

УДК 621.396.67

ХАРАКТЕРИСТИКИ ЛИНЕЙНЫХ ВИБРАТОРОВ, РАЗМЕЩЕННЫХ ВБЛИЗИ ГРАНИЦЫ РАЗДЕЛА ДВУХ СРЕД

С. Л. Рашковский

Рассмотрены характеристики — токораспределение, импедансы и КПД — линейных вибраторов небольшой длины при различной их ориентации относительно бесконечной плоской поверхности раздела двух сред. Характеристики определяются методом интегрального уравнения. Приводятся некоторые обобщения метода зеркальных отображений на случай неидеально проводящего экрана.

Настоящая работа является продолжением [1], где рассмотрена методика расчета токораспределения в антеннах, образованных набором тонких проводников, при учете влияния бесконечной плоской поверхности раздела двух сред. Ниже приведены примеры применения методики к исследованию линейных вибраторов небольшой длины при различной их ориентации относительно поверхности раздела. Помимо этого сделаны некоторые обобщения, являющиеся следствием соотношений, приведенных в [1].

Рассматривается вибратор рис. 1 при коэффициенте преломления проводящего полупространства $n^2 = 10 - i 10$ и $L/a = 100^*$. В процессе расчета, кроме распределения токов, определялись входной импеданс и КПД вибратора. При этом исследование проводилось как для вибратора над проводящей поверхностью, так и для случаев идеально проводящего экрана и свободного пространства.

Все приведенные ниже данные получены при разбиении вибратора на 11 участков ($N = 11$) с квадратичной аппроксимацией тока в пределах каждого из участков. Таким образом, длина запитанной части вибратора равна $L/11$. Последнее, как известно, сказывается в основном на статических компонентах входного импеданса.

На рис. 2 показаны импедансные характеристики горизонтального вибратора при различных высотах H над проводящей поверхностью раздела. Кривая 1 соответствует $H/L = 0,04$, 2 — 0,08, 3 — 0,16, 4 — 0,32, 5 — 0,64, 6 — свободное пространство. В качестве параметра указано отношение L/λ . На рис. 3 под теми же номерами даны аналогичные зависимости для идеального экрана.

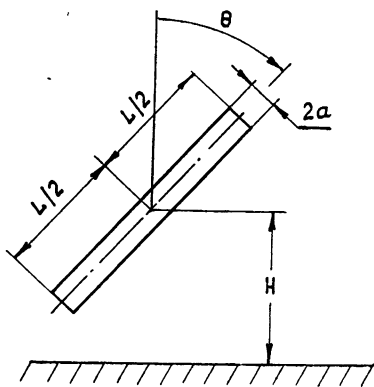


Рис. 1.

* В настоящей работе будем придерживаться обозначений, принятых в [1]. При ссылках на приведенные там формулы будем писать их номер через черточку. Например, (1-10) обозначает уравнение (10) из работы [1].

Сравнение рисунков 2 и 3 показывает существенное различие полученных импедансных характеристик. Для наглядности на рис. 4 приведены зависимости реальной (сплошные линии) и мнимой (прерывистые) компонент импеданса от высоты подвеса при $L/\lambda = 0,5$ (кривые 1 и 3) и 1,0 (кривые 2 и 4). Отчетливо видно, что пока H велико, импе-

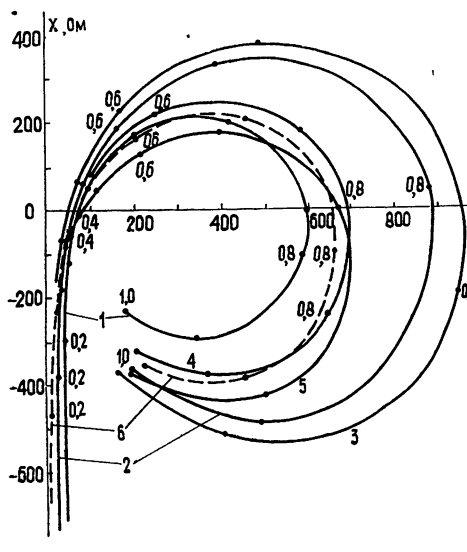


Рис. 2.

