

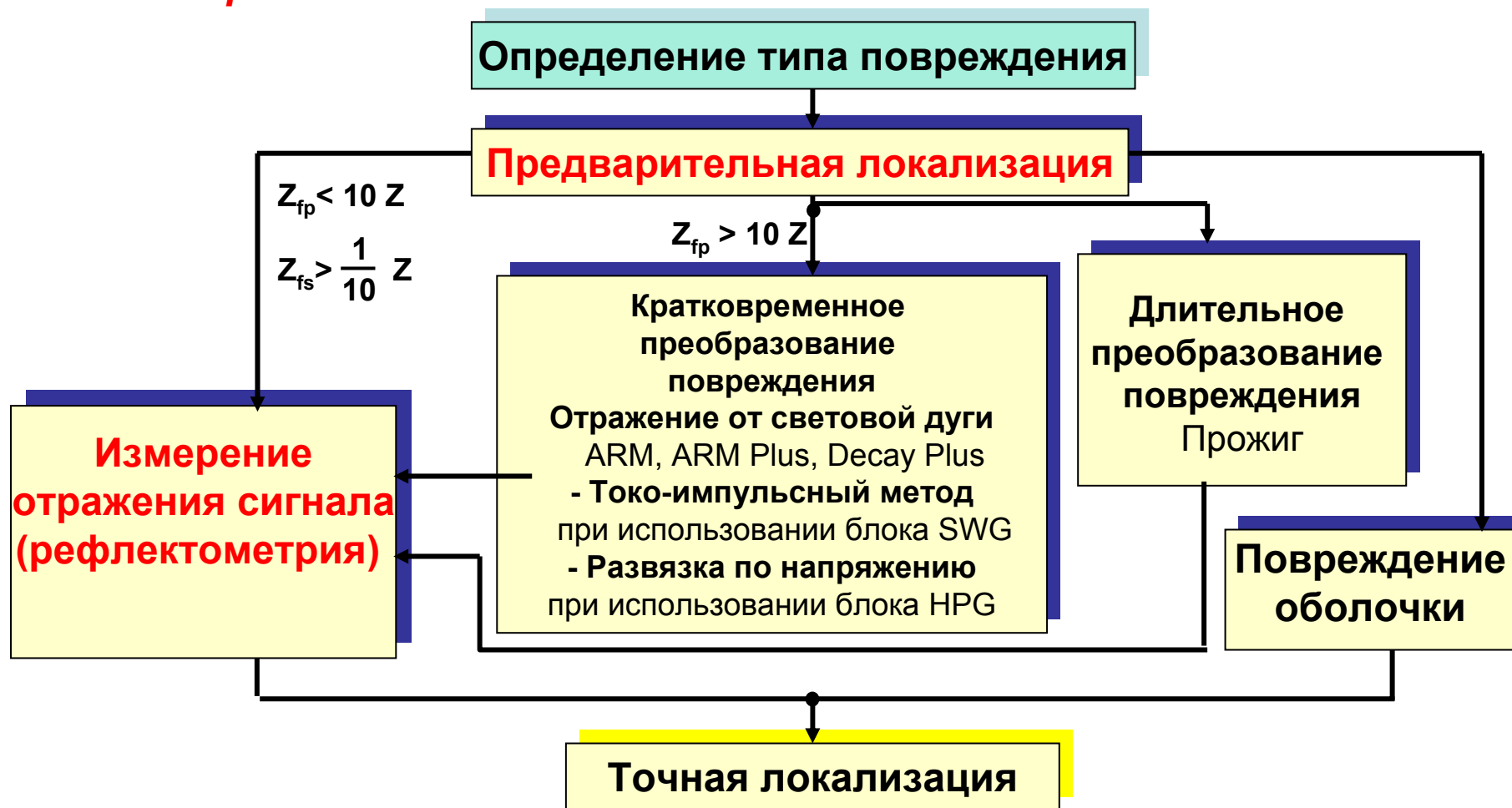


## ***Основы измерительной техники отражения***



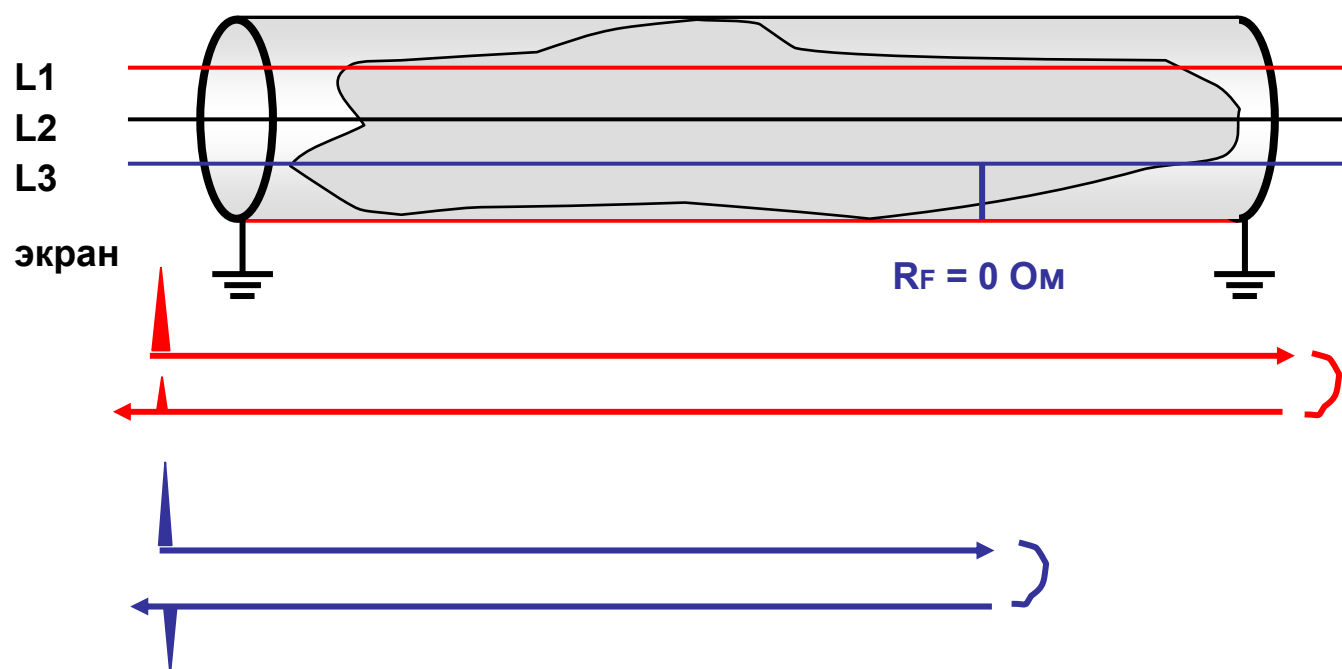


## Основы рефлектометрии Обзор





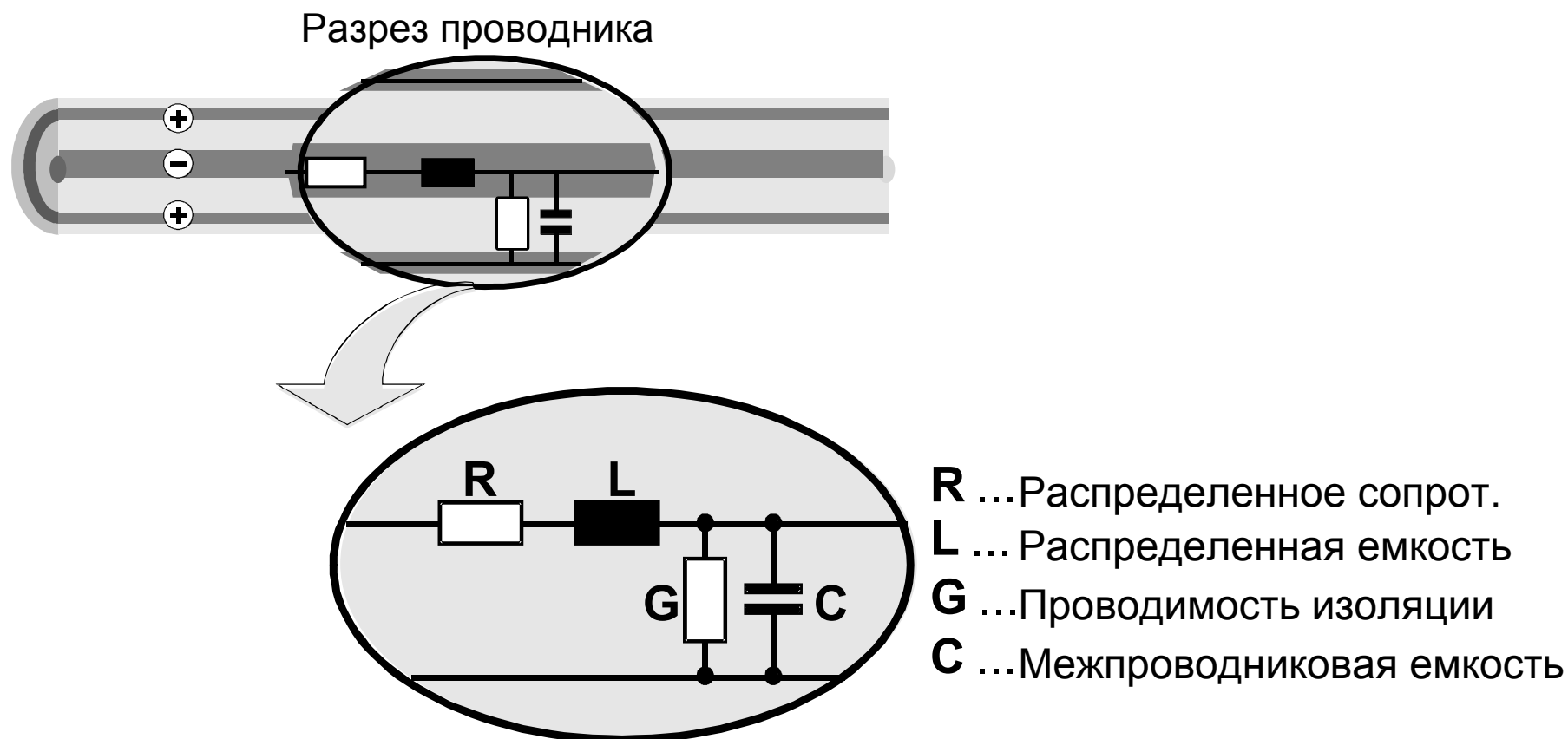
## Принцип измерительной техники отражения (рефлектометрия)



Рефлектометр (TDR) работает по принципу радиолокатора.  
Посланный в кабель импульс отражается в каждом изменении импеданса и возвращается к рефлектометру.  
По времени и скорости распространения  $v/2$  может определяться удаление.

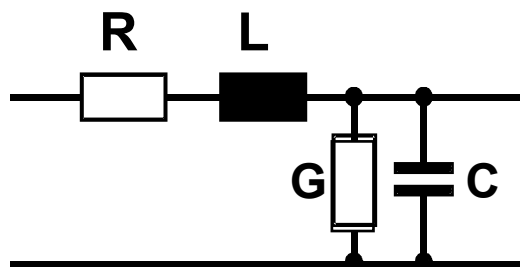


## Модель электрического проводника / схема замещения





## Модель электрического проводника / волновое сопротивление

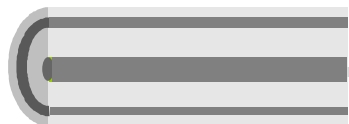


Омическое сопротивление ошибки зависит от **R** и **G**.

Волновое сопротивление **Z** проводника зависит от **L** и **C**.

Общая формула для расчета волнового сопротивления проводника:  $Z = \sqrt{\frac{R + j\omega \cdot L}{G + j\omega \cdot C}}$

Упрощенная формула для высоких частот:  
(напр. для импульса)  $Z = \sqrt{\frac{L}{C}}$



тонкий проводник  
большая протяженность

L	C	Z
выс.	низ.	выс.

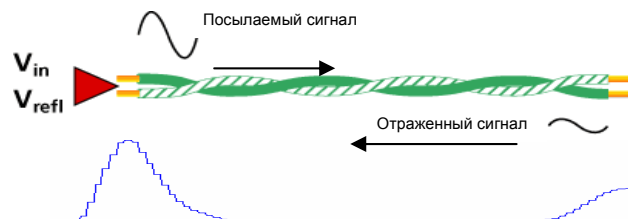


толстый проводник  
малая протяженность

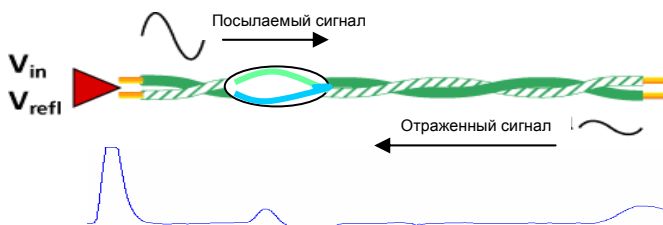
L	C	Z
низ.	выс.	низ.



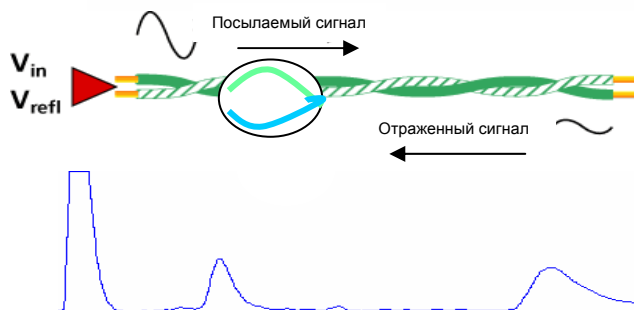
## Отражение при волновом сопротивлении



Изменения импеданца нет – нет отражения



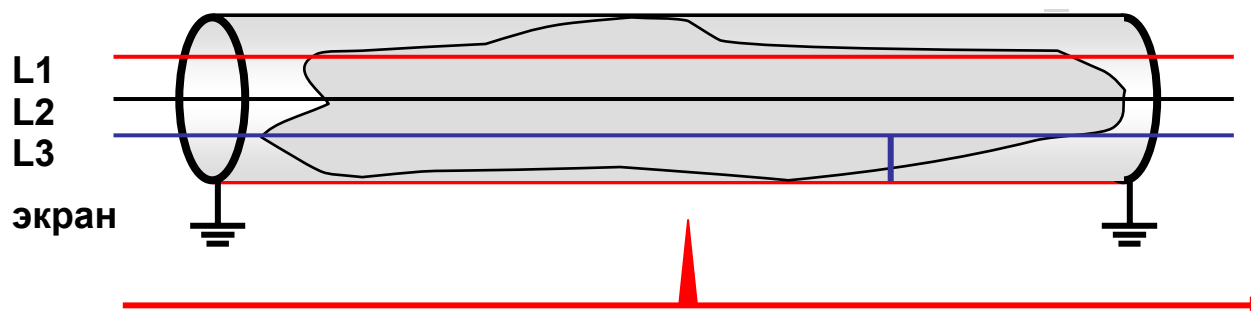
Незначительное изменение импеданца – отражение



Отчетливое изменение импеданца – отражение отчётливое, дающее основание для выводов



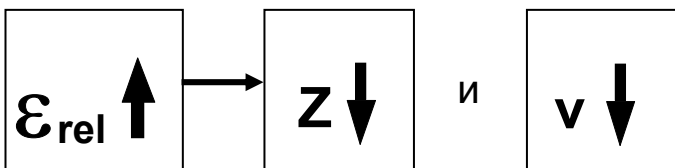
## Скорость распространения электрической волны



Диэлектрик	Значения $\epsilon_{rel}$
Вакуум	1
Иск. Матер.	2 до 4
Вода	81

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_{rel}}}$$

**v** Скорость распространения электрической волны  
**c** Скорость света (300м/μs)  
 **$\epsilon_{rel}$**  Относ. Диэлектрич. Коэффициц.



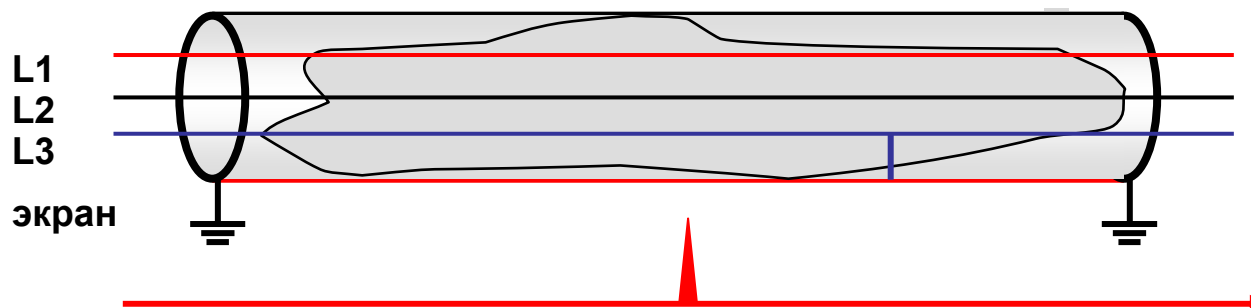
$$z = \sqrt{\frac{L}{C}}$$

**z** Волновое сопротивление  
**L** Индуктивность проводника  
**C** Емкость проводн.  **$C \sim \epsilon_{rel}$**





## **Скорость распространения - изменения**



Скорость распространения зависит от:

- волнового сопротивления (импеданс)
- диэлектрика, например- другой цвет изоляции
- старение кабеля
- температуры
- влажность (вода в кабеле примерно  $v/2$  = примерно 65 м /  $\mu$  сек)
- положение жил в кабеле (кабель связи)
- производителя кабеля (состав изоляционного материала)



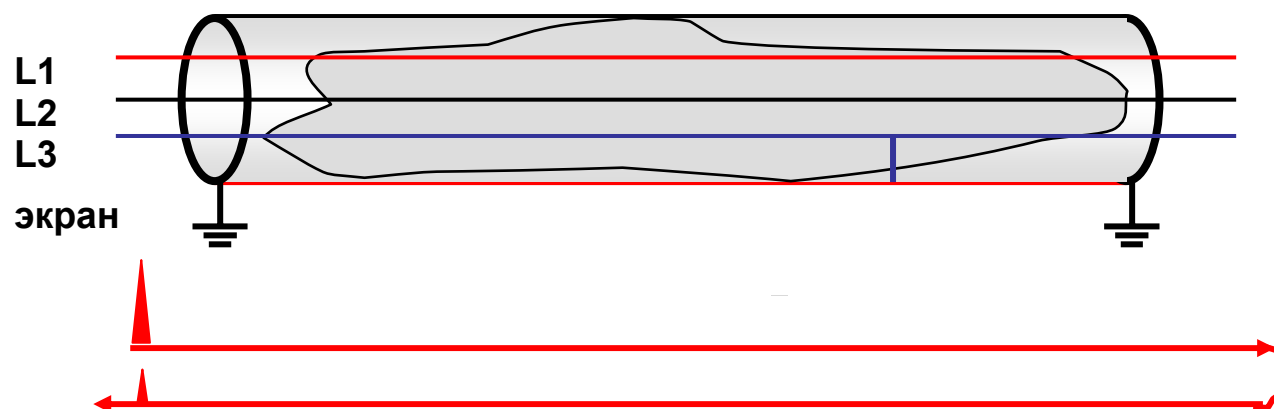


## Таблица V/2 для кабелей энергетики и телекоммуникаций

Тип кабеля (по VDE)	Изоляция	Диэл. пост. $\epsilon \cdot rel$	V/2 м/μ.сек	Величина разброса
A-2YF(L)2Y	PE/PE	2.3	94	мала
A-2Y(St)2Y	PE/PE	2.3	100	мала
A-02Y(LCo)2Y	Schaum-PE/PE пенистый	1.7	116	мала
A-PMbc	Papier-Masse/Бум.мас.	1.6	112(118)	110-126
A-PWE2Y	Papier-Masse/Бум.мас.	1.6	118	110-126
NAEKBA	Papier-Masse/Бум.мас.	3.5	80	77-83
NAKBA	Papier-Masse/Бум.мас.	3.5	80	77-85
NAKLEY	Papier-Masse/Бум.мас.	3.5	80	77-83
NAHEKB	Papier-Masse/Бум.мас.	3.5	80	77-83
NAKEBA	Papier-Masse/Бум.мас.	3.5	80	77-83
NKBA	Papier-Masse/Бум.мас.	3.5	80	77-85
NKLEY	Papier-Masse/Бум.мас.	3.5	80	77-83
NAYY	PVC/ПВХ	5.0	78	70-82
NAYCWY	PVC/ПВХ	5.0	75	69-78
NYUY	PVC/ПВХ	5.0	78	70-82
NYCWY	PVC/ПВХ	5.0	75	69-78
NA2XY	VPE/СПЕ-ПВХ	2.3	85	мала
NA2XSY	VPE/СПЕ-ПВХ	2.3	85	82-86
NA2XSYV	VPE/СПЕ-ПВХ	2.3	85	82-86
NA2XS(F)2Y	VPE/СПЕ-ПВХ	2.3	85	82-86
N2XSY	VPE/СПЕ-ПВХ	2.3	85	82-86



## Время распространения и длина проводника



$$l_x = \left( \frac{v}{2} \right) \cdot t_x$$

$\left( \frac{v}{2} \right)$  половина скорости распространения

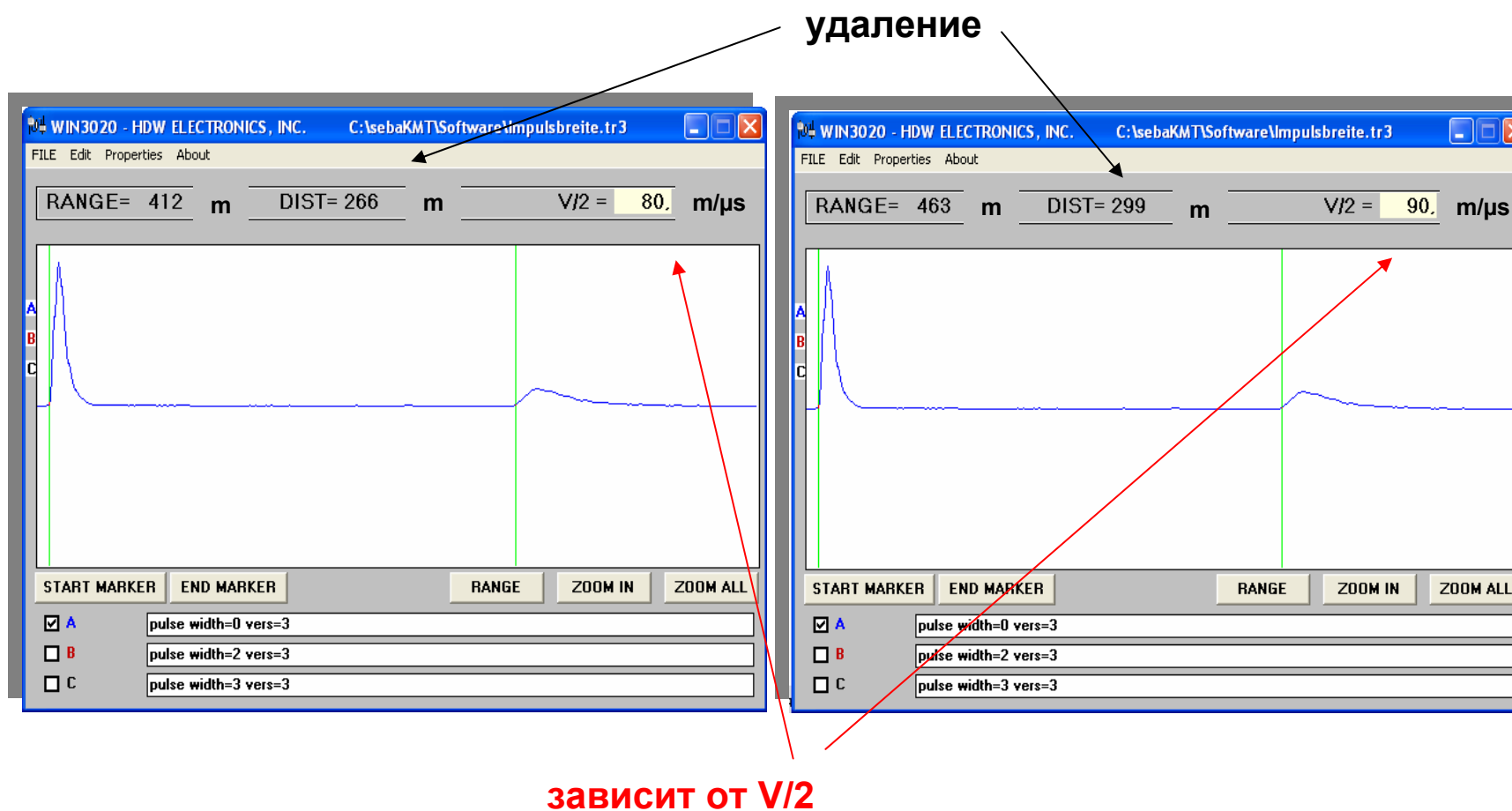
**v** Скорость распространения электрической волны

