

Сопоставимость результатов измерений и реализуемость методов измерений вторичных параметров кабелей по ГОСТ 27893-88, ГОСТ 31944-2012 и МВИ-Q-резонанс с применением измерителей добротности типа Е9-4 и ему подобных, анализаторов систем передачи и кабелей связи AnCom А-7, анализаторов цифровых каналов и трактов AnCom Е-9 и др.
(техническая справка¹)

Метод 6 в ГОСТ 27893-88² - метод **ХХ-КЗ** (холостого хода – короткого замыкания) - позволяет измерять вторичные параметры кабеля в комплексной форме: волновое сопротивление $Z_0 = Z_e \cdot e^{j\Phi}$ и коэффициент передачи $\gamma = \alpha + j\beta$.

Приложение А к ГОСТ 31944-2012³ определяет 3 метода - **ХХ-КЗ**, **разности уровней** и **резонансный** - для измерения модуля импеданса Z_e и коэффициента затухания α .

МВИ-Q-резонанс⁴ ориентирована на применение измерителей добротности (Q-метров) и позволяет **резонансным** методом измерить Z_e и α .

ГОСТ 27893-88. 6. МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВОЛНОВОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ, КОЭФФИЦИЕНТА ЗАТУХАНИЯ И КОЭФФИЦИЕНТА ФАЗЫ СИММЕТРИЧНЫХ КАБЕЛЕЙ (МЕТОД 6)

6.1. Аппаратура

6.1.1. Измерение должно проводиться средствами для измерения входного сопротивления. Погрешность измерения должна определяться классом точности применяемых средств измерений, если в нормативно-технической документации на кабели не указаны другие требования.

6.2. Подготовка к измерениям

6.2.1. Подготовка кабелей к измерениям должна проводиться в соответствии с требованиями п.1.2 и 3.2.2.

6.3. Проведение измерений

6.3.1. Определение волнового сопротивления, коэффициента затухания и коэффициента фазы проводят **методом холостого хода и короткого замыкания** с последующим определением волнового сопротивления, коэффициента затухания и коэффициента фазы.

6.3.2. Допускается проводить измерения другими равноценными методами и средствами измерений, при этом методика измерений должна быть указана в нормативно-технической документации на кабели.

6.3.3. Измерения должны быть проведены **на строительных длинах кабелей**, в измеряемых цепях которых нет обрыва и короткого замыкания, если в нормативно-технической документации на кабели не указаны другие требования.

6.3.4. Измерение сопротивления холостого хода и короткого замыкания должно проводиться с учетом мест отражения, образующихся в зависимости от длины кабеля и частоты.

6.3.5. Диапазон частот или измерительные частоты, на которых проводят измерения, должны быть указаны в нормативно-технической документации на кабели.

¹ В настоящей справке комментарии даны черным курсивом.

² ГОСТ 27893-88. Кабели связи. Методы испытаний - <http://docs.cntd.ru/document/1200004627/>.

В настоящей справке выдержки из ГОСТ 27893-88 цитируются шрифтом синего цвета.

³ ГОСТ 31944-2012 Кабели грузонесущие геофизические бронированные. Общие технические условия - <http://docs.cntd.ru/document/1200102742>. В справке выдержки из ГОСТ 31944-2012 даны красным.

⁴ Методика выполнения измерений вторичных параметров кабелей используется некоторыми кабельными заводами.

6.4. Обработка результатов измерений

6.4.1. По значениям сопротивления холостого хода и короткого замыкания должно быть определено комплексное волновое сопротивление (Z_0) в Ом, коэффициенты затухания (a) и фазы (b) по формулам

$$Z_0 = \sqrt{Z_L \cdot Z_K};$$

$$\text{th } g = \text{th}(\alpha + jb) = \sqrt{\frac{Z_K}{Z_L}},$$

где Z_L - комплексное сопротивление холостого хода, Ом;
 Z_K - комплексное сопротивление короткого замыкания, Ом;
 g - комплексная постоянная распространения.

Значения коэффициентов затухания (a) и фазы (b) должны быть пересчитаны на длину 1 км и температуру 20 °С и указаны в виде

α - коэффициент затухания, дБ/км,
 β - коэффициент фазы, рад/км.

Коэффициент пересчета на длину и температуру 20 °С должен быть указан в нормативно-технической документации на кабель.

6.4.2. Округление результатов измерений должно проводиться в соответствии с требованиями п.3.4.2.

6.4.3. Полученные результаты должны сопоставляться со значениями, указанными в нормативно-технической документации на кабель, и при необходимости изображаться графически.

Обоснование метода измерения вторичных параметров кабелей по результатам измерения импеданса в режимах ХХ-КЗ выполняется с применением систем уравнений (12.20) и (12.21) из **Приложения-1**⁵. Уравнения связывают

комплексные напряжение и ток в начале линии при ХХ на дальнем конце (\dot{U}_{xx} и \dot{I}_{xx}), комплексные напряжение и ток в начале линии при КЗ на дальнем конце ($\dot{U}_{кз}$ и $\dot{I}_{кз}$) с комплексными напряжением и током на дальнем конце (\dot{U}_2 и \dot{I}_2).

Здесь:

$$(12.20) \begin{cases} \dot{U}_{xx} = \dot{U}_2 \text{ch}(\gamma x) \\ \dot{I}_{xx} = \frac{\dot{U}_2}{\dot{Z}_6} \text{sh}(\gamma x) \end{cases}$$

$$(12.21) \begin{cases} \dot{U}_{кз} = \dot{Z}_6 \dot{I}_2 \text{sh}(\gamma x) \\ \dot{I}_{кз} = \dot{I}_2 \text{ch}(\gamma x) \end{cases}$$

$\gamma = \alpha + j\beta$ - комплексный коэффициент передачи,
 α - коэффициент затухания в Нп/км,
 β - коэффициент фазы в рад/км,
 \dot{Z}_6 - импеданс кабеля в Ом,
 x - расстояние от дальнего конца до ближнего в км.

Разделив в (12.20) и (12.21) первые уравнения на вторые, получим импедансы, измеряемые на ближнем конце для отрезка кабеля с длиной $x = l$ в км:

$$\frac{\dot{U}_{xx}}{\dot{I}_{xx}} = \dot{Z}_{xx} = \frac{\dot{Z}_6}{\text{th}(\gamma l)} \quad (\Phi-1)$$

$$\frac{\dot{U}_{кз}}{\dot{I}_{кз}} = \dot{Z}_{кз} = \dot{Z}_6 \text{th}(\gamma l) \quad (\Phi-2)$$

⁵ Формулы воспроизводятся с точностью до обозначений.

Умножением (Ф-1) на (Ф-2) можно получить $\dot{Z}_{кз} \dot{Z}_{xx} = \dot{Z}_e^2$,

делением (Ф-2) на (Ф-1) можно получить $\frac{\dot{Z}_{кз}}{\dot{Z}_{xx}} = th^2(\gamma l)$.

В итоге импеданс в Ом, коэффициент затухания в Нп/км и коэффициент фазы в рад/км могут быть определены выражениями (Ф-3) и (Ф-4), соответствующим формулам п. 6.4.1 ГОСТ 27893-88.

$$\dot{Z}_e = \sqrt{\dot{Z}_{кз} \dot{Z}_{xx}} \quad (\text{Ф-3})$$

$$\gamma = \alpha + j\beta = \frac{1}{l} \operatorname{Re} \left(\operatorname{arth} \left(\frac{\dot{Z}_{кз}}{\dot{Z}_{xx}} \right) \right) + j \frac{1}{l} \operatorname{Im} \left(\operatorname{arth} \left(\frac{\dot{Z}_{кз}}{\dot{Z}_{xx}} \right) \right) \quad (\text{Ф-4})$$

Измерения по методу 6 ГОСТ 27893-88 обеспечиваются анализаторами систем передачи и кабелей связи AnCom A-7 (далее – А-7) в автоматизированном режиме СуперСел. Анализаторы измеряют и симметричные, и коаксиальные кабели.

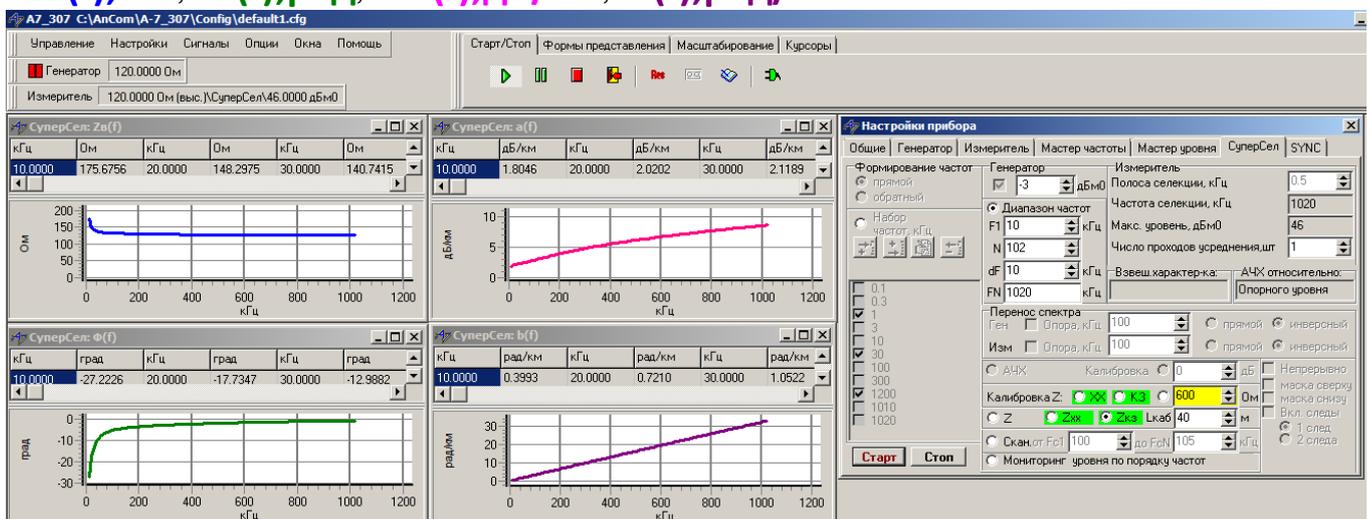
Пользователь производит следующие операции:

- определяет измерительные частоты одним из трех способов: **Диапазон частот** $f = F1...FN$, числом N при шаге dF , или единственное значение частоты в **Диапазоне частот** $f = F1$ при $N = 1$ или произвольный **Набор частот**;
- подключает к анализатору соединительный кабель и калибрует анализатор последовательно в режиме ХХ на окончании соединительного кабеля – **Калибровка Z ХХ**; в режиме КЗ на окончании соединительного кабеля – **Калибровка Z КЗ**;
- подключает к окончанию соединительного кабеля измеряемый кабель (отрезок кабеля, кабель в бухте или на барабане) и задает его длину в метрах **Lкаб**,
- задает режим ХХ на дальнем конце измеряемого кабеля и измеряет **Zxx**,
- задает режим КЗ на дальнем конце измеряемого кабеля и измеряет **Zкз**.

Анализатор выполняет расчет по формулам (Ф-3) и (Ф-4), соответствующих формулам п. 6.4.1 ГОСТ 27893-88, и отображает результаты

$Z_0(f) = Z_e(f) \cdot e^{j\Phi(f)}$ и $g(f) = \alpha(f) + j\beta(f)$ соответственно на формах

Zв(f), Ом, Φ(f), рад, а(f), дБ/км, b(f), рад/км.



ГОСТ 31944-2012. Приложение А (обязательное). Методика определения волнового сопротивления и коэффициента затухания

А.1 Назначение

Настоящее приложение устанавливает методы и порядок определения вторичных параметров передачи (волнового сопротивления и коэффициента затухания) кабелей в диапазоне частот **1 кГц - 10 МГц** с погрешностью **±5%**.

А.2 Методы измерения

А.2.1 **Волновое сопротивление** определяют:

- **методом холостого хода и короткого замыкания** с помощью амперметра и вольтметра;
- **резонансным методом**.

А.2.1.1 Метод **холостого хода и короткого замыкания** с помощью амперметра и вольтметра

А.2.1.1.1 Метод основан на измерении входных напряжений и тока разомкнутой и короткозамкнутой цепей кабеля. Метод следует применять в диапазоне частот **1-300 кГц**.

А.2.1.1.2 Входные сопротивления рассчитывают по результатам измерений напряжений и тока.

А.2.1.1.3 Волновое сопротивление рассчитывают как среднее геометрическое значений входных сопротивлений.

А.2.1.2 **Резонансный метод**

А.2.1.2.1 Метод основан на измерении частоты при резонансе измеряемой цепи кабеля. Метод следует применять в диапазоне частот **0,3-10 МГц**.

А.2.1.2.2 Резонанс фиксируют по минимуму показаний вольтметра на входе разомкнутой или короткозамкнутой цепи.

А.2.1.2.3 Волновое сопротивление рассчитывают по результатам измерений резонансной частоты и емкости.

А.2.2 **Коэффициент затухания** определяют:

- методом **разности уровней**;
- методом **двух вольтметров**.

А.2.2.1 Метод разности уровней

А.2.2.1.1 Метод основан на измерении напряжений на входе и выходе измеряемой цепи кабеля. Метод следует применять в диапазоне частот **1-100 кГц**.

А.2.2.1.2 Коэффициент затухания рассчитывают по результатам измерения напряжений.

А.2.2.2 Метод двух вольтметров

А.2.2.2.1 Метод основан на измерении напряжений на входе и выходе замкнутой измеряемой цепи кабеля **при резонансе**.

Метод следует применять в диапазоне частот **0,3-10 МГц**.

А.2.2.2.2 Резонанс фиксируют по максимуму отношения напряжения на входе к напряжению на выходе измеряемой цепи кабеля.

А.2.2.2.3 Коэффициент затухания рассчитывают по результатам измерения напряжений.

Примечания

Указанные ограничения по диапазону частот обусловлены методическими ограничениями и ограничениями измерительных средств возможностей средств измерений, применявшихся при отработке стандарта.

Оба метода ограничены динамическим диапазоном применяемых средств измерений. Для выбранной частоты, нормированной в соответствующих ТУ на кабель и необходимой погрешности измерений, длина измеряемого кабеля по методу ХХ-КЗ в 2 раза меньше длины кабеля, измеряемого резонансным методом. Причина заключается в том, что по ХХ-КЗ измеряется сигнал, дважды ослабленный в образце, а при резонансном измерении сигнал передается только в одну сторону.

В то же время резонансный метод имеет тот недостаток, что для измерения на требуемой частоте следует отрезать от кабеля образец соответствующей длины. То есть резонансный метод является разрушающим.