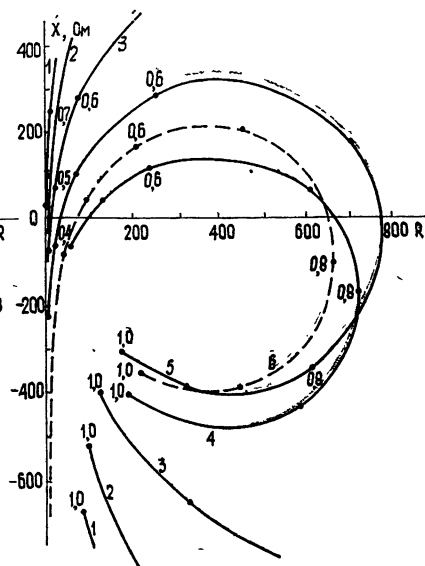


Рис. 3.

дансы слабо зависят от свойств границы раздела, но с приближением к ней они ведут себя противоположным образом: если для экрана (кривые 1 и 2) $\text{Re}(Z)$ стремится к нулю, а $\text{Im}(Z)$ убывает, то при проводящей поверхности (кривые 3 и 4) $\text{Re}(Z)$ и $\text{Im}(Z)$ растут, причем довольно заметно.

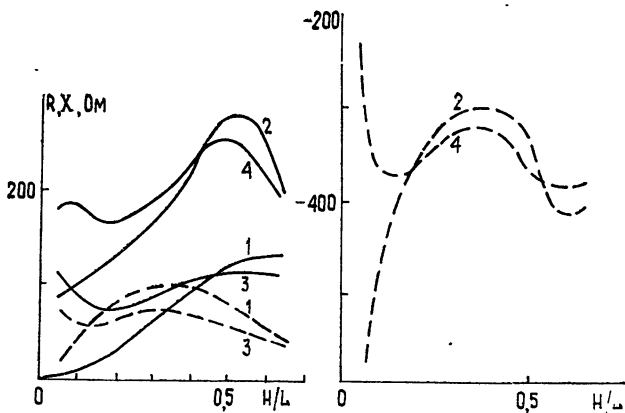


Рис. 4.

Обращает на себя внимание также тот, ранее не отмечавшийся факт, что даже при одновременном уменьшении размеров вибратора и высоты подвеса его сопротивление неограниченно растет (рис. 2, кривая 1 при $L/\lambda < 0,2$). Для идеального же экрана и свободного пространства оно резко уменьшается.

Для объяснения этого эффекта обратимся к соотношениям, приведенным в [1]. Из (1-2) поле E^i можно выразить в виде

$$E^i(t) = -i30 \int_L I(s) \left\{ \begin{array}{c} 1 + \frac{\partial^2}{\partial x^2} \quad \frac{\partial^2}{\partial x \partial y} \quad \frac{\partial^2}{\partial x \partial z} \\ \frac{\partial^2}{\partial x \partial y} \quad 1 + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \quad \frac{\partial^2}{\partial y \partial z} \\ \frac{\partial^2}{\partial x \partial z} \quad \frac{\partial^2}{\partial y \partial z} \quad 1 + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \end{array} \right\} \frac{e^{-iR_i}}{R_i} ds, \quad (1)$$

где R_i — расстояние между точками t и s .

