

УДК 537.86.:621.372.8

В. Е. Захаров, Д. С. Котова, В. В. Брюханов

ИССЛЕДОВАНИЕ ЛИНИИ ВЫТЕКАЮЩЕЙ ВОЛНЫ С ИЗЛУЧАТЕЛЕМ ЩЕЛЕВОГО ТИПА ПРОИЗВОЛЬНОЙ ДЛИНЫ МЕТОДОМ ЭКВИВАЛЕНТНЫХ СХЕМ

Разработана эквивалентная схема для описания электрических процессов в линии вытекающей волны со щелью произвольной длины в стенке волновода. На эквивалентной схеме щель замещена неоднородностью резистивно-емкостного типа с распределенными параметрами. Произведен расчет линии и определены оптимальные режимы при работе на передачу и прием.

The equivalent circuit is developed to describe the electrical processes in the antenna of leaky wave. The slot of an arbitrary length in the waveguide wall is considered as non-uniformity of resistive-capacitive type with distributed parameters. The calculations are performed to determine the optimal values of the antenna parameters.

Ключевые слова: линия вытекающей волны, режимы работы на прием и передачу, метод эквивалентных схем, прямоугольный волновод.

Key word: line of leaky wave, transmitter and receiver, method of equivalent circuits, rectangular waveguide.

Ранее [1] авторами была построена и исследована эквивалентная схема передающего тракта, а в данной статье – приемного тракта линии вытекающей волны. Линией передачи служит прямоугольный волновод без потерь, возбуждаемый на волне основного типа H_{10} с частотой ω . Излучение из волновода наружу происходит через продольную щель длины l в узкой стенке волновода. Регулярная линия передачи замещена двухпроводной линией. Выполнение условия $l \ll \lambda_g$, где λ_g – длина волны в волноводе, позволяет заместить щель неоднородностью резистивно-емкостного типа со сосредоточенными параметрами.

Цель данной работы – исследование режима работы линии вытекающей волны на передачу и прием со щелью произвольной длины.

Если условие $l \ll \lambda_g$ не выполняется, то на эквивалентной схеме щель замещается неоднородностью резистивно-емкостного типа с распределенными параметрами. На рисунке 1 показана структурная схема замещения линии вытекающей волны.

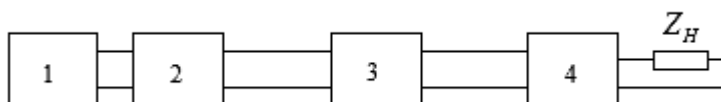


Рис. 1. Структурная схема замещения линии вытекающей волны

На схеме (рис. 1) величина Z_H обозначает сопротивление нагрузки; четырехполосники 2, 3, и 4 соответствуют отрезкам двухпроводных линий, замещающим волновод. Участок 3 длины ℓ_2 замещает отрезок волновода со щелью, а участки 2 и 4 длины ℓ_1 и ℓ_3 соответственно — без щели. Введем обозначения: γ_0 — постоянная распространения волн тока и напряжения на участках 2 и 4, а γ_1 — на участке 3. Так как щель образует неоднородность, то $\gamma_1 \neq \gamma_0$.

На рисунке 2, а показана схема замещения двухполосника 1 (см. рис. 1) при работе на прием, а на рисунке 2, б — при работе на передачу.

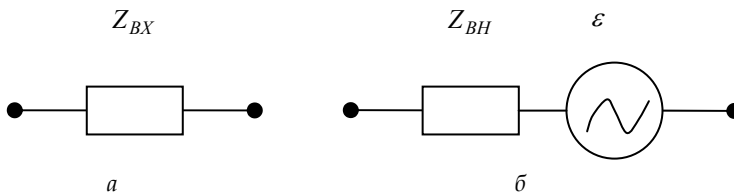


Рис. 2. Схема замещения двухполосника 1 при работе на прием (а) и на передачу (б)

Величина Z_{BX} — входное сопротивление приемника, а Z_{BH} и $\dot{\epsilon}$ — внутреннее сопротивление и комплексная амплитуда э.д.с. передатчика соответственно. Обозначим также \dot{U} и \dot{I} как комплексные амплитуды волны напряжения и тока (соответственно) в линии на рисунке 1.

