

## КОРОТКАЯ МНОГОЧАСТОТНАЯ ВИБРАТОРНАЯ АНТЕННА. II. ИНЖЕНЕРНЫЙ РАСЧЕТ КОРОТКИХ ТОЛСТЫХ ВИБРАТОРОВ

*Предложен электростатический метод инженерного расчета коротких вибраторов, позволяющий прогнозировать параметры вибраторных антенн, длина плеч которых меньше 0.1 рабочей длины волны, а отношение длины плеча вибратора к его радиусу находится в пределах от 2 до 20. Эквивалентная схема таких вибраторов представляется в виде трехэлементного двухполюсника с потерями. Чтобы учесть толщину вибратора при определении реактивных составляющих сопротивления последовательного контура, вводятся эквивалентная длина образующей плеча вибратора при расчете емкости и действующая длина плеча эквивалентного вибратора при определении индуктивности. Экспериментальные исследования десяти моделей подтверждают результаты расчетов предложенным методом.*

*Ключевые слова:* вибраторная антенна, короткий толстый вибратор, входное сопротивление

### 1. Введение

Вибраторы могут применяться как самостоятельные антенны и быть элементами сложных антенных систем. Большое внимание уделяется разработке малогабаритных антенн, что позволяет решать задачи миниатюризации радиоэлектронной аппаратуры в целом. Среди различных типов малогабаритных антенн важное место занимают вибраторные системы, состоящие из коротких вибраторов, длина плеч которых  $l \leq 0.1\lambda$ , где  $\lambda$  – рабочая длина волны. Методика расчета, которая предложена в настоящей статье, являющейся продолжением работы [1], позволяет легко определять параметры коротких вибраторов при разработке вибраторных антенных систем.

Примером таких антенных систем, состоящих из коротких вибраторов, являются многочастотные вибраторные антенны, способные эффективно работать одновременно в нескольких частотных поддиапазонах [1–4]. Они состоят из согласующих устройств и излучающей системы, в качестве которой выступают короткие толстые вибраторы. Под толстым вибратором будем подразумевать вибратор, у которого  $2 \leq l/r_0 \leq 20$ , где  $r_0$  – радиус основания цилиндрической поверхности, образующей вибратор. Чем толще вибратор, тем слабее выражена частотная зависимость входного сопротивления, т. е. эквивалентная добротность вибратора тем ниже, чем ниже его волновое сопротивление. Ряд многочастот-

ных вибраторных антенн был разработан в Радиоастрономическом институте НАН Украины [2–4] и защищен патентами.

Вторым примером применения коротких толстых вибраторов являются сверхширокополосные приемные антенные элементы для низкочастотных радиотелескопов. Так, в антенном элементе, представленном в работе [5], для реализации широкой полосы частот 10 ÷ 100 МГц используется совокупность коротких толстых вибраторов с оптимальной связью.

В мировых проектах LOFAR [6] и ГУРТ [7] применяются активные антенные элементы, выполненные в виде электрически неделимых устройств – собственно вибраторной антенны и активного элемента – усилителя. В проекте ГУРТ вибраторные антенны [8] включают в свой состав разновидность толстых вибраторов – плоские проволочные вибраторы. Они имеют рабочую полосу частот 10 ÷ 70 МГц. Условие  $l \leq 0.1\lambda$  выполняется на частотах ниже 20 МГц. Короткие вибраторы находят применение и в других малогабаритных антеннах. При этом для создания активных антенных элементов и других вибраторных антенн необходимо прогнозировать параметры вибраторов.

До 80-х гг. прошлого века расчет параметров тонких ( $l/r_0 > 20$ ) проволочных ( $r_0 \leq 0.01\lambda$ ) вибраторов проводился в основном путем упрощенного решения интегральных уравнений Халлена и Понклиттона (см., например [9–11]) методом последовательных приближений. При этом условно принималось  $l/r_0 > 75$ , а радиус вибратора

