

**Е. А. Величко, А. П. Николаенко**

*Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины*

*12, ул. Акад. Проскуры, Харьков, 61085, Украина*

E-mail: [sasha@ire.kharkov.ua](mailto:sasha@ire.kharkov.ua)

## О «ДРЕВЕСНОЙ» ВЕРТИКАЛЬНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СНЧ-АНТЕННЕ

Разработка новых антенн для приема радиосигналов была и остается актуальной задачей. В работе с помощью моделирования оценивается работоспособность вертикальной электрической антенны необычной конструкции, предназначенной для приема сигналов сверхнизкочастотного (СНЧ) диапазона. Антенна должна регистрировать вертикальную компоненту электрического поля радиоволны, распространяющейся в сферической полости «Земля–ионосфера» на частотах глобального электромагнитного (шумановского) резонанса в интервале 4...40 Гц. Она состоит из пары электродов, закрепленных на стволе дерева на разной высоте. Древесная антенна должна быть эффективным датчиком СНЧ-поля, особенно в условиях ясной погоды. Обсуждаются требования к антенному усилителю, работающему с древесной антенной. Ил. 7. Библиогр.: 8 назв.

**Ключевые слова:** глобальный электромагнитный резонанс, вертикальная электрическая антенна, древесная антенна, антенный усилитель.

Рассмотрим конструкцию вертикальной электрической антенны сверхнизкочастотного (СНЧ) диапазона, занимающего область от 3 до 3 000 Гц, которую можно назвать «древесной» антенной. Она состоит из пары электродов, например, кольцевых, зафиксированных на стволе дерева и разнесенных на несколько метров по высоте. Такая антенна предназначена для измерений вертикальной компоненты электрического поля радиоволны, распространяющейся в полости «Земля–ионосфера» в области частот, занимаемой глобальным электромагнитным (шумановским) резонансом. Использовать такую конструкцию в измерениях на Аляске намеревался Д. Д. Сэнтман. В данной работе с помощью модельных расчетов показано, что такая необычная антенна может оказаться вполне эффективным датчиком вертикального электрического поля СНЧ-диапазона.

Радиоволны сверхнизких частот распространяются в сферической полости, образованной диэлектрической прослойкой воздуха, расположенной между проводящей Землей и плазмой нижней ионосферы. Атмосферная оболочка имеет малую толщину (60...100 км при радиусе Земли  $\approx 6\,400$  км) и представляет собой своеобразный резонатор электромагнитных волн, частоты которого равны примерно 8, 14, 20 Гц и т. д. Радиоволны столь низких частот могут распространяться в полости «Земля–ионосфера» только в виде электрической волны, а точнее – в виде поперечной электромагнитной (ТЕМ) волны, у которой отличны от нуля вертикальная электрическая и горизонтальная магнитная компоненты поля. Поэтому сигналы глобального электромагнитного резонанса обнаруживаются в энергетических спектрах либо вертикального электрического, либо горизонтального магнитного поля [1]. Источниками естественных СНЧ-радиосигналов служат молнии мировых гроз. Из-за слабого затухания СНЧ-радиоволн импульс, излученный грозным разрядом, способен многократно обогнуть

Землю. Так возникает интерференция прямых и кругосветных волн, и появляются максимумы и минимумы в энергетических спектрах естественного радишума в области частот шумановского резонанса.

Типичная вертикальная электрическая антенна СНЧ-диапазона представляет собой некоторое проводящее тело (обычно это сферический электрод), установленное на изоляторе [1]. Конкретная геометрическая форма электрода не важна, необходимо только, чтобы это был проводник, имеющий значительную собственную емкость (не менее 20...30 пФ), которую было бы легко рассчитать. Активный электрод антенны подключен к антенному усилителю, который должен иметь входное сопротивление не ниже  $10^9$  Ом и входную емкость не больше 100 пФ. Далее идет приемник сигналов шумановского резонанса с коэффициентом усиления около 60 дБ и динамическим диапазоном не менее 120 дБ.

Из перечисленных параметров становится очевидным, что конструкция, несущая активный электрод антенны, должна обеспечивать электрическое сопротивление, превосходящее входной импеданс антенного усилителя. Поэтому в большинстве современных устройств используют несущие мачты из изоляционных материалов, на которых фиксируется активный электрод. При этом часто используют полые высоковольтные изоляторы. Детальное описание типов вертикальной электрической антенны можно найти в монографии [1]. На рис. 1 представлена вертикальная электрическая антенна обсерватории шумановского резонанса Лехта (Карелия, Россия,  $64^{\circ}25'37''$  с.ш. и  $33^{\circ}58'25''$  в.д.).

Резонатором служит медный шар диаметром  $\approx 50$  см, установленный на тефлоновом изоляторе. Он поднят над землей с помощью полиэтиленовой трубы диаметром около 40 см и высотой 3 м. Все электрические соединения расположены внутри трубы, а сам антенный усилитель

помещен в герметичную коробку у основания антенны. Вертикальная электрическая антенна СНЧ-диапазона оказывается довольно сложным изделием.

Обнаружение вертикального электрического поля связано с определенными трудностями, поскольку приходится измерять разность потенциалов между землей и активным электродом. Иногда используют антенны с двумя электродами, расположенными на разной высоте. Одной из таких антенн является так называемая «конденсаторная» антенна [1].



