

## ИМПЕДАНСНЫЕ ВИБРАТОРНЫЕ АНТЕННЫ

В.Д. Двуреченский,  
А.Ю. Федотов  
(ОАО «Корпорация «ВНИИЭМ»)

Обоснована возможность практической реализации в широкой полосе частот потенциальной эффективности симметричных вибраторов путём включения в его плечи периодических структур сосредоточенных импедансов.

Исследованы в полосе частот электрические характеристики импедансных симметричных вибраторов при наличии трёхпроводных рефлекторов и директоров, состоящих из двух отрезков металлического провода.

Показана возможность реализации вибраторных антенн с высоким значением коэффициента направленного действия (до 10 дБ) с использованием симметричных импедансных вибраторов, работающих в широкой полосе частот.

**Ключевые слова:** импедансный симметричный вибратор, вибраторные антенны.

Одними из простейших по конструкции излучателями электромагнитных волн, как известно, являются электрические симметричные вибраторы. Такие излучатели широко применяются на практике как самостоятельные антенны, так и в виде элементов многих сложных антенных систем. Вибратор состоит из двух одинаковых плеч в виде линейных проводников длиной  $l$  диаметром  $2a$ , источник включён в зазор между плечами. Наиболее часто применяются полуволновые вибраторы [1], когда  $l = 0,25\lambda$  ( $\lambda$  – длина волны). В этом случае коэффициент направленного действия вибратора  $G$  равен 1,64 (2,14 дБ), а входное сопротивление близко к 75 Ом. Полоса рабочих частот вибратора зависит от диаметра проводников  $2a$ . Чем он меньше относительно  $\lambda$ , тем узкополосней вибратор. При  $a < 0,01\lambda$  относительная полоса рабочих частот не превышает 10%. При увеличении длины плеча  $l$  растёт коэффициент направленного действия  $G$ . Однако практическая реализация высоких значений  $G$  встречает значительные трудности, связанные с возбуждением вибратора, особенно при тонких проводниках плеч вибратора. Для подтверждения этого факта с помощью программ моделирования антенн MMANA [2] были рассчитаны электрические характеристики симметричного вибратора, который на частоте  $f_0 = 300$  МГц ( $\lambda_0 = 1$  м) имел следующие геометрические размеры:  $2a = 0,001\lambda_0$ ,  $l = 0,525\lambda_0$ . На рис. 1 (пунктирная кривая) показан график изменения входного сопротивления вибратора  $Z = R + jX$  в зависимости от частоты.

На рис. 2 (пунктирная кривая) представлена частотная зависимость коэффициента направленного действия (КНД)  $G$  вибратора в перпендикулярном к его оси направлении ( $\theta = 0^\circ$ ).

Из рисунков следует, что КНД достигает максимального значения  $G_m = 5,03$  дБ при  $l/\lambda = 0,616$  ( $f = 352$  МГц).

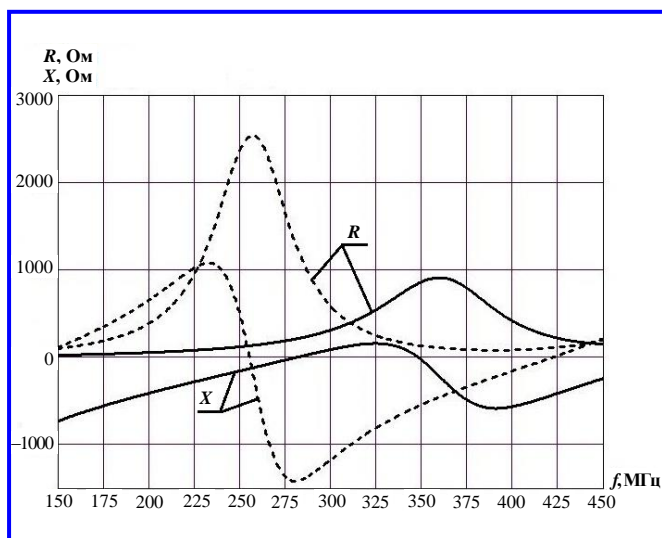


Рис. 1. Частотная зависимость входного сопротивления вибраторной антенны с длиной плеча  $l = 0,515\lambda_0$

