

УДК.621.396.677

Д.А. Литвинов, Т.И. Давыдова

РАСЧЕТ ВХОДНОГО ИМПЕДАНСА ШИРОКОГО ПОЛОСКОВОГО ИЗЛУЧАТЕЛЯ МЕТОДОМ НАВОДИМЫХ ЭЛЕКТРОДВИЖУЩИХ СИЛ

Литвинов Дмитрий Анатольевич, окончил радиотехнический факультет Ульяновского государственного технического университета, аспирант при кафедре «Радиотехника» УлГТУ. Инженер-электроник ООО «ТАКАТА-ПЕТРИ Рус». Имеет статьи, изобретения в области антенных систем. [e-mail: litvinov_dmitry@mail.ru].

Давыдова Татьяна Ивановна, окончила радиотехнический факультет Ульяновского государственного технического университета. Заочный соискатель при кафедре БИУС ВМИРЭ им. А.С. Попова, г. Петергоф. Инженер-конструктор 1 категории ФНПЦ ОАО «НПО «Марс». Имеет статьи в области системного анализа и обработки информации. [e-mail: tasha_dav@inbox.ru].

Аннотация

В данной статье рассматриваются вопросы моделирования полосковых антенн. Приводится модель полоскового излучателя, использующая метод наводимых электродвижущих сил (ЭДС) и позволяющая рассчитывать полное входное сопротивление.

Ключевые слова: полосковый излучатель, входной импеданс антенны, метод наводимых ЭДС.

Dmitry Anatolyevich Litvinov, graduated from the Faculty of Radioengineering of Ulyanovsk State Technical University; post-graduate student at the chair 'Radioengineering' of Ulyanovsk State Technical University; electronics engineer at TAKATA-PETRI Rus, Ltd; author of articles, inventions in the field of antenna systems. e-mail: litvinov_dmitry@mail.ru.

Tatiana Ivanovna Davydova, graduated from the Faculty of Radioengineering of Ulyanovsk State Technical University; correspondence applicant at the Chair 'Combat Management Systems' of the Naval Radio-Electronics Academy named after A. Popov (Petergof); development engineer at FRPC 'OJSC 'RPA 'Mars'; author of articles in the field of system analysis and information processing. e-mail: tasha_dav@inbox.ru.

Abstract

The article deals with issues of stripline-antenna modeling and sets forth a model of stripline radiator, using a method of guided electromotive forces and enabling calculation of total input resistance.

Key words: stripline radiator, input impedance of antenna, method of guided electromotive forces.

ВВЕДЕНИЕ

Современную науку невозможно представить без широкого использования математического моделирования. Особенно важным является его применение при проектировании таких сложных устройств, какими являются современные антенные системы.

Наиболее точные математические модели, используемые для моделирования входного сопротивления полосковых антенн, основаны на составлении интегральных уравнений для токов и последующем их решении численными методами. Получаемая в этом случае математическая модель полосковой антенны может быть использована для расчета ее входного сопротивления с высокой точностью, которая может быть обеспечена только в том случае, если интегральное уравнение было составлено и решено в рамках строгой электромагнитной теории, т. е. с учетом свойств материалов и конструктивных особенностей антенны.

Но на практике и в существующих пакетах программ для моделирования электромагнитных задач использование таких строгих подходов сопряжено со значительными трудностями, связанными с большой громоздкостью и сложностью вычисляемых выражений. Это неизбежно приводит к значительному увеличению времени расчета и в ряде случаев к ограничениям, накладываемым на использование данной математической модели. Например, таким ограничениям, как частотный диапазон (X-диапазон) и размеры моделируемого устройства [1].

