

ТЕХНИЧЕСКАЯ ФИЗИКА

Д. М. ВЫСОКОВСКИЙ

**РЕЗОНАНС В СИСТЕМЕ СВЯЗАННЫХ ВИБРАТОРОВ И НАСТРОЙКА
АНТЕНН «ВОЛНОВОЙ КАНАЛ»**

(Представлено академиком М. А. Леонтовичем 1 IV 1954)

Несмотря на длительное время, прошедшее со времени изобретения антенн «волновой канал», физическая теория явлений, связанных с настройкой таких антенн, до настоящего времени не построена ⁽¹⁾. В. В. Татаринов ⁽²⁾ установил соотношение, определяющее оптимальную фазу тока в одном директоре. Фаза тока в директоре относительно тока активного вибратора выражается в виде

$$\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} d + \psi_0 \left(\frac{2l}{\lambda} \right), \quad (1)$$

где d — расстояние директора от активного вибратора. Если

$$\psi_0 \left(\frac{2l}{\lambda} \right) = 0, \quad (2)$$

то фаза тока директора с учетом запаздывания при распространении на пути d будет обеспечивать наиболее благоприятное синфазное сложение полей активного вибратора и директора в главном направлении (от активного вибратора к директору).

Диаграммы направленности антенн с системой директоров, рассчитанные в предположении выполнения условия (2), оказываются, однако, значительно более широкими, чем действительные. Отсюда следует, что условие (2) не выполняется при настройке антенны. Это подтвердилось при количественном расчете систем вибраторов ⁽³⁾. Для настроенных систем разность фаз токов в соседних вибраторах оказывается существенно больше, чем $(2\pi/d/\lambda)$. За счет этого диаграммы направленности антенн «волновой канал» получаются более узкими. Если при настройке максимальное усиление в главном направлении получается не при оптимальном соотношении фаз по (1) и (2), то это указывает, что максимальное усиление получается за счет увеличения амплитуд токов по сравнению с теми, которые имеются при фазах по указанному соотношению. Настройка зависит, таким образом, от амплитудно-фазовых соотношений. Исследование изменения амплитуд и фаз токов и связанных с ними других параметров антенны при настройке есть по существу исследование резонансных явлений в таких системах. Это вытекает также из общих представлений теории колебаний. Эти представления, однако, не применялись при разработке теории, так как в опубликованных работах настройка рассматривается только со стороны обеспечения необходимого соотношения фаз ⁽⁴⁾. Такая «фазовая» трактовка естественна для антенн из активных вибраторов, в которых амплитуды токов равны и настройка сводится только к подбору фаз. Эта привычная точка зрения, очень удобная для упрощения рассмотрения, переносится и на антенну «волновой канал», ввиду чего в теории этих антенн не учитывалась роль резонанса в самом процессе возбуждения токов и тот факт, что опти-

мальная настройка возможна только в полосе резонанса, когда в вибраторах антенны возбуждены токи значительной амплитуды и при тонком подборе быстро изменяющихся в полосе резонанса фаз оказывается возможным произвести настройку антенны.

На основании обобщения результатов количественного расчета различных систем вибраторов ⁽⁵⁾ оказалось возможным выявить основ-

