

УДК 621.391.827

В. В. СТОРОЖЕНКО, канд. техн. наук, В. Ф. ОЛЕЙНИК, канд. техн. наук

**УЧЕТ ХАРАКТЕРИСТИК НАПРАВЛЕННОСТИ АНТЕНН В ЗАДАЧАХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ**

Один из этапов расчета электромагнитной совместимости (ЭМС) - расчет уровня помехи, проникающей на вход приемника  $P_n$  и сравнение его с допустимой величиной помехи  $P_{ndop}$ . Этот уровень помехи на входе приемника  $P_n$  можно рассчитать, используя следующее соотношение (все слагаемые выражены в дБ)

$$P_n = P_T + G_T - a_{\phi T} + G_R - a_{\phi R} + K_{пл} - L(R) - FDR(\Delta f), \quad (1)$$

где  $P_T$  - мощность передатчика;  $G_T$  - коэффициент усиления антенны источника помех в направлении приемника;  $G_R$  - коэффициент усиления приемной антенны в направлении источника помех;  $a_{\phi T}$ ,  $a_{\phi R}$  - потери в передающем и приемном фидерных трактах соответственно;  $K_{пл}$  - коэффициент, учитывающий различия поляризаций антенн источника и рецептора помех (0...-30);  $L(R)$  - потери на расстоянии разнота  $R$  между рецептором и источником помех, для свободного пространства  $L(R) = 20 \lg(4\pi R / \lambda)$  ( $\lambda$  - длина волны);  $FDR(\Delta f)$  - коэффициент, показывающий, какая доля мощности помехи, центральная частота которой расстроена на величину  $\Delta f$  относительно частоты настройки приемника, проходит на вход демодулятора.

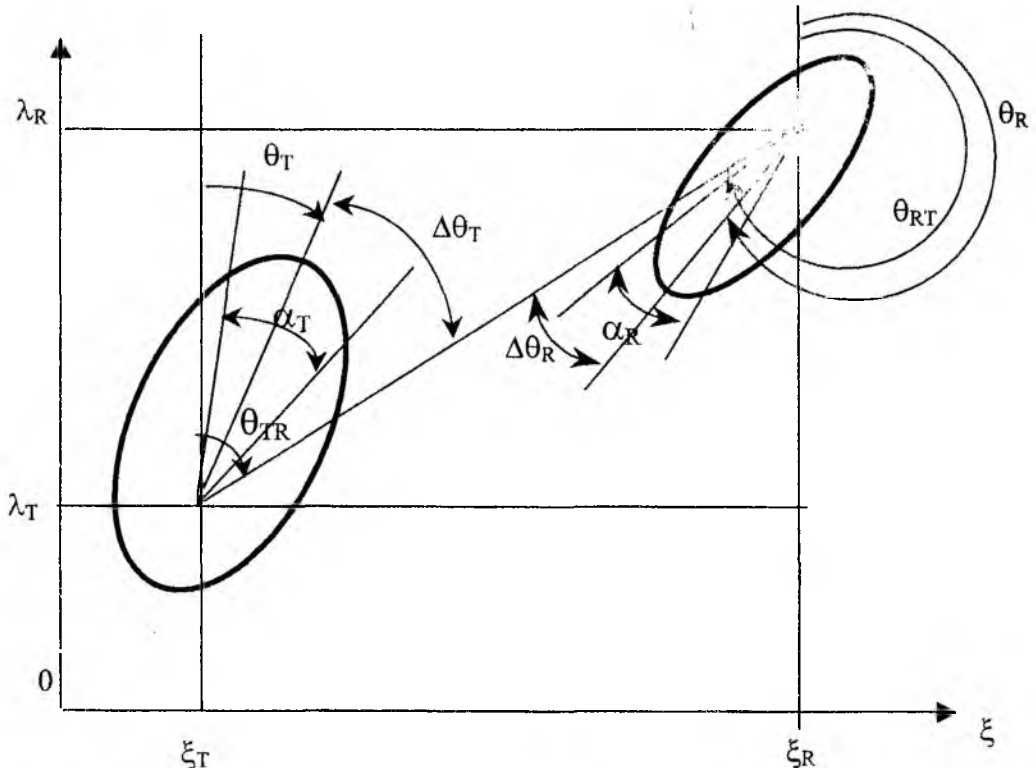
Как видно из (1), параметры антенн существенно влияют на характер и уровень сигналов и помех. Сложность задач ЭМС состоит в том, что необходимо знать не только максимальный коэффициент усиления антенны  $G_{max}$ , но и коэффициент усиления в конкретном направлении по азимуту  $\theta$  и углу места  $\varphi$  -  $G(\theta, \varphi)$ . Более того, коэффициент усиления антенны должен быть определен на всех частотных составляющих, которые используются в расчетах ЭМС. Применяемые способы уменьшения побочного излучения антенн, подавления бокового излучения приводят к усложнению аналитического описания антенны в целом [1,2]. Кроме того, зачастую такое описание является коммерческой тайной фирм-изготовителей и в паспортных данных на антенну приводится только ее упрощенная диаграмма направленности (ДНА) и основные характеристики. Также следует учитывать то обстоятельство, что в реальных условиях установки антенны (крыша здания, антенная мачта) из-за влияния земной поверхности и окружающих предметов, форма реальной ДНА отличается от расчетной. Поэтому, учитывая большое число анализируемых радиоэлектронных средств (РЭС) при расчете ЭМС, актуальной является задача построения упрощенной модели антенны, обладающей в то же время достаточной достоверностью.

