



В. Е. Пониматкин, А. А. Шпилевой, А. А. Тишкин

**СПОСОБ УКОРОЧЕНИЯ АНТЕННЫ ВКЛЮЧЕНИЕМ  
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ИМПЕДАНСОВ В ПЛЕЧО ВИБРАТОРА**

74

*Предложен способ укорочения вибраторной антенны. Емкостное сопротивление компенсируется включением удлиняющей катушки индуктивности в плечах вибратора. Такой вариант исполнения укороченной антенны дает возможность повысить мощность излучения, практически не снижая КПД антенной системы в результате потерь на индуктивном элементе.*

*A method is proposed shortening of vibrator antenna. Capacitive reactance is compensated offset by the inclusion of the extension of the inductance coil in the shoulders vibrator. This interpretation of the short tape antenna gives the opportunity to increase the power of the radiation virtually reducing the efficiency of the antenna system, in a result of losses on the inductive element.*

**Ключевые слова:** удлиняющая катушка индуктивности, симметричный вибратор, гиратор, согласование антенны.

**Key word:** lengthening the inductance coil, symmetrical vibrator, gyrator, coordination antenna.

Укороченные антенны по ряду аспектов имеют худшие характеристики по сравнению с антеннами, использующими режим собственной длины волны. Подробно причины ухудшения характеристик антенн при их электрической длине (значительно меньше резонансной) описаны в ряде источников [1; 2; 3]. Однако, несмотря на свои недостатки, укороченные антенны получили широкое применение в силу того, что расположение полноразмерной антенны оказывается невозможным из-за недостатка рабочего пространства, неудовлетворительных массо-габаритных характеристик или иных технологических ограничений. Известно, что при длине симметричного (несимметричного) вибратора менее  $\frac{\lambda_0}{2}$ ,  $(\frac{\lambda_0}{4})$ , где  $\lambda_0$  – рабочая длина волны, входное сопротивление антенны приобретает емкостной характер [4; 5], поэтому для обеспечения хорошего согласования антенны с фидером применяют различные способы компенсации емкостного сопротивления.

Далее рассмотрим способ компенсации емкостного сопротивления включением удлиняющей катушки индуктивности в плечах симметричного вибратора. Для подбора соответствующего номинала индуктивности удлиняющей катушки прежде всего необходимо определить статическую емкость и волновое сопротивление антенны [6].

Расчет емкости симметричного вибратора выполним методом Хоу (Howe) [5; 6], дающим погрешность порядка 5%. Для этого представим симметричный вибратор в виде цилиндрического проводника длиной



$l$ , заряженного до потенциала  $U$ . Потенциал в различных точках проводника имеет одинаковое значение, однако плотность заряда распределена неравномерно и возрастает по мере удаления от центра провода, особенно резко изменяясь на его концах. Тем не менее относительно небольшое изменение поверхностной плотности заряда на достаточно большой части проводника положено в основу метода Хоу, поэтому будем считать поверхностную плотность заряда неизменной во всех точках провода. Присвоив этому параметру произвольное значение, найдем потенциал, который будет иметь переменное значение по длине проводника, а для устранения возникшего несоответствия усредним найденное значение потенциала и установим емкость антенны. Для определения потенциала длинного круглого проводника от собственного заряда воспользуемся стандартной формулой

$$\varphi = \frac{1}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \int_0^l \frac{q}{R} dz.$$

Для строгого решения задачи необходимо решить интегральное уравнение, в котором поверхностная плотность заряда  $q$  является функцией координаты  $z$ , а  $\varphi = const$ ,  $R$  – расстояние от влияющей точки до рассматриваемой. В данном случае мы полагаем  $q = const$  и находим  $\varphi$ .

Выберем произвольную точку  $0$  на оси проводника (рис. 1), отстоящую от его левого конца на  $al$  и на  $(1-\alpha)l$  – от правого конца. Тогда на элементе с бесконечно малой длиной  $dz$  на расстоянии  $z$  от начала координат возникнет элементарный потенциал  $dU$ , создаваемый зарядом этого элемента.

