

## Исследование широкополосной вибраторной антенной решетки круговой поляризации

В. В. Овсяников

*Днепропетровский национальный университет,  
Украина, 49050, г. Днепропетровск, пер. Научный 9, корп. 12  
E-mail: root@ap1.net-rff.dsu.dp.ua.*

*Статья поступила в редакцию 30 января 2001 г.*

Приведены результаты исследований внутренних и внешних характеристик широкополосных вибраторных антенных решеток методом интегральных уравнений. Рассмотрены примеры антенных решеток, состоящих из четырех и восьми симметричных вибраторов с включенными емкостными нагрузками. Показано, что для стабилизации в широком частотном диапазоне направленных свойств решетки и входных сопротивлений ее вибраторов достаточно в каждое плечо вибратора включить по две емкостные нагрузки определенной величины.

Наведено результати досліджень внутрішніх та зовнішніх характеристик широкосмугових вибраторних антенних решіток методом інтегральних рівнянь. Розглянуто приклади антенних решіток, складених з чотирьох та восьми симетричних вібраторів з увімкнутими ємнісними навантаженнями. Показано, що для стабілізації у широкій частотній смузі спрямованих властивостей решітки та її вхідних опорів достатньо у кожне плече вібратора увімкнути по два ємнісних навантаження відповідної величини.

### Введение

Антенные решетки (АР) с круговой или эллиптической поляризацией излучаемого поля [1] находят применение в сложных радиотехнических системах, так как обеспечивают более высокую надежность прохождения радиоволн в атмосфере по сравнению с антеннами линейной поляризации.

В работе [2] предложен метод оптимизации площадных АР с нерегулярным размещением элементов. В работах [3, 4] и др. рассмотрены способы оптимизации характеристик вибраторных антенн путем включения в излучающие ветви сосредоточенных реактивных элементов. В [3] приведены распределения токов вдоль антенн с последовательно включенными индуктивными и емкостными элементами. В частности, рассмотрена ви-

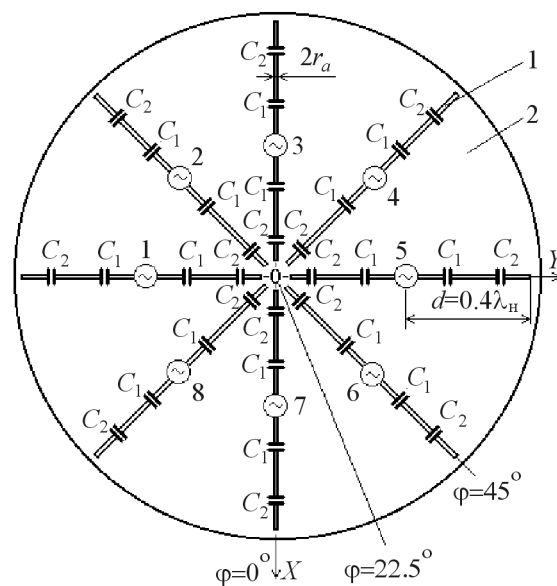
браторная антенна Татаринова и антенна-рамка с емкостями, разработанная фирмой General Electric Company. В работе [4] рассмотрены результаты оптимизации распределения тока вдоль несимметричной вибраторной антенны с последовательно включенными тридцатью девятью емкостными элементами различной величины и показано, что коэффициент стоячей волны по напряжению такой антенны в пятикратном частотном диапазоне 600÷3000 МГц снижается до 2÷3, по сравнению с подобной антенной без нагрузок. При этом диаграмма направленности (ДН) стабилизируется в более узком – трехкратном частотном диапазоне, 600÷1800 МГц. Однако из-за большого числа конденсаторов с различными значениями емкостей такая антенна сложна в изготовлении и настройке.

