

КОЭФФИЦИЕНТ СТОЯЧЕЙ ВОЛНЫ В ЛИНИИ ПЕРЕДАЧИ С НАГРУЗКОЙ В ВИДЕ ЭКСПОНЕНЦИАЛЬНОГО ТЕМ- РУПОРА

к.т.н Г.В. Ермаков, В.Ф. Шеянов
(представил д.т.н., проф. А. В. Полярус)

Разработана методика расчета коэффициента стоячей волны в линии передачи с нагрузкой в виде экспоненциального ТЕМ-рупора квазианалитическим методом.

За последнее время появилось большое количество публикаций, посвященных вопросам исследования и использования антенн, излучающих сверхширокополосные (СШП) сигналы [1,2]. При использовании СШП антенн принципиальным моментом является излучение сигнала с минимальными искажениями его формы. При наличии неоднородностей передающей линии снижается эффективность излучающей системы и искажается излучаемый сигнал.

При проведении численных расчетов необходимо учитывать, что амплитуда тока, так же как и скорость изменения тока во времени определяются параметрами возбуждающего антенну импульса и условиями согласования линии передачи с нагрузкой. Последнее требование является принципиальным, поскольку при интерференции прямого и отраженного сигнала искажается форма генерируемого сигнала в линии.

Цель настоящей работы состоит в определении коэффициента стоячей волны (КСВ) конструкции с нагрузкой в виде экспоненциального ТЕМ – рупора путем использования комбинированного квазианалитического метода.

Рассмотрим систему, состоящую из ленточной линии передачи и СШП излучателя в виде экспоненциального ТЕМ – рупора [3]. На рис.1 представлена проекция конструкции в плоскости YZ. Продольные размеры линии выбраны таким образом, чтобы в ней не возникли высшие гармоники и существовала только волна основного типа.

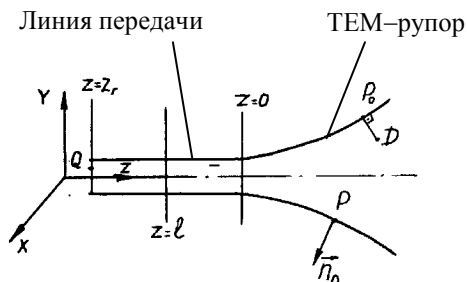


Рис.1. Ленточная линия с нагрузкой в виде ТЕМ – рупора

Для определения формы импульсов тока и напряжения в линии передачи вблизи точки соединения длинной линии с нагрузкой рассмотрим временное и пространственное распределение тока и напряжения в линии. При использовании СШП сигналов, распространяющихся в линиях передачи, существует возможность решения дифференциальных уравнений длинной линии с распределенными параметрами непосредственно во временной области [6].

Для определения тока и напряжения в сечении $z = 0$ (рис. 1) представим длинную линию в виде набора *RLCG* – ячеек [4]. Обозначим приходящиеся на единицу длины ленточной линии проводимость, емкость, индуктивность, активное сопротивление соответственно через G_0 , C_0 , L_0 и R_0 . Для выбранной линии индуктивность, емкость и волновое сопротивление зависят от геометрических размеров и электрических параметров диэлектрика [4]:

$$C_0 = \varepsilon \frac{b}{a}; L_0 = \mu \frac{a}{b}; Z_B = 120\pi \frac{a}{b} \left(\frac{a}{b} \ll 1 \right); Z_B = 120 \ln \left(4 \frac{a}{b} \right) \left(\frac{a}{b} \gg 1 \right), \quad (1)$$

где Z_B – волновое сопротивление ленточной линии передачи;

a – расстояние между полосками;

b – ширина полоски;

μ , ε – магнитная и диэлектрическая проницаемости диэлектрика линии.

Сопротивление потерь R_0 и проводимость излучения G_0 ячейки для каждой составляющей спектра СШП сигнала можно определить, зная распределение плотности поверхностного тока $\vec{J}(\omega)$ на $S = S_1 \cup S_2$:

$$R_0 = \frac{1}{I_1^2} r_S \int_{L_1} H_\tau^2(\omega, z=l) dl; \quad \frac{1}{G_0} = \frac{1}{I_1^2} \int_{S_0} [\vec{E}_1(\omega), \vec{H}_1(\omega)] d\vec{S}_0, \quad (2)$$

где $\vec{H}_\tau = -[\vec{n}, \vec{J}]$; I_l – ток в сечении $z=l$;

\vec{E}_1, \vec{H}_1 – напряженности спектральных составляющих электрического и магнитного полей СШП сигнала в линии передачи в сечении $z=l$ ($z_r \leq l \leq z=0$);

$r_S = \sqrt{\omega \mu_a / 2\sigma}$ – поверхностное сопротивление линии передачи;

σ – удельная электрическая проводимость линии;

μ_a – абсолютная магнитная проницаемость линии.

