

МЕТОД РАСЧЕТА КОЭФФИЦИЕНТА БЕГУЩЕЙ ВОЛНЫ В ВЫСОКОЧАСТОТНОМ ТРАКТЕ С НЕСКОЛЬКИМИ НЕОДНОРОДНОСТЯМИ

В. Л. Муравченко, старший научный сотрудник НИЦ ТТ ВМФ, д.т.н.; alexibal@mail.ru

Предложен математический аппарат для расчета коэффициента бегущей волны в высокочастотном тракте, содержащем несколько неоднородностей.

Ключевые слова: коэффициент бегущей волны, падающая волна, отраженная волна.

Введение. В настоящее время в литературе отсутствует математический аппарат для определения коэффициента бегущей волны (КБВ) в высокочастотном тракте (ВЧ), включающем несколько неоднородностей. Типичным примером может служить выходной тракт широкополосного радиопередатчика, у которого на выходе отсутствует согласующее устройство. Обусловлено это требованием быстрой перестройки на другую рабочую частоту, предъявляемым радиoliniи с адаптацией по частоте. В результате выходное сопротивление радиопередатчика с полосой перекрытия по диапазону, превышающее несколько октав, оказывается рассогласованным (в разной степени в зависимости от частоты) с входным сопротивлением антенного фидера. Входное сопротивление антенны в большинстве случаев также не согласовано с фидером.

Ниже представлен вывод аналитических выражений, позволяющих определить значение КБВ на участке ВЧ-тракта, имеющего неоднородности на обоих его концах.

Коэффициент бегущей волны в ВЧ-тракте с несколькими неоднородностями. В [1, 2] показано, что суммарная амплитуда всех переотраженных волн ВЧ-колебаний (в том числе тока \dot{I}_n), направленных в сторону нагрузки (падающая волна), от неоднородностей, характеризующих коэффициентами отражений $p_1 e^{i\phi_1}$ и $p_2 e^{i\phi_2}$, представляет собой бесконечную убывающую геометрическую прогрессию и может быть определена соотношением:

$$\dot{I}_n = I_m \frac{1 - p_1 e^{i\phi_1}}{1 - p_1 p_2 e^{-2\alpha} e^{i(\phi_1 + \phi_2 - 2\beta)}}, \quad (1)$$

где I_m — амплитуда тока падающей волны на входе первой неоднородности; $p_1 p_2$ — модули коэффициентов отражений от 1-й и 2-й неоднородностей; ϕ_1, ϕ_2 — фазовые характеристики коэффициентов отражений; α — затухание фидера; $\beta = \frac{2\pi}{\lambda} l$ — электрическая длина фидера между неоднородностями; l — физическая длина фидера; λ — длина волны ВЧ-колебания.

Используя математические соотношения [3] при действиях с комплексными величинами, выделим действительную и мнимую части выражения (1):

$$\begin{aligned} \operatorname{Re}(\dot{I}_n) = I_m \frac{(1 - p_1 \cos \phi_1)[1 - p_1 p_2 e^{-2\alpha} \cos(\phi_1 + \phi_2 - 2\beta)] +}{[1 - p_1 p_2 e^{-2\alpha} \cos(\phi_1 + \phi_2 - 2\beta)]^2 +} \rightarrow \\ \rightarrow \frac{+ p_1^2 p_2 e^{-2\alpha} \sin \phi_1 \sin(\phi_1 + \phi_2 - 2\beta)}{+ [p_1 p_2 \sin(\phi_1 + \phi_2 - 2\beta)]^2}; \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \operatorname{Im}(\dot{I}_n) = I_m \frac{-[1 - p_1 p_2 e^{-2\alpha} \cos(\phi_1 + \phi_2 - 2\beta)] p_1 \sin \phi_1 +}{[1 - p_1 p_2 e^{-2\alpha} \cos(\phi_1 + \phi_2 - 2\beta)]^2 +} \rightarrow \\ \rightarrow \frac{+ p_1 p_2 e^{-2\alpha} (1 - p_1 \cos \phi_1) \sin(\phi_1 + \phi_2 - 2\beta)}{+ [p_1 p_2 e^{-2\alpha} \sin(\phi_1 + \phi_2 - 2\beta)]^2}. \end{aligned} \quad (3)$$

Представим величину \dot{I}_n в показательной форме:

$$\dot{I}_n = I_{mn} e^{i\theta_n}, \quad (4)$$

$$\text{где } I_{mn} = \sqrt{(\operatorname{Re}(\dot{I}_n))^2 + (\operatorname{Im}(\dot{I}_n))^2}; \quad \theta_n = \arctg \frac{\operatorname{Im}(\dot{I}_n)}{\operatorname{Re}(\dot{I}_n)}. \quad (5)$$

