

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

В. А. ИЛЬИН

**К ВЫБОРУ НЕОДНОРОДНОЙ ДЛИННОЙ ЛИНИИ ДЛЯ  
СОГЛАСОВАНИЯ СОПРОТИВЛЕНИЙ В ШИРОКОЙ ПОЛОСЕ ЧАСТОТ**

(Представлено академиком А. И. Бергом 5 X 1951)

Согласование сопротивлений в широкой полосе высоких частот часто осуществляется длинной линией, погонные параметры которой монотонно изменяются по ее длине. Такая неоднородная линия, являющаяся трансформатором сопротивлений, должна вносить малые частотные искажения в заданном диапазоне частот. Существующие линии не позволяют обеспечить достаточно малые частотные искажения.

В настоящей заметке показывается, что выбор рационального закона изменения погонных параметров позволяет получить линию — трансформатор сопротивлений с весьма малыми частотными искажениями в широком диапазоне частот.

В соответствии с теорией неоднородных длинных линий <sup>(1)</sup> общее решение для эквивалентного сопротивления линии имеет вид

$$\rho = \rho_c + \frac{[Z_n - \rho_c(0)] e^{-2\gamma_l x}}{1 + [Z_n - \rho_c(0)] \int_0^x Y_1 e^{-2\gamma_l x} dx} \quad (1)$$

Здесь  $\rho$  — эквивалентное сопротивление, равное отношению напряжения к току в точке  $x$  линии;  $\rho_c$  — частное решение, характеризующее только структуру линии, равное отношению напряжения к току в точке  $x$  линии при условии отсутствия отражения на ее конце (т. е. когда  $Z_n = \rho_c(0)$ );  $Z_n$  — сопротивление нагрузки;  $Y_1$  — погонная параллельная проводимость линии;  $\gamma_l = \frac{1}{x} \int_0^x Y_1 \rho_c dx$  — коэффициент распространения волны тока;  $\rho, \rho_c, Y_1, \gamma_l$  — в общем случае комплексные величины, зависящие от координаты  $x$ , которая отсчитывается от конца ( $l$  — длина линии).

Частотные свойства трансформатора характеризуются зависимостью коэффициента трансформации сопротивлений от частоты  $K_T(\omega) = Z_n(\omega) / \rho_l(\omega)$ .

При расчете трансформаторов задается  $Z_n(\omega)$ , тогда для определения  $K_T(\omega)$  необходимо найти  $\rho_l(\omega)$ .

Условимся называть отражения в линии внутренними, если отражения от конца линии отсутствуют.

Частотные искажения возникают как из-за внутренних отражений в самой линии, так и из-за отражений от ее конца.

Из (1) следует, что первый член правой части ( $\rho_c$ ) определяет частотные искажения, возникающие из-за внутренних отражений, а второй член зависит от нагрузки на конце линии. В соответствии с этим исследование частотных искажений удобно производить отдельно.

Предварительно рассмотрим внутренние отражения. Каждый элементарный участок неоднородной линии без отражения на ее конце можно рассматривать как элементарный участок однородной линии с волновым сопротивлением в данной точке  $W_1 = \sqrt{Z_1/Y_1}$ , нагруженный на эквивалентное сопротивление  $\rho_c$ . Тогда коэффициент внутренних отражений можно определить выражением

$$p_a(x) = \frac{\rho_c(x) - W_1(x)}{\rho_c(x) + W_1(x)}. \quad (2)$$

В линиях с медленно изменяющимся  $\rho_c(x)$ , что имеет место в трансформаторах сопротивлений,  $|p_a| \ll 1$ , при этом

$$p_a \simeq -\frac{1}{4\gamma} \frac{d}{dx} \ln W_1. \quad (3)$$

Здесь  $\gamma = \sqrt{Z_1 Y_1}$ .

Для общего случая при  $p_a(x) = \text{const}$  из (2) и дифференциального уравнения линии  $d\rho/dx + \rho^2 Y_1 - Z_1 = 0$  (1) получим

$$\rho_c = \rho_c(0) \exp \left[ -4 \int_0^x \frac{\gamma p_a}{1 - p_a^2} dx \right]. \quad (4)$$

При отсутствии отражений от конца  $Z_n(\omega) = \rho_c(0)$  и

$$\int_0^l \frac{\gamma p_a}{1 - p_a^2} dx = \frac{1}{4} \ln K_T. \quad (5)$$

Из (5) следует, что заданный коэффициент трансформации может быть получен в линиях, без отражения от конца, для  $|p_a(x)| \ll 1$  и  $\gamma(x) = j\omega \sqrt{L_1 C_1}$  в виде действительной величины, не зависящей от частоты.

В существующих неоднородных линиях  $\rho_c$  имеет комплексный характер, а линию нагружают на активное сопротивление (например, равное волновому), поэтому в них всегда существует отражение от конца.