считался малым по сравнению с длиной волны. Поверхностные электрические токи заменялись эквивалентным током, расположенным вдоль оси вибратора в виде тонкой нити. Торцевые токи вибратора не учитывались. В [10] приведены экспериментальные и расчетные значения входного сопротивления вибратора при  $l/\lambda \geq 0.2$  и  $21.8 \leq l/r_0 \leq 700$ . Отмечено, что экспериментальные данные отличаются от расчетных тем больше, чем меньше отношение  $l/r_0$ . Для более точного решения этих интегральных уравнений Харрингтон впервые применил метод моментов [11]. Этот метод позволяет свести интегральные уравнения к системам линейных алгебраических уравнений с  $N$  неизвестными, которые обычно представляют собой коэффициенты разложения тока по базисным функциям [10, 11]. Метод моментов используется во всех современных программах расчета тонких проволочных антенн [12, 13]. При этом проволочная антенна разбивается на  $N$  сегментов, в каждом из которых вычисляются собственный и наведенный токи. Длина сегмента  $\Delta$  обычно меньше  $0.1\lambda$  и  $\Delta/r_0 \geq 2$  [13]. Зная численное решение интегрального уравнения, легко получить распределение тока в антенне, входной импеданс и другие ее параметры. Результаты расчета входного импеданса вибраторов, имеющих длину  $2l \approx 0.45\lambda$ , приведены в [11]. Данные расчета позволяют судить о скорости сходимости решения при косинусоидальной и импульсной базисных функциях. В первом случае решение сходится при  $N \approx 20$ , а во втором случае при  $N \approx 150$ . Решение интегральных уравнений для таких вибраторов будет сходиться при  $l/r_0 \geq N$  и при косинусоидальной базисной функции  $l/r_0 \geq 20$ .

В случае толстых вибраторов при использовании метода моментов вибратор можно заменить эквивалентной сеткой из тонких проводов [13]. Возникает проблема “острых кромок”. Вибратор можно моделировать телом вращения [14] или не учитывать эти кромки. В таком случае точность расчета может быть недостаточной.

Алгоритмы с применением метода моментов и коллокации, которые способны моделировать толстые цилиндрические вибраторы, опубликованы, например, в работах [15–17]. В [15] приведен алгоритм для  $0.01\lambda \leq r_0 \leq 0.1\lambda$ , а в [16, 17] для вибраторов с произвольным радиусом. Однако в этих работах рассматриваются вибраторы, дли-

на плеч которых больше  $0.12\lambda$  и не проводится проверка расчета экспериментом.

В инженерной практике для расчета входного сопротивления тонкого проволочного вибратора хорошо зарекомендовал себя метод эквивалентных схем [9]. Для симметричного вибратора очень удачной оказалась схема замещения в виде отрезка разомкнутой на конце двухпроводной линии с потерями длиной, равной длине плеча вибратора. В [9] приведены значения входного сопротивления вибратора при  $20 \leq l/r_0 \leq 60$  и  $l/\lambda \geq 0.1$ , т. е. для длинных и достаточно тонких вибраторов. Известны электростатические методы расчета емкости проволочных вибраторных антенных систем, у которых  $l \gg r_0$  (см., например, [18–20]).

Таким образом, в большинстве случаев в литературе рассматриваются проволочные тонкие вибраторы с длиной плеча  $l > 0.1\lambda$ .

Настоящая статья посвящена разработке электростатического метода инженерного расчета коротких толстых вибраторов, имеющих длину плеч меньше  $0.1\lambda$  и толщину  $2 \leq l/r_0 \leq 20$ . Вибраторам ставится в соответствие эквивалентная схема в виде трехэлементного реактивного двухполюсника с потерями. Значения параметров элементов этой эквивалентной схемы определяются разработанным электростатическим методом. Приведены экспериментальные данные, которые подтверждают результаты расчетов предложенным методом.

## 2. Эквивалентная схема короткого вибратора

Для инженерных расчетов параметров вибратора часто используется метод эквивалентных схем [9]. Согласно этому методу антенне ставится в соответствие эквивалентная цепь с распределенными или сосредоточенными параметрами. Параметры этих цепей подбираются так, чтобы входное сопротивление цепи наилучшим образом аппроксимировало частотную зависимость входного сопротивления антенны и отражало зависимость входного сопротивления антенны от ее размеров.

В большинстве случаев плечи короткого вибратора имеют форму цилиндра. Для уменьшения емкости между торцами плеч вибратора концы его плеч часто имеют коническую форму. На рис. 1 изображен несимметричный вибратор 1 припод-

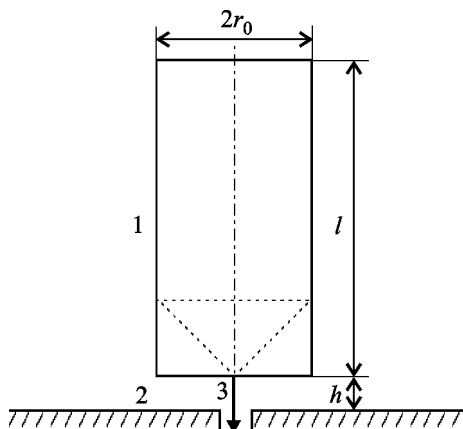


Рис. 1. Несимметричный короткий вибратор

нятый на высоту  $h$  над проводящей плоскостью 2. Пунктирной линией изображен конец вибратора, имеющий форму конуса. Запитка осуществляется в центре нижнего основания цилиндра или через вершину конуса проводником 3. Длина образующей цилиндрической поверхности обозначена через  $l$ , а радиус основания цилиндра, имеющего форму круга, – через  $r_0$ . Плечи симметричного вибратора имеют такие же размеры, как и плечи несимметричного вибратора с разном плеч на расстояние  $2h$ .

