

**А. А. Кужелев, В. Е. Пониматкин
С. Г. Шпилевая, А. А. Попов**

К ВОПРОСУ ОБ УВЕЛИЧЕНИИ ДИАПАЗОННЫХ СВОЙСТВ НЕСИММЕТРИЧНОГО ВИБРАТОРА

95

Работа относится к области прикладной электродинамики и посвящена усовершенствованию антенно-фидерных устройств средств связи. Сделана попытка обосновать один из способов расширения диапазонных свойств коротковолновой штыревой антенны за счет создания условий постоянства волнового сопротивления вдоль антенны. Предложена физическая модель несимметричного вибратора, позволяющая определить комплекс мер, необходимых для получения конструкции антенны с улучшенными диапазонными свойствами. Рассмотрены вопросы экспериментальной оценки влияния генератора электродвижущей силы на емкостную и индуктивную составляющие антенной системы.

The work relates to the field of applied electrodynamics and is devoted to improving antenna-feeder devices of communication means. The article attempts to justify one of the ways to expand the range properties of a short-wave pin antenna by creating conditions for constant wave resistance along the antenna. The authors propose a physical model of an asymmetric vibrator that allows us to determine the set of measures necessary to obtain an antenna design with improved range properties. The questions of experimental evaluation of the effects of the electromotive force generator on the capacitive and inductive components of the antenna system are considered.

Ключевые слова: штыревая антенна, диапазонные свойства, волновое сопротивление, диаграмма направленности, физическая модель антенны, межвитковая емкость, погонное индуктивное сопротивление.

Keywords: pin antenna, range properties, wave resistance, directional diagram, physical model of the antenna, inter-turn capacitance, linear inductive resistance.

Системы связи, работающие в коротковолновом диапазоне радиочастотного спектра, повсеместно используют в качестве антенн вертикальные несимметричные вибраторы различных конструкций [1]. Модельное представление простейшего несимметричного вибратора удобно пояснить схемой, изображенной на рисунке 1.

Существующие модификации несимметричного вибратора приведены на рисунке 2.

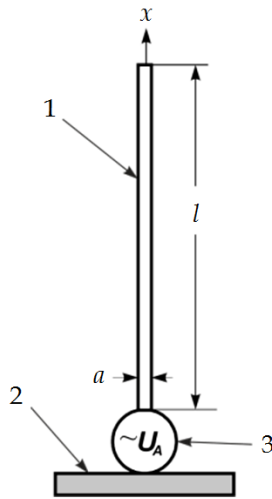


Рис. 1. Модельное представление несимметричного вибратора:
1 – излучающая часть; 2 – заземлитель; 3 – генератор электродвижущей силы (ЭДС)

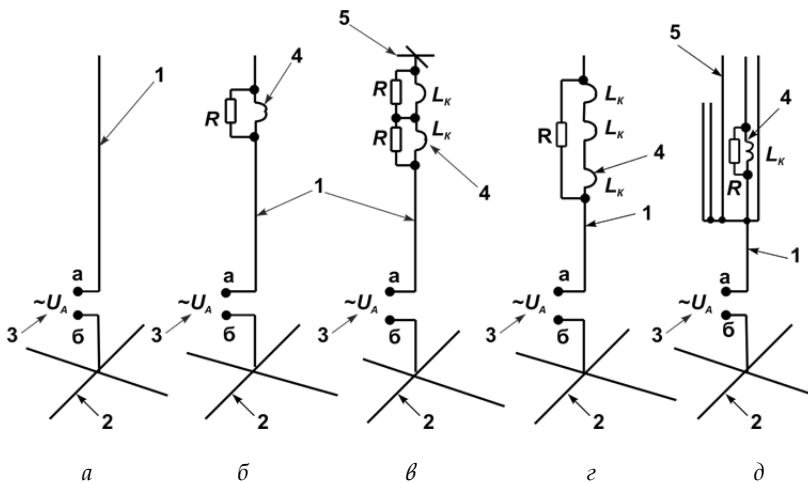


Рис. 2. Различные варианты конструктивного исполнения штыревой антенны в виде несимметричного вибратора:
1 – излучающая часть; 2 – заземлитель; 3 – генератор электродвижущей силы (ЭДС);
4 – сосредоточенная индуктивность; 5 – емкостная нагрузка

Основное отличие конструкций, изображенных на рисунке 2, б – д, от стандартной модели (рис. 2, а), заключается в использовании различного количества включенных сосредоточенно индуктивностей, а также емкостных штырей на конце антенны: б – несимметричный вибратор с RL-включением; в – несимметричный вибратор с двойным RL-включением и емкостной нагрузкой; г – несимметричный вибратор с тремя индуктивными элементами; д – несимметричная многовибраторная



антенна. При этом генератор ЭДС возбуждает ток в антенне, где элементами для настройки на заданный диапазон частот могут являться сосредоточенно включенные индуктивность и емкость [2].