**t<sub>x</sub>** Время пробега импульса до конца проводника и обратно

**l<sub>x</sub>** Длина проводника

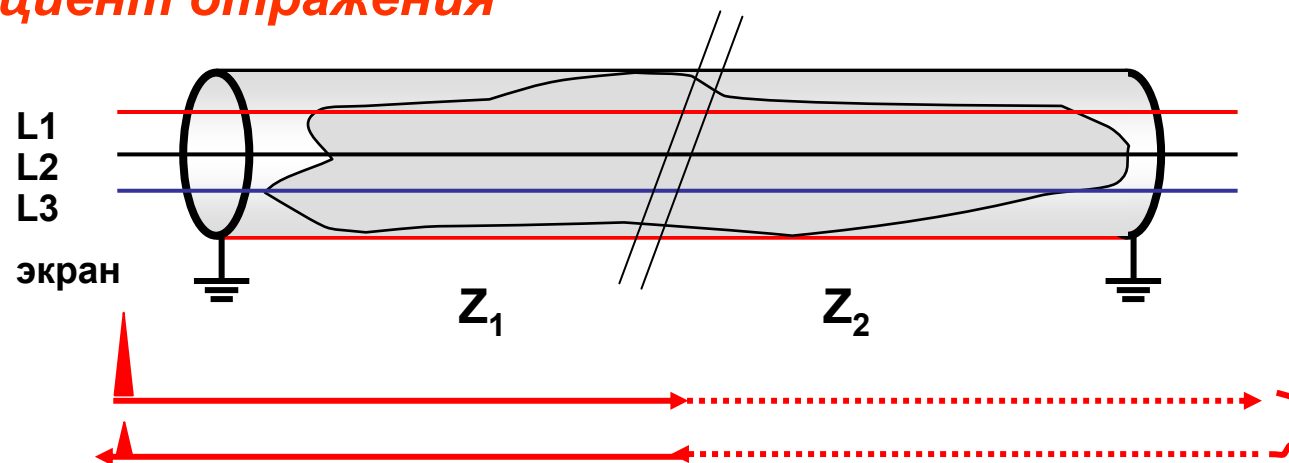


## Время распространения и длина проводника





## Коэффициент отражения



$$r = \frac{U_R}{U_S}$$

$$r = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1}$$

$r$  Коэффициент отражения

$U_S$  Исходный сигнал

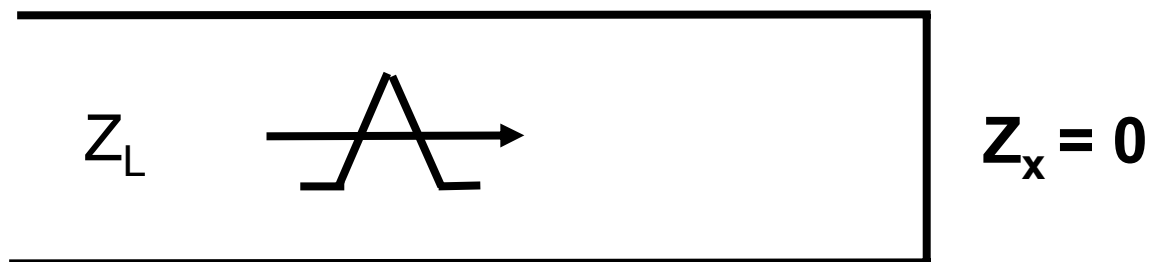
$U_R$  Отраженный сигнал

$z_1$  Волновое сопротивление  
первого проводника

$z_2$  Волновое сопротивление  
второго проводника



## Коэффициент отражения - короткое замыкание



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

Короткое замыкание:  $Z_x = 0 \Rightarrow r = -1$  отрицательное отражение



## Предварительная локализация отраженного (эхо) импульса

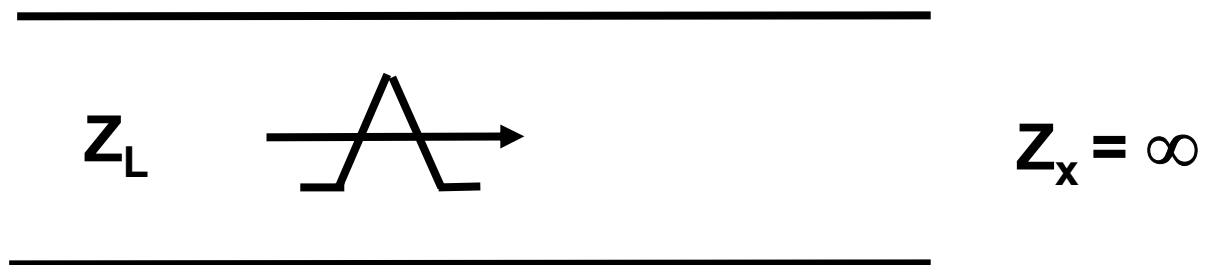


Короткое замыкание

$$Z_x = 0$$



### *Коэффициент отражения - свободный конец*

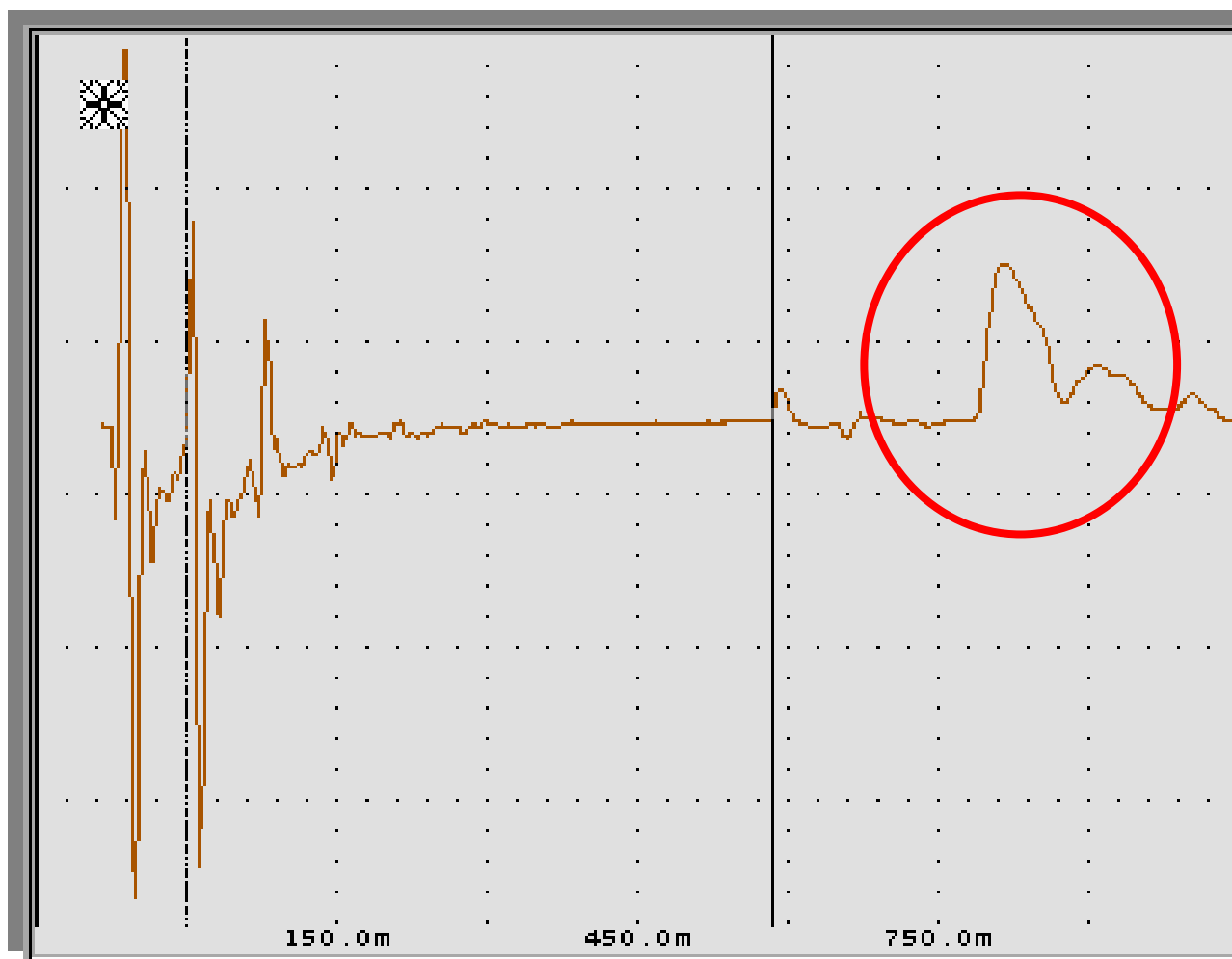


$$r = \frac{Z_x - Z_L}{Z_x + Z_L} = \frac{\infty - Z_L}{\infty + Z_L} = \frac{\infty}{\infty} = 1$$





## Предварительная локализация отраженного (эхо) импульса

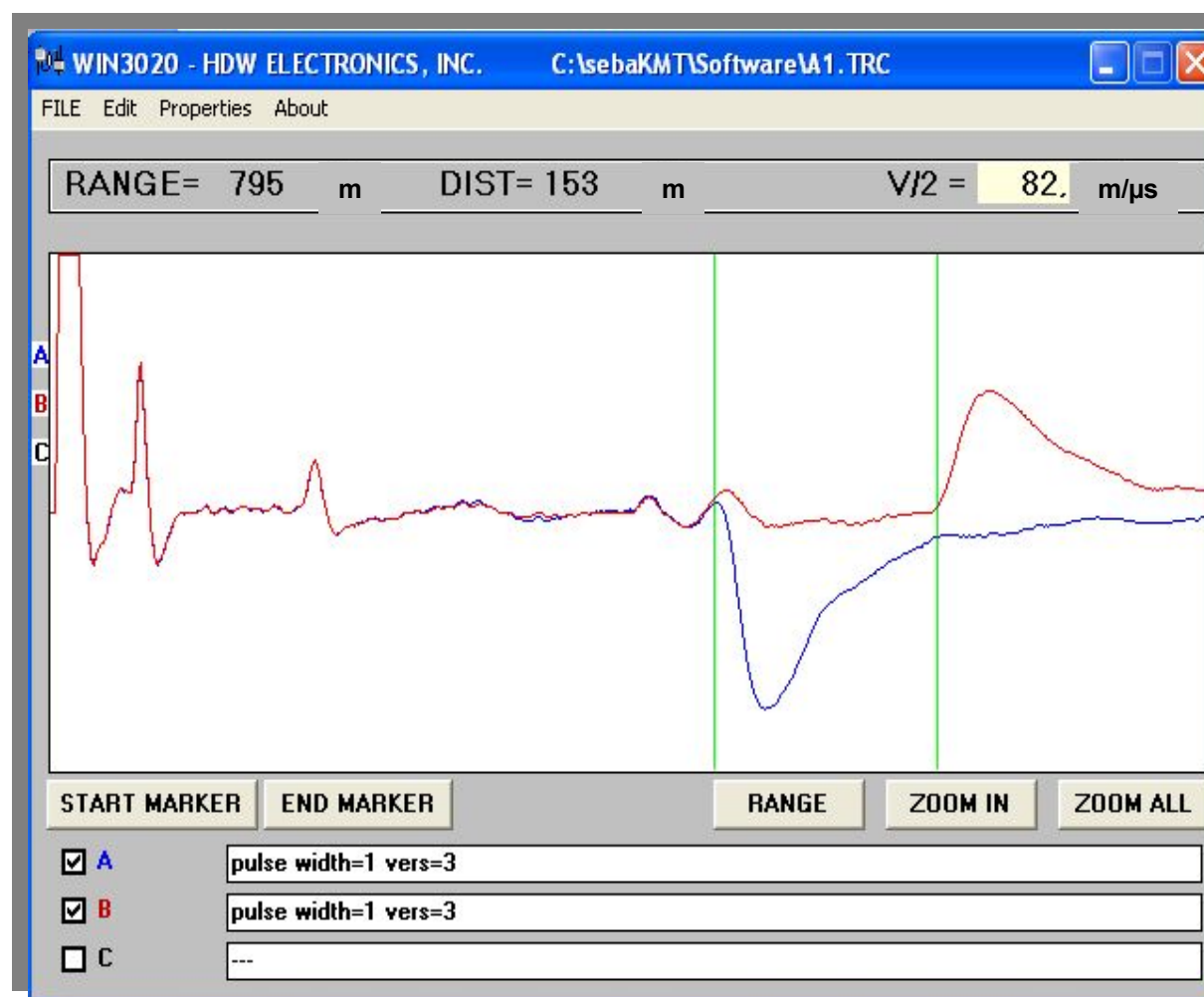


Свободный  
конец

$$Z_x = \infty$$

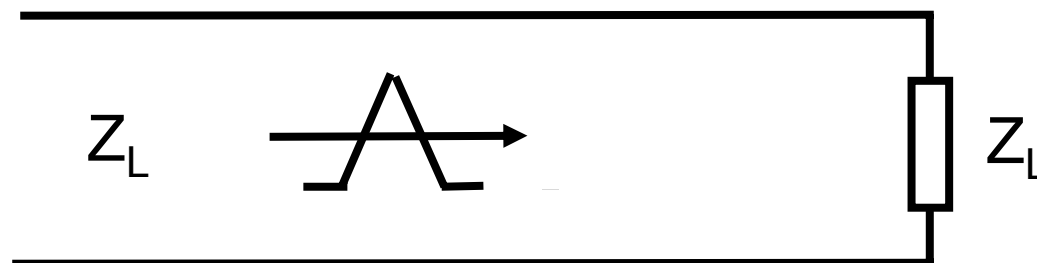


## Типичные картины отражения (измеренные)





**Коэффициент отражения - окончание проводника с волновым сопротивлением**

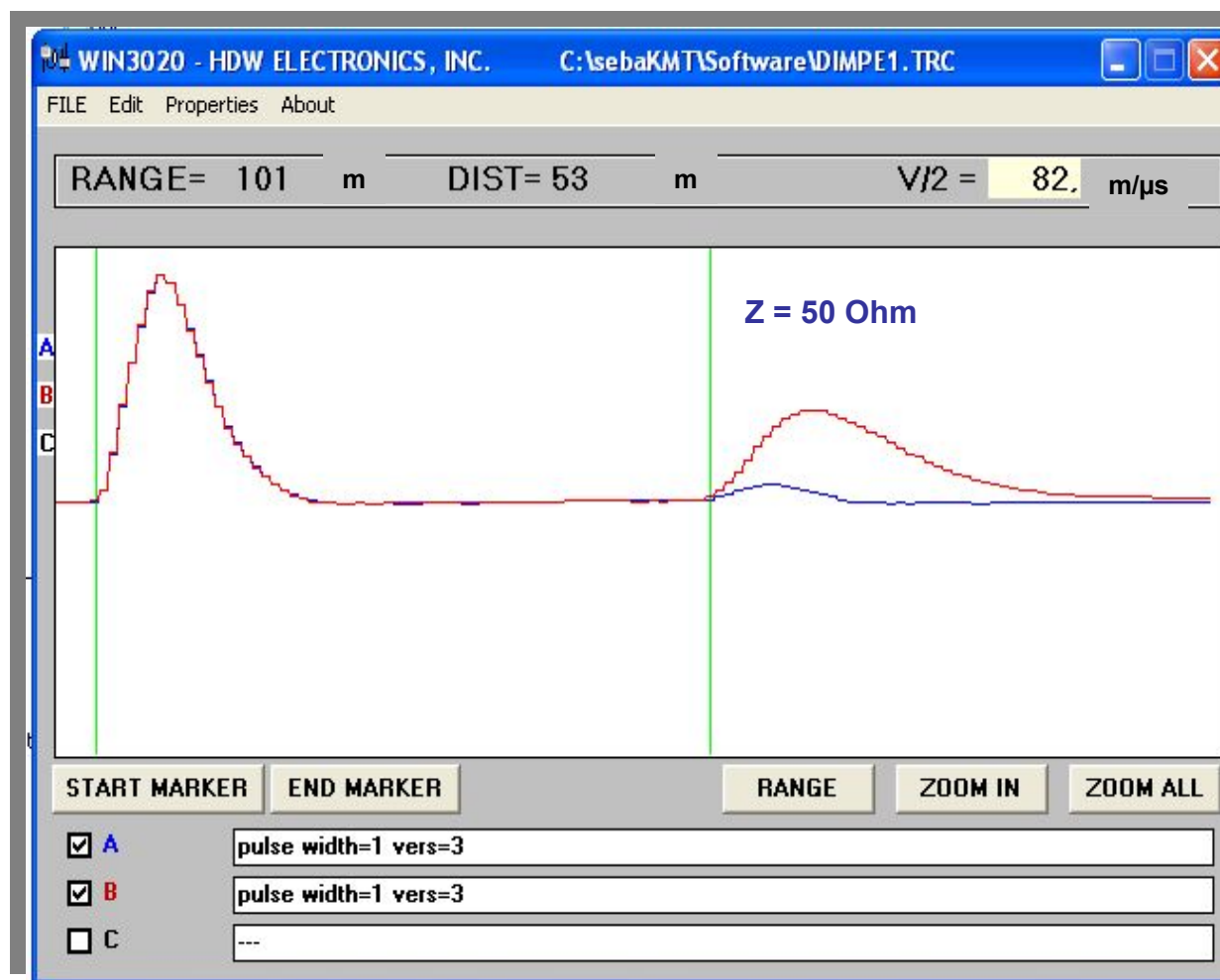


**для  $Z_x = Z_L \longrightarrow r = 0$**

Нет отражения

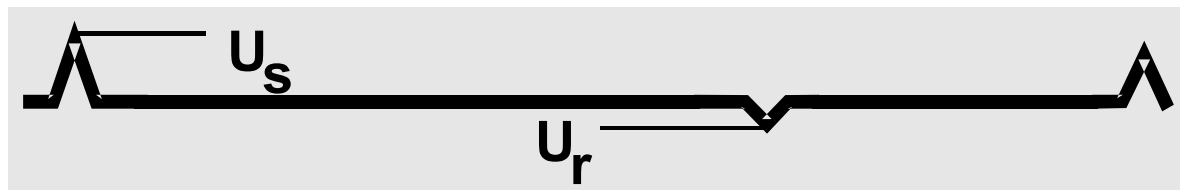


## Коэффициент отражения - окончание проводника с волновым сопротивлением

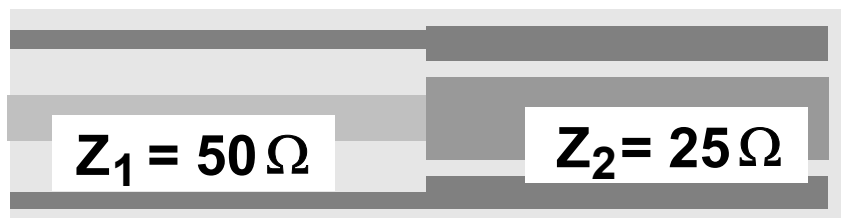




## Коэффициент отражения (арифметический пример)



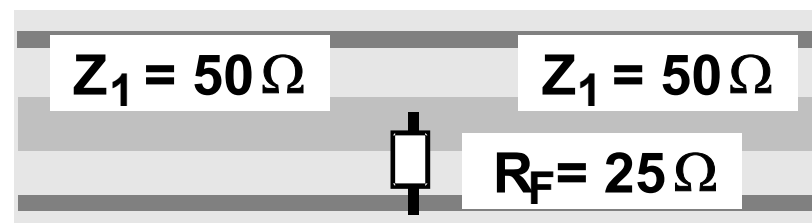
1. Проводники с различным волновым сопротивлением  
(напр. разные типы кабеля)



$$r = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} = \frac{25 \Omega - 50 \Omega}{25 \Omega + 50 \Omega} =$$

$$r = \frac{-25 \Omega}{75 \Omega} = -\frac{1}{3}$$

2. Проводники с омическими повреждениями  
(напр. повреждение изоляции)



$$Z_2 = Z_1 \parallel R_F = 25 \Omega$$

$$r = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} = \frac{25 \Omega - 50 \Omega}{25 \Omega + 50 \Omega} =$$

$$r = \frac{-25 \Omega}{75 \Omega} = -\frac{1}{3}$$



**Коэффициент отражения при различных сопротивлениях  
неисправностей и волновом сопротивлении**

Параллельные неисправности

R Ohm	0.5	1	2	5	10	20	50	100	200	500	1000
Z=20 r%	95	91	83	66	50	33	16	9	5	2	1
Z=60 r%	98	96	93	85	75	60	37	23	13	5	3
Z=120 r%	99	98	96	92	85	75	54	37	23	10	5

$$r = \frac{-Z \cdot 100}{2R + Z} \%$$



**Коэффициент отражения при различных сопротивлениях  
неисправностей и волновом сопротивлении**

Продольные неисправности

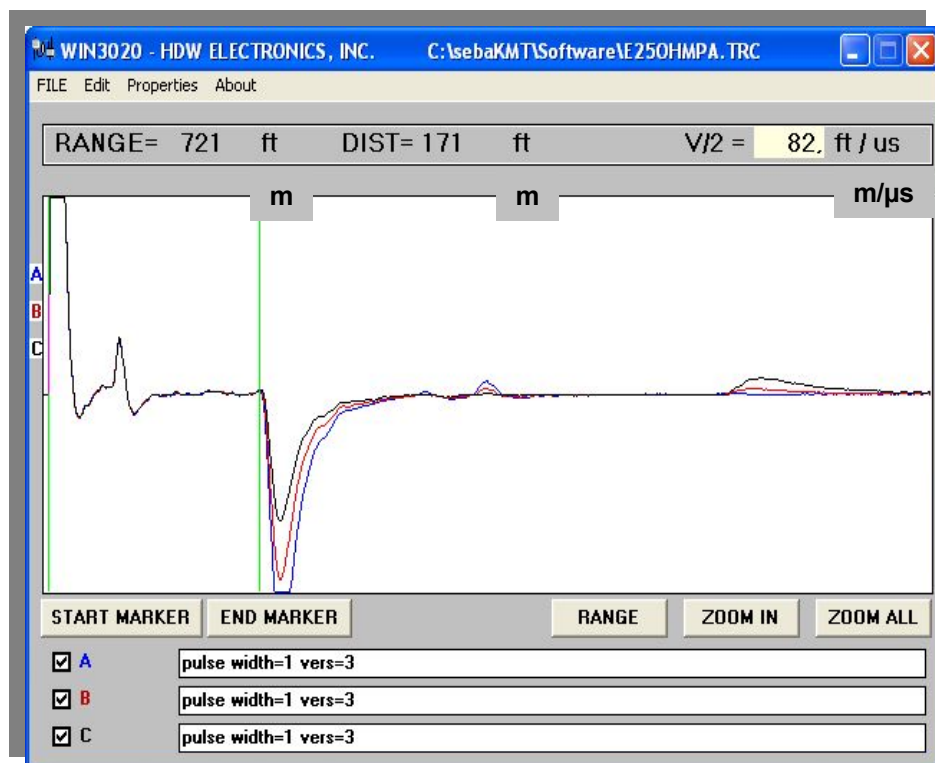
R Ohm	2000	1000	500	200	100	50	20	10	5	2	1
Z=20 r%	98	96	92	83	71	55	33	20	11	5	3
Z=60 r%	94	89	80	62	45	29	14	8	4	2	1
Z=120 r%	89	80	67	45	29	17	8	4	2	1	

