

УДК 621.396.671:528.8

## ВОЛНОВЫЕ ПРОЦЕССЫ В БЛИЖНЕЙ ЗОНЕ АПЕРТУРНЫХ АНТЕНН С РАСКРЫВОМ КРУГЛОЙ ФОРМЫ

**Н.Н. Горобец, Е.Е. Овсянникова**

*Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина, пл. Свободы, 4; Харьков, 61022, Украина.*

*e-mail: Nikolay.N.Gorobets@karazin.ua*

*Поступила в редакцию 27 июня 2017г.*

Методом вектора Герца решена задача определения амплитудных и фазовых характеристик электрических и магнитных полей в ближней и промежуточной зонах наблюдения, излучаемых апертурной антенной с раскрывом круглой формы при равномерном синфазном ее возбуждении. Показано, что круглые апертуры формируют прожекторный луч в ближней зоне при диаметрах раскрыва, больших одной длины волны. Характер распределения амплитуд и фаз электрического и магнитного полей в ближней и промежуточной зонах качественно близок к таким же распределениям в случае квадратных и прямоугольных апертур, однако отличается существенно большей глубиной осцилляций полей.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** электромагнитные поля, апертурные антенны, ближняя, промежуточная, дальняя зона антенны, прожекторный луч

Методом вектора Герца вирішена задача визначення амплітудних і фазових характеристик електричних і магнітних полів в ближній і проміжній зонах спостереження, випромінюваних апертурною антеною з розкритом круглої форми при рівномірному синфазному її збудженні. Показано, що круглі апертури формують прожекторний промінь в ближній зоні при діаметрах розкриття, більших однієї довжини хвилі. Характер розподілу амплітуд і фаз електричного і магнітного полів в ближній і проміжній зонах якісно близький до таких же розподілів у випадку квадратних і прямокутних апертур, однак відрізняється істотно більшою глибиною осциляцій полів.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** електромагнітні поля, апертурні антени, ближня, проміжна, дальня зона антени, прожекторний промінь

The problem of determining the amplitude and phase characteristics of electric and magnetic fields in the near and intermediate observation zones emitted by an aperture antenna with a circular opening, when it is scattered in-phase excited, is solved by the method of the Hertz vector. It is shown that round apertures form a searchlight in the near zone with opening diameters larger than one wavelength. The nature of the distribution of the amplitudes and phases of the electric and magnetic fields in the near and intermediate zones is qualitatively close to the same distributions in the case of square and rectangular apertures, but differs by a much greater depth of field oscillations.

**KEY WORDS:** electromagnetic fields, aperture antennas, near-, intermediate-, far zone of the antenna, searchlight beam

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время хорошо известно, что распределение амплитудных, фазовых и поляризационных характеристик электрических и магнитных полей в пространстве вблизи антенны в ее ближней и промежуточной зонах наблюдения сильно зависит не только от амплитудно-фазового распределения источников поля в антенне и ее электрических размеров, но и от формы излучающего раскрыва [1-3]. В [1, 4] показано, что надлежащим выбором отношения сторон плоского раскрыва антенны прямоугольной формы с размерами, большими одной-двух длин волн, можно обеспечить близкое к постоянному пространственное распределение амплитуды поля в определенной (не любой) области пространства в некотором объеме или на плоскости в ближней зоне антенны. С другой стороны, из результатов расчетов, приведенных, в [2], следует, что максимальные осцилляции амплитуды электрического и магнитного полей и, следовательно, мощности поля имеет место в прожекторном луче апертурных антенн с раскрывом круглой формы. При этом вопросы формирования прожекторного луча и фазовые характеристики электрического и магнитного поля, особенности их распределения в ближней зоне антенны, влияние электрических размеров раскрыва на глубину осцилляций поля остались не изученными.

Цель настоящей статьи – исследование амплитудных и фазовых характеристик электрических и магнитных полей на конечном расстоянии от излучающего раскрыва круглой формы в ближней и промежуточной зонах наблюдения.

### АЛГОРИТМ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Задача нахождения полей на конечном расстоянии в ближней и промежуточной зонах антенн при заданных амплитудных и фазовых распределениях источников поля относится к внешним задачам электродинамики и методы ее решения хорошо известны. Воспользуемся достаточно простым и хорошо разработанным методом векторов Герца. Будем считать, что раскрыв антенны возбуждается синфазно, а электрические и магнитные поля в раскрыве  $\vec{E}_S$  и  $\vec{H}_S$  известны. Тогда искомые электрические и магнитные поля на конечном расстоянии от раскрыва выражаются через электрический и магнитный векторы Герца следующим образом:

$$\vec{E} = \text{grad div } \vec{\Pi}^{\mathcal{E}} + \kappa^2 \vec{\Pi}^{\mathcal{E}} - i\omega \mu \text{rot } \vec{\Pi}^{\mathcal{M}}, \quad (1)$$

$$\vec{H} = i\omega \varepsilon \text{rot } \vec{\Pi}^{\mathcal{E}} + \text{grad div } \vec{\Pi}^{\mathcal{M}} + k^2 \vec{\Pi}^{\mathcal{M}}. \quad (2)$$

Здесь векторы Герца запишем через поля в раскрыве в виде

$$\vec{\Pi}^{\mathcal{M}} = -\frac{1}{4\pi i \mu \omega} \int_S [\vec{z}^0 \vec{E}_S] \psi(r) dS; \quad (3)$$

$$\vec{\Pi}^{\mathcal{E}} = \frac{1}{4\pi i \varepsilon \omega} \int_S [\vec{z}^0 \vec{H}_S] \psi(r) dS, \quad (4)$$

а функция сферической волны равна

$$\psi(r) = \frac{e^{-ikr}}{r}. \quad (5)$$

Свяжем с излучающим раскрывом антенны, поля и волны излучения которой исследуются на конечном расстоянии, декартову систему координат, в которой будем находить амплитудные и фазовые характеристики электрических и магнитных полей. Поля в раскрыве, как и во всех краевых задачах с осевой симметрией, будем описывать в полярной системе координат  $\rho$  и  $\varphi$ . Естественно, что начала обеих систем координат помещаются в центр круга, совпадающего с раскрывом антенны. В выбранных таким способом системах координат расстояние  $r$  от точек раскрыва с координатами  $\rho$  и  $\varphi$ , по которым проводится интегрирование в (1) – (4), и точками наблюдения с текущими координатами  $x$ ,  $y$ ,  $z$  равно

$$r = \left( (x - \rho \cos \varphi)^2 + (y - \rho \sin \varphi)^2 + z^2 \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (6)$$

Электрические и магнитные поля в раскрыве будем считать поперечными и связанными между собой известным соотношением

$$\vec{H}_S = \frac{1}{W_S} [\vec{z}^0 \vec{E}_S], \quad (7)$$

где  $W_S$  - волновое сопротивление раскрыва антенны.