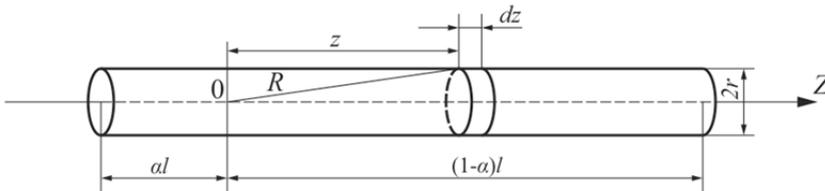


Рис. 1. Чертеж, поясняющий способ определения емкости антенны

Расстояние от начала координат до поверхности элемента определяется следующим выражением:

$$R = \sqrt{z^2 + r^2},$$

где  $r$  – радиус провода. Элементарный потенциал в нулевой точке вычисляется согласно выражению

$$dU = \frac{q}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \cdot \frac{dz}{\sqrt{z^2 + r^2}}. \quad (1)$$

Полный потенциал в точке  $0$  получим путем интегрирования (1) по длине проводника



$$U_\alpha = \frac{q}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \left( \int_0^{\alpha l} \frac{dz}{\sqrt{z^2 + r^2}} + \int_0^{(1-\alpha)l} \frac{dz}{\sqrt{z^2 + r^2}} \right). \quad (2)$$

Интегральную функцию (2) можно свести к логарифмической [5]:

$$U_\alpha = \frac{q}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \left( \ln \frac{l}{r} + \ln 2 + \frac{1}{2} \ln \alpha(1-\alpha) \right). \quad (3)$$

Графически изменение потенциала  $U_\alpha$  вдоль провода показано на рисунке 2, где функция  $U_\alpha$  нормирована.

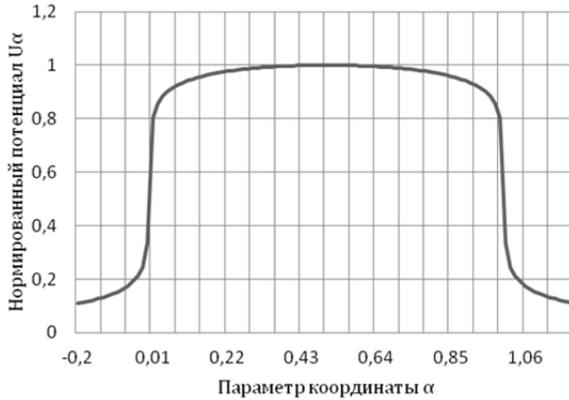


Рис. 2. График нормированной функции распределения потенциала по длине проводника

Как видно из рисунка 2, потенциал меняется вдоль проводника. Для получения среднего значения потенциала необходимо проинтегрировать функцию (3) по  $\alpha$ :

$$U = \frac{1}{\alpha} \int_0^\alpha U_\alpha d\alpha = \frac{1}{\alpha} \frac{q}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \cdot \left( \ln \frac{l}{r} + \ln 2 + \frac{1}{2} \int_0^\alpha \ln \alpha(1-\alpha) d\alpha \right).$$

Учитывая, что полную длину провода мы охватим при  $\alpha = 1$ , получим

$$L_0 = \frac{\rho}{\omega} \cdot \frac{\cos ml}{\sin m(l-l_2) \cos ml_2},$$

тогда

$$U = \frac{q}{4\pi\epsilon\epsilon_0} 2 \ln \left( \frac{l}{r} - 0,307 \right).$$

На основании этого найдем погонную емкость проводника:

$$C = \frac{4\pi\epsilon\epsilon_0 l}{2 \ln \left( \frac{l}{r} - 0,307 \right)}. \quad (4)$$

Известная величина погонной емкости (4) позволяет рассчитать волновое сопротивление антенны  $r$ . Теперь, согласно [6], мы имеем все входные



данные для расчета индуктивности удлиняющей катушки в плечах симметричного вибратора. На рисунке 3 показана схема для расчета удлиняющей катушки в несимметричном вибраторе. Для симметричного вибратора значение индуктивности будет таким же, с тем отличием, что придется взять две катушки, по одной в каждом плече антенны.

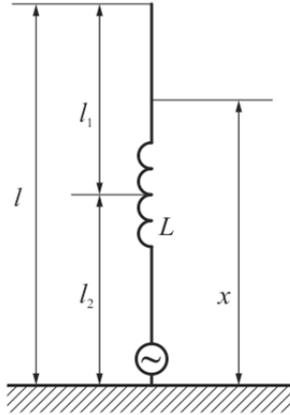


Рис. 3. Несимметричный вибратор с вынесенной удлинительной катушкой

Резонансная величина индуктивности рассчитывается по следующей формуле:

$$L_0 = \frac{\rho}{\omega} \cdot \frac{\cos ml}{\sin m(l-l_2) \cos ml_2},$$

где  $m$  — волновое число;  $\omega$  — циклическая частота. Аналогичным образом можно найти распределение тока в проводнике

$$I_1 = I_A \cdot \frac{\rho \sin m(l-x)}{\rho \sin ml - \omega L \sin m(l-l_2) \sin ml_2}$$

$$I_2 = I_A \cdot \frac{\rho \cos m(l-x) - \omega L \sin m(l-l_2) \sin m(l_2-x)}{\rho \sin ml - \omega L \sin m(l-l_2) \sin ml_2}, \quad (5)$$

где  $I_A$  — амплитуда тока на входе антенны, а  $I_1$  и  $I_2$  — токи в верхней и нижней частях несимметричного вибратора.