В случае коротких вибраторов плечи их могут быть представлены схемой в виде трехэлементного реактивного двухполюсника с потерями. Эквивалентная схема короткого вибратора приведена на рис. 2.

Сопротивление потерь контура  $R_l$  зависит от сопротивления излучения  $R_r$  и потерь энергии

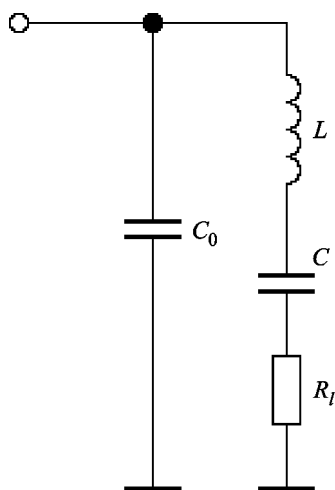


Рис. 2. Эквивалентная схема короткого вибратора

на нагрев вибратора  $R_h$ , отнесенных к току в точках питания.

Сопротивление излучения  $R_r$  коротких вибраторов [9, 21] зависит от распределения тока по их длине, отношения  $l/\lambda$  и определяется полем в дальней зоне. Оно слабо зависит от толщины вибратора:

$$R_r = \chi \pi^2 \left( \frac{l}{\lambda} \right)^2.$$

Здесь  $\chi$  – коэффициент, зависящий от формы распределения тока и типа вибратора – симметричного или несимметричного.

Для симметричных коротких вибраторов при синусоидальном распределении тока этот коэффициент равен 80. В случае коротких несимметричных вибраторов значение коэффициента  $\chi$  в два раза меньше, чем для симметричных.

Входное сопротивление симметричных и несимметричных коротких вибраторов [1, 15]

$$R_i = R_r (1 + q \lambda^{3/2} P^{-1} l^{-1} n). \quad (1)$$

Здесь  $P$  – периметр сечения вибратора;  $n = \sqrt{\mu_r/g}$  – коэффициент, зависящий от относительной магнитной проницаемости  $\mu_r$  и удельной проводимости  $g$  материала вибратора. При синусоидальном распределении тока параметр  $q$  рассчитывается по формуле

$$q \approx 8.75 \cdot 10^{-2} \frac{1 - \sin 2kl / (2kl)}{1 - \cos kl}, \quad (2)$$

где  $k$  – эквивалентное волновое число,  $k = 2\xi\pi/\lambda$ ,  $\xi$  – поправочный множитель;  $q$  измеряется в  $\text{Ом}^{-1/2}$ . Для коротких вибраторов поправочный множитель  $1 < \xi < 1.05$  [9] и определяется из экспериментальных данных.

Следует отметить, что согласно (2) с уменьшением  $l/\lambda$  от 0.1 до 0.01 при синусоидальном распределении тока параметр  $q$  изменяется мало: от  $3.1 \cdot 10^{-2}$  до  $2.9 \cdot 10^{-2} \text{ Ом}^{-1/2}$ .

Из (1) получим, что периметр сечения короткого вибратора должен удовлетворять соотношению

$$\frac{P}{\lambda} = nq\lambda^{1/2} l^{-1} \frac{\eta}{1 - \eta}, \quad (3)$$

где  $\eta$  – КПД вибратора.

Для материалов с высокой проводимостью, таких как медь, латунь и алюминий, имеющих удельную проводимость  $g > 3 \cdot 10^7 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$  и относительную магнитную проницаемость  $\mu_r = 1$ , коэффициент  $n < 1.8 \cdot 10^{-4} \text{ Ом}^{1/2} \cdot \text{м}^{1/2}$ .

Из выражения (3) видно, что при одинаковых  $\eta$ ,  $q$  и  $\lambda$  периметр сечения вибратора обратно пропорционален длине его плеч. Для реализации  $\eta > 0.99$  необходимо удовлетворить условию  $P/\lambda > 100nq\lambda^{1/2}l^{-1}$ , где  $nq = 5.6 \cdot 10^{-6} \text{ м}^{1/2}$ .

Реактивные сопротивления емкости  $C$  и индуктивности  $L$ , входящих в состав эквивалентной схемы короткого вибратора, изображенной на рис. 2, можно определить с помощью электростатических методов. Эти методы еще не получили теоретического обоснования, но результаты их применения хорошо согласуются с результатами измерений при длине проводов меньше длины волны [21, 22].

