

ИССЛЕДОВАНИЕ ИМПУЛЬСНОГО МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ
МЕСТ ПОВРЕЖДЕНИЯ КАБЕЛЯ

ДОСЛІДЖЕННЯ ІМПУЛЬСНОГО МЕТОДУ ВИЗНАЧЕННЯ
МІСЦЬ ПОШКОДЖЕННЯ КАБЕЛЮ

STUDY OF PULSE METHOD FOR FAULT LOCALIZATION

Аннотация. Проведен анализ исследования возможностей импульсного метода, который позволяет определить повреждения типа «понижение сопротивления изоляции», «обрыв жилы» и «короткое замыкание» с учетом действия шумов. Доказано, что мешающее воздействие шумов за счет конструктивных неоднородностей оказывается значительным по сравнению с шумами за счет внешних и переходных помех.

Анотація. Проведено аналіз дослідження можливостей імпульсного методу, який дозволяє визначити пошкодження типу «пониження опору ізоляції», «обрив жили» та «коротке замикання» з урахуванням дії шумів. Доведено, що заважаючий вплив шумів за рахунок конструктивних неоднорідностей виявляється значним порівняно з шумами за рахунок зовнішніх і перехідних завод.

Summary. Possibility study of the pulse method which allows to determine the type of damage, "decrease the insulation resistance", "open core" and "short circuit" considering noise influence is made. Proved that harmful influence of the noise due to structural inhomogeneities becomes more significant, compare to the noise due to external and cross-noise.

В настоящее время для определения мест повреждений в подземных кабелях передачи разработано и находит применение достаточно большое число методов и приборов (Digiflex Com, Eajyflex Com, ALT-200, ИРК-ПРО АЛЬФА), отличающихся друг от друга как принципом действия, так и точностью, и трудозатратами [1].

Повреждения, которые обычно имеют место в линиях передачи, связаны с наличием в них нерегулярностей. Изменение параметров, характеристик повреждений может происходить скачкообразно, либо плавно, в результате которого параметр не соответствует нормированному значению.

Импульсный метод позволяет определить повреждения типа «понижение сопротивления изоляции», «обрыв жилы» и «короткое замыкание», что составляет, соответственно 40, 23,9, 17,2 % (81,1) от общего числа повреждений [2].

Для анализа предельных возможностей импульсного метода удобным зондирующим сигналом является скачок напряжения, так как все виды зондирующих импульсных сигналов могут быть выражены с его помощью.

Данному методу посвящено большое число научных работ [3,4]. Однако в них отсутствует анализ основных эксплуатационных характеристик приборов, реализующих импульсный метод с учетом действия собственных шумов и переходных помех и внешних влияний.

Целью статьи является теоретическое исследование возможностей импульсного метода, позволяющего определить повреждения.

Переходную характеристику ступенчатой функции можно представить в виде [2].

$$h(t) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{k(\omega) \sin[\omega t - \varphi(\omega)]}{\omega} d\omega, \quad (1)$$

где $k(\omega)$ – вещественная частотная характеристика коэффициента передачи, где

$$k(\omega) = e^{-0,115\alpha(\omega)l};$$

$\alpha(\omega)$ – коэффициент затухания цепи, дБ/км;

$\varphi(\omega)$ – коэффициент фазы цепи, рад/км;

l – длина цепи, км.

Поскольку функция $\varphi(\omega)$ линейная, т. е. практически не вносит искажений в передаваемый сигнал, то ее можно не учитывать [3].

Зависимость коэффициента затухания цепи от частоты в верхнем диапазоне частот свыше 10 кГц с достаточной погрешностью, (не превышающей 5 %), аппроксимируется в виде [5]

$$\alpha(\omega) = \alpha_0 + \alpha_1 \omega, \quad \frac{\text{дБ}}{\text{км}},$$

где α_0, α_1 – постоянные коэффициенты аппроксимации.

Тогда выражение (1) примет вид

$$h(t) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{e^{-0,115(\alpha_0 + \alpha_1 \omega)l} \sin \omega t}{\omega} d\omega.$$

После преобразований данного выражения, получим

$$h(t) = \frac{2}{\pi} e^{-0,115\alpha_0 l} \operatorname{arctg} \frac{t}{0,115\alpha_1 l}, \quad (2)$$

где t – текущее время.