Коррекция максимальных коэффициентов усиления антенн производится за счет определения их направленных свойств в заданных условиях их взаимного расположения и ориентации с учетом конкретных условий приема и передачи, режима рабочих или нерабочих частот, основной или неосновной поляризации.

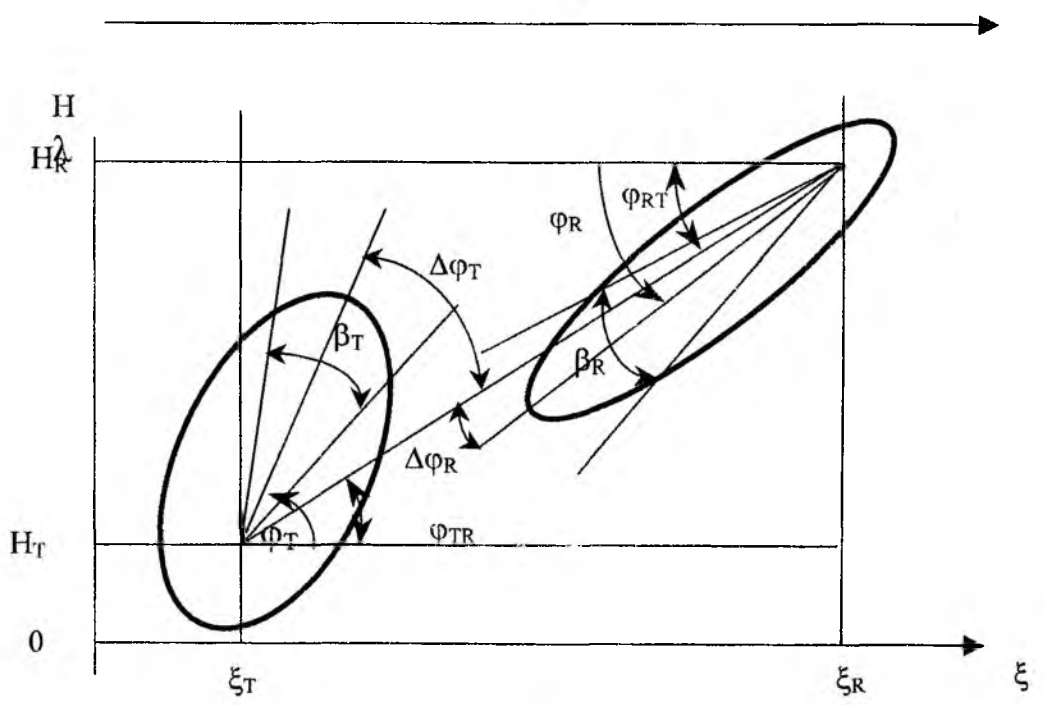
Взаимное расположение и ориентация антенн при расчете помех между РЭС различных систем связи могут быть совершенно разными. Поэтому реальное усиление антенны в направлении на взаимодействующее с нею РЭС определяется углами, задающими направление от антенны передатчика на антенну приемника и, наоборот, - в горизонтальной и вертикальной плоскостях  $\theta_{TR}$ ,  $\theta_{RT}$ ,  $\varphi_{TR}$ ,  $\varphi_{RT}$  соответственно.