Если выразить компоненты электромагнитного поля (\vec{E}, \vec{H}) через векторный потенциал (\vec{A}) посредством соотношений [6], то можно найти неразделяющиеся решения уравнения Клейн – Гордона в диспергирующей и проводящей средах для СШП сигналов, описываемых функциями Лагерра [6]. Рассмотрим линию передачи с распределенными па-

раметрами, определенными в (1) и (2). Ток I и напряжение U в таких линиях описывается системой уравнений

$$\begin{cases} \frac{\partial I}{\partial z} + C_0 \frac{\partial U}{\partial t} + G_0 U = 0; \\ \frac{\partial U}{\partial z} + L_0 \frac{\partial I}{\partial t} + R_0 I = 0. \end{cases} \quad (3)$$

Представив характеристическое время T_0 как $T_0 = \frac{2t_1 t_2}{|t_1 - t_2|}$, где $t_1 = \frac{L_0}{R_0}$; $t_2 = \frac{C_0}{G_0}$, определим безразмерные переменные τ и η и нормированные значения тока и напряжения i и u следующим образом:

$$V = \frac{I}{\sqrt{L_0 C_0}}; \quad \tau = \frac{t}{T_0}; \quad \eta = \frac{z}{V T_0}, \quad i = BI; \quad u = \frac{AU}{R_0 T_0 V},$$

где τ, η – приведенное время излучения и запаздывания сигнала;

V – фазовая скорость;

B – коэффициент, определяемый из условия полной нормировки.

Тогда система (3) переписется в виде

$$\begin{cases} \frac{t_1 t_2}{T_0^2} \frac{\partial i}{\partial \eta} + \frac{t_2}{T_0} \frac{\partial u}{\partial \tau} + u = 0; \\ \frac{\partial u}{\partial \eta} + \frac{t_1}{T_0} \frac{\partial i}{\partial \tau} + i = 0. \end{cases} \quad (4)$$

Для того, чтобы найти несинусоидальные волновые решения в линии передачи, введем неизвестную функцию Φ уравнением [6]:

$$i = \frac{\partial \Phi}{\partial \eta}; \quad u = -\frac{t_1}{T_0} \frac{\partial \Phi}{\partial \tau} - \Phi. \quad (5)$$

Подставляя ее в систему (4), второе уравнение системы становится тождеством и Φ может быть найдено из первого уравнения

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial \eta^2} - \frac{\partial^2 \Phi}{\partial \tau^2} = \frac{T_0^2}{t_1 t_2} \Phi + \frac{T_0(t_1 + t_2)}{t_1 t_2} \frac{\partial \Phi}{\partial \tau}. \quad (6)$$

Точное непериодическое решение уравнения (6), описывающее нестационарные поля, распространяющиеся от границы $\eta=0$, может быть записано (для $\tau^2 \geq \eta^2$) в виде [6]:

$$\Phi = \sum_{q=0}^{\infty} f_q(\eta, \tau); \quad f_q = \frac{\partial \Theta_q}{\partial \tau}, \quad (7)$$

где $\Theta_q(\eta, \tau) = \exp(-\gamma\tau) \left(\frac{\tau - \eta}{\tau + \eta} \right)^{\frac{q}{2}} I_q \left(\sqrt{\tau^2 - \eta^2} \right), \quad \tau \geq \eta;$

I_q – модифицированная функция Бесселя 1 - го рода,

$$\gamma = \frac{t_1 + t_2}{|t_1 - t_2|}.$$

Выражение (7), будучи подставленным в (5), даст выражения для тока и напряжения СШП сигнала:

$$i = - \sum_{q=0}^{\infty} a_q i_q(\eta, \tau), \quad u = - \sum_{q=0}^{\infty} a_q u_q(\eta, \tau), \quad (8)$$

где

$$i_q = \frac{\partial^2 \Theta_q}{\partial \tau \partial \eta} = \frac{1}{4} \left[\Theta_{q-2}(\eta, \tau) - \Theta_{q+2}(\eta, \tau) - 2\gamma(\Theta_{q-1}(\eta, \tau) - \Theta_{q+1}(\eta, \tau)) \right];$$

$$u_q = \frac{\partial^2 \Theta_q}{\partial \tau^2} = \frac{1}{4} \left(1 - \frac{t_2}{t_1} \right) \left[\Theta_{q-2}(\eta, \tau) + \Theta_{q+2}(\eta, \tau) - 2(1 - \gamma) + 2(1 + 2\gamma)\Theta_q(\eta, \tau) \right].$$

Уравнение (9) описывает временное и пространственное преобразование несинусоидальных функций тока и напряжения для различных соотношений t_2/t_1 на различных расстояниях от источника.