$$r = \frac{R \cdot 100}{2 Z + R} \%$$

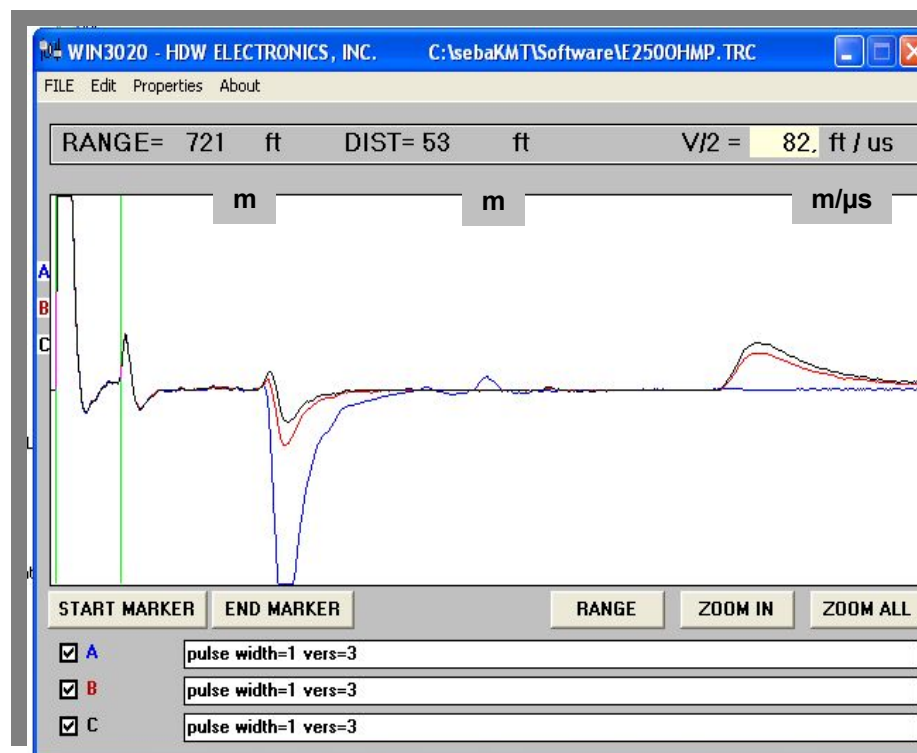




## Типичные картины отражения (измерение параллельных повреждений)



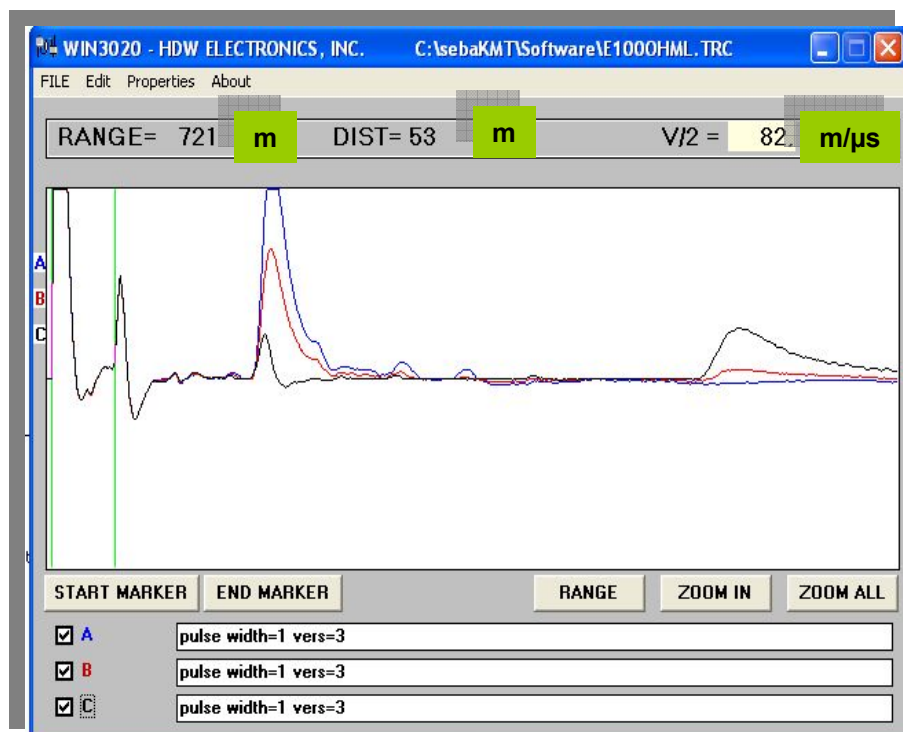
$R_{\text{параллельно}} = 0 \text{ Ом}$   
 $R_{\text{параллельно}} = 10 \text{ Ом}$   
 $R_{\text{параллельно}} = 50 \text{ Ом}$



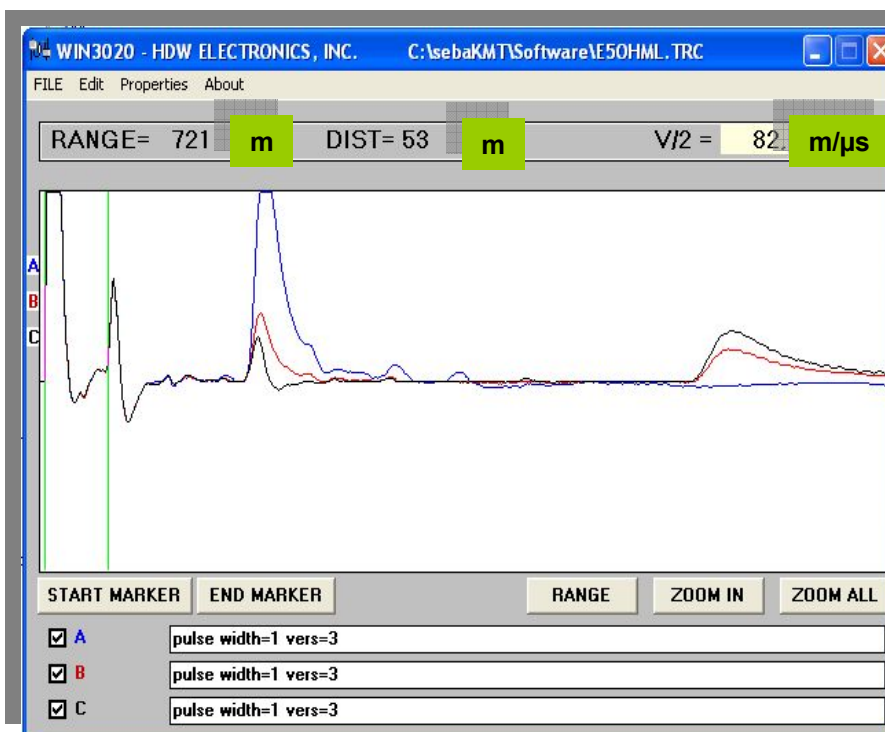
$R_{\text{параллельно}} = 0 \text{ Ом}$   
 $R_{\text{параллельно}} = 100 \text{ Ом}$   
 $R_{\text{параллельно}} = 250 \text{ Ом}$



## Типичные картины отражения (измерение продольных повреждений)



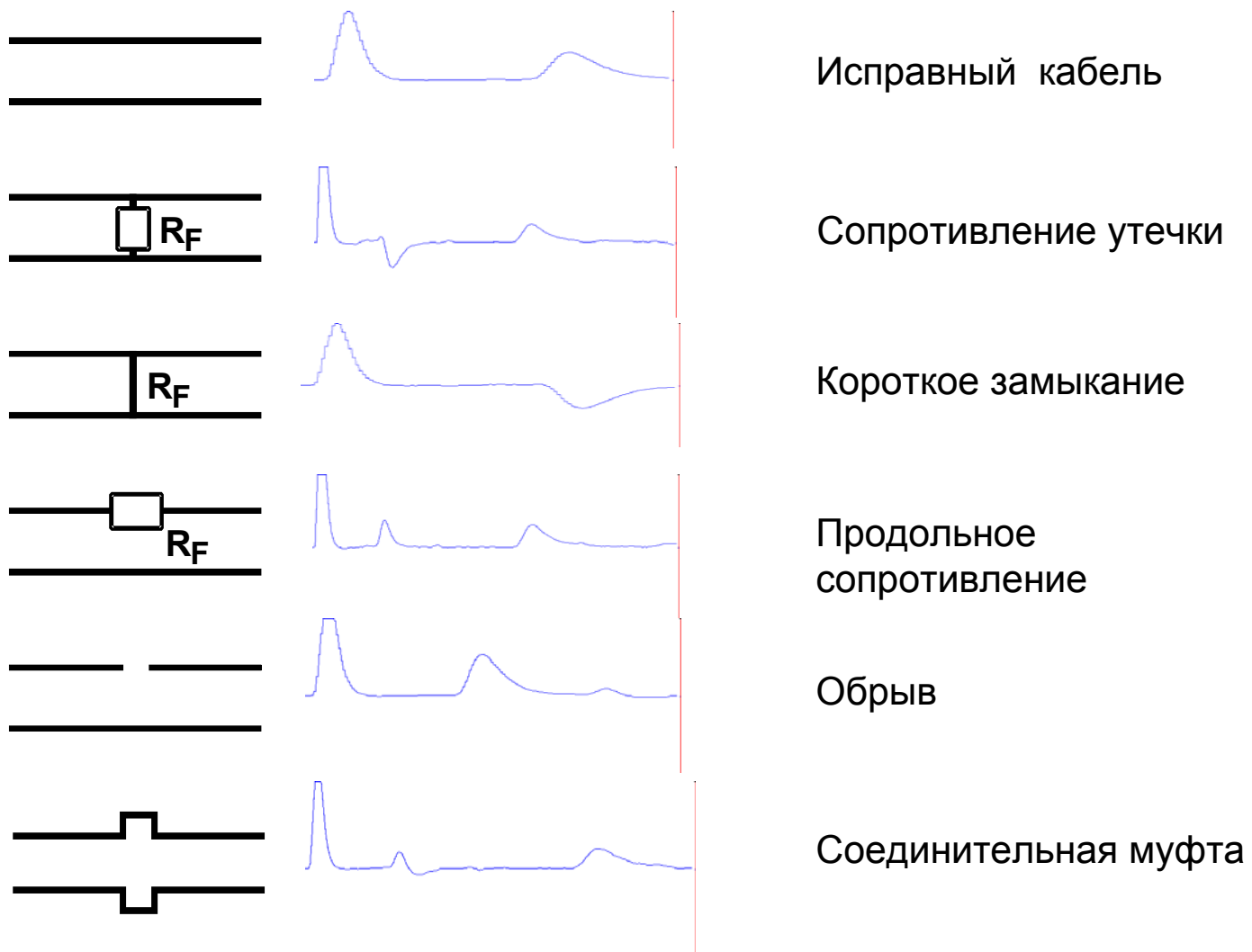
$R_{\text{последовательно}} = \text{бесконечно}$   
 $R_{\text{последовательно}} = 250 \text{ Ом}$   
 $R_{\text{последовательно}} = 10 \text{ Ом}$



$R_{\text{последовательно}} = \text{бесконечно}$   
 $R_{\text{последовательно}} = 100 \text{ Ом}$   
 $R_{\text{последовательно}} = 10 \text{ Ом}$

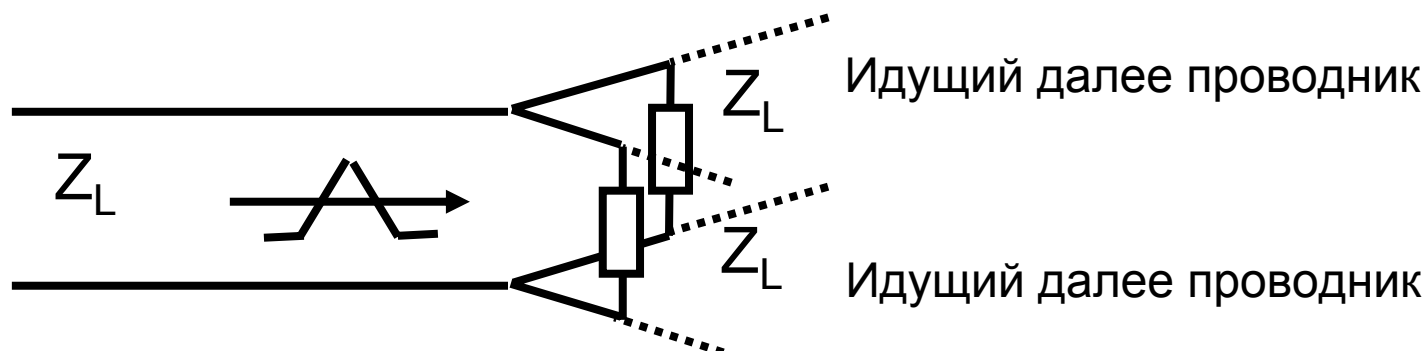


## Типичные картины отражения (идеализировано)





## Коэффициент отражения - ответвление

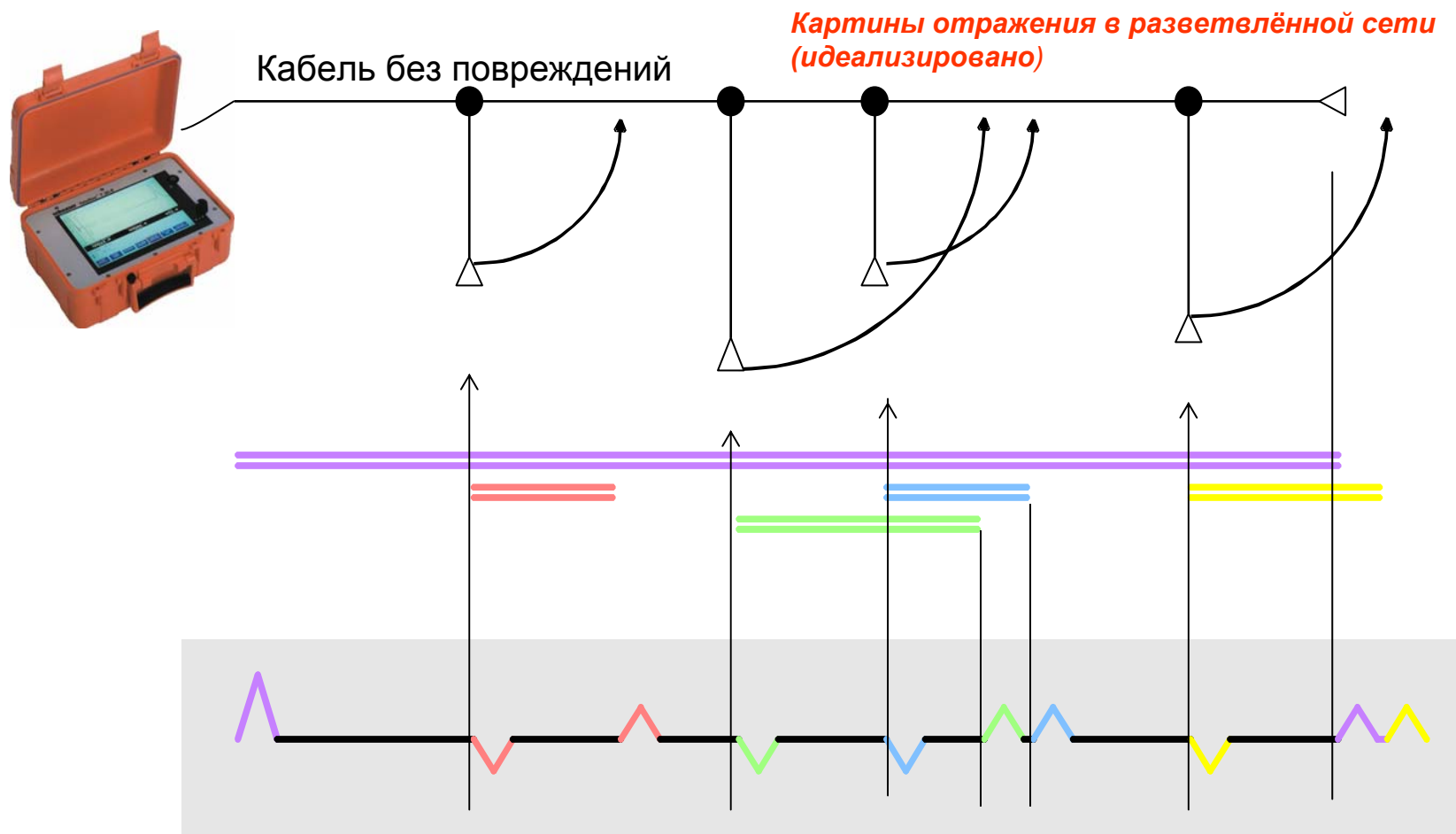


$$Z_X = \frac{Z_L^2}{2 \times Z_L} = \frac{1}{2} Z_L$$

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

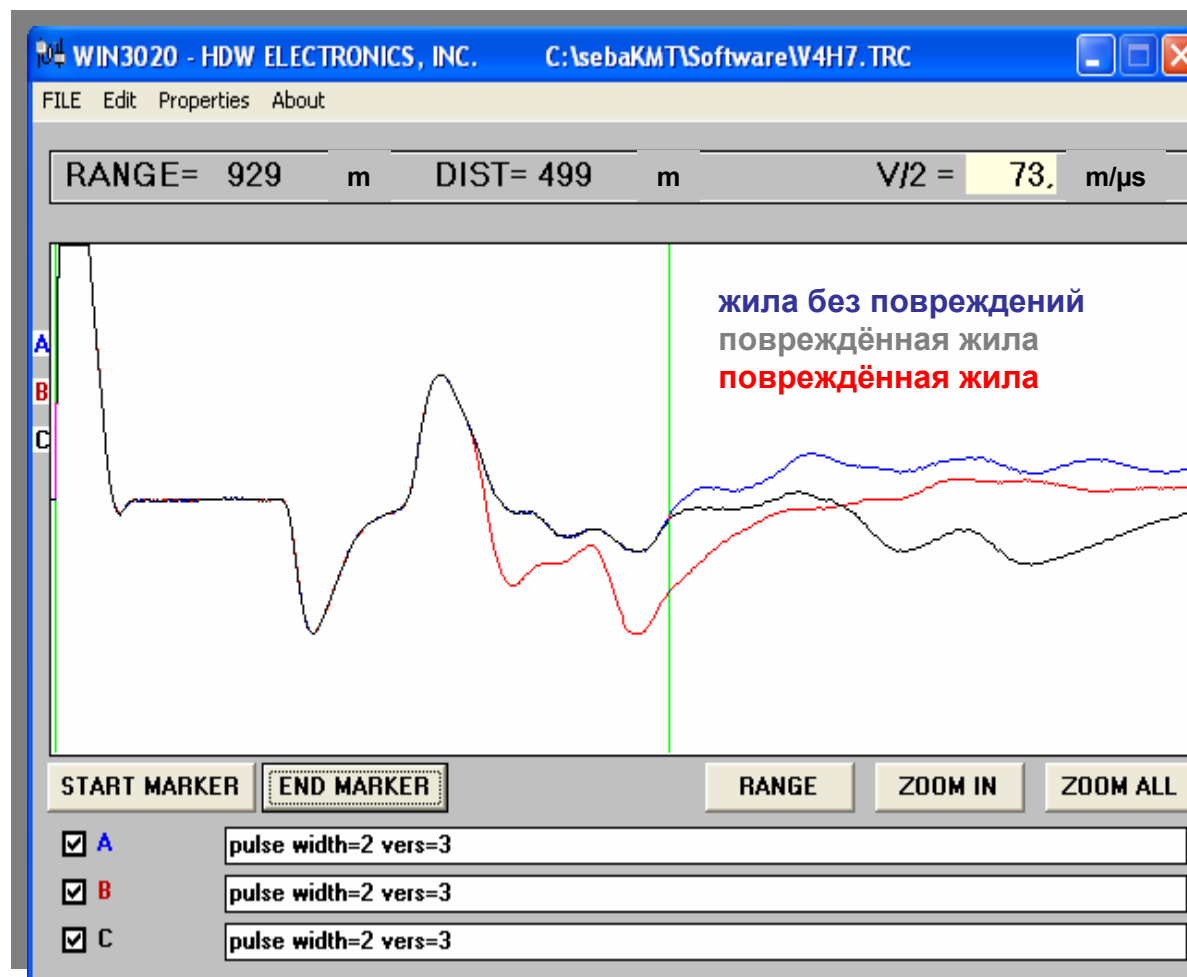


## Картины отражений в разветвлённой сети (идеализировано)





## Картина отражений в разветвлённой сети (пример)

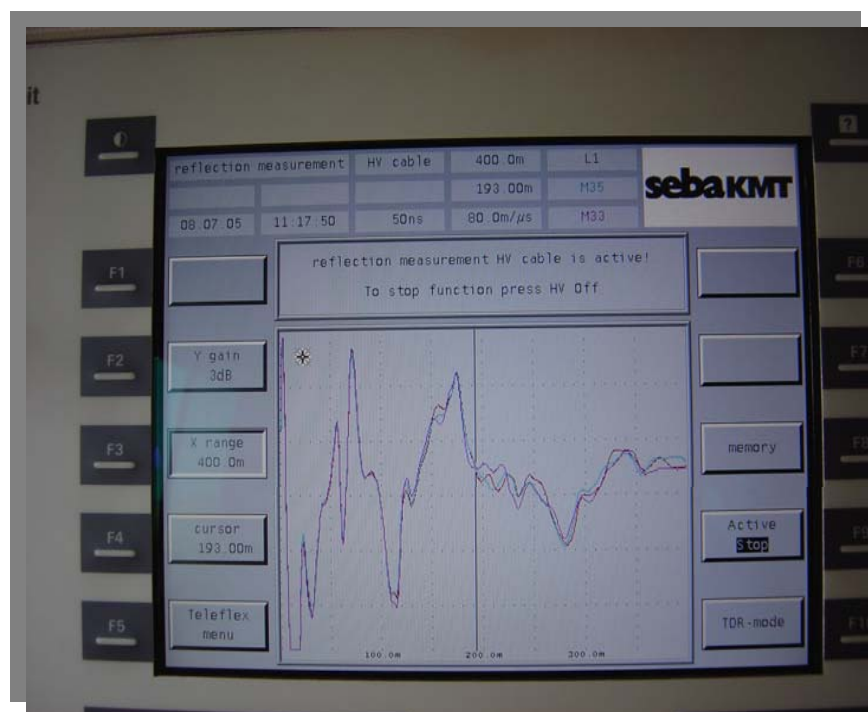






seba KMT

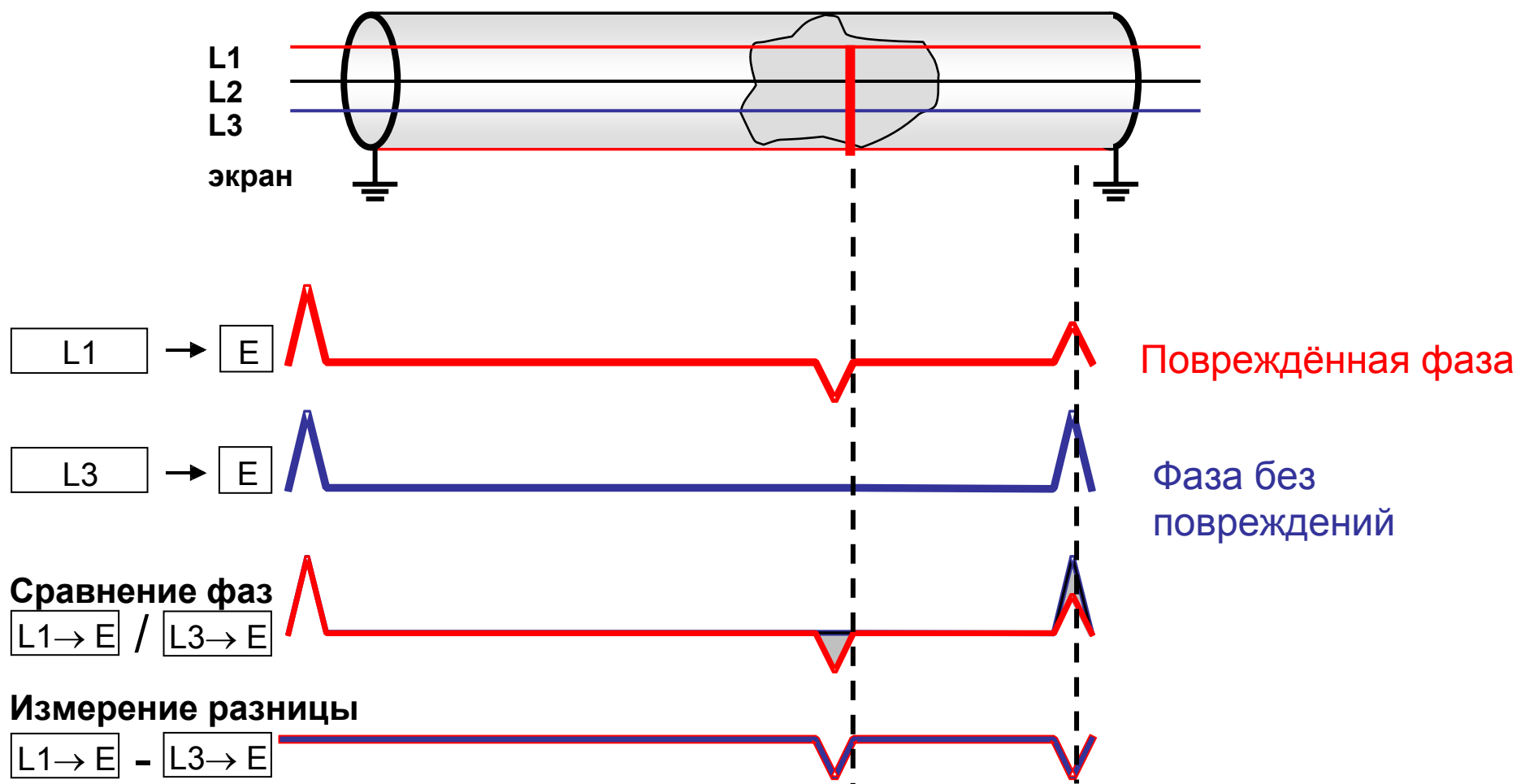
## Картина отражения в разветвлённой сети (пример в Австралии)