В связи с вышеизложенным возникает вопрос о том, в какой степени уменьшение числа емкостных нагрузок в плече вибраторной антенны влияет на величину частотного рабочего диапазона антенны, находящейся, например, в составе плоскостной АР круговой поляризации, рассмотренной в [5]. В этой работе исследованы характеристики излучения (ХИ) АР над идеально проводящим бесконечным экраном, состоящей из симметричных вибраторов без нагрузок, которые размещены вдоль радиальных ветвей решетки. Расчеты ХИ проводились без учета взаимного влияния вибраторов при синусоидальном распределении тока. Вибраторы каждой ветви АР возбуждались с периодически увеличивающимся фазовым сдвигом  $\Delta\psi$ , равным углу  $\Delta\phi$  между соседними ветвями.

Данная статья посвящена исследованию внутренних и внешних параметров АР, подобных рассмотренным в [5], но с емкостными элементами, в строгой постановке задачи. Рассматривается влияние на характеристики таких АР сосредоточенных емкостных нагрузок, включенных в ветви вибраторов, и влияние числа радиальных ветвей АР.

## 1. Методы исследований и исходные соотношения

Целью работы является поиск вариантов АР, обеспечивающих улучшение радиотехнических и электродинамических характеристик. Так как в одиночном вибраторе емкостные нагрузки позволяют расширить рабочую полосу частот [4], задача состоит в оптимизации величины и мест включений емкостных нагрузок по критерию максимального частотного диапазона АР. Рабочий диапазон частот АР определяется постоянством двух основных характеристик антенн: входного сопротивления  $Z_{вх}$  и ДН. Устанавливаем ограничение для активной составляющей входного сопротивления вибратора в АР  $R_{вх} = 100 \pm 50$  Ом, а реактивная составляющая  $X_{вх}$  по абсолютной величине должна быть минимально возможной (в идеальном случае  $|X_{вх}| = 0$ ). В отношении ДН введем до-



**Рис. 1.** Широкополосная вибраторная АР:  
1 – вибратор с емкостными нагрузками  $C_1, C_2$ ;  
2 – проводящий экран

полнительное условие обеспечения осевого излучения АР (рис. 1) вдоль оси  $Z$  в заданном частотном диапазоне.

При оптимизации конструкции вибраторов с нагрузками учитываем данные работ [4, 6], а именно: 1) длина плеча симметричного вибратора должна быть не менее  $d = (0.4 \div 0.5)\lambda_n$ , где  $\lambda_n$  – нижняя длина волны рабочего диапазона; 2) точки включения емкостей располагаются на расстояниях  $m \cdot 0.25\lambda_v$  от конца вибратора, где  $m = 1, 3, 5, \dots$ , а  $\lambda_v$  – верхняя длина волны рабочего диапазона; 3) ближайший к точке возбуждения конденсатор включается в плечо вибратора на расстоянии не менее  $(0.15 \div 0.20)\lambda_n$ ; 4) суммарное реактивное сопротивление всех конденсаторов плеча на нижней длине волны выбирается в пределах  $X_c \approx -i(1400 \div 1800)$  Ом.

Для строгого определения внутренних и внешних параметров АР применяем метод интегральных уравнений (ИУ) [7], позволяющий вычислить распределение тока на вибраторах АР с нагрузками, т. е. выполнить анализ заданной АР. В этом случае исходные интегральные уравнения имеют вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \int_{-d_1}^{d_1} I_1(s') K_{1,1}(s, s') ds' + \dots + \int_{-d_n}^{d_n} I_n(s') K_{1,n}(s, s') ds' + U(s, h_\gamma) = F_1(s, h_\gamma), \\ \dots \\ \int_{-d_1}^{d_1} I_1(s') K_{n,1}(s, s') ds' + \dots + \int_{-d_n}^{d_n} I_n(s') K_{n,n}(s, s') ds' + U(s, h_\gamma) = F_n(s, h_\gamma), \end{array} \right. \quad (1)$$

