НАПРАВЛЕННАЯ АНТЕННА ДЛЯ РАДИОСВЯЗИ СПИСЧИКА ВАГОНОВ

С. Е. Токарь
Харьков

При установке стационарной антенны круга радиосвязи списчика вагонов в горловине парка применение ненаправленной антенны нерационально. Более всего здесь подходит антенна слабо выраженного направленного действия с односторонним излучением, у которой диаграмма направленности имеет форму кардиоиды. Ниже приводится описание такой антенны для частот диапазона 36—46 *Мгц*.

Двухэлементная антенна направленного действия с активным рефлектором

Схематическое изображение антенны приведено на рис. 1.

Антенна представляет собой два полуволновых вибратора, расположенных в вертикальной плоскости на расстоянии четверти длины волны.

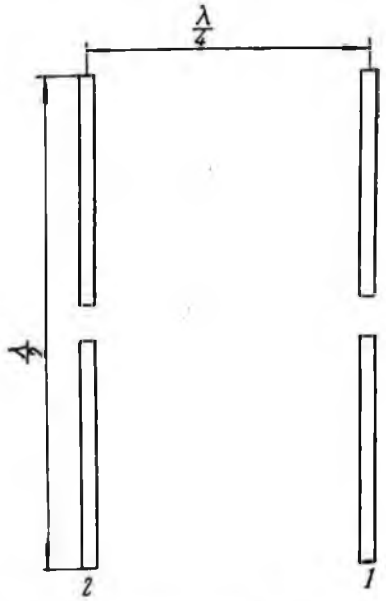

Рис. 1. Схематическое изображение антенны.

Из теории антенн известно, что диаграмма направленности (в горизонтальной плоскости) такой системы вибраторов имеет форму кардиоиды в том случае, когда амплитуды токов в обоих вибраторах одинаковы, а фазы токов отличаются на 90°. Это условие выполняется для активных вибраторов. Например, излучение будет происходить преимущественно в сторону вибратора *1*, если фаза тока в вибраторе *2* опережает фазу тока в вибраторе *1* на 90°. Вибратор *2* при этом играет роль активного рефлектора.

Входные сопротивления при идентичных вибраторах определяются соотношениями [1]:

$$Z_{01} = Z + jZ_{в};$$
$$Z_{02} = Z - jZ_{в}, \qquad (1)$$

где $Z = R + jx$ — собственное сопротивление вибраторов;
$Z_{в} = R_{в} + jx_{в}$ — взаимное сопротивление вибраторов.

Если в точках питания антенны включаются реактивные элементы для настройки вибраторов $Z_{н1} = jx_{н1}$; $Z_{н2} = jx_{н2}$, формулы для входных сопротивлений приобретают вид

$$Z_1 = R - x_в + j(x + x_{н1} + R_в) = R_1 + jx_1;$$
$$Z_2 = R + x_в + j(x + x_{н2} - R_в) = R_2 + jx_2. \quad (2)$$

Схема питания антенны

Антенна соединяется с передатчиком коаксиальным фидером, что требует применения симметрирующих устройств.

