



**В.Н. Коршунов**, д-р техн. наук, профессор кафедры «Многоканальные телекоммуникационные системы» Московского технического университета связи и информатики

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАБОЧИХ ПАРАМЕТРОВ КАБЕЛЬНЫХ ЦЕПЕЙ ПРИ ИЗМЕРЕНИЯХ ПО ШЛЕЙФУ

При использовании симметричных кабелей связи [1] на низких частотах, в частности, в тональном диапазоне частот 0,3...3,4 кГц, как правило, имеет место несогласованность кабеля с нагрузками. Возникающие отражения заметным образом влияют на формирование рабочих параметров передачи цепей, и при измерениях по шлейфу рабочее затухание шлейфа может существенно отличаться от удвоенного рабочего затухания цепи. Поэтому последнее нельзя определять как половину результата измерений.

Ниже исследуется данный феномен и даются рекомендации по проведению шлейфных измерений рабочих параметров симметричных кабельных цепей в условиях их несогласованности с нагрузками.

### ОПИСАНИЕ МЕТОДА

Как известно [2], вторичными параметрами передачи кабельных цепей с металлическими токопроводящими жилами являются волновое сопротивление  $Z_0$  и коэффициент распространения

$$\gamma = \alpha + j\beta, \quad (1)$$

где  $\alpha$  – коэффициент затухания (ослабления) в натураль-нологоарифмической мере (неперы), связанной с десятично-логоарифмической мерой (децибелы) модулем перехода 0,115;  $\beta$  – коэффициент фазы.

На высоких частотах  $Z_0$  активно и не зависит от частоты, поэтому при работе с резистивными нагрузками  $R_H$  достигается соответствие  $Z_0 = R_H$ , и рабочая постоянная передачи [3, 4] (при одинаковых нагрузках на входе и выходе равная вносимой постоянной) цепи длиной  $l$  равна ее постоянной передачи:

$$g_p = a_p + jb_p \approx \gamma l \quad (2)$$

где  $a_p$  – рабочее затухание;  $b_p$  – рабочая фазовая постоянная.

Вместе с тем, на низких частотах  $Z_0$  имеет частотнозависимый модуль и частотнозависимый отрицательный угол, таким образом  $Z_0 \neq R_H$ . В результате несогласованности с нагрузками рабочая постоянная передачи линии отличается от  $\gamma l$ . При передаче низкочастотных сигналов фазовые искажения в кабельной линии имеют меньшее значение, чем амплитудно-частотные искажения, поэтому большее внимание уделяется затуханию линии, в роли которого рассматривают ее рабочее затухание  $a_p$ .

Рабочее затухание кабельной цепи в общем случае содержит четыре компонента:

$$a_p = a_1 + a_2 + a_3 + a_4, \quad (3)$$

где  $a_1 = \alpha l$  – собственное затухание передачи цепи;  $a_2$  и  $a_3$  – затухание, обусловленное отражениями соответственно на

входе и на выходе;  $a_4$  – затухание взаимодействия отражений. Для случая шлейфа величина  $a_1$  увеличивается в два раза;  $a_2$  и  $a_3$  остаются неизменными;  $a_4$  с ростом  $l$  уменьшается (для электрически длинных линий, имеющих  $\alpha l \geq 1,5$  Нп = 13 дБ имеем  $a_4 \approx 0$ ). Отсюда следует, что рабочее затухание шлейфа в общем случае не равно удвоенному рабочему затуханию цепи.

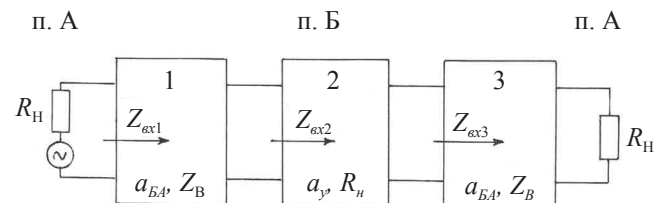
В [5] изложен метод определения рабочего затухания цепей протяженной кабельной линии, когда измерения выполняются на ближнем конце, а объектом измерения является шлейф, составленный из двух кабельных цепей, соединенных на дальнем конце через удлинитель (аттенуатор).