Исследуем работу схемы рисунка 1 на прием. Ось z направим от нагрузки к приемнику, причем $z = 0$ в сечении нагрузки. Пусть плоская гармоническая волна, падающая на щель, возбуждает бегущую волну э.д.с. на участке 3. Комплексная амплитуда э.д.с. равна $\dot{\epsilon}' = \dot{\epsilon}_0 \exp(-\gamma_0(\ell_2 + \ell_3 - z))$, где $\dot{\epsilon}_0$ — параметр, определяемый амплитудой волны, падающей на щель. Анализ показывает, что общее решение телеграфных уравнений [2; 3] для волн напряжения и тока на участке 3 с учетом действия э.д.с. $\dot{\epsilon}'$ выражается как:

$$\begin{aligned} \dot{U}_3 &= \frac{\dot{\epsilon}_0}{1 - (\gamma_1/\gamma_0)^2} \exp(-\gamma_0(\ell_2 + \ell_3 - z)) + A \exp(-\gamma_1(\ell_2 + \ell_3 - z)) + \\ &+ B \exp(\gamma_1(\ell_2 + \ell_3 - z)); \\ \dot{I}_3 &= \frac{1}{Z_1} \left(\begin{aligned} &\frac{\gamma_1}{\gamma_0} \frac{\dot{\epsilon}_0}{1 - (\gamma_1/\gamma_0)^2} \exp(-\gamma_0(\ell_2 + \ell_3 - z)) + \\ &+ A \exp(-\gamma_1(\ell_2 + \ell_3 - z)) - B \exp(\gamma_1(\ell_2 + \ell_3 - z)) \end{aligned} \right), \end{aligned} \quad (1)$$



где Z_1 – волновое сопротивление линии на участке 3, A и B – константы интегрирования.

Решение телеграфных уравнений на участке 2 линии имеет вид:

$$\begin{aligned} \dot{U}_2 &= \dot{U}_{\Pi 2} \left(\exp(\gamma_0(\ell_1 + \ell_2 + \ell_3 - z)) + \Gamma_2 \exp(-\gamma_0(\ell_1 + \ell_2 + \ell_3 - z)) \right); \\ \dot{I}_2 &= \frac{\dot{U}_2}{Z_0} \left(\exp(\gamma_0(\ell_1 + \ell_2 + \ell_3 - z)) - \Gamma_2 \exp(-\gamma_0(\ell_1 + \ell_2 + \ell_3 - z)) \right), \end{aligned} \quad (2)$$

где Z_0 – волновое сопротивление линии на участках 2 и 4; $\dot{U}_{\Pi 2}$ – константа интегрирования; Γ_2 – коэффициент отражения волны от входного сопротивления приемника Z_{BX} , причем $\Gamma_2 = (Z_{BX} + Z_0)/(Z_{BX} - Z_0)$.

На участке 4 вместо (2) имеем:

$$\dot{U}_4 = \dot{U}_{\Pi 4} \left(\exp(\gamma_0 z) + \Gamma_4 \exp(-\gamma_0 z) \right); \quad \dot{I}_4 = \frac{\dot{U}_{\Pi 4}}{Z_0} \left(\exp(\gamma_0 z) - \Gamma_4 \exp(-\gamma_0 z) \right), \quad (3)$$

где $\dot{U}_{\Pi 4}$ – константа интегрирования; и Γ_4 – коэффициент отражения волны от нагрузки Z_H , причем $\Gamma_4 = (Z_H + Z_0)/(Z_H - Z_0)$.

Константы A , B , $\dot{U}_{\Pi 2}$ и $\dot{U}_{\Pi 4}$ определяются следующими условиями непрерывности напряжения и тока на границах между участками 2 и 3, а также 3 и 4:

$$\begin{aligned} \dot{U}_2(z = \ell_2 + \ell_3 + 0) &= \dot{U}_3(z = \ell_2 + \ell_3 - 0); \quad \dot{I}_2(z = \ell_2 + \ell_3 + 0) = \dot{I}_3(z = \ell_2 + \ell_3 - 0); \\ \dot{U}_3(z = \ell_3 + 0) &= \dot{U}_4(z = \ell_3 - 0); \quad \dot{I}_3(z = \ell_3 + 0) = \dot{I}_4(z = \ell_3 - 0). \end{aligned} \quad (4)$$

