

УДК 621.396.6:537.862

АНТЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОВОЛОЧНЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ СПИРАЛЬНЫХ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ С ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ПОКРЫТИЕМ

Н.Ю. СИЦКО

УП "Гипросвязь"
Сурганова, 24, Минск, 220012, Беларусь

Поступила в редакцию 21 февраля 2008

Исследованы антенные характеристики (диаграмма направленности, поляризационные характеристики, коэффициент направленного действия, входной импеданс) проволочных цилиндрических излучателей, покрытых диэлектрическим слоем. Методика анализа базируется на численном решении интегрального уравнения Поклингтона, обобщенного на случай тонкого проводника с диэлектрическим покрытием. Установлены зависимости антенных характеристик излучателя от толщины и диэлектрической проницаемости диэлектрика.

Ключевые слова: спиральная антенна, диэлектрическое покрытие, антенные характеристики, интегральное уравнение.

Введение

Современные радиосистемы различного назначения, особенно те, которые эксплуатируются на надводных и воздушных судах, должны проектироваться с учетом внешних воздействий, влияющих на их работу. Основным устройством радиосистем, подверженных внешнему воздействию, является антенна. С целью уменьшения внешних воздействий на антенну используют диэлектрическое покрытие, что в свою очередь приводит к изменениям электродинамических характеристик [1]. Поэтому учет влияния диэлектрического покрытия на работу антенн является актуальной практической задачей.

Спиральные антенны, относящиеся к классу широкополосных антенн средней и слабой направленности, широко используются в антенной технике в качестве самостоятельных излучающих систем, в качестве облучателей зеркальных и линзовых антенн, элементов фазированных антенных решеток, возбуждателей волноводно-рупорных антенн [2].

Данная работа является продолжением исследований цилиндрических спиральных антенн (ЦСА), представленных в [3], и посвящена детальному изучению влияния диэлектрического покрытия на такие важные антенные характеристики, как диаграмма направленности (ДН), коэффициент направленного действия (КНД), поляризационные характеристики, входной импеданс в диапазоне частот, соответствующих осевому режиму излучения. Исследования проводились для ЦСА с числом витков $N = 4 \dots 8$ и углом намотки $\alpha = 6 \dots 30^\circ$, поскольку излучатели с такими параметрами широко используются на практике.

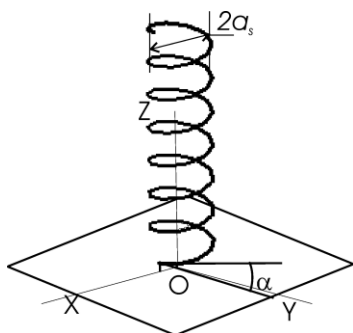


Рис. 1. Геометрия ЦСА

Для решения задачи возбуждения ЦСА, геометрия которой представлена на рис. 1, использовалось интегральное уравнение (ИУ) типа Поклингтона, обобщенное на случай тонкого проводника произвольной геометрии с диэлектрическим покрытием [4]:

$$\int_L I(s) K(s, s') ds' = i\omega \varepsilon_0 E_\tau^i,$$

$$K(s, s') = AG_a \rho_a^{-2} k^2 - 3ik\rho_a^{-1} - 3\rho_a^{-2} + CG_a \beta_a \rho_a^{-2} - k^2 -$$

$$- \alpha AG_a \rho_a^{-2} k^2 - 3ik\rho_a^{-1} - 3\rho_a^{-2} + \alpha AG_b \rho_b^{-2} k^2 - 3ik\rho_b^{-1} - 3\rho_b^{-2} - \alpha C G_a \beta_a \rho_a^{-2} - G_b \beta_b \rho_b^{-2}, \quad (1)$$

$$\alpha = \varepsilon_a - \varepsilon_0 \varepsilon_a^{-1}, \quad d_i = x_i - x'_i, \quad \beta_{a,b} = 1 + ik\rho_{a,b},$$

$$A = \sum_{j=1}^3 d_j \frac{\partial x_j}{\partial s} d_i \frac{\partial x'_i}{\partial s'}, \quad C = \sum_{i=1}^3 \frac{\partial x_i}{\partial s} \frac{\partial x'_i}{\partial s'}, \quad \rho_a = \sqrt{\sum_{j=1}^3 (x_j - x'_j)^2 + a^2}, \quad \rho_b = \sqrt{\sum_{j=1}^3 (x_j - x'_j)^2 + b^2},$$