Включение индуктивностей в качестве неоднородностей в электрическую схему вертикального несимметричного вибратора количеством более трех нецелесообразно [3]. Обосновано это тем, что суммарная индуктивность повышает активное сопротивление провода и, как следствие, уменьшает величину тока в антенне.

В системах радиосвязи несимметричный вибратор нашел широкое применение ввиду своих важных качеств: надежности и простоты изготовления [4; 5]. Однако по диапазоновым свойствам вибратор относят к слабо диапазоновым антеннам. Для увеличения диапазоновых свойств антенны $2\Delta f$ применяют различные способы [6; 7], которые вытекают логически из выражения для оценки этих свойств:

$$2\Delta f = \frac{\pi}{4} \cdot f_0 \cdot \frac{R_A}{W_A}, \quad (1)$$

где f_0 – резонансная частота антенны, которая соответствует режиму собственной длины вибратора ($\ell = \lambda / 4$); R_A – активное входное сопротивление антенны; W_A – волновое сопротивление антенны $W_A = \sqrt{L_A / C_A}$.

Анализ выражения (1) показал, что увеличить диапазоновые свойства возможно при помощи следующих действий:

- увеличением активного сопротивления антенны R_A или увеличением потерь в антенне;
- уменьшением волнового сопротивления W_A путем увеличения емкости антенны C_A ;
- улучшением согласования входного сопротивления антенны Z_A с волновым сопротивлением питающего фидера;
- включением катушек с двойным назначением (как для увеличения длины в низкочастотной области рабочего диапазона, так и для укорочения длины антенны в высокочастотной области);
- включением индуктивных шунтов для компенсации входного емкостного сопротивления антенны в низкочастотной части рабочего диапазона;
- включением емкостных штырей для компенсации входного индуктивного сопротивления антенны в высокочастотной части рабочего диапазона.

Приведенные способы увеличения диапазоновых свойств несимметричного вибратора, однако, не в полной мере отражают весь круг возможных технических решений.

Для выяснения дополнительных возможностей заменим прямолинейный проводник длиной ℓ , которым является несимметричный вибратор, цилиндрической спиралью. Геометрические параметры спиральной антенны приведены на рисунке 3.

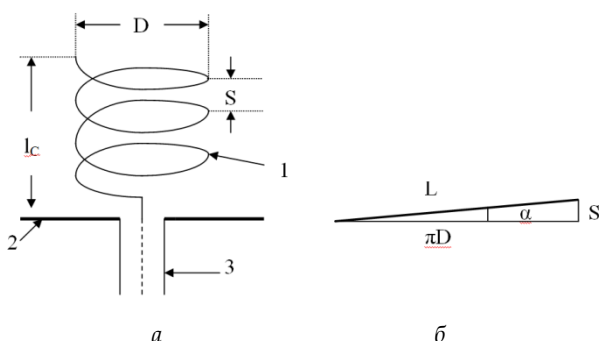


Рис. 3. Геометрические параметры спиральной антенны (а);
развертка витка спирали (б)

Цилиндрическая спиральная антенна представляет собой совокупность n витков провода одинаковых размеров 1, образующих проводочную спираль цилиндрической формы, и плоского металлического экрана 2. Для питания спирали используется коаксиальный кабель 3, центральная жила которого подключена к спирали, а экранированная оплетка кабеля — к экрану спиральной антенны [8]. Цилиндрическая спираль может быть описана следующими параметрами: длиной витка — L , шагом намотки — S , длиной антенны — $l_c = nS$, числом витков — n , диаметром цилиндра — D .

