

УДК 621.396.67

В.Г. Слезкин, доцент, канд. техн. наук; Е.А. Редькина

Севастопольский национальный технический университет

Студгородок, г. Севастополь, Украина, 99053

E-mail: rt.sevgtu@stel.sebastopol.ua

ПРИБЛИЖЕННЫЙ МЕТОД РАСЧЕТА ВХОДНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ВИБРАТОРНЫХ АНТЕНН С РАЗЛИЧНОЙ КОНФИГУРАЦИЕЙ ПЛЕЧ

Предложена методика расчета входного сопротивления вибраторных антенн, пригодная как для антенн типа симметричного вибратора, так и для разрезных вибраторов с плечами разной длины и разных размеров поперечного сечения. Метод может быть использован для расчета характеристик антенн с нагрузками в плечах и антенн с числом плеч, большим двух.

Известно, что при анализе входного сопротивления вибраторных антенн наиболее простым и широко используемым является метод эквивалентных схем, согласно которому анализируемой антенне ставится в соответствие некоторая эквивалентная цепь с распределенными и сосредоточенными параметрами. Значения параметров эквивалентной схемы рассчитываются или подбираются таким образом, чтобы входное сопротивление цепи наилучшим образом аппроксимировало входное сопротивление антенны в нужной полосе частот [1].

При всей простоте метода в литературе он рассматривается только применительно к симметричным вибраторным антеннам, поскольку при анализе вибраторов с нарушенной симметрией плеч имеет место неопределенность в выборе эквивалентной схемы антенны.

В данной работе предложена общая методика расчета входного сопротивления на основе метода эквивалентных схем, пригодная для несимметричных вибраторов и вибраторов, в плечи которых включены нагрузки [2].

Анализ вибраторов таких конфигураций представляет научный и практический интерес, поскольку они могут быть использованы для реализации антенн с диаграммами направленности (ДН) специальной формы [3] в системах телекоммуникации, радиолокации и др. На рисунке 1 изображены два вида конфигурации антенн, входное сопротивление которых анализируется. К подобным конструкциям могут быть сведены также антенны с числом плеч, большим двух, например, коллинеарные антенны.

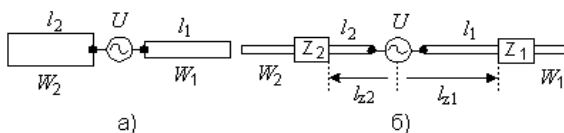


Рисунок 1 - Конфигурации рассматриваемых антенн

Конфигурация на рисунке 1,а соответствует несимметричному вибратору с разными волновыми сопротивлениями плеч: либо с различной толщиной плеч, либо с неодинаковой их длиной. Вариант, представленный на рисунке 1,б, соответствует несимметричному или симметричному вибратору, в плечи которого включены нагрузки.

В хорошо известном для симметричного вибратора с длиной плеча l варианте метода эквивалентных схем [1] вибратор заменяется разомкнутым отрезком линии передачи с потерями, имеющим такую же длину l . Волновое сопротивление линии без учета потерь W определяется по обычной формуле

$$W = 120 \left[\ln \left(\frac{l}{a} \right) - 1 \right],$$

где a – радиус плеча вибратора.

Считается, что потери в линии обусловлены только излучением и мало влияют на форму ДН, так что ДН можно определить, задавшись упрощенным синусоидальным распределением токов по плечам. По известной ДН методом Пойнтинга рассчитывается сопротивление излучения R_{Σ} , затем из условия равенства суммарных потерь и мощности излучения находится погонное сопротивление R_l . В комплексной постоянной распространения γ учитываются не только потери, но и изменение фазовой постоянной, обусловленное ближним полем вибратора

$$\gamma = \alpha + j\zeta k,$$

где $\alpha = R_l/W$ – эквивалентный коэффициент затухания; ζ – поправочный множитель фазы, определяемый по экспериментальным данным [1]; $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число.