Таким образом, решение системы (4) представляет напряжение и ток в линии передачи, выраженные через неразделяющиеся функции Θ_q , которые не могут быть описаны как произведение функций времени и координат.

Представим ток и напряжение в линии передачи в виде линейной комбинации функций Лагерра на конце линии ($\eta=0$) в виде:

$$i = - \sum_{m=0}^{\infty} A_m L_m(x); \quad u = - \sum_{m=0}^{\infty} B_m L_m(x), \quad (10)$$

где $x = t\Gamma_0^{-1};$

$$A_m = \sum_{q=0}^{\infty} a_q P_{mq}(x); \quad B_m = \sum_{q=0}^{\infty} a_q Q_{mq}(x);$$

$$P_{mq}(x) = \int_0^{\infty} L_m(x) i_q(x); \quad Q_{mq}(x) = \int_0^{\infty} L_m(x) u_q(x).$$

Матричные элементы P_{mq} и Q_{mq} описывают возбуждение m - м импульсом Лагерра q – й несинусоидальной функции поля. Коэффициенты a_q могут быть найдены из условий непрерывности в сечении $\eta=0$ [6].

Выполнив обратное Фурье - преобразование для напряжения и тока вблизи точки подключения нагрузки (10), определим сопротивление линии передачи, зная которое можно определить КСВ линии (при известном волновом сопротивлении) в полосе частот, занимаемой спектром СШП сигнала. Знание КСВ позволяет провести анализ согласования нагрузки с линией передачи и подобрать соответствующие согласующие устройства.

При проведении численных расчетов была выбрана ленточная линия передачи с волновым сопротивлением 50 Ом и воздушным заполнением. Полоса рассматриваемого СШП сигнала составляет 100 МГц – 1 ГГц.

В данной работе расчет проводился для конструкции пластин с размерами: $y=0,007 \exp(2,9z)$; $x=0,1 \exp(0,46z)$; $\alpha=15^\circ$, $z=1,5$ м. Такой выбор обеспечивает максимальное излучение электромагнитной энергии за счет кривизны поверхности излучателя за один проход сигнала по антенне. Это подтверждается и расчетом коэффициента стоячей волны (рис. 2).

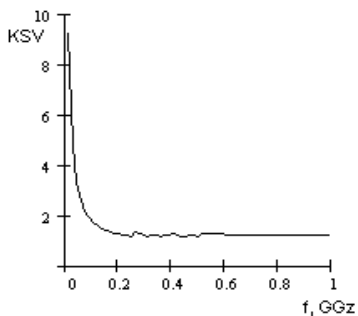


Рис.2. КСВ в линии передачи

Устранение отраженного импульса тока возможно за счет изменения конструкции экспоненциального ТЕМ – рупора в точке питания, что приведет к изменению временной формы импульса тока (напряжения) в линии передачи. Вследствие этого возможно значительное уменьшение области «звона» при фиксированной конструкции пластин.

Кроме этого, достигнуть полного согласования линии передачи с излучателем СШП сигналов возможно при использовании активных поглощающих нагрузок в точке питания или применения резистивных секций на концах излучателя.

ЛИТЕРАТУРА

1. Baum C.E., Farr E.G., Giri D.V. The Review Of Radio Science 1996 – 1999. – Oxford University Press, 1999. – P. 403 - 439.
2. Borysenko A., Borysenko E., Ivaschuk V., Prohorenko V. // Proc. Of 2000 Antenna Applications Symposium, IL. – 2000. – P. 55 - 82.
3. Ермаков Г.В. Исследование пространственных характеристик сверхширокополосных излучателей // Системи обробки інформації. – Харків : НАНУ, ПАНМ, ХВУ. – 2000. – Вип. 2(8). – С.168 - 171.
4. Фельдштейн А.В., Явич Л.Р., Смирнов В.П. Справочник по элементам волноводной техники. – М.: Сов. радио, 1967. – 356 с.

5. Шимони К. Теоретическая электротехника. – М.: Мир, 1964. – 382 с.
6. Shvartsburg A. V. Physics - Uspehi. – 1998. – V.41(1). – P. 77 - 94.

Поступила в редколлегию 29.01.2001