На рис. 1 приведено взаимное расположение диаграмм направленности антенн (ДНА) в горизонтальной плоскости (а) и в плоскости, проходящей перпендикулярно плоскости  $\lambda, \theta, \xi$  через исследуемые антенны (б). На рисунке обозначены: географические координаты:  $\lambda_T, \xi_T$  - широта и долгота месторасположения антенны передатчика,  $\lambda_R, \xi_R$  - широта и долгота месторасположения антенны приемника;  $\alpha_T, \beta_T$  - ширина ДНА передатчика в горизонтальной и вертикальной плоскостях соответственно;  $\alpha_R, \beta_R$  - то же для ДНА приемника;  $\Theta_T, \Theta_R$  - азимуты максимального излучения и приема

передающей и приемной антенн соответственно (для сканирующих антенн - углы, определяющие центры секторов обзора антенн передатчика и приемника в горизонтальной плоскости);  $\varphi_T, \varphi_R$  - углы места максимального излучения и приема передающей и приемной антенн соответственно (для сканирующих антенн - углы, определяющие центры секторов обзора антенн передатчика и приемника в вертикальной плоскости);  $R$  - расстояние между передатчиком и приемником;  $H_T, H_R$  - высоты передающей и приемной антенн соответственно.



a



б

Рис. 1

Углы  $\theta_{TR}$  и  $\varphi_{TR}$  получим из геометрической задачи на рис. 1.:

$$\theta_{TR} = \arccos \frac{\sin \lambda_R - \sin \lambda_T (\sin \lambda_T \cdot \sin \lambda_R + \cos \lambda_T \cdot \cos \lambda_R \cdot \cos(\xi_R - \xi_T))}{\cos \lambda_T \cdot \sin(\arccos(\sin \lambda_T \cdot \sin \lambda_R + \cos \lambda_T \cdot \cos \lambda_R \cdot \cos(\xi_R - \xi_T)))},$$

$$\varphi_{TR} = \operatorname{arctg} \frac{H_R - H_T}{R}. \quad (2)$$

Для определения  $\theta_{RT}$  и  $\varphi_{RT}$  необходимо в (2) изменить индексы Т на R и R на Т.

В литературе по ЭМС РЭС предлагается несколько способов описания характеристики направленности антенны. Так в [3] предлагается упрощенные модели антенн, в которых коэффициент усиления антенны в пределах главного лепестка ДНА и параметры распределения бокового усиления антенны считаются постоянными величинами. Недостаток этого способа – значительные погрешности аппроксимации, особенно в области боковых лепестков и на границах лепестков и зон. В других программах по оценке ЭМС РЭС [4] предлагается иметь базу данных характеристик антенн как функций от угла  $G(\theta)$ ,  $G(\varphi)$ . К сожалению, достоверных данных о  $G(\theta)$ ,  $G(\varphi)$ , как правило, нет. Однако, если бы они и были, то влияние окружающего фона, особенно в городах, сильно искажает ДНА, а хранение таких данных в базе требует значительных объемов памяти. С этой точки зрения более приемлемым является описание характеристик ДНА в соответствии с рекомендацией СЕРТ T/R 25-08 [5]. Согласно этой рекомендации для описания используется строка символов, состоящая из трех цифр, двух букв и двух цифр.

