

ЭКВИВАЛЕНТНАЯ СХЕМА, МОДЕЛИРУЮЩАЯ ВХОДНОЙ ИМПЕДАНС БИКОНИЧЕСКОЙ АНТЕННЫ

Макурин М.Н., Кирьяшкин В.В., Чубинский Н.П.

Московский физико-технический институт (Государственный университет)

nchub@mail.mipt.ru

Предложена простая эквивалентная физически реализуемая схема, моделирующая частотные зависимости действительной и мнимой компонент входного импеданса биконической антенны любых электрических размеров, используемых в практических приложениях. Полученные результаты для широкого набора углов раскрыва конических элементов симметричного биконуса убедительно совпадают как со строгими расчетами возбуждения биконических структур, так и с экспериментальными данными.

Биконические антенны (прототип толстого диполя) являются чрезвычайно широкополосными и имеют более чем столетнюю историю. В патенте Оливера Лоджа появилось первое упоминание о биконических антеннах, как излучателях с очень короткой переходной характеристикой [1]. На заре радиотехники, когда отсутствовали когерентные источники электрических колебаний, возбуждение излучающих антенн осуществлялось короткими импульсами (Герц, Попов и др.). Приём сигналов проводился на аналогичные антенны. В тот период не было строгой теории антенн, как устройств для преобразования нестационарного электрического тока в соответствующее электромагнитное поле, а так же для обратного преобразования поля в электрический сигнал. Только после того, как радиотехника прошла главные этапы становления когерентных, то есть относительно узкополосных, систем радиосвязи, радиолокации и радионавигации, возник интерес к широкополосным системам. Он был обусловлен насущными потребностями увеличения разрешающей способности радиолокаторов, увеличением пропускной способности информационных каналов и другими задачами. Мощный толчок к развитию данного направления дали многочисленные монографии и статьи Хармута [2, 3], который стал его талантливым пропагандистом. Первые два десятка лет после опубликования основных работ его цитировали практически все авторы, серьёзно занимающиеся задачами импульсных сверхширокополосных (СШП) систем радиосвязи и локации. В его работах озвучено много новых идей для специалистов, воспитанных в период полной монополии узкополосных радиосистем. Но для получения компактных и легко обозримых физических формул, подтверждающих эти идеи, автор часто пользуется оценочными соотношениями, не всегда соблюдая границы их применимости. В частности, это касается области антенн, которые являются важнейшими элементами при реализации СШП радиолоний. Очевидно, что такие антенны должны быть сверхширокополосными, то есть иметь рабочий диапазон частот более октавы. Среди многочисленных разновидностей таких антенн большинство из них (логопериодические, рупорные и т.п.) вносят дисперсионные искажения, обусловленные нелинейностью их фазовых характеристик. Практически идеальной антенной для излучения (приёма) СШП импульсов является биконическая антенна, относительный частотный диапазон которой близок к десяти, а её фазовая характеристика является линейной. Этим и обусловлена новая волна интереса к данной антенне.

При разработке СШП систем необходимо знать форму излучаемого импульса электромагнитного поля, поскольку последняя радикально отличается от формы возбуждающего электрического сигнала на входе антенны. В этом случае удобно прибегать к моделированию, что можно сделать прямо во временной области, например, методом FDTD. К сожалению, для данного метода и родственных ему методов конечных элементов, размеры области, в которой может быть получено решение невелики. Они не превышают единиц длин волн, что ограничивает их использование. Поэтому создание широкополосной эквивалентной

схемы, описывающей входной импеданс излучающей антенны, является весьма актуальным при обработке формы излучаемого импульса.