Обозначим амплитуду зондирующего сигнала U_0 , тогда скачок напряжения, распространяющийся по цепи, описывается выражением.

$$U(t) = \frac{2}{\pi} U_0 e^{-0,115\alpha_0 l} \operatorname{arctg} \frac{t}{0,115\alpha_1 l}. \quad (3)$$

Определим формулу сигнала, отраженного от неоднородности. При этом, рассмотрим наиболее общий случай, когда на расстоянии x от точки наблюдения имеется сосредоточенная неоднородность Δx с коэффициентами отражения на ближнем S_1 и дальних S_2 концах $|S_1| = |S_2| = S$.

На входе цепи действует скачок напряжения $U_{\text{вх1}}$

$$U_{\text{вх1}} = \frac{2}{\pi} U_0 \int_0^{\infty} \frac{\sin \omega t}{\omega} d\omega. \quad (4)$$

Напряжения отраженных сигналов $U_{1\text{отр}}$ и $U_{2\text{отр}}$ будут сдвинуты на время τ , определяемого соотношением

$$\tau = \frac{2\Delta x}{V}, \text{ с.} \quad (4,а)$$

где V – скорость распространения импульсного сигнала по цепи, км/с.

Тогда, с учетом (3) и (4), отраженный от неоднородности сигнал в начале цепи будет иметь вид

$$U_{\text{отр}} = \frac{2}{\pi} S U_0 e^{-0,23\alpha_0 l} \left(\operatorname{arctg} \frac{t}{0,23\alpha_1 l} - \operatorname{arctg} \frac{t - \tau}{0,23\alpha_1 l} \right).$$

Или, с учетом скорости распространения

$$U_{\text{отр}} = \frac{2}{\pi} S U_0 e^{-0,23\alpha_0 l} \left(\operatorname{arctg} \frac{t - \frac{2l}{V}}{0,23\alpha_1 l} - \operatorname{arctg} \frac{t - \tau - \frac{2l}{V}}{0,23\alpha_1 l} \right). \quad (5)$$

Из анализа выражения (5) следует, что сосредоточенная неоднородность создает импульсный отраженный сигнал длительностью τ и его форма имеет вид, представленный на рис. 1.

Для частного случая, когда неоднородность является распределенной по длине, отраженный сигнал на расстоянии x принимает вид:

$$U_{\text{отр}} = \frac{2}{\pi} S U_0 e^{-0,115\alpha_0(l-x)} \operatorname{arctg} \frac{t}{0,115\alpha_1(l-x)},$$

а в точке наблюдения

$$U_{\text{отр}} = \frac{2}{\pi} S U_0 e^{-0,23\alpha_0(l-x)} \operatorname{arctg} \frac{t}{0,23\alpha_1(l-x)}, \quad (6)$$

где x – расстояние до начала распределенной неоднородности, км.