Строка символов имеет такую структуру:

YYY	XX	ZZ
1-3 символы	4-5 символы	6-7 символы

Строка передается в одном блоке: YYYXXZZ

Исходными данными для описания антенн, в соответствии с данной рекомендацией, являются их диаграммы направленности в полярной системе координат.

В соответствии с данной рекомендацией ДН антенн, используемых на практике, могут быть представлены девятью типичными группами кривых (рис. 2). Для идентификации каждой группы используется двубуквенный код:

- эллипс            EA, EB, EC, DE;
- круг             KA;
- лемниската    LA;
- кассини        CA, CB, CC.

Для ДНА, которые могут быть аппроксимированы кривыми групп EA, EB, EC, DE и LA, характерным является то, что ширина главного лепестка может изменяться в пределах  $0^\circ \dots 240^\circ$ . То есть эти кривые могут описывать сколь угодно узкую ДНА. В строке необходимо кодировать такие данные:

- символы YYY описывают диапазон угла (в градусах) диаграммы направленности (записывается только половина ширины ДНА, отсчитанный по уровню половинной мощности);
- символы XX описывают группу диаграммы антенны, например, EA, EB и т.д. Для ненаправленной антенны используют обозначение ND;
- символы ZZ описывают уровень боковых лепестков в десятых долях от уровня главного лепестка, умноженный на 100. Для последующих расчетов учитывают наибольший боковой лепесток. Если дано только защитное отношение (защитное отношение в главном и только заднем направлении f,b), эти две цифры можно рассчитать, используя уравнение [5]:

$$ZZ = 10^2 - \frac{\text{защитное отношение } f \cdot b}{20}.$$

Для ДНА, которые могут быть аппроксимированы кривыми типа CA, CB, CC и KA, характерно наличие нескольких основных лучей. Кроме этого, эти кривые показывают ограничение на минимальную ширину аппроксимируемой ДНА ( $60^\circ$ ,  $80^\circ$ ,  $30^\circ$  и  $90^\circ$  соответственно). В строке необходимо кодировать такие данные:

- символы YYY описывают не угол, как для ДНА, относящихся к группе EA, EB, EC, DE и LA, а коэффициент провала (отношение минимального значения в провале к максимальному в вершине

лепестка). Эти значения можно вывести из величины затухания диаграммы направленности антенны, умноженной на 100.

- символы  $XX$  описывают группу ДНА, например, СА, СВ и т.д.;

- символы  $ZZ$  для типов антенн, не имеющих или имеющих незначительные боковые лепестки, эти цифры имеют значение 00. В случае, когда боковые лепестки превышают линии диаграммы направленности, описываемые символами  $YYY$ , во внимание следует принимать наибольший боковой лепесток. В этом случае символы  $ZZ$  рассчитывают описанным выше способом.

Как было отмечено раньше, антенны типа СА, СВ, СС и КА имеют несколько основных лучей. В этих случаях в строке символов указываются параметры одного из них.

Для других типов антенн ДНА в полярных системах координат сравнивается с кривыми, представленными на рис. 2.