где L — длина проводника; $I(s)$ — искомая функция распределения тока вдоль проводника; s, s' — криволинейные координаты, отсчитываемые вдоль оси проводника; ω — циклическая частота; $\varepsilon_0, \varepsilon_a$ — диэлектрическая постоянная и диэлектрическая проницаемость покрытия; E_τ^i — тангенциальная составляющая электрического поля; $K(s, s')$ — ядро интегрального уравнения; x_i, x'_j — декартовы координаты точек наблюдения и источника; G_a, G_b — функция Грина для точек наблюдения на поверхности проводника и покрытия; ρ_a, ρ_b — расстояние между точками источника тока и наблюдения на поверхности проводника и диэлектрического слоя; a — радиус сечения проводника; $b-a$ — толщина диэлектрического слоя.

ИУ (1) решалось методом моментов с использованием кусочно-постоянных функций в качестве базисных и дельта-функций в качестве весовых [5]. Параметры покрытия изменялись в соответствии с ограничениями квазистатической модели распределения заряда в диэлектрическом покрытии, установленными в [6]. Учет влияния экрана проводился методом зеркальных изображений, т.е. рассматривался экран бесконечных размеров. По найденному амплитудно-фазовому распределению тока рассчитывались характеристики направленности, поляризационные характеристики, входной импеданс [7]. Все алгоритмы по расчетам были разработаны и реализованы авторами в виде программы "РМК32W".

На рис. 2 представлена диаграмма направленности (ДН) в различных частотных диапазонах.

В низкочастотной области при $ka_s < 0,2$ (где k — волновое число, a_s — радиус катушки спирали) ДН ЦСА похожа на ДН полуволнового вибратора, размещенного параллельно оси спирали. Наличие диэлектрического покрытия приводит к появлению небольшого по уровню лепестка в осевом направлении. Как увеличение толщины покрытия, так и увеличение диэлектрической проницаемости приводит к возрастанию уровня осевого лепестка до 20% от максимума излучения.

На частотах, соответствующих $ka_s = 0,2 \dots 0,55$, ДН имеет вид листка клена, у которого боковые лепестки по уровню сравнимы с осевым лепестком. Наличие диэлектрика приводит к изменению угла места боковых лепестков.

В частотной области $ka_s = 0,55 \dots 0,65$ формируется один осевой и не более четырех боковых лепестков с уровнем 10...25%. Направление главного лепестка совпадает с направлением оси спирали. Увеличение диэлектрической проницаемости покрытия не приводит к значительным искажениям ДН, уровень и количество боковых лепестков уменьшается.

В диапазоне $ka_s = 0,65 \dots 1,0$ формируется осевое излучение с малым уровнем боковых лепестков. Ширина главного лепестка по уровню половинной мощности составляет $\Delta\theta_{0,5} = 45 \dots 70^\circ$. При увеличении диэлектрической проницаемости и толщины покрытия незначительно изменяется ширина главного лепестка. У ЦСА с углами катушки $\alpha = 13 \dots 18^\circ$ на частотах близких к $ka_s = 0,60 \dots 0,75$ наблюдается искажение ДН, выраженное в резком увеличении одного из боковых лепестков до уровня 20%. Анализ характера излучения ЦСА на этих частотах без экрана показывает наличие перехода между обратным и прямым осевым излучением.