Направленные свойства такой спиральной антенны зависят от соотношения между ее размерами и длиной волны излучаемого ею поля. Известно, если длина волны существенно превосходит диаметр витков спирали $\lambda > 6D$ и каждый виток можно принять за плоскую элементарную рамку, то такую антенну можно рассматривать как совокупность магнитных и электрических диполей, оси которых параллельны оси спирали (рис. 4).

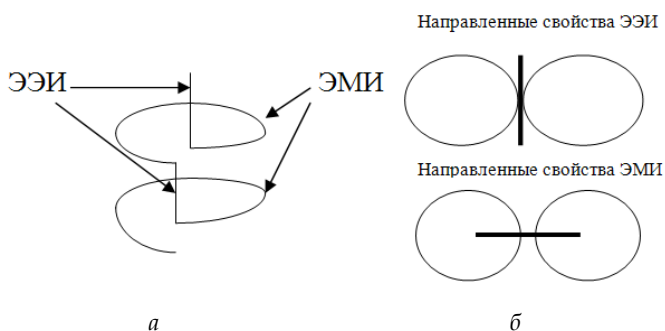


Рис. 4. Спиральная антенна в виде элементарных электрических (ЭЭИ)
и элементарных магнитных (ЭМИ) излучателей (а);
диаграмма направленности ЭЭИ и ЭМИ (б)

Из рисунка 4, б видно, что направленные свойства антенны при заданных условиях $\lambda > 6D$ для ЭЭИ и ЭМИ совпадают. Поэтому диаграмма направленности цилиндрической спиральной антенны в мериди-



альной плоскости, то есть в плоскости, совпадающей с осью антенны, имеет вид *восьмерки*, а в экваториальной плоскости, перпендикулярной оси спирали, представляет собой *окружность*.

Сопротивление излучения при $\lambda > 6D$ оказывается очень малым и КПД получается низким. Поэтому спиральные антенны малых размеров на практике не применяются.

Учитывая, что

$$R_{\Sigma} = 320\pi^2 (S^2 / \lambda^4), \quad R_A = R_{\Sigma} + R_{\Pi} = 140(L / \lambda),$$

то КПД такой конструкции равен

$$\eta = R_{\Sigma} / R_A = 2,285 \cdot \frac{\pi^2 S^2}{L \lambda^3}. \quad (2)$$

Таким образом, направленные свойства цилиндрической антенны совпадают с направленными свойствами несимметричного вибратора. Используем выражение (2) для оценки эффективности конструкции антенной системы.

Представим несимметричный вибратор моделью, изображенной на рисунке 5. Общая длина антенны, принятая для работы на излучение в коротковолновом диапазоне радиочастотного спектра, равна 10 м. При этом верхняя часть длиной 3 м выполнена цельнометаллическим стержнем. Нижняя часть длиной 7 м выполнена в виде цилиндрической спирали. Между нижней и верхней частями располагается согласующее устройство (рис. 5).

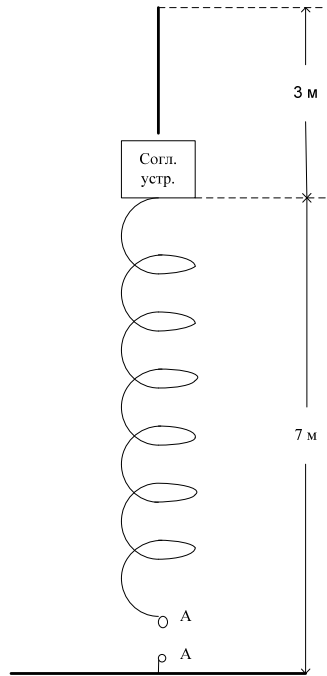


Рис. 5. Модель несимметричного вибратора, выполненного с использованием цилиндрической спирали



Экспериментальные исследования показывают, что для получения экваториального излучения угол наклона витка α должен превышать 24° . В то же время

$$\alpha = \arctg(S / \pi D) = 24^\circ. \quad (3)$$

Используя выражение (3), можно обосновать связь между шагом катушки S и диаметром D антенны:

$$S = 1,398 \cdot D.$$

Длина проводника ℓ в семиметровой цилиндрической спирали H определится из соотношения

$$\sin 24^\circ = H / \ell = 0,406.$$

Следовательно,

$$\ell = H / 0,406 = 7 / 0,406 = 17,24 \text{ м}. \quad (4)$$

Используя выражение (4), получим, что количество витков n , которые уложены на длине $H=7$ м равно

$$n = H / S = 700 / 1,389 D = 500,7 / D,$$

откуда

$$nD = 500,7. \quad (5)$$

Если принять, что $D=0,1$ м, то количество витков, полученное на основании выражения (5), $n=50$.