Задачей данной статьи является описание математической модели широкого полоскового излучателя, а также сравнительный, подтверждающий адекватность предлагаемой модели анализ результатов расчета входного сопротивления излучателя, основанного на данной модели, и данных, полученных экспериментально.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПОЛОСКОВОЙ АНТЕННЫ, ОСНОВАННАЯ НА МЕТОДЕ НАВОДИМЫХ ЭДС

Метод наводимых ЭДС для резонансных вибраторов является весьма эффективным средством вычисления входного сопротивления линейного вибратора или системы вибраторов, а также оценки взаимного влияния отдельных элементов антенного устройства друг на друга. Кроме того, он не имеет ограничений по частотному диапазону и неточностей, свойственных численным методам вычислений. Сопротивление резонансного вибратора, согласно этому методу, может быть вычислено по следующей формуле [2]:

$$Z_{12} = -\frac{2}{I_{n_1} I_{n_2} l} \int E_{z_{12}} I_z^* dz, \quad (1)$$

где $E_{z_{12}}$ – продольная составляющая напряженности электрического поля, создаваемая током второго вибратора у поверхности первого;

I_z^* – распределение тока вдоль первого вибратора, наведенное вторым вибратором;

l – длина вибратора;

$I_{n_1} = I_{n_2} = I_0 / \sin kl$ – амплитудное значение тока в пучности, где k – фазовая постоянная.

Так как полосковые антенны являются резонансными, закон распределения тока по излучателю также может быть принят синусоидальным. Но за счет влияния диэлектрической подложки он будет отличаться от закона распределения по проволочному вибратору, расположенному в свободном пространстве.

Согласно [3], взаимные сопротивления полосковых вибраторов можно вычислить методом наводимых ЭДС по следующей формуле:

$$Z_{\text{вз}} = -j \frac{2\rho_0 k_0^2}{\pi^2 \sin(k_0 l)} \int_{-\infty}^{+\infty} \int \left(\frac{\sin(x_2 b)}{x_2 b} \right)^2 \times \\ \times \left(\frac{\cos(x_1 l) - \cos(k_0 l)}{k_0^2 - x_1^2} \right)^2 \times \\ \times \left(\frac{x_1^2 \gamma^2 \epsilon_r}{\epsilon_r \gamma + \gamma_1 + th(h\gamma_1)} - \frac{x_2^2 k_0^2}{\gamma + \gamma_1 cth(h\gamma_1)} \right) \times \\ \times \frac{e^{-jx_2 d}}{(x_1^2 + x_2^2)} dx_1 dx_2; \quad (2)$$

где $2l$ – длина элемента;

$2b$ – ширина элемента;

h – толщина подложки;

x_1 и x_2 – переменные интегрирования;

$$\gamma = \sqrt{x_1^2 + x_2^2 - k_0^2};$$

$$\gamma_1 = \sqrt{x_1^2 + x_2^2 - k_1^2};$$

$k_1 = k_0 \sqrt{\epsilon_r}$ – постоянная распространения в подложке с диэлектрической проницаемостью ϵ_r ;

k_0 – постоянная распространения;

d – расстояние между излучателями;

ρ_0 – волновое сопротивление свободного пространства.

Считается, что ток в вибраторах задан в виде:

$$I_z = I_0 \frac{1}{2b} I(x) I(y) \delta(z - 0),$$

$$\text{где } I(x) = \frac{\sin[k_0(l - |x|)]}{\sin(k_0 l)}, \quad -1 \leq x \leq 1,$$

$$I(y) = 1, \quad d - b \leq y \leq d + b;$$

I_0 – комплексная амплитуда тока в вибраторе;

δ – угол потерь в диэлектрике;

$|x|$ – абсолютное значение координаты x , отсчитываемой от середины вибратора.

Толщина полоскового проводника не учитывается. Выражение получено в строгой электродинамической постановке задачи, учитывающей возникновение в подложке поверхностных волн типа H и E . Толщина подложки h и относительная диэлектрическая проницаемость ϵ_r определяют число поверхностных волн.

Исходя из [2, 4], зная выражение для $Z_{\text{вз}}$ двух идентичных параллельных вибраторов и уменьшая расстояние d между ними до значения половины ширины b , мы определим входное сопротивление уединенного вибратора или собственное сопротивление вибратора:

$$Z_{\text{соб}} = \lim_{d \rightarrow b} Z_{\text{вз}}.$$

Данная математическая модель также может быть использована для полосковых антенн с широким излучающим элементом, например, прямоугольной полосковой антенны. Для этого необходимо рассматривать излучатель с точки зрения токов, текущих по его поверхности.