Рис. 1. Вертикальная электрическая антенна обсерватории Лехта. Слева на переднем плане виден бетонный бункер, в котором расположены магнитные антенны

Элементы конструкции должны быть прочно закреплены и одновременно обеспечивать достаточно хорошую изоляцию. Кроме того, во избежание вибрационных помех конструкция должна быть достаточно жесткой. Действительно, датчик поля расположен в вертикальном квазистатическом электрическом поле атмосферы, так называемом поле ясной погоды, амплитуда которого в течение дня изменяется от 80 до 120 В/м. Очевидно, что малейшая механическая вибрация активного электрода антенны в таком поле вызовет существенное переменное напряжение на входе антенного усилителя [1]. Для устранения вибрационной помехи, как правило, используют массивную несущую конструкцию, чтобы ее механические колебания лежали вне области рабочих частот, т. е. частот шумановского резонанса (4...40 Гц). Многие экспериментаторы, опасаясь значительных токов утечки через элементы несущей конструкции и вибрационных помех, используют шаровую антенну, установленную в верхней части массивного высоковольтного керамического изолятора.

Справедливости ради надо отметить, что вертикальная электрическая антенна устанавливалась также на металлической мачте и при этом надежно работала. Причина заключается в том, что идеально проводящая мачта не только приподнимает поверхность нулевого электрического потенциала  $U = 0$  над землей, но и линии равного

потенциала. Эти линии, огибая проводящую несущую мачту, концентрируются у ее верхнего конца. Возникающий при этом рост напряженности поля проявляется в большей степени, чем подъем нулевой эквипотенциали. В результате эффективная высота электрической антенны растет с увеличением высоты несущей металлической мачты [1].

На этом фоне предложение использовать два металлических электрода, прикрепленных к стволу дерева на разных высотах, выглядит по меньшей мере странно. Проводимость древесины значительно выше, чем у керамики высоковольтных изоляторов, и возникают опасения, что электрическое поле радиоволны окажется «закороченным». Ниже с помощью моделирования показано, что такие опасения напрасны, и «древесная» антенна может служить весьма эффективным датчиком электрического поля в измерениях сигналов шумановского резонанса. Благодаря своей простоте, древесная антенна может составить конкуренцию общепринятым конструкциям электрических антенн.

**1. Древесная антенна.** Идея древесной антенны чрезвычайно проста. Надо выбрать одиноко стоящее достаточно высокое дерево и зафиксировать на его стволе два кольцевых электрода, расположив их на разной высоте. Электроды должны быть подсоединены к антенному усилителю с дифференциальным входом с помощью симметричного кабеля (витой пары). Тогда на выходе антенного усилителя появится сигнал шумановского резонанса, вместе с которым будут присутствовать различные локальные помехи. По своим характеристикам он примерно соответствует сигналу с типовой антенны. Этот сигнал подается на приемник шумановского резонанса, где он усиливается, фильтруется и подводится к системе сбора данных для дискретизации и записи в память персонального компьютера. Здесь возможна предварительная обработка сигнала.

Напомним, что в идеальном случае антенна не должна влиять на измеряемое падающее поле. Такой антенной могут быть два вертикально разнесенных электрода, например два concentрических диска или кольца, установленных на изолирующем столбе из материала, относительная диэлектрическая проницаемость которого равна единице. В этом случае полное поле внутри диэлектрика окажется таким же, как в окружающем пространстве, и если тонкие горизонтальные электроды разнесены по вертикали, действующая высота антенны окажется равной расстоянию между электродами. Подобная конструкция упоминалась в литературе как конденсаторная антенна [1]. Очевидно, что задача состоит в оценке отличий амплитуды полного электрического поля внутри ствола дерева от амплитуды падающей

волны. Чем меньше эти отличия, тем лучше будет работать древесная антенна.

Антенна, подобная той, которую мы собираемся моделировать, уже однажды использовалась в ультранизочастотных (УНЧ) исследованиях, результаты которых опубликованы в работе [2]. Здесь описана антенна, образованная двумя стальными гвоздями, забитыми на глубину 5 см в ствол дуба с разномом по вертикали 0,76 м. Диаметр дерева посередине между электродами составлял 0,65 м. Антенна с успехом принимала сигналы в УНЧ-диапазоне. В частности, в работе [2] демонстрируется полное подобие записей геомагнитной пульсации РС1 при одновременном приеме на древесную антенну и на стандартную индукционную магнитную УНЧ-антенну в 20 тыс. витков, намотанных на ферромагнитный сердечник.

Главное отличие моделируемой электрической антенны от антенны в работе [2] состоит в том, что она должна обнаруживать вертикальное электрическое поле СНЧ-диапазона, а не горизонтальное магнитное УНЧ-поле. Как следует из данных работы [2], древесная УНЧ-антенна оказалась аналогична одновитковой магнитной рамке, сигнал которой зависел от переменного магнитного поля. Дерево в такой антенне выступает в роли проводника, замыкающего цепь рамки, при этом сигнал геомагнитных пульсаций примерно на три порядка величины превышает уровень сигнала шумановского резонанса.

Здесь мы используем экспериментальные данные работы [2] о сопротивлении древесной антенны. Оказалось, что на постоянном токе сопротивление между электродами составило 5 кОм, а если допускалась поляризация электродов, то оно достигало 10 кОм. Примем, что площадь сечения ствола дерева равна  $S = 0,33 \text{ м}^2$ , что соответствует диаметру 0,65 м. Тогда для расстояния между электродами  $L = 0,76 \text{ м}$  получим, что сопротивление 5 кОм соответствует удельному сопротивлению древесины  $\rho = 2171 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ . Отсюда проводимость древесины оказывается равной  $\sigma = 4,6 \cdot 10^{-4} \text{ См/м}$ . Эту величину и будем использовать в дальнейших расчетах.

