

*Б.В. ДЗЮНДЗЮК, д-р техн. наук,
И.В. НАУМЕЙКО, канд. техн. наук, П.Н. МАСЛОВ*

К РАСЧЕТУ ИЗЛУЧЕНИЙ НА СТЫКАХ НЕОДНОРОДНЫХ МНОГОМОДОВЫХ НАПРАВЛЯЮЩИХ СИСТЕМ

Работа посвящена расчету параметров СВЧ-излучений в точке сочленения двух неоднородных высокочастотных многомодовых направляющих систем. Исследование проводилось для многопроводной кабельной линии с взаимными влияниями, которая, как известно [1] является многомодовой. Однако результаты могут быть распространены без существенных изменений на другие направляющие системы описываемые в первом приближении телеграфной моделью [1], например коаксиальные и полосковые линии. Полученные формулы справедливы также для любых линейных направляющих систем, в частности для волноводов различных типов, допускающих построение передаточных матриц каким-либо способом.

Предполагается, что электромагнитные параметры и их распределение вдоль каждого из кабелей известны, и в точке стыка x_1 они не совпадают. Излучение электромагнитных волн в точке x_1 для таких высокочастотных кабелей зависит от рассогласования параметров электрогерметичности стыка и может быть весьма значительно [2]. Его не удастся выразить теоретически в рамках телеграфной модели. Непосредственное измерение параметров излучения также затруднительно, поскольку диаграмма направленности стыка как излучатель зависит от многих факторов и заранее не известна.

Нами решена задача определения мощности излучения каждой моды по результатам измерения тестовых сигналов на входе кабельной линии при условии, что передаточные матрицы [3] K_1 и K_2 обеих частей состыкованной линии вычислены заранее решением соответствующей системы телеграфных уравнений. Отметим, что если фундаментальная система точных или приближенных решений $\{X_i\}$ телеграфной системы известна (подробнее о методах решения см работу [4], обозначения и терминология которой здесь сохранены), то передаточная матрица определяется следующим образом:

$$K = X(x)X^{-1}(0), \quad (1)$$

где $X(x)$ — матрица фундаментальных решений систем телеграфных уравнений, составленная из них как из столбцов. Решение системы телеграфных уравнений необходимо, поскольку для высоких частот матрица K не может быть определена достаточно точно по результатам предварительных измерений сигналов на входе и выходе каждого из отрезков кабеля, так как при этом проявляется краевой эффект, аналогичный по физической природе эффекту излучения на стыке. Если же измерительные приборы согласованы с кабелем по входному сопротивлению: $Z_{вход} = Z_{нагр}$ (методика описана в [5]), то излучением можно пренебречь. Но в n -проводной линии может существовать не более чем n линейно независимых векторов входа, что недостаточно для определения из выражения (1) передаточной матрицы размера $2n \times 2n$ посредством измерений на входе и выходе.

Исходя из перечисленных выше исходных положений, предлагается следующий метод оценки излучений для каждой моды в точке X_1 стыка высокочастотных многопроводных кабелей.

На вход линии подается n линейно независимых векторов высокочастотных синусоидальных кабелей напряжения. Время τ , по прошествии которого процесс считается установившимся, можно определить экспериментально. Напряжения и силы токов на входе и выходе измеряются согласованными с линией приборами. Используя передаточные матрицы, запишем

$$X_1 = K_1 X_0; \quad X_2 = K_2 (X_1 - P), \quad (2)$$

где X_0, X_1, X_2 — матрицы размера $2n \times 2n$ комплексных напряжений и сил токов, измеренных на входе и выходе первого участка и на выходе всей линии; P — матрица той же структуры, определяющая напряжения и силы токов, за счет которых произошло излучение, а также возможные другие эффекты, не учтенные моделью.

Из (2) получим

$$P = K_1 X_0 - K_2^{-1} X_2. \quad (3)$$

Введем обозначения:

$U_p, I_p; U_0, I_0; U_2, I_2$ — верхние и нижние квадратные блоки матриц P, X_0 и X_2 соответственно;

$Y^* = (U_0; I_0; U_2; I_2)^*$; K_{1j}, K_{2j} ($j = 1, 2, 3, 4$) — квадратные блоки матриц K_1, K_2 ;

* — символ сопряжения.

Действующая мощность излучения определяется матрицей размера $n \times n$

$$P_0 = 1/2 * \operatorname{Re} U_p^* I_p, \quad (4)$$

которая близка к диагональной, если излучения за счет взаимных влияний малы.