Из теории полосковых антенн известно, что токи по излучателю текут по его кромкам [5]. Воспользовавшись этим, можно принять эти токи за воображаемые вибраторы и рассчитать их входные сопротивления. Причем выбираются токи, текущие по большим краям излучателя. Эти токи выбираются исходя из того, что тангенциальные составляющие полей у больших краев синфазны и формируют в поперечном направлении максимум излучения. А так как при расчете методом наводимых ЭДС учитывается именно тангенциальная составляющая поля, то при определении входного сопротивления полоскового излучателя необходимо принимать в расчет именно эти два тока, текущих по большим краям.

Так как длина прямоугольной антенны примерно равна $\lambda/2$, необходимо рассматривать полуволновые вибраторы. Сопротивление этих воображаемых вибраторов рассчитывается согласно рассмотренной математической модели по методу наводимых ЭДС, по формуле (2). Теоретически ширина воображаемых вибраторов должна стремиться к нулю, но на практике она принимается на порядок меньшей, чем длина вибратора.

После вычисления их входного сопротивления необходимо найти общее сопротивление излучателя. Общее со-

противление будет вычисляться исходя из взаимного расположения этих вибраторов (расстояния между ними) и в точке, расположенной в центре излучателя, может быть рассчитано как параллельное соединение входных сопротивлений этих воображаемых вибраторов в этой точке (рис. 1).

Сопротивление каждого из вибраторов в центре излучателя может быть вычислено по формуле для расчета сопротивления линии передач, с учетом расстояния от края излучателя до его центра. Зная сопротивление каждого вибратора в точке, находящейся в центре излучателя, можно рассчитать входное сопротивление антенны в данной точке как равное сопротивлению параллельного соединения сопротивлений этих двух вибраторов в этой точке, а затем при необходимости можно пересчитать сопротивление для точки подвода питания.

Сопротивление вибратора в центре излучателя может быть вычислено исходя из положений для расчета сопротивлений по методу длинных линий. Для этого необходимо знать характеристическое сопротивление полосковой линии. Характеристическое сопротивление полоскового излучателя (для перерасчета сопротивления излучателя к точке питания) может быть рассчитано по следующей формуле:

$$Z_0 = \frac{300}{\left(1 + \frac{w}{h}\right) \sqrt{\epsilon_r}}, \quad (3)$$

где w – ширина полосковой линии;

h – высота подложки;

ϵ_r – диэлектрическая проницаемость.

Таким образом, для вычисления сопротивления вибратора в центре полоска величина w будет равна длине излучателя L , а для пересчета сопротивления к точке подвода питания ширине излучателя W [1].

Численные результаты

Численные результаты моделирования полосковой антенны с прямоугольным излучателем приведены на рисунке 2 и представляют собой графики зависимости активной

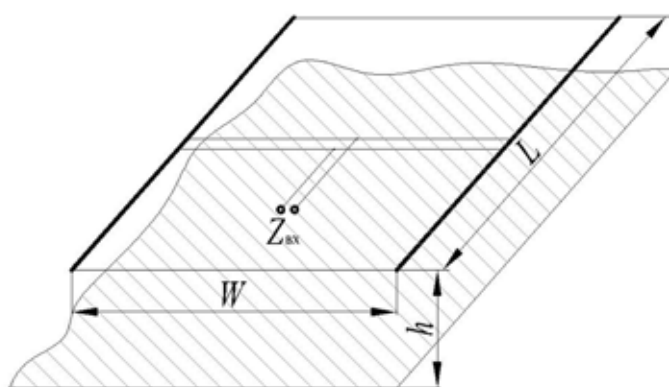


Рис. 1. Модель прямоугольной антенны

и реактивной частей входного импеданса от частоты.

Конструкция антенны имеет следующие характеристики: диэлектрическая проницаемость подложки $\epsilon_r = 2,2$; высота подложки $h = 0,8$ мм; ширина излучателя $W = 6$ мм; длина излучателя $L = 13$ мм.

