



УДК 537.86.:621.372.8

В. Е. Захаров, Д. С. Котова

**ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ЭКВИВАЛЕНТНЫХ СХЕМ
ДЛЯ РАСЧЕТА ЛИНИИ ВЫТЕКАЮЩЕЙ ВОЛНЫ**

Обосновано построение резистивно-емкостной цепи для замещения неоднородности, образованной излучателем линии в виде щели. Произведен расчет электрических параметров разработанной эквивалентной схемы для описания электрических процессов в линии вытекающей волны на основе заданных параметров линии передачи, щелевого излучателя и нагрузки. Составлена и решена система уравнений электрического равновесия для эквивалентной схемы. Исследован баланс мощностей в цепи.

The resistive-capacitive electric circuit is obtained to describe the processes of the wave transmission and of radiation in the antenna of leaky wave. The equivalent electric parameters of the circuit are estimated. The system of equations is composed to describe the electric processes in the equivalent circuit. To study the balance of the wave power in the antenna of leaky wave, the calculations are performed.

Ключевые слова: антенны вытекающей волны, мощность излучения, коэффициент затухания мощности в волноводе, метод эквивалентных схем.

Key words: leaky wave antenna, radiated power, the damping factor of power in the waveguide, the method of equivalent circuits.

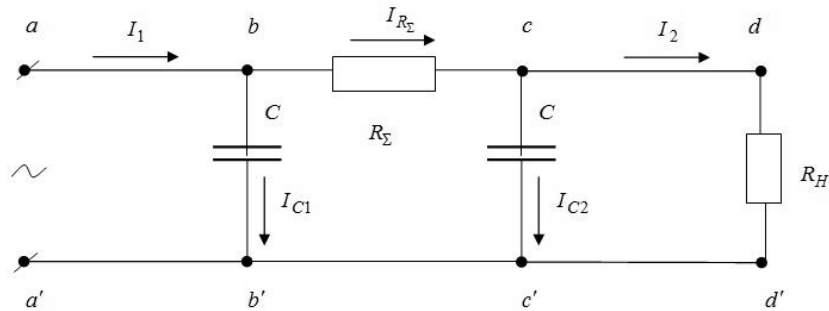
Пусть линией передачи служит прямоугольный волновод с воздушным заполнением, возбуждаемый на волне основного типа H_{10} с частотой ω . Излучение из волновода наружу происходит через продольную щель в узкой стенке волновода.

Применяя метод эквивалентных схем [1], регулярную линию передачи замещаем двухпроводной линией.

Щель длины ℓ создает неоднородность. В щели может запасаться энергия электрического поля. Излучение через щель приводит к потере части мощности в линии.

Если $\ell \ll \lambda_g$ (λ_g — длина волны в волноводе, $\lambda_g = 2\pi/(\gamma k)$, $\gamma = k_z/k$, k_z и k — продольное и полное волновое число соответственно), то неоднородность замещается симметричным четырехполосником резистивно-емкостного типа.

Эквивалентная схема линии вытекающей волны, работающая от генератора сигнала на согласованную нагрузку ($R_H = Z_0$, где Z_0 — волновое сопротивление линии), показана на рисунке.



82

Рис. Эквивалентная схема линии вытекающей волны, работающей на передачу

К зажимам $a - a'$ подключен генератор гармонического сигнала, а к зажимам $d - d'$ — нагрузка R_H . Отрезки ab и $cd = \ell_1$ идеальной двухпроводной линии соединяют четырехполюсник с генератором и нагрузкой.

Направим ось z от нагрузки к генератору ($z = 0$ в сечении нагрузки). На отрезке линии между зажимами $c - c'$ и $d - d'$ — комплексные амплитуды волн напряжения и силы тока:

$$\dot{U}_2 = \dot{U}_{n2} \exp(j\gamma kz), \quad \dot{I}_2 = \dot{U}_{n2} \exp(j\gamma kz)/Z_0, \quad (1)$$

а на отрезке линии между зажимами $a - a'$ и $b - b'$ —

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= \dot{U}_{m1} \exp(j\gamma k(z - \ell_1)) + \dot{U}_{o1} \exp(-j\gamma k(z - \ell_1)); \\ \dot{I}_1 &= (\dot{U}_{m1} \exp(j\gamma k(z - \ell_1)) - \dot{U}_{o1} \exp(-j\gamma k(z - \ell_1))) / Z_0. \end{aligned} \quad (2)$$