Подставив выражения (1) – (3) в равенства (4), найдем константы интегрирования:

$$\begin{aligned} \dot{U}_{\Pi 2} &= \frac{ed - ab}{ac - df}; \quad A = \frac{1}{2} \left(c \dot{U}_{\Pi 2} \exp(\gamma_1 \ell_2) - \frac{\dot{\epsilon}_0}{1 - (\gamma_1/\gamma_0)^2} \left(1 + \frac{\gamma_1}{\gamma_0} \right) \right); \quad (5) \\ \dot{U}_{\Pi 4} &= \frac{e}{a} + \frac{f}{a} \dot{U}_{\Pi 2}; \quad B = \frac{1}{2} \left(f \dot{U}_{\Pi 2} \exp(-\gamma_1 \ell_2) - \frac{\dot{\epsilon}_0}{1 - (\gamma_1/\gamma_0)^2} \left(1 - \frac{\gamma_1}{\gamma_0} \right) \right); \end{aligned}$$

где

$$\begin{aligned} a &= \left(1 - \frac{Z_1}{Z_0} \right) \exp(\gamma_0 \ell_3) + \Gamma_4 \left(1 + \frac{Z_1}{Z_0} \right) \exp(-\gamma_0 \ell_3); \\ c &= \left(\left(1 + \frac{Z_1}{Z_0} \right) \exp(\gamma_0 \ell_1) + \Gamma_2 \left(1 - \frac{Z_1}{Z_0} \right) \exp(-\gamma_0 \ell_1) \right) \exp(-\gamma_1 \ell_2); \\ d &= \left(1 + \frac{Z_1}{Z_0} \right) \exp(\gamma_0 \ell_3) + \Gamma_4 \left(1 - \frac{Z_1}{Z_0} \right) \exp(-\gamma_0 \ell_3); \end{aligned}$$



$$e = \frac{\dot{\varepsilon}_0}{1 - (\gamma_1/\gamma_0)^2} \left(1 - \frac{\gamma_1}{\gamma_0}\right) (\exp(-\gamma_0 \ell_2) - \exp(\gamma_1 \ell_2));$$

$$f = \left(\left(1 - \frac{Z_1}{Z_0}\right) \exp(\gamma_0 \ell_1) + \Gamma_2 \left(1 + \frac{Z_1}{Z_0}\right) \exp(-\gamma_0 \ell_1) \right) \exp(\gamma_1 \ell_2).$$

Оптимальный режим приема достигается при согласовании приемника с волноводом ($Z_{BX} = Z_0$, и тогда $\Gamma_2 = 0$) и холостом ходе ($Z_H \rightarrow \infty$, и тогда $\Gamma_4 = -1$) или коротком замыкании ($Z_H = 0$, и тогда $\Gamma_4 = -1$) на нагрузке.

98

Перейдем к исследованию работы схемы рисунка 1 на передачу. Вместо схемы рисунка 2, а участок 1 теперь замещается схемой рисунка 2, б. На участке 3 э.д.с. $\dot{\varepsilon}'$ уже не действует. С учетом этих изменений решение системы телеграфных уравнений, уравнения закона Ома, условий непрерывности тока и напряжения при переходе с одного участка цепи рисунка 1 на другой можно выразить как

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= \dot{\varepsilon} - Z_{BH} \dot{I}_1; \\ \dot{U}_2 &= B_2 \exp(\gamma_0 (\ell_1 + \ell_2 + \ell_3 - z)) + A_2 \exp(-\gamma_0 (\ell_1 + \ell_2 + \ell_3 - z)); \\ \dot{I}_2 &= \frac{1}{Z_0} (B_2 \exp(\gamma_0 (\ell_1 + \ell_2 + \ell_3 - z)) - A_2 \exp(-\gamma_0 (\ell_1 + \ell_2 + \ell_3 - z))); \\ \dot{U}_3 &= A_3 \exp(-\gamma_1 (\ell_3 - z)) + B_3 \exp(\gamma_1 (\ell_3 - z)); \\ \dot{I}_3 &= \frac{1}{Z_1} (A_3 \exp(-\gamma_1 (\ell_3 - z)) - B_3 \exp(\gamma_1 (\ell_3 - z))); \\ \dot{U}_4 &= \dot{U}_{\Pi 4} (\exp(\gamma_0 z) + \Gamma_4 \exp(-\gamma_0 z)); \\ \dot{I}_4 &= \frac{\dot{U}_{\Pi 4}}{Z_0} (\exp(\gamma_0 z) - \Gamma_4 \exp(-\gamma_0 z)), \end{aligned} \quad (6)$$