При этом

$$U_p = (K_{11}; K_{12}; -K_{21}; -K_{22})Y; \quad I_p = (K_{13}; K_{14}; -K_{23}; -K_{24})Y.$$

Отсюда

$$U_p^* I_p = Y^* \Pi Y, \quad (5)$$

где

$$\Pi = (K_{11}; K_{12}; -K_{21}; -K_{22})^* (K_{13}; K_{14}; -K_{23}; -K_{24}). \quad (6)$$

Матрица Π , определяющая квадратичные формы в (5), не обязательно эрмитова. Отметим, что, как следует из (6), матрица Π характеризует отрезки линий и не зависит от поданного сигнала. С ее помощью, зная векторы напряжений и сил токов на входе и выходе X_0 и X_2 , найдем по формуле (4) мощность излучения на стыке кабелей.

Однако гораздо удобнее было бы получить эту величину в зависимости только от входного сигнала X_0 . Сделать это непосредственно, определив “передаточную размера $2n \times 2n$ матрицу по излучению” K_p из матричного уравнения

$$P = K_p X_1, \quad (7)$$

невозможно, поскольку матрица прямоугольная, размера $2n \times n$. Доопределить ее можно, добавив к матрицам P и X_1 недостающие n

столбцов. Однако тогда необходимо рассогласовать выход систем, так как только в этом случае к матрице входов X_0 можно добавить еще n линейно независимых столбцов. Чем сильнее реальная матрица X_1 отличается от вырожденной, тем это рассогласование должно быть большим, а вместе с ним растет и излучение на конце линий, которое исказит измерения X_2 . Для решения данной задачи воспользуемся тем, что нижние n компонентов столбцов матрицы X_1 , т.е. силы токов, определяются ее верхними n компонентами — напряжениями и режимом на конце линии $Z_{\text{нагр}}$.

При этом матрица K_p может быть представлена в блочно-диагональном виде. Тогда система (7) распадается на две независимые:

$$U_p = K_{pi} U_1; \quad I_p = K_{pi} I_1, \quad (8)$$

причем каждая из них однозначно разрешима.

Матрицы K_{pi} , K_{pi} размера $n \times n$ назовем матричными коэффициентами излучения по напряжению и силе тока.

Из формул (2) и (8) получим:

$$K_{pi} = U_p U_1^{-1} = U_p (K_{11} U_0 + K_{12} I_0)^{-1}; \quad (9)$$

$$K_{pi} = I_p I_1^{-1} = I_p (K_{13} U_0 + K_{14} I_0)^{-1}.$$

Таким образом, предлагаемая методика сводится к следующему:

1. На вход n -проводной системы последовательно подаются векторы высокочастотного напряжения $\vec{U}^{(i)} = \{\delta_{ij}\}_{j=1}^n$. Здесь $\delta_{ij} = 1$, если $i = j$, и $\delta_{ij} = 0$, если $i \neq j$. Векторы X_0 и X_2 регистрируются, и из них как из столбцов составляются матрицы X_0 и X_2 .

2. Из (3) вычисляются матрицы U_p и I_p .

3. Из (4) отыскиваются (если необходимо) P_{ji} -элементы матрицы P_0 — мощности излучения каждой i -й моды в каждой j -й цепи.

4. Определив с помощью формул (9) один раз матрицу K_p по результатам измерений на входе и выходе, можно для любого входного вектора X_0 найти мощность излучения на стыке по формулам

$$\begin{bmatrix} \vec{U}_p \\ \vec{I}_p \end{bmatrix} = K_p K_1 \vec{X}_0; \quad P = 1/2 * \text{Re}(\vec{U}_p \vec{I}_p).$$

Список литературы: 1. *Schelkunoff S.A.* Conversion of Maxwell's Equations into Generalized Telegraphist's Equations // B.S.T.J. 1955. N 5. P. 995 - 1010. 2. *Литвиненко О.Н., Сошников В.И.* Теория неоднородных линий и их применение в радиотехнике. М.: Сов. радио 1964. 536 с. 3. *Зелях Э.В.* Основы общей теории линейных электрических схем. М.: Изд-во АН СССР, 1951. 335 с. 4. *Дикарев В.А.* Волны в многопроводных системах с распределенными параметрами // Радиотехника и электрон. 1975. Т. XX, № 12. С. 2618 - 2621 5. *Дикарев В.А., Мельников А.Ф., Наумейко И.В.* Вопросы преобразования сигналов и согласования вычислительных систем с помощью кабельных каналов связи // Электронное математическое моделирование и оптимизация процессов. К., 1976. С. 98 - 104.

Харьковский государственный технический университет радиотехники

Поступила в редколлегию 25.04.97