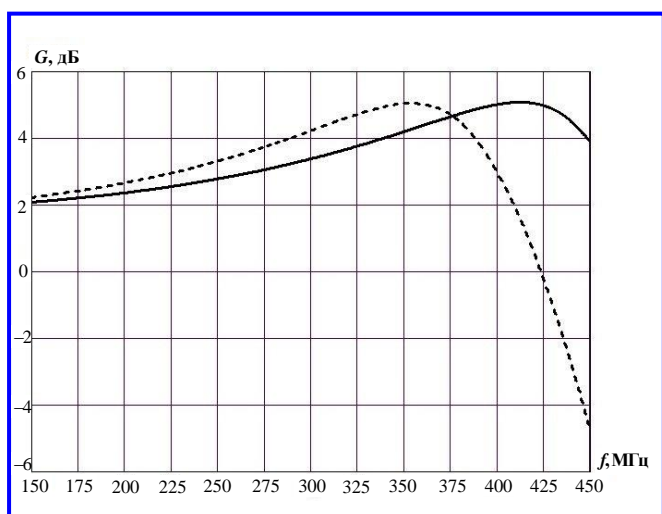


Рис. 2. Частотная зависимость коэффициента направленного действия вибратора антенны с длиной плеча  $l = 0,515\lambda_0$

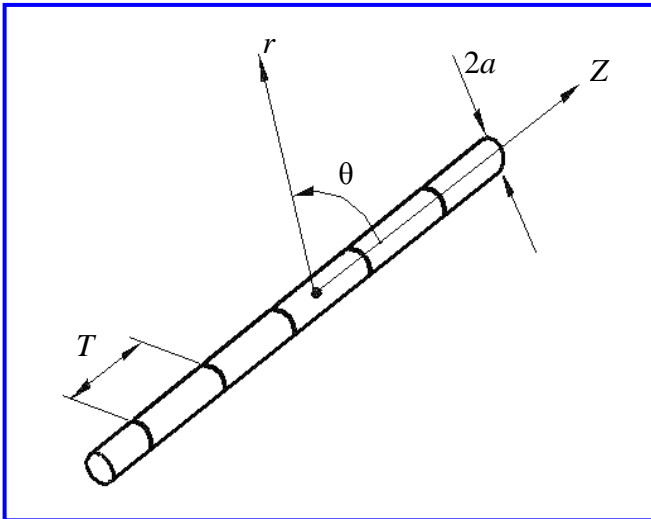


Рис. 3. Проводник с последовательно включёнными реактивными нагрузками

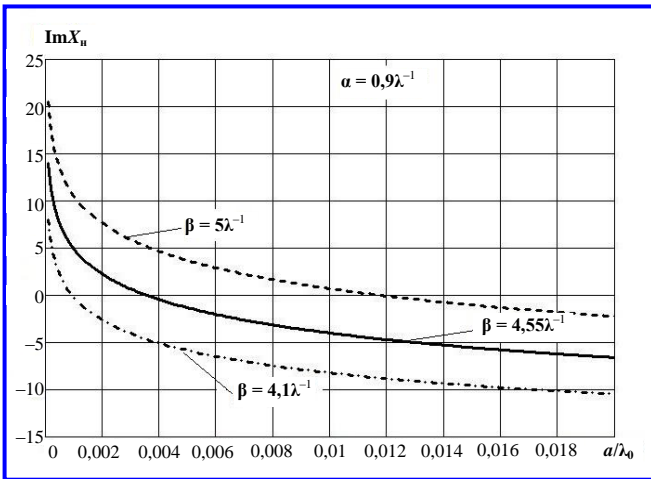


Рис. 4. Графики зависимости  $\text{Im}X_n$  от диаметра провода

При этом входное сопротивление изменяется в пределах  $(2350 \div 130)$  Ом – активная часть и  $(-j1100 - +j1500)$  Ом – реактивная часть. Это факт практически исключает возможность согласования входного сопротивления в этом диапазоне частот с традиционными симметричными линиями передач с волновым сопротивлением  $W = 300$  Ом и несимметричными с  $W = 75(50)$  Ом.

Цель настоящей статьи обосновать возможность практической реализации высоких значений  $G$  симметричных вибраторов в широкой полосе частот путём включения в его плечи периодической системы сосредоточенных реактивных нагрузок по аналогии с [3]. Для этого рассмотрим прямолинейный проводник диаметром  $2a$ , в который на равном расстоянии  $T \ll \lambda$  друг от друга включены сосредоточенные реактивные сопротивления (импеданс)  $jX_n$  (рис. 3).