где:

$$K_{i,j} = \frac{\partial}{\partial s'} G_{i,j}(s, s') - k^2 \int_{-s}^s G_{i,j}(\xi, s') (\vec{\xi}, \vec{s}')_{i,j} d\xi;$$

$$U(s, h_\gamma) = i\omega \varepsilon_a \sum_{\gamma=1}^K \begin{cases} 0 & \text{при } 0 \leq |s| < |h_\gamma|, \\ I(h_\gamma) Z_\gamma & \text{при } h_\gamma \leq |s| \leq |d_n|; \end{cases}$$

$$F_i(s, h_\gamma) = i\omega \varepsilon_a \sum_{v=1}^P \begin{cases} 0 & \text{при } 0 \leq |s| < |h_v|, \\ V_i & \text{при } h_v \leq |s| \leq |d_n|; \end{cases}$$

$G_{i,j}(s, s')$ ,  $G_{i,j}(\xi, s')$  и  $(\vec{\xi}, \vec{s}')_{i,j}$  – соответственно функции Грина точек наблюдения  $s$ ,  $\xi$  и точек источников  $s'$  и скалярные произведения единичных векторов;  $Z_\gamma$  – импедансы нагрузок, включенных в вибратор на расстояниях  $h_\gamma$  от точки возбуждения,  $\gamma$  – номер нагрузки;  $V$  – напряжение возбуждающего генератора, включенного в вибратор решетки на расстоянии  $h_v$  от точки симметрии,  $v$  – номер генератора;  $\omega$ ,  $k$ ,  $\varepsilon_a$  – соответственно круговая частота, волновое число и абсолютная диэлектрическая проницаемость;  $d_1, \dots, d_n$  – длина плеча вибратора АР;  $I_1(s), \dots, I_n(s)$  – искомый ток вдоль вибратора.

Известное интегральное уравнение Поплингтона [8] для одиночного прямолинейного вибратора в свободном пространстве без сосредоточенных нагрузок является частным случаем ИУ (1). Система ИУ (1) решается методом моментов.

По найденным токам на вибраторах АР определяются собственные и взаимные сопро-

тивления между вибраторами, входные сопротивления вибраторов и диаграммы направленности АР.

## 2. Исследуемые модели антенных решеток

На рис. 1 представлена АР из восьми симметричных вибраторов с емкостными элементами, угол между вибраторами  $\Delta\varphi = 45^\circ$ .

При расчетах использовались следующие варианты антенных решеток (рис. 1):

а) АР с четырьмя симметричными вибраторами 1, 3, 5, 7 с углом  $\Delta\varphi = 90^\circ$  в плоскости  $XOY$  между ближайшими вибраторами, возбужденными с периодически нарастающим или убывающим фазовым сдвигом с дискретностью  $\Delta\psi = 90^\circ$ , с конденсаторами и без них;

б) АР с восемью симметричными вибраторами 1, ..., 8 с углом  $\Delta\psi = 45^\circ$  в плоскости  $XOY$  между ближайшими вибраторами, возбужденными с периодически нарастающим или убывающим фазовым сдвигом с дискретностью  $\Delta\psi = 45^\circ$ , с конденсаторами и без них.

Для обоих случаев высота АР над идеально проводящей бесконечной плоскостью равна  $0.1\lambda_n$ , параметр толщины вибратора  $\Omega = 4.61 \lg(2d/r_a) = 9.2$ . Расстояние между концами вибраторов мало и равно  $r_a$ .

## 3. Результаты исследований

Исследование вариантов АР проводилось в частотном диапазоне 360-900 МГц, что соответствует изменению электрической длины вибратора  $d$  в пределах  $d/\lambda = 0.4 \div 1.0$ . Кон-

денсаторы емкостью  $C_1 = C_2 = 0.5$  пФ включались в вибраторы в точках, соответствующих требованиям элементов 1)-4) перечня из раздела 1. Суммарное значение емкостного сопротивления обоих конденсаторов на нижней частоте диапазона составляет  $X_H = -i1770$  Ом, на верхней –  $X_B = -i708$  Ом.