В самом общем случае поля в раскрыве могут быть поляризованы эллиптически. Их можно представить в ортогональном линейнополяризованном базисе

$$\begin{aligned} \vec{E}_S(x, y) &= \vec{x}^0 \dot{E}_{Sx}(x, y) + \vec{y}^0 \dot{E}_{Sy}(x, y); \\ \vec{H}_S(x, y) &= \vec{x}^0 \dot{H}_{Sx}(x, y) + \vec{y}^0 \dot{H}_{Sy}(x, y) \end{aligned} \quad (8)$$

и дальше работать отдельно с каждой скалярной компонентой поля отдельно.

Выполнив все математические операции согласно (1) – (4) с учетом (5) – (8) получим расчетные формулы для всех скалярных компонент векторов напряженности электрического и магнитного поля в декартовой системе координат:

$$\dot{E}_x = \frac{1}{4\pi} \int_S \dot{E}_{Sx} \psi f_1 z dS + \frac{i\lambda W_0}{8\pi^2 W_S} \int_S (-\dot{E}_{Sx} \psi f_1 + \psi f_2 (x - \rho \cos \varphi) q_1) dS + \frac{iW_0}{2\lambda W_S} \int_S \dot{E}_{Sx} \psi dS, \quad (9)$$

$$\dot{E}_y = \frac{1}{4\pi} \int_S \dot{E}_{Sy} \psi f_1 z dS + \frac{i\lambda W_0}{8\pi^2 W_S} \int_S (-\dot{E}_{Sy} \psi f_1 + \psi f_2 (y - \rho \sin \varphi) q_1) dS + \frac{iW_0}{2\lambda W_S} \int_S \dot{E}_{Sy} \psi dS, \quad (10)$$

$$\dot{E}_z = -\frac{1}{4\pi} \int_S \psi f_1 q_1 dS + \frac{i\lambda W_0}{8\pi^2 W_S} \int_S q_1 \psi f_2 z dS, \quad (11)$$

$$\dot{H}_x = -\frac{1}{4\pi W_S} \int_S \dot{E}_{Sy} \psi f_1 z dS + \frac{i\lambda}{8\pi^2 W_0} \int_S (-\psi f_1 \dot{E}_{Sy} + \psi f_2 (x - x_S) q_2) dS - \frac{i}{2\lambda W_0} \int_S \dot{E}_{Sy} \psi dS, \quad (12)$$

$$\dot{H}_y = -\frac{1}{4\pi W_S} \int_S -\dot{E}_{Sx} \psi f_1 z dS + \frac{i\lambda}{8\pi^2 W_0} \int_S (\psi f_2 (y - \rho \sin \varphi) q_2 + \dot{E}_{Sx} \psi f_1) dS + \frac{i}{2\lambda W_0} \int_S \dot{E}_{Sx} \psi dS, \quad (13)$$

$$\dot{H}_z = \frac{1}{4\pi W_S} \int_S q_2 \psi f_1 dS + \frac{i\lambda}{8\pi^2 W_0} \int_S \psi f_2 z q_2 dS, \quad (14)$$

$$q_1 = \dot{E}_{Sx} (x - \rho \cos \varphi) + \dot{E}_{Sy} (y - \rho \sin \varphi), \quad q_2 = \dot{E}_{Sy} (x - \rho \cos \varphi) - \dot{E}_{Sx} (y - \rho \sin \varphi), \quad f_1 = \frac{ik}{r} + \frac{1}{r^2},$$

$$f_2 = \frac{3}{r^4} + \frac{3ik}{r^3} - \frac{k^2}{r^2}. \quad (15)$$

Проделав математические выкладки аналогично [1], легко получить ортогональные компоненты электрического и магнитного полей в сферической системе координат.

Разработанное математическое обеспечение является математической моделью ближней и промежуточной зоны апертурной антенны с раскрывом круглой формы. Для количественного анализа физических закономерностей волновых процессов вблизи апертурных антенн с круглым раскрывом при изменении их размеров необходимо иметь из решения внутренней задачи электродинамики амплитудные и фазовые распределения ортогональных компонент электрического и магнитного полей. Эти данные позволяют также определить состояние поляризации электромагнитной волны в каждой точке излучающего раскрыва антенны. К настоящему времени в строгой постановке известно решение внутренней и внешней задачи только для открытого конца круглого волновода и конического рупора. Для апертурных антенн акустического и оптического типа, широко используемых на практике, общего решения внутренней задачи электродинамики нет из-за разнообразия возможностей возбуждения излучающего раскрыва антенны. Тем не менее анализ физических закономерностей волновых процессов в ближней и промежуточной зонах наблюдения возможен при задании различных вариантов амплитудно-фазовых распределений источников полей в раскрыве, как обычно и делают [5]. Из физических соображений следует, что наиболее полные проявления влияния формы и электрических размеров раскрыва антенны на особенности волновых процессов в ближней зоне будут иметь место при постоянном амплитудном и фазовом распределении поля в раскрыве и при линейной поляризации излучения. Далее рассмотрим именно такой случай при  $\dot{E}_{Sy} = 0$  для круглых раскрывов с диаметром, меньшим длины волны, равным нескольким длинам волн и большим электрическим размером.

### ВОЛНОВЫЕ ПРОЦЕССЫ В БЛИЖНЕЙ ЗОНЕ АПЕРТУРНЫХ АНТЕНН С РАСКРЫВОМ КРУГЛОЙ ФОРМЫ МАЛЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ РАЗМЕРОВ

Нетрудно видеть, что при размерах излучающего раскрыва, не превышающих одной длины волны, любая точка наблюдения в ближней, промежуточной и дальней зонах находится в пределах одной первой зоны Френеля. Следовательно, в этом случае нет предпосылок для формирования проекторного луча, для которого характерны осцилляции амплитуды и электрического и магнитного поля по мере удаления точки наблюдения от раскрыва антенны. Диаграмма направленности таких антенн широкая и не имеет боковых лепестков, а расстояние дальней зоны, как показано нами в [6], равно примерно двум длинам волн.