Также на рисунке 2 показаны данные, полученные экспериментально при помощи измерения входного импеданса образца полосковой антенны с теми же параметрами конструкции на измерительной линии Р1-25, которая предназначена для измерения параметров СВЧ-устройств (в том числе полного входного сопротивления). Как и при теоретических расчетах, исследуемый экспериментально образец антенны имеет запитку в центре излучателя. Измерения производились по методике, изложенной в руководстве на измерительную линию. Согласно этой методике, на разных частотах производились измерения коэффициента стоячей волны (КСВ) и фазового угла коэффициента отражения. По соответствующим формулам находились активные и реактивные составляющие входного импеданса исследуемой антенны на каждой частоте, а затем строились графики [6].

Сравнение данных, полученных экспериментально и с использованием описанной математической модели, показывает высокую степень соответствия результатов: отличие активной части входного сопротивления составля-

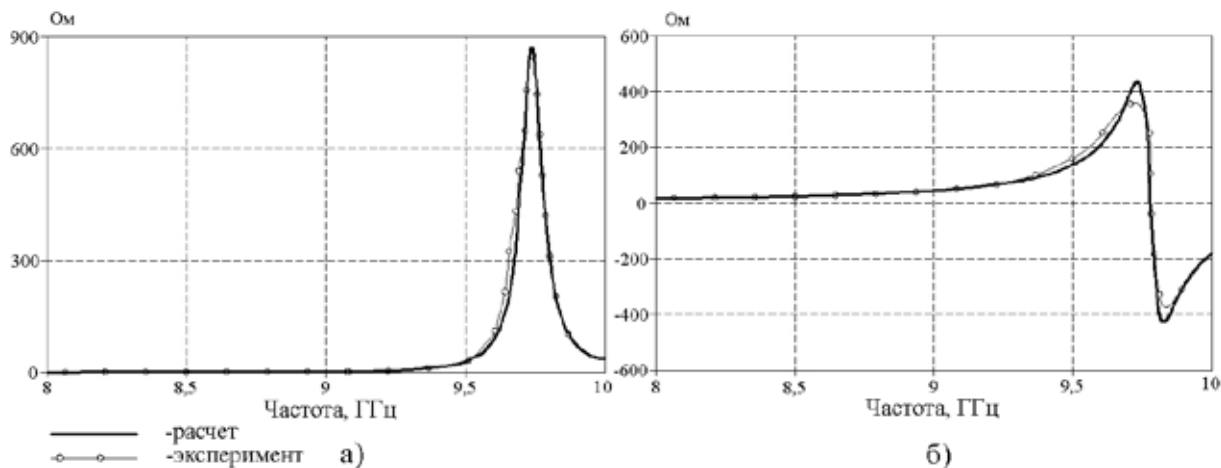


Рис. 2. Активная (а) и реактивная (б) составляющие входного импеданса

ет не более 5%, а реактивной – не более 10%.

Для сравнения и оценки точности полученных данных был произведен расчет входного сопротивления исследуемой полосковой антенны на специализированной программе CST Microwave Studio, являющейся одной из самых распространенных программ для расчета параметров СВЧ-структур (рис. 3). Характеристики модели антенны, построенной в программе, максимально приближены к реальным: учитываются потери в диэлектрике (тангенс угла диэлектрических потерь 0,0009), заданы конечные размеры подложки, а также свойства металла (меди), из которого состоят металлические части конструкции. В остальном конструкция антенны имеет те же характеристики, что и реальный исследуемый образец [7].

Отличие от экспериментальных данных составило: по активной части входного сопротивления не более 6%, по реактивной – не более 30%, что явилось подтверждением точности предлагаемой математической модели расчета входного сопротивления полосковых антенн, основанной на методе наводимых ЭДС.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенная в данной статье математическая модель полосковых антенн с широким излучающим элементом может быть использована при инженерных расчетах для повышения точности оценки реактивной составляющей входного сопротивления, как наиболее точная из простых и нетрудоемких методов расчета. Точность результатов расчета входного импеданса при применении предложенной математической модели на 20% выше, чем при использовании существующих программ для моделирования полосковых антенн, основанных на численных методах при вычислениях.