В таблице 1 приведены первые строки матриц собственных и взаимных сопротивлений (в Омах) рассчитанных методом ИУ для варианта “а”. Учитывая полную симметрию модели АР, можно считать, что первая строка квадратной матрицы содержит все ее элементы.

**Таблица 1.** Собственные и взаимные импедансы АР из четырех ветвей (вариант “а”)

№ столбца матрицы $j$	$\frac{d}{\lambda} = 0.4$		$\frac{d}{\lambda} = 0.5$		$\frac{d}{\lambda} = 0.6$	
	$Z_{1j}$ без “С”	$Z_{1j}$ с “С”	$Z_{1j}$ без “С”	$Z_{1j}$ с “С”	$Z_{1j}$ без “С”	$Z_{1j}$ с “С”
1	1286 – i456	9.9 – i192.0	154 – i322	46.8 – i81.4	34.4 – i201.0	184.8 – i103.5
2	–103 – i686	–1.1 – i2.0	61.2 + i89.5	–5.7 – i3.2	5.6 – i29.5	–4.3 + i33.6
3	–223 + i192	–1.3 + i0.21	53.2 + i90.0	–2.9 + i2.7	–3.3 – i33.2	11.6 + i0.19

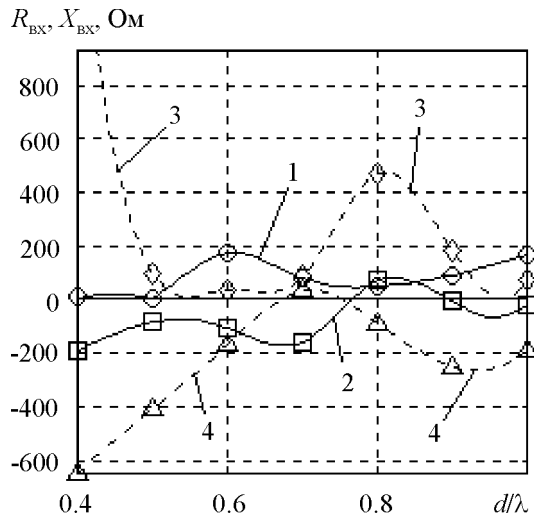
**Таблица 1.** (Продолжение)

№ столбца матрицы $j$	$\frac{d}{\lambda} = 0.7$		$\frac{d}{\lambda} = 0.8$		$\frac{d}{\lambda} = 0.9$	
	$Z_{1j}$ без “С”	$Z_{1j}$ с “С”	$Z_{1j}$ без “С”	$Z_{1j}$ с “С”	$Z_{1j}$ без “С”	$Z_{1j}$ с “С”
1	55.8 – i3.3	82.3 – i170.2	422.0 + i64.2	38.5 – i75.7	208.1 – i287.7	82.1 + i7.0
2	–2.4 – i28.3	10.6 – i11.0	–95.7 – i36.5	0.95 – i7.5	30.8 + i29.2	–3.1 – i8.9
3	–29.9 – i35.5	2.05 – i13.4	–47.2 + i151.7	–11.0 – i4.6	22.2 – i38.2	–10.8 + i13.0

*Примечание.* Взаимные импедансы  $Z_{1,4}$  в таблицах не приведены, так как очевидно  $Z_{1,4} = Z_{1,2}$

Для этого же варианта “а” на рис. 2 приведены в частотном диапазоне графики входного сопротивления вибратора  $Z_{вх}$  в составе АР с учетом влияния трех других вибраторов для случаев без емкостей и с включенными емкостями, как показано на рис. 1. Данные для графиков рис. 2 получены из таблицы 1.