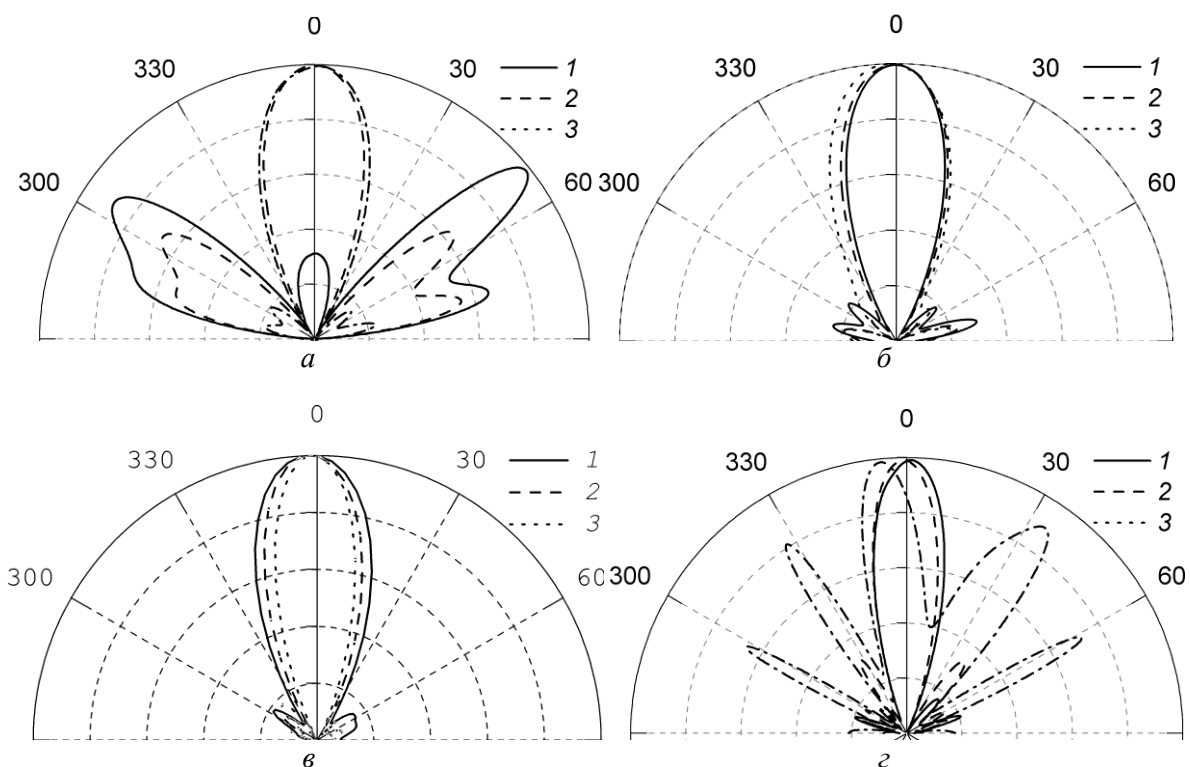


Рис. 2. Диаграмма направленности ЦСА по мощности:
 $a — ka_s=0,57$; $б — ka_s=0,7$; $в — ka_s=1,1$; $г — ka_s=1,4$; 1 — $\epsilon=1$; 2 — $\epsilon=2$; 3 — $\epsilon=10$

На высокочастотной (ВЧ) границе $ka_s=1,0 \dots 1,2$ режима осевого излучения происходит сужение главного лепестка из-за диэлектрического покрытия. Незначительное нарушение симметрии главного лепестка и отклонение примерно на $5 \dots 10^\circ$ от оси спирали связано с конечными размерами спирали и несимметричным расположением источника возбуждения относительно антенны.

На частотах $ka_s > 1,2$ формируется изрезанная многолепестковая ДН. Лепестки имеют игольчатую форму. Диэлектрическое покрытие приводит к росту боковых лепестков, отклонение главного лепестка от оси достигает 30° .

Коэффициент направленного действия. По найденному распределению электромагнитного поля в дальней зоне рассчитывался КНД. На рис. 3 представлена характерная зависимость КНД от параметра ka_s при различном количестве витков, углах намотки, диэлектрической проницаемости и толщины покрытия.

При малом количестве витков $N < 5$ и углах намотки $\alpha < 12^\circ$ КНД не превышает $D < 10$ и слабо зависит как от частотного параметра ka_s , так и от диэлектрического покрытия. При большем числе витков и увеличении угла намотки КНД возрастает до $D=14 \dots 20$, как показано на рис. 3,б. Также на центральных частотах появляется зависимость между КНД и частотным параметром ka_s . Максимальных значений КНД достигает на нижних частотах при $ka_s=0,5 \dots 0,6$ и верхних при $ka_s=1,1 \dots 1,2$. Анализ излучения ЦСА показывает, что на нижних частотах высокий КНД обеспечивается обратным лепестком, который отражается от экрана, формируя главный лепесток с низким уровнем боковых. На верхних частотах высокий КНД обеспечивается узким главным лепестком, но при этом существуют боковые лепестки с высоким уровнем.

КНД достигает максимальных значений при углах намотки $12 \dots 16^\circ$, однако на некоторых частотах снижается до 10, как представлено на рис. 3,в,г. С увеличением диэлектрической проницаемости покрытия наблюдается как смещение КНД в НЧ область, так и увеличение максимальных значений КНД на НЧ и ВЧ границе осевого режима излучения.