Из (1-10) — (1-16) несложно получить асимптотическое выражение для поля E^r при малых L и H :

$$E^r(t) \approx -i30q_1 \int_L I(s) \left\{ \begin{array}{c} -1 - \frac{\partial^2}{\partial x^2} \quad - \frac{\partial^2}{\partial x \partial y} \quad - \frac{\partial^2}{\partial x \partial z} \\ - \frac{\partial^2}{\partial x \partial z} \quad -1 - \frac{\partial^2}{\partial y^2} \quad - \frac{\partial^2}{\partial y \partial z} \\ \frac{\partial^2}{\partial x \partial z} \quad \frac{\partial^2}{\partial y \partial z} \quad 1 + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \end{array} \right\} \frac{e^{-iR_r}}{R_r} ds, \quad (2)$$

где R_r — расстояние между t и s^* (s^* — точка, зеркальная s относительно поверхности раздела).

Здесь сохранены только члены, растущие с убыванием R_r . При этом они выражены через соответствующие производные от ядра e^{-iR_r}/R_r . Соотношение (2) отличается от (1) наличием множителя $q_1 = (n^2 - 1)/(n^2 + 1)$, учитывающего влияние коэффициента преломления, и знаками в первых двух строках матрицы. Последнее отражает тот факт, что зеркальные отображения токов в случае горизонтального вибратора направлены противоположно по отношению к самим токам (метод зеркальных отображений).

Если вибратор находится в свободном пространстве, то токораспределение в нем и его импеданс полностью определяются выражением (1). В силу линейности задачи соотношение (2) даст дополнительное слагаемое к импедансу, пропорциональное величине q_1 , и взаимному импедансу между самим вибратором и его зеркальным отображением относительно поверхности раздела. Таким образом, при $R_r \rightarrow 0$ входной импеданс вибратора определится как

$$Z = Z_c - [(n^2 - 1)/(n^2 + 1)] Z_{вз}, \quad (3)$$

где Z_c — собственный импеданс вибратора в свободном пространстве, $Z_{вз}$ — взаимный импеданс вибратора и его отображения, зеркального относительно поверхности раздела.

При малых L и H на значения мнимых компонент Z_c и $Z_{вз}$ определяющее влияние оказывают минимальные величины R_i и R_r , соответственно ($R_i^{\min} = a$, $R_r^{\min} \approx 2H$). Чем последние меньше, тем больше мнимые компоненты этих импедансов. При определении $\text{Re}(Z)$ короткого вибратора из (3) величина $\text{Re}(Z_c)$ пропорциональна L^4 (формула Рюденберга) и очень мала, а взаимный импеданс практически чисто мнимый и неограниченно растет с приближением к поверхности разде-

ла. Так как величина n комплексна, то во входном импедансе появляется реальная часть, также неограниченно растущая с уменьшением высоты подвеса.

Формула (3) является асимптотически строгой и обобщает соотношения, применяемые в методе наводимых ЭДС, на случай проводящего полупространства. Для идеального экрана $n \rightarrow \infty$, $q_1 = 1$ и (3) переходит в обычное выражение для горизонтального вибратора над идеальным экраном: $Z = Z_c - Z_{вв}$.

Следует отметить отличие влияния границы раздела на горизонтальный и вертикальный вибраторы. Влияние границы на импедансы вертикального вибратора невелико и практически не отличимо от влияния идеального экрана, а токораспределение отчетливо асимметрично (рис. 3 и 4 в [1]). Для горизонтального вибратора, как видно из рис. 5, закон распределения тока с приближением к границе раздела практически не меняется, а амплитуды токов варьируют в широких пределах. Кривые 1 и 2 на этом рисунке соответствуют $H/L = 0,04$, 3 и 4 — $H/L = 0,64$ (1 и 3 — идеальный экран, 2 и 4 — проводящая поверхность), кривая 5 — свободное пространство. Так как кривые симметричны относительно центра вибратора, то приводятся только их половины — слева реальные компоненты тока, справа — мнимые. Рис. 5а соответствует $L/\lambda = 0,4$, а 5б — $L/\lambda = 1,0$.

На основании расчетов импедансов можно судить о добротности и длине волны в вибраторе.