Из данных таблицы и графиков рис. 2 следует, во-первых, что включение в вибратор АР емкостных элементов способствует существенному снижению большинства абсолютных значений взаимных сопротивлений, а это свидетельствует об ослаблении взаимного влияния вибраторов решетки. Во-вторых, входные

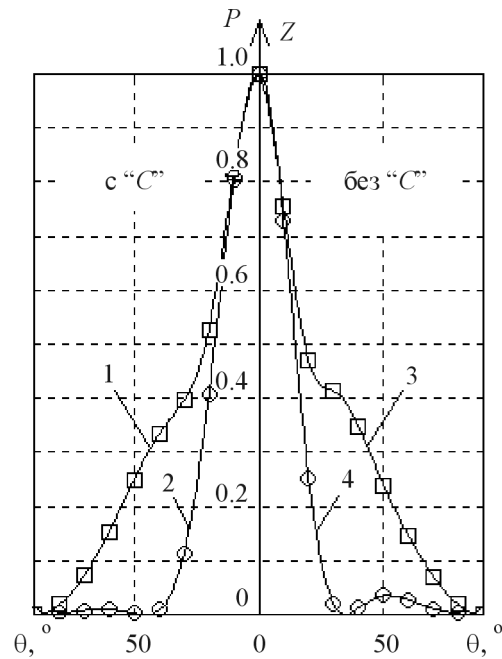


**Рис. 2.** Графики входных сопротивлений вибратора в составе варианта "а" АР для разных соотношений  $d/\lambda$ :  
 1 –  $R_{вх}$  с "С"; 2 –  $X_{вх}$  с "С"; 3 –  $R_{вх}$  без "С"; 4 –  $X_{вх}$  без "С"

сопротивления вибраторов в составе АР (рис. 2) в рассматриваемом частотном диапазоне существенно стабилизируются. Как и для случая одиночного вибратора [3, 6, 7], на вибраторах рассматриваемой АР с емкостными нагрузками распределение тока становится более плавным, убывающим к концам вибраторов. Все это свидетельствует о создании в АР режима близкого к режиму бегущей волны.

На рис. 3 приведены нормированные ДН с емкостными нагрузками и без них для варианта "а" АР в двух характерных плоскостях  $\varphi = 0^\circ$  и  $\varphi = 45^\circ$ . Угол  $\theta$  отсчитывается от оси  $OZ$  декартовой системы координат, совмещенной со сферической системой координат. Ось  $OZ$  перпендикулярна АР и экрану.

Исходя из рис. 3, можно сделать вывод, что ДН варианта "а" АР благодаря влиянию экрана ориентирована вдоль оси  $OZ$ , однако она значительно неравномерна в азимутальных плоскостях при  $\theta \approx 10 \div 90^\circ$ . Это не позволяет получить максимально возможный коэффициент направленного действия АР в направлении главного лепестка. Как следует из работы [5], равномерность ДН в азимутальной плоскости подобных АР может быть



**Рис. 3.** Графики диаграмм направленности варианта "а" АР для  $d/\lambda = 0.5$ :  
 1 – плоскость  $\varphi = 0^\circ$  с "С"; 2 –  $\varphi = 45^\circ$  с "С"; 3 –  $\varphi = 0^\circ$  без "С"; 4 –  $\varphi = 45^\circ$  без "С"

улучшена при увеличении числа радиальных ветвей. Такому случаю соответствует вариант "б" АР с восемью вибраторами (рис. 1), который будет рассмотрен ниже.

Результаты расчетов варианта "б" приведены в таблице 2 и на рис. 4, 5 и 6.

Как следует из таблицы 2, большинство взаимных импедансов в случае вибраторов АР с емкостными элементами имеют гораздо меньшую абсолютную величину по сравнению со случаем вибраторов без емкостей. Это свидетельствует об ослаблении взаимного влияния вибраторов АР, что наблюдалось и в варианте "а". Из рис. 4 видно, что входные сопротивления вибраторов АР с емкостными элементами стабилизируются в частотном диапазоне, приблизительно равном  $2\Delta f/f_0 \cdot 100\% \approx 77\%$ , в котором выполняются ограничения по  $R_{вх}$  и  $R_{вх}$ , установленные в разделе 1. Исследования показали, что частотный диапазон этой АР практически составляет 85 %.