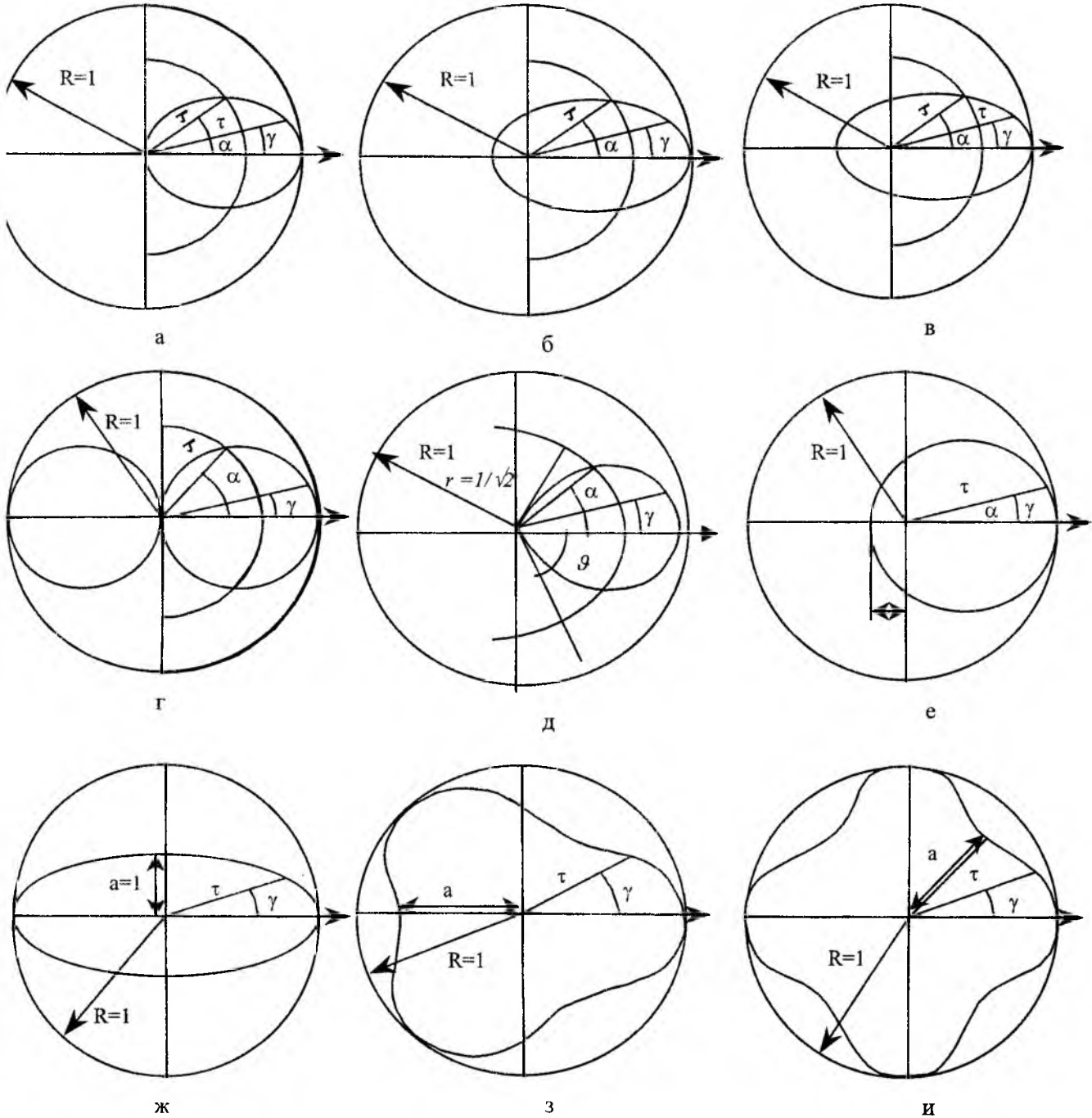


Рис. 2

Для ненаправленных антенн используется обозначение "000ND00".

В обсуждаемых рекомендациях [5] вычисление коэффициента усиления антенны в заданном направлении производится по формуле

$$G_{T(R)} = G_{0T(0R)} - \Delta G, \quad (3)$$

где  $G_{0T}$  и  $G_{0R}$  - максимальные коэффициенты усиления антенн передающей и приемной соответственно (содержатся в ГТХ РЭС);  $\Delta G$  - поправка, учитывающая изменение  $G_{0T(0R)}$  в заданном направлении.