Если отражения от конца линии малы, что имеет место в рабочем режиме трансформатора, входное сопротивление линии из (1) приближенно будет равно

$$\rho(l) \simeq \rho_c(l) + [Z_n - \rho_c(0)] e^{-2\gamma l}, \quad (6)$$

а коэффициент трансформации

$$K_T \simeq \frac{1}{\frac{\rho_c(l)}{Z_n} + \left(1 - \frac{\rho_c(0)}{Z_n}\right) e^{-2\gamma l}}. \quad (7)$$

На основании (7) можно сделать вывод, что для устранения частотных искажений в трансформаторе необходимо выполнить следующие условия:

$$Z_{\text{н}} = \rho_c(0), \quad \frac{Z_{\text{н}}}{\rho_c(l)} = K_1; \quad (8)$$

здесь  $K_1$  — действительная величина, не зависящая от частоты.

При включении на конце линии активного сопротивления условия (8) могут быть приближенно выполнены, если

$$Z_{\text{н}} = W_1(0) = \rho_c(0) \text{ и } \rho_c(l) = W_1(l),$$

где  $W_1(0)$  и  $W_1(l)$  — почти чисто активные величины.

В этом случае из (2)  $p_a(0) = p_a(l) = 0$  ( $p_a \neq 0$  при  $0 < x < l$ ).

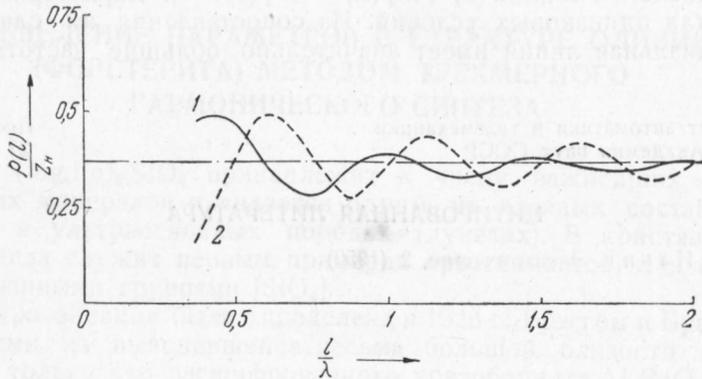


Рис. 1

Заданным требованиям удовлетворяет, например, линия, для которой

$$p_a(x) = a \sin bx, \quad \rho_c(x) = \rho_c(0) e^{\delta(1-\cos bx)}, \quad (9)$$

$$Z_1(x) = Z_1(0) e^{\delta(1-\cos bx)}, \quad Y_1(x) = Y_1(0) e^{-\delta(1-\cos bx)} \left[ 1 - \frac{\delta b \rho_c(0)}{Z_1(0)} \sin bx \right],$$

где  $bl = \pi$ ,  $a = \frac{\pi}{8\gamma l} \ln K_T$ ,  $\delta = -\frac{\ln K_T}{2}$ .

В такой линии с координатой  $x$  должны изменяться по заданным законам не только емкость и индуктивность, но и потери.

Из (9) следует, что с увеличением частоты уменьшается влияние потерь на  $p_a(x)$ , а эквивалентное сопротивление стремится к волновому сопротивлению.

Учитывая практические трудности осуществления рассматриваемой линии, для получения малых частотных искажений в рабочем диапазоне частот более удобно выбрать линию, у которой  $W_1(x)$  совпадает с  $\rho_c(x)$  для рассмотренной выше линии с точностью до постоянного коэффициента.

В случае  $\gamma(x) = \text{const}$  имеем:

$$W_1(x) = W_1(0) e^{\delta(1-\cos bx)}, \quad (10)$$

$$Z_1(x) = Z_1(0) e^{\delta(1-\cos bx)}, \quad Y_1(x) = Y_1(0) e^{-\delta(1-\cos bx)}.$$

Эквивалентное сопротивление  $\rho_c$  для средних и высоких частот ( $l/\lambda > 1$ ) определим по приближенному методу (1):

$$\rho_c \simeq W_1 - b\delta W_1(0) e^{-2\gamma l} \int e^{2\gamma x + \delta(1 - \cos bx)} \sin bx dx.$$

Входное сопротивление линии, нагруженной на волновое сопротивление, для средних и высоких частот равно

$$\rho(l) \simeq W_1(l) \left[ 1 - \frac{\delta}{\left(\frac{2\gamma l}{\pi}\right)^2 + 1} (e^{-2\gamma l} - 1) \right].$$

На рис. 1 приведены частотные характеристики такой линии (1) и экспоненциальной линии (2) ( $W_1(x) = W_1(0) e^{\delta x}$ ). Характеристики рассчитаны для одинаковых условий. Из сопоставления их следует, что экспоненциальная линия имеет значительно большие частотные искажения.

Институт автоматики и телемеханики  
Академии наук СССР

Поступило  
27 II 1951

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- <sup>1</sup> В. А. Ильин, Электричество, 2 (1950).