**2. Моделирование.** Для оценки эффективности древесной антенны и демонстрации влияния проводящего ствола дерева на пространственное распределение поля СНЧ-радиоволны применим следующую модель. Имеется вертикальный диэлектрический цилиндр (ствол дерева), расположенный в поле плоской электромагнитной  $E$ -поляризованной волны [3, 4]. Из-за конечной проводимости материала диэлектрическая проницаемость цилиндра оказывается комплексной величиной:

$$\varepsilon = \varepsilon_R + \sigma/(i\omega\varepsilon_0). \quad (1)$$

Здесь  $\varepsilon$  – комплексная диэлектрическая проницаемость цилиндра, моделирующего ствол дерева;  $\varepsilon_R = 81$  – действительная часть комплексной относительной диэлектрической проницаемости ствола, равная диэлектрической проницаемости воды;  $\sigma$  – проводимость древесины в См/м;  $\varepsilon_0 = 1/(36\pi) \cdot 10^{-9} \text{ Ф/м}$  – диэлектрическая проницаемость вакуума;  $\omega = 2\pi f$  – круговая частота падающей радиоволны.

В вычислениях рассматривается плоская монохроматическая электромагнитная волна единичной амплитуды на частоте  $f = 10 \text{ Гц}$ , которая падает на диэлектрический цилиндр радиусом  $a = 20 \text{ см}$ . Цилиндр бесконечен по высоте и ориентирован по оси  $OZ$ . Падающая плоская электромагнитная  $TEM$ -волна также однородна вдоль этой оси. Используется временная зависимость вида  $\exp(i\omega t)$ , так что падающая волна описывается зависимостью вида  $E_z \sim \exp[i(kx - \omega t)]$ , где  $k = \omega/c$  – постоянная распространения в вакууме. Падающая волна движется справа налево.

Вычислим пространственное распределение амплитуды СНЧ-поля  $|E(x, y)|$  внутри и в непосредственной окрестности диэлектрического цилиндра. В решении задачи используем классическое разложение из работы [5]. Типичный результат расчетов показан на рис. 2.

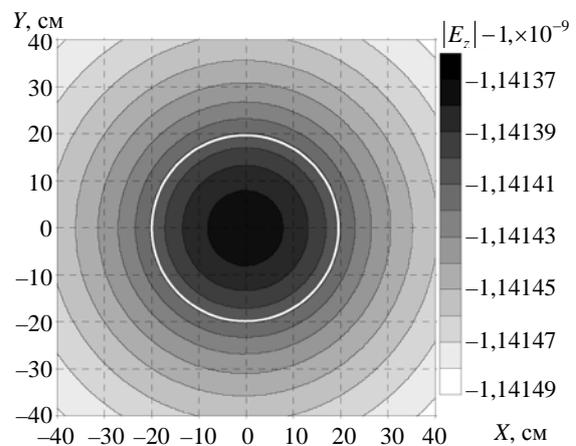


Рис. 2. Пространственное распределение амплитуды СНЧ-поля вблизи ствола живого дерева ( $f = 10 \text{ Гц}$ ,  $d = 40 \text{ см}$ ,  $\varepsilon = 81$ ,  $\sigma = 4,6 \cdot 10^{-4}$ )

Очевидно, что мы имеем дело с классической двумерной задачей рассеяния плоской электромагнитной волны на диэлектрическом цилиндре с потерями. Используется полярная система координат  $(r, \varphi, z)$  с осью  $z = 0$  в центре цилиндра. Решение такой стандартной электромагнитной задачи строится с помощью скалярных потенциалов. Соответствующие формулы хорошо известны, например, из работ [3–5]. Отметим, что искомые электрические и магнитные поля удовлетворяют уравнению Гельмгольца, условию из-

лучения на бесконечности  $r \rightarrow \infty$  и остаются непрерывными на границе раздела «вакуум–дерево».

Применяя в качестве базисных функций модифицированные функции Бесселя [5] и используя результаты, описанные в работах [3, 4], можно построить решения для круговых цилиндров из неидеальных диэлектриков. Чтобы оценить наибольшее возможное влияние проводимости ствола дерева, будем полагать, что реальная часть проницаемости  $\varepsilon_r = 81$  Ф/м, как у дистиллированной воды. Проводимость древесины принимается равной  $\sigma = 4,6 \cdot 10^{-4}$  См/м, а диаметр ствола равен 40 см.

Рассматривается падение плоской монохроматической радиоволны единичной амплитуды на диэлектрический цилиндр справа. Электрическое поле волны параллельно оси цилиндра, поскольку рассматривается  $E$ -волна. Соблюдая условие непрерывности тангенциальных компонент поля на границе раздела сред, получим систему двух линейных алгебраических уравнений для неизвестных коэффициентов отражения и прохождения радиоволны через границу. Система решается численно с использованием соответствующих процедур из математической библиотеки языка FORTRAN [3, 4].