А.3 Средства измерения

При проведении измерений должны быть применены средства измерений согласно таблице А.1.

Таблица А.1

Наименование средств измерений	Обозначение стандарта	Основные метрологические характеристики
Генератор	ГОСТ 22261	Погрешность установки частоты генератора не должна быть более $\pm 1\%$
Вольтметр	ГОСТ 22261	Погрешность не должна быть более $\pm 1\%$. Входное сопротивление не должно быть менее 1 МОм. Входная емкость не должна быть более 120 пФ
Амперметр	ГОСТ 8711	Погрешность не должна быть более $\pm 1\%$
Нагрузочное сопротивление	ГОСТ 24013	Сопротивление, выбранное из ряда нагрузочных сопротивлений, равное волновому сопротивлению кабеля, с погрешностью не более $\pm 4\%$
Мост для измерения электрической емкости	ГОСТ 9486	Погрешность не должна быть более $\pm 1\%$

А.4 Подготовка и порядок проведения измерений

А.4.1 Отбор и подготовка объекта измерений

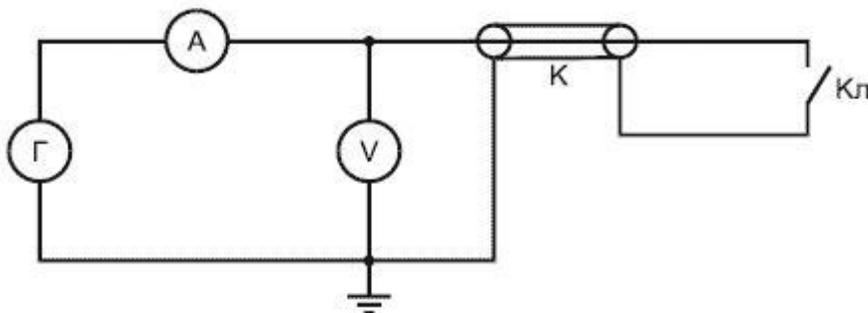
А.4.1.1 Волновое сопротивление и коэффициент затухания определяют на **строительных длинах** или **образцах кабеля**. Длина образцов должна быть указана в технических условиях на кабели конкретных марок.

А.4.1.2 Подготовку к выполнению измерений проводят в следующем порядке:

- на оба конца кабеля накладывают бандаж на броню и удаляют последнюю на длине 200-250 мм;
- до обреза брони удаляют оболочки и обмотки лентами (если они имеются);
- на кабелях с коаксиальными парами удаляют изоляцию внешних проводников на длине 140-160 мм и внешние проводники на длине 100-120 мм;
- удаляют изоляцию с токопроводящих жил на длине 30-50 мм и, при необходимости, маркируют жилы;
- заземляют корпуса приборов.

А.4.2 Определение волнового сопротивления методом **холостого хода и короткого замыкания** с помощью амперметра и вольтметра (А.2.1.1)

А.4.2.1 Собирают установку по схеме, показанной на рисунке А.1



Г - генератор; А - амперметр; V - вольтметр; К - кабель; Кл – ключ
Рисунок А.1

А.4.2.2 Измеряют параметры в следующем порядке:

- устанавливают частоту генератора на значение, указанное в технических условиях на кабели конкретных марок;
- измеряют напряжение и ток на входе измеряемой цепи для режимов холостого хода и короткого замыкания I_{xx} , $I_{кз}$, U_{xx} , $U_{кз}$, где

I_{xx} - ток на входе кабеля в режиме холостого хода, А;

$I_{кз}$ - ток на входе кабеля в режиме короткого замыкания, А;

U_{xx} - напряжение на входе кабеля в режиме холостого хода, В;

$U_{кз}$ - напряжение на входе кабеля в режиме короткого замыкания, В.

Современные средства измерений имеют динамический диапазон около 80 дБ, что определяет ограничение по применимости метода ХХ-КЗ для измерения коэффициента затухания:

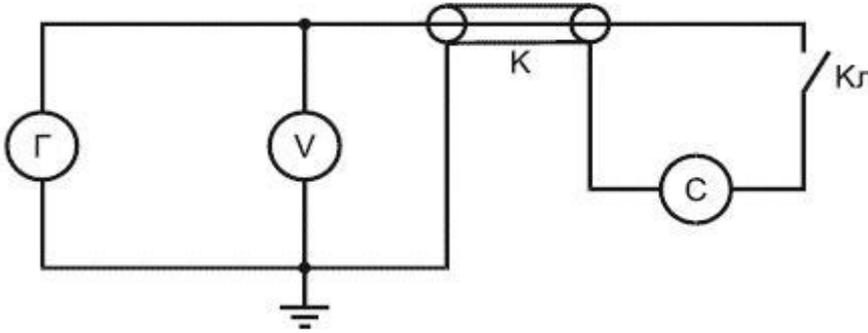
$$\alpha_{xx-кз}(f) < \frac{40\text{дБ}}{L, \text{км}}$$

Для измерений импеданса по ХХ-КЗ ограничение по максимальной длине отсутствует.

Измерения методом ХХ-КЗ выполняется на **строительных длинах**

A.4.3 Определение волнового сопротивления резонансным методом (A.2.1.2)

A.4.3.1 Собирают установку по схеме, показанной на рисунке A.2.



Г - генератор; V - вольтметр; K - кабель; C - измеритель емкости; Кл - ключ
Рисунок A.2

A.4.3.2 Резонансную частоту определяют в следующем порядке:

- устанавливают ориентировочную резонансную частоту генератора f_p , МГц, рассчитанную по формуле

$$f_p = \frac{75n}{L\sqrt{\varepsilon}}$$

(A.1)

где

ε - диэлектрическая проницаемость изоляции;

L - длина кабеля, м;

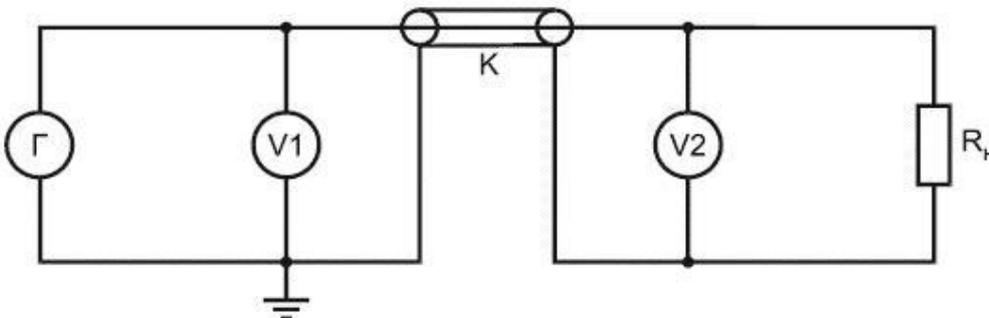
n - номер резонанса - любое целое число, которое в режиме холостого хода должно быть нечетным, а в режиме короткого замыкания - четным;

- уточняют значение резонансной частоты регулировкой генератора по минимуму показаний вольтметра.

A.4.3.3 Измеряют электрическую емкость цепи C по ГОСТ 27893.

A.4.4 Определение коэффициента затухания методом разности уровней (A.2.2.1)

A.4.4.1 Собирают установку по схеме, показанной на рисунке A.3.



Г - генератор; V1, V2 - вольтметры; K - кабель; R_n - нагрузочное сопротивление
Рисунок A.3

A.4.4.2 Измеряют напряжения на входе и выходе кабеля в следующем порядке:

- устанавливают частоту генератора на значение, указанное в технических условиях на кабели конкретных марок;
- измеряют напряжения на входе (U_1) и выходе кабеля (U_2).

Объединение в одной схеме двух задач не представляется правильным. Следовало бы представить две схемы:

- для определения частоты резонанса,
- для измерения ёмкости.

Измерение резонансным методом выполняется на отрезках кабеля

длина, которых соответствует частоте резонанса по (A.1). Так для

ПЭ-изоляции ($\varepsilon = 2,3$):

$L(0.1\text{МГц}) = 494.5\text{м}$

$L(0.3\text{МГц}) = 164.8\text{м}$

$L(1\text{МГц}) = 49.45\text{м}$

$L(3\text{МГц}) = 16.48\text{м}$

$L(10\text{МГц}) = 4.945\text{м}$

$L(30\text{МГц}) = 1.648\text{м}$

$L(100\text{МГц}) = 0.495\text{м}$

Измерение емкости по п. 3.3.1 ГОСТ 27893-88

выполняется на

частоте 800 Гц

(10...2000 Гц).

Измеренная НЧ-ёмкость

используется для

расчета ВЧ-импеданса,

что вносит

методическую

погрешность в

результат, т.к.

ёмкость кабеля зависит

от частоты, хотя эта

зависимость выражена

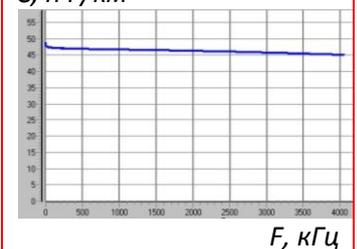
слабо.

Пример зависимости

ёмкости от частоты

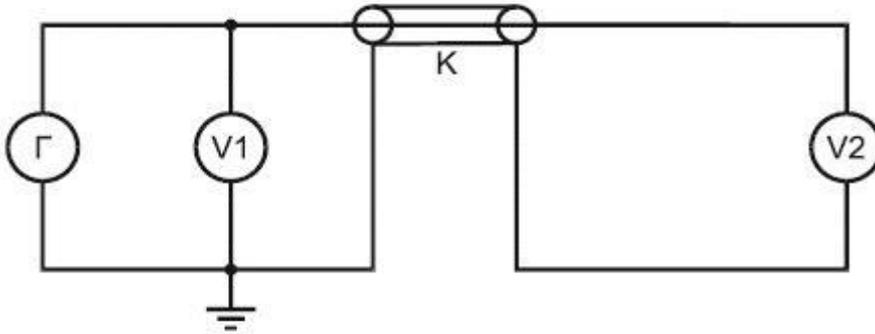
для КСВ 5е 2х2х0,52

C , нФ/км



A.4.5 Определение коэффициента затухания методом двух вольтметров (A.2.2.2)

A.4.5.1 Собирают установку по схеме, показанной на рисунке А.4.



Г - генератор; V1, V2 - вольтметры; К - кабель
Рисунок А.4

A.4.5.2 Измеряют напряжения на входе и выходе кабеля в следующем порядке:

- устанавливают резонансную частоту генератора, рассчитанную по формуле (A.1);
- изменяя частоту генератора, поддерживают постоянное напряжение на входе и по **минимуму показаний вольтметра на выходе** определяют момент резонанса в измеряемой цепи;
- измеряют напряжения U_1 и U_2 .

A.5 Обработка результатов измерений

A.5.1 Волновое сопротивление кабеля Z_e , Ом, определяют по формулам:

по результатам измерений методом **холостого хода и короткого замыкания** с помощью амперметра и вольтметра (A.4.2)

$$Z_B = \sqrt{\frac{U_{\text{ХХ}} U_{\text{КЗ}}}{I_{\text{ХХ}} I_{\text{КЗ}}}} \quad (\text{A.2})$$

по результатам измерений **резонансным методом** (A.4.3)

$$Z_B = \frac{\pi}{4 f_p C} \quad (\text{A.3})$$

A.5.2 Коэффициент затухания кабеля α , дБ/км, определяют по формулам:

по результатам измерений методом **разности уровней** (A.4.4)

$$\alpha = \frac{8,68 \ln \frac{U_1}{U_2}}{L} \quad (\text{A.4})$$

по результатам измерения методом **двух вольтметров** (A.4.5):

- **на резонансной частоте**

$$\alpha_p = \frac{8,68 \text{Arsh} \frac{U_1}{U_2}}{L} \quad (\text{A.5})$$

- приведенный к частоте f , Гц, указанной в технических условиях на кабели конкретных марок

$$\alpha = \alpha_p \sqrt{\frac{f}{f_p}} \quad (\text{A.6})$$

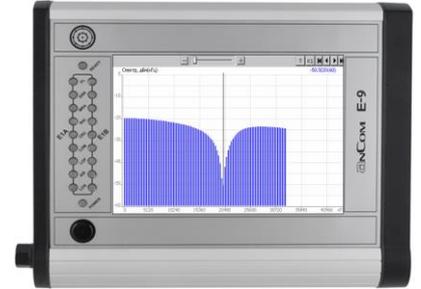
Здесь – ошибка.
В режиме ХХ на дальнем конце (в точке установки вольтметра V2) при согласованном включении генератора Г на ближнем конце напряжение на V2 фактически постоянно $U_2(f = \text{var}) = \text{const}$
Напряжение на ближнем конце будет **минимально** на частоте резонанса f_p
 $U_1(f_p) = \text{min}$ (см. иллюстрации на стр. 8).

Здесь – неточность.
 $20 \lg(e) =$
 $= 20 \lg(2,71828) =$
 $= 8,686$, т.е. округление до 3-х знаков было произведено с ошибкой

Обоснование **резонансного метода** измерения коэффициента затухания кабелей выполняется на основе применения первого уравнения из уже использованной выше системы уравнений для режима ХХ на дальнем конце – см. (12.20) из **Приложения-1**:

$$\begin{aligned} \dot{U}_{xx} &= \dot{U}_2 \operatorname{ch}(\gamma x) = \frac{1}{2} \dot{U}_2 (e^{\gamma x} + e^{-\gamma x}) = \frac{1}{2} \dot{U}_2 (e^{\alpha x} e^{j\beta x} + e^{-\alpha x} e^{-j\beta x}) = \\ &= \frac{1}{2} \dot{U}_2 (e^{\alpha x} (\cos(\beta x) + j \sin(\beta x)) + e^{-\alpha x} (\cos(-\beta x) + j \sin(-\beta x))) \end{aligned} \quad (\Phi-5)$$

Значения частот нечетных резонансов $n = 1, 3, 5, \dots$, наблюдаемых при ХХ на дальнем конце, $f = n f_p$ связаны с длиной волны $x = l = \frac{n\lambda}{4}$. Частота 1-го резонанса f_p определяется экспериментально по минимуму напряжения $U_{xx}(f_p) = |\dot{U}_{xx}(f_p)| = \min$.