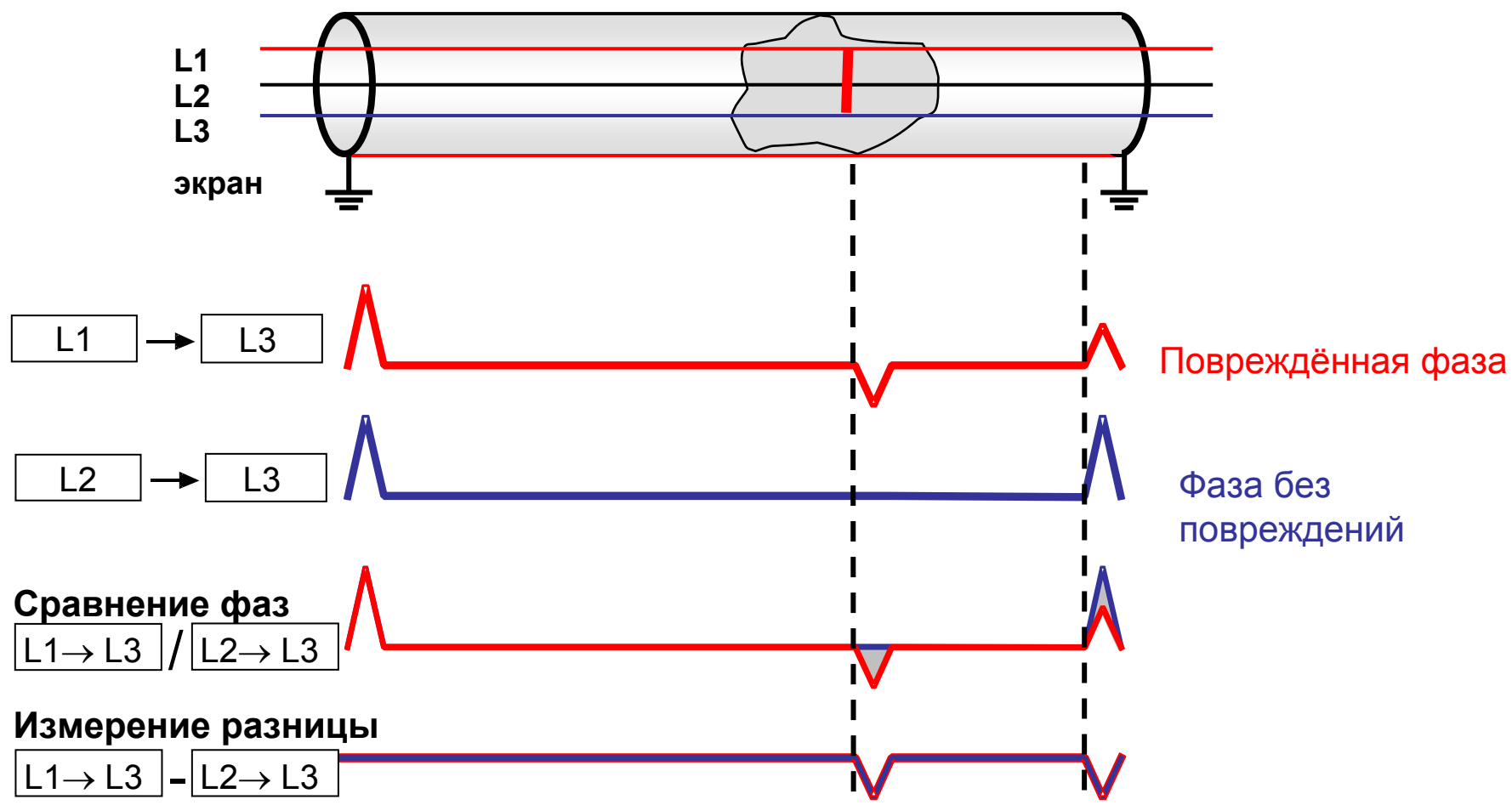


## Повреждение жила-экран





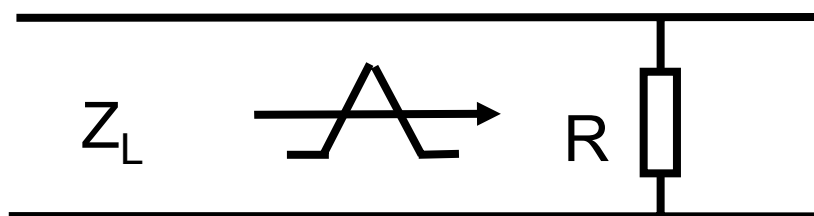
## Повреждение жила – жила



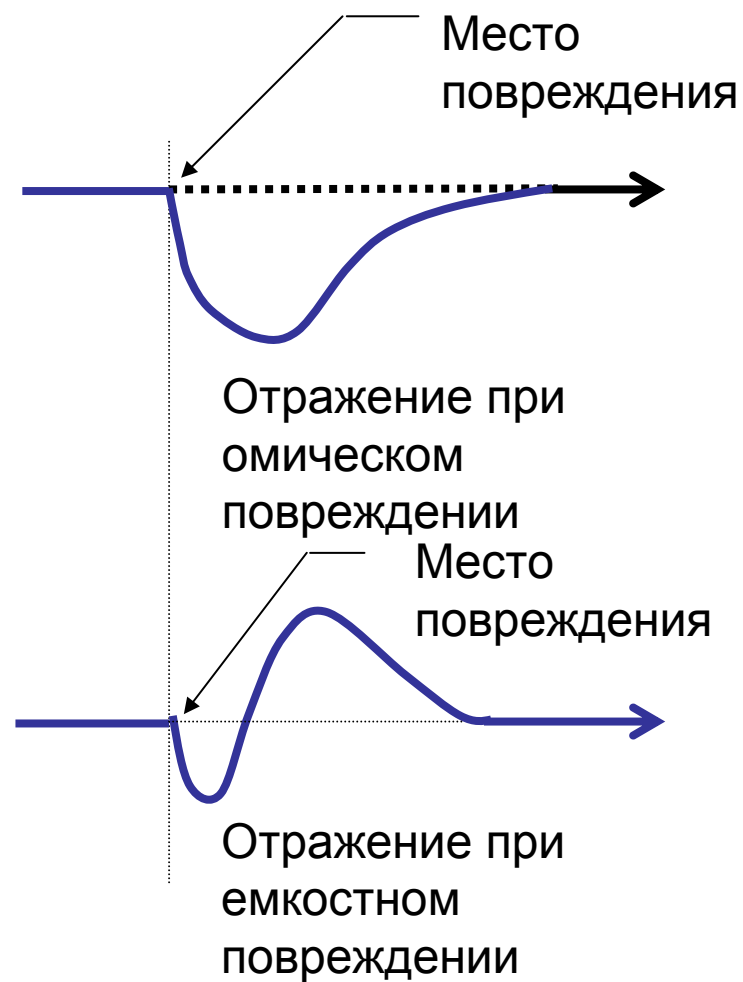
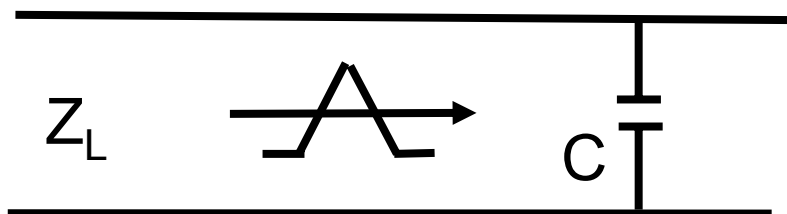


## Омическое повреждение:

(как разветвление)

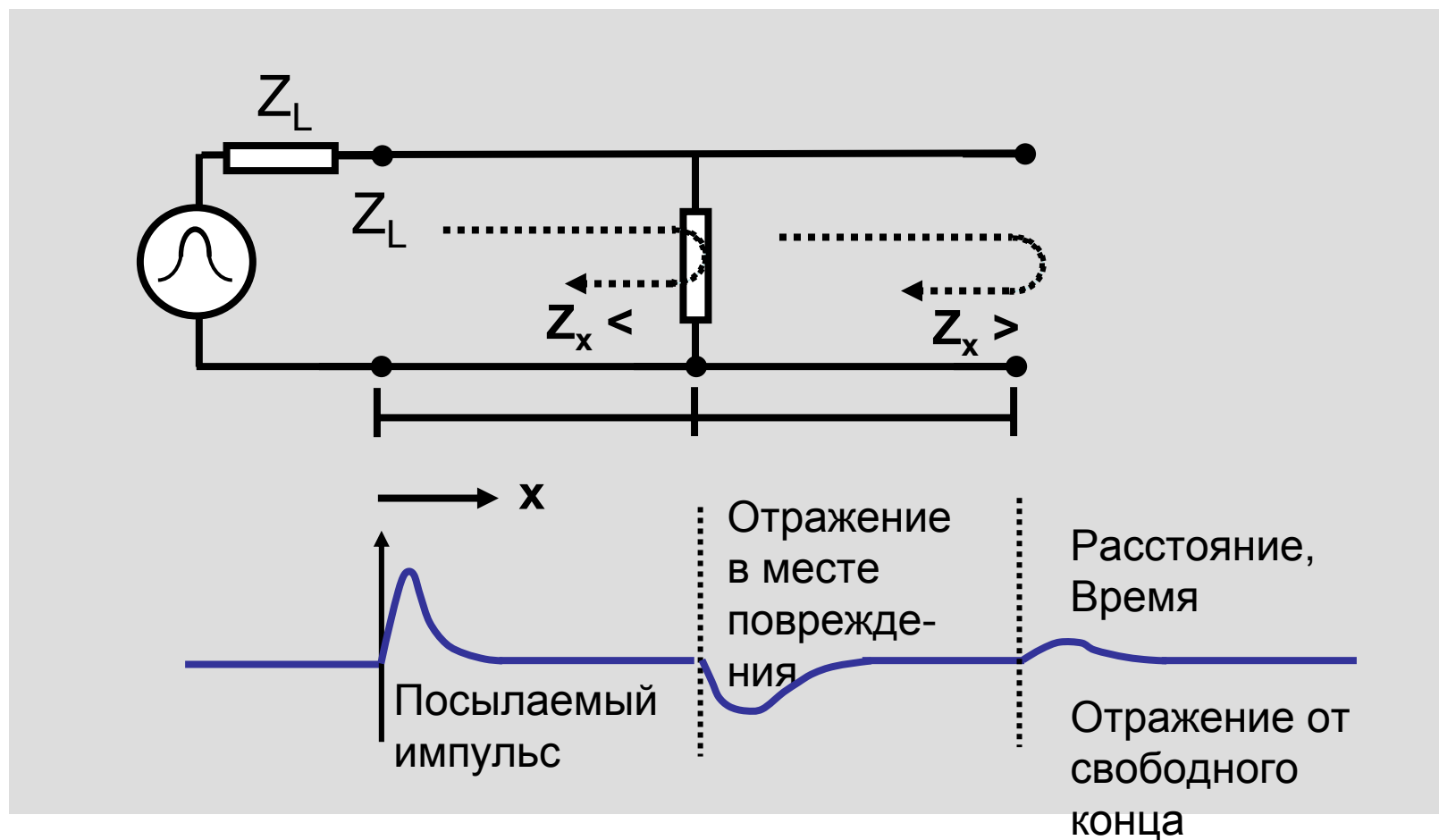


## Емкостное повреждение:



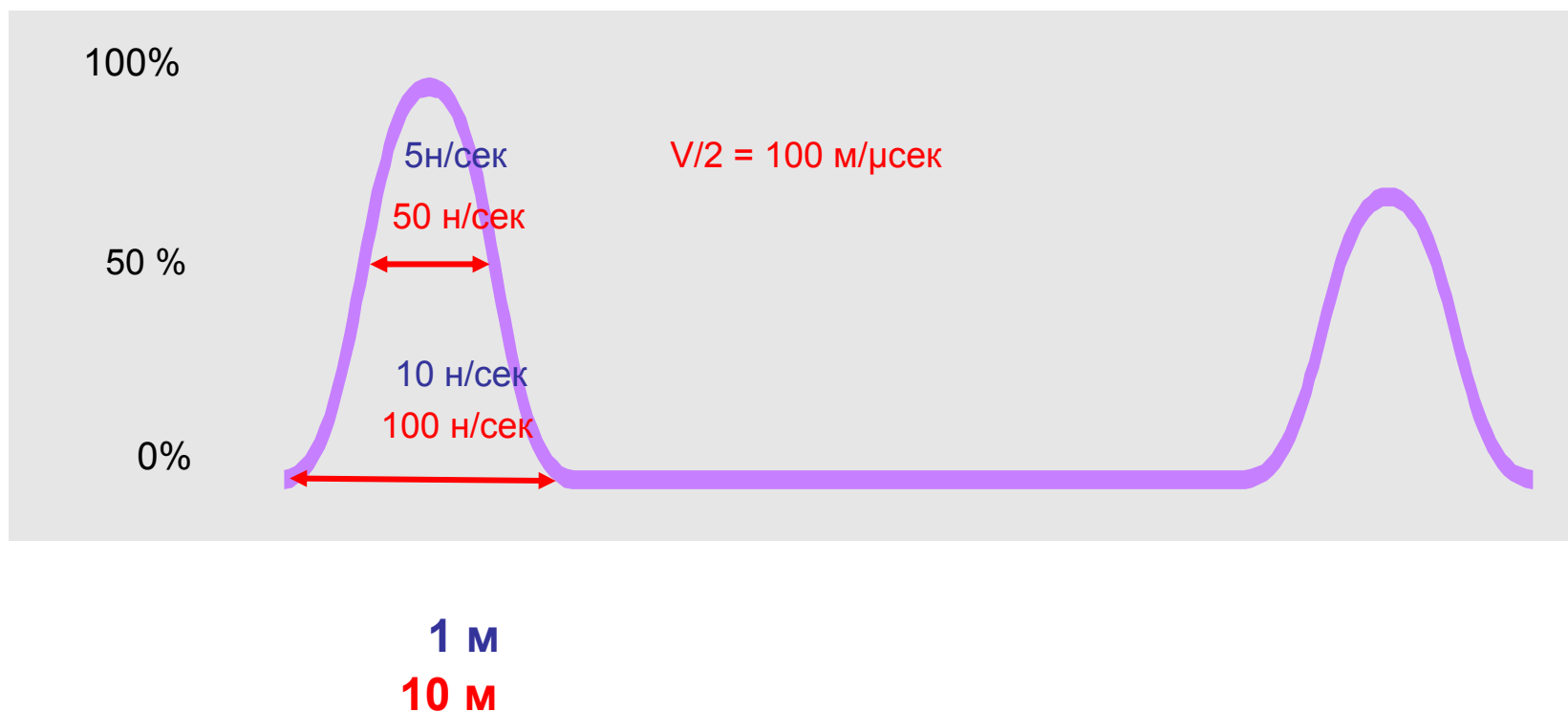


## Несколько отражений - потери энергии



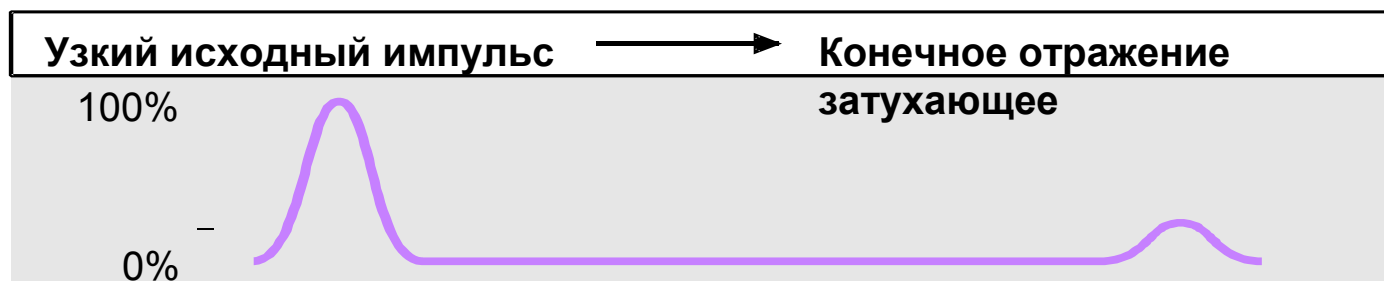


## Определение - влияния ширины импульса

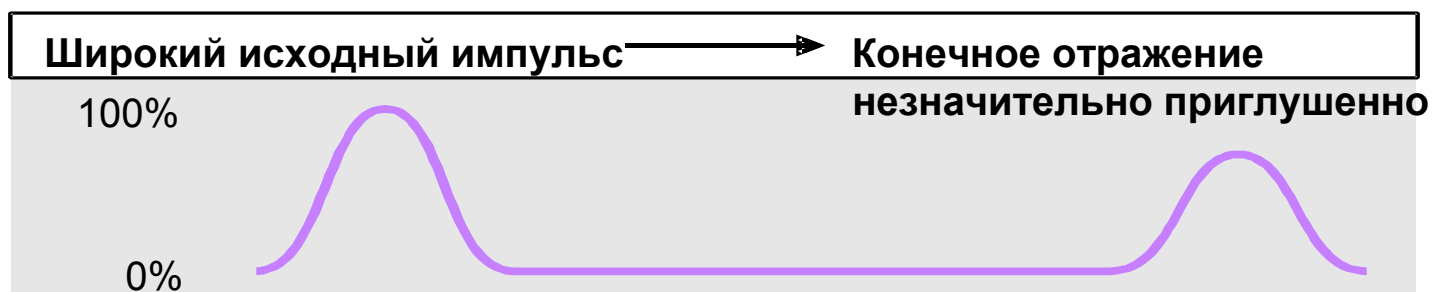




## **Влияние ширины импульса – расстояние до повреждения**



Причина сильного затухания: спектр импульса содержит очень высокочастотные составляющие.



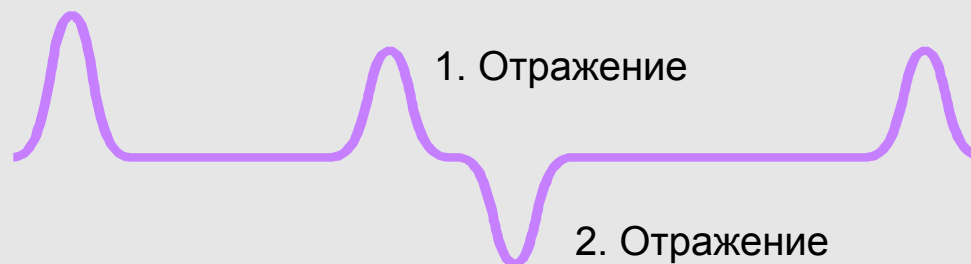
Причина незначительного затухания: спектр импульса содержит меньшее количество высокочастотных составляющих.