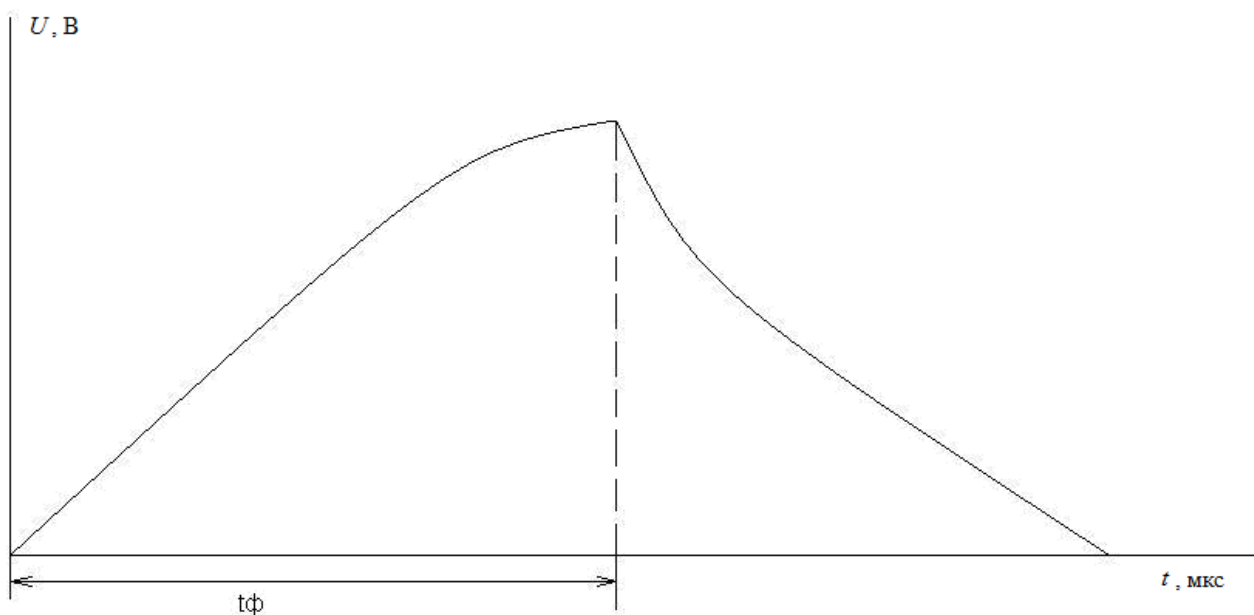


Рисунок 1 – Форма отраженного сигнала от сосредоточенной неоднородности

Из выражения (6) видно, что распределенная неоднородность создает отраженный сигнал в виде скачка напряжения.

Известно, что шумами при исследовании цепей являются собственные шумы и переходные помехи [4].

Определим минимальный коэффициент отражения S_{\min} , при котором еще будет фиксироваться отраженный импульс при наличии в цепях указанных видов шумов.

При визуальных наблюдениях периодически повторяющихся импульсов на экране электронно-лучевой трубки измерительного прибора минимальная амплитуда установившегося сигнала, еще обнаруживаемая на фоне флуктуационных помех, составляет около половины наивероятнейшей амплитуды гладкой помехи, причем, при отношении

$$\frac{U_c}{U_{\text{ш}}} \geq 1,5 \text{ происходит безошибочное обнаружение сигнала [5],}$$

где U_c – напряжение сигнала, В; $U_{\text{ш}}$ – напряжение шума, В.

Так как уровень принимаемого сигнала должен быть в 1,5 раза выше уровня шумов, то минимальное значение отраженного сигнала $U_{\text{отр min}}$, которое безошибочно обнаруживается на приеме, будет равно

$$U_{\text{отр min}} = 0,775 e^{P_{\text{ш}} + 0,4}. \quad (7)$$

С другой стороны, установившееся значение отраженного сигнала на приемном конце

$$U_{\text{отр min}} = S_{\min} U_0 l^{-0,23\alpha_0 l}. \quad (8)$$

Приравнявая (7) и (8), получим значение

$$S_{\min} = \frac{0,775 e^{P_{\text{ш}} + 0,23\alpha_0 l + 0,4}}{U_0}. \quad (8,а)$$

Был проведен расчет зависимости минимального значения коэффициента отражения от длины цепи и уровня шума для симметричной цепи кабеля типа МКСБ – 4 x 4 - 1,2 и коаксиального кабеля типа КБМ, результаты расчета представлены на рис. 2. В качестве расчетных уровней шума приняты стандартные значения [4]

$$P_{\text{ш1}} = -87 \text{ дБ}, P_{\text{ш2}} = 73,3 \text{ дБ}, P_{\text{ш3}} = -69,6 \text{ дБ}.$$

Полученные результаты справедливы для распределенной неоднородности.

С учетом того, что

$$\operatorname{arctg} a - \operatorname{arctg} b = \operatorname{arctg} \frac{a-b}{1+ab},$$

а также

$$\frac{t(t-\tau)}{0,23\alpha_1 l} \ll 1,$$

минимальное значение отраженного сигнала $U_{\text{отр min c}}$ от сосредоточенной неоднородности будет равно