Для количественного анализа волновых процессов в ближней зоне апертурных антенн с раскрывом круглой формы согласно приведенной выше математической модели в среде MathCad разработано программное обеспечение решения задачи расчета и анализа амплитудных и фазовых характеристик электрических и магнитных полей на конечном расстоянии от антенны в ее ближней и промежуточной зонах. Для полноты анализа расчеты проведены для трех значений диаметра раскрыва: 0,5; 0,75 и 1,0 длины волны. Как было отмечено выше, амплитудное и фазовое распределение поля в раскрыве приняты постоянными. Поляризация излучения принята линейной и для определенности – вертикальной. На рис.1а представлены расчеты амплитуд векторов напряженности электрического и магнитного полей апертурных излучателей с круглым раскрывом диаметром 0,5 длины волны, 0,75 длины волны и одной длиной волны в зависимости от расстояния от центра раскрыва до точек наблюдения в направлении оси излучателя, т.е. в рассматриваемом случае в направлении главного максимума диаграммы направленности. Из рисунка видно, что как и в случаях линейных излучателей и апертурных излучателей

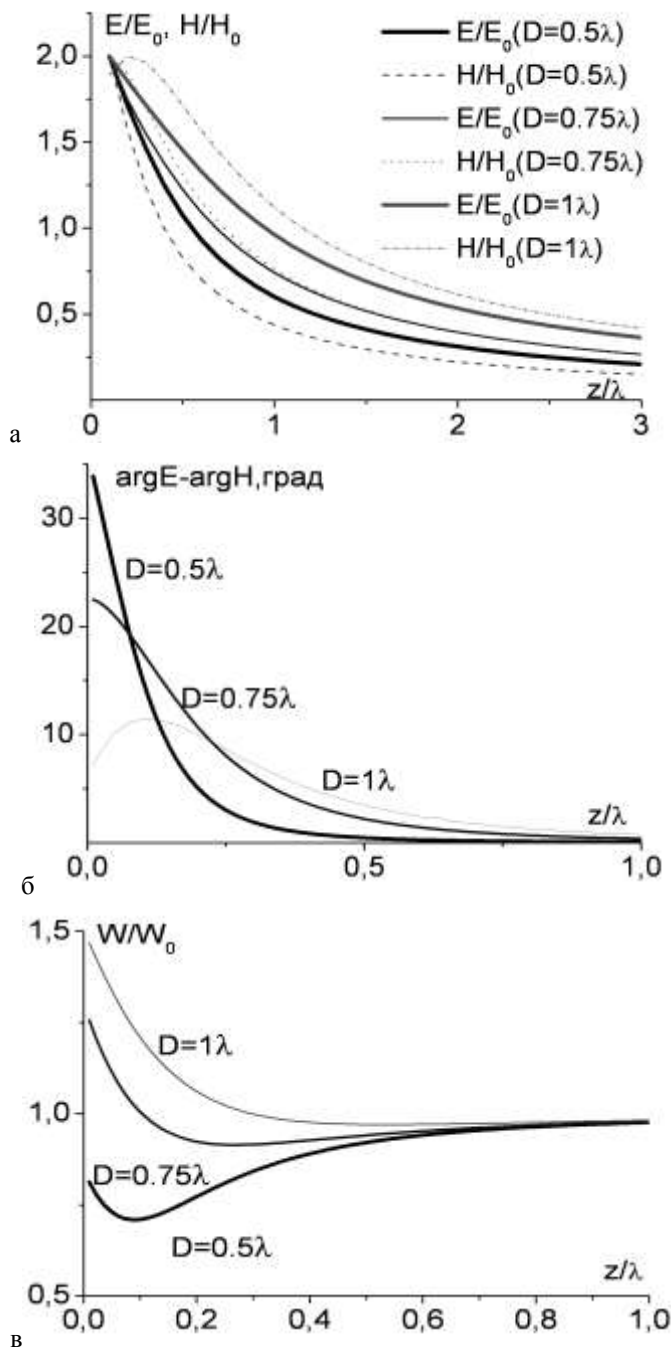


Рис.1. Зависимости амплитуд и разности фаз электрического и магнитного полей, а также волнового сопротивления излучателей с круглым раскрытием от расстояния в направлении нормали к раскрытию при  $D = 0,5; 0,75; 1,0$  длины волны

полной мощности электромагнитного поля в области этой точки наблюдения.

Особенностью волнового процесса в ближней зоне антенн является отличие волнового сопротивления пространства в ближней зоне от волнового сопротивления свободного пространства в дальней зоне  $W_0 = 120\pi$  Ом [2, 6]. Из рис. 1г, на котором представлена зависимость отношения волнового сопротивления в ближней зоне к волновому сопротивлению раскрытия  $W_s = W_0$  от расстояния  $z/\lambda$  в том же направлении нормали к раскрытию, видно, что характер этой зависимости довольно сложный. При этом максимальное отличие сопротивлений тем больше, чем больше диаметр раскрытия.

с прямоугольным и квадратным раскрытием малых электрических размеров [3], прожекторный луч не формируется, а амплитуда полей  $E$  и  $H$  равномерно уменьшается с увеличением координаты  $z$ . Скорость уменьшения амплитуды тем выше, чем меньше электрический размер раскрытия. Их рис.1 видно также, что при  $D = 0.5\lambda$  амплитуда электрического поля, отнесена к ее величине в центре раскрытия, т.е. в начале координат больше относительной амплитуды магнитного поля. При  $D = \lambda$  относительная амплитуда магнитного поля больше относительной амплитуды электрического поля, а при  $D = 0.75\lambda$  поля  $E/E_0$  и  $H/H_0$  в ближней и промежуточной зонах весьма близки друг к другу.