Длина волны в соответствии с § 12.3 **Приложения-1** (стр. 352) равна $\lambda = \frac{2\pi}{\beta}$. Тогда

на частотах $n = 1, 3, 5, \dots$ резонанса $\beta x = \beta l = \beta \frac{n\lambda}{4} = \beta \frac{2\pi n}{4\beta} = \frac{\pi}{2} n$ и с учетом (Ф-5)

$$\begin{aligned} \dot{U}_{xx} &= \frac{1}{2} \dot{U}_2 \left(e^{\alpha l} \left(\cos\left(\frac{\pi}{2} n\right) + j \sin\left(\frac{\pi}{2} n\right) \right) + e^{-\alpha l} \left(\cos\left(-\frac{\pi}{2} n\right) + j \sin\left(-\frac{\pi}{2} n\right) \right) \right) = \\ &= \frac{1}{2} \dot{U}_2 (e^{\alpha l} (0 \pm j) - e^{-\alpha l} (0 \pm j)) = \pm j \dot{U}_2 \frac{e^{\alpha l} - e^{-\alpha l}}{2} = \pm j \dot{U}_2 \operatorname{sh}(\alpha l) \end{aligned} \quad (\Phi-6)$$

Формула (Ф-6) показывает, что при ХХ на дальнем конце и расстоянии до измерительного сечения $x = \frac{n\lambda}{4}$ сдвиг фазы между напряжениями равен $\pm \frac{\pi}{2}$. Тогда из (Ф-6) для измеренных уровней

на ближнем конце $U_{xx}(f = n f_p) = |\dot{U}_{xx}(f = n f_p)|$ и

на дальнем конце $U_2(f = n f_p) = |\dot{U}_2(f = n f_p)|$ следует (Ф-7).

$$\operatorname{sh}(\alpha(f = n f_p)l) = \frac{U_{xx}(f = n f_p)}{U_2(f = n f_p)} \quad (\Phi-7)$$

В итоге коэффициент затухания в Нп/км на частотах нечетных ($n = 1, 3, 5, \dots$) резонансов $f = n f_p$ может быть определен выражением (Ф-8), которое соответствует формуле **(А.5) ГОСТ 31944-2012** при $n = 1$.

$$\alpha(f = n f_p) = \frac{1}{l} \operatorname{arsh} \left(\frac{U_{xx}(f = n f_p)}{U_2(f = n f_p)} \right) \quad (\Phi-8)$$

Обоснование резонансного метода измерения импеданса кабелей выполняется на основе применения формул, определяющих зависимости коэффициента фазы (4.28) и импеданса (4.30) от первичных параметров кабеля (стр. 119, 120 **Приложения-2**). Упрощение этих формул для высоких частот, соответствующих реальным измеряемым длинам кабелей на барабанах, в бухтах и в отрезках, дает выражения (4.34 б) и (4.34 в) – см. стр. 122 **Приложения-2**.

$$(4.34 \text{ б}) \quad \beta \approx \omega_p \sqrt{L_0 C_0} \quad \text{Здесь: } L_0 - \text{погонная индуктивность в Гн/км,}$$

$$(4.34 \text{ в}) \quad Z_s \approx \sqrt{\frac{L_0}{C_0}} \quad C_0 - \text{погонная емкость в Ф/км,}$$

$$\omega_p = 2\pi f_p - \text{круговая частота в 1/с,}$$

$$f_p - \text{частота 1-го резонанса, Гц.}$$

Добавим в эту систему уравнений выражение из § 12.3 **Приложения-1** (стр. 352) для длины волны в км.

$$\lambda = \frac{2\pi}{\beta} \quad (\Phi-9)$$

Так как измерение производится на частоте 1-го резонанса f_p , при которой длина отрезка кабеля равна четверти длины волны, то

$$l = \frac{\lambda}{4} \quad (\Phi-10)$$

Из (Φ-9) и (Φ-10) следует, что на частоте 1-го резонанса

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2\pi}{4l} = \frac{\pi}{2l} \quad (\Phi-11)$$

Из (4.34 б) и (Φ-11) следует, что

$$\sqrt{L_0} \approx \frac{\beta}{\omega_p \sqrt{C_0}} = \frac{\pi}{2l\omega_p \sqrt{C_0}} \quad (\Phi-12)$$

Подстановка (Φ-12) в (4.34 в) с учетом того, что измеренная емкость отрезка кабеля равна $C = lC_0$, дает выражение (Φ-13) для вычисления импеданса, соответствующее формуле **(А.3) ГОСТ 31944-2012** для 1-го резонанса.

$$Z_s \approx \frac{\pi}{2l\omega_p \sqrt{C_0} \sqrt{C_0}} = \frac{\pi}{4\pi f_p l C_0} = \frac{1}{4f_p C} \quad (\Phi-13)$$

МВИ-Q-резонанс - методика выполнения измерений импеданса и коэффициента затухания резонансным методом с применением Q-метра

1. НАЗНАЧЕНИЕ, ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ И ПОКАЗАТЕЛИ ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ

1.1. Настоящая методика выполнения измерений (МВИ) распространяется на кабели коаксиальные марок ККФРД, ККПДС ТУ16-505.647-74 и симметричные экранированные парной скрутки марок ККЭВ, ККЭВС ТУ16-505.648-74 и устанавливает метод определения коэффициента затухания и волнового сопротивления в диапазоне частот от 5 МГц до 35 МГц с затуханием в образце кабеля не менее 0,04дБ и обеспечивает определение волнового сопротивления с погрешностью не более $\pm 2\%$ и коэффициента затухания не более $\pm 10\%$.

2. МЕТОД ИЗМЕРЕНИЙ

2.1. Метод определения коэффициента затухания и волнового сопротивления кабелей основывается на измерении параметров образца кабеля резонансным методом на измерителе добротности с последующим определением значений коэффициента затухания и волнового сопротивления по расчетным формулам.

3. СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ

3.1. При проведении измерений по данной МВИ используются средства измерений, указанные в таблице.

Наименование, тип, средство измерений	ГОСТ или ТУ	Основные метрологические характеристики	Примечание
Измеритель добротности Е 9 - 4	ГОСТ 11286-69	Погрешность измерения добротности в диапазоне частот 50 кГц-35 МГц не более	Допускается применение других типов измерителей добротности

ИИВ 204514 Жу 02 02 10

Продолжение

Наименование и тип, средства измерения	ГОСТ или ТУ	Основные метрологические характеристики	Примечание
		на шкале $60 \pm (0,05Q + 0,6)$ $200 \pm (0,04Q + 2)$ $500 \pm (0,04Q + 6)$ Погрешность градуировки шкалы частот - $\pm 1\%$ Погрешность градуировки шкалы емкости от 25 пФ до 100 пФ - ± 1 пФ от 100 пФ до 450 пФ - $\pm 1\%$	с соответствующими метрологическими характеристиками <i>не</i> <i>нужно</i> <i>указанных</i> <i>в</i> <i>таблице</i>

21462 204514 п. с. 02.88

5.6. Выключить приборы в сеть и прогреть в течении 10 мин.

5.7. Произвести калибровку измерителя добротности в соответствии с прилагаемой инструкцией по эксплуатации измерителя добротности.

5.8. Переключателем "диапазоны" и ручкой "частота" установить нулевую частоту.

5.9. Установить переключатель в положение "уст. нули". и ручками "уст. нули Q" и "уст. нули уровни" установить нули на соответствующих шкалах.

5.10. Установить переключатель в положение "измерения".

5.11. Ручкой "уровень" установить стрелку прибора "уровень" на риску и поддерживать в этом положении до время измерений".

5.12. Переключатель "шкала Q" поставить в положение 60.

6. ВЫПОЛНЕНИЕ ИЗМЕРЕНИЙ

6.1. Измерить емкость образца кабеля C_0 в пикофарадах с помощью измерителя Е7-8 в соответствии с инструкцией по эксплуатации на данный прибор и по ГОСТ ~~10786-72~~²⁷⁸⁹³⁻⁸⁸, ГОСТ 11326.0-78. Полученное значение C_0 в пикофарадах занести в таблицу (приложение)

6.2. Определить число четвертей волны, укладываемых в образце (номер резонанса) n' на частоте измерений f по формуле

$$n' = \frac{f \cdot l \cdot \xi}{75} \quad (1)$$

где n' — предполагаемое число четвертей волны (номер резонанса) в образце ;

ξ — коэффициент укорочения длины волны в образце, принимаемый для кабелей со сплошной полиэтиленовой изоляцией $\xi = 1,52$, если в НТД на кабеле не указано другое значение коэффициента укорочения длины волны;

l — длина образца, м

f — частота измерений, указанная в НТД на кабель, МГц.

Полученную величину n' округлить до ближайшего целого числа

и.

6.3. Определить приблизительное значение частоты резонанса

и :

$$f' = \frac{75 \cdot n}{l \cdot \gamma} \text{ МГц (2)}$$

6.4. Подсоединить прямой и обратный проводники образца кабели и гнезда измерителя добротности согласно рис. 1 или рис. 2.

При подсоединении проводников образца 6 последовательно с катушкой 5 измерителя добротности к его гнездам 1 и 2 согласно рис. 1, в разомкнутом на конце кабеле укладывается целое нечетное число четвертей волны, а в замкнутом — целое четное.

При подсоединении проводников образца 6 параллельно конденсатору к гнездам 3 и 4 по рис. 2, в разомкнутом кабеле укладывается целое четное число четвертей волны, а в замкнутом — целое нечетное.

6.5. Вращением ручки "емкость" добиться резонанса — максимального отклонения индикатора, указывающего величину добротности на частоте близкой к f' . При этом зафиксировать величину емкости C_{K1} конденсатора, соответствующую резонансу.

6.6. Отключить кабель, катушку 5 вставить непосредственно в гнезда 1 и 2 и снова добиться резонанса, зафиксировав значение C_{K2} конденсатора.

6.7. Если $C_{K1} \neq C_{K2}$ увеличить или уменьшить частоту генератора измерителя добротности в зависимости от знака разности $(C_{K2} - C_{K1})$ и повторить всю операцию снова, в результате чего разность $(C_{K2} - C_{K1})$ должна уменьшаться.

6.8. Производить изменение частоты до тех пор пока не получится $C_{K1} = C_{K2} = C_f$ при какой-то частоте $f_{рез}$. Измеритель добротности при частоте $f_{рез}$ показывает с включенным кабелем добротность

Схема подключения образца кабеля к измерителю добротности при измерении коэффициента затухания и волнового сопротивления

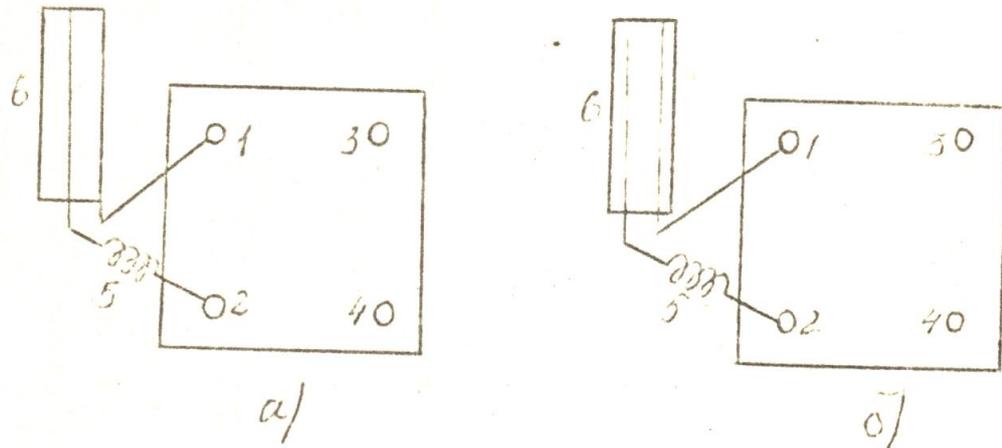


Рис. 1

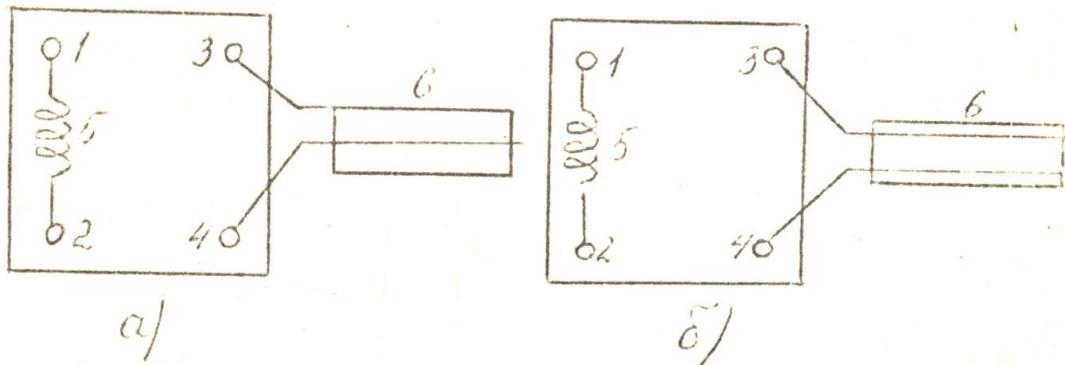


Рис. 2

- Подсоединение проводников а) коаксиальных кабелей,
 б) симметричных кабелей парной скрутки (экран должен быть заземлен)
 1, 2, 3, 4 - гнезда измерителя добротности;
 5 - экранированная катушка индуктивности ;
 6.- испытываемый кабель

Ш.В. 204 574 от 01.12

Q_1 , без кабеля - добротность Q_2 , причем $Q_2 > Q_1$.

Полученные значения $f_{рез}$, R_1 , R_2 , C_f занести в таблицу (приложение).

7. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ И ОФОРМЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

7.1. Волновое сопротивление кабеля определяется по формуле:

$$Z = \frac{250 \cdot n \cdot 10^3}{f_{рез} C_e} \text{ Ом}$$

где Z - волновое сопротивление кабеля, Ом ;

n - номер резонанса ;

$f_{рез}$ - частота резонанса, МГц;

C_e - емкость образца кабеля замеренная по п.6.1, пФ

$$C_e = \frac{2(C_1 + C_2) \cdot l}{v}$$

$$f_{оср} = \frac{v}{l}$$

7.2. Коэффициент затухания кабеля, замеренный по схеме рис.1, определяется по формуле:

$$\alpha_{рез} = \frac{8,686}{l} \text{ artg} \frac{1,59 \cdot 10^5 (R_2 - R_1)}{Z \cdot f_{рез} \cdot C_f \cdot R_2 \cdot R_1} \text{ дБ/м}$$

7.3. Коэффициент затухания кабеля, замеренный по схеме рис.2, определяется по формуле: $\alpha_{рез} = \frac{8,686}{l} \text{ artg} \frac{54,55 \cdot f_{рез} \cdot Z_c \cdot C_f (R_1 - R_2)}{R_1 \cdot R_2 \cdot C \cdot 10^6}$ мм

$$\alpha_{рез} = \frac{8,686}{l} \text{ artg} \frac{1,59 \cdot 10^5 (R_2 - R_1)}{Z \cdot f_{рез} \cdot C_f (R_2 - R_1)} \text{ дБ/м}$$

7.4. Коэффициент затухания на частоте f , отличной от частоты $f_{рез}$ определяется по формуле:

$$\alpha = \alpha_{рез} \sqrt{\frac{f}{f_{рез}}}$$

где: $\alpha_{рез}$ - коэффициент затухания, замеренный при резонансной частоте ;

f - частота, указанная в НТД на кабеле ;

$f_{рез}$ - резонансная частота.