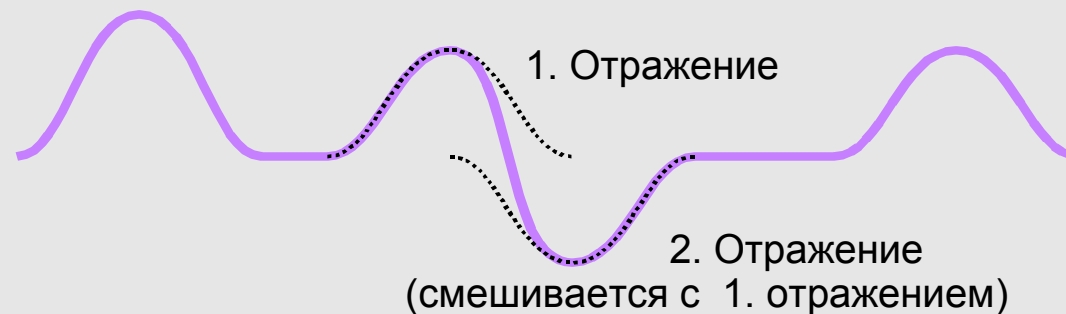
## Влияние ширины импульса - разрешение



Узкий исходный импульс → Различимы отдельные отражения



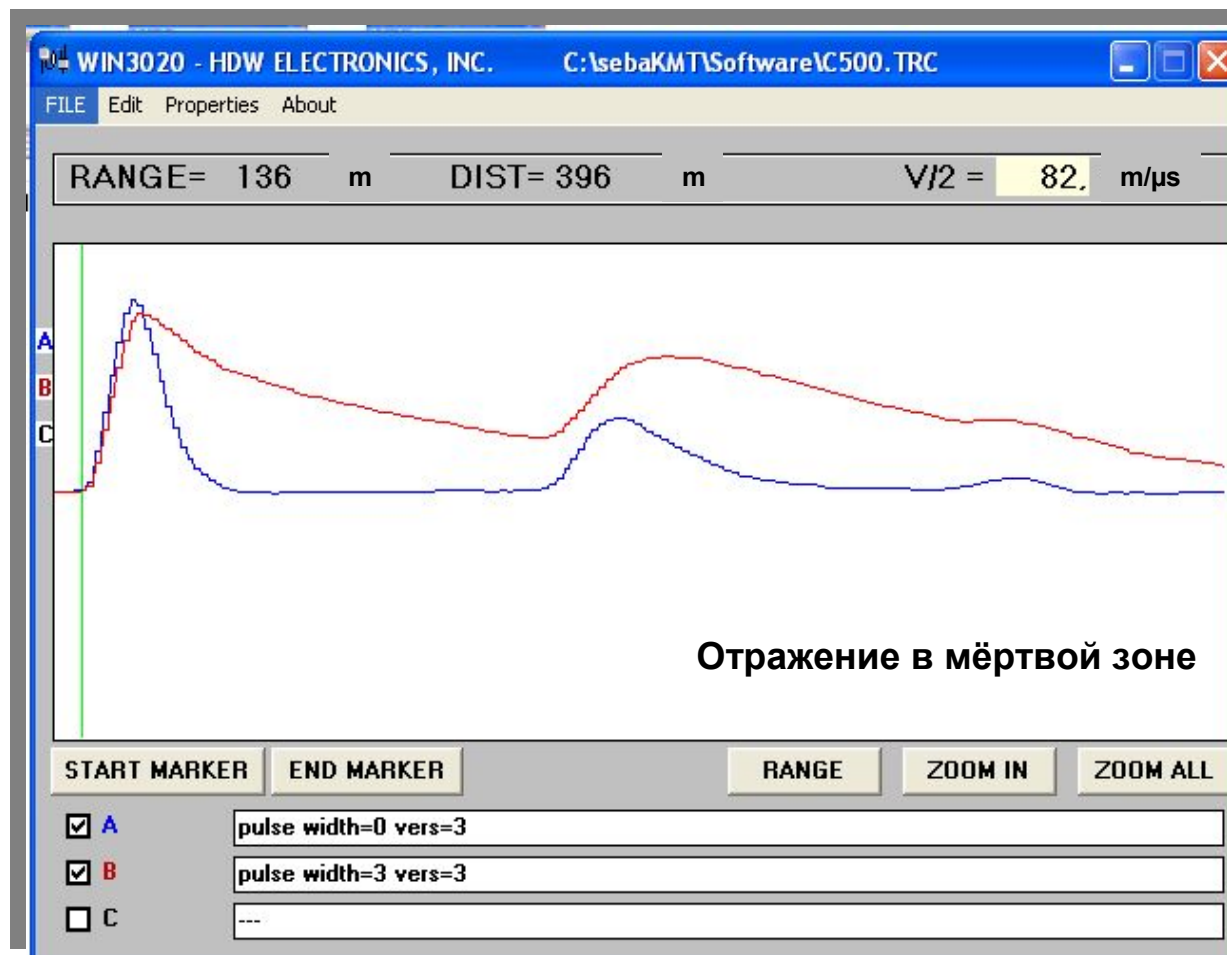
Широкий исходный импульс → Отдельные отражения неразличимы







## Влияние ширины импульса – мёртвая зона

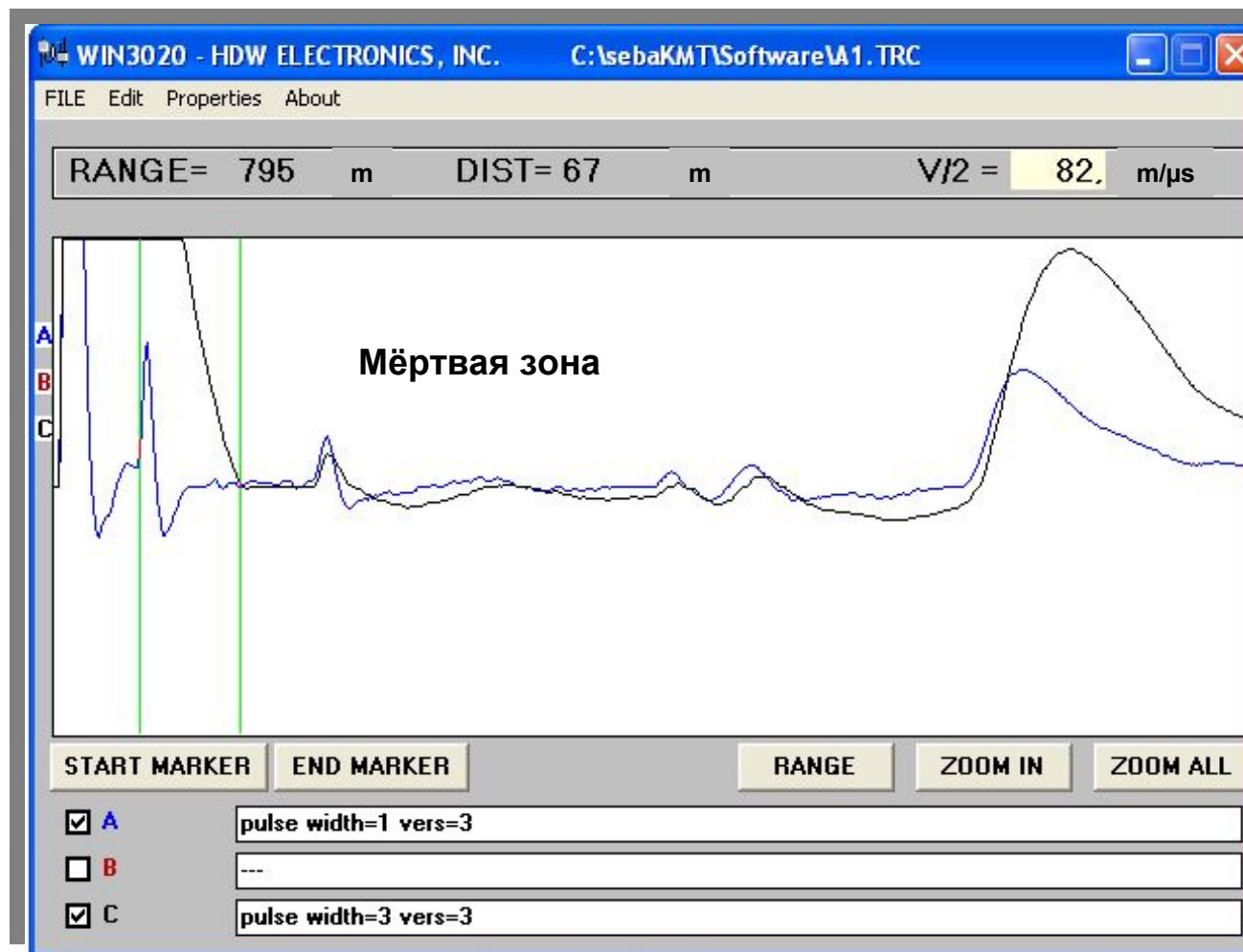


### Мёртвая зона:

5 н/сек	прибл. 2м
500 н/сек	прибл. 90м
3 мсек	прибл. 400м

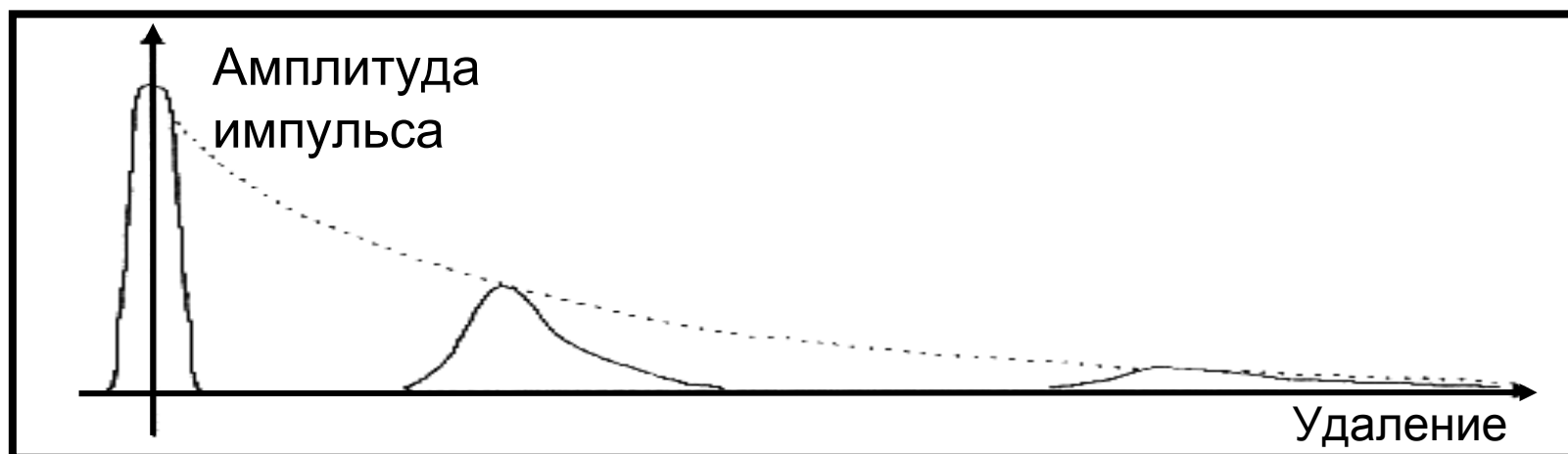


## Влияние ширины импульса – мёртвая зона





## **Влияние ширины импульса - кабельная дисперсия**



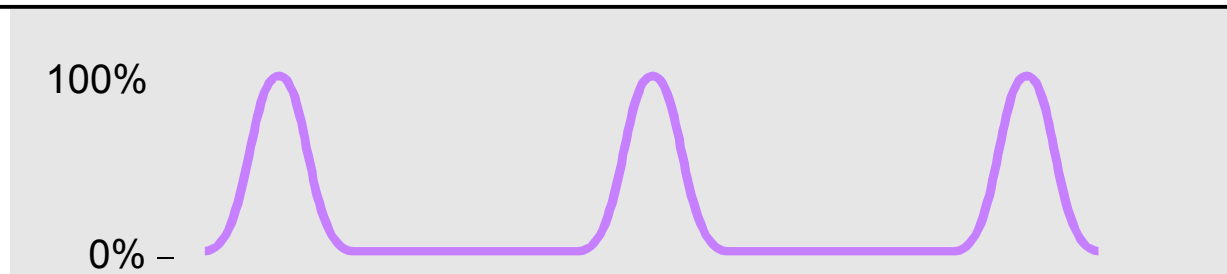
Затухание в кабеле:  $\alpha [\text{ca.}] = \frac{R}{2Z} + \frac{GZ}{2} \text{ Нр/км}$

Дисперсия кабеля:  $\alpha [\text{ca.}] = \sqrt{\frac{R\omega C}{2}} \text{ Нр/км} \quad (\text{при } \omega L \geq R)$

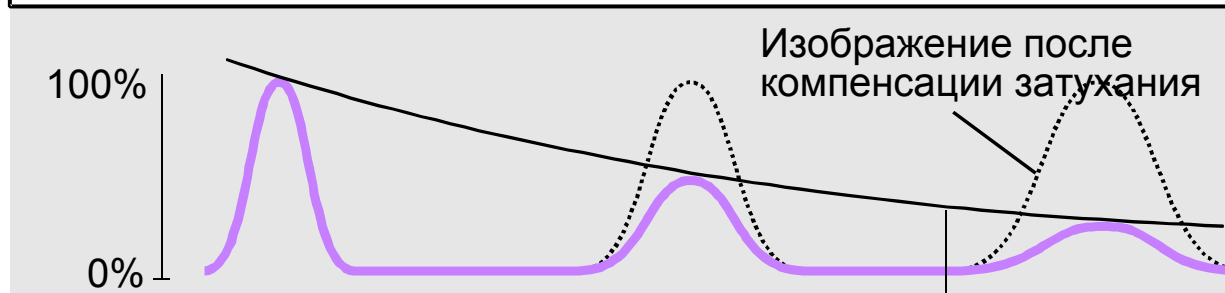


## Влияние затухания в кабеле

Идеальное изображение при специфической для кабеля коррекции

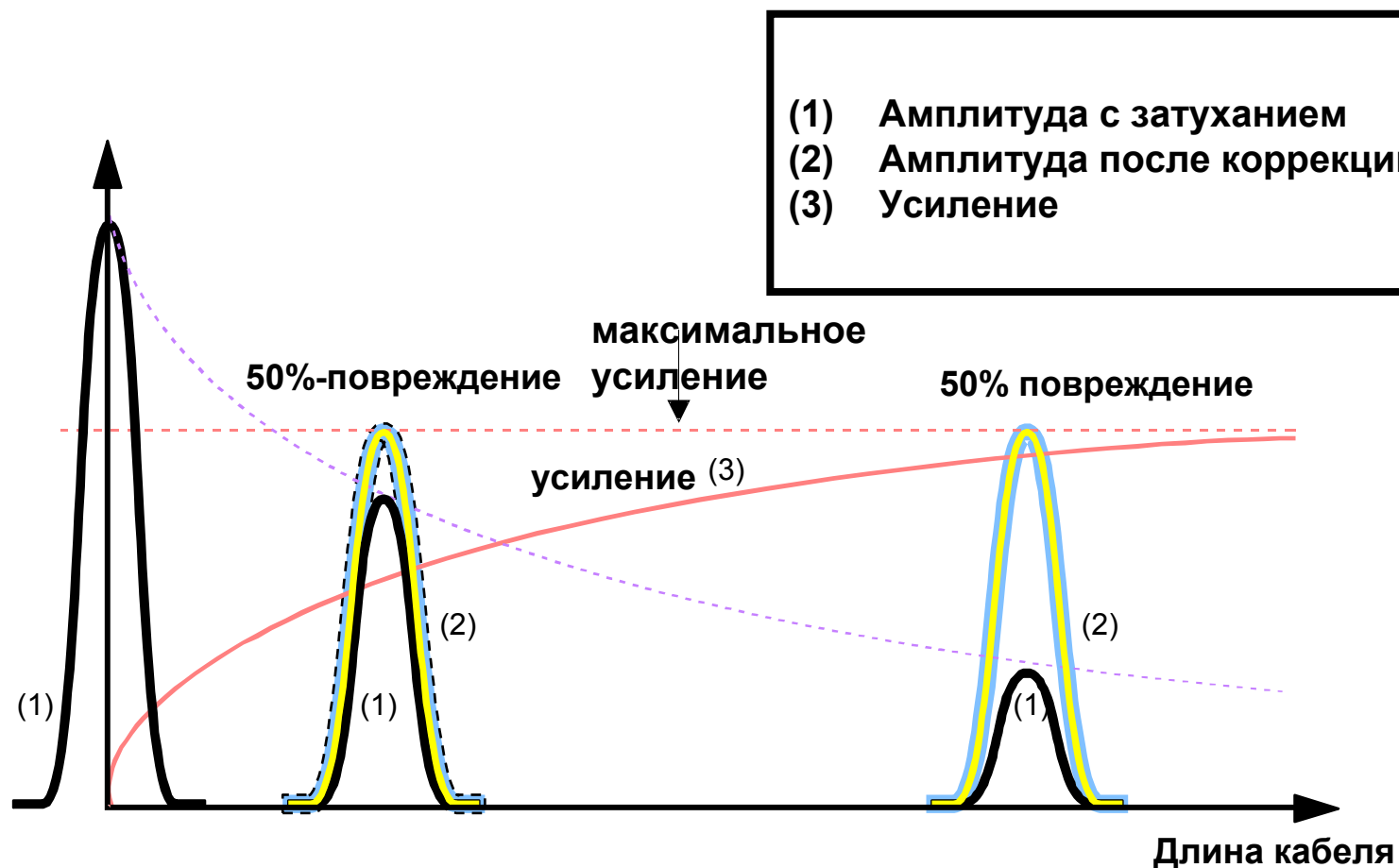


Влияние затухания в кабеле на частоту





## Коррекция амплитуд, зависящая от удаления





## Примеры рефлектограмм





## Примеры рефлектограмм







## ***Предварительная локализация Высоковольтные методы***



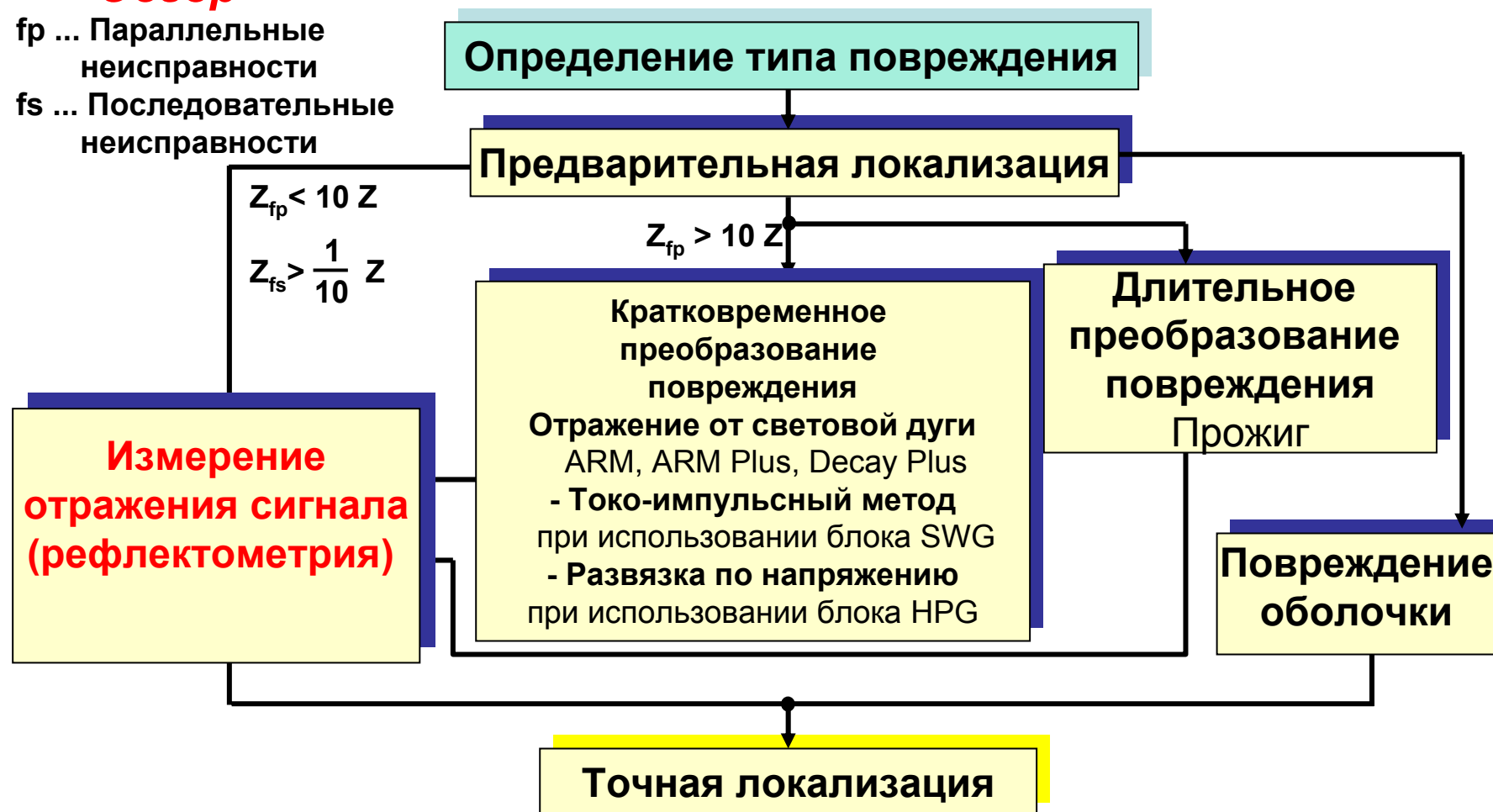


## Методы предварительной локализации

### Обзор

fp ... Параллельные  
неисправности

fs ... Последовательные  
неисправности





## **Методы локализации повреждений**

### **Обзор высоковольтных методов предварительной локализации (SebaKMT)**

<b>„DECAY“ до 80 кВ</b>	DECAY – <u>Метод развязки по напряжению</u>
<b>„ARM“ до 32 кВ</b>	ARM – <u>Метод световой дуги (измерительный импульс до 65 В)</u>
<b>„ARM Plus“ до 32 кВ</b>	ARM Plus – <u>Метод световой дуги (измерительный импульс до 1500 В)</u>
<b>„DECAY Plus“ 80 кВ</b>	Decay Plus – <u>Метод световой дуги (измерительный импульс до 1500В)</u>
<b>„ICE“ 32 кВ</b>	ICE – <u>Токо-импульсный метод</u>
<b>„3 Ph ICE“ 32 кВ</b>	3-хфазный ICE – <u>Токо-импульсный метод для разветвленных сетей</u>
<b>„ARM прожиг световой дугой“</b>	<u>ARM Прожиг световой дугой</u> – Начиная с 20 кВ

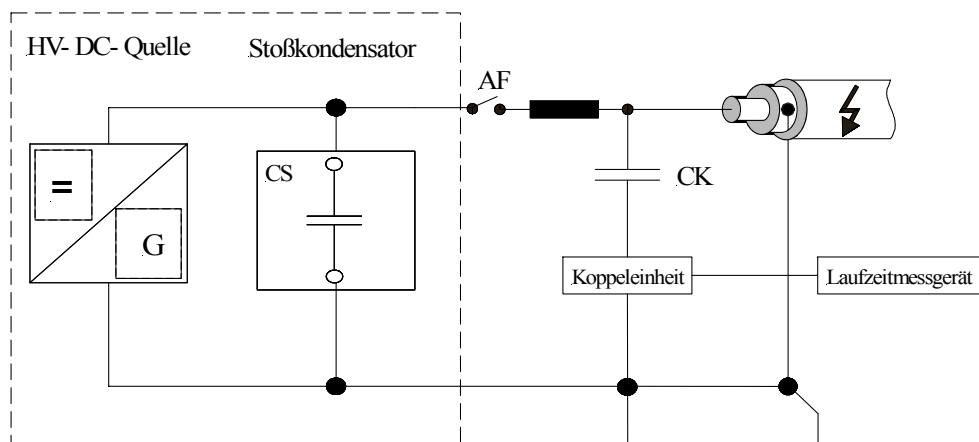


## Методы локализации повреждений

### Принципы стабилизации и продления времени горения световой дуги

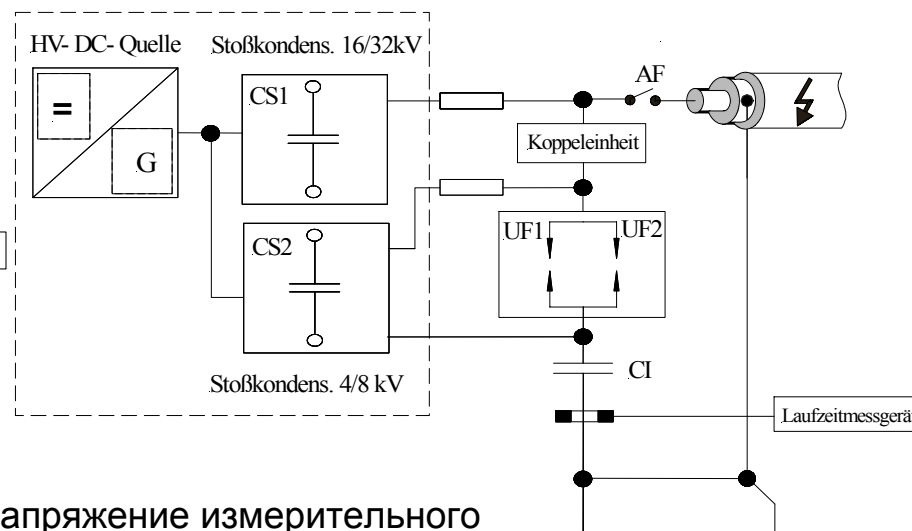
#### Примеры

**ARM** - классическая «пассивная» стабилизация световой дуги



Напряжение измерительного импульса макс. 65 В

**ARM Plus** – «активная» стабилизация световой дуги



Напряжение измерительного импульса макс. 1500 В



## Предварительный метод ARM – пассивное соединение

Рефлектометр

Выходное  
напряжение ARM:

До 32 КВ как  
отдельный прибор

До 50 кВ в комплектации  
лаборатории в  
зависимости от  
оснащения

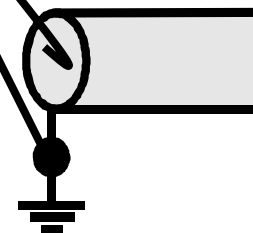


SWG



Электрический  
разделительный  
фильтр  
М 219 и LSG 300

Поврежденный кабель





## Предварительный метод ARM активная стабилизация световой дуги

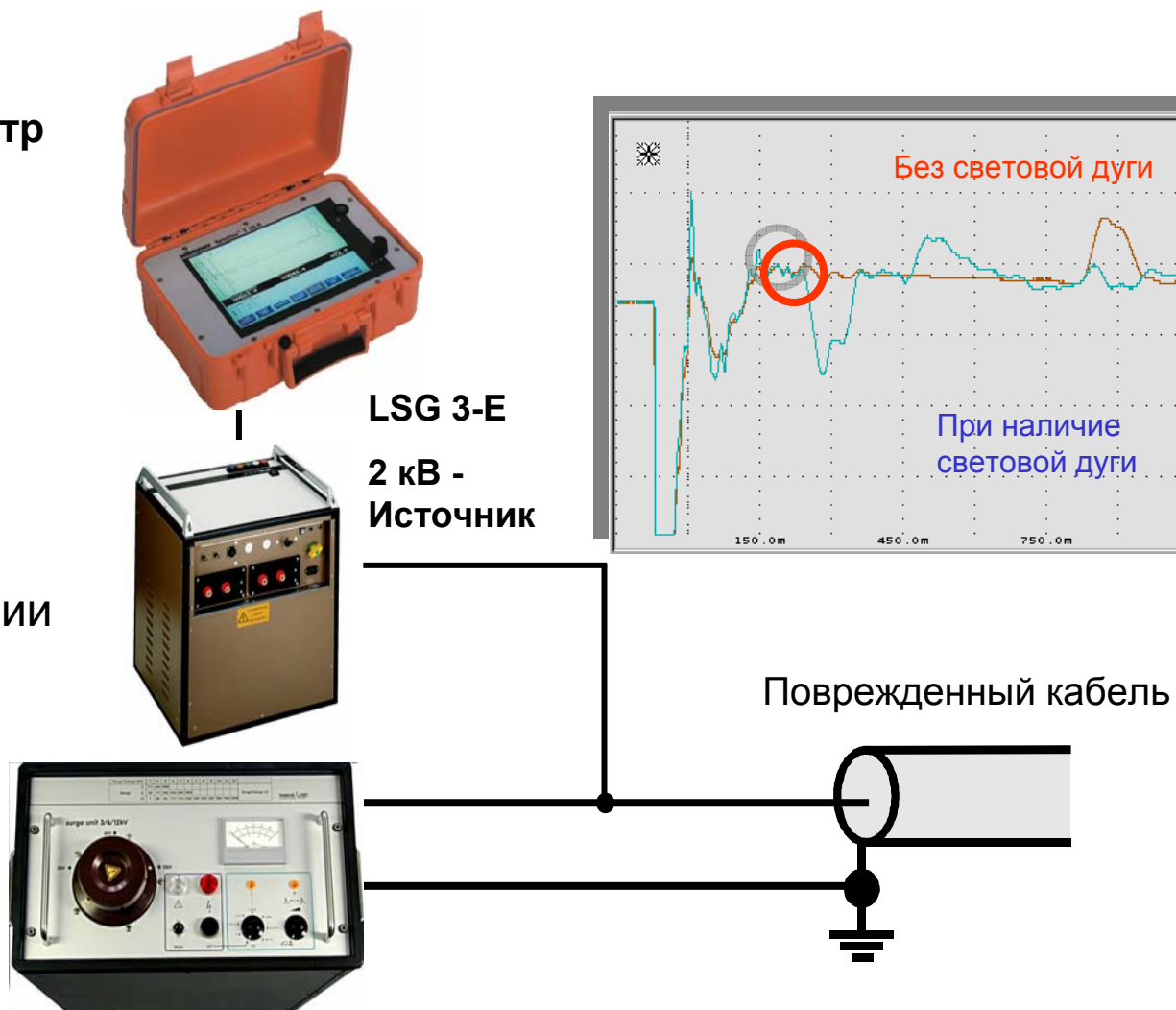
Рефлектометр

Выходное напряжение ARM:

До 32 кВ как отдельный прибор

До 50 кВ в комплектации лаборатории в зависимости от оснащения

SWG







## Приборы и системы

Интеграция всех методов локализации в отдельные приборы и системы

### Электротехническая лаборатория Вариант 1 (SebaKMT)



- Отдельные приборы
- Децентрализованное управление
- Необходим хорошо подготовленный персонал!

### Электротехническая лаборатория Вариант 2 (SebaKMT)



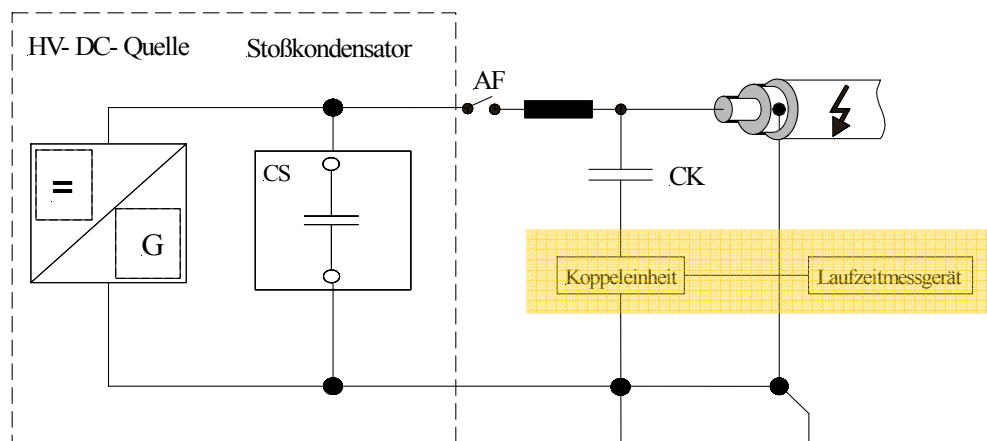
- Автоматизированная ЭТЛ
- Центральное управление и обработка данных компьютером

⇒ **Дальнейшее развитие 2-го поколения**



## Практические измерения и результаты

### Пример 1: Локализация при помощи метода ARM



#### Последовательность

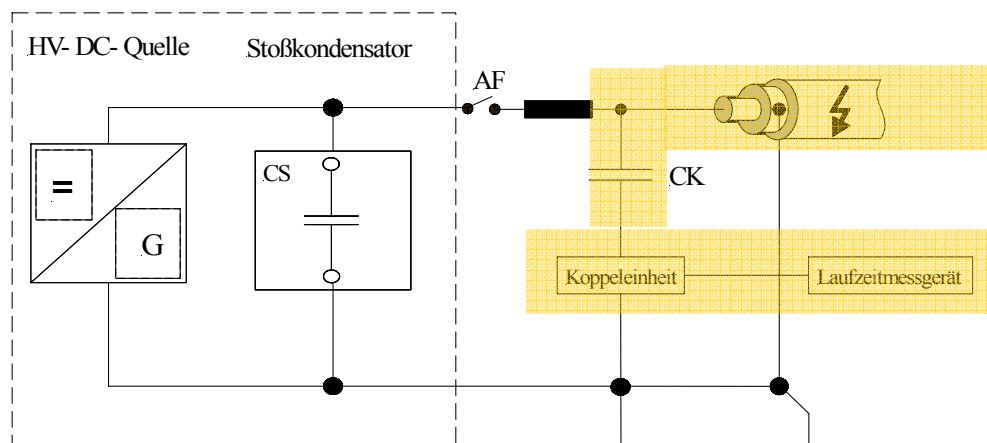
- 1) Получение «здоровой» рефлектограммы





## Практические измерения и результаты

### Пример 1: Локализация при помощи метода ARM



Автоматическая установка курсора  
в конце кабеля



### Последовательность

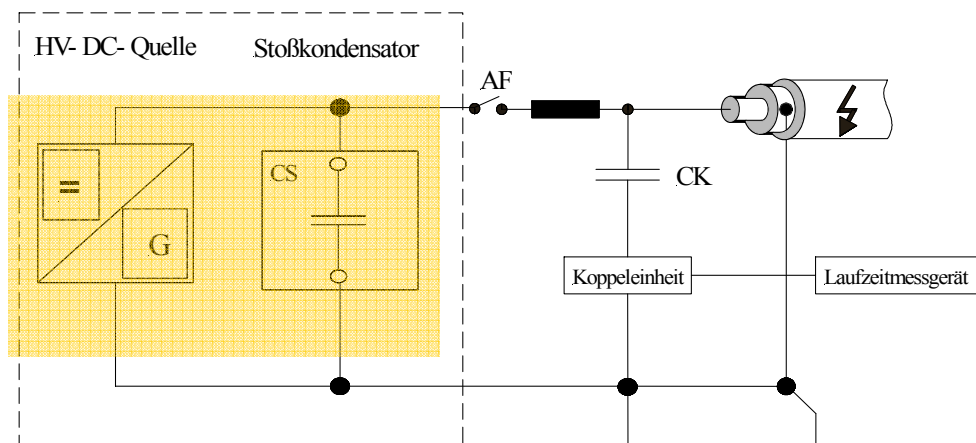
1) Получение «здоровой» рефлектограммы





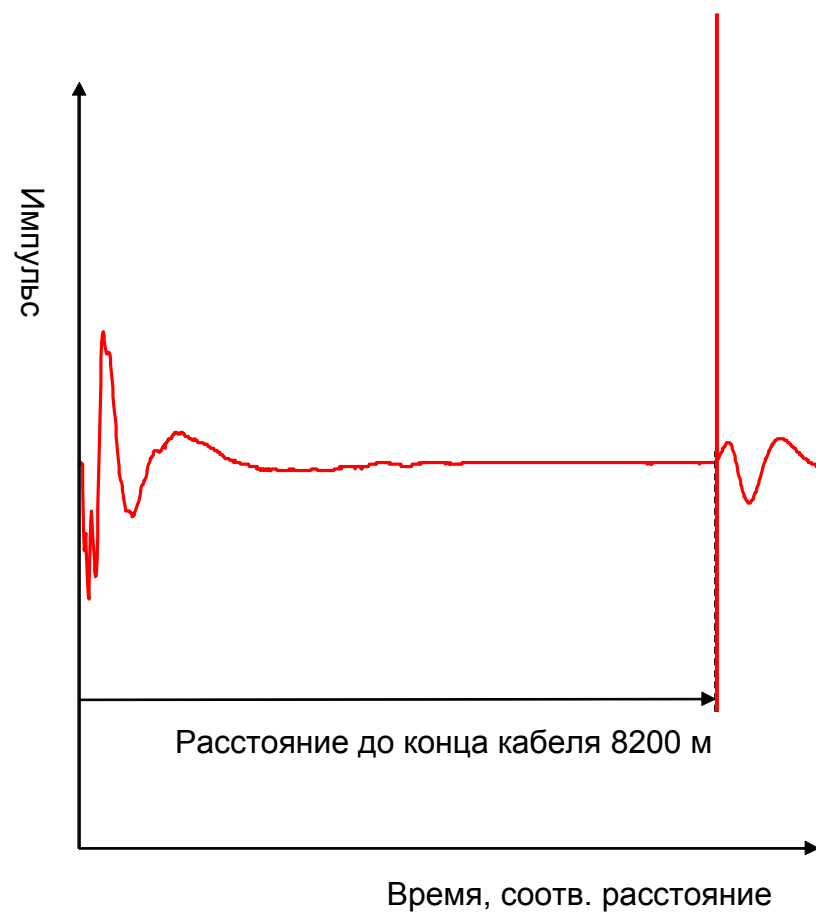
## Практические измерения и результаты

### Пример 1: Локализация при помощи метода ARM



#### Последовательность

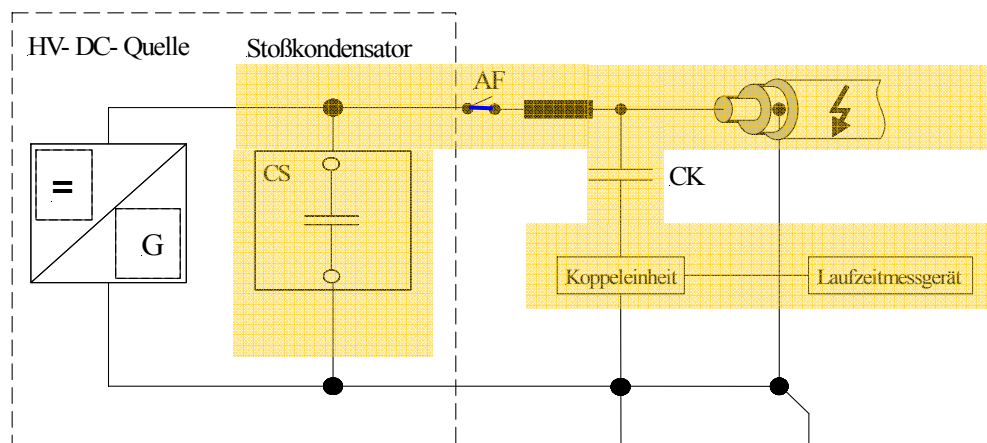
- 1) Получение «здоровой» рефлектограммы
- 2) Получение рефлектограммы повреждения





## Практические измерения и результаты

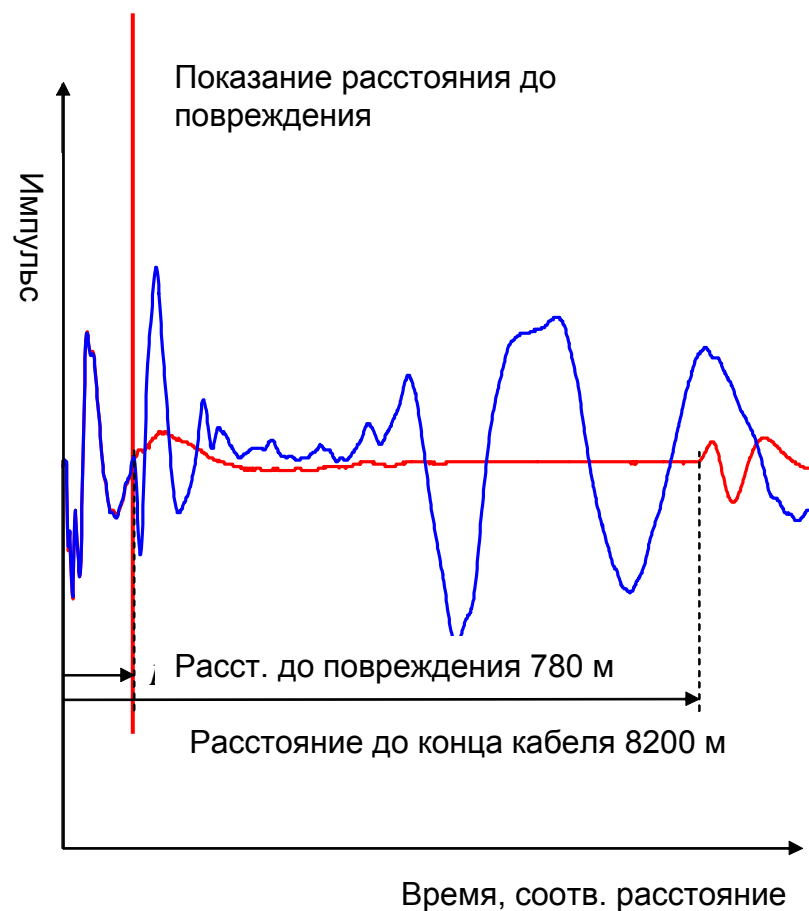
### Пример 1: Локализация при помощи метода ARM



#### Последовательность

- 1) Получение «здоровой» рефлектограммы
- 2) Получение рефлектограммы повреждения

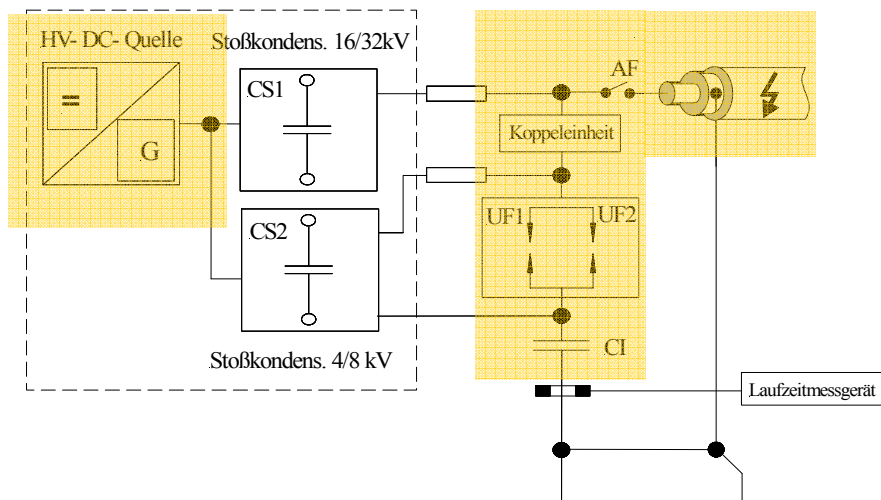
Рефлектограмма повреждения  
Автоматическая установка курсора  
на месте повреждения





## Практические измерения и результаты

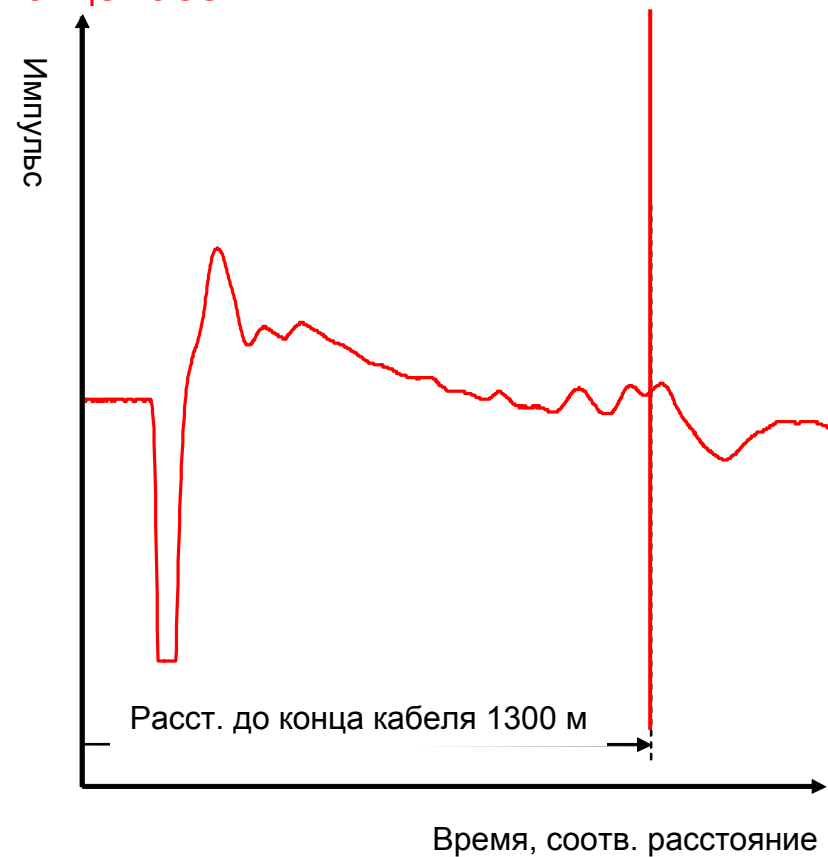
### Пример 2: Локализация при помощи метода ARM-PLus



#### Последовательность

- 1) Получение «здоровой» рефлектограммы

«Здоровая» рефлектограмма  
и автоматическая установка курсора в  
конце кабеля





## Пример 2: Локализация при помощи метода ARM-Plus



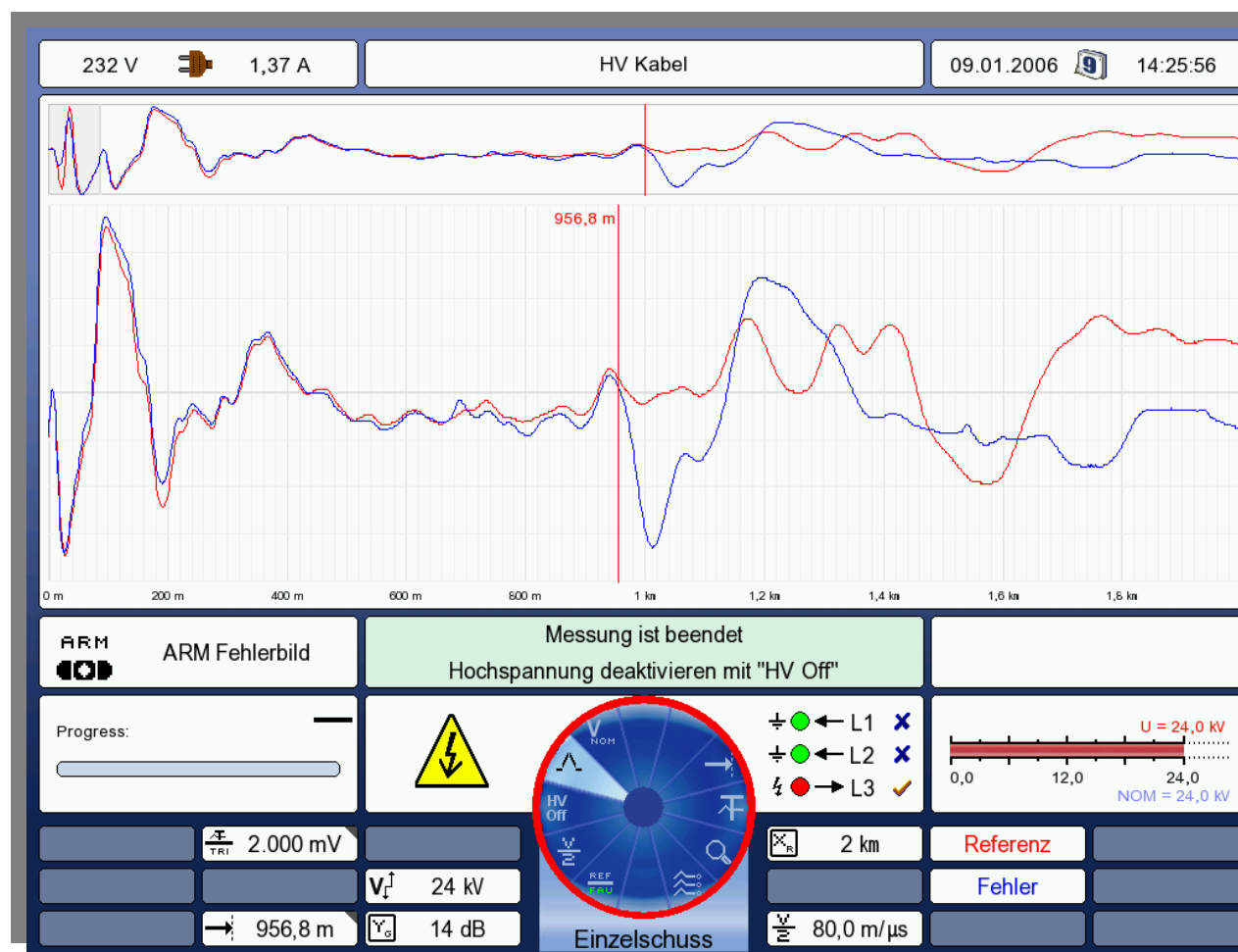
- 1) Получение «здоровой» рефлектограммы
- 2) Получение рефлектограммы повреждения