В окончательной формуле для входного сопротивления разомкнутого отрезка линии значения волнового сопротивления Z_c уточняются введением потерь

$$Z_c = W \left(1 - j \frac{\alpha}{k} \right).$$

Таким образом, для входного сопротивления симметричного вибратора метод эквивалентных схем дает выражение

$$Z_{\text{вх}} = Z_c \operatorname{cth}(\gamma l). \quad (1)$$

Распространить данную методику на случай несимметричных структур можно, если рассматривать каждое плечо в отдельности и предположить, что в формуле для волнового сопротивления плеча $W_{\text{пл}}$ будет в два раза меньше, чем волновое сопротивление симметричного вибратора

$$W_{\text{пл}} = 60 \left[\ln \left(\frac{l}{a} \right) - 1 \right].$$

Данное предположение соответствует тому, что в эквивалентную схему включается плоский бесконечный экран а) между проводниками (рисунок 2,а). Если теперь генератор U разделить на два парциальных генератора $U = U_{10} + U_{12}$, включенных, соответственно, между проводом 1-0 и экраном; между проводом 1-2 и экраном (рисунок 2,б), то все противоречия, связанные с неодинаковостью волновых сопротивлений W_1 , W_2 и длин плеч l_1 , l_2 , снимаются. Окончательный результат можно получить, учтя условие непрерывности тока, протекающего через оба генератора. Волновые сопротивления линий с потерями при этом равны

$$Z_{c1,2} = W_{1,2} (1 - j \frac{\alpha_{1,2}}{k}) .$$

Распределения тока $i(z)$ и напряжения $u(z)$ каждого проводника в эквивалентной схеме соответствуют решениям телеграфных уравнений для линии с потерями

$$\begin{cases} i(z) = I_S \operatorname{ch}[\gamma(z - z_S)] + \frac{U_S}{Z_{c1}} \operatorname{sh}[\gamma(z - z_S)] , \\ u(z) = I_S Z_{c1} \operatorname{sh}[\gamma(z - z_S)] + U_S \operatorname{ch}[\gamma(z - z_S)] , \end{cases} \quad (2)$$

где z_S – сечение линии, в котором известны ток I_S и напряжение U_S ; z – координата, отсчитываемая к генератору.

Для упрощения выкладок примем за единицу амплитуду тока в пучности первого плеча $I_{n1} = 1$, тогда амплитуда тока в пучности второго плеча I_{n2} будет численно равна значению вводимого в рассмотрение коэффициента K , который можно найти при том условии, что ток на концах плеч обращается в нуль, а в точке питания распределение тока непрерывно. Распределения тока и напряжения по плечам 1-0 и 1-2 имеют вид:

$$\begin{cases} I_{10}(z) = \operatorname{sh}(\gamma_1 z) \\ U_{10}(z) = Z_{c1} \operatorname{ch}(\gamma_1 z) , \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} I_{12}(z) = K \operatorname{sh}(\gamma_2 z) \\ U_{12}(z) = K Z_{c2} \operatorname{ch}(\gamma_2 z) . \end{cases} \quad (4)$$

Из условия непрерывности распределения тока в точке питания схемы следует, что $I_{10}(l_1) = I_{12}(l_2)$, откуда можно найти K

$$K = \frac{\operatorname{sh}(\gamma_1 l_1)}{\operatorname{sh}(\gamma_2 l_2)} .$$

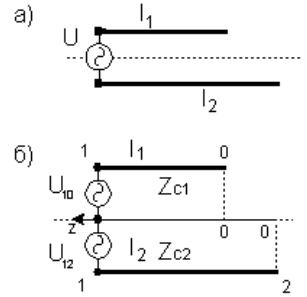


Рисунок 2 - Эквивалентная схема несимметричного вибратора

Входное сопротивление эквивалентной схемы найдем как отношение полного напряжения на зажимах генератора к току в точке питания:

$$Z_{BX} = \frac{U_{12}(l_2) + U_{10}(l_1)}{I_{10}(l_1)} = \frac{KZ_{C2}\text{ch}(\gamma_2 l_2) + Z_{C1}\text{ch}(\gamma_1 l_1)}{\text{sh}(\gamma_1 l_1)}. \quad (5)$$