Шабл 204.514 14.01.01.08

Обоснование **резонансного метода** выполнения измерений (МВИ) с применением измерителей добротности (Q-метров) выполняется на материале представленной выше **МВИ-Q-резонанс** и описания Q-метра Е9-4 (Приложение-3).

Согласно **МВИ-Q-резонанс** импеданс кабеля $Z_с$ вычисляется:

- по измеренной емкости отрезка кабеля C (п. 6.1 **МВИ-Q-резонанс**) и измеренной резонансной частоте f_p (п. 6.2 – п. 6.8 **МВИ-Q-резонанс**)
- с использованием формулы из п. 7.1 **МВИ-Q-резонанс**, которая с точностью до обозначений соответствует ранее полученной формуле (Ф-13).

Вывод представленной в п. 7.3 **МВИ-Q-резонанс** формулы для расчета коэффициента затухания выполняется исходя из уравнений (12.20) **Приложения 1**, связывающих напряжение \dot{U}_{xx} и ток \dot{I}_{xx} на удалении x от находящегося в режиме ХХ конца линии с напряжением на этом конце \dot{U}_2 .

Здесь:

$$(12.20) \begin{cases} \dot{U}_{xx} = \dot{U}_2 ch(\gamma x) \\ \dot{I}_{xx} = \frac{\dot{U}_2}{\dot{Z}_с} sh(\gamma x) \end{cases} \quad \begin{array}{l} \gamma = \alpha + j\beta \text{ - комплексный коэффициент передачи,} \\ \alpha \text{ - коэффициент затухания в Нп/км,} \\ \beta \text{ - коэффициент фазы в рад/км,} \\ \dot{Z}_с \text{ - импеданс кабеля в Ом,} \\ x \text{ - расстояние от дальнего конца до ближнего в км.} \end{array}$$

Разделив 1-е уравнение из (12.20) на 2-е, получим (Ф-14).

$$\dot{Z}_{xx} = \frac{\dot{U}_{xx}}{\dot{I}_{xx}} = \dot{Z}_с ch(\gamma x) \quad (\text{Ф-14})$$

На частоте 1-го резонанса для отрезка кабеля с длиной $x = l = \frac{\lambda}{4}$

$$\beta x = \beta l = \frac{2\pi}{\lambda} \frac{\lambda}{4} = \frac{\pi}{2} \text{ и тогда из (Ф-14) следуют (Ф-15) и (Ф-16).}$$

$$\begin{aligned} \dot{Z}_{xx} &= \dot{Z}_с ch(\gamma l) = \dot{Z}_с \frac{e^{\alpha l} e^{j\beta l} + e^{-\alpha l} e^{-j\beta l}}{e^{\alpha l} e^{j\beta l} - e^{-\alpha l} e^{-j\beta l}} = \\ &= \dot{Z}_с \frac{e^{\alpha l} e^{j\pi/2} + e^{-\alpha l} e^{-j\pi/2}}{e^{\alpha l} e^{j\pi/2} - e^{-\alpha l} e^{-j\pi/2}} = \dot{Z}_с \frac{j(e^{\alpha l} - e^{-\alpha l})}{j(e^{\alpha l} + e^{-\alpha l})} = \dot{Z}_с th(\alpha l) \end{aligned} \quad (\text{Ф-15})$$

$$\alpha = \frac{1}{l} \operatorname{arth} \left(\frac{\dot{Z}_{xx}}{\dot{Z}_с} \right) \quad (\text{Ф-16})$$

На частоте резонанса реактивная составляющая импеданса $X_{xx} = 0$, т.е. $\dot{Z}_{xx} = R_{xx}$. Кроме того, согласно упрощению (4.34 в) (см. стр. 122 **Приложения-2**) и собственный импеданс кабельной линии активен $\dot{Z}_с = |\dot{Z}_с| = Z_с$.

Таким образом, формулу (Ф-16) можно переписать в виде (Ф-17).

$$\alpha = \frac{1}{l} \operatorname{arth} \left(\frac{Z_{xx}}{Z_с} \right) = \frac{1}{l} \operatorname{arth} \left(\frac{R_{xx}}{Z_с} \right) \quad (\text{Ф-17})$$

Для использования (Ф-17) следует измерить импеданс $\dot{Z}_{xx} = R_{xx}$.

Q-метр измеряет полное сопротивление двухполюсника.

При использовании схемы по Рис. 2 **МВИ-Q-резонанс**, соответствующей правой схеме на Рис.4 **Приложения 3**, расчет сопротивления R_{xx} выполняется по формуле (15) со стр. 26 **Приложения 3**.

Здесь:

$$(15) \quad R_{xx} = \frac{1,59 \cdot 10^8 Q_1 Q_2}{f_p C_1 (Q_1 - Q_2)}$$

Q_1, Q_2 , - измеренные значения добротности, ед.
 f_p - измеренная резонансная частота, кГц,
 C_1 - измеренная емкость, пФ,
 R_{xx} - активная составляющая измеряемого импеданса, Ом.

Подставляя (15) из **Приложения 3** в формулу (Ф-17) получаем выражение (Ф-18) для вычисления коэффициента затухания в Нп/км, где импеданс Z_6 вычислен по (Ф-13), соответствующей п. 7.1 **МВИ-Q-резонанс**.

$$\alpha = \frac{1}{l} \operatorname{arth} \left(\frac{1,59 \cdot 10^5 Q_1 Q_2}{Z_6 f_p C_1 (Q_1 - Q_2)} \right) \quad (\text{Ф-18})$$

Формула (Ф-18) соответствует формуле по п. 7.3 **МВИ-Q-резонанс** с точностью до множителей:

- $8,686 = 20 \lg(e)$ - коэффициент пересчета из Нп в дБ и
- 10^8 и 10^5 (под арктангенсом) – демонстрирует различие, вызванное тем, что в описании по **Приложению 3** частота измеряется в кГц, а в **МВИ-Q-резонанс** - в МГц.

Сопоставляя формулы (Ф-8) и (Ф-18), обеспечивающие измерение коэффициента затухания на **резонансной частоте**, легко видеть, что обе формулы выведены из рассмотрения одной и той же системы уравнений (12.20) **Приложения 1**.

Формула (Ф-8), соответствующая формуле **(А.5) ГОСТ 31944-2012**, оперирует результатами прямого измерения 2-х значений уровня напряжения на резонансной частоте, легко определяемой при использовании панорамных измерителей.

В формуле (Ф-18), соответствующей формуле по п. 7.3 **МВИ-Q-резонанс**, используется существенно большее количество первичных данных, резонансная частота определяется итерационно (п.п. 6.2–6.8 **МВИ-Q-резонанс**), дополнительно используется результат измерения импеданса.

Таким образом, выведенные из единого источника формулы (Ф-8) и (Ф-18) обеспечивают получение методически эквивалентных результатов, однако трудоемкость и наличие дополнительных погрешностей, вызванных сложностью метода с применением **Q-метра**, существенно снижает эффективность **МВИ-Q-резонанс** в пользу измерений и расчета по **(А.5) ГОСТ 31944-2012**.

Кроме того существует дополнительное важное требование, которое легко обеспечивается при измерениях по **ГОСТ 27893-88** и **ГОСТ 31944-2012** и способно существенно исказить результаты при использовании **МВИ-Q-резонанс**.

Формулы (Ф-3), (Ф-4) для расчета \dot{Z}_e , α и β по **ГОСТ 27893-88**,

формулы (Ф-13), (Ф-8) для расчета Z_e и α по **ГОСТ 31944-2012** и

формулы (Ф-13), (Ф-17) для расчета Z_e и α по **МВИ-Q-резонанс**

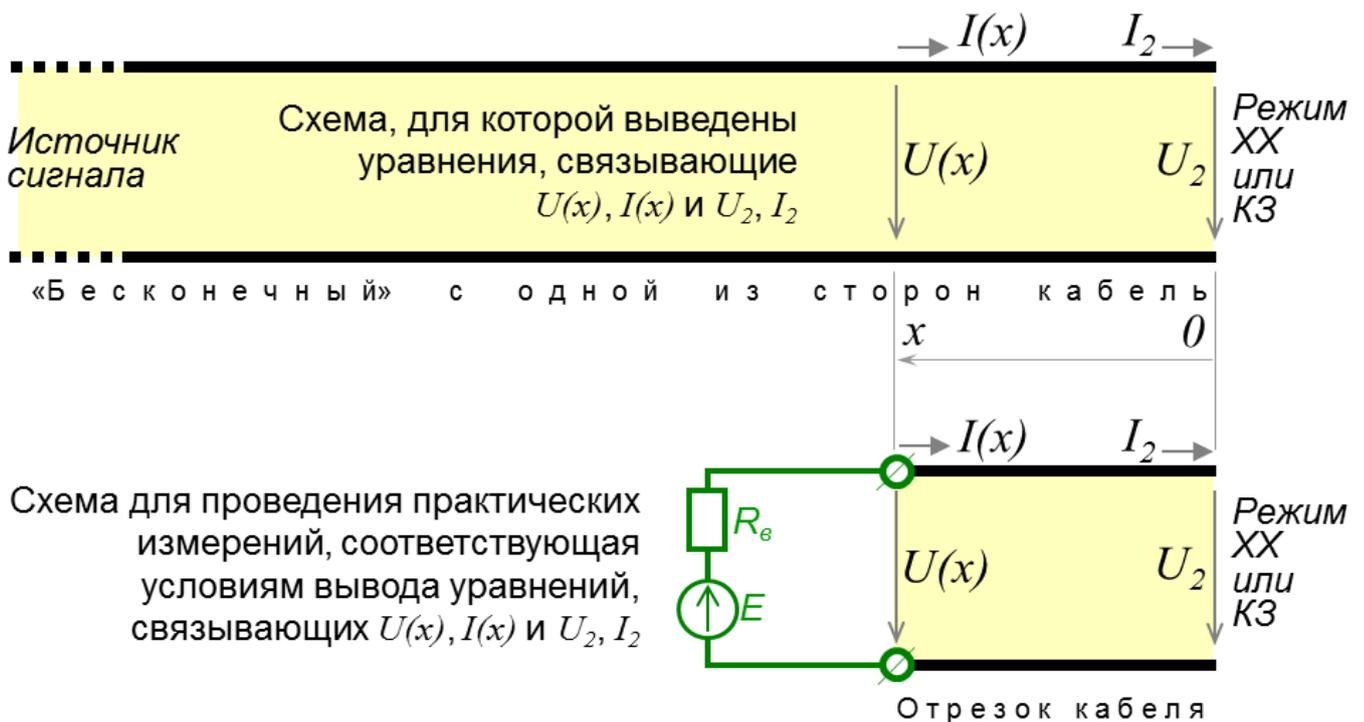
выведены из одних и тех же уравнений системы (12.20), (12.21) **Приложения 1**.

Эти уравнения устанавливают связь между

- напряжением и током $U(x), I(x)$ на удалении x от окончания кабеля, на котором воспроизводятся режимы ХХ или КЗ, и
- напряжением и током U_2, I_2 на окончании кабеля.

Однако теория по **Приложению 1** предполагает, что кабель представляет собой луч, то есть имеет окончание, на котором формируются режимы ХХ и КЗ, а измерительный сигнал поступает из бесконечности и таким образом отрезок кабеля от координаты 0 до координаты x нагружен в точке x на собственный импеданс

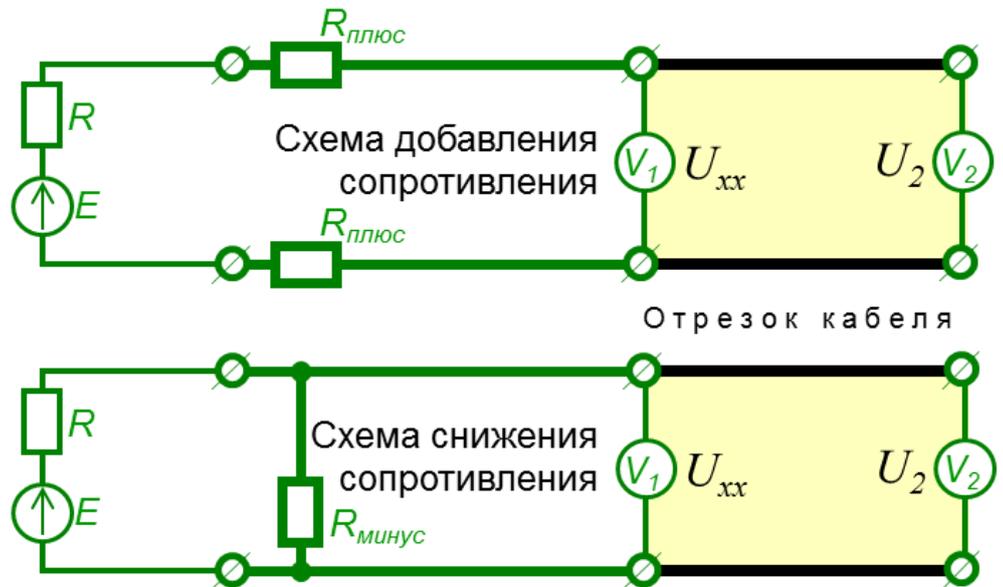
кабеля $\dot{Z}_e \approx R_e$.



То есть в ходе практических измерений в точке с координатой x средство измерений (СИ) должно иметь входное сопротивление равно собственному импедансу кабеля. Такое условие обеспечения согласования СИ с кабелем:

- практически невыполнимо при включении отрезка кабеля в резонансный контур в случае использования Q-метра - **МВИ-Q-резонанс**;
- затруднено при использовании универсальных измерителей импеданса, посредством которых можно было бы реализовать измерения по **ГОСТ 27893-88**;
- обеспечивается анализаторами кабелей связи, входные-выходные сопротивления которых обычно соответствуют импедансам типовых кабелей, - **ГОСТ 27893-88**, **ГОСТ 31944-2012**;
- может быть в точности выполнено при использовании резонансного метода по **ГОСТ 31944-2012** путем доукомплектования панорамного измерителя уровня согласующими устройствами.