Емкость  $C$ , входящую в состав последовательного контура трехэлементного реактивного двухполюсника с потерями, можно определить с помощью электростатического метода как взаимную емкость между цилиндрическими оболочками двух проводников конечных размеров [22] с учетом их толщины. В этом случае получается заниженное значение емкости с погрешностью, не превышающей 10 %. Так как вибратор является электронейтральной системой, то для симметричного короткого вибратора емкость последовательного контура

$$C = 0.5(\alpha_{11} - \alpha_{12})^{-1},$$

а для несимметричного короткого вибратора она в два раза больше. Здесь  $\alpha_{11}$  – собственный потенциальный коэффициент, который определяется как

$$\alpha_{11} \approx \frac{1}{2\pi\epsilon_0 l_e} \times \left\{ \ln \left[ \frac{l_e}{r_0} + \sqrt{1 + \left( \frac{l_e}{r_0} \right)^2} \right] + \frac{r_0}{l_e} - \sqrt{1 + \left( \frac{r_0}{l_e} \right)^2} \right\}, \quad (4)$$

где  $\epsilon_0$  – диэлектрическая проницаемость вакуума,  $l_e$  – эквивалентная длина каждого проводника;

взаимный потенциальный коэффициент  $\alpha_{12}$  определяется из выражения

$$\alpha_{12} \approx \frac{1}{4\pi\epsilon_0 l_e^2} \times \left\{ 2(l_e + h) \ln \frac{2(l_e + h)}{l_e + 2h} + h \ln \left[ 4h^2 (l_e + 2h)^{-2} \right] \right\}. \quad (5)$$

При определении емкости между цилиндрическими оболочками двух проводников вибратора для учета толщины проводника вводится эквивалентная цилиндрическая поверхность с длиной образующей  $l_e = l + r_0/2$  и радиусом  $r_0$ . Площадь этой поверхности больше площади боковой поверхности цилиндрического проводника на величину одного основания.

В эквивалентной схеме короткого вибратора (рис. 2) емкость  $C_0$  шунтирует последовательный контур. При цилиндрической форме плеч симметричного вибратора она образована его торцами и равна

$$C_0 = \pi\epsilon_0 r_0^2 / (2h). \quad (6)$$

В несимметричном вибраторе эта емкость в два раза больше и образована проводящей плоскостью 2 и нижним основанием цилиндра 1 (рис. 1). Емкость  $C_0$  не учитывает поля рассеяния, которое включено в поле между двумя цилиндрическими проводниками – плечами вибратора.

Индуктивность  $L$  в эквивалентной схеме короткого вибратора состоит из собственных индуктивностей плеч  $L_1$ ,  $L_2$  и взаимных индуктивностей  $M_{12}$ ,  $M_{21}$ . Эти величины имеют смысл при условии, что в любой момент времени ток можно считать одинаковым для всех сечений эквивалентного вибратора. Равномерное распределение тока по поверхности вибратора имеет место (см., например, [9, 23]) при действующей длине плеч эквивалентного вибратора

$$l_{\Sigma d} = S_i / i_0,$$

где  $i_0$  – ток на входе вибратора,  $S_i$  – площадь тока плеча вибратора.

Введем действующую длину плеча эквивалентного вибратора в виде

$$l_{\Sigma d} = l_d + r_{1d} + r_{2d},$$

где  $l_d$  – действующая длина плеча вибратора;  $r_{1d}$  – действующая длина радиуса основания вибратора, через центр которого осуществляется запитка его плеч;  $r_{2d}$  – действующая длина радиуса второго основания в конце плеча вибратора.

Для цилиндрического вибратора при треугольном распределении тока по вибратору действующая длина образующей цилиндрической поверхности  $l_d = 0.5l$ , а действующие длины радиусов  $r_{1d}$  и  $r_{2d}$  могут быть определены из выражений:

$$\frac{r_{1d}}{r_0} = \frac{1 + 1.5r_0/l}{1 + 2r_0/l}, \quad \frac{r_{2d}}{r_0} = \frac{r_0/l}{2(1 + 2r_0/l)}.$$

Для толстых вибраторов ( $20 \geq l/r_0 \geq 2$ ) с ростом  $l/r_0$  действующая длина радиуса  $r_{1d}$  уменьшается от  $0.98r_0$  до  $0.86r_0$ , а  $r_{2d}$  возрастает от  $0.02r_0$  до  $0.1r_0$ .