**3. Результаты численного моделирования.** На рис. 2 представлено двумерное пространственное распределение амплитуды вертикального электрического поля вблизи и внутри диэлектрического цилиндра, моделирующего ствол дерева. Белая окружность в центре рисунка обозначает положение ствола. Координаты  $X$  и  $Y$  охватывают диапазон  $-40 \dots 40$  см, т. е. непосредственную окрестность препятствия. Падающее поле имеет единичную амплитуду, а темная заливка на рис. 2 показывает отклонения амплитуды полного поля от единицы:  $|E_z(x, y)| - 1$ . Вертикальная шкала справа от карты приводит масштаб используемых почернений. Видно, что полный диапазон отклонений амплитуды поля от единицы очень мал, он составляет около  $1 \cdot 10^{-13}$ .

Очевидно, что в случае, когда ствол дерева никак не влияет на падающее поле, отклонение  $|E_z(x, y)| - 1$  будет равно нулю. Максимальные девиации амплитуды полного вертикального электрического поля на рис. 2 (от черной до белой заливки) соответствуют значению  $\sim 10^{-13}$ . Амплитуда падающего поля равна единице, следовательно, моделируемое «дерево» не оказывает заметного влияния на поле СНЧ-радиоволны. Зачерненные области на рис. 2 концентричны и соосны центру препятствия. При этом сам эффект оказывается пренебрежимо малым с практической точки зрения.

Диаметр ствола выбирался равным 40 см, а действительная часть его комплексной диэлект-

рической проницаемости была такая же, как у дистиллированной воды. Мнимая же часть диэлектрической проницаемости согласно формуле (1), зависит от частоты. Удельная электропроводность сухой древесины изменяется от  $10^{-16}$  до  $10^{-14}$  См/м, а частота сигнала равна 10 Гц. Поэтому ствол сухого дерева еще меньше влияет на падающую СНЧ-радиоволну. Как следует из рис. 2, ствол живого дерева незначительно изменяет падающее поле на частоте 10 Гц, но амплитуда полного вертикального электрического поля вне ствола оказывается несколько меньше единицы. При этом вертикальное электрическое поле фокусируется внутри дерева, что иллюстрируется черным цветом на рисунке. Отклонения настолько незначительны, что с практической точки зрения ими можно пренебречь. Ствол дерева не оказывает заметного влияния на амплитуду падающей СНЧ электромагнитной волны, и она распространяется так же, как и в свободном пространстве, где нет никаких препятствий.

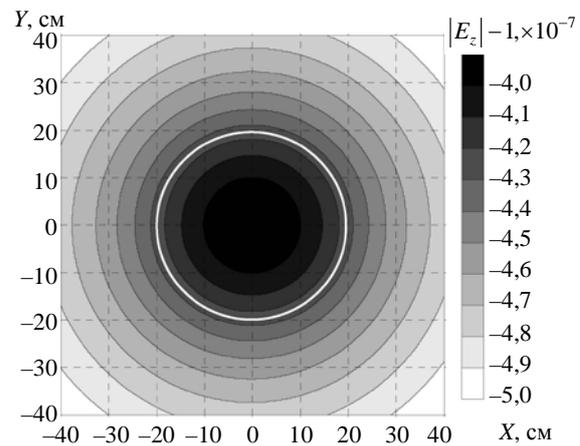


Рис. 3. Пространственное распределение амплитуды СНЧ электрического поля вблизи ствола сухого дерева ( $f = 10$  кГц,  $d = 40$  см,  $\varepsilon = 81$ ,  $\sigma = 4,6 \cdot 10^{-4}$ )

Очевидно, что при фиксированной проводимости материала диэлектрического препятствия и увеличении частоты падающей радиоволны мнимая часть диэлектрической проницаемости (1) уменьшается, и пространственное распределение поля может измениться. Главную роль при этом играет огибание препятствия радиоволнами. Поэтому, несмотря на уменьшение мнимой части  $\varepsilon$  материала, более короткие волны проявляют большую чувствительность к рассеивателю поля. На рис. 3 показаны расчетные данные на частоте 10 кГц, полученные для препятствия тех же размеров и обладающего такой же электрической проводимостью.

Сравнивая рис. 2 и 3, мы видим, что увеличение частоты на три порядка не изменило форму распределения поля – линии постоянной амплитуды при увеличении частоты остались

концентричны препятствию. Что же касается величины отклонений полного поля от единицы, то она заметно увеличилась. Теперь интервал изменений достигает  $10^{-7}$ . Правда, такие изменения все равно не представляют интереса для практики.

Можно сделать вывод, что на частотах вплоть до 10 кГц влияние препятствия на амплитуду поля настолько мало, что распространение происходит так же, как и в свободном пространстве, и древесная антенна должна быть работоспособна и в очень низкочастотном (ОНЧ) диапазоне.

**4. Влияние проводимости препятствия на различных частотах.** Данные, показанные на рис. 2 и 3, были получены для сравнительно малой проводимости  $\sigma = 4,6 \cdot 10^{-4}$  См/м. Правда, у сухой древесины проводимость еще меньше, она лежит в интервале  $\sigma \in [10^{-16}; 10^{-14}]$  См/м. Вычисления для  $\sigma = 0,1$  См/м показали, что даже на частоте 10 кГц относительные изменения амплитуды поля остаются незначительными из-за дифракции сверхдлинной волны (СДВ) вокруг препятствия. Это означает, что активные электроды антенны, прикрепленные к стволу дерева, всегда будут работать так же, как в свободном пространстве.

Физическая интерпретация этих результатов проста и понятна. Геометрический размер препятствия значительно меньше, чем длина волны в окружающем пространстве (например,  $\lambda = 30 \cdot 10^6$  м на частоте 10 Гц). «Электрический» размер препятствия увеличивается за счет его показателя преломления  $|n| \approx 100$ . Однако этого недостаточно для обеспечения ощутимого эффекта на низких частотах. Даже ОНЧ-поле с частотой 10 кГц легко огибает препятствие.