На рис. 1б представлены зависимости от расстояния разности фаз электрического и магнитного полей, рассчитанные для того же направления нормали к раскрытию излучателя. Эта характеристика волнового процесса, как хорошо известно, определяет наличие, локализацию и величину реактивной мощности в ближней зоне антенны. Из рисунка видно, что как и следовало ожидать, максимальный угол сдвига фаз электрического и магнитного поля (достигает примерно  $35^\circ$  вблизи раскрытия) имеет место в случае излучателя с наименьшим диаметром раскрытия. При увеличении электрических размеров раскрытия эта разность фаз и, следовательно, реактивная мощность в ближней зоне, уменьшаются. В частности, при  $D = \lambda$  максимальная разность фаз  $E$  и  $H$  полей не превышает  $12^\circ$  и имеет место на расстоянии около 0,1 длины волны. На расстоянии  $z = \lambda$ , т.е. на расстоянии половины расстояния дальней зоны, разность фаз  $E$  и  $H$  полей не превышает одного градуса. Следовательно, реактивная мощность поля на этом расстоянии не превышает 0,02% от

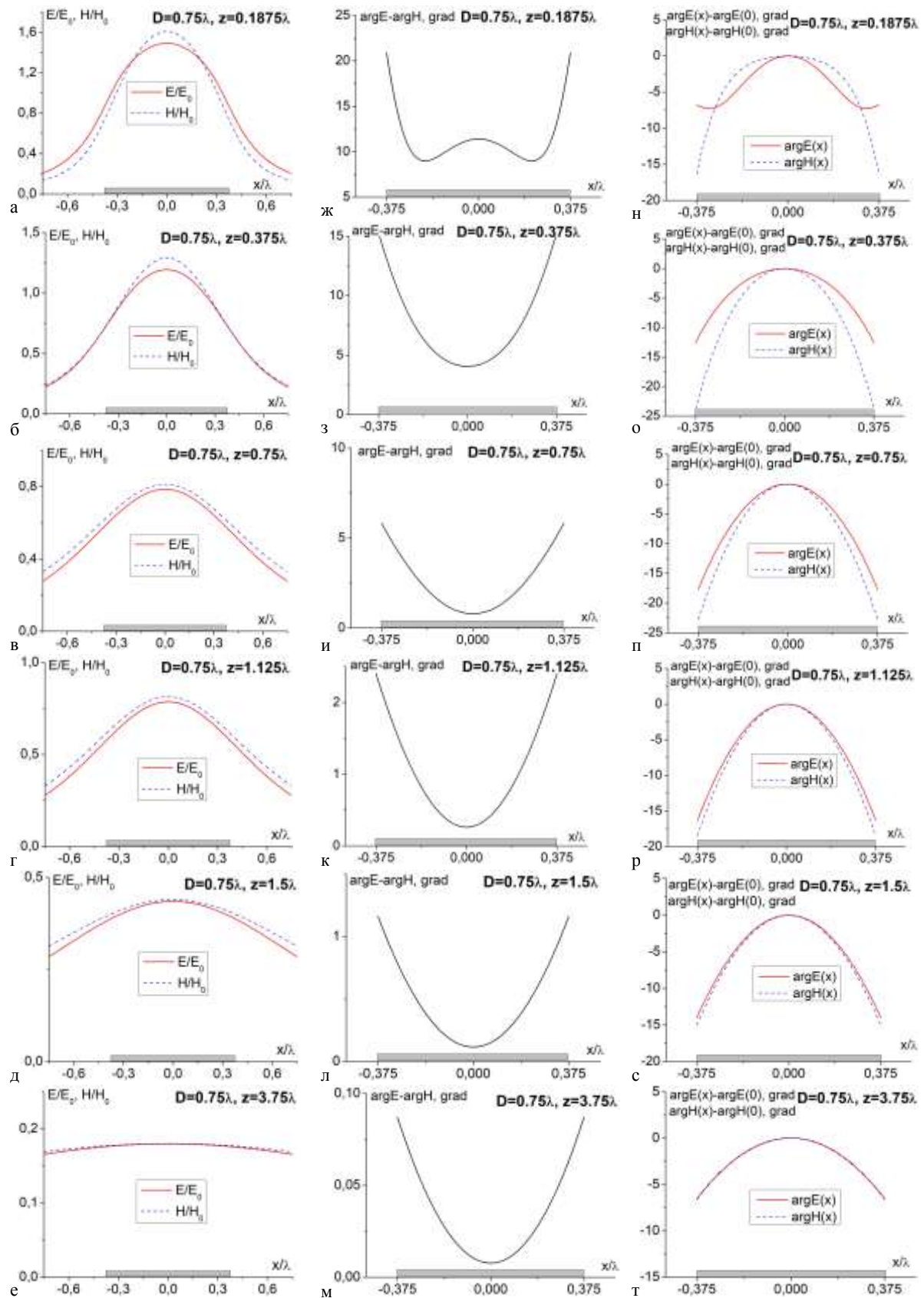


Рис. 2. Амплитудные и фазовые характеристики электрического и магнитного полей в плоскостях, параллельных раскрыву диаметром  $0,75$  длины волны

Рассмотрим далее распределение амплитуд и фаз электрических и магнитных полей на плоских поверхностях, расположенных на разных расстояниях от раскрыва перпендикулярно оси излучателя, т.е. на поверхностях  $z = const$ . Для оценки поперечных размеров прожекторного луча (рис. 2) на горизонтальной оси отмечена величина диаметра излучающего раскрыва антенны. На рис. 2(а-е) приведены расчеты зависимости амплитуд электрического  $E/E_0$  и магнитного  $H/H_0$  полей на плоскостях  $z = D/4\lambda; D/2\lambda; D/\lambda; 1,5D/\lambda; 2D/\lambda$  и  $5D/\lambda$  от поперечной координаты  $x/\lambda$ , рассчитанные для круглой апертуры диаметром  $0,75$  длины волны. Видно, что рассчитанные зависимости имеют плавный регулярно убывающий характер, что подтверждает полученный выше вывод об отсутствии прожекторного луча в ближней зоне апертурных излучателей круглой формы, электрические размеры которых не превышают длины волны. Этот же вывод подтверждают и расчеты зависимости разности фаз электрического и магнитного полей, приведенные для тех же плоскостей  $z = const$  (рис. 2ж-м). Так же убедительно подтверждают этот вывод и расчеты фазового распределения электрического и магнитного полей в поперечных плоскостях (рис.2 н-т).

