



УДК 539.143.539.183

М. В. Афанасьев, А. А. Штилевой, А. А. Попов

## ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ ВИБРАТОРНОЙ АНТЕННЫ В РЕЖИМЕ БЕГУЩЕЙ ВОЛНЫ

*Рассмотрены особенности работы несимметричного вибратора. Выполнен анализ различных рабочих режимов. Произведен расчет оптимальной модели антенны.*

*Features of work of the asymmetrical vibrator are considered. The analysis of various operating conditions is made. Calculation of optimal model of the aerial is made.*

**Ключевые слова:** несимметричный вибратор, полоса пропускания, электрическая емкость антенны, режим бегущей волны.

**Key words:** the asymmetrical vibrator, a pass-band, electric capacity of the aerial, a running wave mode.

Несимметричный вибратор получил широкое практическое применение в различных диапазонах радиочастотного спектра из-за ряда положительных свойств. К ним следует отнести малые размеры и массу, высокую направленность и т.п. В то же время недостатком несимметричного вибратора являются его низкие диапазонные характеристики. Действительно, входное сопротивление антенны  $Z_A = R_A + jX_A$  имеет активное сопротивление только в режиме собственной длины волны, когда рабочая длина волны связана с длиной вибратора соотношением  $\lambda = 4l_B$ , или на одной частоте, зависящей от длины вибратора  $f = c/\lambda = c/4l_B$ , где  $c$  — скорость света в свободном пространстве. Следовательно, несимметричный вибратор в основном работает в режиме удлинения и сильного удлинения, то есть его длина всегда намного меньше четверти рабочей длины волны:

$$\frac{\lambda}{4} \gg l_B. \quad (1)$$

Условие (1) свидетельствует о том, что при работе на излучение антенна является электрически короткой. Как известно, электрически короткие вибраторы обладают входным емкостным сопротивлением, поэтому их удлиняют путем сосредоточенного включения индуктивного сопротивления в виде катушки индуктивности. При этом эффективность излучения антенны резко падает, так как в ее работе участвуют одновременно электрический и магнитный излучатели. Для улучшения диапазонных свойств антенны, определяемых выражением

$$2\Delta f = \frac{\pi}{4} \cdot f_0 \cdot \frac{R_A}{W_A},$$

применяются следующие способы:



- увеличение активного сопротивления антенны  $R_A$  (то есть увеличение затухания в ней);
- уменьшение волнового сопротивления  $W_A$  путем увеличения емкости антенны;
- согласование входного сопротивления антенны  $Z_A$  с волновым сопротивлением питающего фидера;
- включение катушек с двойным назначением (как для увеличения длины в низкочастотной области рабочего диапазона, так и для укорочения длины антенны в высокочастотной области);
- включение индуктивных шунтов для компенсации входного емкостного сопротивления антенны в низкочастотной части рабочего диапазона;
- включение емкостных штырей для компенсации входного индуктивного сопротивления антенны в высокочастотной части рабочего диапазона.

При использовании антенны в максимально широком диапазоне частот наиболее приемлемым является режим собственной длины волны, поскольку режимы удлинения и укорочения снижают эффективность работы излучателя. Это относится прежде всего к распределению суммарного тока вдоль излучателя, величина которого уменьшается. В результате уменьшается излученная мощность, действующая высота антенны и коэффициент полезного действия. При этом основными требованиями к электрическим параметрам антенны являются:

- входное сопротивление антенны  $Z_A$  не зависит от частоты;
- ток антенны  $I_A$  близок к режиму бегущей волны.

Первое требование реализуется в практике построения антенн путем механического изменения длины вибратора [1, с. 47]. Второе требование предусматривает создание режима бегущей волны для тока в антенне. В этом случае входное сопротивление антенны чисто активное, равное волновому сопротивлению антенны и волновому сопротивлению фидера  $W_0$ , то есть  $Z_A(\omega) = R_A(\omega) + jX_A = W_A \approx W_0$ .

Пусть имеется несимметричный вибратор с распределением тока в режиме бегущей волны. Такой режим может быть достигнут путем подключения на конце нагрузочного сопротивления, равного его волновому сопротивлению (рис.).