Дальнейшее увеличение угла намотки приводит к уменьшению КНД на всей области центральных частот, как представлено на рис. 3,д,е.

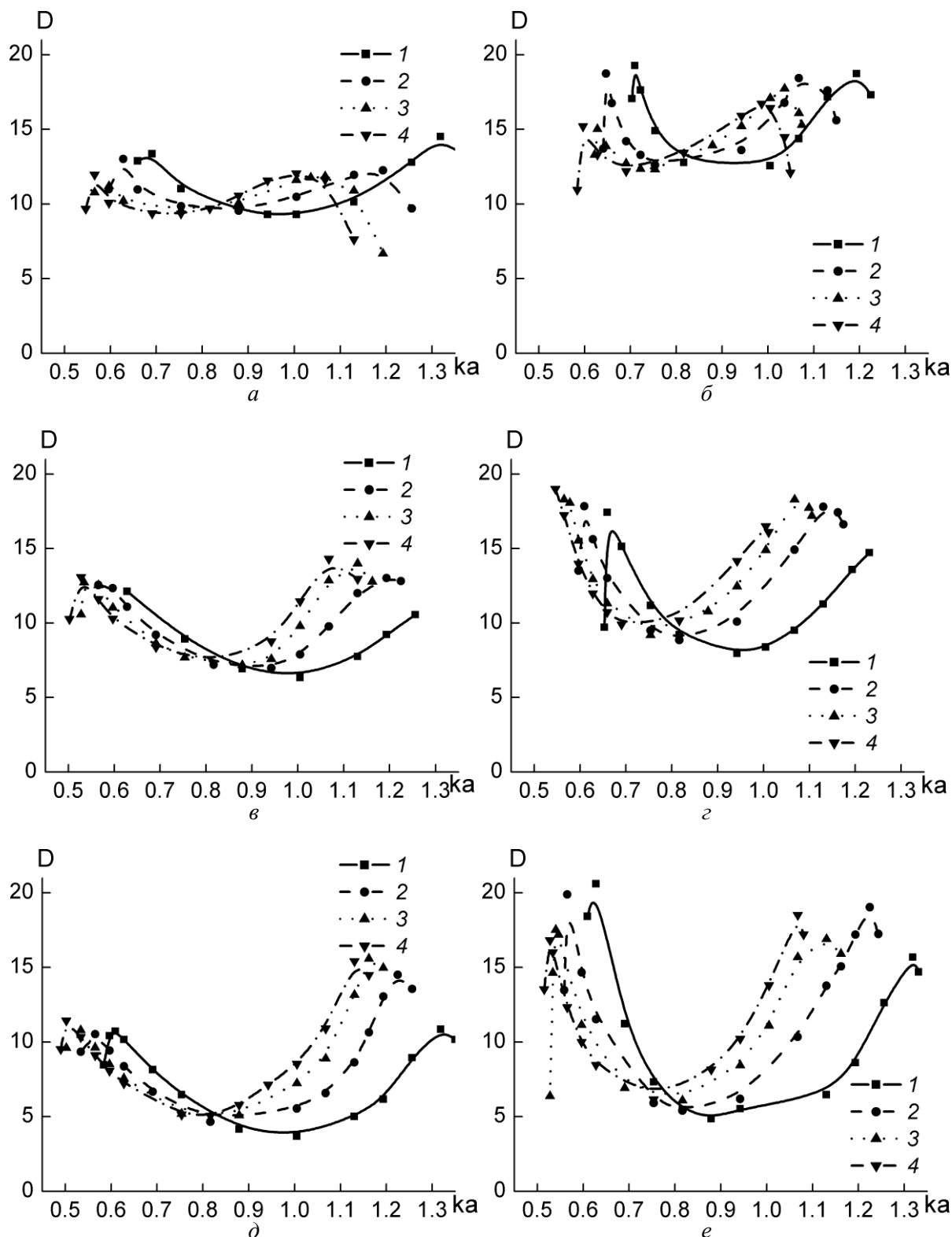


Рис. 3. Коэффициент направленного действия ЦСА: a — $\alpha=12^\circ$; $N=4$; b — $\alpha=12^\circ$; $N=7$; c — $\alpha=16^\circ$; $N=4$; z — $\alpha=16^\circ$; $N=7$; d — $\alpha=20^\circ$; $N=4$; e — $\alpha=20^\circ$; $N=7$; 1 — $\varepsilon=1$; 2 — $\varepsilon=2$; 3 — $\varepsilon=4$; 4 — $\varepsilon=8$