Распределение токов по вибратору графически показано на рисунке 4, где верхняя кривая отображает распределение тока при включении удлинительной катушки, а нижняя кривая — при ее отсутствии. Для примера функции распределения токов вычислены исходя из рабочей длины волны 30 м, длины вибратора 3 м и точки включения удлинительной катушки 2,25 м от источника. В месте включения удлинительной катушки производная функции тока претерпевает разрыв, а сама функция имеет форму близкую к трапецеидальной.

Как видно из сравнения распределения токов, наличие катушки индуктивности дает выигрыш в силе тока, протекающей по антенне, что позволяет увеличить коэффициент усиления антенны.

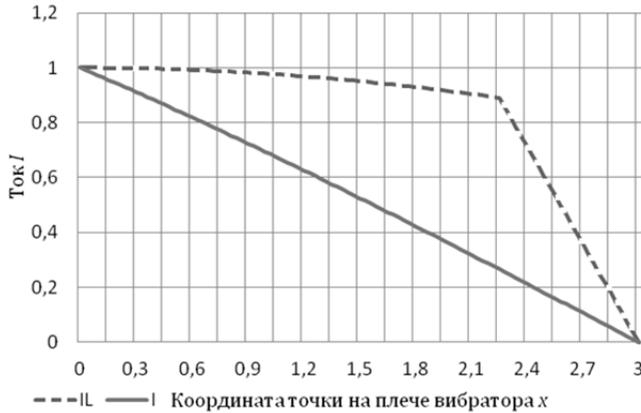


Рис. 4. Распределение тока по плечу вибратора

Количественно данный эффект можно оценить, вычислив разность интегралов соответствующих функций тока по длине вибратора, что эквивалентно разности площадей под кривыми, отображающими распределение токов в антенне.

Как видно из рисунка 5, разность интегральных функций тока (5) линейно возрастает при удалении катушки от источника. Поэтому наибольший эффект можно получить при установке катушки индуктивности как можно ближе к краю вибратора, однако при этом возрастает сопротивление потерь, поэтому имеет смысл выбора точки подключения катушки таким образом, чтобы сопротивление потерь было меньше сопротивления излучения.

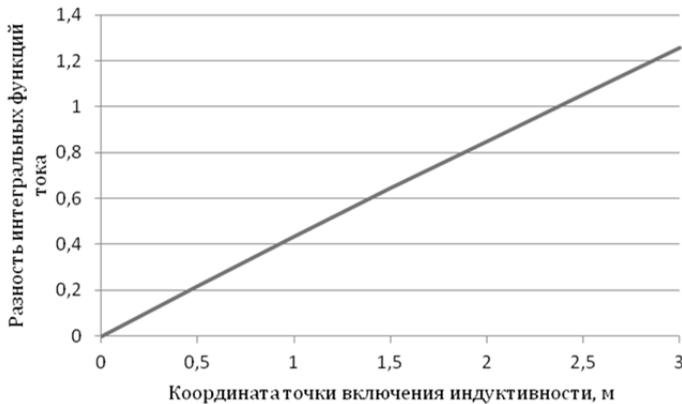


Рис. 5. График разности интегральных функций тока

Выполненный анализ позволяет оценить пути снижения сопротивления потерь. Во-первых, необходимо понижать волновое сопротивление, что достигается повышением емкости антенны за счет утолщения проволочных элементов, а именно выполнение их в виде толстых труб или набора проводов.



Во-вторых, следует увеличивать добротность удлинительной катушки. На практике значения добротности выше 500 получить весьма проблематично, поэтому предлагается в качестве индуктивного элемента использовать гиратор [7], подбором сопротивлений в цепи которого возможно достичь добротности в несколько тысяч единиц. Простейшая эквивалентная схема гиратора изображена на рисунке 7. На рисунке 6 видно, что при больших значениях добротности индуктивного элемента его можно расположить достаточно далеко от источника, тем самым получив значительный выигрыш в мощности излучения.