Пусть вибратор возбуждается генератором ЭДС напряжением  $U_A$ , которое приводит к протеканию вдоль него электрического тока. Распределение тока, протекающего вдоль вибратора, определяется выражением

$$I(x) = I_A \cdot e^{-jkx}. \quad (2)$$

Влияние излучения на входное сопротивление такой антенны определяется коэффициентом затухания

$$\beta = \frac{R_{\Sigma\Pi}}{2W_A}.$$

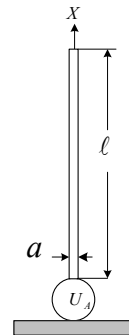


Рис. Несимметричный вибратор



$$\text{Емкость несимметричного вибратора } C = \frac{4\pi\epsilon \cdot \ell}{2(\ln \frac{\ell}{a} - 1)}.$$

$$\text{Волновое сопротивление } W_A = \sqrt{L_A / C_A} : W_A = 60(\ln \frac{\ell}{a} - 1).$$

Очевидно, что режим бегущей волны будет одним из самых оптимальных вариантов работы несимметричного вибратора.

На основе выражения (2) входное сопротивление  $Z_A$  и сопротивление излучения, отнесенные к току на входе  $I_A$ , можно представить в виде

122

$$Z_A = -\frac{1}{|I_A|^2} \int_0^l I(x) \cdot E_\tau(x) dx Z_\Sigma, \quad Z_\Sigma = -\frac{1}{|I_A|^2} \int_0^l I^*(x) \cdot E_\tau(x) dx, \quad (3)$$

где  $E_\tau(x)$  – распределение тангенциальной относительно провода составляющей электрического поля, определенного заданным распределением тока. После решения выражений (3) формулы сопротивления антенны и его сопротивление излучения выражается в следующем виде:

$$Z_A = -60 \left\{ \begin{aligned} & \left[ \begin{aligned} & Cix(2\ell + \sqrt{4\ell^2 + a^2}) - 2Cix(\ell + \sqrt{\ell^2 + a^2}) + Cika - jSik(2\ell + \sqrt{2\ell^2 + a^2}) + \\ & 2jSik(\ell + \sqrt{\ell^2 + a^2}) - jSika + \frac{\cos \kappa(2\ell + \sqrt{4\ell^2 + a^2})}{2jk\sqrt{\ell^2 + a^2}} - \frac{\cos \kappa(\ell + \sqrt{\ell^2 + a^2})}{2jk\sqrt{\ell^2 + a^2}} \end{aligned} \right] \\ & - j \frac{\sin \kappa(2\ell + \sqrt{4\ell^2 + a^2})}{2jk\sqrt{4\ell^2 + a^2}} + j \frac{\sin \kappa(\ell + \sqrt{\ell^2 + a^2})}{2jk\sqrt{\ell^2 + a^2}} + \\ & e^{-2jk\ell} \left[ \frac{\cos \kappa(\sqrt{\ell^2 + a^2} - \ell)}{2jk\sqrt{\ell^2 + a^2}} - \frac{\cos \kappa a}{2jka} + j \frac{\sin \kappa(\sqrt{\ell^2 + a^2} - \ell)}{2jk\sqrt{\ell^2 + a^2}} + \frac{j \sin \kappa a}{2jka} \right] \end{aligned} \right\},$$

$$Z_\Sigma = -60 \left\{ \begin{aligned} & \left[ \begin{aligned} & Cix(\ell + \sqrt{4\ell^2 + a^2}) + Cix(\sqrt{\ell^2 + a^2} - \ell) - 2Cika - jSik(\ell + \sqrt{2\ell^2 + a^2}) - \\ & - jSik(\sqrt{\ell^2 + a^2} - \ell) + 2jSika + \frac{\cos \kappa(\sqrt{4\ell^2 + a^2} - \ell)}{2jk\sqrt{\ell^2 + a^2}} \end{aligned} \right] \\ & - \frac{\cos \kappa a}{2jka} \cdot \frac{j \sin \kappa(\sqrt{\ell^2 + a^2} - \ell)}{2jk\sqrt{\ell^2 + a^2}} + j \frac{\sin \kappa a}{2jka} + \\ & + e^{-2jk\ell} \left[ \begin{aligned} & \frac{\cos \kappa(2\ell + \sqrt{4\ell^2 + a^2})}{2jk\sqrt{4\ell^2 + a^2}} - \frac{\cos \kappa(\ell + \sqrt{\ell^2 + a^2})}{2jk\sqrt{\ell^2 + a^2}} \end{aligned} \right] \\ & - j \frac{\sin \kappa(\sqrt{4\ell^2 + a^2} + 2\ell)}{2jk\sqrt{4\ell^2 + a^2}} + \frac{j \sin \kappa(\ell + \sqrt{\ell^2 + a^2})}{2jk\sqrt{\ell^2 + a^2}} \end{aligned} \right\},$$