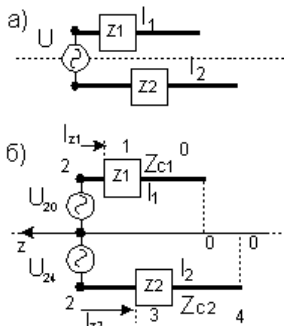


Рисунок 3 - Эквивалентная схема вибратора с нагрузками

Таким образом, несмотря на первоначальную неопределенность в значениях парциальных напряжений, точное соотношение между ними определять нет необходимости, хотя теперь это не представляет труда. Соотношение (5) при одинаковых плечах переходит в известное соотношение для входного сопротивления симметричного вибратора (1).

Представим теперь методику расчета входного сопротивления для вибратора с нагрузками (рисунок 3).

В эквивалентной схеме концы плеч, точки включения нагрузок и точку питания пронумеруем последовательно 0,1...4. Тогда полное напряжение U в точках питания будет складываться из парциальных напряжений U_{20} (на участке между точками 2 и 0) и U_{24} (на участке 2-4). Входное сопротивление по аналогии с (5) равно

$$Z_{BX} = \frac{U_{20}(l_1) + U_{24}(l_2)}{I_{20}(l_1)}. \quad (6)$$

Распределения тока и напряжения на отрезках 0-1 и 3-4 эквивалентной схемы повторяют распределения для несимметричного вибратора (3), (4), т.е.

$$\begin{cases} I_{10}(z) = \text{sh}(\gamma_1 z), \\ U_{10}(z) = Z_{C1}\text{ch}(\gamma_1 z), \\ I_{34}(z) = K \text{sh}(\gamma_2 z), \\ U_{34}(z) = K Z_{C2}\text{ch}(\gamma_2 z). \end{cases}$$

На нагрузках распределение тока непрерывно, а распределение напряжения претерпевает скачки величиной $I_{10}(l_1 - l_{z1}) \cdot Z_1$ и $I_{34}(l_2 - l_{z2}) \cdot Z_2$. Используя решения телеграфных уравнений (2), можем записать распределения тока и напряжения по плечам. Значения тока I_{S1} и напряжения U_{S1} в сечении нагрузки для первого плеча равны

$$I_{S1} = I_{10}(l_{K1}) = \text{sh}(\gamma_1 l_{K1}),$$

$$U_{S1} = U_{10}(l_{K1}) + I_{10}(l_{K1})Z_1 = Z_{C1}\text{ch}(\gamma_1 l_{K1}) + I_{S1}Z_1,$$

где $l_{K1} = l_1 - l_{z1}$, $l_{K2} = l_2 - l_{z2}$.

Значения тока I_{S2} и напряжения U_{S2} в сечении нагрузки для второго плеча запишутся как

$$I_{S2} = I_{34}(l_{K2}) = K \operatorname{sh}(\gamma_2 l_{K2}),$$

$$U_{S2} = U_{34}(l_{K2}) + I_{34}(l_{K2})Z_2 = K Z_{c2} \operatorname{ch}(\gamma_2 l_{K2}) + I_{S2}Z_2.$$

Таким образом, распределения тока и напряжения по плечам можно записать в виде:

$$\begin{cases} I_{20}(z) = I_{S1} \operatorname{ch}[\gamma_1(z - l_{K1})] + \frac{U_{S1}}{Z_{c1}} \operatorname{sh}[\gamma_1(z - l_{K1})], \\ U_{20}(z) = U_{S1} \operatorname{ch}[\gamma_1(z - l_{K1})] + I_{S1} Z_{c1} \operatorname{sh}[\gamma_1(z - l_{K1})]; \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} I_{24}(z) = I_{S2} \operatorname{ch}[\gamma_2(z - l_{K2})] + \frac{U_{S2}}{Z_{c2}} \operatorname{sh}[\gamma_2(z - l_{K2})], \\ U_{24}(z) = U_{S2} \operatorname{ch}[\gamma_2(z - l_{K2})] + I_{S2} Z_{c2} \operatorname{sh}[\gamma_2(z - l_{K2})]. \end{cases} \quad (8)$$