Применим первое правило Кирхгофа для узлов b и c :

$$\dot{I}_1(z = \ell_1 + 0) = \dot{I}_{R_\Sigma} + \dot{I}_{C1}, \quad \dot{I}_{R_\Sigma} = \dot{I}_2(z = \ell_1 - 0) + \dot{I}_{C2}, \quad (3)$$

где на основании закона Ома

$$\begin{aligned} \dot{I}_{R_\Sigma} &= (\dot{U}_1(z = \ell_1 + 0) - \dot{U}_2(z = \ell_1 - 0)) / R_\Sigma; \\ \dot{I}_{C1} &= j\omega C_1 U_1(z = \ell_1 + 0), \quad \dot{I}_{C2} = j\omega C_2 U_2(z = \ell_1 - 0). \end{aligned} \quad (4)$$

Система (1–4) дает

$$\begin{aligned} (\dot{U}_{m1} - \dot{U}_{o1}) / Z_0 &= j\omega C_1 (\dot{U}_{m1} + \dot{U}_{o1}) + (\dot{U}_{m1} + \dot{U}_{o1} - \dot{U}_{n2} \exp(j\gamma k \ell_1)) / R_\Sigma; \\ (\dot{U}_{m1} + \dot{U}_{o1} - \dot{U}_{n2} \exp(j\gamma k \ell_1)) / R_\Sigma &= \dot{U}_{n2} \exp(j\gamma k \ell_1) / Z_0 + j\omega C_2 \dot{U}_{n2} \exp(j\gamma k \ell_1). \end{aligned} \quad (5)$$

Излучение из щели не только приводит к потере части мощности в линии, но и нарушает режим бегущей волны.

Решая систему (5), найдем коэффициент отражения волны от неоднородности в линии:



$$\Gamma = \frac{\dot{U}_{01}}{\dot{U}_{11}} = \left(1 - j\omega CZ_0 - \frac{j\omega CZ_0}{1 + j\omega CZ_0} 2 \frac{Z_0}{R_\Sigma} \right) / \left(1 + 2 \frac{Z_0}{R_\Sigma} \right),$$

мощность волны на входе в неоднородность (на зажимах $b - b'$)

$$P_0 = P_T (1 - |\Gamma|^2) = P_T \left[4 \frac{Z_0}{R_\Sigma} \left(1 + \frac{Z_0}{R_\Sigma} \right) - \omega^2 C^2 Z_0^2 - \frac{\omega^2 C^2 Z_0^2}{1 + \omega^2 C^2 Z_0^2} \left(2 \frac{Z_0}{R_\Sigma} \right)^2 \right] / \left(1 + 2 \frac{Z_0}{R_\Sigma} \right)^2, \quad (6)$$

где P_T — мощность волны, падающей от генератора; $P_T = |\dot{U}_{11}|^2 / (2Z_0)$, а также мощность волны, поглощаемую нагрузкой $R_H = Z_0$:

$$P_{R_H} = \frac{|\dot{U}_{12}|^2}{2Z_0} = P_T \left| \frac{1 - j\omega CZ_0}{1 + j\omega CZ_0} - \Gamma \right|^2 = P_T \left[\omega^2 C^2 Z_0^2 + \left(2 \frac{Z_0}{R_\Sigma} \right)^2 \right] / \left(1 + 2 \frac{Z_0}{R_\Sigma} \right)^2, \quad (7)$$

и мощность, поглощаемую активным сопротивлением неоднородности R_Σ :

$$P_{R_\Sigma} = P_T \left[4 \frac{Z_0}{R_\Sigma} - 2\omega^2 C^2 Z_0^2 - \frac{\omega^2 C^2 Z_0^2}{1 + \omega^2 C^2 Z_0^2} \left(2 \frac{Z_0}{R_\Sigma} \right)^2 \right] / \left(1 + 2 \frac{Z_0}{R_\Sigma} \right)^2. \quad (8)$$

Выражения (6–8) удовлетворяют уравнению баланса мощностей $P_0 = P_{R_H} + P_{R_\Sigma}$.

Регулярный волновод, в котором распространяется одна волна (H_{10}), эквивалентен дисперсионной двухпроводной линии [1].

Амплитуда колебаний эквивалентного напряжения и силы тока в линии $U_{11} = E_{ym} b$ и $I_{11} = 2a H_{xm} / \pi$, где a и b — поперечный размер широкой и узкой стенки волновода, E_{ym} и H_{xm} — амплитуда колебаний электрического поля и поперечной компоненты магнитного поля в волноводе соответственно.