### ВОЛНОВЫЕ ПРОЦЕССЫ В БЛИЖНЕЙ ЗОНЕ АПЕРТУРНЫХ АНТЕНН С РАСКРЫВОМ КРУГЛОЙ ФОРМЫ СРЕДНИХ И БОЛЬШИХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ РАЗМЕРОВ

В [3] установлено, что апертурные антенны с раскрывом квадратной и прямоугольной формы формируют в ближней зоне прожекторный луч в случае, если электрические размеры сторон раскрыва больше одной длины волны. Покажем, что этот вывод справедлив и для апертурных антенн с раскрывом круглой формы. На рис.3а-г представлены расчеты, аналогичные приведенным на рис.1, для раскрывов диаметром  $2; 5$  и  $10$  длин вол. Антенны с такими размерами излучающего раскрыва считаются средней направленности. Из сравнения зависимостей амплитуд полей  $E/E_0$  и  $H/H_0$  от расстояния  $z/\lambda$  в рассматриваемом случае апертуры круглой формы (рис.3а, б) с такими же данными для квадратных апертур, приведенными в [3], видно формирование прожекторного луча протяженностью такой же, как и для квадратных апертур. Однако амплитуды осцилляций поля существенно больше в максимумах и

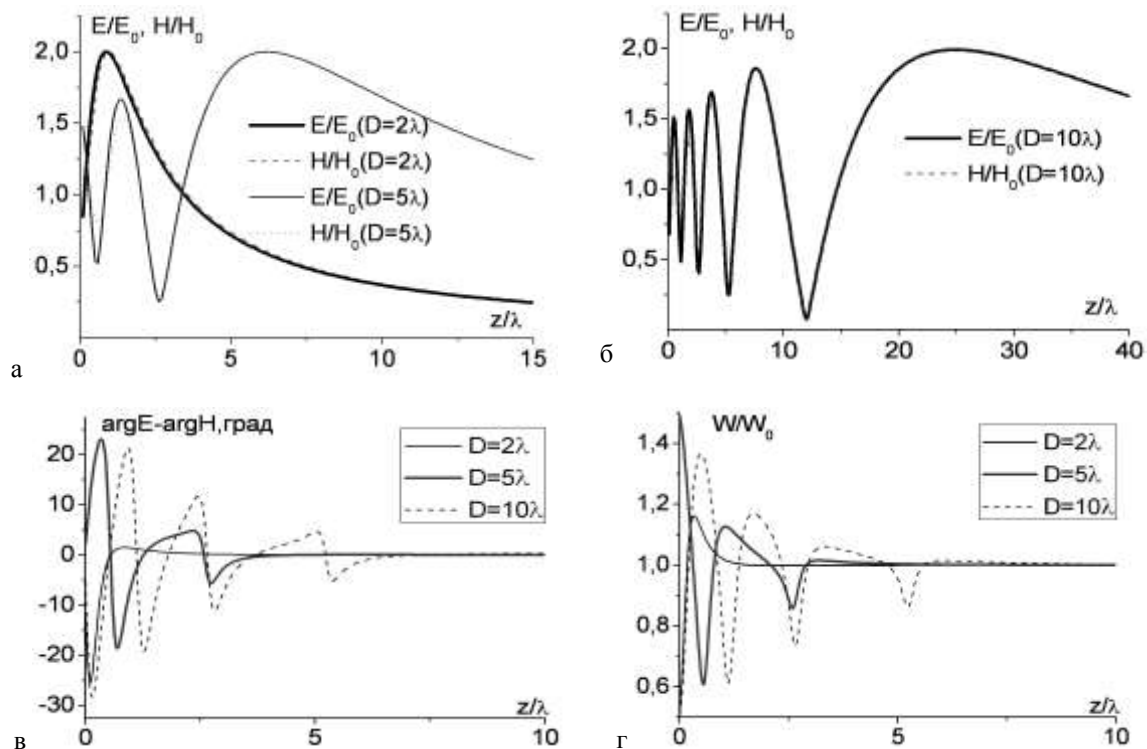


Рис.3. Зависимость амплитуд и разности фаз электрического и магнитного полей и волнового сопротивления апертурных антенн с круглым раскрывом средних электрических размеров от расстояния в направлении нормали к раскрыву