В данной работе, на основе строгого решения внутренней задачи о возбуждении биконической антенны [4], предлагается простая эквивалентная схема, моделирующая частотные зависимости её входного импеданса в широкой области электрических параметров для широкого набора углов раскрыва θ_0 конических элементов. Они охватывают диапазон от очень тонкого биконуса, близкого по параметрам к тонкому диполю, до сферического излучателя с узкой щелью между полусферическими элементами. Для диполей существует несколько вариантов эквивалентных схем, в основном описывающих частотную область электрически коротких излучателей [5]. Некоторые синтезированные схемы удовлетворительно работают вплоть до первого (полуволновой диполь) и даже до второго резонансов (волновой диполь). Причём для адекватного описания входного импеданса необходимо было тщательно подбирать волновое сопротивление плеч диполя. Этот важный параметр, повсеместно используемый для расчетов параметров дипольных антенн, конечно удобен, но имеет несколько условный характер, поскольку зависит от физической длины проводников. Он был введён Щелкуновым [6] на основании сравнения тонкой биконической антенны и диполя с цилиндрическими проводниками.

Идея создания широкополосной эквивалентной схемы для описания входного импеданса биконуса, которая по-видимому может быть распространена на многие типы антенн бегущей волны, основана на строгом определении их волнового сопротивления и его независимости от частоты. Это свойственно системам с ТЕМ волнами. Другая важная деталь, обнаруженная при расчётах входного импеданса биконуса, связана с тем, что его электрическое укорочение не увеличивается монотонно по мере роста угла раскрыва (толщины биконуса), как это было принято ранее для дипольных антенн, а имеет пологий минимум при среднем угле раскрыва около 45° [МЧ]. Именно здесь наблюдается максимальная относительная широкополосность биконуса, а его волновое сопротивление лежит в пределах 50...100 Ом. Электрическое укорочение в линиях с ТЕМ волнами обусловлено краевой ёмкостью, которая и была рассчитана для ряда углов раскрыва θ_0 . В Таблице даны значения электрической длины образующей $k_1 r_0 = k_1 a$ при первом резонансе (мнимая часть входного импеданса переходит через ноль). Электрическое укорочение, определённое предлагаемым соотношением

$$\Delta(\theta_0) = \pi/2 - k_1 a \approx 0,75\sqrt{\text{Sin}2\theta_0}, \quad (1)$$

Таблица

θ_0	(0)	1°	5°	10°	20°	30°	45°	60°	70°	80°	(90°)
θ_0 , рад	(0)	0,0175	0,087	0,175	0,349	0,524	0,785	1,05	1,22	1,40	(1,57)
$k_1 r_0$	(1,57)	1,28	1,14	1,0	0,9	0,84	0,82	0,83	0,89	1,0	(1,57)
$(k_1 r_0)_{\text{эKB}}$	1,571	1,246	1,085	0,996	0,899	0,847	0,827	0,847	0,899	0,996	1,571

даёт значения эквивалентной электрической длины при первом резонансе, которые приведены в нижней строке Таблицы. Они хорошо согласуются с результатами расчётов.

При создании эквивалентной схемы биконической антенны мы исходили из того, что она является типичным примером излучателей бегущей волны, и поэтому в неё должна входить волноведущая однородная линия с фиксированным волновым сопротивлением. Для биконуса оно выражается простым выражением:

$$Z_{0Б}(\theta_0) = 120 \ln(\text{ctg } \theta_0/2). \quad (2)$$

Кроме того, биконус представляет собой «толстый» диполь, который электрически разомкнут по постоянному току. Именно поэтому для моделирования входного импеданса электрически коротких диполей выбран отрезок разомкнутой линии. Тогда в электрическую схему необходимо ввести ёмкостной элемент последовательно с активным, определяющим излучённую мощность. На Рис. 1 приведена предлагаемая эквивалентная схема. Источник

сигнала с волновым сопротивлением Z_0 нагружен на входной импеданс моделирующей схемы $\bar{Z}_{ex}(\theta_0, ka) \Big|_{kr=0} = R_{ex} + jX_{ex}$ ($k = 2\pi/\lambda$ – волновое число). Нагрузкой биконической линии является

$$\bar{Z}_H(ka, \theta_0) = Z_{0Б}(\theta_0)th^2(ka) - j \left[Z_{0Б}(\theta_0) \frac{k_1 a}{ka} tg\Delta(\theta_0) \right]. \quad (3)$$