Волновое сопротивление линии $Z_0 = \dot{U}_{11} / \dot{I}_{11} = Z_{cH_{10}} \pi b / (2a)$, где $Z_{cH_{10}}$ — характеристическое сопротивление волн H_{10} , $Z_{cH_{10}} = E_{ym} / H_{xm} = 120\pi \left(1 - \lambda^2 / (4a^2) \right)^{-1/2}$ Ом; λ — длина волны в свободном пространстве, $\lambda = 2\pi / k$.

Излучение из волновода через щель можно представить как излучение эквивалентного электрического вибратора в полупространство [1]. Неоднородности со сосредоточенными параметрами соответствует эквивалентный вибратор с сопротивлением излучения, равным половине сопротивления излучения элементарного вибратора: $R'_\Sigma = 40\pi^2 (\ell / \lambda)^2$ Ом. Проводимость излучения щели $G'_\Sigma = R'_\Sigma / (60\pi)^2$ См [1], то есть $G'_\Sigma = (1/90) (\ell / \lambda)^2$ См.

Амплитуда линейной плотности тока в узкой идеально проводящей стенке волновода $J_y = H_{zm}$, где H_{zm} — амплитуда продольной компоненты напряженности магнитного поля в волноводе. Применяя



теорему о непрерывности полного тока [2] к границе раздела «стенка волновода – щель», найдем $J_y = \omega \varepsilon_0 h E_{y0}$, где E_{y0} – амплитуда напряженности электрического поля внутри щели, ε_0 – диэлектрическая проницаемость вакуума, h – толщина стенки волновода.

Два последних выражения дают $E_{y0} = H_{zm}/(\omega \varepsilon_0 h)$. Амплитуда напряжения на щели $U_{щ} = E_{y0}d$, где d – ширина щели. Для волны H_{10} отношение $H_{zm}/E_{ym} = \pi/(\omega a \mu_0)$, где μ_0 – магнитная проницаемость вакуума [1]. Отсюда $U_{щ}/U_{II} = H_{zm}d/(E_{ym}b\omega \varepsilon_0 h) = \pi d/(k^2 abh)$.

Максимальная энергия электрического поля, запасаемая в щели, $W_{Em} = C_{щ}U_{щ}^2/2$, где $C_{щ}$ – емкость неоднородности, образуемой щелью, $C_{щ} = \varepsilon_0 h \ell/d$.

Емкость щелевой неоднородности на схеме (см. рис.) равна $2C$; таким образом, $W_{Em} = 2CU_{II}^2/2$.

Тогда

$$C = \frac{C_{щ}}{2} \left(\frac{U_{щ}}{U_{II}} \right)^2 = \frac{\varepsilon_0}{2} \left(\frac{\pi}{ab} \right)^2 \frac{\ell d}{h} \frac{1}{k^4} \Phi.$$

Мощность, излучаемая щелью, равна $P_{\Sigma} = U_{щ}^2 G'_{\Sigma}/2$, а та же мощность, но поглощаемая в активной проводимости G_{Σ} неоднородности (см. рис.), есть $P_{\Sigma} = U_{II}^2 G_{\Sigma}/2$.

Тогда активное сопротивление неоднородности:

$$R_{\Sigma} = \frac{1}{G_{\Sigma}} = \frac{1}{G'_{\Sigma}} \left(\frac{U_{щ}}{U_{II}} \right)^{-2} = 90 \left(\frac{\ell}{\lambda} \right)^{-2} \left(\frac{\pi d}{k^2 abh} \right)^{-2} = 360 \left(\frac{abh}{\ell d} \right)^2 k^2, \text{ Ом.}$$

Список литературы

1. Воскресенский Д.И., Гостюхин В.Л., Максимов В.М. и др. Антенны и устройства СВЧ / под ред. Д.И. Воскресенского. М., 2008.
2. Марков Г.Т., Петров Б.М., Грудинская Г.П. Электродинамика и распространение радиоволн. М., 1979.

Об авторах

Вениамин Ефимович Захаров – д-р физ.-мат. наук, проф., Балтийский федеральный университет им. И. Канта.

Дарья Сергеевна Котова – асп., Балтийский федеральный университет им. И. Канта.

Authors

Veniamin Zakharov – Prof., I. Kant Baltic Federal University.

Darya Kotova – PhD student, I. Kant Baltic Federal University.