Предположим, что около провода существует бегущая волна, ненулевые составляющие электромагнитного поля которой запишем в следующем виде:

$$\begin{aligned} H_\varphi &= Ae^{qz} H_1^{(2)}(pr); \\ E_r &= \left( \frac{qW}{k} \right) Ae^{qz} H_1^{(2)}(pr); \\ E_z &= \frac{jpWA}{k} e^{qz} H_0^{(2)}(pr), \end{aligned} \quad (1)$$

где  $A$  – амплитудный множитель;  $k, W$  – волновые число и сопротивление окружающего пространства;  $q, p$  – волновые числа, связанные между собой равенством  $q^2 - p^2 + k^2 = 0$ ;  $H_n^{(2)}(x)$  – функции Ганкеля второго рода  $n$ -го порядка;  $r$  – радиус.

Для того, чтобы бегущая волна (1) могла существовать около провода, на его поверхности должно выполняться усреднённое импедансное граничное условие:

$$jX_n = \frac{TE_z}{2\pi a H_\varphi} \text{ при } r = a. \quad (2)$$

После подстановки (1) в (2) получим, что

$$X_n = W \frac{pT}{k2\pi a} \frac{H_0^{(2)}(pa)}{H_1^{(2)}(pa)}. \quad (3)$$

Рассмотрим случай, когда вдоль провода распространяется ускоренная бегущая волна. В этом случае  $q = -\alpha - j\beta$ ;  $p = \gamma + j\mu$ , где  $\alpha$  – коэффициент затухания бегущей волны;  $\beta$  – волновое число, причём  $\beta < k$ :

$$\begin{aligned} \gamma &= \sqrt{\frac{\alpha^2 - \beta^2 + k^2 + \sqrt{(\alpha^2 - \beta^2 + k^2)^2 + 4\alpha^2\beta^2}}{2}}; \\ \mu &= \frac{\alpha\beta}{\gamma}. \end{aligned}$$

Так как  $X_n$  действительная величина, то должно выполняться условие  $\text{Im}X_n = 0$ , из которого определяется требуемое значение диаметра  $2a$ .

Для примера на рис. 4 показаны графики изменения  $\text{Im}X_n$  в зависимости от  $a/\lambda$  для  $\alpha = 0,9\lambda^{-1}$  и различных значений  $\beta$ .

Из рисунков следует, что существуют значения диаметров проводов  $2a$ , при которых выполняется равенство  $\text{Im}X_n = 0$ , т. е. имеется возможность ре-

лизовать условия существования ускоренной бегущей волны тока вдоль импедансного провода с заданными значениями  $\alpha$  и  $\beta$  при соответствующих сопротивлениях  $X_n$ , вычисленных по формуле (3).

Рассмотрим симметричный вибратор, длина плеч которого равна  $0,525\lambda_0$ . В каждое плечо вибратора включена периодическая система сосредоточенных реактивных нагрузок с импедансом  $jX_n$  (рис. 5). Используя вышеизложенные формулы для случая, когда  $\lambda_0 = 1$  м ( $f = 300$  МГц),  $T = 0,05\lambda_0$ ,  $\alpha = 0,9\lambda_0^{-1}$ ,  $\beta = 3,9\lambda_0^{-1}$ , было установлено, что диаметр вибратора  $2a$  должен быть равен  $0,001\lambda_0$ , а  $X_n = -78,6$  Ом. Отметим, что импеданс сосредоточенных нагрузок имеет ёмкостной характер и реализуется с помощью конденсаторов, ёмкость  $C_n$  которых равна  $6,7$  пФ.

Эти конструктивные параметры ( $2a$ ,  $l$ ,  $T$ ,  $C_n$ ) были использованы как исходные данные при исследовании импедансного волнового симметричного вибратора с помощью программы моделирования антенн MMANA. Результаты исследований представлены в виде графиков.

На рис. 1 показана частотная зависимость входного сопротивления  $Z$  импедансного вибратора (сплошная линия). Из графиков видно, что изменение реактивной и активной составляющих  $Z$  значительно меньше, чем у вибратора без нагрузок (пунктирная линия). Это позволяет согласовать импедансный волновой вибратор с 300-омной симметричной двухпроводной линией передач радиоволн.