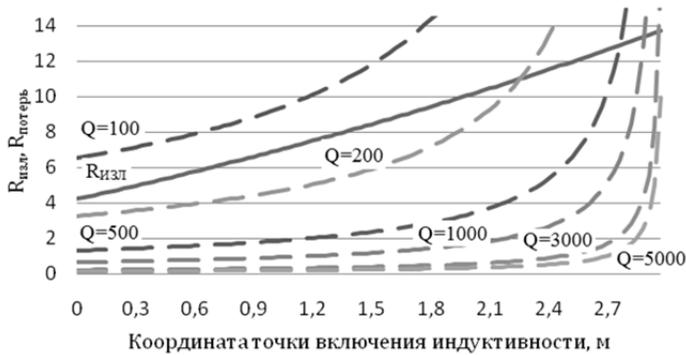


Рис. 6. Графики сопротивления излучения и сопротивления потерь вибратора с вынесенной катушкой

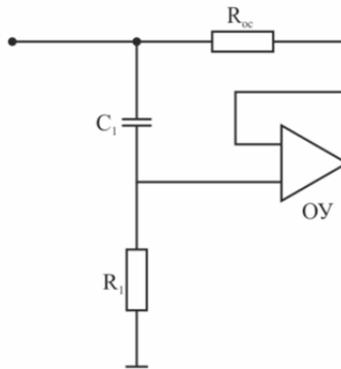


Рис. 7. Эквивалентная схема гиратора

Для представленной схемы справедливы соотношения

$$L = R_1 R_{oc} C_1, Q = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{R_1}{R_{oc}}}$$

Помимо положительного влияния на коэффициент усиления включение дополнительного элемента может вызвать снижение КПД антенны [8], которое также зависит от добротности удлиняющей индуктивности.



Для расчета КПД необходимо вычислить отношение сопротивления излучения к полному сопротивлению антенны. Графически КПД антенны при различных значениях  $Q_L$  представлены на рисунке 8.



Рис. 8. Графики КПД антенны при различных значения добротности индуктивного элемента

Оценить выигрыш в излучаемой мощности можно путем сравнения интегральных функций токов в плече вибратора  $I_1, I_2$  без включения индуктивности и с включенной индуктивностью соответственно. Как видно из графиков на рисунке 9, выигрыш мощности при низкой добротности индуктивного элемента отрицателен для любой координаты точки включения в плечо вибратора, то есть имеем потери мощности, так как рост сопротивления потерь опережает рост сопротивления излучения. Повышая добротность, получаем возможность расположить индуктивный элемент все дальше от источника, тем самым увеличивая выигрыш излучаемой мощности.

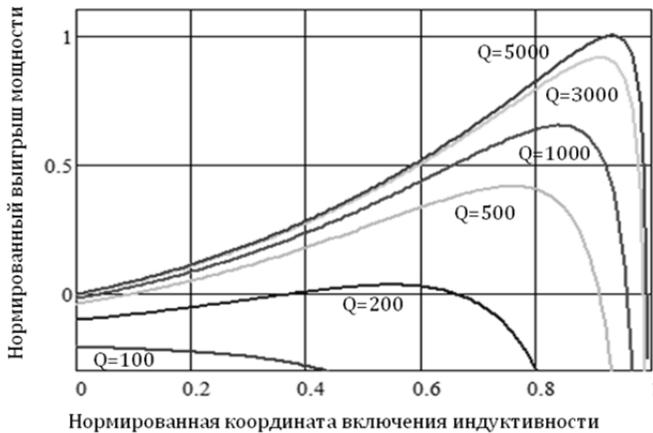


Рис. 9. Графики нормированного выигрыша излучаемой мощности



Исследуя функцию нормированного выигрыша мощности на экстремум, находим оптимальную точку расположения индуктивного элемента.

Рассмотренный вариант исполнения укороченной антенны с преобразователем импедансов дает возможность повысить мощность излучения, практически не снижая КПД антенной системы, поскольку при высокой добротности индуктивного элемента потери на нем будут достаточно малы.

### 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. Пониматкин В. Е., Шпилевой А. А., Утц А. В. О контроле работы радиопередающей системы на излучение // Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. 2011. Вып. 5. С. 33–37.
8. Пониматкин В. Е., Шпилевой А. А., Типикин А. А. О возможности интеграции антенных систем в несущие конструктивные элементы подвижных объектов // Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. 2013. Вып. 4. С. 83–89.

81

### Об авторах

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

E-mail: VPonimatkin@kantiana.ru

Андрей Алексеевич Шпилевой – канд. физ.-мат. наук, доц., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград.

E-mail: AShpilevoi@kantiana.ru

Алексей Алексеевич Типикин – адъюнкт, филиал ВУНЦ ВМФ ВМА, Калининград.

E-mail: VPonimatkin@kantiana.ru

### About the authors

Viktor E. Ponimatkin – PhD, Senior Research Fellow, Ass. Prof., I. Kant Baltic Federal University.

E-mail: VPonimatkin@kantiana.ru

Andrey A. Shpilevoy – PhD, Ass. Prof., I. Kant Baltic Federal University.

E-mail: AShpilevoi@kantiana.ru

Aleksey A. Tipikin – PhD student, MESC MMF VMF, Kaliningrad.

E-mail: VPonimatkin@kantiana.ru