## Рефлектограмма повреждения и автоматическая установка курсора на месте повреждения



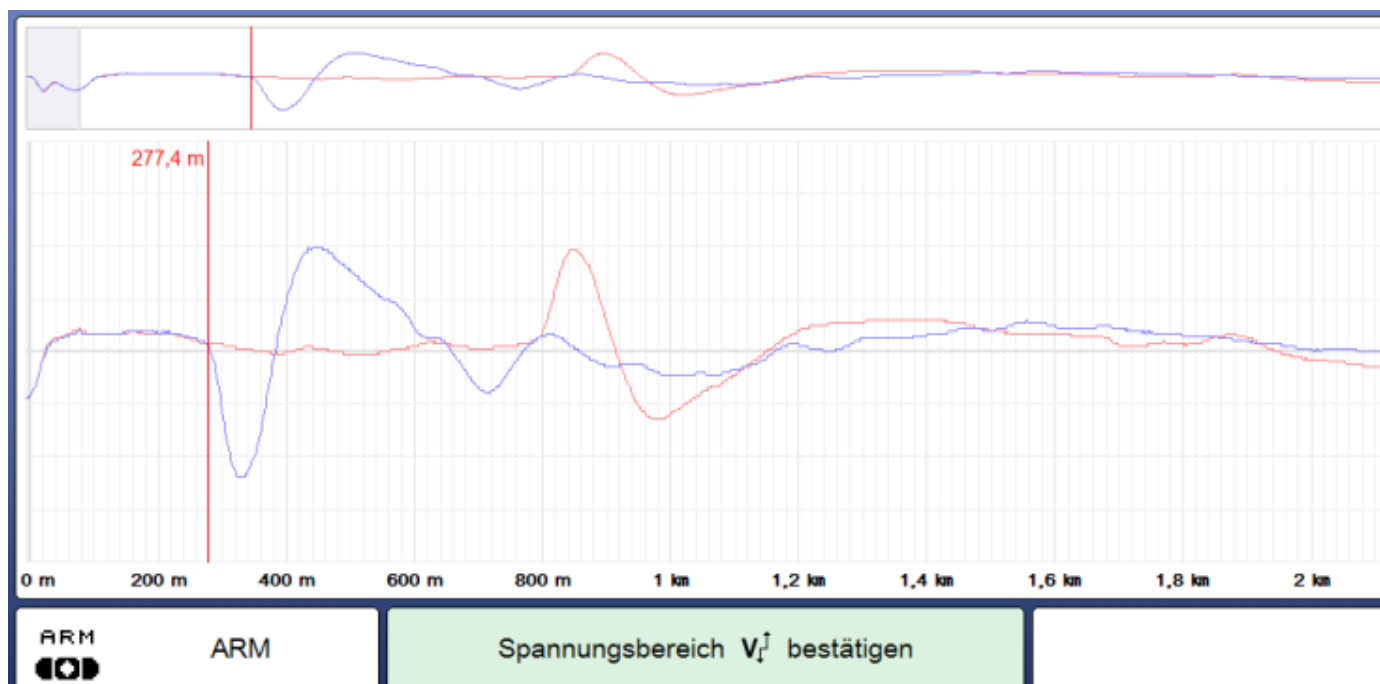


## Рефлектограмма активного ARM-измерения





## Рефлектограмма активного ARM®-измерения

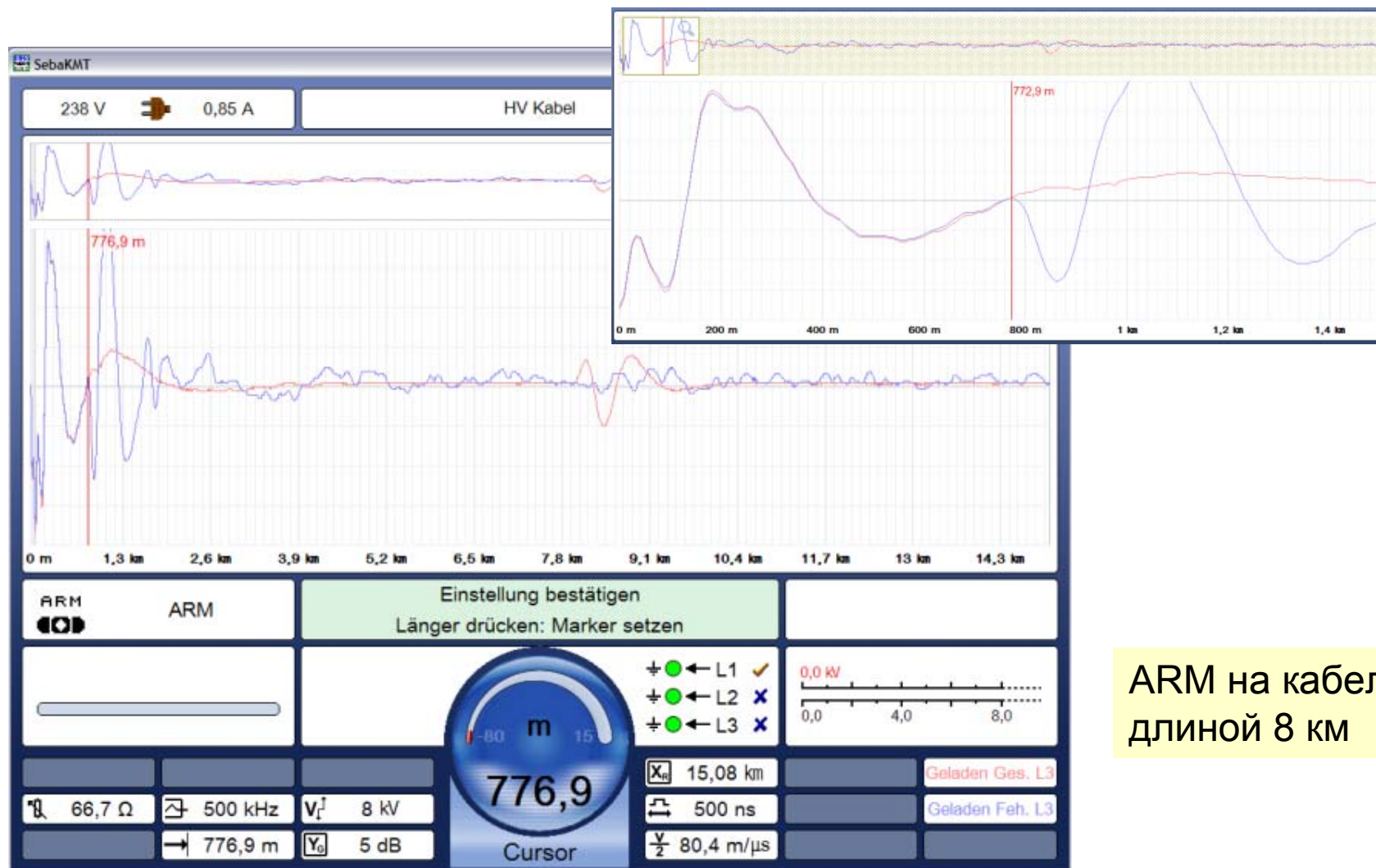


ARM на кабеле длиной 740 м





## Рефлектограмма активного ARM®-измерения



ARM на кабеле  
длиной 8 км



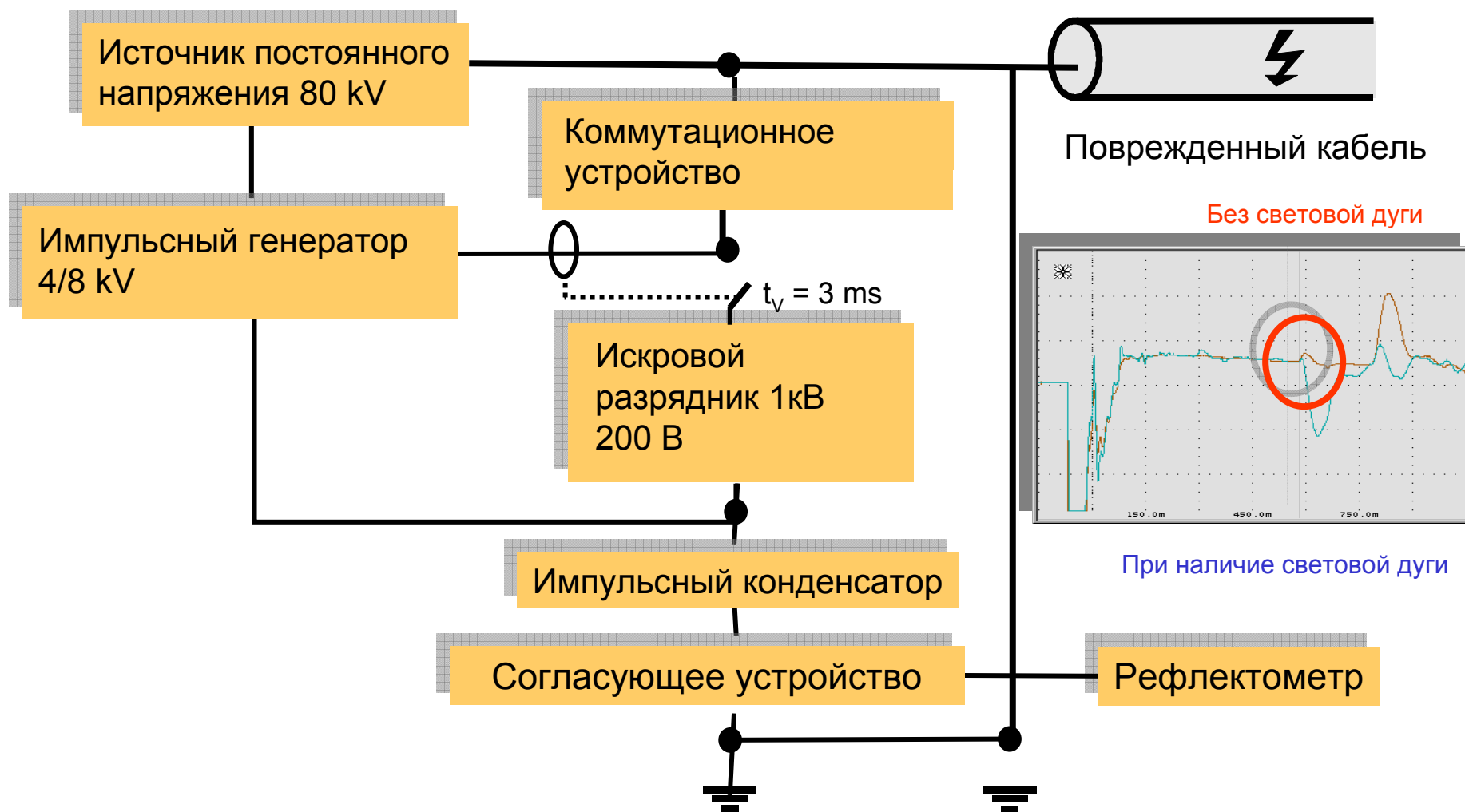
## Рефлектограмма измерения ARM - Plus







## Процесс испытания Decay Plus®





## ***Процесс измерения Decay Plus®***

- **Шаг 1**
  - Снятие картины показаний до момента пробоя с помощью измерительного импульса 1500 Вольт
- **Шаг 2**
  - Инициация пробоя в месте повреждения испытательным повреждением от 32 кВ до 80 кВ
- **Шаг 3**
  - Импульс 4 кВ в действующий пробой
- **Шаг 4**
  - Снятие **картины показаний** повреждения с помощью измерительного импульса 1500 Вольт при пробое

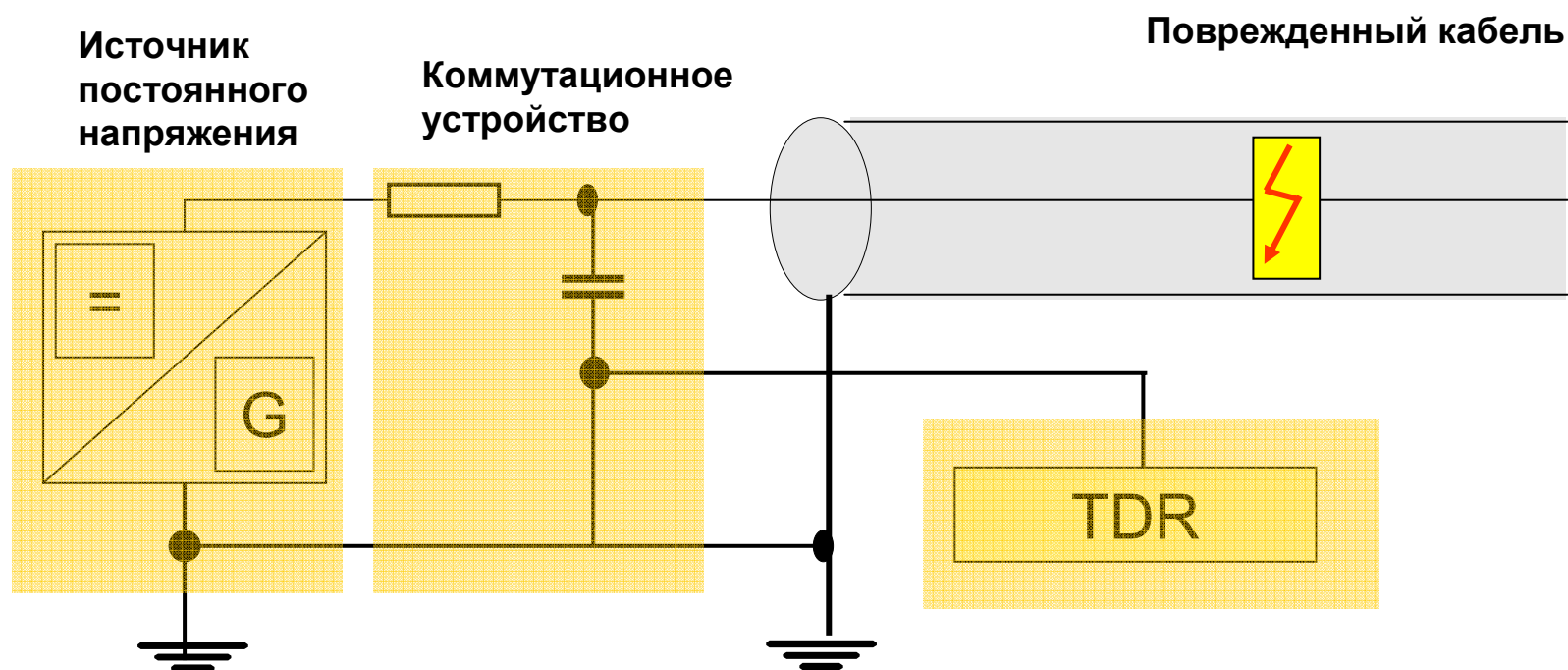


## Рефлектограмма Decay Plus®



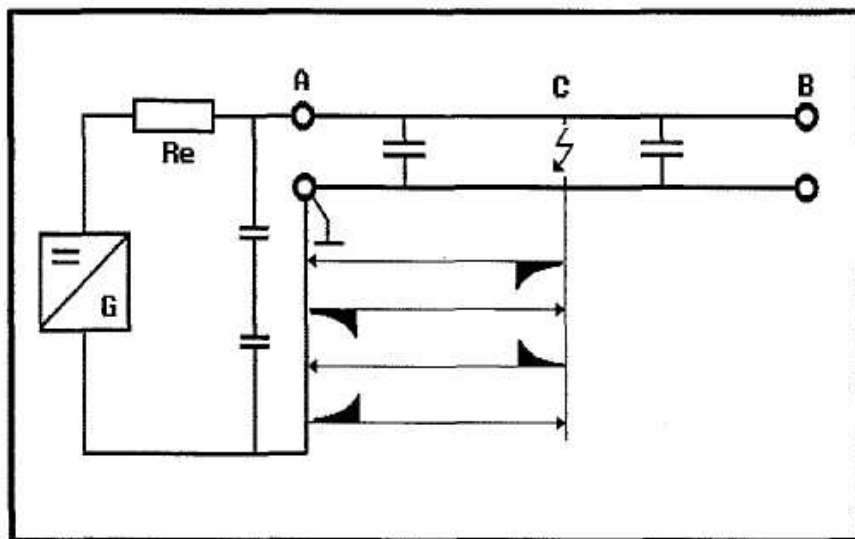


**Метод затухающих колебаний (Desau)  
(метод развязки по напряжению)**

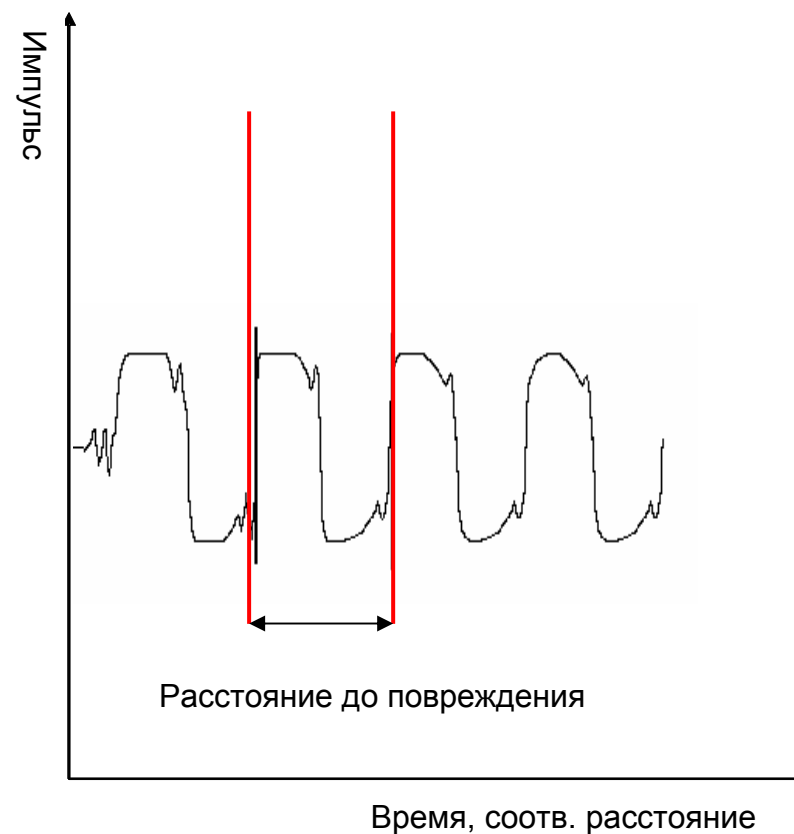




## Токо-импульсный метод - Принцип

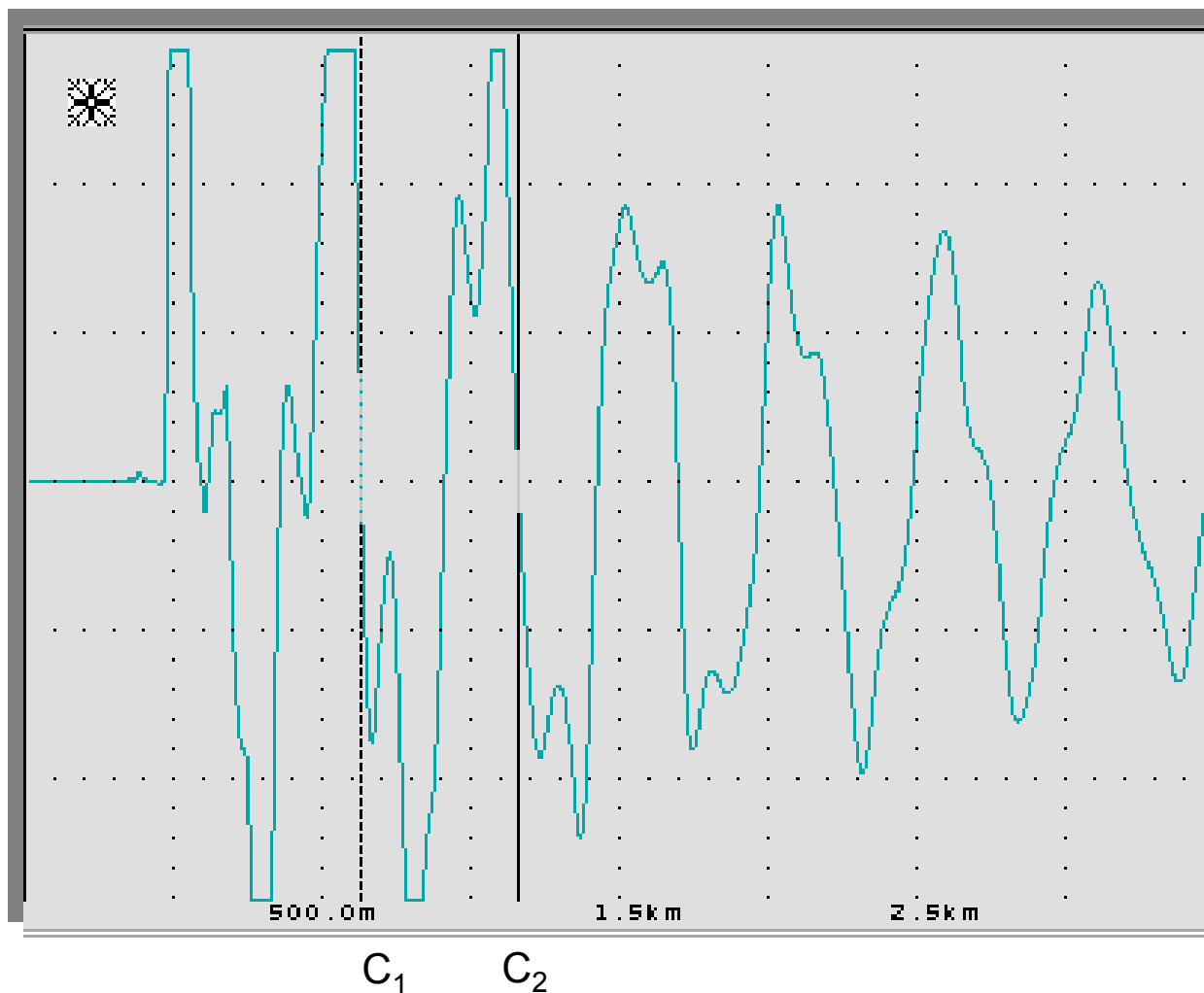


Примечание: На рефлектограмме время между двумя волнами соответствует двойному расстоянию до повреждения, т.к. расстояние рассчитывается с  $V/2$ .