На рис. 6 приводятся зависимости добротности горизонтального вибратора над идеальным экраном (сплошные линии) и проводящим полупространством (пунктир). Под номерами 1 даны зависимости для первого резонанса ($L_{p\infty}/\lambda = 0,463$, $Q_\infty = 3,9$), под номерами 2 — для второго ($L_{p\infty}/\lambda = 0,778$, $Q_\infty = 2,5$). На рис. 7 показаны изменения резонансной длины вибратора. Обозначения кривых на этом рисунке аналогичны обозначениям рис. 6. В качестве нормирующих коэффициентов на этих графиках выбраны добротность Q_∞ и резонансная длина $L_{p\infty}$ вибратора в свободном пространстве ($H \rightarrow \infty$).

На этих зависимостях также прослеживается кардинальное различие влияний экрана и среды с потерями. Если в первом случае добротность и резонансная длина вибратора с уменьшением H значительно возрастают, то во втором случае добротность стремится к нулю, а резонансная длина падает. При этом широкополосность вибратора над поглощающей средой значительно меньше зависит от высоты подвеса. Длина волны в вибраторе в этом случае меняется относительно мало. Однако, когда H оказывается меньше $0,05 \lambda$, в случае проводящей среды начинается резкое падение L_p . По-видимому, можно ожидать, что для вибратора, непосредственно лежащего на поверхности раздела, она должна стремиться к величине

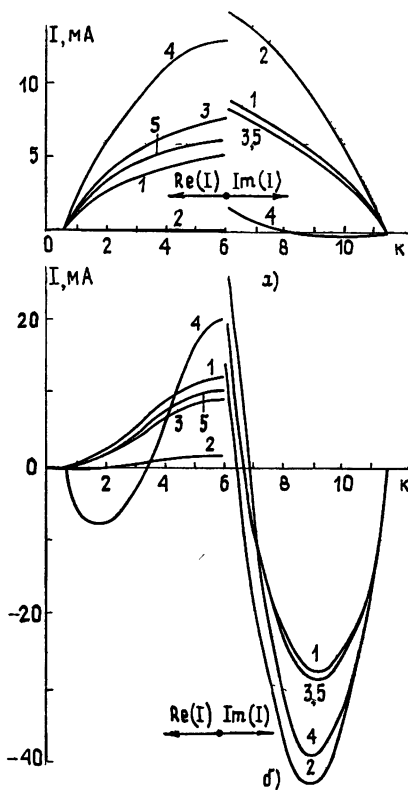


Рис. 5.

$$L_p = L_p \infty \sqrt{2/(1 + |n|^2)}. \quad (4)$$

Соотношение (4) используется в ряде работ (например, [2]). Однако, как следует из приведенных данных, оно может применяться только для очень малых высот H .

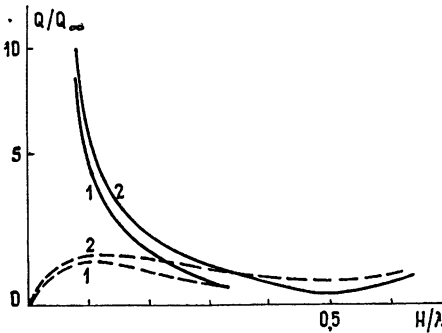


Рис. 6.

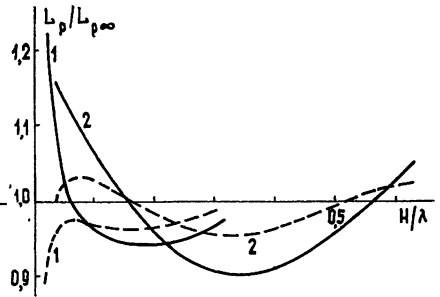


Рис. 7.

Перейдем теперь к рассмотрению КПД вибратора.

В настоящей работе, следуя [3] и [4], под КПД антенны понимается отношение мощности в дальней зоне верхнего полупространства (P_{Σ}) к полной мощности, излучаемой антенной (P_{Π}):

$$\eta = P_{\Sigma}/P_{\Pi} = R_{\Sigma}/R_{\Pi}. \quad (5)$$

При таком определении КПД антенны в свободном пространстве равен 50%, а антенны над бесконечным идеальным экраном — 100%.