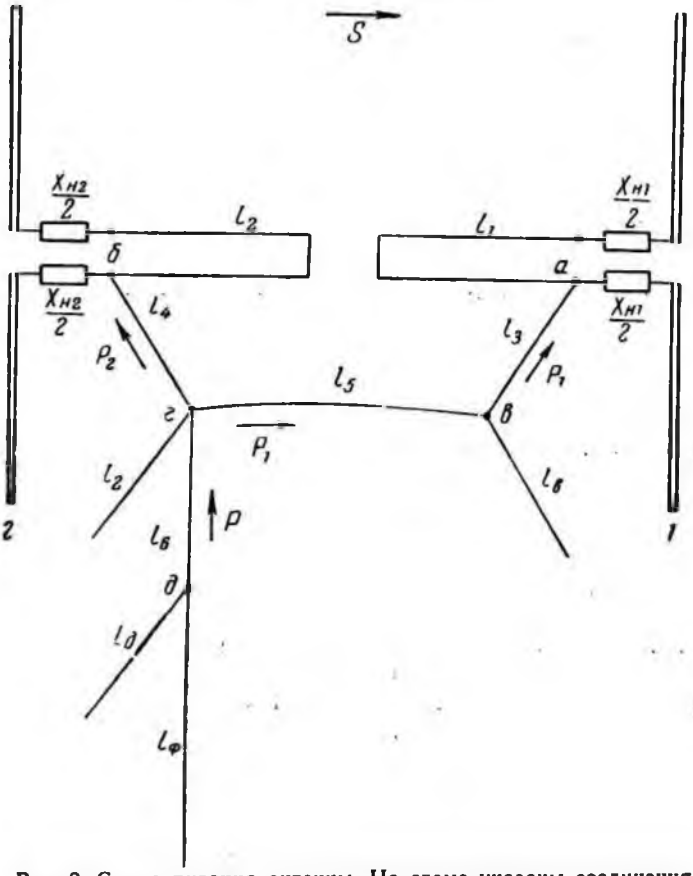

Рис. 2. Схема питания антенны. На схеме указаны соединения центральных жил коаксиальных кабелей.

Устройство согласования входных сопротивлений вибраторов с волновым сопротивлением питающего фидера должно обеспечивать необходимое соотношение амплитуд и фаз токов в вибраторах.

На рис. 2 приведена одна из возможных схем питания антенны, где трансформация сопротивлений осуществляется отрезками коаксиального кабеля. На рисунке приведены следующие обозначения:

$x_{н1}$, $x_{н2}$ — реактивные сопротивления для настройки вибраторов;

l_1, l_2 — симметрирующие U-колена, выполненные из отрезков коаксиального кабеля;

l_3, l_4, l_5, l_6 — соединительные трансформирующие отрезки коаксиального кабеля;
а, *б*, *в*, *г*, *д* — узловые точки схемы питания антенны;
$l_в$, $l_г$, $l_д$ — компенсирующие отрезки коаксиального кабеля;
$l_ф$ — питающий (главный) фидер.

Стрелками на схеме показано распределение мощностей в системе питания антенны и направление максимального излучения антенны. Активным рефлектором является вибратор *2*.

Величину реактивных сопротивлений настройки $x_{н1}$ и $x_{н2}$ определяем из условий

$$x_1 = x + x_{н1} + R_в = 0; \tag{3}$$

$$x_2 = x + x_{н2} - R_в = 0. \tag{4}$$

Длина отрезков кабеля, образующих *U*-колена, равна

$$l_1 = l_2 = \frac{1}{2}\frac{\lambda}{\xi}, \tag{5}$$

где ξ — коэффициент укорочения волны в кабеле $\left(\lambda_к = \frac{\lambda}{\xi}\right.$ — длина волны в кабеле$\left.\right)$.

При включении симметрирующих отрезков входные сопротивления настроенных вибраторов, приведенные к точкам *а* и *б*, окажутся равными

$$R_а = \frac{1}{4}R_1;\ R_б = \frac{1}{4}R_2. \tag{6}$$

Равенство амплитуд токов в вибраторах влечет за собой равенство входных токов в точках *а* и *б*, что возможно при выполнении условия

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{R_а}{R_б}, \tag{7}$$

где P_1 и P_2 — входные мощности в точках а и б соответственно. Сумма мощностей P_1 и P_2 должна быть равна мощности P, поступающей из главного фидера в узловую точку *г* (потерями в отрезках кабеля пренебрегаем). Так как амплитуда напряжения в точке *г* постоянна, условие (7) может быть выполнено, если отношение активных составляющих входных проводимостей разветвлений *га* и *гб* будет равно

$$\frac{G_{га}}{G_{гб}} = \frac{R_а}{R_б}. \tag{8}$$

Реактивные составляющие входных проводимостей в узловой точке г, являющиеся результатом трансформации сопротивлений $R_а$ и $R_б$, должны быть скомпенсированы.

Соединительные отрезки *га* и *гб* обеспечивают также разность хода волн, равную четверти длины волны, что необходимо для выполнения фазового условия возбуждения вибраторов.

Расчет схемы сводится к расчету длины соединительных и компенсирующих отрезков кабеля.

