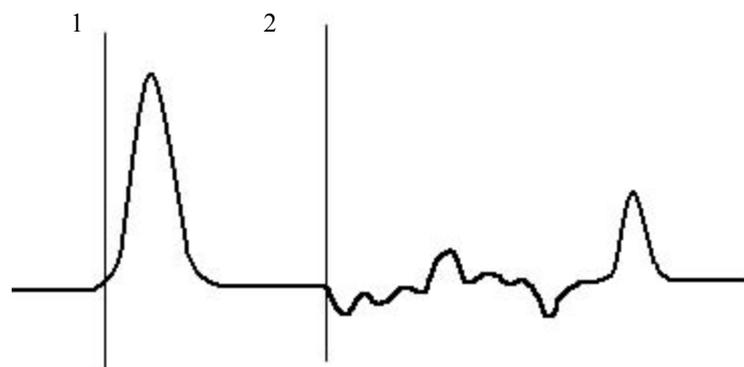
8. Внесение дополнительного сопротивления или сварочный шов приводят к появлению S-образного отражения на рефлектограмме. Высокоомное отражение сопровождается низкоомным.



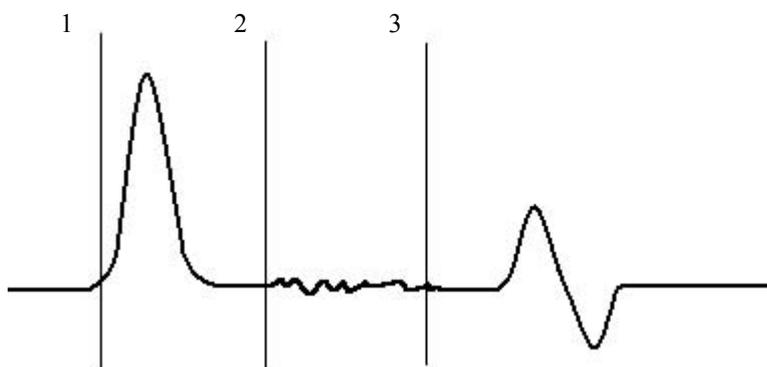
9. Хорошо согласованный кабель с терминатором поглощает полностью сигнал отражения. Такая рефлектограмма служит гарантией правильности выбора терминатора, который не вызывает отражения.



10. Замокание кабеля отражается на рефлектограмме как область случайного отражения. Начало этой области, показанное вторым курсором на рефлектограмме, соответствует началу области замокания кабеля.



11. Повышение влажности в кабелях приводит к появлению шумовой составляющей на рефлектограмме.



Тел./Факс: (812) 334-37-34, 334-37-37, 379-00-26

E-mail: info@ersted.ru www.ersted.ru



Бакланов И.Г. Методы измерений в системах связи. – М.: Изд-во «ЭКО-Трендз», 1999, 195 с.