Для вибраторов основания цилиндров оказывают влияние на индуктивность  $L$ . Ток в каждом основании  $i$  можно разбить на элементарные нити тока бесконечно малого сечения  $di = id\varphi/(2\pi)$ , направленные вдоль радиуса  $r_0$ . Направление магнитных линий потока самоиндукции каждой нити образует правовинтовую систему с направлением тока в ней. Поэтому собственная индуктивность нити тока является величиной положительной независимо от направления тока в нити. Направление линий потока взаимной индукции зависит от направления тока в нитях и их взаимного расположения. Взаимная индуктивность двух равных по длине нитей тока [24], сходящихся в одной точке,

$$M_{ik} = \mu_0 r_{1d} F_{ik} / (4\pi). \quad (7)$$

Здесь  $\mu_0$  – магнитная проницаемость вакуума. Величина  $F_{ik}$  зависит от угла между двумя,  $i$ -й и  $k$ -й, нитями тока  $\varphi_{ik}$  и определяется выражением

$$F_{ik} = 2 \cos \varphi_{ik} \ln \left( 1 + \sin^{-1} \varphi_{ik} / 2 \right). \quad (8)$$

Отсюда взаимную индуктивность между нитями тока основания цилиндра  $M_1$ , через центр которого осуществляется запитка вибратора, можно определить следующим образом:

$$M_1 \approx 5.7 \cdot 10^{-2} \mu_0 r_{1d}. \quad (9)$$

Взаимная индуктивность между нитями тока второго основания в конце плеча вибратора  $M_2$  может быть определена аналогично взаимной

индуктивности между нитями тока основания  $M_1$ , через центр которого осуществляется запитка вибратора. В этом случае в выражениях (7)–(9) вместо  $r_{1d}$  используется действующая длина радиуса второго основания  $r_{2d}$ .

Собственные индуктивности цилиндрических поверхностей  $L_{1,2}$  плеч вибратора [22, 24], расположенного в однородной среде, равны

$$L_1 = L_2 \approx \epsilon \mu \alpha'_{11} l_{\Sigma d}^2,$$

а взаимные индуктивности цилиндрических поверхностей [22, 24] плеч симметричного вибратора –

$$M_{12} = M_{21} \approx \epsilon \mu \alpha'_{12} l_{\Sigma d}^2.$$

Здесь  $\alpha'_{11} = \alpha'_{22}$  и  $\alpha'_{12} = \alpha'_{21}$  – собственные и взаимные потенциальные коэффициенты цилиндрических поверхностей плеч симметричного вибратора. Для определения этих коэффициентов в выражениях (4) и (5) вместо эквивалентной длины проводника  $l_e$  используется действующая длина образующей цилиндрической поверхности  $l_{\Sigma d}$  плеча вибратора. Этим самым учитывается толщина вибратора.

Результирующая индуктивность  $L$  в эквивалентной схеме симметричного короткого вибратора

$$L = 2(L_1 + M_{12} + M_1 + M_2).$$

Для несимметричного короткого вибратора результирующая индуктивность равна половине этого параметра для симметричного вибратора.

Рассмотрим, как согласуются экспериментальные данные с результатами расчетов элементов эквивалентной схемы короткого толстого вибратора (рис. 2), полученными с помощью электростатических методов.

### 3. Экспериментальные исследования

Экспериментально исследовались параметры толстых цилиндрических коротких несимметричных вибраторов (рис. 1) различных размеров (табл. 1). Модели вибраторов отличались длиной образующей цилиндрической поверхности  $l$ , радиусом основания цилиндра  $r_0$  и высотой расположения над проводящей плоскостью  $h$ . Значения отношения  $l/r_0$  для моделей вибраторов находились в пределах  $2.5 \leq l/r_0 \leq 20$ .

Проводились измерения входного сопротивления всех десяти моделей коротких вибраторов

Таблица 1. Размеры моделей несимметричных вибраторов

№ модели	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$l$ , мм	25	25	50	50	50	50	100	100	100	100
$r_0$ , мм	5	10	5	10	5	10	5	10	5	10
$h$ , мм	2	2	2	2	4	4	2	2	4	4

на измерителях комплексных коэффициентов передачи Р4-11 и “Обзор-103”. Модели, имеющие номера с 1-го по 6-й, были цилиндрическими и измерения для них проводились в диапазоне частот 300 ÷ 600 МГц на одиннадцати частотах. Измерения для моделей с номерами с 7-го по 10-й проводились в диапазоне частот 150 ÷ 300 МГц тоже на одиннадцати частотах. Эти модели имели нижнее основание в форме конуса, через вершину которого осуществлялась запитка вибраторов. При этом несимметричные вибраторы были короткими,  $l/\lambda \leq 0.1$ , и радиус цилиндров удовлетворял условию  $2\pi r_0/\lambda < 1$ .