На рис. 6 показана частотная зависимость КСВ импедансного вибратора, в каждом плече которого включена компенсирующая индуктивность  $0,05$  мГн.

Из рисунка следует, что полоса рабочих частот, в которой  $КСВ \leq 3$ , равна  $(250 \div 450)$  МГц (57%), что значительно больше полосы обычного волнового вибратора. Для снижения уровня КСВ до двух был увеличен диаметр провода до  $0,007\lambda_0$ . Ему соответствуют следующие значения:  $\alpha = 0,94\lambda_0^{-1}$ ,  $\beta = 4,48\lambda_0^{-1}$ ,  $X_n = -48$  Ом.

На рис. 6 представлена частотная зависимость КСВ импедансного вибратора, в каждое плечо которого включена компенсирующая индуктивность  $0,037$  мГн, для этого случая (пунктирная линия). Из графика видно, что  $КСВ \leq 2$  в полосе частот  $(240 \div 410)$  МГц.

На рис. 2 представлен график частотной зависимости коэффициента направленного действия  $G$  (сплошная линия) симметричной вибраторной антенны с

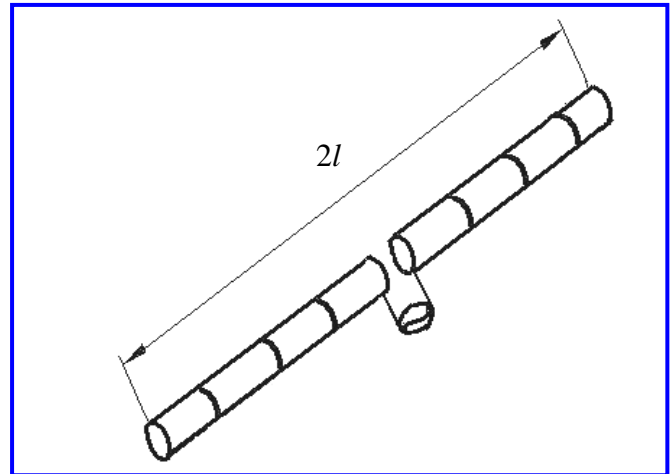


Рис. 5. Симметричный вибратор, в плечо которого периодически включены реактивные нагрузки

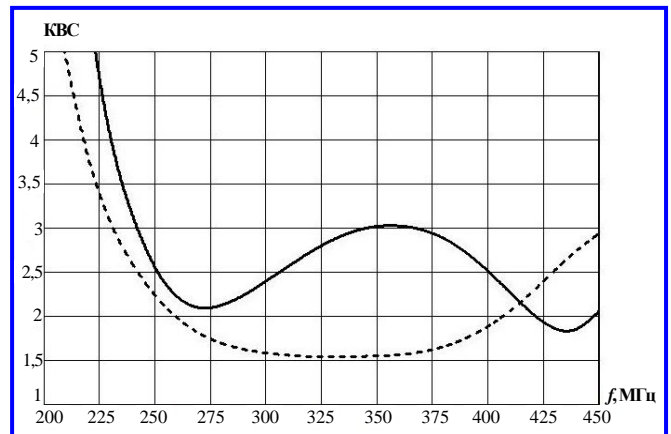


Рис. 6. Частотная зависимость КСВ симметричного вибратора антенны с нагрузками с длиной плеча  $l = 0,5\lambda_0$

нагрузками. Величина  $G$  растёт с увеличением частоты  $f$  до максимального значения  $5,07$  дБ при  $f = 412$  МГц, когда  $l = 0,72\lambda$ . Зависимость  $G(f)$  практически совпадает с аналогичной зависимостью для обычного симметричного вибратора (см. рис. 2, пунктирная кривая). Это объясняется тем, что с ростом частоты значение  $X_n$  уменьшается и значение  $G$  импедансного вибратора приближается к коэффициенту усиления обычного вибратора. Следует отметить, что максимальное значение  $G$  достигается на более высокой частоте  $410$  МГц, вместо  $360$  МГц. Нижняя рабочая частота импедансного вибратора определяется уровнем КСВ, а верхняя рабочая частота определяется коэффициентом направленного действия после его максимального значения.