Дополнительные согласующие устройства для корректной реализации резонансного метода измерения импеданса и коэффициента затухания по ГОСТ 31944-2012 посредством применения широкополосного панорамного измерителя уровня, входящего в состав анализатора AnCom E-9.



Компромиссное собственное входное-выходное сопротивление анализаторов может быть выбрано равным $R=130 \text{ Ом}$.

Возможные значения импеданса измеряемых кабелей разных типов могут составлять ряд, определяемый ГОСТ 11326.0-78⁶:

- РК (коаксиальные) $R_e = 50, 75, 100, 150, 200 \text{ Ом}$;
- РД (двухпроводные) $R_e = 50, 75, 100, 150, 200, 300 \text{ Ом}$;
- РС (спиральные) $R_e = 50, 75, 100, 150, 200, 400, 800, 1600, 3200 \text{ Ом}$;
- РИ (излучающие) $R_e = 50, 75 \text{ Ом}$.

Дополнительные значения, известные из различных ТУ на кабели таковы $R_e = 45, 110, 120, 130, 145, 200 \text{ Ом}$.

В таблице для некоторых значений R_e представлены значения соответствующих резисторов для схем снижения и добавления сопротивления.

$R_e, \text{ Ом}$		45	50	75	100	110	120	145	150	175	200	300	400	800
Согласование генератора	$R=130 \text{ Ом}$	68.8	81.3	177.3	433.3	715.0	1560.0	7.5	10.0	22.5	35.0	85.0	135.0	335.0
	$R=130 \text{ Ом}$	68.8	81.3	177.3	433.3	715.0	1560.0	7.5	10.0	22.5	35.0	85.0	135.0	335.0
	Схема и резисторы	$R_{\text{минус}} = \frac{RR_e}{R - R_e}, \text{ Ом}$ снижает сопротивление						$R_{\text{плюс}} = \frac{R_e - R}{2}, \text{ Ом}$ добавляет сопротивление						

⁶ ГОСТ 11326.0-78 Кабели радиочастотные. Общие технические условия. <http://docs.cntd.ru/document/1200012011>
Пункт 1.3 Номинальные значения волнового сопротивления.

Измерение импеданса по **ГОСТ 31944-2012**:

- **A.4.2** (по **XX-K3**) реализуется по схеме вольтметра-амперметра, что практически совпадает с методом 6 **ГОСТ 27893-88** и, следовательно, обеспечивается анализатором **A-7** в автоматизированном режиме СуперСел;
- **A.4.3** (**резонансный** метод) обеспечивается анализатором **A-7** путем
 - определения резонансной частоты f_p по измеряемым анализатором **A-7** **спектральной панораме уровня** или **частотной характеристике импеданса** отрезка кабеля с **XX** на дальнем конце,
 - измерения анализатором **A-7** ёмкости C отрезка кабеля с **XX** на дальнем конце и
 - расчетом по формуле **(A.3)**.

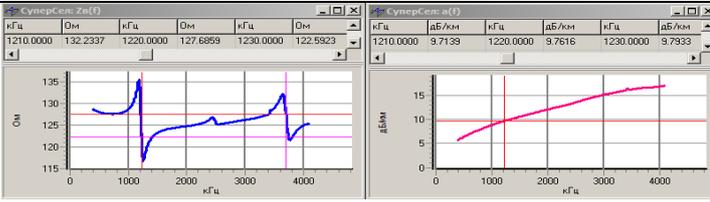
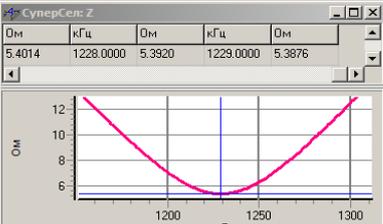
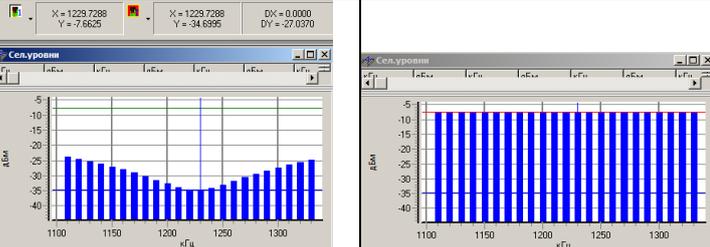
Измерение коэффициента затухания по **ГОСТ 31944-2012**:

- **A.4.4** – (**по разности уровней**) обеспечивается анализатором **A-7** следующим образом:
 - устанавливается импеданс генератора и импеданс измерителя анализатора **A-7** в соответствии с измеренным волновым сопротивлением кабеля,
 - выход генератора соединительными проводами соединяется со входом измерителя; выполняется калибровка анализатора вместе с соединительными проводами (установка затухания 0 дБ на частоте f);
 - к соединительным проводам подключается измеряемый кабель; анализатором **A-7** измеряется рабочее затухание $A(f)$ в дБ; коэффициент затухания определяется по формуле $\alpha(f) = \frac{A(f)}{L}$, соответствующей формуле **(A.4)**;
- **A.4.5** – (методом двух вольтметров на **резонансной** частоте) обеспечивается анализатором **A-7** следующим образом:
 - устанавливаются импедансы генератора и измерителя анализатора **A-7**:
 - генератор
 - **согласованно** в соответствии с измеренным волновым сопротивлением кабеля,
 - подключение к отрезку кабеля на ближнем конце;
 - измеритель
 - **высокоомно**,
 - подключение к кабелю на ближнем конце для измерения U_1 ;
 - подключение к кабелю на дальнем конце в режиме **XX** для измерения U_2 ;
 - при таком включении на частоте 1-го резонанса f_p , определяемой материалом изоляции жил кабеля и длиной кабеля, обеспечивается минимум уровня напряжения U_1 (в точке подключения кабеля к генератору Γ – **Рисунок A.4**) при практически независимом от частоты уровне напряжения U_2 в точке **XX**;
 - измерение напряжений U_1 и U_2 выполняется на фактической резонансной частоте, определяемой минимумом напряжения $U_1(f_p) = \min$;
 - коэффициент затухания определяется по формуле **(A.5)**.

Измерение импеданса и коэффициента затухания по **ГОСТ 27893-88** и **ГОСТ 31944-2012** на образце кабеля КТЦПм 1х2х0,8 ($D_{жс} = 0,8\text{мм}$, $L = 40\text{м}$).

1-й резонанс по **(А.1)** – расчетная частота $f_p = \frac{75 \cdot 1}{(0,040\text{м}) \cdot \sqrt{2,3}} = 1236\text{кГц}$.

Анализатор AnSot A-7/307 (погрешность измерения импеданса $\pm 1\%$).

Метод	Результаты и расчеты	f , кГц	Z_e , Ом	α , дБ/км	Примечания	
<p>ГОСТ 27893-88</p> <p>Метод 6 ХХ-КЗ</p> <p>Измерение импеданса и коэф. затухания</p>	 <p>ЧХ импеданса и коэффициента затухания непосредственно измеряются анализатором</p>	1230	125	9.79 (+1.2%)	Измерение на любой частоте. Вблизи резонансных частот ($n f_p \pm 0.2 f_p$) возрастает погрешность измерения импеданса	
<p>ГОСТ 31944-2012</p> <p>Резонансный метод А4.3</p> <p>Определение волнового сопротивления на резонансной частоте</p>	 <p>минимум ЧХ импеданса на ближнем конце при ХХ на дальнем</p>	$f_p = 1230\text{кГц}$ $C(1\text{кГц}) = 1.626\text{нФ}$ $Z_e(f_p) = \frac{1}{4(1230\text{кГц})(1.626\text{нФ})} = 125.0\text{Ом}$	1230	125 (результат принят за основу)	Измерение только на резонансных частотах, определяемых выбранной длиной контрольного отрезка кабеля и материалом изоляции жил.	
<p>ГОСТ 31944-2012</p> <p>Метод двух вольтметров на резонансной частоте А4.5</p> <p>Определение коэффициента затухания методом двух вольтметров на резонансной частоте</p>	 <p>$U_1(1230\text{кГц}) = -34.70\text{дБм}$ Ближний конец $U_2(1230\text{кГц}) = -7.66\text{дБм}$ Дальний конец=ХХ</p> <p>Положение резонанса определяется в точке минимума на панораме уровня</p> $\frac{U_1(1230\text{кГц})}{U_2(1230\text{кГц})} = (-34.70\text{дБм}) - (-7.66\text{дБм}) = -27.04\text{дБ}$ $\frac{U_1}{U_2}(1230\text{кГц}) = 10^{(-27.04\text{дБ})/20} = 0.0445$ $\alpha(1230\text{кГц}) = \frac{8.696 \cdot \text{arsh}(0.0445)}{(0.04\text{км})} = 9.67\text{дБ/км}$	1230	-	9.67 (результат принят за основу – откл.= 0.0%)	Наличие панорамного измерителя уровня или АЧХ облегчает поиск резонанса. Возможна разработка СИ на основе панорамного измерителя с автоматическим поиском резонанса	
<p>ГОСТ 31944-2012</p> <p>Метод по разности уровней А4.4</p> <p>Опред. коэф. зат. методом разности уровней</p>	<p>Прямое измерение рабочего затухания при подключении генератора и измерителя анализатора (120 Ом) близком к согласованному</p> $A(1230\text{кГц}) = U_1/U_2 = 0.3774\text{дБ}$	$\alpha(1230\text{кГц}) = \frac{(0.3774\text{дБ})}{(0.04\text{км})} = 9.44\text{дБ/км}$	1230	-	9.44 (-2.4%)	Измерение на любой частоте при условии согласования анализатора и кабеля. Источник погрешности - неполная согласованность

Анализатор AnCom A-7/307 обеспечивает измерение импеданса и коэффициента затухания коаксиальных и симметричных кабелей:

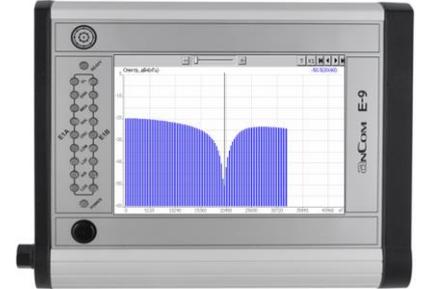
- методом **XX-K3** по **ГОСТ 27893-88** (автоматизирован);
- **резонансным** методом по **ГОСТ 31944-2012**;
- методом **разности уровней**.

Применение анализатора AnCom A-7/307 ограничено:

- диапазоном частот анализатора – **до 4096 кГц**;
- погрешностью измерения импеданса, составляющей $\pm 1\%$, что при использовании метода **XX-K3** на резонансных частотах провоцирует всплеск погрешности измерения собственного импеданса кабеля и вынуждает вводить вблизи резонансных частот запретные зоны, которые применительно к допустимому отклонению выбранному (к примеру) равным $\pm 2\%$ составляют $(nf_p \pm 0.20f_p)$.

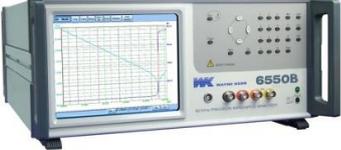
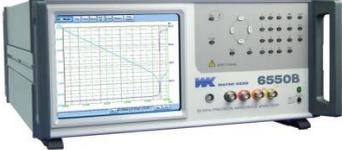
Анализатор AnCom E-9 позволяет использовать **резонансный метод** по **ГОСТ 31944-2012** для измерения импеданса и затухания в диапазоне **до 32000 кГц**.

Пример для отрезка кабеля КТЦПМ 1x2x0,8 с длиной 2,5 м:



<p>RLC-метр измеряет емкость</p>	<p>$C(1кГц) = 0.10нФ$</p>
<p>Измеряется панорама частот на ближнем конце отрезка при XX на дальнем.</p> <p>ГОСТ 31944-2012 - А4.3 резонансный метод - импеданс кабеля:</p> $Z_{\epsilon}(f_p) = \frac{1}{4(20160кГц)(0.10нФ)} = 122.7 Ом$	<p>Анализ кабеля: АЧХ Затухание, дБ= 3.00 Защищенность, дБ=49.18</p> <p>Спектр, дБм(кГц)</p> <p>Анализатор AnCom E1 настроен на измерение АЧХ. Генератор на разъеме Tx формирует МЧС (многочастотный сигнал) и подключен к кабелю с длиной 2,5 м при XX на дальнем, Приемник RTx (высокоомно) - к Tx. Индицируется спектр сигнала.</p> <p>Измерительный курсор настроен на положение резонанса: $f_p = 20160 кГц$ $P1(f_p) = -57.6 дБм$</p>
<p>Измеряется панорама частот на дальнем конце</p> <p>ГОСТ 31944-2012 - А4.5 метод двух вольтметров на резонансной частоте коэффициент затухания</p> $\frac{U_1}{U_2}(20160кГц) = 10^{((-57.6)-(24.4))/20} = 0.0219$ $\alpha(20160кГц) = \frac{8.696 arsh(0.0219)}{(0.0025км)} = 76.1 дБ/км$	<p>Анализ кабеля: АЧХ Затухание, дБ= 1.37 Защищенность, дБ=51.25</p> <p>Спектр, дБм(кГц)</p> <p>Второе измерение выполняется при подключении дальнего конца отрезка кабеля на высокоомный вход измерителя RTx на той же резонансной частоте</p> <p>$P1(f_p) = -24.4 дБм$</p>

Дальнейшее расширение диапазона частот **до 140 МГц** может быть обеспечено применением анализаторов иммитанса или анализаторов АЧХ.

