

Добротность короткого вибратора в среде с потерями

М. И. Сугак

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

sugakmi@yandex.ru

Аннотация. Получено компактное выражение для определения добротности электрически малой вибраторной антенны в среде с потерями. В выражение входят параметры, описывающие свойства среды (ее проводимость и диэлектрическая проницаемость), частота и размеры вибратора. Показано, что, в отличие от случая среды без потерь, при стремлении электрических размеров вибратора к нулю, его добротность стремится к конечному значению, зависящему только от свойств среды. В частном случае отсутствия потерь в среде результат расчета добротности стремится к известному соотношению.

Ключевые слова: добротность, электрически малые антенны, среда с потерями

I. ВВЕДЕНИЕ. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ.

Для ряда прикладных задач: разработки аппаратуры радиоволнового просвечивания и антенного каротажа [1,2], проектирования антенн для систем с радиочастотными метками и других систем, работающих в среде с потерями, представляет интерес возможность оперативной оценки рабочей полосы частот электрически малых антенн вибраторного типа.

Хорошо известна формула для оценки добротности короткой, тонкой симметричной вибраторной антенны (СВА) в воздухе:

$$Q(kl, ka) = \frac{6 \left(\ln \left(\frac{kl}{ka} \right) - 1 \right)}{kl^3}, \quad (1)$$

где: kl, ka – электрическая длина и электрический радиус вибратора. К сожалению, в обширной литературе, посвященной электрически малым антеннам (ЭМА), например, в [3] и антеннам, установленным в среде с потерями [4–6], аналогичной формулы, учитывающей параметры среды, не обнаружено.

$$Q(\beta l, \beta a) \approx \frac{|\operatorname{Im}(Y(\beta l, \beta a))|}{\operatorname{Re}(Y(\beta l, \beta a))} = \frac{\beta l^3 (1 + \gamma^2)^2 + \beta l^2 \frac{1}{3} (1 - 6\gamma^2 + \gamma^4) \Omega_1(\beta l, \beta a) \Omega_2(\beta l, \beta a) + (1 - \gamma^2) \Omega_1(\beta l, \beta a)}{\beta l^3 (1 - \gamma^2 + \gamma^4) + \beta l^2 \frac{4}{3} \gamma (1 - \gamma^2) \Omega_2(\beta l, \beta a) + 2\gamma \Omega_1(\beta l, \beta a)} \quad (3)$$

В выражении (3) введены следующие обозначения:

$$\gamma = \frac{\alpha}{\beta}, \quad \Omega_1 = 3(\Omega - 3), \quad \Omega_2 = 1 - \frac{3 \ln 2 - 1}{\Omega - 3},$$

Таким образом, представляет интерес обобщение выражения типа (1) для случая среды с потерями. С этой целью в данной работе получено приближенное компактное выражение для добротности электрически малой неизолированной вибраторной антенны от ее размеров и параметров среды.

Воспользуемся данными работы [5]. В ней из решения интегрального уравнения относительно распределения тока в неизолированной СВА, установленной в среде с потерями, получено выражение для входной проводимости в следующем виде:

$$Y(kl, ka) = \frac{2\pi k}{\omega \mu \Psi} \left(\frac{(kl)^4}{3(\Omega - 3)} + ikl \left(1 + \frac{(kl)^2}{3} f \right) \right) \quad (2)$$
$$\Psi = 2 \left(\ln \left(\frac{kl}{ka} \right) - 1 \right), \quad \Omega = 2 \ln \left(\frac{2kl}{ka} \right), \quad f = 1 + \frac{3 \ln 2 - 1}{\Omega - 3},$$
$$k = \beta - i\alpha,$$

Выражение (2), как отмечено в [5], справедливо для следующих ограничений

$$|kl| < 1, \quad \beta l < 1, \quad \alpha l < 1, \quad |ka| \ll 1, \quad a \ll l$$

Здесь и далее: $k = \beta - i\alpha$ – волновое число окружающей среды.