Комплексное входное сопротивление короткого цилиндрического вибратора можно определить расчетным путем из эквивалентной схемы,

$$Z_{in} = R_{in} + jX_{in}.$$

Здесь  $R_{in}$  – активная составляющая входного сопротивления,

$$R_{in} = \frac{R_l \omega_0^4 C^2}{R_l^2 \omega_0^4 \omega^2 C^2 C_0^2 + [\omega_0^2 C + C_0 (\omega_0^2 - \omega^2)]^2},$$

а  $X_{in}$  – реактивная составляющая входного сопротивления,

$$X_{in} = \frac{(\omega_0^2 - \omega^2) [\omega_0^2 C + C_0 (\omega_0^2 - \omega^2)] + R_l^2 \omega^2 \omega_0^4 C^2 C_0}{R_l^2 \omega^3 \omega_0^4 C^2 C_0^2 + \omega [\omega_0^2 C + C_0 (\omega_0^2 - \omega^2)]^2},$$

где  $\omega$  – круговая частота,  $\omega_0$  – резонансная частота последовательного контура.

Активная составляющая входного сопротивления короткого несимметричного вибратора при высоком КПД и треугольном распределении тока не превышает нескольких ом и ее можно оценить из выражения (1). Измерить активную составляющую входного сопротивления с высокой точностью

затруднительно, но можно получить высокую точность измерений реактивной составляющей входного сопротивления короткого вибратора.

Как активная, так и реактивная составляющие входного сопротивления зависят от частоты  $\omega$ , емкости  $C$  и резонансной частоты  $\omega_0$  последовательного контура, а также от сопротивления излучения  $R_l$  и емкости  $C_0$ , шунтирующей последовательный контур. Сопротивление излучения слабо зависит от толщины вибратора, а емкость  $C_0$ , образованная нижним основанием несимметричного вибратора и проводящей плоскостью, не учитывает поле рассеяния. Параметры этих элементов определяются расчетным путем из выражений (1) и (6) соответственно. Сравнение расчетных значений  $X_{in}$  и соответствующих экспериментальных данных  $X'_{in}$  показали хорошее согласие в пределах ошибки.

Емкость  $C$  и резонансная частота  $\omega_0$  определяются из системы двух уравнений по измеренной на двух частотах  $\omega_{1,2}$  реактивной составляющей  $X'_{in_{1,2}}$  входного сопротивления. Для расчета применялись 10 систем двух уравнений для разных частот, что позволило уменьшить случайную ошибку измерений.

Решение каждой системы двух уравнений дает

$$\omega_0^2 = \frac{\omega_1 \omega_2 (\omega_2 A_2 B_1 - \omega_1 A_1 B_2)}{\omega_1 A_2 B_1 - \omega_2 A_1 B_2},$$

где

$$A_{1,2} =$$

$$= 2X_{in_{1,2}} \omega_{1,2} C_0 + 1 + \left[ 1 - 4R_{l_{1,2}}^2 C_0^2 (1 + X_{in_{1,2}} C_0 \omega_{1,2})^2 \right]^{1/2},$$

$$B_{1,2} = X_{in_{1,2}} + R_{l_{1,2}}^2 \omega_{1,2} C_0 (1 + X_{in_{1,2}} \omega_{1,2} C_0),$$

значения  $C_0$  и  $R_{l_{1,2}}^2$  определяются из предварительных расчетов.

Для реактивностей последовательного контура имеем

$$C_e = \frac{(\omega_2^2 - \omega_0^2)A_2}{2\omega_2\omega_0^2B_2}, \quad L_e = \omega_0^{-2}C_e^{-1}.$$

В табл. 2 и 3 приведены значения емкостей  $C$  и индуктивностей  $L$  последовательного контура для десяти моделей коротких вибраторов, полученные из экспериментальных данных ( $C_c, L_e$ ) и расчетным путем электростатическим методом ( $C_c, L_e$ ). Из приведенных данных следует, что соответствующие реактивности последовательного контура в пределах ошибки совпадают.

Таким образом, короткие вибраторы могут быть представлены эквивалентной схемой в виде трехэлементного реактивного двухполюсника с потерями. Значения параметров элементов можно определить описанным электростатическим методом.