С целью подтверждения эффективности включения реактивных нагрузок в плечи вибратора был исследован импедансный симметричный вибратор с длиной плеч  $l = 0,75 \lambda_0$ . При таком значении  $l$

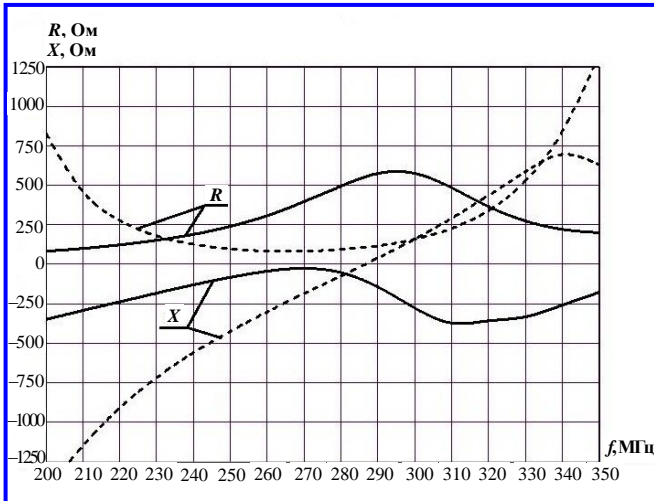


Рис. 7. Частотная зависимость входного сопротивления вибраторной антенны с длиной плеча  $l = 0,75\lambda_0$

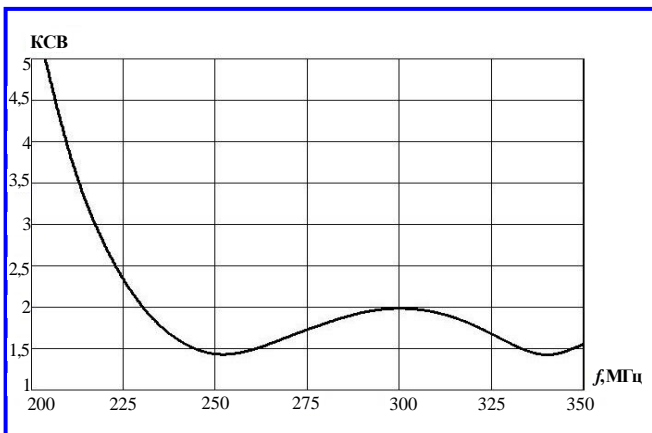


Рис. 8. Частотная зависимость КСВ симметричного вибратора с нагрузками с длиной плеча  $l = 0,75\lambda_0$

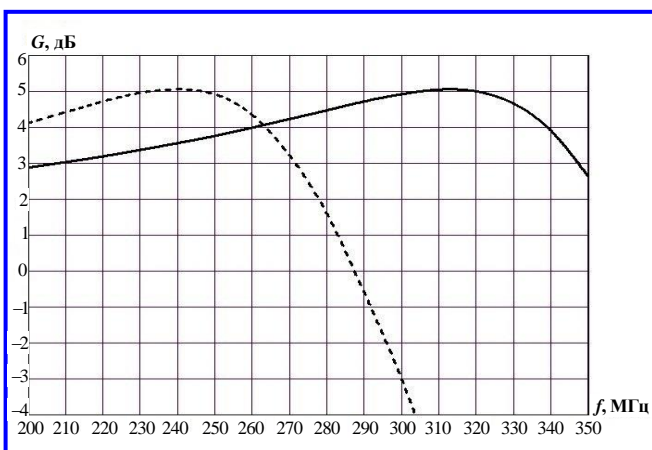


Рис. 9. Частотная зависимость коэффициента направленного действия симметричного вибратора с длиной плеча  $l = 0,79\lambda_0$  и импедансного симметричного вибратора

диаграмма направленности (ДН) обычного вибратора имеет многолепестковую форму и на практике, по этой причине, такой вибратор не используется. Покажем, что включение в плечи вибратора периодической системы ёмкостных нагрузок позволит устранить этот недостаток. Исходные параметры при расчётах:  $\lambda_0 = 1$  м,  $T = 0,05\lambda_0$ ,  $X_n = 73,9$  Ом,  $C_n = 7,2$  пФ.