Метод XX-K3 (ГОСТ 27893-88)		Резонансный метод (ГОСТ 31944-2012)	
На основе анализатора иммитанса		На основе анализатора АЧХ	
 WK 6505B...WK 65120B 5...120 МГц 1 308 240 руб. (без учета работ по допрограммированию)		 WK 6505B...WK 65120B 5...120 МГц 1 308 240 руб. (без учета работ по допрограммированию)	
		 АКИП-4601 анализатор АЧХ 140 МГц 156 944 руб. (без учета работ по допрограммированию)	
		 + измеритель RLC АКИП-6108 26 136 руб.	
<p>Можно ожидать, что уменьшение инструментальной погрешности анализаторов при измерении импеданса позволит сузить запретную зону вокруг значений резонансной частоты при измерениях методом XX-K3</p>		<p>Анализаторы иммитанса могут быть применены и для измерений резонансным методом: измерение ёмкости C; измерение ЧХ импеданса в целях определения резонансной частоты f_p позволяет получить импеданс по A.4.3. Для определения коэффициента затухания по A.4.5 дополнительно необходимы генератор и измеритель уровня для измерения соотношения $U_1(f_p)/U_2(f_p)$.</p>	
Анализатор (верхняя частота диапазона)	Инструментальная погрешность измерения импеданса, %	Запретная зона измерения собственного импеданса кабеля методом XX-K3 относительно резонансных частот $n f_p$	<p>Резонансный метод по A.4.3 (импеданс) и по A.4.5 (коэфф. затухания) может быть реализован с использованием анализаторов АЧХ, сочетающих в себе: панорамный индикатор для определения резонансной частоты f_p, генератор и измеритель уровня для определения $U_1(f_p)/U_2(f_p)$. Дополнительно необходим измеритель ёмкости.</p> <p>Возможна автоматизация измерений путем USB-подключения измерителей к ПК и разработки соответствующего ПО</p>
A-7/307 (4 МГц)	±1%	$n f_p \pm 0.20 f_p$	
E7-29 (15 МГц)	±0,2%	$n f_p \pm 0.04 f_p$	
E4990A (20...120 МГц)	±0,08%	$n f_p \pm 0.02 f_p$	
WK 6505B...WK 65120B (5...120 МГц)	±0,05%	$n f_p \pm 0.01 f_p$	

Заместитель директора, главный метролог
ООО «Аналитик-ТС»



А.В. Кочеров, к.т.н.
6 ноября 2017
+7 985 999 02 48
andrey@analytic.ru
andrey.kocherov@yandex.ru

Приложение-1. «Телеграфные» уравнения

6П2. 1
Т 11
УДК 621.3 (075.8)

Рецензент: докт. техн. наук, проф. Н. Г. Максимович
(Львовский государственный университет)

Ионкин Петр Афанасьевич, Даревский Александр Иосифович,
Кухаркин Евгений Степанович, Миронов Владимир Георгиевич,
Мельников Николай Александрович

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ
Т о м I.

Основы теории линейных цепей
Под ред. проф. П. А. Ионкина

Редактор Е. М. Романчук. Художественный редактор Т. М. Скворцова. Технический редактор Э. М. Чижиков. Корректор Г. И. Кострикова.
Т-02838. Слано в набор 18/Х-75 г. Подп. к печати 6/II-76 г. Формат 60х90¹/₁₆. Бум. тип. № 3. Объем 34 печ. л. Усл. п. л. 34. Уч.-изд. л. 32,21. Изд. № ЭР-193. Тираж 70 000 экз. Цена 1 р. 23 к. Зак. 208
План выпуска литературы издательства «Высшая школа» (вузы и техникумы) на 1976 г. Позиция № 129
Москва, К-51, Неглинная ул., д. 29/14. Издательство «Высшая школа»
Орден Трудового Красного Знамени Ленинградское производственно-техническое объединение «Печатный Двор» имени А. М. Горького Союзполиграфпрома при Государственном комитете Совета Министров СССР по делам издательства, полиграфии и книжной торговли, 197136, Ленинград, П-136, Гатчинская ул., 26.

Т 11 Теоретические основы электротехники. Т. I. Основы теории линейных цепей. Под ред. П. А. Ионкина. Учебник для электротехн. вузов. Изд. 2-е, переработ. и доп. М., «Высш. школа», 1976.

544 с. с ил.
На обороте тит. л. авт.: П. А. Ионкин, А. И. Даревский, Е. С. Кухаркин и др.
Первый том книги подвергся существенной переработке, необходимой для приближения содержания курса к современной практике расчета и проектирования электротехнических устройств. Изложение основных законов и методов расчета цепей ведется с использованием матриц, топологических понятий и графов.

30306—135
001 (01)—76 129—76

6П2.1

© Издательство «Высшая школа», 1976.
www.toe.ho.ua

Отсюда, пренебрегая величинами второго порядка малости, легко получить:

$$\left. \begin{aligned} -\frac{\partial u}{\partial x} &= r_0 i + L_0 \frac{\partial i}{\partial t}; \\ -\frac{\partial i}{\partial x} &= g_0 u + C_0 \frac{\partial u}{\partial t}. \end{aligned} \right\} \quad (12.4)$$

При синусоидальном напряжении источника питания линии с однородными постоянными параметрами (не зависящими от тока и напряжения) ток и напряжение в любой ее точке при установившемся режиме, так же как и в линейных цепях с сосредоточенными параметрами, синусоидальны. Поэтому уравнения (12.4) можно переписать в комплексной форме:

$$\left. \begin{aligned} -d\dot{U}/dx &= (r_0 + j\omega L_0) \dot{I} = Z_0 \dot{I}; \\ -d\dot{I}/dx &= (g_0 + j\omega C_0) \dot{U} = Y_0 \dot{U}, \end{aligned} \right\} \quad (12.5)$$

где $Z_0 = r_0 + j\omega L_0$ — комплекс продольного сопротивления на единицу длины линии; $Y_0 = g_0 + j\omega C_0$ — комплекс поперечной проводимости на единицу длины линии, причем $Z_0 \neq 1/Y_0$.

После дифференцирования этих уравнений и замены $d\dot{U}/dx$ и $d\dot{I}/dx$ в соответствии с выражениями (12.5) получаются следующие равенства:

$$\left. \begin{aligned} \frac{d^2 \dot{U}}{dx^2} &= Z_0 Y_0 \dot{U} = \gamma^2 \dot{U}; \\ \frac{d^2 \dot{I}}{dx^2} &= Y_0 Z_0 \dot{I} = \gamma^2 \dot{I}, \end{aligned} \right\} \quad (12.6)$$

где $\gamma = \alpha + j\beta = \sqrt{Z_0 Y_0} = \sqrt{(r_0 + j\omega L_0)(g_0 + j\omega C_0)}$ — коэффициент (постоянная) распространения; α — коэффициент (постоянная) затухания; β — коэффициент (постоянная) сдвига фаз. Из этих уравнений следует, что изменения комплексных значений напряжения и тока вдоль линии (в зависимости от координаты x) одинаковы. Поэтому сначала следует найти закон изменения одной из этих величин, например напряжения \dot{U} , после чего легко определить закон изменения другой величины \dot{I} с помощью первого из уравнений (12.5).

Общее решение однородного линейного дифференциального уравнения второго порядка (12.6) относительно напряжения имеет вид

$$\dot{U} = \dot{A}_1 e^{-\gamma x} + \dot{A}_2 e^{\gamma x}, \quad (12.7)$$

где \dot{U} — комплексное значение напряжения на расстоянии x от начала линии; $-\gamma$ и γ — корни характеристического уравнения $p^2 - \gamma^2 = 0$; \dot{A}_1 и \dot{A}_2 — постоянные интегрирования.

Комплексное выражение для тока \dot{I} определяем из первого уравнения (12.5):

$$\dot{I} = -\frac{1}{Z_0} \frac{d\dot{U}}{dx} = \frac{\gamma}{Z_0} (\dot{A}_1 e^{-\gamma x} - \dot{A}_2 e^{\gamma x}) = \frac{1}{Z_c} (\dot{A}_1 e^{-\gamma x} - \dot{A}_2 e^{\gamma x}), \quad (12.8)$$

Напряжение и ток на входе $(k+1)$ -го (от начала цепочки) звена определяют по формулам

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_{k+1} &= \dot{U}_{n+1} \operatorname{ch}(n-k)g + Z_c \dot{I}_{n+1} \operatorname{sh}(n-k)g; \\ \dot{I}_{k+1} &= \dot{I}_{n+1} \operatorname{ch}(n-k)g + \dot{U}_{n+1} \frac{\operatorname{sh}(n-k)g}{Z_c}. \end{aligned} \right\} \quad (12.3)$$

§ 12.2. Основные уравнения для цепей с распределенными параметрами

В цепях малой пространственной протяженности наличие сдвига фаз между токами и напряжениями на разных участках цепи обусловлено действием э. д. с. самоиндукции, э. д. с. взаимной индукции и емкостных токов, имеющих сдвиг по фазе относительно соответствующих токов и напряжений. В однородных цепях большой пространственной протяженности, например, линиях электропередач, сдвиг токов и напряжений по фазе, а также их изменение во времени и вдоль цепи можно рассматривать как результат волнового электромагнитного процесса в пространстве, окружающей цепь.

Пусть известны параметры однородной цепи (линии), отнесенные к единице ее длины (рис. 12.2): r_0 — сопротивление прямого и обратного проводов; L_0 — индуктивность петли, образуемой прямым и обратным проводами; g_0 — проводимость утечки между проводами; C_0 — емкость двух проводов линии. При этом сопротивление $r_0 dx$ и индуктивность $L_0 dx$ считаются включенными в один провод, а расстояние x считается от начала линии до ее элемента dx .

Если обозначить мгновенные значения напряжения и тока в начале рассматриваемого элемента линии dx соответственно через u и i , а в начале следующего элемента — через $u + \frac{\partial u}{\partial x} dx$ и $i + \frac{\partial i}{\partial x} dx$, выбрав положительные направления тока и напряжения так, как показано на рис. 12.2, то на основании законов Кирхгофа для элемента линии длиной dx можно записать следующие уравнения:

$$u - \left(u + \frac{\partial u}{\partial x} dx \right) = r_0 dx i + L_0 dx \frac{\partial i}{\partial t};$$

$$\left(i + \frac{\partial i}{\partial x} dx \right) + \left(u + \frac{\partial u}{\partial x} dx \right) g_0 dx + C_0 dx \frac{\partial}{\partial t} \left(u + \frac{\partial u}{\partial x} dx \right) - i = 0.$$

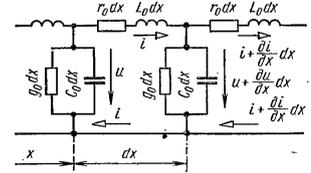


Рис. 12.2

где $Z_c = \sqrt{Z_0/Y_0}$ — характеристическое (волновое) сопротивление.

Если начало координат поместить в конце линии (рис. 12.3), то дифференциальные уравнения в частных производных имеют следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial x} dx &= r_0 i + L_0 \frac{\partial i}{\partial t}; \\ \frac{\partial i}{\partial x} dx &= g_0 u + C_0 \frac{\partial u}{\partial t}. \end{aligned} \right\} \quad (12.9)$$

При синусоидальном напряжении источника питания однородной линии и постоянных параметрах уравнения (12.9) можно записать в комплексной форме:

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\dot{U}}{dx} &= (r_0 + j\omega L_0) \dot{I}; \\ \frac{d\dot{I}}{dx} &= (g_0 + j\omega C_0) \dot{U}. \end{aligned} \right\} \quad (12.10)$$

При сравнении (12.5) и (12.10) видно, что эти уравнения отличаются только знаками, поскольку при увеличении координаты x от конца линии (от нагрузки) к ее началу для выбранных положительных направлений тока и напряжения приращения этих величин положительны.

После дифференцирования уравнений (12.10) и замены $d\dot{U}/dx$ и $d\dot{I}/dx$ в соответствии с выражениями (12.10) получают дифференциальные уравнения, полностью совпадающие с (12.6). Таким образом, решение полученного уравнения относительно, например, напряжения \dot{U} отличается от (12.7) только постоянными интегрирования:

$$\dot{U} = \dot{B}_1 e^{\gamma x} + \dot{B}_2 e^{-\gamma x}. \quad (12.11)$$

Комплексное выражение для тока \dot{I} можно найти с помощью первого уравнения (12.10):

$$\dot{I} = \frac{1}{Z_0} \frac{d\dot{U}}{dx} = \frac{1}{Z_c} (\dot{B}_1 e^{\gamma x} - \dot{B}_2 e^{-\gamma x}). \quad (12.12)$$

Для определения постоянных интегрирования \dot{A}_1 и \dot{A}_2 можно воспользоваться уравнениями (12.7) и (12.8), подставив в них граничные значения напряжения \dot{U}_1 и тока \dot{I}_1 (в начале линии), т. е. при $x=0$

$$\left. \begin{aligned} \dot{A}_1 + \dot{A}_2 &= \dot{U}_1; \\ \dot{A}_1 - \dot{A}_2 &= Z_c \dot{I}_1. \end{aligned} \right\} \quad (12.13)$$

Совместно решая уравнения, получаем:

$$\dot{A}_1 = \frac{1}{2}(\dot{U}_1 + Z_c \dot{I}_1); \quad \dot{A}_2 = \frac{1}{2}(\dot{U}_1 - Z_c \dot{I}_1). \quad (12.14)$$

После подстановки постоянных \dot{A}_1, \dot{A}_2 в уравнения (12.7), (12.8) и некоторой перегруппировки слагаемых уравнения длинной линии в гиперболических функциях имеют вид

$$\left. \begin{aligned} \dot{U} &= \dot{U}_1 \operatorname{ch} \gamma x - Z_c \dot{I}_1 \operatorname{sh} \gamma x; \\ \dot{I} &= \dot{I}_1 \operatorname{ch} \gamma x - \frac{\dot{U}_1}{Z_c} \operatorname{sh} \gamma x. \end{aligned} \right\} \quad (12.15)$$

Пользуясь этими уравнениями, можно определить напряжение и ток в любой точке линии по заданным параметрам линии и по известным значениям \dot{U}_1 и \dot{I}_1 в начале линии.

Если известны комплексные значения \dot{U}_2 и \dot{I}_2 в конце линии, то \dot{U} и \dot{I} в любой точке линии на расстоянии x от ее конца находят по уравнениям (12.11) и (12.12). Постоянные \dot{B}_1 и \dot{B}_2 определяют из граничных условий для конца линии. Затем путем преобразований, аналогичных приведенным ранее, эти уравнения преобразуют с помощью гиперболических функций в следующем виде:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U} &= \dot{U}_2 \operatorname{ch} \gamma x + Z_c \dot{I}_2 \operatorname{sh} \gamma x; \\ \dot{I} &= \dot{I}_2 \operatorname{ch} \gamma x + \frac{\dot{U}_2}{Z_c} \operatorname{sh} \gamma x. \end{aligned} \right\} \quad (12.16)$$

Полученные уравнения, в частности, позволяют вычислить \dot{U}_1 и \dot{I}_1 по известным величинам \dot{U}_2, \dot{I}_2 :

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_1 &= \dot{U}_2 \operatorname{ch} \gamma l + Z_c \dot{I}_2 \operatorname{sh} \gamma l; \\ \dot{I}_1 &= \dot{I}_2 \operatorname{ch} \gamma l + \frac{\dot{U}_2}{Z_c} \operatorname{sh} \gamma l, \end{aligned} \right\} \quad (12.17)$$

где l — длина линии.