В (5) R_{Π} — входное сопротивление вибратора, R_{Σ} — сопротивление излучения:

$$R_{\Sigma} = \frac{7,5\Delta^2}{\pi |I_{вх}|^2} \int_0^{\pi/2} \sin \theta d\theta \int_0^{2\pi} \left(\left| \sum_{l=1}^N I_l F_{\theta}^l \right|^2 + \left| \sum_{l=1}^N I_l F_{\varphi}^l \right|^2 \right) d\varphi, \quad (6)$$

Δ — длина одного участка, $I_{вх}$ — ток на входе вибратора, F_{θ} и F_{φ} — диаграммы направленности для θ -й и φ -й компонент поля в дальней зоне для диполя Герца, произвольно ориентированного в пространстве,

$$F_{\theta}^l = \cos \theta_l \sin \theta [1 + R_{\parallel} \exp(-2iz_l \cos \theta)] e^{i\psi} - \cos \theta \sin \theta_l \cos(\varphi - \varphi_l) \times \\ \times [1 - R_{\parallel} \exp(-2iz_l \cos \theta)] e^{i\psi}; \quad (7)$$

$$F_{\varphi}^l = \sin \theta_l \sin(\varphi - \varphi_l) [1 + R_{\perp} \exp(-2iz_l \cos \theta)] e^{i\psi}, \quad (8)$$

θ_l и φ_l — углы, характеризующие направление l -го элемента с током I_l в сферической системе координат,

$$\psi = \sin \theta (x_l \cos \varphi + y_l \sin \varphi), \quad (9)$$

x_l , y_l и z_l — координаты l -го элемента.

Эти соотношения соответствуют предположению, что распределение тока в вибраторе кусочно-постоянное. При расчетах диаграмм направленности такое приближение не приводит к сколько-нибудь заметным ошибкам, если $\Delta < 0,2 \lambda$.

Полученные по формулам (5)–(9) зависимости для различно ориентированных вибраторов приведены на рис. 8 сплошными линиями.

Рис. 8а — случай вертикального вибратора ($\theta = 0$), кривая 1 соответствует $H/L = 0,54$, 2 — 0,75, и 3 — 1,0.

Рис. 8б — горизонтальный вибратор, 1 — $H/L = 0,04$, 2 — 0,08, 3 — 0,16, 4 — 0,32, 5 — 0,54, 6 — 0,64.

Рис. 8в — наклонный вибратор, 1 — $\theta = 0$, 2 — 30° , 3 — 60° , 4 — 90° , $H/L = 0,54$.

Эти кривые, определенные по рассчитанным токораспределениям, интересно сравнить с аналогичными зависимостями, полученными в приближении синусоидального распределения методом наводимых

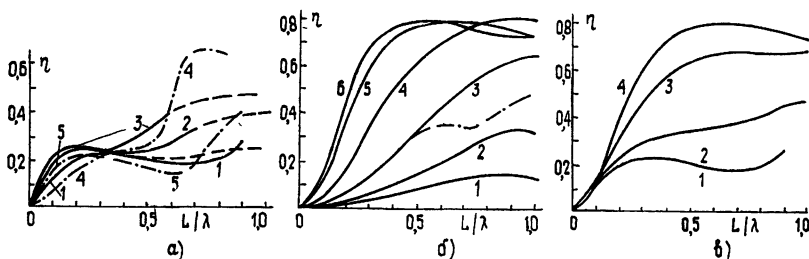


Рис. 8.