В первом слагаемом (Рис. 1б) $Re[\bar{Z}_H(ka, \theta_0)] = R_H$ сомножитель $th^2(ka)$ даёт хорошо согласующиеся с расчётами и экспериментами и физически корректное описание активной составляющей входного импеданса биконуса в широком диапазоне электрических длин, а так же для любых углов раскрыва. Реактивная компонента X_H содержит сомножитель $k_1 a/ka$, который обеспечивает правильную частотную зависимость реактивной составляющей ёмкостного типа, обусловленную краевой ёмкостью.

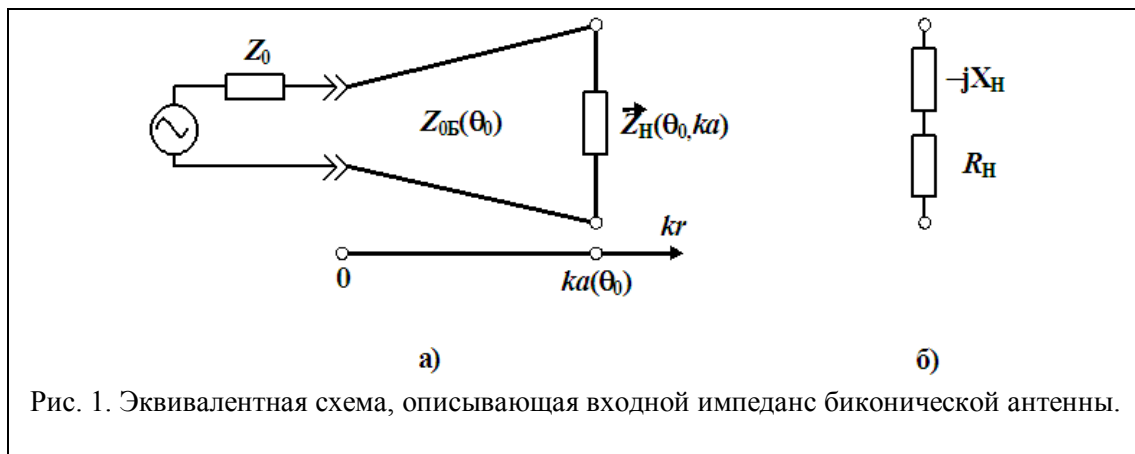


Рис. 1. Эквивалентная схема, описывающая входной импеданс биконической антенны.

Тогда входной импеданс легко получить пересчётом импеданса нагрузки на вход биконуса:

$$\bar{Z}_{ex}(\theta_0, ka) \Big|_{kr=0} = Z_{0Б}(\theta_0) \frac{\bar{Z}_H(ka, \theta_0) + jZ_{0Б}(\theta_0)tg(ka)}{Z_{0Б}(\theta_0) + j\bar{Z}_H(ka, \theta_0)tg(ka)}. \quad (4)$$

Ниже приведены примеры расчётов входного импеданса симметричного биконуса методом частичных областей (сплошные линии) и по формуле (4) на основании предложенной на Рис. 1а эквивалентной схемы (пунктирные линии) для нескольких углов раскрыва. На Рис. 2 результаты относятся к углу раскрыва $\theta_0 = 1^\circ$, что соответствует тонким диполям. Наблюдается хорошее качественное и количественное соответствие между результатами точного расчёта в стократном диапазоне длин волн. На Рис. 3 приведены частотные зависимости компонент входного импеданса толстого биконуса, обладающего максимальной широкополосностью при возбуждении от источника с волновым сопротивлением около 106 Ом. Область, где $KCB \leq 2$ лежит при $ka \geq 1$. На Рис. 4 приведены аналогичные зависимости для очень толстого биконуса, близкого к сфероидальному вибратору. На последних двух рисунках качественное и количественное соответствие результатов строгих расчётов и результатов, полученных с использованием модельного соотношения (4), так же убедительны.