На рис. 4 представлена серия графиков, характеризующих зависимость коэффициента поляризации p от угла θ в сферической системе координат при различной диэлектрической проницаемости, на центральных и периферийных частотах осевого режима излучения. Под коэффициентом поляризации подразумевается отношение малой к большой оси поляризационно-

го эллипса. В пределах главного лепестка ($\theta < 20 \dots 40^\circ$) на центральных частотах излучение имеет поляризацию $p > 0,8$, близкую к круговой. На нижних частотах поляризация становится эллиптической и на некоторых частотах почти линейной. На высоких частотах наблюдается эллиптическая поляризация с $p = 0,6 \dots 0,8$.

Хорошо видно, что кривые 4 на рис. 4, а, б, г, д весьма схожи, несмотря на различные диэлектрическую проницаемость и частоту. Это позволяет сделать вывод о том, что с увеличением диэлектрической проницаемости, или толщины покрытия, наблюдается смещение поляризационных характеристик в НЧ область.

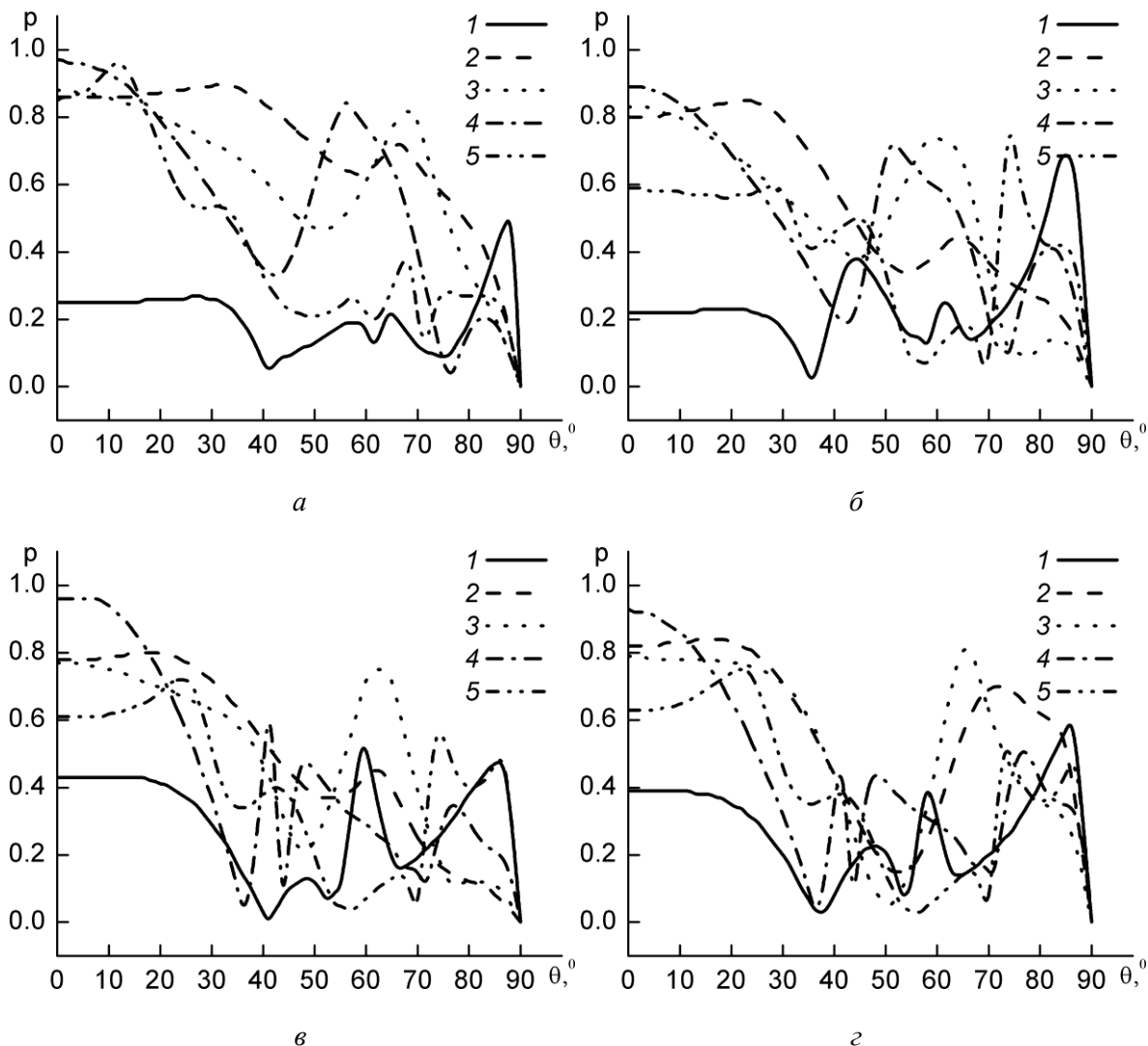


Рис. 4. Поляризационные характеристики ЦСА:

- а — $\varepsilon=1$; 1 — $ka_s=0,71$; 2 — $ka_s=0,75$; 3 — $ka_s=0,94$; 4 — $ka_s=1,04$; 5 — $ka_s=1,32$;
 б — $\varepsilon=2$; 1 — $ka_s=0,65$; 2 — $ka_s=0,75$; 3 — $ka_s=0,94$; 4 — $ka_s=1,00$; 5 — $ka_s=1,13$;
 в — $\varepsilon=4$; 1 — $ka_s=0,62$; 2 — $ka_s=0,70$; 3 — $ka_s=0,88$; 4 — $ka_s=0,99$; 5 — $ka_s=1,07$;