Полученные пространственные распределения амплитуды электромагнитного поля низкой частоты вблизи цилиндрического диэлектрического препятствия позволяют сделать следующий вывод. Несмотря на значительную по модулю диэлектрическую проницаемость материала рассеивающего цилиндра, его влияние на амплитуду падающей СНЧ-радиоволны отмечается примерно в десятом-одиннадцатом знаке после запятой. Этот результат можно было ожидать заранее вследствие того, что геометрические размеры препятствия на несколько порядков меньше длины падающей волны. Мы должны признать, что с приемлемой для практики точностью такой небольшой объект не влияет на падающую электромагнитную волну СНЧ-диапазона. Несмотря на фокусировку волны внутри ствола, амплитуда полного вертикального электрического поля внутри него отличается от единицы на величину  $10^{-13}$ .

Чтобы сделать результаты вычислений более убедительными, приведем данные для случая, когда частота падающей волны равна 10 кГц, а проводимость препятствия достигает

$\sigma = 0,02$  См/м (рис. 4). Такая проводимость соответствует вертикальному цилиндру, заполненному водопроводной водой. Все остальные параметры задачи остаются неизменными. Очевидно, что радиоволна ОНЧ-диапазона, падающая справа налево, по-прежнему с легкостью огибает препятствие. Однако при этом пространственное распределение поля заметно изменилось. Теперь линии постоянной амплитуды оказываются не концентрическими окружностями, а вытянутыми овалами. Кроме того, фокусировка поля цилиндрическим препятствием происходит в стороне от его центра. Тем не менее, относительная величина эффекта составляет приблизительно  $10^{-6}$  (амплитуда падающего поля равна единице).

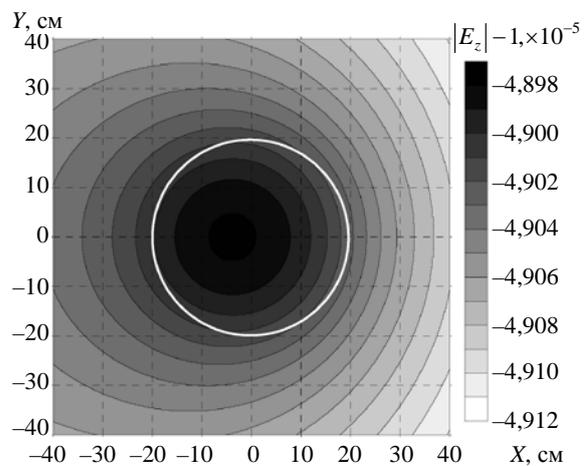


Рис. 4. Пространственное распределение амплитуды поля вблизи «ствола, заполненного водопроводной водой» ( $f = 10$  кГц,  $d = 40$  см,  $\varepsilon = 81$ ,  $\sigma = 0,02$ )

Надо отметить, что влияние препятствия зависит как от его проводимости, так и от частоты падающей волны. Оба параметра играют свою роль. Модельные расчеты непосредственно указывают на значительную роль проводимости, поскольку «электрический» размер ствола дерева зависит от модуля диэлектрической проницаемости, и соотношение этого размера и длины волны определяет, каким образом происходит дифракция. Ниже мы используем ту же методику расчета для оценки искажений поля цилиндрическими объектами различной проводимости на более высоких частотах.

В моделировании важно использовать реалистичную геометрию задачи. Действительно, пренебрежимо малые изменения амплитуды поля, полученные выше, связаны с огибанием препятствия очень длинными радиоволнами, которые просто «не замечают» небольшой цилиндрический объект. Если же в расчетах рассматривается падение плоской электромагнитной волны на полупространство, заполненное средой с такой же диэлектрической постоянной, то дифракционные

явления исчезнут, из-за чего оцениваемый эффект от препятствия окажется сильно искаженным.

Как показано на рис. 5, общая картина дифракции радиоволны не сильно изменяется, если ее частота увеличивается на три порядка, до 10 МГц, а проводимость цилиндрического препятствия остается равной проводимости водопроводной воды  $\sigma = 0,02$  См/м. Пространственные изменения амплитуды радиоволны коротковолнового диапазона вблизи препятствия в целом не изменяют свою форму, но при этом относительные модификации возрастают и наблюдаются в первом знаке после запятой. Важно отметить, что на высокой частоте произошло изменение знака возмущений поля, теперь изменения амплитуды стали положительными.

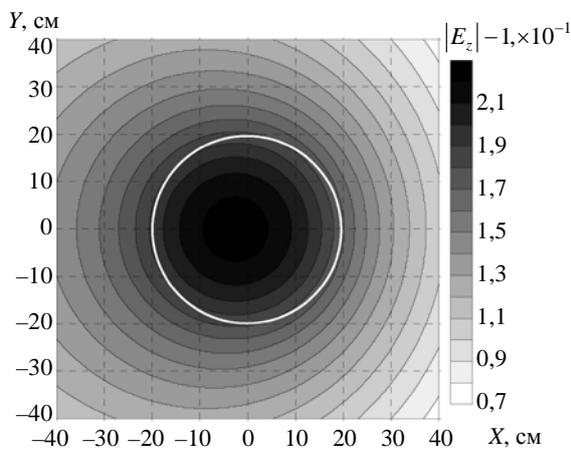


Рис. 5. Пространственное распределение амплитуды поля вблизи «ствола, заполненного водопроводной водой» на частоте 10 МГц ( $f = 10$  МГц,  $d = 40$  см,  $\varepsilon = 81$ ,  $\sigma = 0,02$ )

Тем не менее, величина эффекта все равно мала. Такие изменения не очень существенны для практики. Это, например, подтверждается хорошо известным использованием деревьев для подвешивания коротковолновых антенн в партизанских отрядах во время Великой Отечественной войны.