## Рефлектограмма метода затухающих колебаний (Decay)



Измерение  
одного периода:

$$l_x = \frac{C_2 - C_1}{2} - l_A$$

$l_A$  ... Длина  
высоковольтного  
соединительного  
кабеля



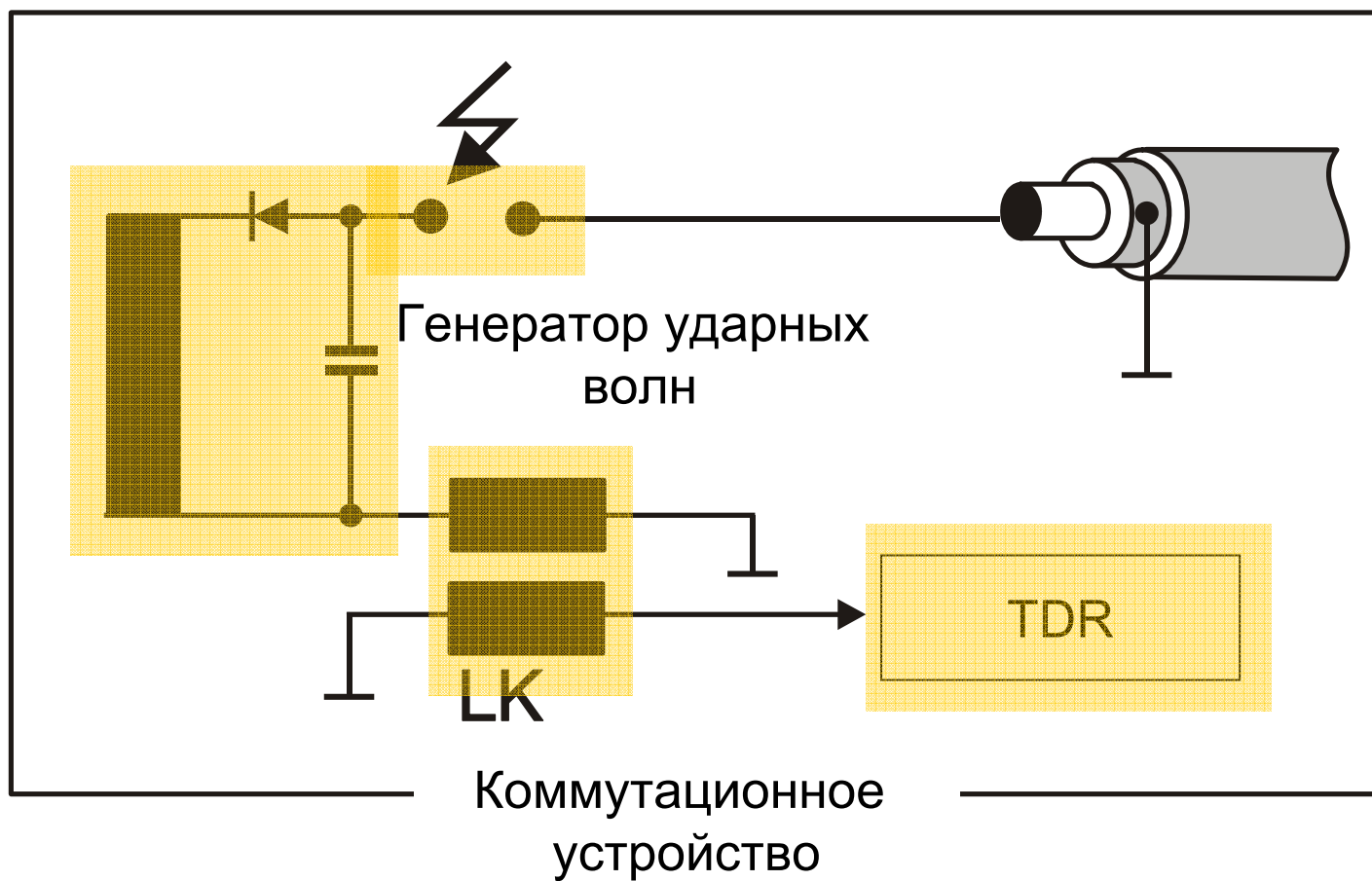
## Рефлектограмма метода затухающих колебаний (Decay)





## Токо-импульсный метод (ICE)

### Блок-схема

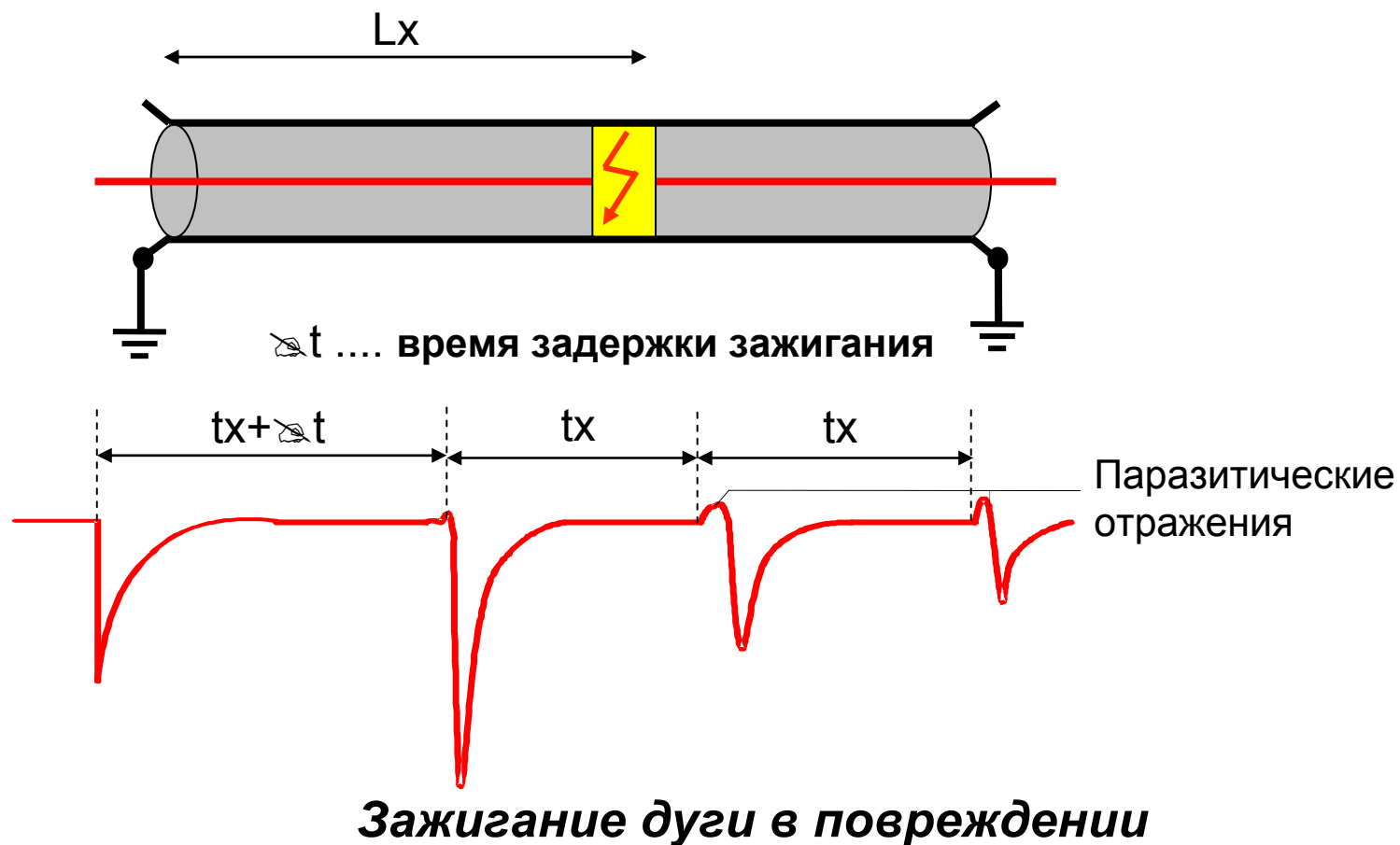






## Токо-импульсный метод (1)

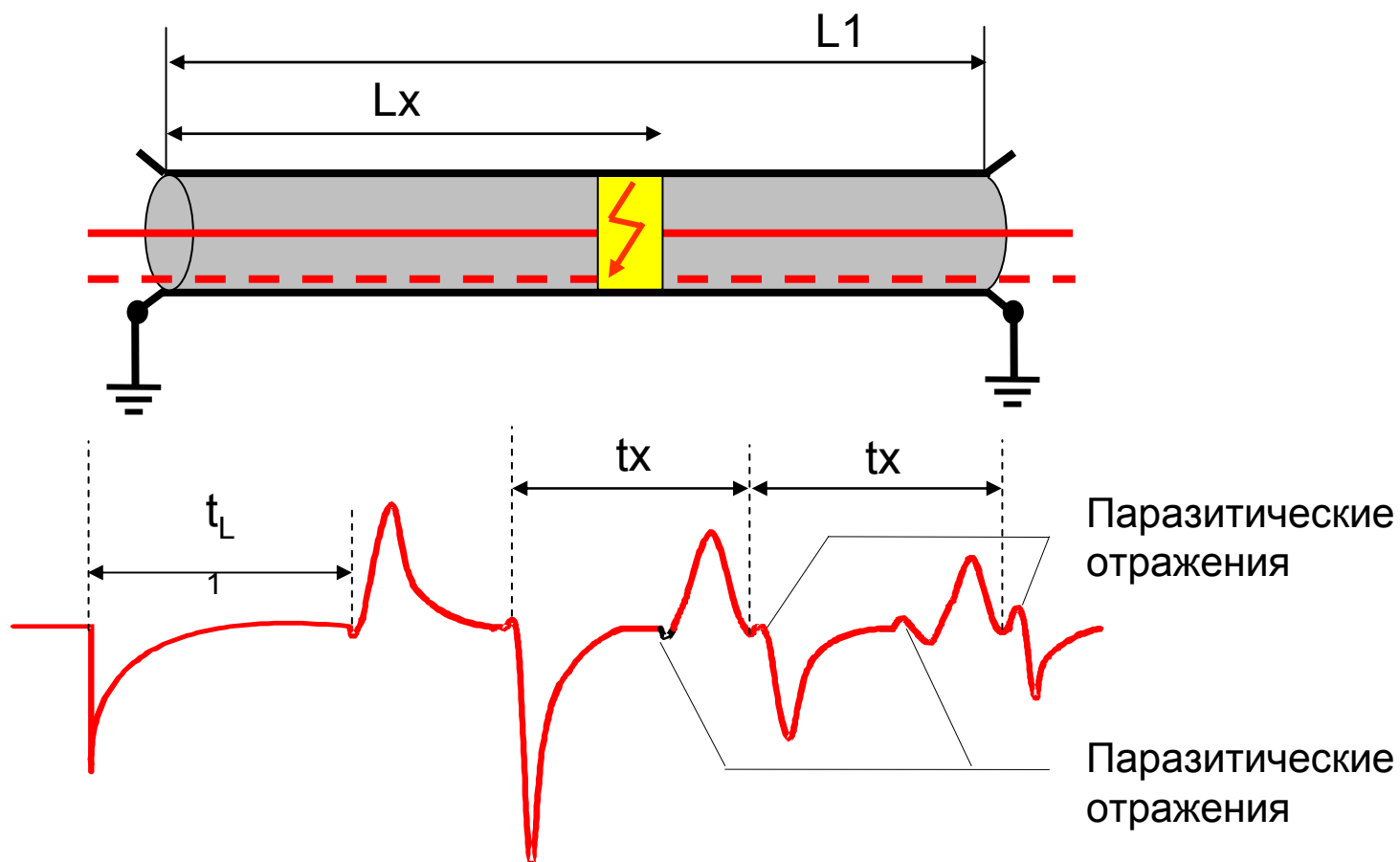
Прямое возбуждение световой дуги в месте повреждения





## Токо-импульсный метод(2)

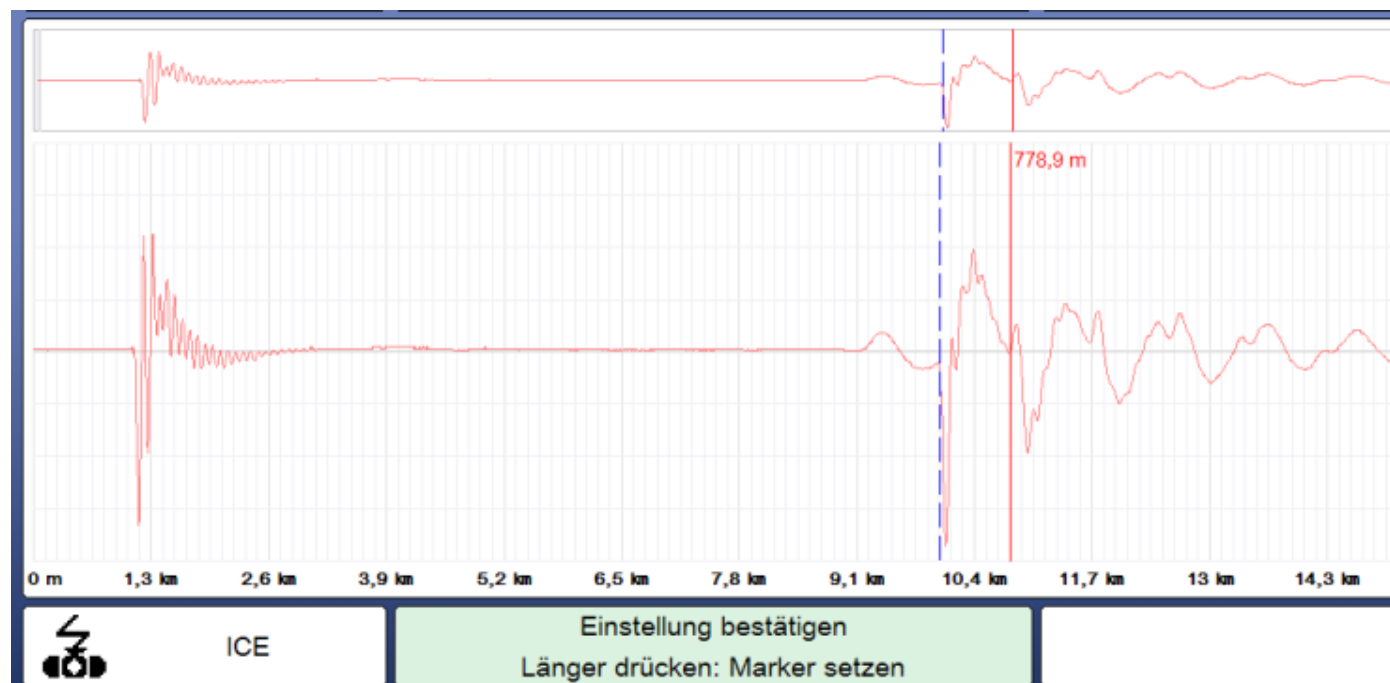
Возбуждение световой дуги посредством возвратных волн



**Зажигание дуги в повреждении**



## Токо-импульсный метод (ICE)



Метод ICE на кабеле длиной 8 км



## Токо-импульсный метод (ICE)



Метод ICE  
Автоматическое  
измерение



## Токо-импульсный метод (ICE)



Метод ICE  
Автоматическое  
измерение и ручная  
корректировка

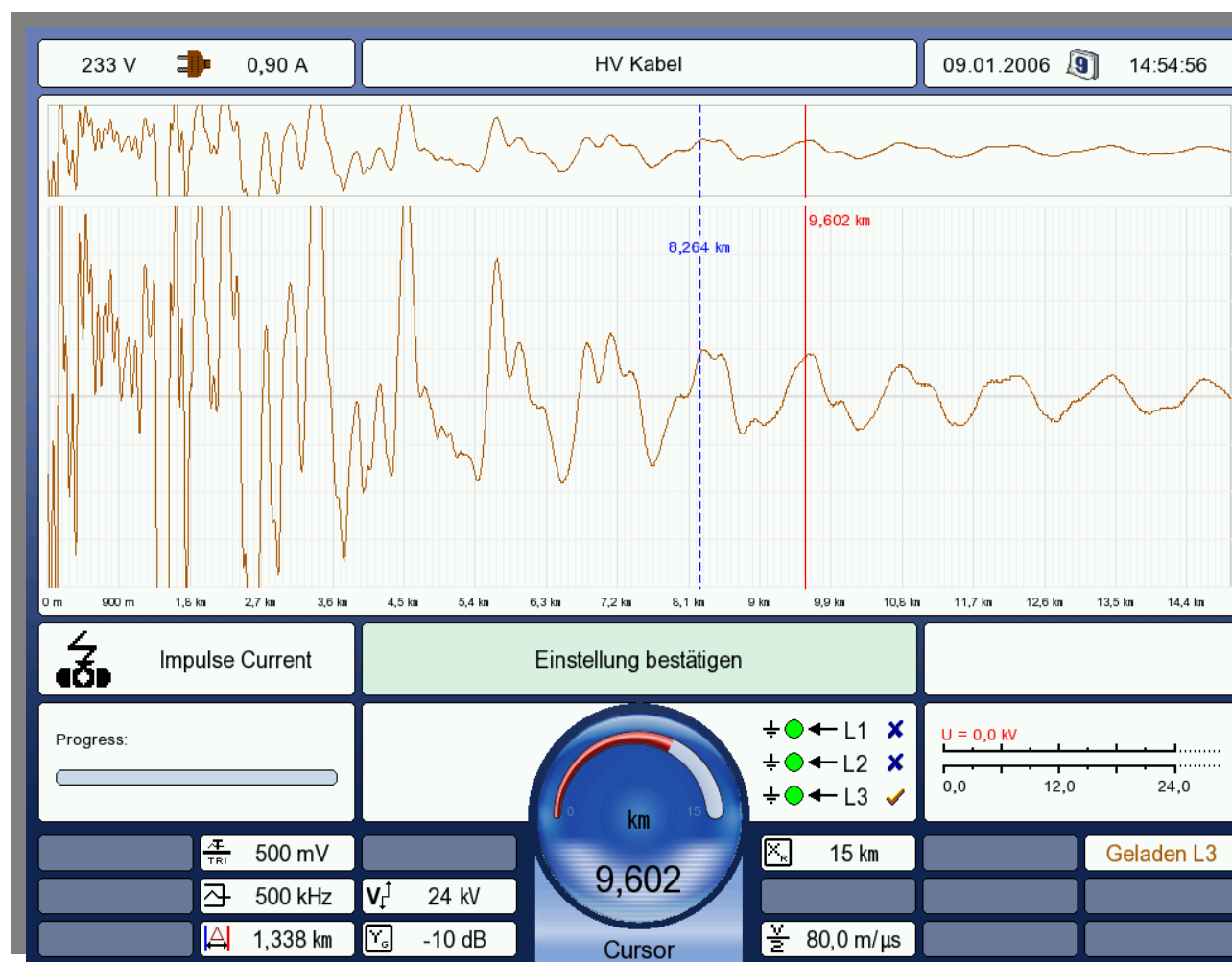


## Токо-импульсный метод

### Пример

Измерение  
расстояния до  
повреждения  
курсором или

X shift

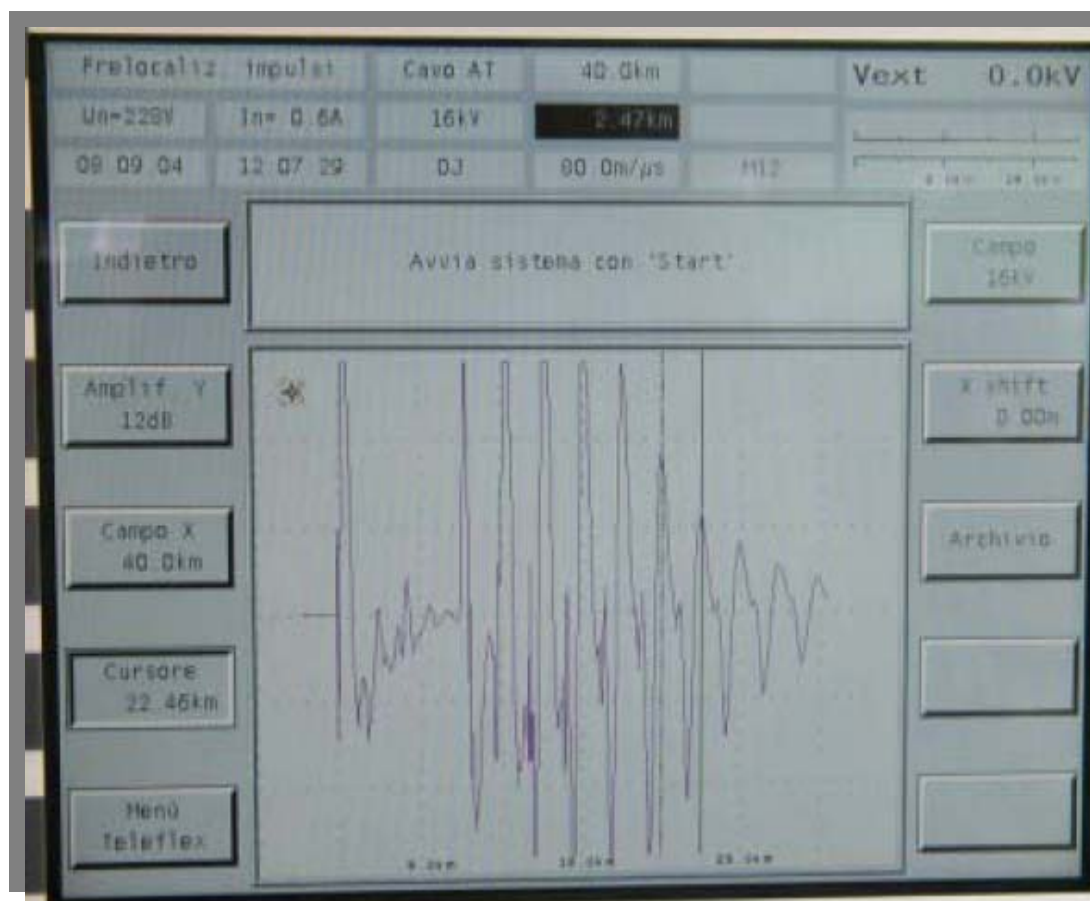






## Токо-импульсный метод

### Пример



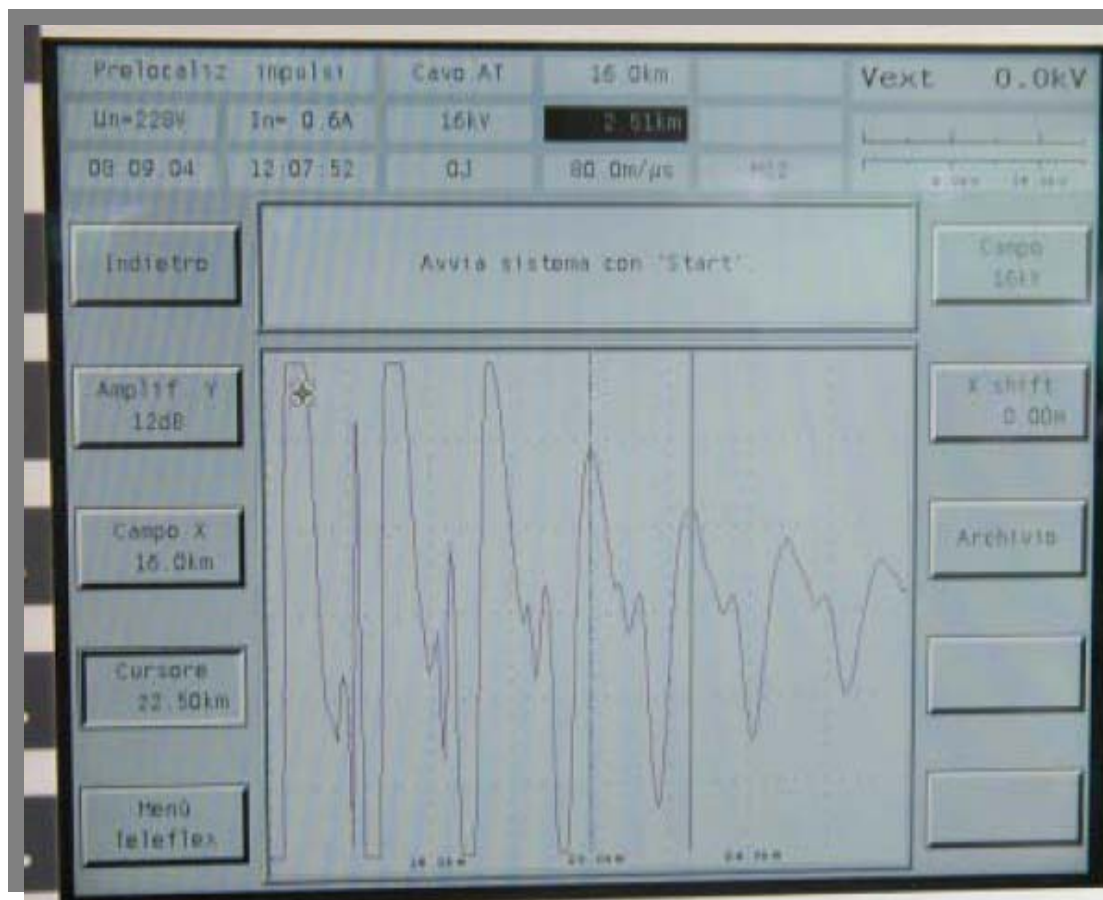
Измерение  
расстояния до  
повреждения  
курсором или  
X shift





## Токо-импульсный метод

### Пример



Измерение  
расстояния до  
повреждения  
курсором или  
X shift



## **Токо-импульсный метод**

### **Пример**