Из графиков ДН, представленных на рис. 5, следует, что в сравнении с ДН варианта "а"

**Таблица 2.** Собственные и взаимные импедансы АР из восьми ветвей (вариант “б”)

№ столбца матрицы $j$	$\frac{d}{\lambda} = 0.4$		$\frac{d}{\lambda} = 0.5$		$\frac{d}{\lambda} = 0.6$	
	$Z_{1,j}$ без “С”	$Z_{1,j}$ с “С”	$Z_{1,j}$ без “С”	$Z_{1,j}$ с “С”	$Z_{1,j}$ без “С”	$Z_{1,j}$ с “С”
1	3190 – $i$ 3205	75.4 – $i$ 191	92.7 – $i$ 413	33.8 – $i$ 86.0	44.0 – $i$ 201.0	181.2 – $i$ 34.5
2	–1964 + $i$ 2334	3.3 – $i$ 0.9	23.9 + $i$ 15.6	7.5 – $i$ 6.0	22.5 – $i$ 23.2	–29.8 – $i$ 34.8
3	1122 + $i$ 866	–0.8 – $i$ 1.4	–0.6 + $i$ 13.0	–3.5 – $i$ 1.3	20.5 – $i$ 27.7	–13.2 + $i$ 21.4
4	–782 – $i$ 866	–1.2 – $i$ 0.08	–1.8 + $i$ 12.4	–1.7 + $i$ 1.4	17.8 – $i$ 30.3	10.4 + $i$ 8.9
5	593 – $i$ 384	–1.0 + $i$ 0.26	–2.0 + $i$ 12.1	–1.1 + $i$ 1.6	16.9 – $i$ 31.2	16.3 – $i$ 7.3

**Таблица 2.** (Продолжение)

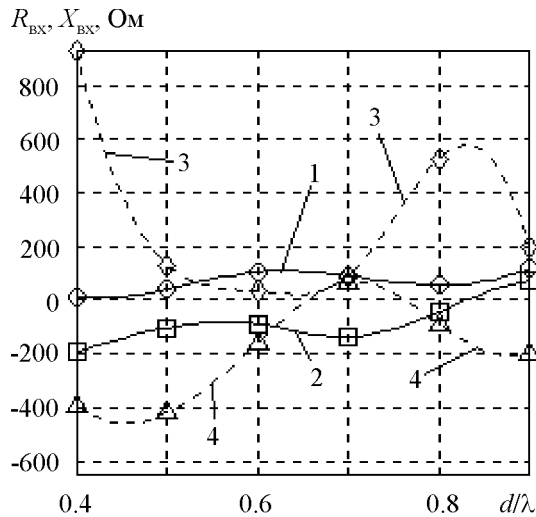
№ столбца матрицы $j$	$\frac{d}{\lambda} = 0.7$		$\frac{d}{\lambda} = 0.8$		$\frac{d}{\lambda} = 0.9$	
	$Z_{1,j}$ без “С”	$Z_{1,j}$ с “С”	$Z_{1,j}$ без “С”	$Z_{1,j}$ с “С”	$Z_{1,j}$ без “С”	$Z_{1,j}$ с “С”
1	48.8 + $i$ 11.1	83.3 – $i$ 230	46 + $i$ 203	33.4 – $i$ 70.7	220 – $i$ 333	78 + $i$ 30.4
2	10.2 – $i$ 13.1	112.0 + $i$ 72.1	–61.4 – $i$ 111.4	9.0 + $i$ 7.5	30.0 + $i$ 67.0	11.0 – $i$ 8.6
3	0.01 – $i$ 21.8	8.1 – $i$ 45.2	–21.8 – $i$ 35.3	0.9 – $i$ 7.9	9.0 + $i$ 33.0	–4.0 – $i$ 8.5
4	–9.4 – $i$ 31.3	0.4 + $i$ 26.1	–77.6 + $i$ 40.7	–4.1 – $i$ 7.9	29.0 – $i$ 10.5	–12.8 + $i$ 3.1
5	–16.1 – $i$ 32.1	8.4 – $i$ 27.2	–44.6 + $i$ 75.4	–5.6 – $i$ 7.5	23.0 – $i$ 27.0	–11.0 + $i$ 6.1