Картина возмущений поля будет не полной, если не привести расчетные данные для стального цилиндрического объекта (рис. 6). Проводимость углеродистой стали равна  $\sigma = 5,6 \cdot 10^6$  См/м. Мы выбрали частоту падающей радиоволны, равную 10 Гц. Из распределения поля на рис. 6 видно, что геометрия возмущений для препятствия с высокой проводимостью сохраняет цилиндрическую структуру, однако само возмущение оказывается весьма заметным. Так, в центре стальной мачты поле полностью отсутствует, а у ее поверхности амплитуда составляет 1 % от амплитуды падающей волны. Этот результат хорошо согласуется с исследованиями влияния проводящей несущей мачты на поле вблизи антенны [1, 6–8].

Возвращаясь к древесной антенне, уместно сделать важную оговорку. Мы рассматривали сухой ствол дерева в условиях ясной погоды. Ситуация будет совершенно иной в дождливую погоду. Например, дождевая вода может покрыть и смочить поверхность ствола, что значительно увеличит поверхностный ток утечки. Тогда древесная антенна просто перестанет работать, поскольку ее верхний активный электрод окажется замкнутым на нижний (землю). Правда, в таких жестких условиях и обычная электрическая СНЧ-антенна также станет неработоспособной из-за того, что ее изолятор покрыт водой [1, 6].

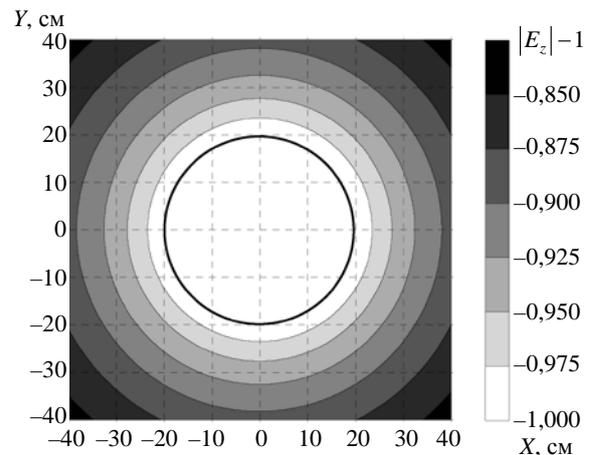


Рис. 6. Пространственное распределение поля вблизи цилиндра из углеродистой стали ( $f = 10$  Гц,  $d = 40$  см,  $\varepsilon = 1$ ,  $\sigma = 5,6 \cdot 10^6$ )

**5. Обсуждение результатов.** В нашем анализе мы отталкивались от классической работы [2], где описана подобная конфигурация, успешно использованная для приема геомагнитных пульсаций РС1 в УНЧ-диапазоне. Сигнал с древесной антенны был очень похож на одновременную запись стандартного магнитного индукционного датчика. Отличие рассмотренной электрической антенны состоит в том, что она должна регистрировать вертикальное электрическое, а не горизонтальное магнитное поле в области СНЧ.

Результаты модельных расчетов говорят о состоятельности идеи древесной антенны. Действительно, ствол дерева, несущий такую антенну, не оказывает заметного влияния на амплитуду радиоволны низкой частоты, поэтому идею древесной антенны вполне можно реализовать. При практическом применении такой антенны возникнут серьезные трудности. Проблема связана с тем, что сигнал, наведенный падающей радиоволной на электродах, надо подвести ко входу основного усилителя приемника. Для этой цели применяют антенный усилитель. На рис. 7 показаны эквивалентная схема и частотная зависимость коэффициента передачи  $|G|$  антенного усилителя вертикальной электрической антенны при разных параметрах цепи [1, 6].

В эквивалентную схему вертикальной электрической антенны входят: генератор напряжения с электродвижущей силой  $Eh_{eff}$ , где  $E$  – напряженность падающего поля;  $h_{eff}$  – эффективная высота антенны;  $C_0$  – собственная емкость активного электрода;  $C_1$  и  $R$  – входная емкость и входное сопротивление антенного усилителя соответственно. В случае древесной антенны эффективная высота будет близка к вертикальному разнесу электродов. Если считать, что нижний электрод заземлен, то  $h_{eff}$  – это высота верхнего электрода над землей. У обычной антенны емкость  $C_0$  определяется геометрией активного электрода; если он имеет форму шара, то  $C_0 = 0,9R_A$ , где  $R_A$  – радиус сферы в сантиметрах, а  $C_0$  измеряется в пикофарадах.