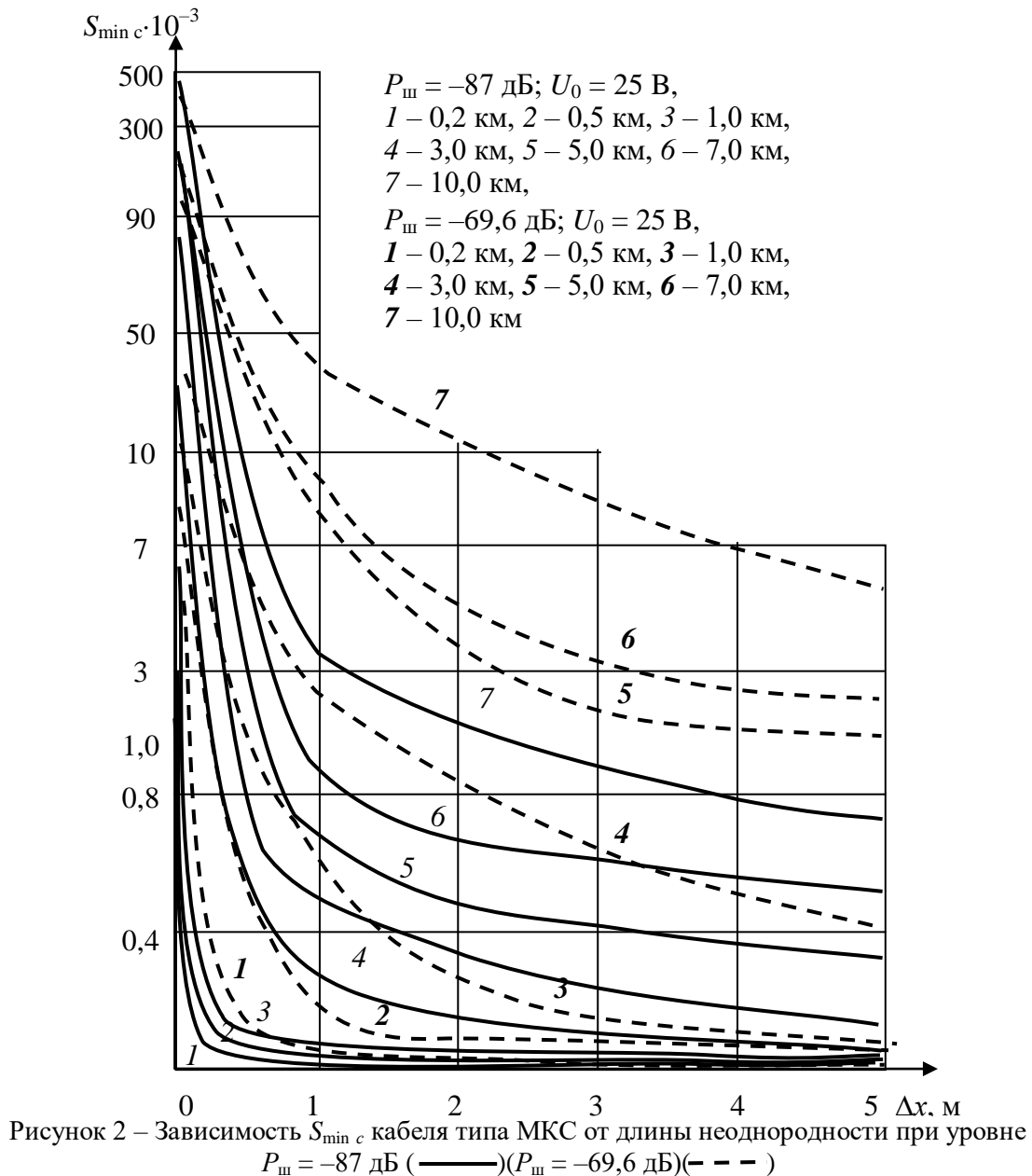
$$U_{\text{отр min c}} = S_{\text{min c}} U_0 e^{-0,23\alpha_0 l} \operatorname{arctg} \frac{\tau}{0,23\alpha_1 l}. \quad (9)$$

Аналогично определим выражение

$$S_{\text{min c}} = S_{\text{min}} \frac{2}{\pi} \operatorname{arctg} \frac{\Delta x}{\sqrt{0,115\alpha_1 l}},$$

где Δx – длина сосредоточенной неоднородности, м.

Зависимость $S_{\text{min c}}$ от длины цепи, уровня шума и длины неоднородности на примере симметричной цепи кабеля типа МКСБ 4 x 4 приведены на рис. 2.