§ 12.3. Волны в линии при установившемся режиме

Как уже было отмечено, пользуясь уравнениями длинной линии в гиперболических функциях (12.15) или (12.16), можно определить напряжение и ток в любой точке линии и, следовательно, для любого момента времени, так как напряжение и ток изменяются в любой точке линии по синусоидальному закону.

Для получения уравнений, определяющих мгновенные значения напряжения и тока в любой точке линии, все комплексные величины, входящие в уравнения (12.7) и (12.8), необходимо представить в показательной форме. Комплексы \dot{A}_1 и \dot{A}_2 , имеющие размерность напряжения, можно записать в виде $\dot{A}_1 = A_1 e^{j\psi_1}$, $\dot{A}_2 = A_2 e^{j\psi_2}$. Характеристическое сопротивление Z_c также можно представить в показательной форме:

$$Z_c = \sqrt{\frac{Z_0}{Y_0}} = \sqrt{\frac{r_0 + j\omega L_0}{g_0 + j\omega C_0}} = \sqrt{\frac{r_0^2 + (\omega L_0)^2}{g_0^2 + (\omega C_0)^2}} e^{j\theta} = z_c e^{j\theta},$$

350

www.toe.hu.ua

Продифференцировав это выражение по времени, получим:

$$\frac{d}{dt}(\omega t - \beta x + \psi_1) = 0 \quad \text{и} \quad v = dx/dt = \omega/\beta.$$

Аналогично можно показать, что фазовая скорость бегущей волны тока равна той же скорости v . Вторые слагаемые в уравнениях (12.19) дают отрицательное значение фазовой скорости, что означает движение волн в сторону уменьшения координаты x . Таким образом, указанные слагаемые можно рассматривать в виде волн, движущихся в противоположных направлениях. Волны, распространяющиеся вдоль линии от источника электрической энергии к приемнику в направлении увеличения координаты x , называют прямыми (падающими), а волны, распространяющиеся в обратном направлении, — обратными (отраженными). Характерной величиной бегущей волны является ее длина λ , определяемая расстоянием между ближайшими двумя точками (рис. 12.4), взятыми в направлении распространения волны, с фазами колебания, отличающимися на 2π . Следовательно, длину волны можно найти из равенства

$$\cdot [\omega t - \beta x + \psi_1] - [\omega t - \beta(x + \lambda) + \psi_1] = 2\pi,$$

откуда $\lambda = 2\pi/\beta$, $v = \omega/\beta = 2\pi f/\beta = \lambda f = \lambda/T$. Иначе говоря, за один период волна пробегает расстояние, равное длине волны.

Аналогично можно получить волновые уравнения для токов и напряжений, если воспользоваться уравнениями (12.11) и (12.12). Основное отличие в соответствующих уравнениях состоит в изменении знака координаты x и в величинах постоянных \dot{B}_1 и \dot{B}_2 , выраженных через напряжение \dot{U}_2 и ток \dot{I}_2 . Падающие и отраженные волны тока в общем случае отстают по фазе относительно соответствующих волн напряжения на угол θ при его положительном значении. Кроме того, если мгновенное значение напряжения u в любой точке линии равно сумме мгновенных значений напряжений падающей и отраженной волн, то мгновенное значение тока i в любой точке линии равно разности мгновенных значений тока падающей и отраженной волн, что непосредственно следует из уравнений (12.19).

Такое представление установившегося процесса в цепи с распределенными параметрами при синусоидальных функциях тока и напряжения от времени носит формальный характер и определяется математическим разложением соответствующих функций.

§ 12.4. Установившиеся процессы в нагруженной, разомкнутой и короткозамкнутой линиях с потерями

Рабочий режим в любой точке нагруженной линии можно представить как результат наложения режимов в линии при разомкнутом и короткозамкнутом ее конце.

Пусть ток $\dot{I}_2 = 0$, а напряжение в конце линии равно \dot{U}_2 . Такой режим часто называют холостым ходом линии. Тогда

352

www.toe.hu.ua

где

$$\theta = \frac{1}{2} \operatorname{arctg} \frac{\omega(g_0 L_0 - r_0 C_0)}{r_0 g_0 + \omega^2 L_0 C_0}. \quad (12.18)$$

После подстановки этих выражений в уравнения (12.7) и (12.8) находим:

$$\left. \begin{aligned} u &= \operatorname{Im} \left[\sqrt{2} A_1 e^{-\alpha x} e^{j(\omega t + \psi_1 - \beta x)} + \sqrt{2} A_2 e^{\alpha x} e^{j(\omega t + \psi_2 + \beta x)} \right] = \\ &= \sqrt{2} A_1 e^{-\alpha x} \sin(\omega t + \psi_1 - \beta x) + \sqrt{2} A_2 e^{\alpha x} \sin(\omega t + \psi_2 + \beta x); \\ i &= \operatorname{Im} \left[\frac{\sqrt{2} A_1 e^{\alpha x} e^{j(\omega t + \psi_1 - \beta x - \theta)}}{z_c} - \frac{\sqrt{2} A_2 e^{\alpha x} e^{j(\omega t + \psi_2 + \beta x - \theta)}}{z_c} \right] = \\ &= \frac{\sqrt{2}}{z_c} A_1 e^{-\alpha x} \sin(\omega t + \psi_1 - \theta - \beta x) - \\ &\quad - \frac{\sqrt{2}}{z_c} A_2 e^{\alpha x} \sin(\omega t + \psi_2 - \theta + \beta x), \end{aligned} \right\} \quad (12.19)$$

где умножение на $\sqrt{2}$ произведено для перехода от действующих значений напряжения \dot{U}_1 и тока \dot{I}_1 к их амплитудным значениям. Первые слагаемые в правой части полученных выражений характеризуют бегущие волны напряжения и тока, движущиеся в направлении возрастания координаты x и затухающие по направлению движения (рис. 12.4).

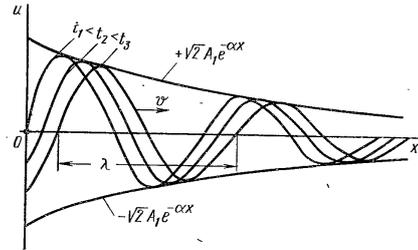


Рис. 12.4

Действительно, с одной стороны, в любой точке $x = x_1$ первое слагаемое каждой из величин представляет собой периодическую функцию времени. С другой стороны, в любой момент времени $t = t_1$ первое слагаемое изменяется вдоль линии по закону затухающей синусоиды, при этом уменьшение амплитуд определяется коэффициентом затухания α . Чтобы определить фазовую скорость бегущей волны напряжения, необходимо считать фазу колебания напряжения равной постоянной величине, т. е. $\omega t - \beta x + \psi_1 = \text{const}$.

напряжение и ток в любой точке линии при разомкнутом конце определяют из выражений

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_p &= \dot{U}_2 \operatorname{ch} \gamma x = \frac{1}{2} U_2 (e^{\gamma x} + e^{-\gamma x}); \\ \dot{I}_p &= \frac{\dot{U}_2}{Z_c} \operatorname{sh} \gamma x = \frac{1}{2} \frac{U_2}{Z_c} (e^{\gamma x} - e^{-\gamma x}), \end{aligned} \right\} \quad (12.20)$$

где x — расстояние от конца линии. При коротком замыкании в конце линии ($\dot{U}_2 = 0$, ток равен \dot{I}_2) напряжение и ток в той же точке на расстоянии x от конца линии находят из уравнений

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_k &= Z_c \dot{I}_2 \operatorname{sh} \gamma x = \frac{1}{2} Z_c \dot{I}_2 (e^{\gamma x} - e^{-\gamma x}); \\ \dot{I}_k &= \dot{I}_2 \operatorname{ch} \gamma x = \frac{1}{2} \dot{I}_2 (e^{\gamma x} + e^{-\gamma x}). \end{aligned} \right\} \quad (12.21)$$

Следовательно, $\dot{U} = \dot{U}_p + \dot{U}_k$; $\dot{I} = \dot{I}_p + \dot{I}_k$. Таким образом, наложение режимов при размыкании (холостом ходе) и коротком замыкании линии даст возможность определить напряжение и ток в любой точке линии при любой нагрузке, включенной в конце линии.

Векторные диаграммы токов и напряжений при разомкнутом и короткозамкнутом конце линии и при нагрузке строятся по уравнениям (12.17), определяющим напряжение \dot{U}_1 и ток \dot{I}_1 в начале линии. Пусть напряжение \dot{U}_2 совпадает с осью вещественных величин (рис. 12.5). Тогда напряжение \dot{U}_{1p} и ток \dot{I}_{1p} в начале линии можно представить в виде

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_{1p} &= \frac{1}{2} \dot{U}_2 e^{\alpha l} e^{j\beta l} + \frac{1}{2} \dot{U}_2 e^{-\alpha l} e^{-j\beta l}; \\ \dot{I}_{1p} &= \left(\frac{1}{2} \dot{U}_2 e^{\alpha l} e^{j\beta l} - \frac{1}{2} \dot{U}_2 e^{-\alpha l} e^{-j\beta l} \right) \frac{1}{z_c} e^{-j\theta}. \end{aligned} \right\} \quad (12.22)$$

По этим уравнениям на рис. 12.5 построена векторная диаграмма для разомкнутой линии. Из этой диаграммы видно, что напряжение \dot{U}_{1p} равно сумме составляющих $\frac{1}{2} \dot{U}_2 e^{\alpha l} e^{j\beta l}$ и $\frac{1}{2} \dot{U}_2 e^{-\alpha l} e^{-j\beta l}$, а ток \dot{I}_{1p} равен разности тех же составляющих, разделенной на комплексное волновое сопротивление $Z_c = z_c e^{j\theta}$. При коротком замыкании в конце линии ($\dot{U}_2 = 0$, ток равен \dot{I}_2), напряжение и ток в начале линии определяют из уравнений

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_{1k} &= Z_c \dot{I}_2 \operatorname{sh} \gamma l = \frac{1}{2} Z_c \dot{I}_2 (e^{\gamma l} - e^{-\gamma l}); \\ \dot{I}_{1k} &= \dot{I}_2 \operatorname{ch} \gamma l = \frac{1}{2} \dot{I}_2 (e^{\gamma l} + e^{-\gamma l}). \end{aligned} \right\} \quad (12.23)$$

Приложение-2. Упрощенный расчет импеданса и коэффициента фазы

ББК 32.843.2
Б87
УДК 621.315.2(03)

Брискер А. С., Руга А. Д., Шарле Д. Л.

Б87 Городские телефонные кабели: Справочник. 2-е изд., перераб. и доп./Под ред. Д. Л. Шарле. — М.: Радио и связь, 1984. — 304 с., ил.

70 к.

Приводятся основные сведения о городских телефонных кабелях с воздушно-бумажной и полистиленовой изоляцией, методы расчета их конструктивных и электрических характеристик, а также принципы испытаний и измерений.

Для инженерно-технических работников, занимающихся проектированием и производством городских телефонных кабелей, проектированием, строительством и эксплуатацией местных телефонных сетей, а также для преподавателей и студентов вузов и техникумов.

Б 2402040000-052 ББК 32.843.2
046 (01) — 84 130-83 6Ф1

Рецензент Н. И. Белоруссов
Редакция литературы по электросвязи

Анатолій Самойлович Брискер, Александр Дмитриевич Руга,
Давид Леонидович Шарле

ГОРОДСКИЕ ТЕЛЕФОННЫЕ КАБЕЛИ

Редактор Е. В. Комарова Худ. редактор Р. А. Клочков
Художник И. В. Печенкин Техн. редактор Г. И. Колосова
Корректор Т. Г. Захарова

ИБ № 271

Подписано в печать 11.01.84 г. Т-03217 Формат 70х90/32 Бумага
Тип № 2. Гарнитура "Пресс-роман" Печать офсетная
Усл. печ. л. 11,11 Усл. кр.-отт. 11,256 Уч.-изд. л. 13,88 Тираж
25 000 экз. Изд. № 19890 Зак. № 34 Цена 70 к.
Издательство "Радио и связь", 101000, Москва, Почтамт, а/я 693

Московская типография № 4 Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР по делам издательства, полиграфии и книжной торговли. 129041, Москва, Б. Перяславская ул., д. 46

© Издательство "Радио и связь", 1984

ПРЕДИСЛОВИЕ

Городские телефонные кабели — наиболее распространенный тип кабелей связи. Существует прямая зависимость между объемом производства городских телефонных кабелей и масштабами телефонизации городов. Для обеспечения связью 1000 телефонных абонентов требуется проложить на городской телефонной сети в среднем 60 км кабелей в приведенном к 50-парному (даже с учетом внедрения на соединительных линиях систем передачи с частотным и временным разделением каналов). Общее число установленных в мире телефонов приближается к 600 млн. Следовательно, общая длина телефонных кабелей, проложенных на городских сетях земного шара, составляет десятки миллионов километров.

Большое внимание уделяется телефонизации в нашей стране. Так, в Москве, городская телефонная сеть которой одновременно с Ленинградской, Рижской и Одесской вступила в свое второе столетие, число телефонов достигло 3 млн. Советский Союз занимает место в первой шестерке стран мира по абсолютному количеству телефонов. Ежегодно в нашей стране на ГТС устанавливается около 1 000 000 телефонов, а следовательно, прокладывается примерно 60 тыс. км кабелей в приведенном исчислении.

Выпуск городских телефонных кабелей возрастает, номенклатура их расширяется. Так, если два-три десятка лет тому назад изготавливались кабели только с воздушно-бумажной изоляцией в свинцовой оболочке, то на современном этапе преобладают кабели с пластмассовой изоляцией и оболочкой.

Разнообразие применяемых материалов и конструкций городских телефонных кабелей как в нашей стране, так и за рубежом обусловило целесообразность выпуска самостоятельного справочника по этим кабелям, первое издание которого вышло в 1979 г.