 г — $\varepsilon=8$; 1 — $ka_s=0,60$; 2 — $ka_s=0,75$; 3 — $ka_s=0,82$; 4 — $ka_s=0,96$; 5 — $ka_s=1,04$

Характерная зависимость входного импеданса от параметра ka_s представлена на рис. 5 при различной диэлектрической проницаемости и толщине покрытия, где R_{in} , X_{in} — активная и реактивная части входного импеданса, $d=b-a$ — толщина диэлектрического покрытия.

Результаты моделирования активной и реактивной составляющей входного импеданса ЦСА, выполненной из проводника без диэлектрического покрытия, сравнивались с представленными экспериментальными данными $R_{in} = 160 \pm 60$ Ом, $X_{in} = -70 \pm 35$ Ом [8]. Расхождение между данными составило порядка 20...30%.

В НЧ области при $ka_s = 0,5 \dots 0,7$ происходит резонанс как действительной, так и мнимой частей входного импеданса.

На центральных частотах при $ka_s = 0,7 \dots 1,2$ наблюдается плавное уменьшение действительной составляющей входного импеданса. Наличие диэлектрического покрытия приводит к уменьшению активной составляющей входного импеданса приблизительно на 10...30 Ом. Реактивная составляющая практически не изменяется и составляет около $-15 \dots -20$ Ом. Однако для покрытия с толщиной $d/a \geq 3$ нарушается монотонная зависимость импеданса, как представлено на рис. 5, б.

В частотной области $ka_s = 1,2 \dots 1,4$ увеличивается значение действительной составляющей импеданса. В этом частотном диапазоне диэлектрическое покрытие уменьшает входной импеданс на 10...40 Ом.