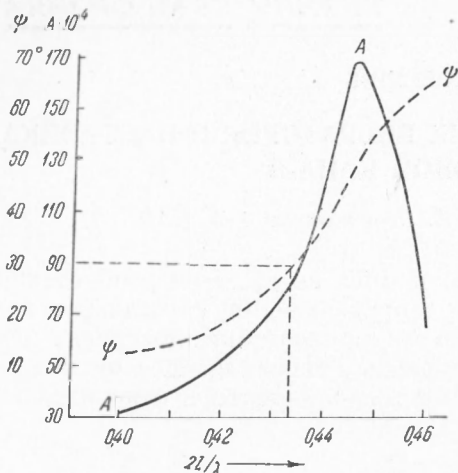


Рис. 1. Кривые усредненных амплитуд и фазовых углов

ные характеристики явления резонанса и установить критерии настройки системы вибраторов на максимум усиления в главном направлении. Расчеты были выполнены при расхождении между вибраторами $d = \lambda/3$ и все выводы относятся к настройке посредством изменения длины всех вибраторов. Для усредненных значений амплитуд и фаз токов в вибраторах построены резонансные кривые при изменении длины вибраторов $2l$ от $0,40$ до $0,46 \lambda$. Типичные резонансные кривые амплитуд и фаз векторов поля (с учетом запаздывания) приведены на рис. 1.

Для определения условий настройки необходимо рассмотреть условия сложения в главном направлении векторов поля от токов в вибраторах. Сумма фаз векторов поля с учетом запаздывания при распространении будет

$$\Phi_n = \sum_{m=1}^n (\varphi_{m-1} - \varphi_m - kd) = n\psi, \quad (3)$$

где d — расстояние между вибраторами; n — число директоров; ψ — усредненная величина фазового угла $[(\varphi_{m-1} - \varphi_m) - kd]_{\text{ср}}$; $k = 2\pi/\lambda$.

Возможны следующие случаи:

1. $0 \leq \Phi_n \leq \pi/2$. Векторы поля складываются почти синфазно. Такие условия получаются, когда в среднем $\varphi_{m-1} - \varphi_m \approx kd$, что имеет место для сильно укороченных вибраторов ($2l < 0,40 - 0,41 \lambda$). При среднем и малом числе директоров применение таких укорочений не эффективно, так как токи, возбуждаемые в директорах, малы. Однако для большого числа директоров ($n > 20$) наиболее эффективное сложение полей получается именно при значительных укорочениях, когда хорошо выполняется условие

$$n\psi \approx \frac{\pi}{2}. \quad (4)$$

Это условие означает, что ни один из векторов поля при сложении в главном направлении не дает проекции обратного знака на направление вектора поля активного вибратора. Это условие не представляется, однако, оптимальным, так как при его несоблюдении, несмотря на наличие в векторном полигоне слагаемых с отрицательной проекцией от последних вибраторов, суммарное усиление может оказаться большим за счет более быстрого роста амплитуд токов.

2. Оптимальная настройка во всех случаях получается, очевидно, в области

$$\frac{\pi}{2} \leq \Phi_n \leq \pi. \quad (5)$$

При таком условии векторы поля складываются несинфазно. Однако, если при этом $\psi \approx \pi/n$, что имеет место для директоров со средними укорочениями $(0,42-0,44\lambda)$, то при настройке получается максимум усиления за счет больших амплитуд тока. Соблюдение условия $\psi \approx \pi/n$ при средних укорочениях возможно для небольшого и среднего числа вибраторов.

3. $\psi \rightarrow 2\pi/n$. При мало укороченных вибраторах $(0,445-0,46\lambda)$ это соотношение имеет место и для небольшого числа директоров, начиная с $n = 1$. Условие $n\psi \approx 2\pi$ эквивалентно условию замыкания полигона векторов поля для главного направления. Поэтому при таких мало укороченных директорах в главном направлении получается не максимум, а минимум поля, и система полностью теряет направленность.

Таким образом, определение точных условий настройки антенны состоит в определении оптимального соотношения амплитуд и фаз в полосе резонанса для данной системы вибраторов, при котором получается максимальное усиление в главном направлении.