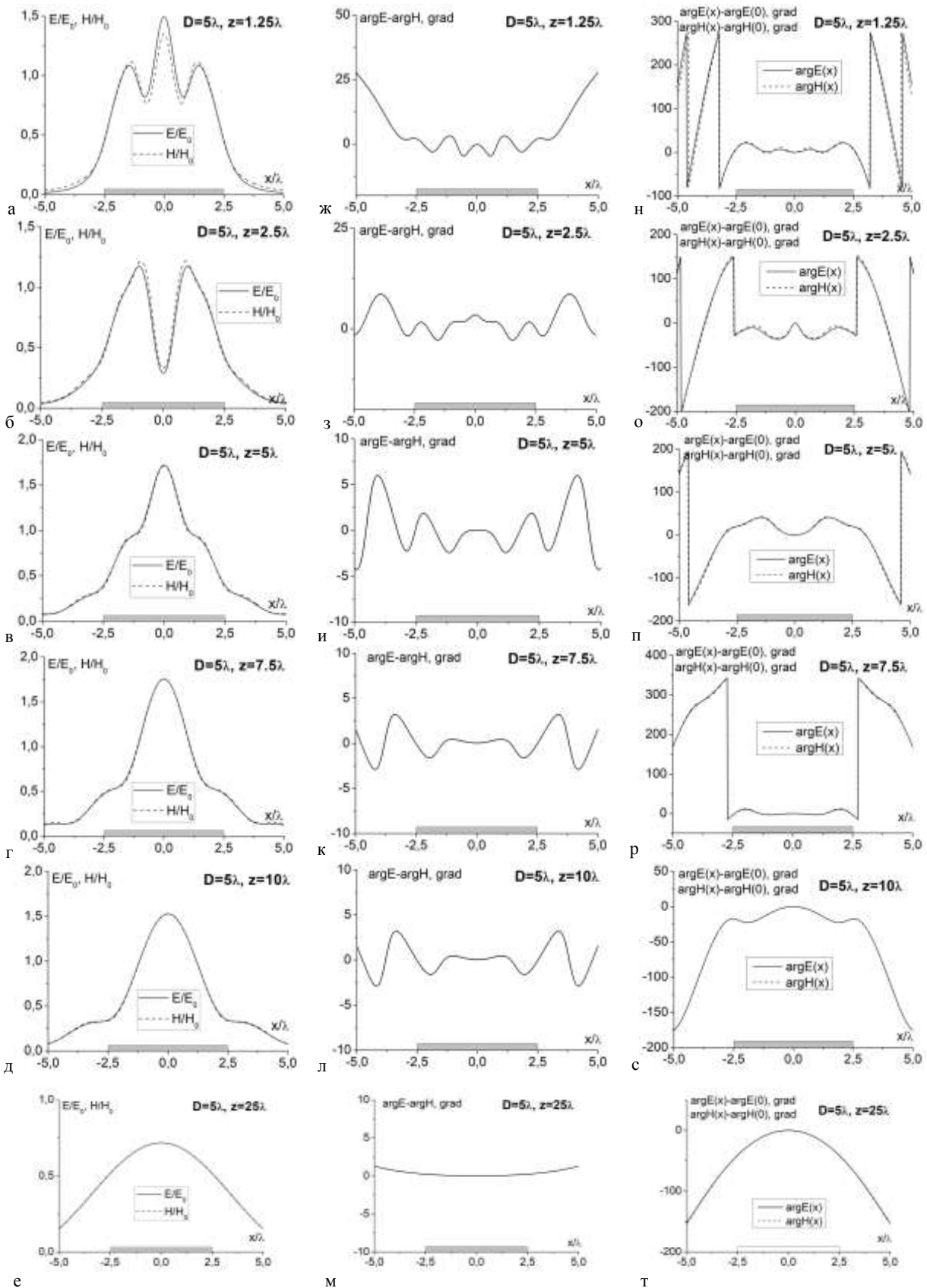


Рис. 4. Амплитудные и фазовые характеристики электрического и магнитного полей в плоскостях, параллельных раскрытию диаметром 5 длин волны существенно меньше в минимумах поля в ближней зоне подобных антенн. Число осцилляций поля в прожекторном луче равно или на единицу меньше числа, равного электрическому размеру раскрытия.

Видно также, что нормированы электрические  $E/E_0$  и магнитные  $H/H_0$  поля отличаются друг от друга незначительно. Из рис. 3в видно, что разность фаз электрического и магнитного поля непосредственно вблизи антенны (на расстояниях, не превышающих диаметр раскрыва антенны) осциллирует в пределах углов примерно от  $-28$  до  $+22$ . На расстояниях, больших  $D$ , отличие разности фаз  $E$  и  $H$  полей от нуля пренебрежимо мало, что свидетельствует об отсутствии реактивной мощности электромагнитного поля на расстояниях, больших одного размера раскрыва антенны. Отношение волнового сопротивления  $W$  в ближней зоне к волновому сопротивлению свободного пространства в дальней зоне  $W_0$  в зависимости от расстояния  $z$  вблизи раскрыва также изменяется по осциллирующей закономерности до расстояний, не больших размера раскрыва.

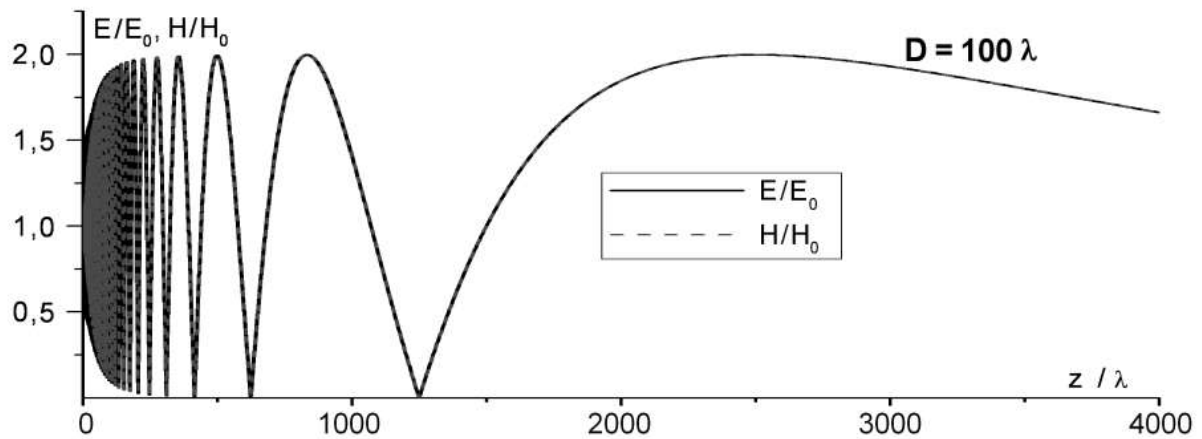
Волновые процессы в прожекторном луче антенн с круглым раскрывом со средней направленностью иллюстрирует рис. 4, на котором представлены расчеты распределения амплитудных и фазовых характеристик электрического и магнитного полей на поперечных плоскостях, расположенных параллельно раскрыву диаметром 5 длин волн на расстояниях, изменяемых от 0,25 до 5,0 диаметра раскрыва. Из сравнения с данными на рис. 2 для слабонаправленных антенн видна динамика формирования прожекторного луча и особенности распределения полей в пространстве вблизи антенны. В частности, из рис. 4 а-е и рис. 4 н-т и дополнительных расчетов оказалось, что локальная неоднородная квазиплоская волна в ближней зоне антенн со средней направленностью имеет место на расстояниях, меньших двух электрических диаметров раскрыва.

Рассмотрим далее волновые процессы в ближней зоне антенн с круглым раскрывом в случае его больших электрических размеров. На рис. 5а,б представлены расчеты относительных амплитуд электрических и магнитных полей в зависимости от расстояния в направлении нормали к раскрыву диаметром 100 длин волн. Видно, что как и в случае антенн со средней направленностью по мере увеличения расстояния  $z/\lambda$  амплитуды полей изменяются по осциллирующим закономерностям с равномерно нарастающим перепадом амплитуд. На расстояниях, больших 1,0 -1,5 диаметра раскрыва максимумы амплитуды  $E$  и  $H$  полей достигают удвоенного значения их амплитуд в центре раскрыва, а минимумы уменьшаются до нуля. Таким образом, в волновых явлениях в ближней зоне апертурных антенн со средней и большой направленностью при круглой форме раскрыва принципиально нет возможностей обеспечения близкого к постоянному значению амплитуды и мощности электромагнитного поля в некотором объеме или на плоскости, параллельной раскрыву, в ближней зоне антенны, как это имеет место в случае апертурных антенн с раскрывом квадратной или прямоугольной формы [3, 4]. Второй особенностью волновых процессов в ближней зоне исследуемых антенн являются существенные отличия поведения электрических и магнитных полей в области, непосредственно примыкающей к антенне, на расстояниях, не больших электрического размера раскрыва (рис. 5б). Отметим также существенное увеличение протяженности области прожекторного луча при увеличении диаметра раскрыва. Это же явление имеет место, как показано в [3], и в случае апертурных антенн с раскрывом квадратной и прямоугольной формы.