Таблица 2. Значения емкости в эквивалентной схеме для моделей несимметричных вибраторов

№ модели	$C_e$ , пФ	$C_{c\min}$ , пФ	$C_{c\max}$ , пФ
1	1.2±0.1	1.1	1.2
2	3.2±0.3	3.4	3.7
3	1.9±0.2	1.9	2.1
4	3.1±0.3	3.3	3.6
5	1.8±0.2	1.8	2.0
6	2.9±0.3	3.0	3.3
7	3.1±0.3	2.7	3.0
8	4.0±0.4	3.9	4.3
9	2.8±0.3	2.6	2.9
10	4.0±0.4	3.8	4.2

Таблица 3. Значения индуктивности в эквивалентной схеме для моделей несимметричных вибраторов

№ модели	$L_e$ , нГн	$L_{c\min}$ , нГн	$L_{c\max}$ , нГн
1	6.7±1.8	5.4	6.0
2	7.2±1.5	5.9	6.5
3	12.8±2.0	11.9	13.2
4	9.9±1.5	11.3	12.6
5	13.8±2.0	11.5	12.8
6	10.4±1.5	10.9	12.1
7	18.8±2.2	20.6	22.9
8	14.5±2.0	15.6	17.3
9	19.2±2.0	20.3	22.6
10	17.5±2.0	15.3	17.0

#### 4. Заключение

В статье описывается разработанный электростатический метод инженерного расчета коротких ( $l \leq 0.1\lambda$ ) толстых ( $2 \leq l/r_0 \leq 20$ ) вибраторов. Эквивалентная схема таких излучателей представляется в виде трехэлементного реактивного двухполюсника с потерями. Для того чтобы учесть толщину вибратора при определении реактивных сопротивлений последовательного контура, вводятся эквивалентная длина образующей плеча вибратора  $l_e$  при расчете емкости, а при определении индуктивности – действующая длина плеча эквивалентного вибратора  $l_{\Sigma d}$ .

Приводятся расчетные и подтверждающие их экспериментальные данные для десяти моделей вибраторов.

Авторы считают приятным долгом выразить благодарность В. Н. Кочину за ценные замечания и обсуждение результатов работы.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бовкун В. П., Гридин А. А., Жук И. Н. Короткая многочастотная антенна. I. Принципы построения // Радиофизика и радиоастрономия. – 1999. – Т. 4, № 4. – С. 299–310.
2. Пат. № 1806429 АЗ СССР, МПК 5Н01 Q9/42. Малогабаритная антенна / В. П. Бовкун, А. А. Гридин, И. Н. Жук (Украина); Радиоастрономический институт АН Украины. – № 4911586; Заяв. 03.01.91; Опубл. 30.03.93, Бюл. № 12. – 3 с.
3. Пат. № 2220481 С2 Россия, МПК 7Н01 Q9/38. Многочастотная низкопрофильная антенна / В. П. Бовкун, А. А. Гридин, И. Н. Жук (Украина); Радиоастрономический институт НАН Украины. – № 2000112896/09 (013675); Заяв. 24.05.2000; Опубл. 27.12.2003, Бюл. № 30. – 7 с.
4. Многочастотная малогабаритная антенна: А. с. 1705928 А1 СССР, МКИ 5Н01 Q9/42 / В. П. Бовкун, А. А. Гридин, И. Н. Жук (Украина); Радиоастрономический институт АН Украины. – № 4685222/09; Заяв. 25.04.89; Опубл. 15.01.92, Бюл. № 2. – 9 с.
5. Коноваленко А. А., Жук И. Н., Гридин А. А., Бовкун В. П., Бубнов И. Н. Сверхширокополосный антенный элемент низкочастотного радиотелескопа. I. Принципы построения // Радиофизика и радиоастрономия. – 2010. – Т. 15, № 4. – С. 376–386.
6. Butcher H. R. LOFAR: First of a new generation of radio telescopes // Proc. SPIE. – 2004. – Vol. 5489. – P. 537–548.
7. Falkovich I. S., Konovalenko A. A., Gridin A. A., Sodin L. G., Bubnov I. N., Kalinichenko N. N., Rashkovski S. L., Murha D. V., and Tokarsky P. I. Wide-band high linearity active dipole for low frequency radio astronomy // Exp. Astron. – 2011. – Vol. 32. – P. 149–164.
8. Пат. № 43457 С2 Украина. МПК Н01 Q1/44. Антенна на формотворных пластиковых водопроводных трубах /