Измерения выполняются на ближнем конце линии (пункт А), на дальнем конце (пункт Б) две цепи соединяются через удлинитель. Схема объекта измерений показана на рис. 1. Шлейф включает в себя три симметричных уравновешенных четырехполюсника: 1 – кабельная цепь АБ, имеющая собственное затухание  $a_{AB} = \alpha l$ , характеристическое сопротивление  $Z_0$ , входное сопротивление  $Z_{ex1}$ ; 2 – удлинитель с собственным затуханием  $a_y$ , характеристическим сопротивлением  $R_H$  (равным сопротивлению нагрузки), входным сопротивлением  $Z_{ex2}$ ; 3 – кабельная цепь БА, имеющая соответственно  $a_{BA} = \alpha l$ ;  $Z_0$ ;  $Z_{ex3}$ . Рабочее затухание цепи находится как половина рабочего затухания шлейфа через удлинитель  $a_{шл}$ , за вычетом собственного затухания удлинителя  $a_y$ :

$$a_p = (a_{шл} - a_y)/2. \quad (4)$$

На действующих соединительных линиях сети связи были проведены измерения рабочего затухания шлейфа кабельных цепей с включенным на дальнем конце удлинителем, затухание которого варьировалось в диапазоне от 0 до 20 дБ. Пример результатов измерений представлен на рис. 2. Измерения были выполнены методом  $Z$  с применением схемы сравнения [6] при использовании двух цепей одной четверки симметричного кабеля звездной скрутки типа ТЗ-0,9 длиной  $l = 3,635$  км для активных нагрузок  $R_H = 600$  Ом в диапазоне частот от 0,3 до 3, 4 кГц.

Можно видеть, что рабочее затухание цепи, определенное как половина рабочего затухания шлейфа, при отсутствии



**Рис. 1.** Схема измеряемого шлейфа (1 – цепь АБ, 2 – удлинитель, 3 – цепь БА)

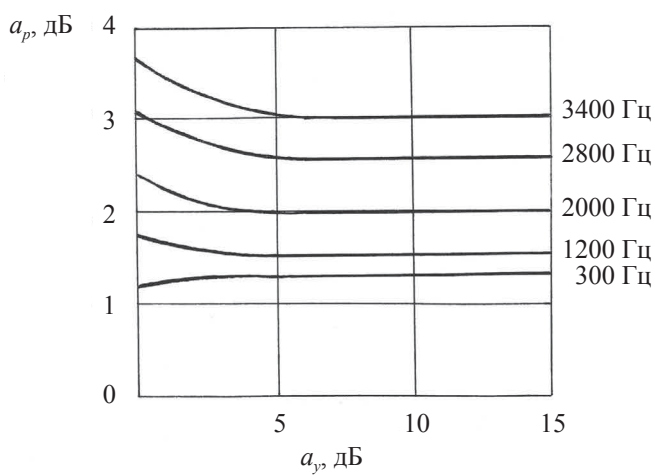


Рис. 2. Зависимость измеренного рабочего затухания цепи от затухания удлинителя

удлинителя ( $a_y = 0$ ) в диапазоне тональных частот отличается на 0,2...0,7 дБ от рабочего затухания, определенного по формуле (4) при включенном удлинителе с достаточно большим затуханием. Величина  $a_p$  претерпевает изменение при увеличении  $a_y$  от 0 до 7 дБ. Дальнейшее увеличение затухания удлинителя не влияет на результат.

С целью установления достоверности метода далее сопоставляются аналитические выражения рабочего затухания кабельной цепи и шлейфа.

**АНАЛИТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ**

Рабочее затухание последовательного соединения  $n$  четырехполюсников:

$$a_{p\Sigma} = a_{ex} + \sum_{i=1}^n a_{nepi}, \tag{5}$$

где входное затухание

$$a_{ex} = (1/2) \ln (P_1/P_{01}); \tag{6}$$

затухание передачи  $i$ -го четырехполюсника

$$a_{nepi} = (1/2) \ln (P_{0i}/P_{2i}); \tag{7}$$

$P_1$  – полная (кажущаяся) мощность на согласованной с генератором нагрузке;  $P_{0i}$  – полная мощность на входе  $i$ -го четырехполюсника;  $P_{2i}$  – мощность на входе  $i$ -го четырехполюсника.