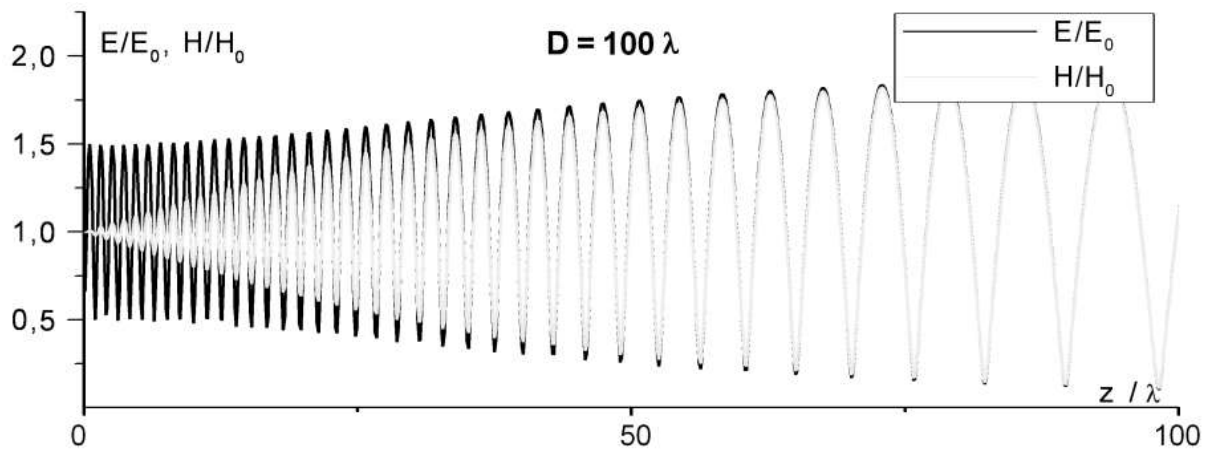
Из рис. 5в видно, что протяженность области ближних реактивных полей не превышает диаметра раскрыва. На этом же расстоянии исчезают осцилляции отношения волнового сопротивления в ближней зоне к волновому сопротивлению свободного пространства в дальней зоне антенны.

На рис.6 представлены амплитудные и фазовые характеристики электрических и магнитных полей в зависимости от поперечной координаты  $x/\lambda$ , рассчитанные для расстояний от одной четверти диаметра раскрыва до 5 диаметров. Из динамики изменения пространственного распределения амплитуд (рис. 6а-е) и фаз (рис. 6н-т) в зависимости от расстояния от антенны видно, что нормированные электрические  $E/E_0$  и магнитные  $H/H_0$  поля отличаются друг от друга незначительно уже на весьма малых – до одной четверти диаметра раскрыва расстояниях от антенны. Видно также, что в прожекторном луче поперечные градиенты амплитуд и фаз полей и, следовательно, мощности электромагнитного поля значительно меньше продольных градиентов (рис. 5а-в). Отметим, что квазиплоская локальная неоднородная волна в прожекторном луче, наблюдается на больших расстояниях, отнесенных к длине волны и к диаметру раскрыва, как и в случае апертурных антенн с квадратным и прямоугольным раскрывом больших электрических размеров [3].

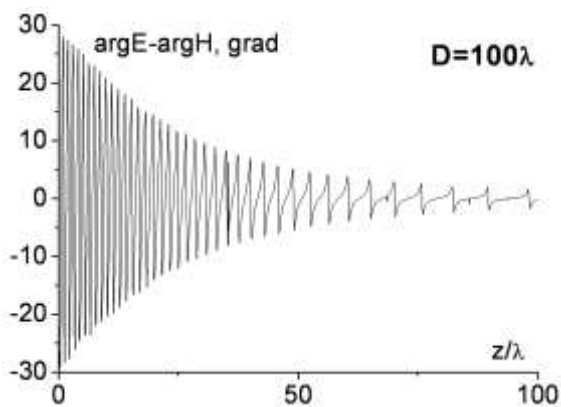




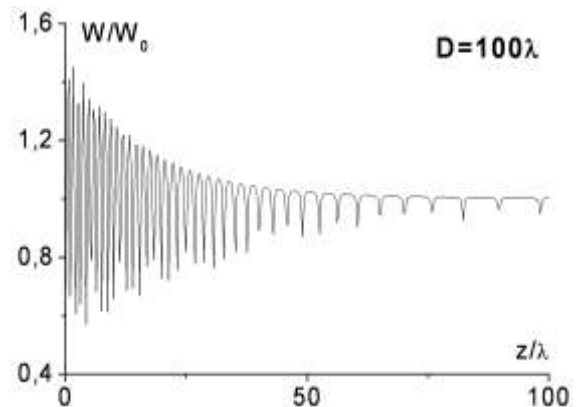
а



б



в



г

Рис. 5. Зависимости амплитуд и разности фаз электрического и магнитного полей и волнового сопротивления апертурной антенны с круглым раскрытием от расстояния до точек наблюдения в направлении нормали к раскрытию при  $D=100$  длин волн.