Пусть волновое сопротивление соединительных отрезков *га* и *гб* равно W. Условию (8) можно удовлетворить, выбрав одну из проводимостей произвольно. Выбираем $G_{га} = \frac{1}{W}$, что соответствует согласованию волнового сопротивления отрезка *га* с сопротивлением нагрузки $R_а$. Такое согласование достигается включением в точке *в*, где активная

составляющая проводимости нагруженного отрезка равна $\frac{1}{W}$, реактивного элемента, компенсирующего реактивную составляющую проводимости.

Длину отрезка l_3 находим по формуле

$$l_3 = \frac{\lambda_к}{2\pi} \operatorname{arctg} \sqrt{\frac{R_а}{W}}. \tag{9}$$

Реактивная составляющая проводимости в точке *в*, подлежащая компенсации:

$$B_в = \frac{R_а - W}{W\sqrt{R_а W}}. \tag{10}$$

При $R_а > W$ проводимость $B_в$ имеет емкостный характер. В качестве противофазного компенсирующего устройства следует взять индуктивность, при $R_а < W$ — емкость.

Короткозамкнутый отрезок кабеля с волновым сопротивлением W, используемый как компенсирующая индуктивность, имеет длину

$$l_в = \frac{\lambda_к}{2\pi} \operatorname{arctg} \frac{1}{W|B_в|}. \tag{11}$$

Длина разомкнутого отрезка, включенного как компенсирующая емкость:

$$l_в = \frac{\lambda_к}{2\pi} \operatorname{arcctg} \frac{1}{W|B_в|}. \tag{12}$$

Из соотношения (8) находим требуемую величину активной составляющей входной проводимости отрезка *гб*

$$G_{гб} = \frac{R_б}{R_а W}. \tag{13}$$

Полная входная проводимость отрезка *гб*, нагруженного на сопротивление $R_б$ [2]:

$$\bar{Y}_{гб} = \frac{R_б\left(1 + \operatorname{tg}^2 \frac{2\pi}{\lambda_к} l_4\right)}{R_б^2 + W^2 \operatorname{tg}^2 \frac{2\pi}{\lambda_к} l_4} + j \frac{\left(R_б^2 - W^2\right) \operatorname{tg} \frac{2\pi}{\lambda_к} l_4}{W\left(R_б^2 + W^2 \operatorname{tg}^2 \frac{2\pi}{\lambda_к} l_4\right)},$$

Из условия равенства активной составляющей этой проводимости требуемой величине (13) определяем длину отрезка l_4

$$l_4 = \frac{\lambda_к}{2\pi} \operatorname{arctg} \sqrt{\frac{WR_а - R_б^2}{W^2 - WR_а}}. \tag{14}$$

Реактивная составляющая проводимости $Y_{гб}$ должна быть скомпенсирована. Эта составляющая равна

$$B_{гб} = -\frac{\sqrt{\left(WR_а - R_б^2\right)\left(W^2 - WR_а\right)}}{WR_а}. \tag{15}$$

Соотношения (14) и (15) применимы в таких случаях:

1. $WR_а > R_б^2$; $W^2 > WR_а$;
2. $WR_а < R_б^2$; $W^2 < WR_а$;
3. $WR_а \neq R_б^2$; $W^2 = WR_а$.

В первом и втором случаях проводимость $B_{гб}$ имеет индуктивный характер и может быть скомпенсирована разомкнутым отрезком кабеля (с волновым сопротивлением W) длиной

$$l_г = \frac{\lambda_к}{2\pi} \operatorname{arcctg} \frac{1}{W\,|B_{гб}|}. \qquad (16)$$

При $W = R_а$ (третий случай) $l_4 = \frac{\lambda_к}{4}$. Отрезок *гб* будет представлять собой четвертьволновый трансформатор, трансформирующий сопротивление $R_б$ в чисто активную проводимость $G_{гб}$.

Суммарная проводимость в узловой точке *г* равна

$$G_г = \frac{1}{W}\left(1 + \frac{R_б}{R_а}\right).$$

Соответствующее ей сопротивление, равное

$$R_г = \frac{R_а W}{R_а + R_б}, \qquad (17)$$

надлежит согласовать с волновым сопротивлением питающего фидера.