Индуктивность однослойной цилиндрической катушки определится в виде

$$L = \frac{(\pi \cdot nD)^2}{\ell + 0,45D} = 1426 \cdot 10^{-9} \text{ Гн}, \quad (6)$$

где D, ℓ — диаметр и длина катушки в сантиметрах, причем применимость выражения при $0,3 D < \ell$.

На основании (6) погонная индуктивность цилиндрической спирали составит $203,7 \cdot 10^{-9}$ Гн/м. Собственная межвитковая емкость для цилиндрической спирали на резонансной частоте f_r определится следующим образом:

$$C_L = \frac{1}{(2\pi f_r)^2 L} = \frac{1}{\omega^2 L}. \quad (7)$$

Расчеты на основании (7) показывают, что межвитковая емкость для катушки из 50 витков с диаметром витка 0,1 м будет равна 1,51 пФ, а погонная емкость — $0,216 \cdot 10^{-12}$ Ф/м.

Волновое сопротивление антенны, выполненной на основе цилиндрической спирали:

$$W_A = \sqrt{\frac{L_A}{C_A}} = \sqrt{\frac{203,7 \cdot 10^{-9}}{0,216 \cdot 10^{-12}}} = 971 \text{ Ом}. \quad (8)$$



Если волновое сопротивление питающего фидера $W_\phi = 50$ Ом, то, исходя из (8), необходимо уменьшить волновое сопротивление антенны в K раз или $K = W_A / W_\phi \approx 20$. При $W_\phi = 100$ Ом потребуется уменьшить волновое сопротивление в 10 раз.

Резонансная частота f_r для такой антенны составит

$$f_r = \sqrt{\frac{1}{4\pi^2 LC}} = 10,85 \text{ МГц.}$$

Уменьшить волновое сопротивление возможно путем увеличения межвитковой емкости с одновременным уменьшением индуктивности витков. Для выполнения подобных требований целесообразно:

- сократить длину витка для протекания тока, не уменьшая диаметра спирали;
- увеличить межвитковую емкость, заменив виток провода витком плоским (рис. 6).

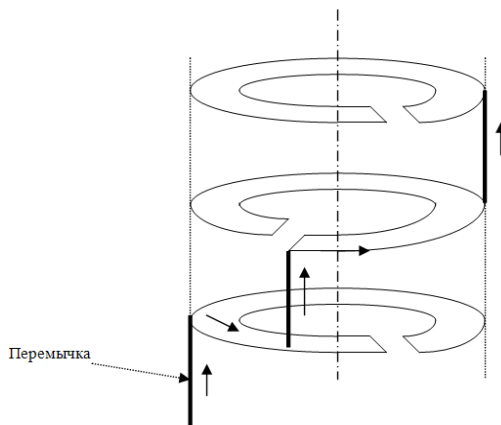


Рис. 6. Модель несимметричного вибратора, выполненного из пластин

На рисунке 6 приведено конструктивное исполнение несимметричного вибратора, который состоит из изолированных друг от друга круговых металлических разрезных пластин, соединенных между собой перемычками. Точки подключения перемычек к металлическим пластинам должны быть подобраны исходя из требований к погонным параметрам емкости и индуктивности. Электрический ток генератора протекает по цепи, образованной перемычками и металлическими пластинами. Причем ток проходит не по всей пластине, а лишь по ее части, что уменьшает индуктивность антенны. При этом часть пластин, по которой не протекает ток, будет находиться под потенциалом, что увеличит погонную емкость конструкции.

Экспериментальные методы отдельного определения влияний на емкостную и индуктивную части основаны на измерении токов и напряжений в цепях, когда между цепями существует либо электрическое



поле, либо магнитное. Эти условия создаются в коротких по сравнению с рабочей длиной волны отрезках линий при режимах холостого хода (электрическое поле) и короткого замыкания (магнитное поле). Поэтому необходимо выполнить измерения в режиме холостого хода для определения и корректировки межвитковой емкости.