Выводы

1. Основным результатом является физически обоснованная эквивалентная схема и аналитическая формула, описывающие частотные зависимости входного импеданса симметричной биконической антенны для любых углов раскрыва и практически в

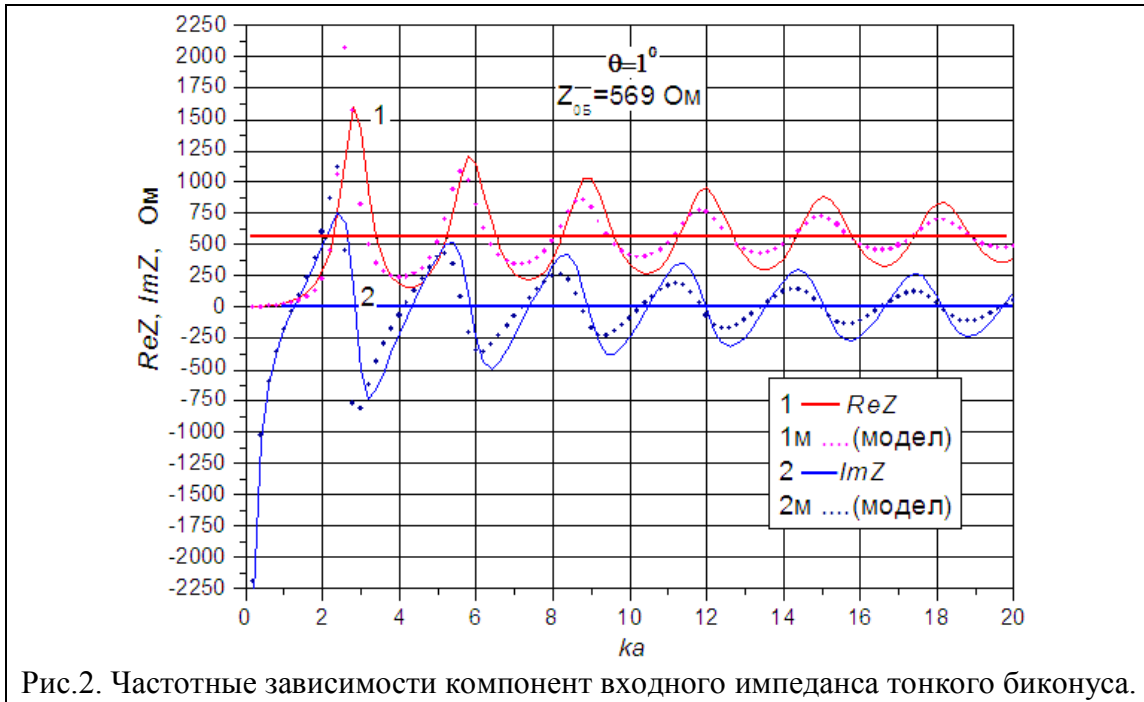


Рис.2. Частотные зависимости компонент входного импеданса тонкого биконуса.