Подставив значения токов и напряжений в точке питания из выражений (7) и (8) в формулу (6), получим выражение для расчета входного сопротивления вибратора, в плечи которого включены нагрузки

$$Z_{BX} = \frac{[Z_{c1} \operatorname{ch}(\gamma_1 l_{K1}) + Z_1 \operatorname{sh}(\gamma_1 l_{K1})] \operatorname{ch}(\gamma_1 l_{Z1}) + Z_{c1} \operatorname{sh}(\gamma_1 l_{K1}) \operatorname{sh}(\gamma_1 l_{Z1}) + \operatorname{sh}(\gamma_1 l_{K1}) \operatorname{ch}(\gamma_1 l_{Z1}) + \left[\operatorname{ch}(\gamma_1 l_{K1}) + \frac{Z_1}{Z_{c1}} \operatorname{sh}(\gamma_1 l_{K1}) \right] \operatorname{sh}(\gamma_1 l_{Z1})}{+ \frac{K \cdot \{ [Z_{c2} \operatorname{ch}(\gamma_2 l_{K2}) + Z_2 \operatorname{sh}(\gamma_2 l_{K2})] \operatorname{ch}(\gamma_2 l_{Z2}) + Z_{c2} \operatorname{sh}(\gamma_2 l_{K2}) \operatorname{sh}(\gamma_2 l_{Z2}) \}}{\operatorname{sh}(\gamma_1 l_{K1}) \operatorname{ch}(\gamma_1 l_{Z1}) + \left[\operatorname{ch}(\gamma_1 l_{K1}) + \frac{Z_1}{Z_{c1}} \operatorname{sh}(\gamma_1 l_{K1}) \right] \operatorname{sh}(\gamma_1 l_{Z1})}},$$

$$\text{где } K = \frac{\operatorname{sh}(\gamma_1 l_{R1}) \operatorname{ch}[\gamma_1 l_{Z1}] + \left\{ \operatorname{ch}(\gamma_1 l_{K1}) + \frac{Z_1}{Z_{c1}} \operatorname{sh}(\gamma_1 l_{K1}) \right\} \operatorname{sh}[\gamma_1 l_{Z1}]}{\operatorname{sh}(\gamma_2 l_{R2}) \operatorname{ch}[\gamma_2 l_{Z2}] + \left\{ \operatorname{ch}(\gamma_2 l_{K2}) + \frac{Z_2}{Z_{c2}} \operatorname{sh}(\gamma_2 l_{K2}) \right\} \operatorname{sh}[\gamma_2 l_{Z2}]} - \text{отноше-}$$

ние токов в пучности, найденное из условия непрерывности токов в точке питания.

Таким образом, предложен приближенный метод расчета входного сопротивления вибраторных антенн, который представляет собой вариант известного метода эквивалентных схем, обобщенный на случай вибраторов с нарушенной симметрией плеч, в том числе с нагрузками, включенными в произвольных сечениях плеч. Правомерность такого обобщения доказывается тем, что в его основу заложено введение плоскости с нулевым абсолютным потенциалом между проводниками эквивалентной двухпроводной линии передачи, а такая плоскость не нарушает физических условий передачи электромагнитной волны.

Перспективами дальнейшего исследования в данном направлении является обобщение предложенного метода расчета входного сопротивления для анализа характеристик антенн сложных конструкций, в частности, коаксиально-коллинеарных антенн.

Библиографический список

1. Сазонов Д.М. Антенны и устройства СВЧ/ Д.М. Сазонов. — М.: Высш. шк., 1988. — 432 с.
2. Овсяников В.В. Вибраторные антенны с реактивными нагрузками / В.В. Овсяников. — М.: Радио и связь, 1985. — 120 с.
3. Мишустин Б.А. Оптимизация характеристик излучения коаксиальных коллинеарных антенн с последовательными делителями питания / Б.А. Мишустин, Е.А. Редькина, В.Г. Слезкин // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии: Материалы 12-ой междунар. конф. КрыМиКо-2002, Севастополь, 12 сент. 2002 г. — Севастополь, 2002. — С. 347–348

Поступила в редакцию 1.04.2004 г.