*Примечание.* Взаимные импедансы  $Z_{1,6} \div Z_{1,8}$  в таблице не приведены, так как очевидно  $Z_{1,6} = Z_{1,4}$ ,  $Z_{1,7} = Z_{1,3}$  и  $Z_{1,8} = Z_{1,2}$ .

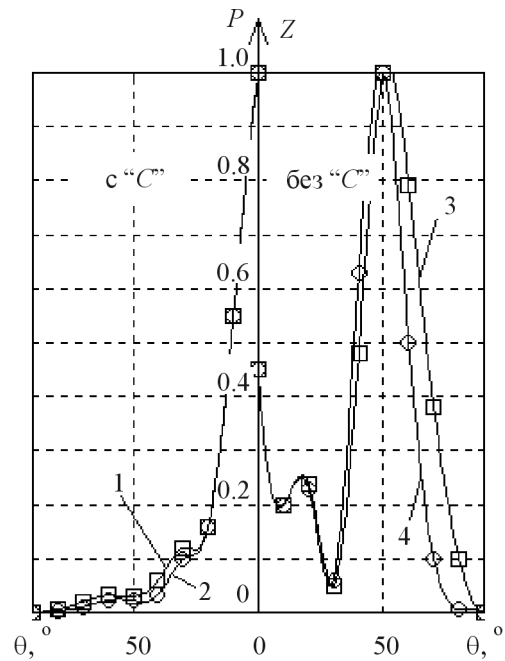
(рис. 3) обеспечивается практически полная равномерность азимутальных ДН, как для АР с емкостными элементами, так и без них. Очевидно, причиной получения равномерных ДН в направлении основного лепестка является увеличение числа вибраторов АР от четырех до восьми.

Изменение ДН варианта “б” АР в частотном диапазоне можно видеть на рис. 6 для

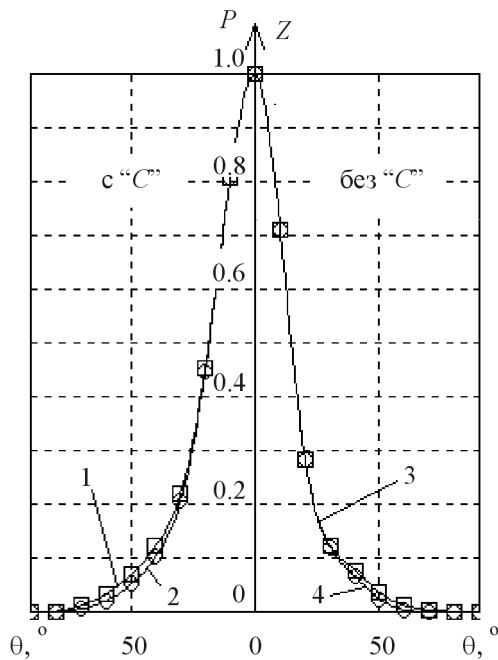
$d/\lambda = 0.7$ . В этом случае главный лепесток ДН АР с емкостями направлен вдоль оси  $OZ$  ( $\theta = 0^\circ$ ), тогда как для АР без емкостных элементов боковые лепестки уже преобладают над уровнем излучения АР вдоль оси  $OZ$ . При дальнейшем увеличении электрических размеров АР осевое излучение исчезает и изрезанность ДН растет, ограничивая частотный диапазон АР по ДН до  $\sim 55\%$ .