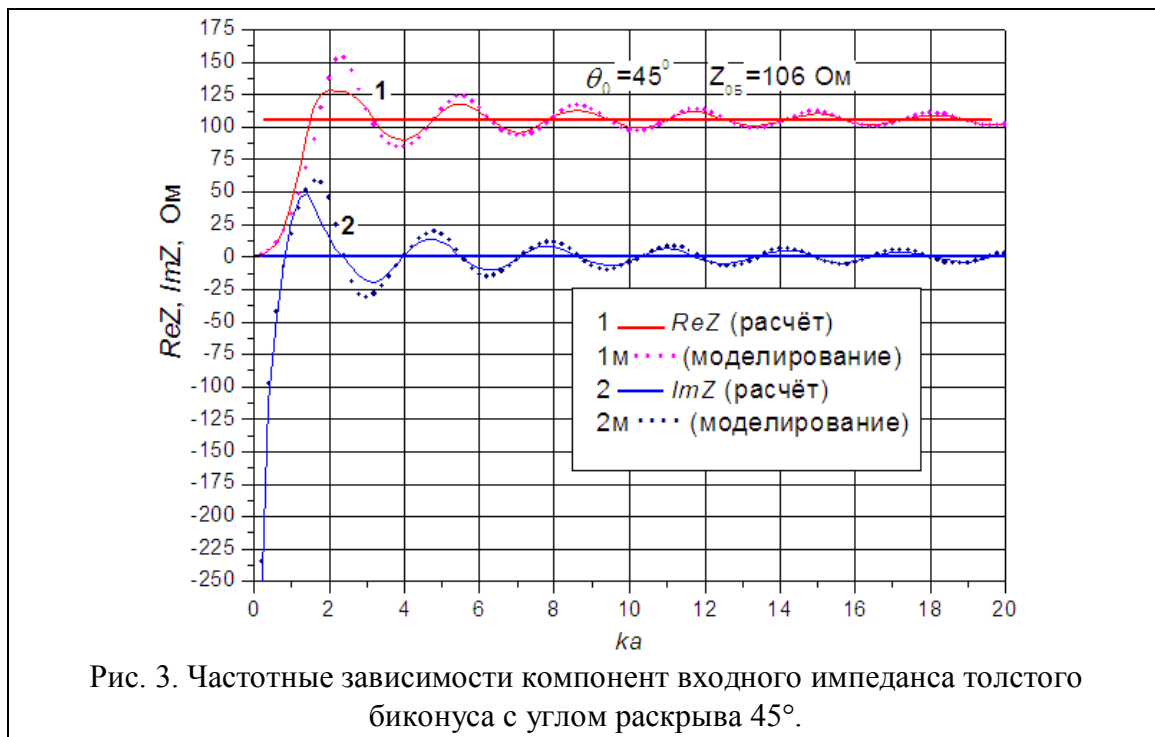
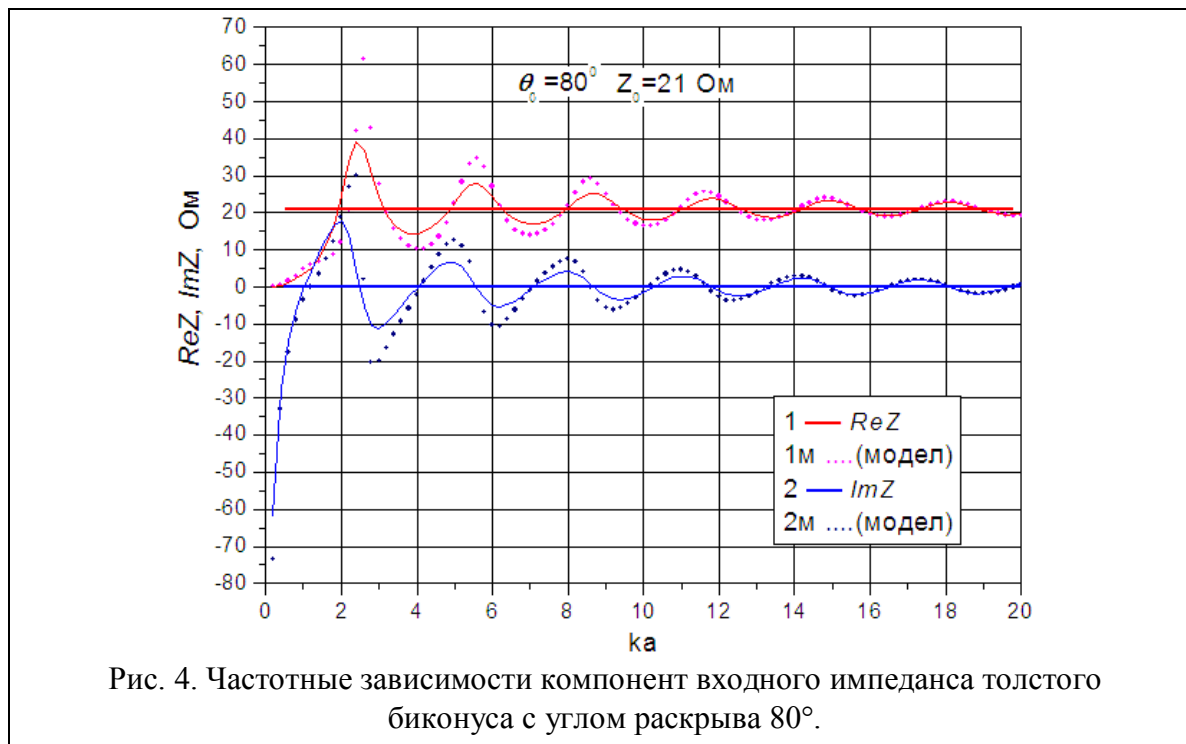