Настоящее издание содержит сведения о конструкциях и электрических параметрах всей обширной номенклатуры (око-

Окончание табл. 4.7

f, кГц	R, Ом/км при d ₀ , мм				L, Гн/км... × 10 ⁻⁴ при d ₀ , мм				G, См/км... × 10 ⁻⁶ при C=45 нФ/км
	0,32	0,4	0,5	0,7	0,32	0,4	0,5	0,7	
10	432	278	180	91	5,73	5,51	5,51	5,51	0,424
20	432	278	181	91	5,73	5,51	5,50	5,50	1,13
50	435	280	182	94	5,73	5,51	5,50	5,49	4,24
100	436	283	189	108	5,73	5,50	5,49	5,43	11,3
150	442	291	203	123	5,72	5,49	5,46	5,36	21,2
200	450	303	219	139	5,72	5,48	5,43	5,30	31,1
250	453	316	234	153	5,71	5,46	5,40	5,23	42,4
300	467	334	250	166	5,70	5,44	5,36	5,19	55,1
400	492	363	282	190	5,68	5,39	5,29	5,10	84,8
500	525	394	310	211	5,65	5,35	5,23	5,03	120
600	550	426	335	228	5,62	5,30	5,18	5,00	153
700	583	455	361	245	5,60	5,26	5,13	4,96	188
800	611	481	386	259	5,57	5,22	5,10	4,92	226
900	640	508	405	275	5,54	5,18	5,06	4,90	265
1000	672	535	424	289	5,51	5,15	5,04	4,88	305
1200	719	583	462	313	5,46	5,11	4,99	4,85	373
1500	816	629	511	350	5,39	5,04	4,93	4,81	488
2000	944	733	582	400	5,31	4,98	4,88	4,76	678

* Кроме цепей с жилами диаметром 0,32 мм, для которых b_{нз} = (0,55-0,6) d₀.

Б. ВТОРИЧНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ПЕРЕДАЧИ

Электромагнитные волны, распространяясь вдоль цепи, уменьшаются по амплитуде и изменяются по фазе. Уменьшение энергии по длине цепи в 1 км учитывается коэффициентом затухания α, а изменение фазы напряжения и тока на каждом километре цепи – коэффициентом фазы β.

Коэффициенты затухания (децибел на километр) и фазы (радиан на километр) в общем виде в зависимости от первичных параметров передачи R, L, C и G определяются по формуле коэффициента распространения

$$\gamma = \alpha + j\beta = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)} = |\gamma| e^{j\varphi_\gamma} \quad (4.24)$$

где

$$|\gamma| = \sqrt{(R^2 + \omega^2 L^2)(G^2 + \omega^2 C^2)};$$

$$\varphi_\gamma = \frac{1}{2} (\arctg \omega L/R + \arctg \omega C/G).$$

Коэффициент затухания, дБ/км,

$$\alpha = 8,7 |\gamma| \cos \varphi_\gamma \quad (4.25)$$

Коэффициент фазы, рад/км,

$$\beta = |\gamma| \sin \varphi_\gamma \quad (4.26)$$

Из (4.24) возможны и другие интерпретации формул для α и β:

$$\alpha = 8,7 \sqrt{\frac{1}{2} [\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2} (G^2 + \omega^2 C^2) - (\omega^2 LC - RG)]}; \quad (4.27)$$

$$\beta = \sqrt{\frac{1}{2} [\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2} (G^2 + \omega^2 C^2) + (\omega^2 LC - RG)]}. \quad (4.28)$$

Коэффициент затухания при температуре, отличной от 20° С,

$$\alpha_t = \alpha_{20} [1 + \alpha_\alpha (t - 20)], \quad (4.29)$$

где α₂₀ – коэффициент затухания при 20° С, t – температура, при которой определяется коэффициент затухания, °С; α_α – температурный коэффициент затухания, равный относительному приращению затухания на один градус, 1° С. Ориентировочные значения α_α приведены на рис. 4.3 [20].

Волновое сопротивление – это сопротивление, которое встречает электромагнитная волна при распространении вдоль однородной цепи без отражения. Оно определяется в зависимости от первичных параметров по формуле

$$Z_B = \sqrt{(R + j\omega L)/(G + j\omega C)} = |Z_B| e^{j\varphi_Z} \quad (4.30)$$

где $|Z_B| = \sqrt{(R^2 + \omega^2 L^2)/(G^2 + \omega^2 C^2)}$;

$$\varphi_Z = \frac{1}{2} [\arctg(\omega L/R) - \arctg(\omega C/G)].$$

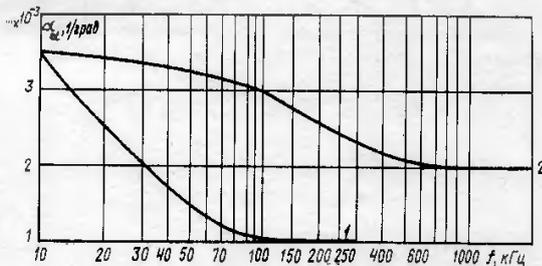


Рис. 4.3. Частотные зависимости температурного коэффициента затухания кабелей с воздушно-бумажной I и полиэтиленовой 2 изоляцией

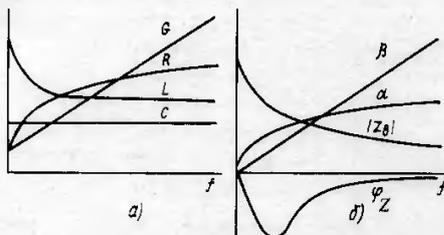


Рис. 4.4. Характер частотных зависимостей параметров передачи кабельной цепи:

а) первичных; б) вторичных

При постоянном токе и в области высоких частот φ_Z = 0.

Расчет α, β и Z_B может производиться по упрощенным формулам, приведенным в табл. 4.8 [21 и 11]. При указанных в

Таблица 4.8

Приближенные формулы для расчета вторичных параметров передачи

Условия изменения формулы	Расчетные формулы			Область применения формулы	Номер формулы
	α, Нп/км*	β, рад/км	Z _B , Ом		
ωL = 0 ωC = 0	√RC	0	√R/G	Постоянный ток (f = 0)	(4.31 а, б, в)
R/ωL > 5	√(ωC/2 (R - ωL))	ωC/2 √(R + ωL)	√R/ωC	Токовые частоты	(4.32 а, б, в)
R/ωL > 50	√(ωCR/2)	ω√LC	√L/C	Высокие частоты	(4.33 а, б, в)
ωL/R > 3,5	R/2 √(G/L + 2√L/C)	ω√LC	√L/C	Высокие частоты	(4.34 а, б, в)

* Для получения коэффициента затухания α, дБ/км, необходимо вычисленные значения умножить на 8,686 ≈ 8,7.

Приложение-3. Измерение импеданса Q-метром

Собственная емкость катушки определяется по формуле:

$$C_0 = \frac{C_{2a} - 4 C_{1a}}{3}, \quad (8)$$

где, $C_{2a} = \frac{10^4 \cdot C_2}{C_2 + 10^4}$; $C_{1a} = \frac{10^4 \cdot C_1}{C_1 + 10^4}$; C_1 и C_2 в пФ

Для получения более точного результата измерения могут быть проведены несколько раз при различных значениях C_1 , а затем взято среднее значение C_0 .

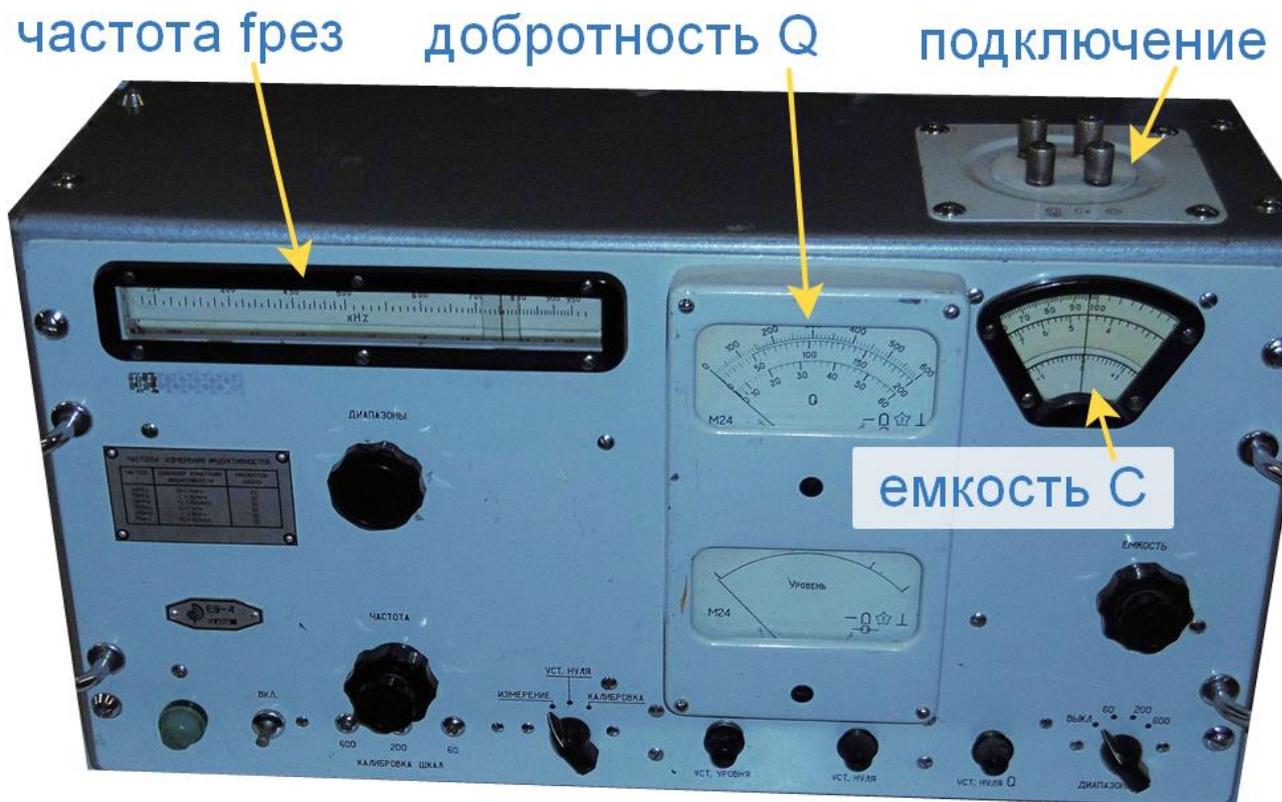
Кроме выше описанных измерений, с помощью куметра можно производить измерения добротности, активного и реактивного сопротивлений, индуктивности и емкости любого полного сопротивления.

7.6. Измерение любого полного сопротивления

Любое полное сопротивление Z_x можно представить состоящим из активного и реактивного сопротивлений, соединенных последовательно или параллельно. Реактивное сопротивление может быть индуктивным или емкостным /черт.3/.

Общий метод измерения полного сопротивления Z_x

23

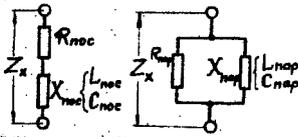


ИЗМЕРИТЕЛЬ ДОБРОТНОСТИ E9-4

Техническое описание
и инструкция по эксплуатации

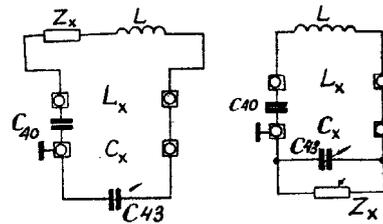
или его составляющих следующий.

К клеммам куметра подключается вспомогательная катушка индуктивности.



Черт. 3.

Контур куметра настраивается в резонанс на частоте измерения f и определяются значения резонансной емкости и добротности контура C_1 и Q_1 , затем последующее сопротивление подключается к контуру куметра последовательно или параллельно /черт.4/ и контур вторично настраивается в резонанс на той же частоте путем изменения емкости измерительного конденсатора. При этом определяются новые значения C_2 и Q_2 .



Черт. 4.

Зная величины f, Q_1, C_1, Q_2, C_2 , можно с помощью нижеприведенных формул определить эффективные величины последовательных и параллельных значений активного и реактивного сопротивлений, индуктивности и емкости, добротности и тангенса угла потерь измеряемого полного сопротивления.

формулы для последовательного подключения к контуру

формулы для параллельного подключения к контуру

$$R_{пас} = \frac{1,59 \cdot 10^8 \left(\frac{C_1}{C_2} a_1 - a_2 \right)}{f C_1 a_1 a_2}; \quad (9) \quad R_{пар} = \frac{1,59 \cdot 10^8 a_1 a_2}{f C_1 (a_1 - a_2)}; \quad (15)$$

$$X_{пас} = \frac{1,59 \cdot 10^8 (C_1 - C_2)}{f C_1 C_2}; \quad (10) \quad X_{пар} = \frac{1,59 \cdot 10^8}{f (C_2 - C_1)}; \quad (16)$$

$$L_{пас} = \frac{2,53 \cdot 10^{10} (C_1 - C_2)}{f^2 C_1 C_2}; \quad (11) \quad L_{пар} = \frac{2,53 \cdot 10^{10}}{f^2 (C_2 - C_1)}; \quad (17)$$

$$C_{пас} = \frac{C_1 C_2}{C_2 - C_1}; \quad (12) \quad C_{пар} = C_1 - C_2; \quad (18)$$

$$Q = \frac{(C_1 - C_2) a_1 a_2}{C_1 a_1 - C_2 a_2}; \quad (13) \quad Q = \frac{(C_1 - C_2) a_1 a_2}{C_1 (a_1 - a_2)}; \quad (19)$$

$$\tan \delta = \frac{1}{Q} = \frac{C_1 a_1 - C_2 a_2}{(C_1 - C_2) a_1 a_2}; \quad (14) \quad \tan \delta = \frac{1}{Q} = \frac{C_1 (a_1 - a_2)}{(C_1 - C_2) a_1 a_2}; \quad (20)$$

при $C_1 > C_2$ $X_{пас}$ - индуктивный; при $C_1 > C_2$ $X_{пар}$ - емкостной;

при $C_1 < C_2$ при $C_1 < C_2$

$X_{пас}$ - емкостной $X_{пар}$ - индуктивный.

В формулах для определения $Q / C_1 - C_2$ и $1 / C_2 - C_1$ всегда рассматриваются как положительные.

В формулах /9 - 20/:

- f - в кГц;
- C_1 и C_2 - в пФ;
- L - в мГн;
- R и X - в ом.

$C_{пас}$; $L_{пас}$; $R_{пас}$; $X_{пас}$ - эффективные последовательные значения последующего элемента;

$C_{пар}$; $L_{пар}$; $R_{пар}$; $X_{пар}$ - эффективные параллельные значения последующего элемента.

Между последовательными и параллельными значениями существуют следующие зависимости:

$$R_{пас} = \frac{R_{пар}}{1 + Q^2}; \quad (21) \quad C_{пас} = C_{пар} \frac{1 + Q^2}{Q^2}; \quad (24)$$

$$X_{пас} = X_{пар} \frac{Q^2}{1 + Q^2}; \quad (22) \quad Q = \frac{X_{пас}}{R_{пас}} = \frac{R_{пар}}{X_{пар}}. \quad (25)$$

$$L_{пас} = L_{пар} \frac{Q^2}{1 + Q^2}; \quad (23)$$