В выражение (5) в рассматриваемом случае входят члены:

$$a_{ex} = \ln \left| \frac{R_n + Z_{ex1}}{2\sqrt{R_n Z_{ex1}}} \right|, \tag{8}$$

$$a_{nep1} = \alpha l + \ln \left| \frac{Z_{ex2} + Z_g}{2\sqrt{Z_{ex2} Z_g}} \right| - \ln \left| \frac{Z_{ex1} + Z_g}{2\sqrt{Z_{ex1} Z_g}} \right|, \tag{9}$$

$$a_{nep2} = a_y + \ln \left| \frac{Z_{ex3} + R_n}{2\sqrt{Z_{ex3} R_n}} \right| - \ln \left| \frac{Z_{ex2} + R_n}{2\sqrt{Z_{ex2} R_n}} \right| \tag{10}$$

$$a_{nep3} = \alpha l + \ln \left| \frac{R_n + Z_g}{2\sqrt{R_n Z_g}} \right| - \ln \left| \frac{Z_{ex3} + Z_g}{2\sqrt{Z_{ex3} Z_g}} \right|. \tag{11}$$

Положив в (5)  $n = 1$ , находим рабочее затухание цепи АБ:

$$a_{pAB} = \ln \left| \frac{R_n + Z_{exAB}}{2\sqrt{R_n Z_{exAB}}} \right| + \alpha l + \ln \left| \frac{R_n + Z_g}{2\sqrt{R_n Z_g}} \right| - \ln \left| \frac{Z_{exAB} + Z_g}{2\sqrt{Z_{exAB} Z_g}} \right|. \tag{12}$$

При достаточно большой величине  $a_y$ , имеем  $Z_{ex2} = R_n$ , отсюда  $Z_{ex1} = Z_{exAB}$ ; для идентичных цепей АБ и БА справедливо также  $Z_{ex3} = Z_{exAB}$ . Произведя соответствующие замены в (8)–(11) и сопоставляя определенное по (5) при  $n = 3$  рабочее затухание шлейфа с (12), получаем

$$a_{p\Sigma} = 2a_{pAB} + a_y = a_{шл}, \tag{13}$$

что соответствует формуле (4) и подтверждает ее достоверность.

Аналогичным образом можно получить соотношения для рабочей постоянной передачи кабельной цепи:

$$g_p = (g_{шл} - g_y)/2 \tag{14}$$

и для ее рабочей фазовой постоянной:

$$b_p = (b_{шл} - b_y)/2 = b_{шл}/2. \tag{15}$$

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Изложенный метод дает возможность посредством измерения шлейфа линий определять их рабочие параметры передачи. Удобством является выполнение измерений на одном конце линии. С ростом затухания удлинителя точность определения рабочего затухания кабельной цепи повышается. Однако чрезмерно большая величина  $a_y$  может привести к существенному влиянию на результат измерения переходной помехи на ближнем конце. Практически достаточным является затухание удлинителя 10 дБ.

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Основы кабельной техники / под ред. И.Б. Пешкова. – М.: Издательский центр «Академия», 2006. – 432 с.
2. Направляющие системы электросвязи / под ред. В.А. Андреева. Том 1. – М.: Горячая линия – Телеком, 2009. – 424 с.
3. Акульшин П.К., Кошечев И.А., Кульбацкий К.Е. Теория связи по проводам. – М.: Связьиздат, 1940. – 568 с.
4. Бакалов В.П., Дмитриков В.Ф., Крук Б.И. Основы теории цепей. – М.: Горячая линия – Телеком, 2009. – 596 с.
5. Коршунов В.Н. Способ повышения точности определения рабочего затухания линии // Вестник связи. – 1967. – № 4. – С. 11–12.
6. Хромой Б.П. Метрология и измерения в телекоммуникационных системах. Том 2. – М.: ИРИАС, 2008. – 580 с.