Таблица 1
Данные по рис. 1

	Интервалы настройки $2l/\lambda$				
	0,41—0,42	0,42—0,43	0,43—0,435	0,435—0,44	0,44—0,445
$\Delta A \cdot 10^4$	13	23	14	38	43
$A \cdot 10^4$	45	63	82	108	148
$\Delta A/A$	0,29	0,36	0,17	0,35	0,29
$\Delta\varphi$, градусов	5	6	8	5	10
φ , градусов	136	142	149	155	163
$\Delta\varphi/\varphi$	0,037	0,04	0,054	0,032	0,061
$\frac{\Delta A}{A} : \frac{\Delta\varphi}{\varphi}$	7,8	9	3,2	11	4,7

Примечание. $\varphi = \psi + kd$. Для $d = \lambda/3$ $\varphi = \psi + 120^\circ$. Значения φ и A берутся для средней точки интервала.

Если для различных интервалов изменения длины вибраторов определить по кривым для усредненных значений A и φ величины $\Delta A/A$ и $\Delta\varphi/\varphi$ (рис. 1), то окажется, что отношение этих величин для интервала, в котором получается максимальное усиление, является минимальным (см. табл. 1). Таким образом, можно сформулировать вариационный признак достижения настройки. Настройка антенны достигается при такой длине вибраторов, для которой отношение относительных частных производных $\frac{1}{A} \frac{\partial A}{\partial l}$ и $\frac{1}{\varphi} \frac{\partial \varphi}{\partial l}$ достигает минимума, т. е. в такой точке, где относительная скорость изменения фазы является наиболее быстрой по сравнению с относительной скоростью изменения амплитуды. Дело в том, что участок быстрого изменения фаз (на фазовой кривой), на котором фазы быстро достигают значения, после которого направленные свойства антенны начинают ухудшаться, находится при меньших значениях $2l$, чем участок наиболее быстрого изменения амплитуд вблизи максимума амплитудной кривой. Это связано с тем, что условие возбуждения токов максимальной амплитуды и условие получения наиболее благоприятных фаз для сложения полей в главном направлении вообще не совпадают. Условие синфазности векторов поля при их сложении в главном направлении для среднего числа вибраторов (до 20) достигается при $2l < 0,40\lambda$, в то время как максимальные амплитуды токов получают при $2l \geq 0,44\lambda$. При увеличении

числа вибраторов длина, при которой получаются максимальные токи, в общем постепенно уменьшается.

Ввиду трудности строгого определения точного значения длины директоров, при которой получается максимальная направленность, желательно найти по опытным данным эмпирическую закономерность. При сопоставлении расчетных данных можно установить простой способ приближенного определения оптимальной длины директоров. Максимальное усиление получается для средней разности фазы (в градусах)

$$\psi = [(\varphi_{m-1} - \varphi_m) - kd]_{\text{ср}} \approx \frac{180}{n+2}, \quad (6)$$

где n — число директоров (без активного вибратора).

На рис. 1 это значение ψ для системы из 5 вибраторов указано горизонтальной пунктирной линией, точка пересечения которой с фазовой характеристикой определяет оптимальную длину директоров при данном их числе. Можно вывести соотношение для укорочения вибраторов при увеличении их числа (начиная с 4—5). При увеличении числа вибраторов с n до $n+1$ оптимальная длина директоров уменьшается в среднем на $0,0015\lambda$. Точная подстройка является, таким образом, очень тонкой. Экстраполяция этой закономерности дает, например, для $n=20$ оптимальную длину директора $2l \approx 0,41\lambda$, что соответствует экспериментальным данным.

Необходимо иметь в виду, что все эти выводы сделаны для случая слабой связи между вибраторами при $d = \lambda/3$. Случай сильной связи нуждается в дальнейшем исследовании.

Поступило
2 III 1953

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ Д. М. Высоковский, ЖТФ, 18, 9, 1234 (1948). ² В. В. Татарinov, Коротковолновые направленные антенны, 1936, стр. 10. ³ Д. М. Высоковский, ДАН, 89, № 1, 41 (1953). ⁴ K. M. Fishenden, E. R. Wiblin, Proc. IEE, 96, III, 39, 5 (1949). ⁵ Д. М. Высоковский, ДАН, 96, № 5 (1954).