

## УЧЕТ ПОТЕРЬ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ МЕТОДА МОД ДЛЯ АНАЛИЗА ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩИХ ДЛИННЫХ ЛИНИЙ

к.т.н. В.П. Самсонов, к.т.н. В.Г. Свистун  
(представил д.т.н., проф. А.И. Овчаренко)

Представлена методика учета потерь во взаимодействующих длинных линиях для случая, когда исходными данными для анализа взаимодействующих длинных линий являются матрицы погонных собственных и взаимных проводимостей и сопротивлений.

Постоянное повышение быстродействия ЭВМ влечет за собой повышение уровня перекрестных помех, а в разряд длинных линий попадают не только соединительные кабели, но и проводники печатных плат и даже чипов микросхем [1].

Поэтому в данном случае нельзя ограничиваться только учетом величин взаимных емкостей и индуктивностей, а необходимо рассматривать дорожку на печатной плате или соединитель в чипе микросхемы как линию с распределенными параметрами.

Наиболее эффективным методом анализа в настоящее время является метод волновых каналов (метод мод), основными достоинствами которого является наглядность и возможность сравнительно просто анализировать прохождение сигналов по линии при заданных схемах возбуждения и нагрузки [2, 3].

В большинстве случаев анализ перекрестных помех проводится для линий без потерь. При этом исходными данными для метода волновых каналов являются матрицы погонных емкостей и индуктивностей [4]. Но иногда необходимо оценить границу частотного диапазона в слабо связанных линиях, где потери в линиях по степени влияния на сигнал могут соперничать с перекрестными помехами. В этом случае в качестве исходных данных для метода волновых каналов удобно использовать матрицы погонных сопротивлений и проводимостей [3]. Матрицы погонных сопротивлений и проводимостей в общем случае являются комплексными, а величина их реальной части определяется потерями в линиях.

Методике определения реальной части этих матриц в литературе, посвященной методу волновых каналов, уделено очень мало внимания, поэтому данная статья посвящена методике определения потерь во взаимодействующих длинных линиях в виде, удобном для использования в методе волновых каналов.

Как известно взаимодействующие линии в установившемся гармо-

ническом режиме описываются системой телеграфных уравнений

$$\frac{d}{dx} \begin{vmatrix} \dot{U} \\ \dot{I} \end{vmatrix} = - \begin{vmatrix} \mathbf{0} & \underline{Z} \\ \underline{Y} & \mathbf{0} \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} \dot{U} \\ \dot{I} \end{vmatrix}, \quad (1)$$

где  $\dot{U}, \dot{I}$  - векторы напряжений и токов в линиях;  $\underline{Z}, \underline{Y}$  - матрицы сопротивлений и проводимостей. Матрицы  $\underline{Z}, \underline{Y}$  являются исходными для метода волновых каналов. Поэтому в дальнейшем под матрицами сопротивлений и проводимостей будем понимать именно эти матрицы.

Данная статья ограничивается рассмотрением только двух видов потерь – потерь в проводниках и потерь в диэлектриках, что вполне корректно при условии, что по линиям распространяются волны одного типа ТЕМ [5].

Рассмотрим учет потерь в проводниках. Как известно, сечение проводника при переменном токе используется не полностью из-за скин - эффекта. Поэтому активное сопротивление проводника будем определять, исходя из глубины проникновения тока. Под глубиной проникновения тока будем понимать расстояние от поверхности проводника по направлению к его центру, на котором плотность тока убывает в  $e$  раз, т.е. на 63,2% [1]. Для определения глубины проникновения используется выражение

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \cdot \mu \cdot \gamma}}, \quad (2)$$

где  $\omega = 2\pi f$ ;  $f$  - частота волны, распространяющейся по проводнику;  $\mu$  - магнитная проницаемость материала;  $\gamma$  - удельная электрическая проводимость материала.

Зная толщину скин - слоя, можно рассчитать активное сопротивление проводника для данной частоты. Для печатной дорожки (рис.1) вы-

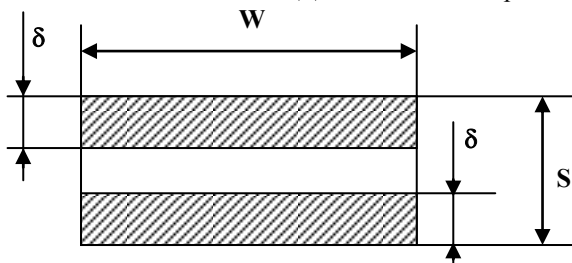


Рис.1. Печатная дорожка

ражение для активного сопротивления будет иметь вид

$$R = \frac{l \cdot \rho}{2 \cdot \delta \cdot w}, \quad (3)$$

где  $l$  - длина дорожки;  $\rho$  - удельная проводимость материала дорожки;  $\delta$  - толщина скин - слоя;  $w$  - ширина дорожки.