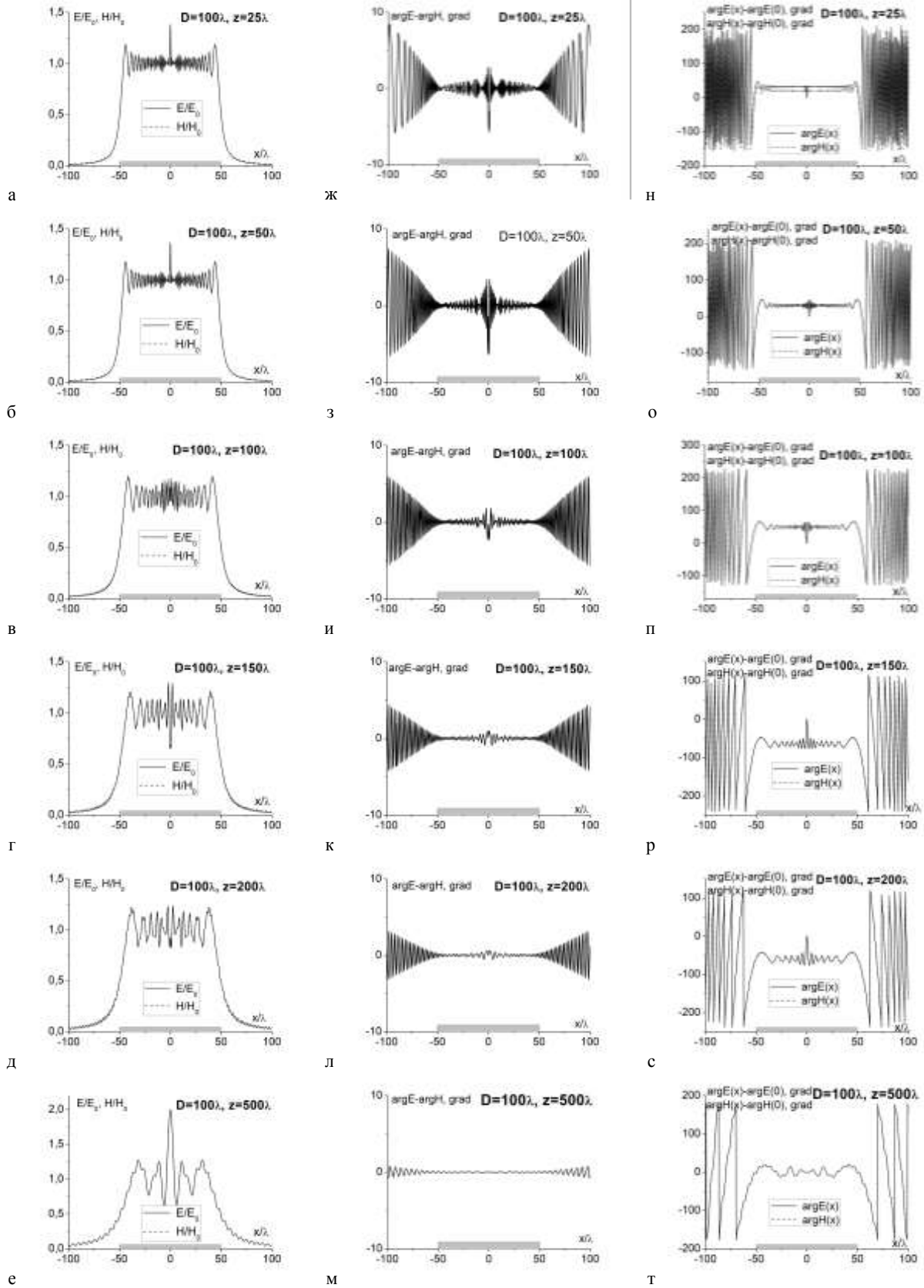


Рис. 6. Амплитудные и фазовые характеристики электрического и магнитного полей в плоскостях, параллельных раскрытию диаметром 100 длин волны

В заключение отметим, что уменьшить градиенты полей в ближней зоне в направлении к раскрытию антенны можно путем использования спадающих к краю амплитудных распределений в синфазном раскрытии. В частности, в [2] показано, что в случае гиперболического и гиперболического в квадрате амплитудного распределения источников поля в синфазном круглом раскрытии размах осцилляций поля в прожекторном луче уменьшается, особенно в последнем случае.

### ВЫВОДЫ

На основании решения внешней задачи электродинамики разработано математическое обеспечение для расчета, анализа и исследования волновых процессов в ближней и промежуточной зонах наблюдения апертурных антенн, т.е. антенн акустического и оптического типов, с раскрытием круглой формы. Проведены расчеты амплитудных и фазовых характеристик электрических и магнитных полей на конечных расстояниях от антенны при постоянных амплитудных и фазовых распределениях полей в излучающем раскрытии при изменении его диаметра в широких пределах для антенн с малой, средней и высокой направленностью. В результате анализа данных расчетов показано, что вблизи апертурных антенн с раскрытием круглой формы волновые процессы качественно близки к таковым в случае апертурных антенн с раскрытием квадратной формы, однако количественные данные отличаются существенно. В частности, показано, что при диаметрах раскрытия слабонаправленных антенн, меньших одной длины волны, амплитуды и электрических и магнитных полей равномерно убывают как и в случае квадратных и прямоугольных антенн таких размеров. Расстояние дальней зоны подобных антенн не меньше 1,5 длины волны. При диаметрах излучающего раскрытия, больших одной длины волны, вблизи антенны формируется прожекторный луч цилиндрической формы, в котором амплитуды электрического и магнитного поля образуют локальную квазиплоскую неоднородную волну со средней амплитудой, близкой к амплитуде поля в центре раскрытия, независимо от электрических размеров раскрытия антенны. В направлении главного максимума диаграммы направленности рассматриваемых антенн амплитуды полей в зависимости от расстояния изменяются по осциллирующим закономерностям, причем отличия амплитуд полей максимальны из всех возможных вариантов формы раскрытия. Число экстремумов амплитуд электрических и магнитных полей совпадает и равно числу длин волн, укладываемых на диаметре раскрытия. При увеличении диаметра раскрытия протяженность области прожекторного луча и в длинах волн и в диаметрах раскрытия увеличивается с большей скоростью, как и в случае апертурных антенн с квадратным раскрытием. Расстояние дальней зоны исследованных антенн хорошо описывается классической формулой  $R_{дз} \geq 2D^2/\lambda$ . Показано также, что чем больше размеры антенны, тем больше отличаются относительные амплитуды электрических и магнитных полей непосредственно вблизи раскрытия антенны.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Горобец Н.Н. Амплитудные, фазовые и поляризационные диаграммы апертурных антенн в ближней, промежуточной и дальней зонах. // Вестник Харьковского ун-та. №203, Радиофизика и электроника. – 1980. Вып. 9. – С. 26-34.
2. Laybros, S.; Combes, P.F.; Mametsa, H.J. The "Very-Near-Field" Region of Equiphase Radiating Apertures. // IEEE Antennas Propag. Mag., Aug. 2005, V.47, N.4. – p.50-66,
3. Горобец Н.Н., Овсянникова Е.Е. Влияние размеров и формы излучающего раскрытия на характер пространственного распределения поля вблизи антенны. // Вісник Харківськ. нац. ун-ту імені В. Н. Каразіна. № 1094. Радіофізика та електроніка. – 2013. Вип. 23. – С. 51-59.
4. Горобец Н.Н., Овсянникова Е.Е., Шишкова А.В. Формирование равномерного распределения электромагнитного поля в ближней зоне Е-секториальных рупорных антенн // Вісник Харківськ. нац. ун-ту ім. В.Н. Каразіна. № 1038. Радіофізика та електроніка. 2012. Вип. 21. – С. 17-24
5. Шубарин Ю.В. Антенны сверхвысоких частот. - Харьков: Изд. Харьковского гос. университета, 1960. — 285 с.
6. Горобец Н.Н., Овсянникова Е.Е., Шишкова А.В. Расстояние дальней зоны волноводных излучателей. // Вісник Харківськ. нац. ун-ту ім. В.Н. Каразіна. №834, Радіофізика та електроніка, 2008, Вип.13, – С.68-76