- О. О. Коноваленко, І. С. Фалькович, А. О. Гридін, І. М. Бубнов; *Радіоастрономічний інститут НАН України*. – № 200807006; Подання 20.05.2008; Оприл. 25.08.2009, Бюл. № 16. – 6 с.
9. *Сазонов Д. М.* Антенны и устройства СВЧ. – М.: Высшая школа, 1988. – 432 с.
  10. *Коротковолновые антенны / Г. З. Айзенберг, С. П. Белоусов, Э. М. Журбенко и др. / Под ред. Г. З. Айзенберга.* – М.: Радио и Связь, 1985. – 536 с.
  11. *Вычислительные методы в электродинамике / Под ред. Р. Митры.* – М.: Мир, 1977. – 480 с.
  12. *Гончаренко И. В.* Компьютерное моделирование антенн. Все о программе MMANA. – М.: ИП РадиоСофт, 2002. – 80 с.
  13. *Гончаренко И. В.* Антенны КВ и УКВ. Часть I. Компьютерное моделирование. MMANA. – М.: ИП РадиоСофт, 2004. – 126 с.
  14. *Васильев Е. Н., Малушков В. Г.* Распределение тока на цилиндре средней толщины // *Изв. вузов. Радиофизика.* – 1967. – Т. 10, № 4. – С. 530–536.
  15. *Werner D. H.* A method of moments approach for the efficient and accurate modeling of moderately thick cylindrical wire antennas // *IEEE Trans. Antennas Propag.* – 1998. – Vol. 46, No. 3. – P. 373–382.
  16. *Кочин В. Н.* Моделирование несимметричного вертикального вибратора конечной толщины при осесимметричном возбуждении // *Радиофизика и радиоастрономия.* – 2002. – Т. 7, №1. – С. 17–27.
  17. *Лерер А. М., Клецников А. Б., Лерер В. А., Лабунько О. С.* Методика расчета характеристик системы параллельных вибраторов при стационарном и импульсном возбуждении // *Радиотехника и электроника.* – 2008. – Т. 53, № 4. – С. 423–431.
  18. *Пистолькорс А. А.* Антенны. – М.: Связьиздат, 1947. – 480 с.
  19. *Дорохов А. П.* Расчет и конструирование антенно-фидерных устройств. – Харьков: Издательство Харьковского ордена Трудового Красного Знамени государственного университета им. А. М. Горького, 1960. – 452 с.
  20. *Драбкин А. Л., Зузенко В. Л.* Антенно-фидерные устройства. – М.: Сов. радио, 1961. – 816 с.
  21. *Надененко С. И.* Антенны. – М.: Связьиздат, 1959. – 552 с.
  22. *Иоссель Ю. Я., Кочанов Э. С., Струнский М. Г.* Расчет электрической емкости. – Л.: Энергоиздат, 1981. – 288 с.
  23. *Кочержевский Г. Н.* Антенно-фидерные устройства. – М.: Связь, 1972. – 472 с.
  24. *Калантаров П. Л., Цейтлин Л. А.* Расчет индуктивностей. – Л.: Энергоатомиздат, 1986. – 488 с.

*В. П. Бовкун, І. М. Бубнов, А. О. Гридін, І. М. Жук*  
Радіоастрономічний інститут НАН України,  
вул. Червонопрапорна, 4, м. Харків, 61002, Україна

#### КОРОТКА БАГАТОЧАСТОТНА ВІБРАТОРНА АНТЕНА. ІІ. ІНЖЕНЕРНИЙ РОЗРАХУНОК КОРОТКИХ ТОВСТИХ ВІБРАТОРІВ

Запропоновано електростатичний метод інженерного розрахунку коротких вібраторів, що дозволяє прогнозувати параметри вібраторних антен, довжина плеч яких менша 0.1 робочої довжини хвилі, а відношення довжини плеча до його радіусу  $\epsilon$  в межах від 2 до 20. Еквівалентна схема таких вібраторів розглядається як трьохелементний двополосник з втратами. Аби врахувати товщину вібратора у визначенні реактивних складових опору послідовного контуру, вводяться еквівалентна довжина твірної лінії плеча вібратора у обрахунку електроємності та чинна довжина еквівалентного вібратора у визначенні індуктивності. Експериментальні дослідження десяти моделей таких вібраторів підтверджують результати розрахунків запропонованим методом.

*V. P. Bovkoon, I. N. Bubnov, A. A. Gridin, and I. N. Zhuk*

Institute of Radio Astronomy, National Academy  
of Sciences of Ukraine,  
4, Chervonopraporna St., Kharkiv, 61002, Ukraine

#### SHORT MULTIFREQUENCY VIBRATOR ANTENNA. II. ENGINEERING CALCULATION OF SHORT THICK VIBRATORS

The electrostatic method of engineering calculation of short thick vibrators is presented. This method allows to determinate the parameters of vibrators with arm length of less than one tenth of operating wavelength providing the vibrator's arm length-to-radius ratio within 2 to 20. The equivalent circuit of such vibrators is represented in the form of a three-element reactive two-terminal circuit with losses. The equivalent length generating the vibrator arm is introduced to account for the vibrator thickness in calculation of reactive resistance components of a series circuit, whereas the effective length generating the equivalent vibrator arm is used to account for the vibrator thickness in calculation of a series circuit inductance. The experimentally tested ten models confirm the results obtained with the proposed method.

*Статья поступила в редакцию 27.03.2013*