где  $Six$  – интегральный синус от аргумента  $x$ ;  $Cix$  – интегральный косинус от аргумента  $x$ . Таким образом, использование режима бегущей волны совместно с увеличением суммарной емкости антенны позволит не только оптимизировать работу антенны, но и существенно улучшить ее характеристики.



Зависимость емкости несимметричного вибратора, как и распределение тока, носит синусоидальный характер: то есть максимальна в основании и стремится к нулю на конце.

Зная полную емкость и характер ее распределения, можно вычислить частные значения емкости вдоль штывра антенны в программе Maple. Расчеты показывают, что для улучшения диапазонных свойств вертикальный штывр целесообразно заменить спиралью, емкость которой можно увеличить при помощи перехода от проводника кругового сечения к плоским кольцам. Емкость такого проводника определится выражением

$$\frac{C_0}{8\epsilon b} \approx \frac{\pi^2}{4} \left(1 + \frac{a}{b}\right) \left[ \ln \left( 16 \frac{1 + \frac{a}{b}}{1 - \frac{a}{b}} \right) \right]^{-1} \quad \text{при } b/a > 1,5; \quad (4)$$

$$\frac{C_0}{8\epsilon b} \approx \left(1 - 0,003 \frac{a}{b}\right) \left[ 1 - 0,08 \left(\frac{a}{b}\right)^3 \right] \quad \text{при } b/a < 1,5, \quad (5)$$

где  $a$  и  $b$  — радиусы внутреннего и внешнего колец соответственно.

На основе формул (4) и (5) получаем зависимость  $C_0/(8\epsilon b)$  от  $b/a$ , представленную в нижеследующей таблице.

**Зависимость  $C_0/(8\epsilon b)$  от  $b/a$**

$b/a$	$C_0/(8\epsilon b)$
1,021	0,6667
1,091	0,8011
1,125	0,8326
1,2	0,8776
1,25	0,8976
1,50	0,9494
2,0	0,9810

По результатам исследования можно сформулировать следующие критерии выбора размера кольца:

1) выбор  $a$  и  $b$  эффективен при отношении  $a/b > 1,3$ , при  $a/b > 2$  емкость меняется незначительно;

2) значение емкости в большей степени зависит от  $bC_0/(8\epsilon b)$ ;

3) от  $b$  однозначно зависят конечные размеры антенны, что делает этот параметр основным при выборе кольца, то есть  $b$  необходимо сделать минимально возможным для получения данной емкости;

4)  $a$  выбираем максимально возможным, не нарушая критерии 1 и 3.

Таким образом, исследование этой модели несимметричного вибратора является перспективным и открывает новые возможности использования штывровых антенн почти во всех радиочастотных диапазонах. Дальнейшая разработка данного метода и совмещение его с другими направлениями дает возможность получить антенны с принципиально новыми свойствами.



### Список литературы

1. Муравьев Ю. К. Антенные устройства для радиосвязи. М., 1998.

### Об авторах

Максим Васильевич Афанасьев – асп., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, e-mail: m.afanasiev@kl.nw.rt.ru.

Андрей Алексеевич Шpileвой – канд. физ.-мат. наук, доц., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, e-mail: AShpilevoi@kantiana.ru.

Андрей Алексеевич Попов – ассист., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, e-mail: APopov@kantiana.ru.

### Authors

Maxim Afanasiev – PhD student, I. Kant Baltic Federal University, e-mail: m.afanasiev@kl.nw.rt.ru.

Dr Andrey Shpilevoy – assistant professor, I. Kant Baltic Federal University, e-mail: AShpilevoi@kantiana.ru.

Andrey Popov – assistant, I. Kant Baltic Federal University, e-mail: APopov@kantiana.ru.