Рис. 3. Частотные зависимости компонент входного импеданса толстого биконуса с углом раскрыва 45° .

неограниченном частотном диапазоне. Верхний предел, естественно, существует, он связан с электрическими размерами неоднородности в области возбуждения биконуса через коаксиальную линию.

2. Для наиболее интересного диапазона углов раскрыва от 40° до 60° , где волновое сопротивление биконуса близко к стандартным значениям коаксиальных линий, близость модельных расчётов результатам строгого анализа и экспериментам наибольшая. Она выражается в удивительно точном расположении на оси частот (электрических длин) нулей реактивной составляющей входного импеданса и их строгой периодичности. Последнее гарантирует малость или даже отсутствие дисперсионных искажений у данной



антенны в широчайшем диапазоне частот.

3. Опыт данной работы показывает, что подобные эквивалентные схемы могут быть успешно реализованы и для других типов антенн, относящихся к классу антенн бегущей волны (дисконусной, дипольной, V-антенны, ТЕМ-рупора и т.п.).
4. Наибольшее расхождение модельных результатов с опытными данными для тонких и очень толстых биконусов выражается с одной стороны в смещении точек перехода реактанса антенны через ноль. Для тонкого биконуса это наблюдается в интервале электрических длин выше первого резонанса ($ka \approx 2,5 \dots 17$), но не превышает 0,25. Кроме того, у использованной эквивалентной схемы степень затухания осцилляций активной и реактивной компонент входного импеданса для тонких вибраторов завышена, а для толстых – занижена. Опыт показал, что для определенных диапазонов углов можно ввести корректирующие коэффициенты, регулирующие степень указанного затухания и амплитуд осцилляций, позволяющие приблизить модельные результаты к опытным. По-видимому, это позволит создать достаточно строгую формулу для описания входного импеданса классических тонких диполей. Тем более, что практически используемый диапазон электрических длин таких антенн не превышает одной-двух волн.

ЛИТЕРАТУРА

1. Lodge O. Electric telegraphy. US Patent 609,154. August 16, 1898
2. Harmuth H.F., Ding-Rong S. Antennas for nonsinusoidal waves: 1 – Radiators // IEEE Trans. on Electromagnetic Compatibility, vol. EMC-25, nb 1, February 1983, pp 13-24
3. Хармут Х.Ф. Несинусоидальные волны в радиолокации и связи. Пер. с англ. – М.: Радио и связь, 1985. – 376 с.
4. Макурин М. Н., Чубинский Н. П. Расчет характеристик биконической антенны методом частичных областей. // РЭ. 2007. Т. 52. №10. С. 1199.
5. Айзенберг Г.З., Белоусов С.П., Журбенко Э.М. и др. Коротковолновые антенны. – М.: Радио и связь, 1985.
6. Щелкунов С.А., Фриис Г. Антенны. Пер. с англ. Под ред. Л.Д. Бахраха. – М.: Сов. радио, 1955. – 604 с.