Взяв для питающего фидера кабель с волновым сопротивлением, равным W, длину согласовывающего отрезка $l_в$ найдем по формуле

$$l_в = \frac{\lambda_к}{2\pi} \operatorname{arctg} \sqrt{\frac{R_а}{R_а + R_б}}. \qquad (18)$$

Реактивная составляющая входной проводимости в точке *д*

$$B_д = \frac{R_г - W}{W\sqrt{R_г W}}. \qquad (19)$$

Для расчета длины компенсирующего отрезка $l_д$ воспользуемся формулами (11) или (12) (в зависимости от знака $B_д$), заменив в них $B_в$ на $B_д$.

Взяв для отрезка l_5 кабель с волновым сопротивлением W, длину отрезка находим из условия

$$l_5 + l_3 - l_4 = \frac{\lambda_к}{4}. \qquad (20)$$

Пример расчета схемы питания антенны

Рассчитаем схему питания антенны для частоты тока $f = 45{,}5$ *мгц* ($\lambda = 6{,}59$ *м*).

Собственное сопротивление полуволнового вибратора, как известно, равно

$$Z = 73{,}1 + j42{,}5 \text{ ом}.$$

Взаимное сопротивление двух идентичных полуволновых вибраторов находим по графику [1]

$$Z_В = 40 - j30 \text{ ом}.$$

Входные сопротивления (1):

$$Z_{01} = 103{,}1 + j82{,}5 \text{ ом},$$
$$Z_{02} = 43{,}1 + j2{,}5 \text{ ом}.$$

Сопротивление настройки активного вибратора находим из условия (3)

$$x_{н1} = -82{,}5 \text{ ом}.$$

Соответствующая сопротивлению $x_{н1}$ емкость $C_{н1} = 42{,}5$ *пф*. В каждое плечо вибратора *1* необходимо включить емкость, равную $2C_{н1}$. Индуктивной составляющей входного сопротивления активного рефлектора можно пренебречь.

Для всех элементов схемы питания используем радиочастотный кабель марки РК-50-7-15 с волновым сопротивлением $W = 52$ *ом*. Коэффициент укорочения волны для радиочастотных кабелей с полиэтиленовой изоляцией $\xi = 1{,}52$.

Длина U-колен (5):

$$l_1 = l_2 = 2{,}17 \text{ м};$$

Сопротивления вибраторов, приведенные к точкам *а* и *б* (6):

$$R_а = 25{,}8 \text{ ом}; \quad R_б = 10{,}8 \text{ ом}.$$

Длина согласующего отрезка $l_3 = 0{,}42$ *м* (9). Проводимость $B_в = -1{,}38 \cdot 10^{-2}$ *сим* (10). Компенсация проводимости $B_в$ производится включением в точке *в* разомкнутого отрезка кабеля длиной $l_в = 0{,}42$ *м* (11). Длина трансформирующего отрезка $l_4 = 0{,}51$ *м* (14). Проводимость $B_{гб} = -1{,}84 \cdot 10^{-2}$ *сим* (15). Длина компенсирующего разомкнутого отрезка $l_г = 0{,}53$ *м* (16). Сопротивление нагрузки питающего фидера в точке *г* $R_г = 36{,}6$ *ом* (17). Согласующий отрезок $l_6 = 0{,}42$ *м* (18). Проводимость $B_д = -9{,}77 \cdot 10^{-3}$ *сим* (19). Длина разомкнутого компенсирующего отрезка $l_д = 0{,}32$ *м* (11). Из условия (20) находим длину отрезка $l_5 = 1{,}175$ *м*.

Конструкция антенны

В качестве вибраторов используются дюралюминиевые трубки с внешним диаметром 15 — 20 *мм*. Каждое плечо вибратора при помощи двух радиочастотных изоляторов типа ПР-1 крепится на раме из деревянных брусьев сечением 40 × 60 *мм*. На раме размещаются также элементы системы питания антенны. Для настройки активного вибратора используются керамические трубчатые конденсаторы типа КТК, вмонтированные (для защиты от атмосферных осадков) в герметизированный фарфоровый корпус от конденсаторов типа КБГ. Рама антенны крепится на деревянной мачте. На рис. 3 показана антенна, установленная на прожекторной мачте.



Рис. 3. Антенна, установленная на прожекторной мачте.

ЛИТЕРАТУРА

1. Г. Т. Марков. Антенны. Госэнергоиздат, 1960.
2. Б. П. Асеев. Колебательные цепи. Связьиздат, 1955.