**Рис. 4.** Графики входных сопротивлений вибратора в составе варианта "б" АР для разных соотношений  $d/\lambda$ :  
 1 –  $R_{вх}$  с "С"; 2 –  $X_{вх}$  с "С"; 3 –  $R_{вх}$  без "С"; 4 –  $X_{вх}$  без "С"



**Рис. 6.** Графики диаграмм направленности варианта "б" АР для  $d/\lambda = 0.7$ :  
 1 – плоскость  $\varphi = 0^\circ$  с "С"; 2 –  $\varphi = 22.5^\circ$  с "С"; 3 –  $\varphi = 0^\circ$  без "С"; 4 –  $\varphi = 22.5^\circ$  без "С"



**Рис. 5.** Графики диаграмм направленности варианта "б" АР для  $d/\lambda = 0.5$ :  
 1 – плоскость  $\varphi = 0^\circ$  с "С"; 2 –  $\varphi = 22.5^\circ$  с "С"; 3 –  $\varphi = 0^\circ$  без "С"; 4 –  $\varphi = 22.5^\circ$  без "С"

При увеличении числа конденсаторов в плечах вибраторов АР частотный диапазон может быть расширен.

#### 4. Выводы

1. Для получения равномерных азимутальных характеристик излучения рассматриваемых осесимметричных плоскостных АР круговой поляризации достаточно увеличить число радиальных ветвей АР с четырех до восьми, обеспечивая соответствующий сдвиг фаз между излучателями.

2. Для расширения частотного диапазона подобных АР по входному сопротивлению вибраторов до 85 %, а по ДН решетки до 55 % достаточно в каждое плечо вибратора АР включить по два конденсатора с определенной емкостью.

3. Благодаря наличию в АР емкостных элементов, в решетках образуется режим близкий к бегущей волне, расширяется рабочий диапазон частот, уменьшается взаимное влияние элементов АР.

4. Недостатком рассмотренных широкополосных АР с емкостными элементами является необходимость увеличения длины вибраторов приблизительно вдвое по сравнению с размерами обычных вибраторов АР без емкостных элементов.

## Литература

1. Антенны и устройства СВЧ (Проектирование фазированных антенных решеток). Под ред. Д. И. Воскресенского. Москва, Радио и связь, 1981, 432 с.
2. Л. Г. Содин. Антенны. Москва, Связь, 1972, вып. 15, ч. I, с. 3-16.
3. А. А. Пистолькорс. Антенны. Москва, Связьиздат, 1947, 480 с.
4. B. L. J. Rao, J. E. Ferris, W. E. Zimmerman. IEEE Trans. 1969, **AP-17**, No. 2, pp. 145-151.
5. В. В. Овсяников. В сб.: Материалы 10-й Международной крымской микров. конф. "СВЧ-техника и телеком. технологии". Севастополь, Изд-во "Вебер", 2000, с. 346-347.
6. В. В. Овсяников. Вибраторные антенны с реактивными нагрузками. Москва, Радио и связь, 1985, 120 с.
7. Ф. И. Коломойцев, В. С. Варывдин, В. В. Овсяников. Радиотехника и электроника. 1972, **17**, №11, с. 2429-2432.
8. H. C. Pocklington. Camb. Phil. Soc. Proc. 1897, **9**, pp. 324-332.

## Investigation of Broadband Vibrator Array with Circular Polarization

V. V. Ovsyanikov

The results of investigation of internal and external parameters of the broadband vibrator arrays by the integral equation method are presented. We consider the examples of the arrays consisting of four and eight symmetrical vibrators with lumped capacitive loads. It is shown that inclusion of two capacitive loads in each vibrator arm is sufficient for stabilization of array patterns and the input impedances of the vibrators on the broad bandwidth.