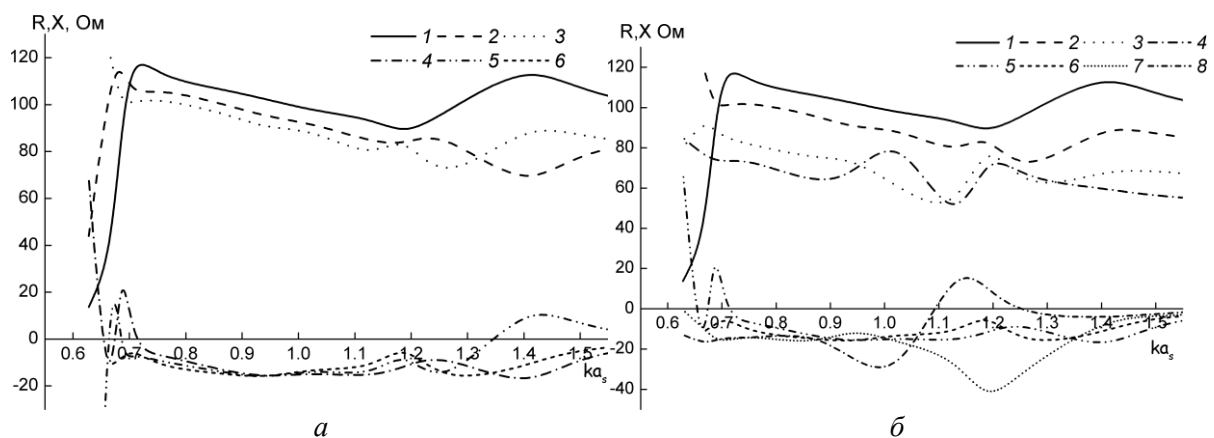


Рис. 5. Входной импеданс ЦСА:

a — 1, 4 — $\epsilon=1$; 2, 5 — $\epsilon=2$; 3, 6 — $\epsilon=5$; *б* — 1, 5 — $d/a=0$; 2, 6 — $d/a=1$; 3, 7 — $d/a=3$; 4, 8 — $d/a=5$

Зависимость мнимой составляющей входного импеданса от частоты носит сложный осциллирующий характер. В большинстве случаев значение колеблется вокруг значения $-15 \dots -20$ Ом. Под воздействием диэлектрического покрытия увеличивается диапазон изменений мнимой составляющей входного импеданса до 20 ...-35 Ом.

Таким образом, в ходе исследований было изучено влияние диэлектрического покрытия на антенные характеристики тонкопроволочных цилиндрических спиральных антенн. Полученные результаты по характеристикам направленности, поляризационным характеристикам и входному импедансу позволяют сделать вывод: диэлектрическое покрытие приводит к уменьшению уровня боковых лепестков на низких частотах, к увеличению уровня боковых лепестков и отклонению главного лепестка от осевого направления до 30° на высоких частотах; при углах намотки $\alpha = 10 \dots 16^\circ$ на краях диапазона осевого излучения увеличивается КНД; на низких частотах коэффициент поляризации увеличивается; входной импеданс уменьшается, особенно сильно на высоких частотах.

В целом диэлектрическое покрытие с проницаемостью $\epsilon < 10$ и толщиной, сравнимой с диаметром проводника проволочных ЦСА, приводит к смещению рабочего диапазона антенны в область низких частот в среднем на 10...15%.

ANTENNAS CHARACTERISTICS OF CYLINDRICAL HELICAL RADIATORS WITH DIELECTRIC COATINGS

N.Yu. SITSKO

Abstract

An investigation of antennas characteristics (radiation pattern, polarization characteristics, directivity, input impedance) of cylindrical helices wire radiators with dielectric coatings was carried out. The analysis procedure is based on numerical solution of Pocklington's integral equation generalized for the case of a thin conductor covered with dielectric layer. The radiator's antennas characteristics dependence on dielectric thickness and permittivity are established.

Литература

1. Красюк В.Н. Антенны СВЧ с диэлектрическими покрытиями. Л., 1986.
2. Юрцев О.А., Рунов А.В., Казарин А.Н. Спиральные антенны. М., 1974.
3. Демидчик В.И., Сицко Н.Ю. // Вестник БГУ. Сер. 1. 2005. № 1. С. 56–59.
4. Demidchik V., Sitsko M. // IV International Conference on Antenna Theory and Techniques 2003, September 8-13, Sevastopol, Ukraine. ICATT'03 Proc. Vol. 2. P. 723–725.
5. Митра Р. Вычислительные методы электродинамики. М., 1977.
6. Popovich B.D., Djordjevich A.R., Kirchanski N.M. // The Radio and Electronic Engineer. 1981. Vol. 51, № 3. P. 141–145.
7. Сазонов М.Д. Антенны и устройства СВЧ. М., 1988.
8. Nakano H., Samada Y., Yamauchi J. // IEEE Antennas Propag. 1986. Vol. AP-34, № 9. P. 1143–1148.

В рубрике "Электроника" в № 1 за 2008 г. в статье "Задающие воздействия цепей самонастройки автокомпенсаторов мешающих отражений и формирующие фильтры их воспроизведения" авторов А.В. Романова, А.Е. Охрименко, С.В. Шаляпина, П.Г. Семашко, И.С. Храпуна, абзац, начинающийся словами "Эффективным методом исследования..." к статье не относится. Приносим извинения читателям.