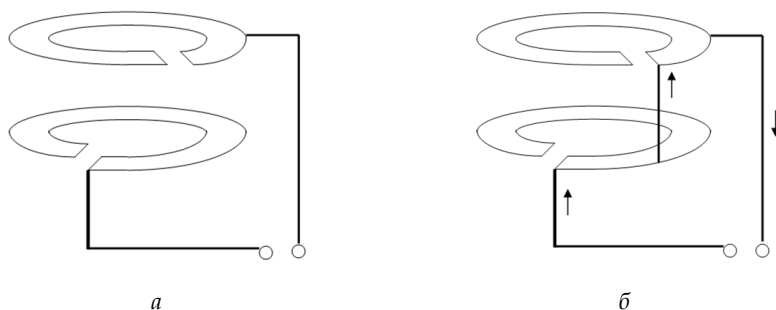


Рис. 7. Схема измерения межвитковой емкости антенны в режиме холостого хода (а) и погонного индуктивного сопротивления в режиме короткого замыкания (б)

Напряжение источника должно подаваться на пластины, как это показано на рисунке 7, а.

Выполнить измерения в режиме короткого замыкания для определения и корректировки погонного индуктивного сопротивления также не составляет труда. Напряжение источника должно подаваться на пластины, как это приведено на рисунке 7, б.

Для определения допустимых погонных параметров цилиндрической спирали необходимо проведение дополнительных исследований. При этом должны быть учтены следующие вопросы:

- как изменяется сопротивление излучения антенны;
- как влияет увеличение емкости антенны на входное сопротивление антенны;
- как согласовать входное сопротивление трехметровой части цельнометаллического штыря.

Таким образом, выявлены дальнейшие направления совершенствования параметров штыревой антенны на основе увеличения ее диапазонных свойств. Результатом работы является разработанная и предложенная для рассмотрения физическая модель антенны. Данная модель позволяет открыть ряд направлений для исследований по созданию штыревых антенн:

- исследование предложенной модели как варианта, описанного и предложенного для рассмотрения;
- исследование других вариантов, в которых поиск возможен через заданные параметры дисперсионной среды и ее использования.

Список литературы

1. Гончаренко И. В. Антенны КВ и УКВ. М., 2005. Ч. 2 : Основы и практика.
2. Schelkunoff S. A., Friis H. T. Antennas. N. Y., 1952.



3. *Balanis C. A.* Modern antenna handbook. N. Y., 2008.
4. *Айзенберг Г. З.* Коротковолновые антенны. М., 1962.
5. *Пистолькорс А. А.* Антенны. М., 1947.
6. *Муравьев Ю. К.* Справочник по расчету проволочных антенн. Л., 1978.
7. *Корабельная передающая антенная система* : пат. Рос. Федерация. № 2017125585 ; заявл. 17.07.2017.
8. *Пониматкин В. Е., Шпилевой А. А., Кужелев А. А., Типикин А. А.* Антенный модуль коротковолнового диапазона // Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. 2015. Вып. 4 : Физико-математические науки. С. 74–81.

Об авторах

Виктор Ефимович Пониматкин – канд. техн. наук, доц., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Россия.

E-mail: VPonimatkin@kantiana.ru

Александр Александрович Кужелев – канд. техн. наук, преп., Калининградский филиал Военного учебно-научного центра Военно-морского флота «Военно-морская академия», Россия.

E-mail: alkuzh007@yandex.ru

Светлана Геннадьевна Шпилевая – канд. пед. наук, доц., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Россия.

E-mail: SSHpilevaya@kantiana.ru

Андрей Алексеевич Попов – ст. преп., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Россия.

E-mail: popandro@gmail.com

The authors

Dr Viktor E. Ponimatkin, Associate Professor, Immanuel Kant Baltic Federal University, Russia.

E-mail: VPonimatkin@kantiana.ru

Dr Aleksandr A. Kuzelev, Lecturer, Kaliningrad Branch of Military Educational and Scientific Centre «Naval Academy», Russia.

E-mail: alkuzh007@yandex.ru

Dr Svetlana G. Shpilevaya, Associate Professor, Immanuel Kant Baltic Federal University, Russia.

E-mail: SSHpilevaya@kantiana.ru

Andrey A. Popov, Assistant Professor, Immanuel Kant Baltic Federal University, Russia.

E-mail: popandro@gmail.com