II. ВЫВОД ОСНОВНОГО СООТНОШЕНИЯ. ЧАСТНЫЕ СЛУЧАИ

Из выражения (2) с помощью известного соотношения, связывающего добротность электрически малой антенны с частотной зависимостью входного сопротивления [7], удается записать приближенную формулу для добротности, как отношения модуля мнимой и вещественной части проводимости. В результате преобразований имеем соотношение:

Для случая стремления электрической длины СВА к нулю, из формулы (3), полагая нулевыми все слагаемые, содержащие множителем электрическую длину плеча СВА, можно получить предельное соотношение:

$$Q_0 = \frac{1 - \gamma^2}{2\gamma} \quad (4)$$

При этом в случае малых потерь в формуле (4) можно принять в числителе $\gamma^2 \approx 0$, удерживая при этом ненулевое значение γ в знаменателе, в результате получим:

$$Q_0 \approx \frac{1}{2\gamma} \quad (5)$$

Таким образом, в пределе, при стремлении электрических размеров СВА к нулю, получаем добротность, зависящую исключительно от свойств среды. Заметим, что для СВА в вакууме, как это видно, в частности, из формулы (1), в этом случае присутствует неограниченный рост добротности.

В случае малых потерь и малых размеров СВА в выражении (3) в числителе можно пренебречь членами, содержащими электрическую длину плеча СВА в третьей и второй степени, при этом в знаменателе первым слагаемым пренебрегать не следует. Окончательно, после выполнения преобразований удастся получить полезную приближенную формулу для добротности:

$$Q(\beta l, \beta a) = \frac{\Omega_1(\beta l, \beta a)}{\beta l^3 + 2\gamma\Omega_1(\beta l, \beta a)} \quad (6)$$

Это соотношение можно рассматривать, как обобщение формулы (1) на случай размещения короткой СВА в среде с потерями. Наконец, из соотношения (6) можно выполнить предельный переход в сторону полного отсутствия потерь в среде. Для этого надо положить $\gamma = 0$. В этом случае получается формула:

$$Q(kl, ka) = \frac{6 \left(\ln \left(\frac{2kl}{ka} \right) - \frac{3}{2} \right)}{kl^3} \quad (7)$$

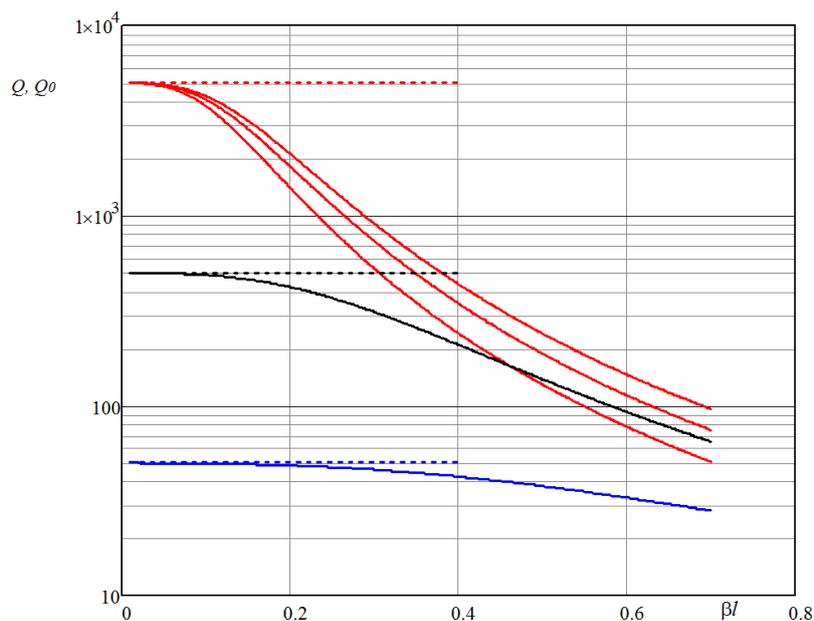


Рис. 2. Зависимость добротности короткого неизолированного вибратора от электрической длины плеча для разных параметров среды и разной толщины СВА (3)

Несмотря на некоторое внешнее отличие, расчеты добротности по формулам (1) и (7) практически совпадают. Сравнение результатов расчета добротности СВА по формулам (1) и (7) приведено на рис. 1.