Комплексная форма суммарной амплитуды переотраженных токов, направленных в сторону генератора (отраженная волна):

$$\dot{I}_o = I_m \frac{(1 - p_1 e^{i\phi_1}) p_2 e^{-2\alpha} e^{i(\phi_2 - 2\beta)}}{1 - p_1 p_2 e^{-2\alpha} e^{i(\phi_1 + \phi_2 - 2\beta)}}. \quad (6)$$

Действительная и мнимая части \dot{I}_o :

$$\begin{aligned} \operatorname{Re}(\dot{I}_o) = I_m \frac{[p_2 e^{-2\alpha} \cos(\phi_2 - 2\beta) - p_1 p_2 e^{-2\alpha} \cos(\phi_1 + \phi_2 - 2\beta)] \times}{[1 - p_1 p_2 e^{-2\alpha} \cos(\phi_1 + \phi_2 - 2\beta)]^2 +} \times \\ \times \frac{[1 - p_1 p_2 e^{-2\alpha} \cos(\phi_1 + \phi_2 - 2\beta)]}{[p_1 p_2 e^{-2\alpha} \sin(\phi_1 + \phi_2 - 2\beta)]^2} + \\ + \frac{[p_2 e^{-2\alpha} \sin(\phi_2 - 2\beta) - p_1 p_2 e^{-2\alpha} \sin(\phi_1 + \phi_2 - 2\beta)]}{1} \rightarrow \\ \rightarrow \frac{[-p_1 p_2 e^{-2\alpha} \sin(\phi_1 + \phi_2 - 2\beta)]}{1}; \end{aligned} \quad (7)$$

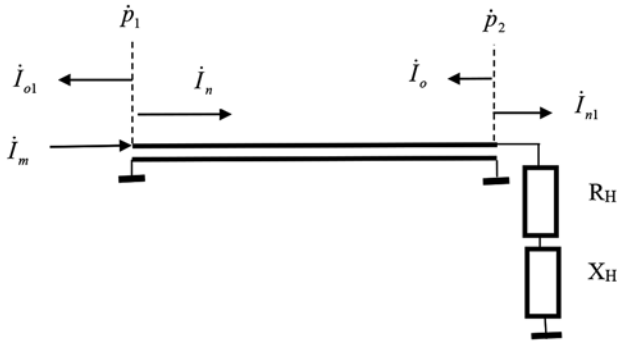
$$\begin{aligned} \operatorname{Im}(\dot{I}_o) = I_m \frac{[1 - p_1 p_2 e^{-2\alpha} \cos(\phi_1 + \phi_2 - 2\beta)] \times}{[1 - p_1 p_2 e^{-2\alpha} \cos(\phi_1 + \phi_2 - 2\beta)]^2 +} \rightarrow \\ \rightarrow \frac{\times [p_2 e^{-2\alpha} \sin(\phi_2 - 2\beta) - p_1 p_2 e^{-2\alpha} \sin(\phi_1 + \phi_2 - 2\beta)] -}{+ [p_1 p_2 e^{-2\alpha} \sin(\phi_1 + \phi_2 - 2\beta)]^2} \rightarrow \\ \rightarrow \frac{-[p_2 e^{-2\alpha} \sin(\phi_2 - 2\beta) - p_1 p_2 e^{-2\alpha} \sin(\phi_1 + \phi_2 - 2\beta)] \times}{1} \rightarrow \\ \rightarrow \frac{\times [-p_1 p_2 e^{-2\alpha} \sin(\phi_1 + \phi_2 - 2\beta)]}{1}. \end{aligned} \quad (8)$$

Представим величину \dot{I}_o в показательной форме:

$$\dot{I}_o = I_{mo} e^{i\theta_o}, \quad (9)$$

$$\text{где } I_{mo} = \sqrt{(\operatorname{Re}(\dot{I}_o))^2 + (\operatorname{Im}(\dot{I}_o))^2}; \quad \theta_o = \arctg \frac{\operatorname{Im}(\dot{I}_o)}{\operatorname{Re}(\dot{I}_o)}.$$

На рисунке графически в виде векторов представлены токи прямых и отраженных волн ВЧ-колебаний в антенном фидере с двумя неоднородностями на концах.