На рис. 7 представлены графики частотной зависимости  $R$  и  $X$  симметричного вибратора (пунктирная кривая) и симметричного импедансного вибратора с  $l = 0,75\lambda_0$ .

Из рисунка следует, что  $X$  импедансного вибратора имеет ёмкостной характер и лежит в пределах  $[-370, 0]$  Ом,  $R$  импедансного симметричного вибратора находится в пределах  $[130, 600]$  Ом в широкой полосе частот. Эти обстоятельства позволяют согласовать вход импедансного вибратора с 300-омной симметричной двухпроводной линией передач радиоволн. На рис. 8 показана частотная зависимость КСВ такого импедансного вибратора с 300-омной линией передач, в плечи которого включены компенсирующие индуктивности  $0,05$  мГн.

Из рисунка видно, что  $KCB \leq 2$  на частотах от 230 МГц и более 350 МГц. Следует отметить, что согласование  $Z$  с 75-омным коаксиальным кабелем можно осуществить с помощью симметрирующего устройства, применяемого при возбуждении петлевых вибраторов.

На рис. 9 представлены графики частотной зависимости коэффициента направленного действия  $G$  обычного симметричного вибратора (пунктирная линия) и импедансного симметричного вибратора (сплошная линия).

Из графиков следует, что максимальное значение  $G$  (5,2 дБ) импедансного вибратора достигается на более высоких частотах (315 МГц), чем  $G$  для обычного вибратора (240 МГц). На частотах выше 250 МГц ДН обычного вибратора имеет многолепестковую форму, а ДН импедансного вибратора сохраняет форму, свойственную форме ДН симметричных вибраторов до 320 МГц. Этот факт подтверждается расчётными диаграммами направленности на частоте 300 МГц обычного (пунктирная линия) и импедансного вибраторов (сплошная линия), представленных на рис. 10.

Из сравнения полученных расчётных данных следует то, что электромагнитные характеристики ( $G$  и КСВ) волнового и полутораволнового вибраторов практически совпадают.