$\Delta G$  можно найти по формуле:

$$\Delta G = \sqrt{G_{\Delta\theta}^2 + G_{\Delta\varphi}^2} + g, \quad (4)$$

где  $G_{\Delta\theta}$  и  $G_{\Delta\varphi}$  - коэффициенты усиления антенны в горизонтальной и вертикальной плоскостях соответственно;  $g$  - поправка, учитывающая значение коэффициента усиления антенны, заданного относительно направленной антенны (Е) - полуволнового вибратора, при этом  $g=0$ , или ненаправленной (изотропной) антенны (I), при этом  $g=2,1$ .

Графики диаграмм направленности антенн представлены в полярной системе координат и имеют единичный радиус ( $R=1$ ).

Коэффициент усиления антенны относительно напряженности поля может быть рассчитан по формуле

$$G_{\Delta\theta}, G_{\Delta\varphi} = 20 \cdot \lg(\tau) \text{ (дБ)}, \quad (5)$$

где  $\tau$  - величина, учитывающая уменьшение коэффициента усиления антенны в направлении  $\Delta\theta, \Delta\varphi$  по сравнению с максимальным  $G_0$  (см. рис. 1).

Углы  $\Delta\theta, \Delta\varphi$  можно найти по формулам:

$$\Delta\theta_{T,R} = | \theta_{T(R)} - \theta_{TR(RT)} |, \quad \Delta\varphi_{T,R} = | \varphi_{T(R)} - \varphi_{TR(RT)} |,$$

где  $\gamma$  - угол  $\Delta\theta_T, \Delta\theta_R, \Delta\varphi_T, \Delta\varphi_R$  в зависимости от рассматриваемой антенны (передающей - Т, приемной - R) и плоскости (горизонтальной  $\theta$  или вертикальной  $\varphi$ );  $\alpha$  - ширина ДНА в горизонтальной ( $\alpha_T, \alpha_R$ ) или вертикальной ( $\beta_T, \beta_R$ ) плоскостях.

Формулы для расчета  $\tau$  для различных типов антенн имеют такой вид:

- антенна типа EA (рис. 2, а):

$$\tau = \frac{4b^2 \cdot \cos^2 \gamma}{(4b^2 - 1) \cos^2 \gamma + 1}, \quad b^2 = \frac{1}{2} \cdot \frac{1 - \cos^2 \alpha}{1 - (\sqrt{2} \cos \alpha - 1)^2}, \quad 0^\circ \leq \alpha \leq 65^\circ, -90^\circ \leq \gamma \leq 90^\circ,$$

- антенна типа EB (рис. 2, б):

$$\tau = \frac{1,6 \cdot b^2 \cos \gamma + 2,4 \sqrt{b^2 (b^2 - 0,2) \cdot \cos^2 \gamma + 0,2b^2}}{(4b^2 - 1,44) \cos^2 \gamma + 1,44},$$

где  $b^2 = 0,77 \cdot \frac{1 - \cos^2 \alpha}{1,44 - (\sqrt{2} \cos \alpha - 0,8)^2}, \quad 0^\circ \leq \alpha \leq 79^\circ, -180^\circ \leq \gamma \leq 180^\circ.$

- антенна типа EC (рис. 2, в):

$$\tau = \frac{1,2 \cdot b^2 \cos \gamma + 2,4 \sqrt{b^2 (b^2 - 0,4) \cdot \cos^2 \gamma + 0,4b^2}}{(4b^2 - 1,96) \cos^2 \gamma + 1,96},$$

где  $b^2 = 0,98 \frac{1 - \cos^2 \alpha}{1,96 - (\sqrt{2} \cos \alpha - 0,6)^2}$ ,  $0^\circ \leq \alpha \leq 96^\circ$ ,  $-180^\circ \leq \gamma \leq 180^\circ$ ,