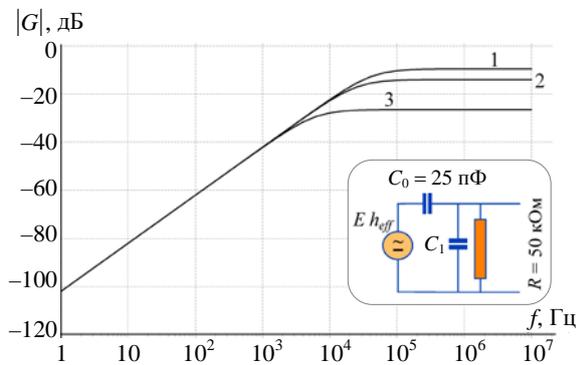


Рис. 7. Эквивалентная схема вертикальной электрической антенны и частотные зависимости коэффициента передачи  $|G(f)|$ . Кривой 1 соответствуют  $C_0 = 25$  пФ и  $C_1 = 50$  пФ; кривой 2 –  $C_0 = 25$  пФ и  $C_1 = 100$  пФ; кривой 3 –  $C_0 = 25$  пФ и  $C_1 = 500$  пФ

Входная емкость антенного усилителя  $C_1$  определяется, главным образом, емкостью входного разъема антенного усилителя, а сопротивление входа  $R$  относится к параллельному соединению сопротивления изоляции антенны и входного сопротивления антенного усилителя. Поскольку в обычных конструкциях используют хорошие изоляторы, величина  $R$  определяется входным сопротивлением антенного усилителя.

Для эквивалентной цепи (рис. 7) получим следующие соотношения для входного напряжения антенного усилителя [1, 6]:

$$U = Eh_{eff}G; \quad (2)$$

$$G = \frac{i\omega RC_0}{1+i\omega R(C_0+C_1)}. \quad (3)$$

Здесь  $U$  – входное напряжение антенного усилителя, а  $G$  – коэффициент передачи антенны.

На рис. 7 показаны кривые  $|G(f)|$ , рассчитанные для  $C_0 = 25$  пФ при трех значениях емкости входа  $C_1$  (50, 100 и 500 пФ). Предполагалось, что сопротивление входа антенного усилителя бесконечно, а входное сопротивление цепи опре-

деляется сопротивлением ствола  $R = 50$  кОм. Как видно из рис. 7, при увеличении входной емкости снижается частота среза частотной характеристики электрической антенны, и при этом снижается уровень  $|G| = C_0/(C_1+C_0)$ , на который выходит коэффициент передачи с увеличением частоты. Поэтому при прочих равных условиях целесообразно использовать конструкции усилителей с малой входной емкостью.

У древесной антенны сопротивление входа  $R$  равно сопротивлению ствола между электродами (далее предполагается, что нижний электрод расположен у земли). При постулированной нами проводимости древесины оно окажется не более 50 кОм, если электроды разнесены на 3 м. Отсюда следует, что желательно обеспечить как можно большую емкость активного электрода. Если его выполнить в виде метровой металлической «юбки», надетой на ствол, то окажется, что  $C_0 \approx 25$  пФ. Получение большей собственной емкости возможно при использовании в качестве верхнего электрода горизонтального провода, натянутого между двумя деревьями. Тогда собственная емкость активного электрода оценивается с помощью соотношения:

$$C_0 = \frac{0,9L}{2 \ln \frac{2L}{r}}. \quad (4)$$

Здесь  $C_0$  – собственная емкость в пФ;  $2L$  – длина электрода, а  $r$  – его радиус, измеренные в сантиметрах. Для антенного канатика диаметром 4 мм и длиной 20 м собственная емкость составит  $C_0 \approx 39$  пФ. Мы используем в оценках  $C_0 = 25$  пФ.

Принимая, что  $C_1 = 50$  пФ, можно оценить частоту среза коэффициента передачи древесной антенны  $f_c = 1/[2\pi R(C_0+C_1)]$ . Подставив указанные выше численные значения, получим  $f_c = 42\,441$  Гц ( $\approx 40$  кГц). Это означает, что модуль коэффициента передачи на низких частотах будет линейно расти с частотой, а выше 100 кГц он выйдет на асимптоту, примерно равную  $-10$  дБ. Легко рассчитать, что на частоте 10 Гц  $|G(f)| = -82,1$  дБ, а на частоте 100 Гц он составит  $|G(f)| = -62,1$  дБ.

Примем среднеквадратичное значение резонансного сигнала на входе антенного усилителя равным 2 мВ. Это значение отвечает спектральной плотности поля  $\approx 100$  мкВ  $m^{-1}Hz^{-1/2}$  при действующей высоте антенны 3 м (высоте верхнего электрода над землей) и полосе частот до 50 Гц.

Из рис. 7 видно, что при линейном увеличении коэффициента передачи с частотой резонансный сигнал на выходе антенного усилителя будет иметь среднеквадратичное значение около  $-90$  дБ или около 36 мкВ. Это очень малый уровень, который компенсируется коэффициентом усиления приемника. Если потребовать, чтобы

собственные шумы усилителя были в 30 раз ниже уровня полезного сигнала, то окажется, что они не должны превышать  $-120$  дБ. Так мы получили предельный уровень шумов антенного усилителя и необходимый коэффициент усиления приемника (90...100 дБ).

Важно подчеркнуть, что влияние атмосферных помех, а также промышленные помехи на частоте 50 Гц и ее гармониках ослабевают в той же степени, что и полезный сигнал шумановского резонанса. Поэтому отношение сигнал/шум не ухудшается, если помехи не попадают непосредственно на вход приемника, минуя антенну.

Полученные величины указывают, что практическая регистрация сигналов шумановского резонанса древесной антенной оказывается не простой, но вполне реализуемой задачей, если на входе антенного усилителя используются малошумящие дифференциальные микросхемы, а активный электрод антенны имеет собственную емкость около 25 пФ.