Симметричные вибраторы широко применяют в

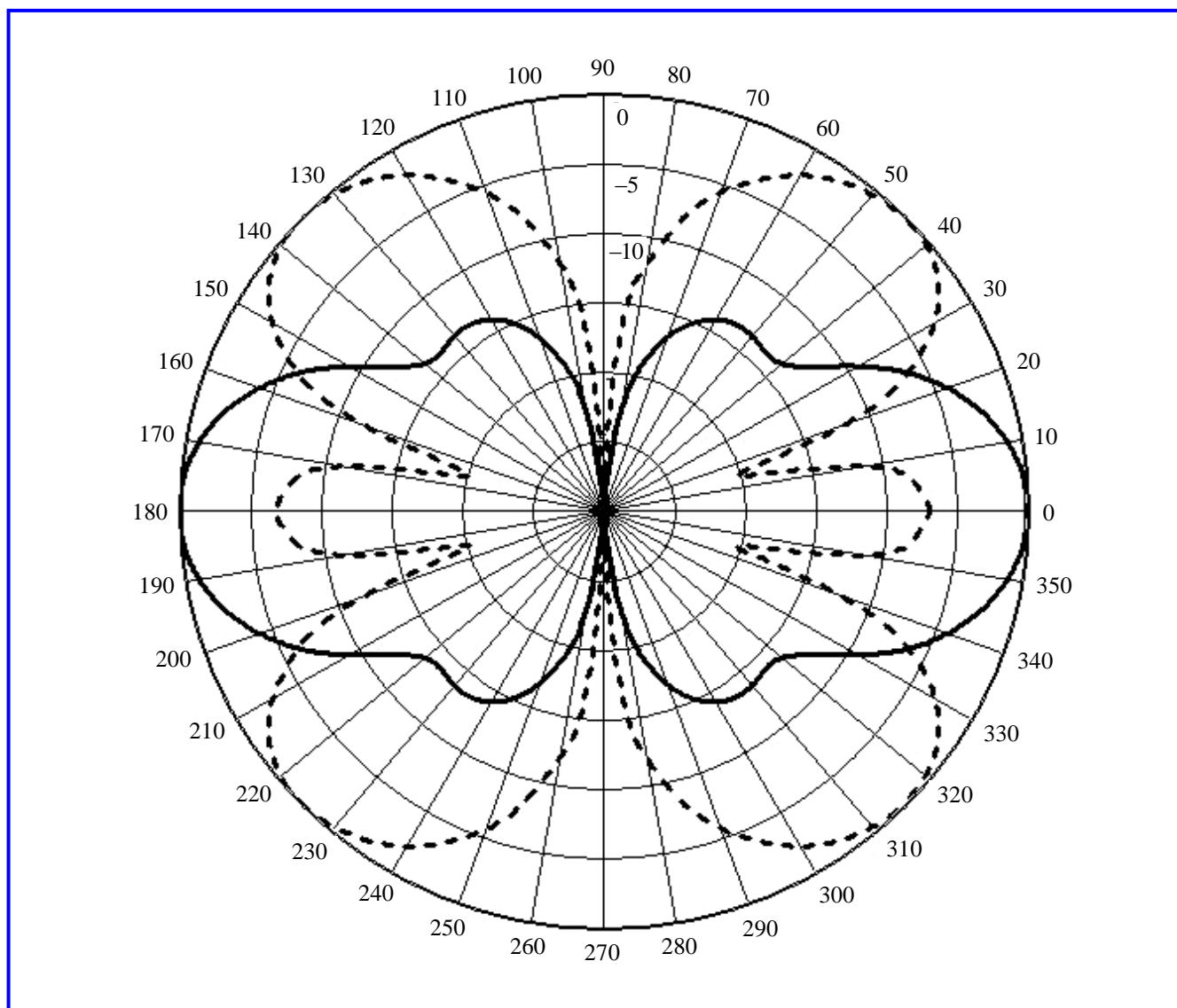


Рис. 10. Диаграмма симметричных вибраторных и импедансных антенн с длиной плеча  $l = 0,75\lambda_0$

директорных антеннах. Для исследования возможности использования импедансных вибраторов для создания эффективных антенн были проведены расчёты с помощью программы MMANA антенн, показанных на рис. 11.

Первый вариант антенны (рис. 11, а) представляет собой импедансный вибратор, расположенный на высоте  $H$  над тремя отрезками проводов, расположенными в одной плоскости на одинаковом расстоянии  $d$  друг от друга. Длина проводников равна  $L$ , а диаметр –  $2b$ . Расчёты проводились для следующих исходных данных:  $\lambda_0 = 1$  м ( $f = 300$  МГц);  $l = 0,5\lambda_0$ ;  $T = 0,05\lambda_0$ ;  $a = b = 0,0035\lambda_0$ ;  $X_H = -48$  Ом;  $L = 0,525\lambda_0$ ;  $H = 0,2\lambda_0$ ;  $T_1 = 0,1\lambda_0$ .

На рис. 12 показана частотная зависимость коэффициента направленного действия  $G$  (пунктирная линия).

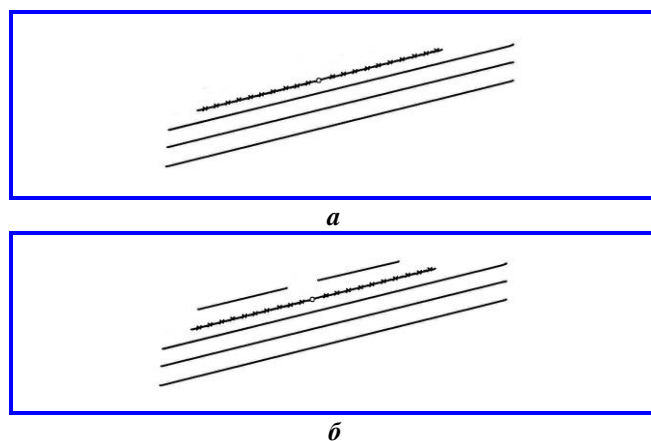
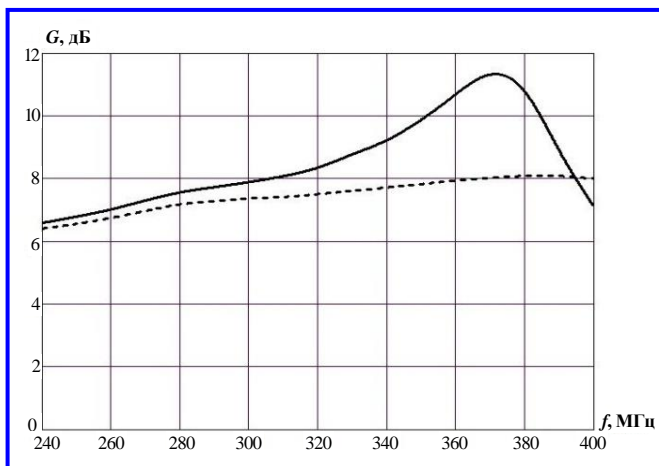
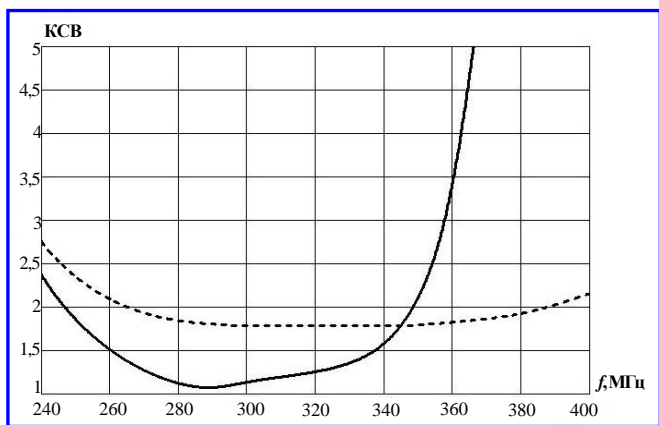