Боковым скин - слоем мы пренебрегаем, так как  $w \gg s$ .

Для медной полоски

$$R_{\text{меди}} = 1,28 \cdot 10^{-7} \frac{l}{w} \cdot \sqrt{f} . \quad (4)$$

Выражение (4) дает величину реальной части элементов матрицы  $\underline{Z}$ .

В диэлектрике причиной возникновения потерь является наличие трения при его поляризации под действием переменного электрического поля. Учет потерь в диэлектрике производится исходя из тангенса угла потерь (угла поглощения энергии). График зависимости тангенса угла потерь  $\delta$  от частоты изображен на рис. 2. В нашем эксперименте используется только участок вышеприведенной кривой в ограниченном частотном диапазоне. Для большей конкретизации будем использовать зависимость  $\text{tg}\delta(f)$ , которая более характерна для высоко-глиноземной керамики (рис.3).

Как известно, в реальном конденсаторе  $\phi$  - угол, на который ток

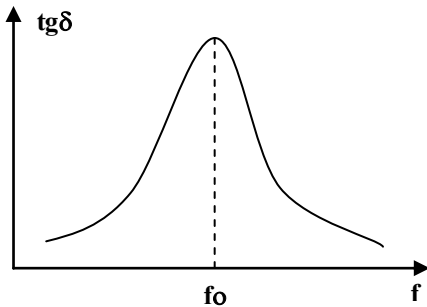


Рис.2. Зависимость  $\delta$  от частоты

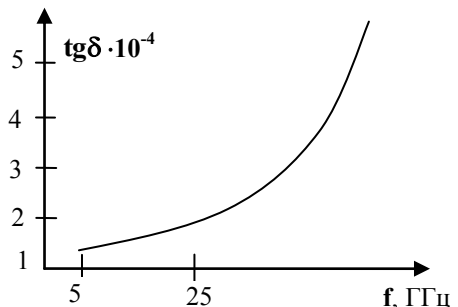


Рис. 3. Зависимость  $\text{tg}\delta(f)$

смещения опережает напряженность электрического поля, всегда меньше  $90^\circ$ . Поэтому энергия, рассеиваемая в единице объема диэлектрика, будет отлична от нуля и определяется выражением

$$P = \omega \epsilon E^2 \cos\phi . \quad (5)$$

Угол, равный разности между  $90^\circ$  и углом  $\phi$ , будем называть углом поглощения или углом потерь. Обозначим этот угол  $\gamma$ , тогда

$$\cos\phi = \sin\gamma .$$

При малых углах  $\sin\gamma = \text{tg}\delta$ .

Рассмотрим модель реального конденсатора и соответствующую ему диаграмму проводимостей (рис.4.). Из векторной диаграммы получаем:

$$\underline{Y} = j\omega C + G ; \quad (6)$$

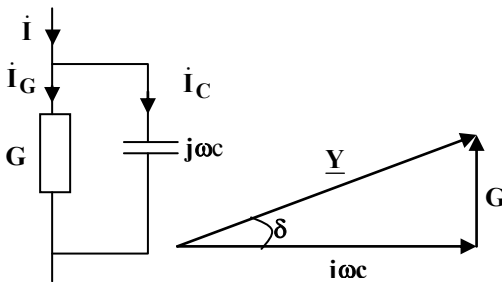


Рис.4. Модель и диаграмма проводимостей реального конденсатора

Из векторной диаграммы получаем:

$$G = \omega C \cdot \operatorname{tg} \delta . \quad (7)$$

Формируя матрицу  $\underline{Y}$  с помощью выражений (6) и (7), производим учет потерь в диэлектрике.

Для проведения численного эксперимента была выбрана линия, состоящая из двух параллельных дорожек, расположенных над заземленной плоскостью [5] (рис. 5, где  $W=0.5\text{мм}$ ,  $S=0.5\text{мм}$ ,  $h=0.25\text{мм}$ ,  $d=0.03\text{мм}$ ).