Есть еще одна сложность, связанная с применением древесной антенны. Линейная частотная зависимость коэффициента передачи антенны в области низких частот говорит о том, что приемник будет регистрировать не саму временную реализацию электрического поля  $E(t)$ , а ее производную по времени. Впрочем, с этим обстоятельством имеют дело при регистрации горизонтального магнитного поля шумановского резонанса, поскольку на выходе магнитных индукционных датчиков тоже присутствует не само поле, а его производная по времени.

**Выводы.** Проведенный анализ и расчеты позволяют сформулировать следующие выводы:

1. Использовано стандартное решение задачи электродинамики о рассеянии плоской радиоволны  $E$ -поляризации на цилиндре с комплексной диэлектрической проницаемостью, которое показало, что ствол дерева при любой реальной проводимости не влияет на амплитуду низкочастотного электромагнитного поля.

2. С электродинамической точки зрения древесная СНЧ-антенна должна успешно работать в полосе частот шумановского резонанса.

3. Реализация древесной антенны столкнется с низким электрическим сопротивлением между электродами. Частично компенсировать влияние этого фактора можно увеличением собственной емкости активного электрода. Необходимо использовать антенные усилители с уровнем собственных шумов не выше  $-120$  дБ.

#### Библиографический список

1. *Nickolaenko A.* Schumann resonance for tyros / A. Nickolaenko and M. Hayakawa. – Tokyo-Heidelberg-N. Y.-Dordrecht-L.: Springer Japan, 2014. – Springer Geophysics. Ser. XI. – 348 p.
2. *Fraser-Smith A. C.* ULF tree potentials and geomagnetic pulsations / A. C. Fraser-Smith // *Nature*. – 1978. – 271, N 5646. – P. 641–642.

3. *Величко Е. А.* Моделирование рассеяния плоской электромагнитной волны на диэлектрическом цилиндре / Е. А. Величко, А. П. Николаенко // *Радиофизика и электрон.* – 2010. – 1(15), № 3. – С. 17–24.
4. *Velichko E. A.* Scattering of a plane electromagnetic wave by a metal cylinder with dielectric or metamaterial coating / E. A. Velichko, A. P. Nickolaenko // *Radiophysics and Quantum Electronics*. – 2014. – 57, N 1. – P. 43–51.
5. *Wait J. R.* Introduction to antennas and propagation / J. R. Wait. – N. Y.-L.-Toronto: Peter Peregrinus Ltd., 1986. – 256 p.
6. *Nickolaenko A. P.* Resonances in the Earth-ionosphere cavity / A. P. Nickolaenko, M. Hayakawa. – Dordrecht-Boston-L.: Kluwer Acad. Publ., 2002. – 380 p.
7. *Яцевич Е. И.* Оценка влияния растительности на действующую высоту вертикальной электрической сверхнизкочастотной антенны / Е. И. Яцевич, А. П. Николаенко // *Радиофизика и электрон.* – 2012. – 3(17), № 1. – С. 45–48.
8. *Yatsevich E. I.* Impact of trees and bushes on the effective height of a vertical electric ELF antenna / E. I. Yatsevich, A. P. Nickolaenko // *J. Atmospheric Electricity*. – 2012. – 32, N 2. – P. 65–70.

*Рукопись поступила 20.07.2016.*

E. A. Velichko, A. P. Nickolaenko

#### ON THE “TREE” VERTICAL ELECTRIC ELF ANTENNA

Development of new antennas for reception of radio signals was and remains an actual problem. We model and estimate the efficiency of unusual design of the vertical electric antenna detecting ELF (3...3 000 Hz) radio signals. The antenna must be sensitive to the vertical electric field of radio waves traveling in the spherical Earth-ionosphere cavity at frequencies of global electromagnetic (Schumann) resonance ranging from 4 to 40 Hz. It is formed by a couple of electrodes fixed at the tree trunk at different heights separated by several meters. Such a design is unusual, and its workability might seem dubious. We show with the help of model computations that the tree antenna is a rather effective ELF sensor, especially in fair weather condition. We also discuss the requirements for the tree antenna pre-amplifier.

**Key words:** global electromagnetic resonance, vertical electric antenna, tree antenna, antenna amplifier.

О. А. Величко, О. П. Николаенко

#### ПРО «ДЕРЕВ'ЯНУ» ВЕРТИКАЛЬНУ ЕЛЕКТРИЧНУ ННЧ-АНТЕНУ

Розробка нових антенн для прийому радіосигналів було і залишається актуальним завданням. Моделюється та оцінюється працездатність вертикальної електричної антени оригінальної конструкції, що призначена для прийому сигналів наднизькочастотного (ННЧ) діапазону. Антена повинна реєструвати вертикальне електричне поле радіохвилі, що поширюється у сферичній порожнині «Земля-іоносфера» на частотах глобального електромагнітного (шуманівського) резонансу в інтервалі 4...40 Гц. Антена складається з пари електродів, які закріплені на стовбурі дерева на різній висоті на відстані декількох метрів один від одного. У статті наведено результати числового моделювання, які показують, що «дерев'яна» антена буде ефективним датчиком ННЧ-поля, особливо за умов ясної погоди. Обговорюються вимоги до антенного підсилювача, що працює з дерев'яною антеною.

**Ключові слова:** глобальний електромагнітний резонанс, вертикальна електрична антена, дерев'яна антена, антенний підсилювач.