Рис. 11. Симметричная вибраторная антенна с нагрузками: а – с рефлекторами; б – с двумя директорами и рефлектором



**Рис. 12.** Частотная зависимость коэффициента направленного действия симметричной вибраторной антенны с нагрузками над рефлектором



**Рис. 13.** Частотная зависимость КСВ симметричной вибраторной антенны с нагрузками над рефлектором

На рис. 13 показан график функции КСВ (пунктирная линия) на входе 300-омной симметричной линии передачи в зависимости от частоты. Из анализа этих графиков следует, что коэффициент

направленного действия (исследованной антенны) изменяется от 6,8 до 8,1 дБ в полосе частот (245 ÷ 385) МГц. При этом  $KCB \leq 2$  при возбуждении 300-омным источником импедансного вибратора, в каждое плечо которого включена компенсирующая индуктивность 0,037 мГн.

На рис. 12, 13 также представлены графики  $G$  и  $KCB$  (сплошные линии) в зависимости от частоты для антенны, отличающейся от предыдущей антенны наличием двух директоров длиной  $0,36\lambda_0$ , симметрично расположенных над импедансным вибратором на высоте  $h = 0,12\lambda_0$ , период включения  $T_1 = 0,5 \lambda_0$  (рис. 11, б). Коэффициент направленного действия этой антенны изменяется от 6,7 до 9,7 дБ в полосе частот (245 ÷ 348) МГц (35%).

При этом  $KCB \leq 2$  при возбуждении 300-омной симметричной линии.

Анализируя полученные результаты можно сделать вывод, что рассмотренные антенны являются эффективными широкополосными вибраторными антеннами, эквивалентными (на частоте 300 МГц) антенным решеткам из двух узкополосных (единицы процентов) директорных антенн.

Из вышеизложенного следует то, что существует возможность реализации вибраторных антенн с высоким значением КНД (до 10 дБ) с использованием симметричных импедансных вибраторов, работающих в широкой полосе частот.

### Литература

1. Марков Г. Т., Сазонов Д. М. Антенны / Г. Т. Марков, Д. М. Сазонов. – М. : Энергия, 1975. – 528 с.
2. Гончаренко И. В. Антенны КВ и УКВ / И. В. Гончаренко // «Радио». – М. : ИП РадиоСофт, 2007. – 288 с.
3. Синтез линий лестничного типа / В. Д. Двуреченский, З. Л. Винницкий, А. Ю. Федотов // Антенны. – 2001. – № 1. – С. 36–40.

Поступила в редакцию 14.12.2012

*Виктор Дмитриевич Двуреченский, д-р техн. наук, ведущий научн. сотрудник.  
Александр Юрьевич Федотов, д-р техн. наук, нач. лаборатории.  
E-mail: vniiet@vniiet.ru.  
Т. (495) 366-27-55.*