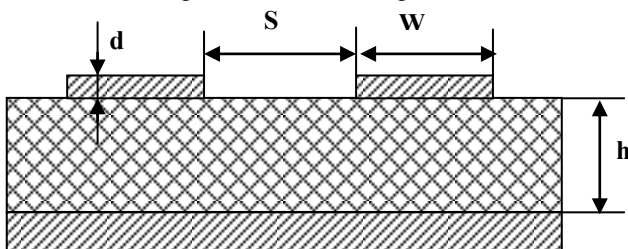


Рис. 5. Параметры эксперимента

При данных геометрических размерах и диэлектрической проницаемости  $\epsilon=5$  линии имеют следующие параметры:

собственные емкости линий  $C_0 = 1.9\text{пФ/см.}$ ; взаимные емкости линий  $C_{в0} = 1.4\text{пФ/см.}$ ; собственные индуктивности линий  $L_0 = 4.3\text{нГ/см.}$ ; взаимные индуктивности линий  $L_{в0} = 0.5\text{нГ/см.}$

Пусть длина линий  $l = 40\text{см}$ . К входам этих линий подключены одинаковые активные сопротивления  $R_{вх} = 1\text{Ком}$ , а выходы нагружены на одинаковые активные сопротивления  $R_{вых} = 100\text{ Ом}$ . При этом на вход одной из линий подается импульс вида, представленного на рис.6.

Скважность данного импульса  $Q = 2$ , а длительность фронта определяется из выражения

$$t_{\phi} = \frac{20}{f \cdot 128}, \quad (8)$$

где  $f$  - частота следования импульсов при численном эксперименте.

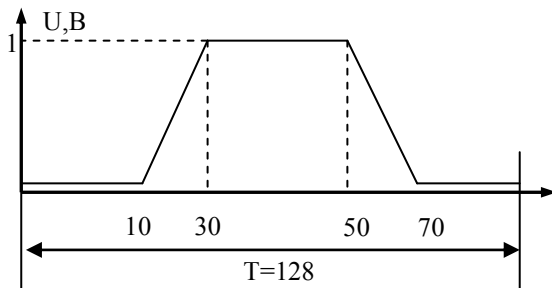


Рис. 6. Входной импульс

В ходе эксперимента выяснилось, что при частоте следования импульсов  $f = 30\text{МГц}$  и длительности фронта  $t_{\phi} = 5,2\text{нс}$ , амплитуда помехи достигает 12% от амплитуды сигнала, а картина сигналов одинакова как для линий с потерями, так и для линий без потерь. Дальнейшее увеличение частоты для данной линии с вышеприведенными нагрузками нецелесообразно, так как при более высоких частотах сигнал невозможно различить на фоне помех.

Чтобы определить частотную границу работоспособности слабо свя-

занных линий подобного типа, обусловленную потерями в проводниках

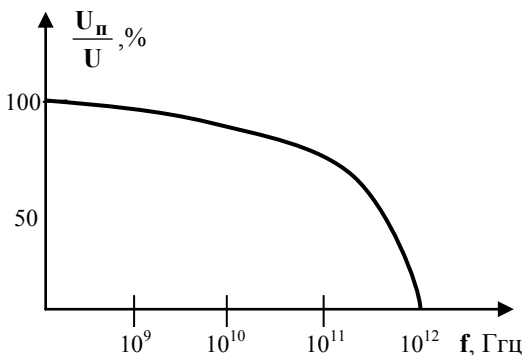


Рис. 7. Зависимость  $U_{п}/U$

и диэлектриках, взаимные связи линий были уменьшены на два порядка, а линии были согласованы. Оценка зависимости отношения напряжения в линии с потерями  $U_{п}$  к напряжению в линии без потерь  $U$  от частоты приведена на рис.7.

Исходя из полученных результатов, можно заключить, что для сильно связанных взаимодействующих линий (сильно связанные линии - линии у которых

собственные и взаимные величины матриц сопротивлений и проводимостей отличаются не более чем на порядок) производить учет потерь нецелесообразно, так как влияние взаимных связей и отражений в таких линиях проявляется гораздо раньше, чем влияние потерь.

Влияние потерь необходимо учитывать лишь в линиях, у которых собственные и взаимные величины отличаются более чем на порядок.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Глуханов Н.П. Физические основы высокочастотного нагрева. – Л.: Машиностроение, 1989. – 57 с.
2. Capacitance and Inductance Matrices of Coupled Lines From Modal Powers // IEEE Trans. Microwave Theory and Techn. – 1993. – Vol.41. – №1. – P. 146.
3. Костенко М.В., Перельман Л.С., Шкарин Ю.П. Волновые процессы и электрические помехи в многопроводных линиях высокого напряжения. – М.: Энергия, 1973. – 271 с.
4. Chang F.Y. Transient Analysis of LossLess Coupled Transmission Lines in a Nonhomogeneous Dielectric Medium // IEEE Trans. Microwave Theory and Techn. – 1993. – Vol.18., №9. – P. 616 - 627.
5. Чурин Ю.А. Переходные процессы в линиях связи быстродействующих ЭВМ. – М.: Сов. радио, 1975. – 208 с.

Поступила в редакцию 15.10.2001