Предложенный способ может применяться как для расчета входного сопротивления одиночной антенны, состоящей из одного излучателя, так и для излучателя, входящего в состав антенной решетки. Для этого используется предложенная математическая модель и известный метод наводимых ЭДС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Марков Г.Т., Сазонов Д.М. Антенны : учебник для студентов радиотехн. специальностей вузов. – М. : Энергия, 1975 – 528 с.
2. Лавров Г.А. Взаимное влияние линейных вибраторных антенн. – М. : Связь, 1975. – 128 с.
3. Веселов Г.И. Микроэлектронные устройства СВЧ : учеб. пособие для радиотехн. специальностей вузов. – М. : Высш. шк., 1988. – 280 с.
4. Литвинов Д.А. Математическая модель полоскового вибратора // Электронная техника : сб. науч. тр. –

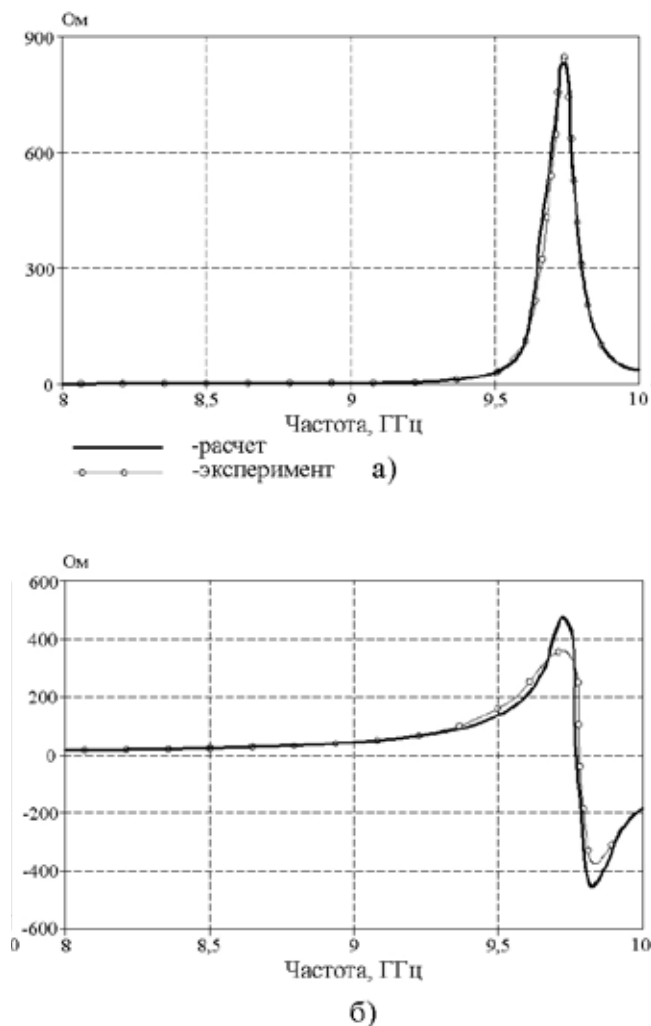


Рис. 3. Активная (а) и реактивная (б) составляющие входного импеданса, полученные в программе CST Microwave Studio

Ульяновск : УлГТУ, 2007. – С. 42–45.

5. Литвинов Д.А. Оценка применимости метода наводимых ЭДС для расчета импеданса полосковых антенн // Современные проблемы радиоэлектроники : сб. науч. ст. – Красноярск : Сибирский федеральный ун-т; Политехнический ин-т, 2007. – С. 231–232.
6. Литвинов Д.А. Математическое моделирование входного сопротивления полосковых антенн // Математическое моделирование, обратные задачи, информационно-вычислительные технологии : сб. ст. VII-й межд. научн.-техн. конф. – Пенза : РИО ПГСХА, 2007. – С. 11–13.