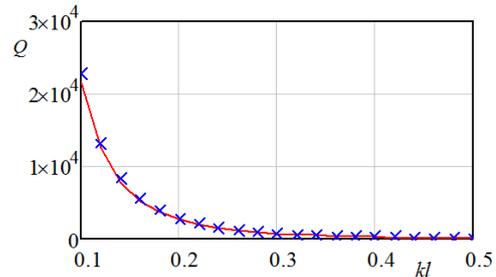


Рис. 1. Результаты расчета добротности СВА по формулам (1) и (7)

Ниже, на рис. 2 представлена зависимость добротности электрически малой неизолированной СВА от ее электрической длины с применением расчетных формул (3,4). На графике (рис. 2) представлены кривые соответствующие частотным зависимостям добротности при разных значениях отношения $\gamma = 10^{-2}, 10^{-3}, 10^{-4}$. Здесь хорошо видно влияние потерь в среде: нижняя кривая имеет характерные значения добротности порядка 50 и ниже, уменьшение γ до значений $\gamma = 10^{-3}$ приводит к росту добротности на порядок. Такое поведение физически совершенно естественно для относительно высокодобротных систем, к которым можно отнести электрически малую СВА. Любопытно, что выход на асимптотическую зависимость, представленную формулой (4), при перемещении в сторону уменьшения электрических размеров СВА (на данном семействе она дана пунктирными линиями) происходит значительно быстрее для среды с большими потерями. Для $\gamma = 10^{-4}$ приведены зависимости добротности при разных толщинах СВА. Здесь закономерность традиционная: уменьшение радиуса антенны повышает добротность.

III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные выражения и вытекающие из них физические закономерности расширяют наше представление о частотных характеристиках неизолированных ЭМА на случай сред с потерями. Основной принципиальный вывод заключается в конечной величине добротности антенны при стремлении электрических размеров антенны к нулю. Эти сведения могут быть полезными при проектировании геофизической аппаратуры для радиоволнового просвечивания и каротажа скважин.

Следует отметить, что не меньший интерес представляет вопрос количественной оценки добротности для СВА с изолированной от среды оболочкой, однако, это требует другого подхода. В этом случае для получения компактного выражения, следует, видимо, решать в одномодовом приближении интегральное уравнение относительно тока с ядром, учитывающим наличие изолирующих оболочек, как это сделано, например, в работах [8, 9]. При этом удастся получить замкнутое выражение для входного импеданса. Из него далее можно получить зависимость добротности, включающую в себя как

электрические параметры среды, так и параметры оболочек.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Петровский А.Д. Радиоволновые методы в подземной геофизике// М. Недра: 1971, 290 с.
- [2] Альпин Л.М. Определение поперечного удельного сопротивления пластов по измерениям в скважине // Изв. вузов. Геология и разведка. 1978, № 4, с. 81-95.
- [3] L.J.Chu, Physical limitations of omni-directional antennas // Appl.Phys., 1948, vol.19, pp.1163-1175.
- [4] A. Karlsson. Physical Limitations of Antennas in a Lossy Medium // IEEE Transactions on AP, vol.52, NO.8 Aug, 2004, p.2027-2033.
- [5] Р. Кинг, Г. Смит. Антенны в материальных средах: в 2-х книгах. Кн.2. Пер с англ. М.: Мир, 1984. 824 с., ил.
- [6] Лавров Г.А., Князев А.С. Приземные и подземные антенны. Изд-во «Сов.радио» Москва. 1965.
- [7] Yaghjian A.D., Best S.R. Impedance, Bandwidth and Q of antennas // IEEE AP, 2005.Vol. 53, iss4, P.1298-1324.
- [8] Голованов В.Н. Повышение эффективности исследования земных недр радиоволновыми методами: дис. ... к.ф.-м. н. Л. 1987 г.
- [9] Юров Ю.Я., Голованов В.Н. Входной импеданс вибраторной антенны, изолированной от окружающей среды // Известия высших учебных заведений СССР. Радиоэлектроника 1989, N8. с.16-20.