ЭДС. В [3] приведены такие зависимости для горизонтального вибратора. Оказалось, что данные [3] практически полностью совпадают с результатами, показанными на рис. 8б. Для вертикального вибратора метод расчета, приведенный в [4], был обобщен на случай вибратора произвольной длины (в [4] даны зависимости КПД только для диполя Герца и полуволнового вибратора). Полученные зависимости показаны на рис. 8а штриховыми линиями. При больших H они совпадают с соответствующими кривыми. При $H/L = 0,54$ на больших L/λ отмечаются существенные расхождения. Это связано с асимметрией распределения тока в вибраторе и, как следствие, с искажением диаграммы направленности, не учитываемыми в рамках приближения [4].

Одновременно с расчетом КПД метод наводимых ЭДС позволяет определять входное сопротивление и сопротивление излучения вибратора. При сравнении оказалось, что эти величины при $L/\lambda > 0,4$ далеки от данных, полученных по нашей методике, хотя зависимости для КПД и совпадают.

Это объясняется тем, что в методе наводимых ЭДС величины R_{Σ} и R_{Π} являются интегралами от токораспределения, и изменения последнего одинаковым образом сказываются и на числитель и на знаменатель, мало влияя на значение КПД.

Все описанные выше результаты относились к вибраторам с симметричной запиткой. Проводились расчеты и для асимметричного питания. Их результаты показаны на рис. 8а и 8б штрихпунктиром. На рис. 8а кривая 4 соответствует запитке второго снизу участка, 5 — десятого ($H/L = 0,54$), на рис. 8б — второго участка ($H/L = 0,16$).

В коротком ($L/\lambda < 0,5$) горизонтальном вибраторе смещение точки питания не приводит к заметным изменениям КПД. Однако с удлинением антенны КПД перестает расти. В вертикальном вибраторе изменение запитки сказывается иначе. КПД в этом случае оказывается тем больше, чем на большем расстоянии от поглощающей поверхности находится пучность тока.

На основании изложенного можно сделать следующие выводы, касающиеся свойств вибраторов вблизи поверхности раздела:

1) Распределение тока в вибраторе близко к синусоидальному и почти не зависит от потерь в проводящем полупространстве.

2) Обнаружен рост реальной компоненты входного импеданса горизонтального вибратора при одновременном уменьшении его размера и высоты подвеса.

Помимо этого на основании работы [1] и настоящей статьи следует отметить:

1) При расчетах вибраторов строгий учет влияния поверхности раздела вносит существенные коррективы по отношению к идеализированным методам расчета. В частности, описанная методика не может быть заменена методом наводимых ЭДС для вибраторов с $L/\lambda > 0,4$.

2) Описанная методика оказалась достаточно эффективной при расчетах вибраторов на ЭВМ и, несмотря на свою строгость, требует малых затрат машинного времени, и доступна для применения даже на мини-ЭВМ. Достаточно сказать, что расчет токораспределения на мини-ЭВМ М-6000, на которой и были проведены все вычисления для настоящей работы, требует при $N = 11$ около трех минут.

В заключение автор выражает благодарность Л. Г. Содину, под руководством которого выполнена настоящая работа.

ЛИТЕРАТУРА

1. Рашковский С. Л. — Изв. вузов — Радиофизика, 1980, 23, № 7, с. 841.
2. Роровиц В. О. — Radio Electronic Engineer., 1976, 46, № 11, p. 553.
3. Содин Л. Г. В кн.: Антенны /Под ред А. А. Пистолькорса. — М.: 1976. — Вып. 24, с. 19.
4. Hansen J. M. — IEEE Trans. Antennas and Propagation, 1972, AP-20, № 6, p. 767.

Институт радиофизики и электроники
АН УССР

Поступила в редакцию
13 марта 1980 г.

CHARACTERISTICS OF LINEAR VIBRATORS LOCATED CLOSE TO THE BOUNDARY OF TWO MEDIA

S. L. Rashkovskij

Characteristics are considered (current distribution, impedance, efficiency) of linear vibrators of small length with different orientation relative to infinite plane surface of two media separation. Characteristics are defined by the method of integral equation. Some generalizations of the mirror reflection method are given for the case of an ideally conducting screen