Как следует из графиков (рис. 2), величина минимального коэффициента отражения от сосредоточенной неоднородности, при котором еще может быть обнаружен сигнал на приеме, возрастает с увеличением протяженности цепи и уменьшением самой неоднородности.

Проведенный анализ предельных возможностей обнаружения импульсов при наличии шумов справедлив для шумов за счет внешних влияний и переходных помех. Однако неоднородность полуфабрикатов, используемых в процессе изготовления кабеля и допуски в технологическом процессе, приводят к тому, что электрические характеристики, и, в первую очередь, волновое сопротивление, не остается постоянным по всей длине. Такие неоднородности также являются источником шумов.

Уровень шума за счет отражений от конструктивных неоднородностей приближенно можно определить по формуле [4]

$$P_{\text{шк}} \approx 20 \lg S, \text{ дБ},$$

где S – среднее значение коэффициента отражения.

Отсюда, $P_{\text{шк}} = -50,5 \text{ дБ}$.

Для этого значения уровня шума минимальные коэффициенты отражения от распределенной и сосредоточенной неоднородностей, полученные на примере симметричной цепи кабеля типа МКСБ – 4 х 4, приведены в табл. 1 и 2 соответственно.

Таблица 1 – Коэффициенты отражения от распределенной неоднородности

$l, \text{ км}$	0,2	0,5	1,0	3,0	5,0	7,0	10,0
$S_{\text{min}} \cdot 10^{-4}$	1,45	1,54	1,69	2,51	3,71	5,49	9,89

Таблица 2 – Коэффициенты отражения от сосредоточенной неоднородности

$\Delta x, M$	$l, \text{ км}$						
	0,2	0,5	1,0	3,0	5,0	7,0	10,0
	$S_{\text{min.c}} \cdot 10^{-2}$						
0,01	7,19	19,1	41,9	187	460	953	2452
0,1	0,72	1,9	4,2	18,7	46,0	953	245,2
0,5	0,14	0,38	0,84	3,73	9,2	19,1	49,1
1,0	0,072	0,19	0,42	1,87	4,6	9,5	24,5
3,0	0,024	0,064	0,14	0,62	1,53	3,18	8,2
5,0	0,014	0,038	0,084	0,37	0,92	1,91	4,9

Таким образом, в соответствии с данными табл. 1 и 2, мешающее действие шумов конструктивных неоднородностей оказывается значительным по сравнению с шумами за счет внешних влияний и помех, что в итоге сказывается на обнаружении отраженного импульса в шумах.

Исследования показали что, измеренное значение уровня шума в реальном кабеле оказалось равным $P_{\text{ш изм}} = -69,6 \text{ дБ}$. Тогда анализ результатов расчетов (табл. 1 и 2) показал, что минимальное значение $P_{\text{ш изм}}$ значительно ниже $P_{\text{ш к}}$, т. е. $P_{\text{ш к}} > P_{\text{ш изм}}$ и практически с действием шумов за счет внешних влияний и переходных помех можно не считаться.

Предыдущий анализ позволяет оценить предельную разрешающую способность импульсного метода (Δy), по (минимальному расстоянию между двумя рядом расположенными неоднородностями), которые еще можно различить на приемном конце. При этом, в основном, будем учитывать шумы за счет конструктивных неоднородностей.

В заключение можно отметить следующее. В статье проведены теоретические исследования возможности импульсного метода, позволяющего определить повреждения.

Литература

1. Бессонов Л.А. Линейные электрические цепи / Бессонов Л. А. – М.: Высшая школа, 1974. – 320 с.
2. Ляховец Г.Я. Расчет искажений коротких импульсов / Г. Я. Ляховец // Труды вузов связи. – М. – Вып. 18, 1963. – С. 12-18.
3. Сафонов В.И. О влияниях помех на прием импульсных сигналов / В. И. Сафонов // Радиотехника. – 1946. – №1. – С. 35-41
4. Шалыт Г.М. Определение мест повреждений в электрических сетях / Шалыт Г. М. – М: Энергоиздат, 1982. – 310 с.
5. Шварцман О.В. Взаимные влияния в кабелях связи / Шварцман О. В. – М.: Связь, 1966. – 431 с.