Определим КБВ как отношение разности суммарных амплитуд падающих и отраженных волн к их сумме:

$$КБВ = \frac{I_{mn} - I_{mo}}{I_{mn} + I_{mo}}. \tag{10}$$

Суммарная волна тока, отраженная от неоднородностей p_1 и p_2 (та ее часть, которая прошла в сторону генератора через неоднородность p_1), определяется выражением:

$$I_{ol} = I_m p_1 e^{i\phi_1} + I_o (1 - p_1 e^{i\phi_1}) = I_m p_1 e^{i\phi_1} + I_{mo} e^{i\theta_o} (1 - p_1 e^{i\phi_1}). \tag{11}$$

Знать суммарную волну, отраженную в сторону генератора, необходимо для учета ее влияния на режим работы генератора. Суммарную волну тока, прошедшую в сторону нагрузки через неоднородность p_2 , можно найти с помощью выражения:

$$I_{n1} = I_n (1 - p_2 e^{i\phi_2}) = I_{mn} e^{i\theta_n} (1 - p_2 e^{i\phi_2}). \tag{12}$$

Мощность, рассеиваемая в нагрузке, определяется выражением:

$$\begin{aligned} \text{Re}(\dot{P}) &= \text{Re}(I_{n1}^2) R_H = \text{Re}(I_{mn} e^{i\theta_n} (1 - p_2 e^{i\phi_2}))^2 R_H = \\ &= \text{Re}(e^{i\theta_n} - p_2 e^{i(\theta_n + \phi_2)})^2 0,5 I_{mn}^2 R_H = \\ &= 0,5 I_{mn}^2 R_H [\cos 2\theta_n - 2 p_2 \cos(2\theta_n + \phi_2) + p_2^2 \cos 2(\theta_n + \phi_2)]. \end{aligned} \tag{13}$$

Следует отметить, что фазовые характеристики коэффициентов отражений и электрическая длина фидера существенным образом влияют на значения суммарных амплитуд падающих и отраженных волн $I_{n \max}, I_{o \max}$ [4].

При наличии в тракте третьей неоднородности приведенные выше расчетные соотношения для определения КБВ на втором участке тракта, ограниченного неоднородностями p_2 и p_3 , останутся неизменными при нормировании суммарного падающего тока $I_{n \max}$ к величине $(1 - p_2)$ и подстановке в расчетные формулы вместо \dot{p}_1 и \dot{p}_2 коэффициентов \dot{p}_2 и \dot{p}_3 , соответственно. Совершенно очевидно, что при изменении коэффициентов отражений изменит-

ся и КБВ на втором участке тракта. По этой причине необходимо учитывать изменения КБВ на отдельных участках тракта с числом неоднородностей более двух. В этом случае критерием отдаваемой мощности в антенну может быть ток в основании антенны.

При включении в тракт четырехполюсников их параметры приводятся к параметрам длинной линии с помощью приведенных ниже соотношений [5]. Затухание в четырехполюснике:

$$\alpha = \ln \left| \sqrt{A_{11} A_{22}} + \sqrt{A_{12} A_{21}} \right|, \tag{14}$$

где $A_{11}, A_{22}, A_{12}, A_{21}$ — параметры четырехполюсника.

Фазовая задержка четырехполюсника:

$$\beta = \text{arctg} \frac{\text{Im}(\sqrt{A_{11} A_{22}} + \sqrt{A_{12} A_{21}})}{\text{Re}(\sqrt{A_{11} A_{22}} + \sqrt{A_{12} A_{21}})}. \tag{15}$$

При включении в тракт двух соединенных непосредственно четырехполюсников, коэффициент отражения на стыке можно рассчитать по формуле:

$$\dot{p} = \pm \sqrt{1 - \frac{4R_\Gamma R_H [(R_\Gamma + R_H)^2 - (X_\Gamma + X_H)^2]}{[(R_\Gamma + R_H)^2 + (X_\Gamma + X_H)^2]} - j \frac{4R_\Gamma R_H (R_\Gamma + R_H)(X_\Gamma + X_H)}{[(R_\Gamma + R_H)^2 + (X_\Gamma + X_H)^2]}}. \tag{16}$$

где \dot{P}_H, P_C — мощность в нагрузке в рассогласованном и согласованном режимах; R_Γ, X_Γ — активная и реактивная составляющие сопротивления четырехполюсника со стороны генератора; R_H, X_H — активная и реактивная составляющие сопротивления четырехполюсника со стороны нагрузки. Разные знаки коэффициента отражения перед корнем соответствуют разным знакам этих коэффициентов при расчетах напряжения и тока в нагрузке тракта с неоднородностью.

Заключение. Предложенный метод расчета КБВ в высокочастотном тракте позволяет рассчитывать КБВ как для участков с двумя неоднородностями, так и с большим их числом, включая различные сочетания фидеров и четырехполюсников.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сушкевич В. Н. Нерегулярные линейные волноводные системы.— М.: Сов. радио, 1967.
2. Муравченко В. Л. Методика оценки входного сопротивления фидера // Электросвязь.— 2009.— № 3.
3. Бронштейн И. Н., Семендяев К. А. Справочник по математике.— М.: Наука, 1965.
4. Муравченко В. Л. Особенности использования квазисогласующих устройств в широкополосных передатчиках // Электросвязь.— 2010.— № 5.
5. Муравченко В. Л. Расчет мощности в нагрузке передающего тракта // Электросвязь.— 2012.— № 7.

Получено 07.03.14