где

$$\begin{aligned} \dot{U}_{\Pi 4} &= \frac{\dot{\varepsilon}}{(H - GF)(1 + Z_{BH}/Z_0)} \exp(-\gamma_0 \ell_1); \\ A_3 &= \frac{\dot{U}_{\Pi 4}}{2} \left(\left(1 + \frac{Z_1}{Z_0}\right) \exp(\gamma_0 \ell_3) + \Gamma_4 \left(1 - \frac{Z_1}{Z_0}\right) \exp(-\gamma_0 \ell_3) \right); \\ B_3 &= \frac{\dot{U}_{\Pi 4}}{2} \left(\left(1 - \frac{Z_1}{Z_0}\right) \exp(\gamma_0 \ell_3) + \Gamma_4 \left(1 + \frac{Z_1}{Z_0}\right) \exp(-\gamma_0 \ell_3) \right); \\ B_2 = FA_2 \quad A_2 &= \frac{1}{1 + Z_{BH}/Z_0} \left(\dot{\varepsilon} - B_2 \left(1 - \frac{Z_{BH}}{Z_0}\right) \right) \quad F = \frac{1}{4} \exp(-\gamma_0 \ell_1) (K + L); \\ K &= M \left(1 - \frac{Z_0}{Z_1}\right) \exp(\gamma_1 \ell_2); \quad L = N \left(1 + \frac{Z_0}{Z_1}\right) \exp(-\gamma_1 \ell_2); \end{aligned}$$



$$G = \exp(\gamma_0 \ell_1) - \frac{1 - Z_{BH}/Z_0}{1 + Z_{BH}/Z_0} \exp(-\gamma_0 \ell_1); \quad H = \frac{1}{2} (M \exp(\gamma_1 \ell_2) + N \exp(-\gamma_1 \ell_2));$$

$$M = \left(1 + \frac{Z_1}{Z_0}\right) \exp(\gamma_0 \ell_3) + \Gamma_4 \left(1 - \frac{Z_1}{Z_0}\right) \exp(-\gamma_0 \ell_3);$$

$$N = \left(1 - \frac{Z_1}{Z_0}\right) \exp(\gamma_0 \ell_3) + \Gamma_4 \left(1 + \frac{Z_1}{Z_0}\right) \exp(-\gamma_0 \ell_3).$$

Оптимальный режим работы линии (рис. 1) на передачу достигается при согласовании волновода с нагрузкой ($Z_H = Z_0$, и тогда $\Gamma_4 = 0$) и с генератором ($Z_{BH} = Z_0$).

Основными результатами проведенных исследований являются следующие:

- построены схемы замещения линии вытекающей волны при работе на передачу и прием (рис. 1, 2) со щелью произвольной длины;
- произведен расчет режима работы линии вытекающей волны на прием (5) и передачу (6). В каждом случае найден оптимальный режим работы линии.

Список литературы

1. Захаров В.Е., Котова Д.С. Применение метода эквивалентных схем для расчета линии вытекающей волны // Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. 2011. Вып. 5. С. 81 – 84.
2. Фельд Я.Н., Бененсон Л.С. Основы теории антенн. М., 2007.
3. Григорьев А.Д. Электродинамика и микроволновая техника. СПб., 2007.

Об авторах

Вениамин Ефимович Захаров – д-р физ.-мат. наук, проф., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград.
E-mail: VeZakharov@kantiana.ru

Дарья Сергеевна Котова – асп., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград.
E-mail: VeZakharov@kantiana.ru

Валерий Вениаминович Брюханов – д-р физ.-мат. наук, проф., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград.
E-mail: bryukhanov_v.v@mail.ru

About authors

Veniamin Zakharov – Dr, professor, I. Kant Baltic Federal University, Kaliningrad.
E-mail: VeZakharov@kantiana.ru

Daria Kotova – PhD student, I. Kant Baltic Federal University, Kaliningrad.
E-mail: VeZakharov@kantiana.ru

Valery Bryukhanov – Dr, professor, I. Kant Baltic Federal University, Kaliningrad.
E-mail: bryukhanov_v.v@mail.ru