- антенна типа DE (рис. 2, г):

$$\tau = \left| \frac{4b^2 \cdot \cos^2 \gamma}{(4b^2 - 1) \cos^2 \gamma + 1} \right|, \quad b^2 = \frac{1 - \cos^2 \alpha}{2 - (2 \cos \alpha \sqrt{2})^2}, \quad 0^\circ \leq \alpha \leq 65^\circ, \quad -180^\circ \leq \gamma \leq 180^\circ,$$

- антенна типа LA (рис. 2, д):

$$\tau = \cos\left(\left(1 - \cos\left(\frac{60}{\alpha} \cdot \gamma\right)\right) \cdot 90\right), \quad \nu = \pm \frac{3\alpha}{2}, \quad 0 \leq \alpha \leq 120^\circ, \quad -1,5\alpha \leq \gamma \leq 1,5\alpha,$$

- антенна типа КА (рис. 2, е):

$$\tau = \frac{(1-a) \cos \gamma + \sqrt{(1-a)^2 \cos^2 \gamma + 4a}}{2}, \quad 0 \leq a \leq 1; \quad a=0 \quad -90^\circ \leq \gamma \leq 90^\circ; \quad a>1 \quad -180^\circ \leq \gamma \leq 180^\circ,$$

антенна типа СА (рис. 2, ж):

$$\tau = \sqrt{\frac{(1-a^2) \cos(2\gamma) + \sqrt{(1-a^2)^2 \cos^2(2\gamma) + 4a^2}}{2}}, \quad 0 \leq a \leq 1, \quad -180^\circ \leq \gamma \leq 180^\circ,$$

- антенна типа СВ (рис. 2, з):

$$\tau = \sqrt{\frac{(1-a^2) \cos(3\gamma) + \sqrt{(1-a^2)^2 \cos^2(3\gamma) + 4a^2}}{2}}, \quad 0 \leq a \leq 1; \quad -180^\circ \leq \gamma \leq 180^\circ,$$

- антенна типа СС (рис. 2, и):

$$\tau = \sqrt{\frac{(1-a^2) \cos(4\gamma) + \sqrt{(1-a^2)^2 \cos^2(4\gamma) + 4a^2}}{2}}, \quad 0 \leq a \leq 1, \quad -180^\circ \leq \gamma \leq 180^\circ.$$

Пример кодирования антенны приведен на рис. 3.

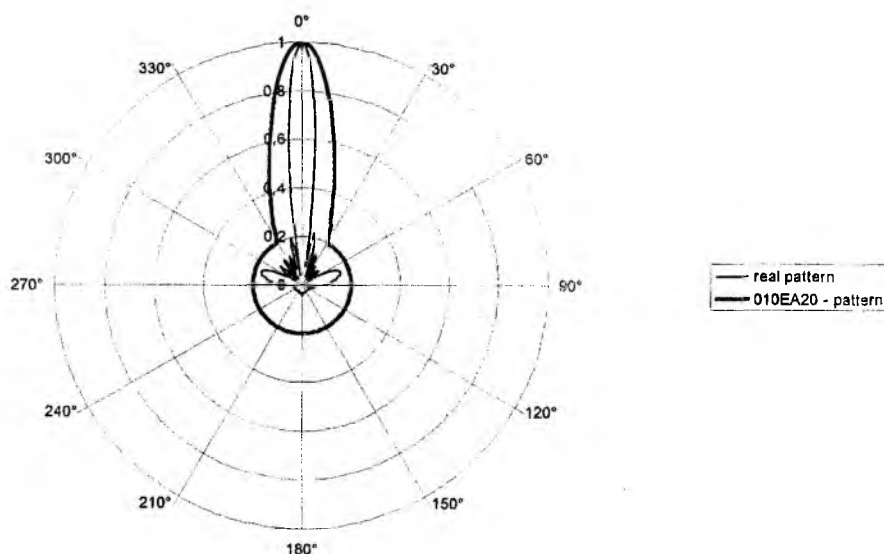


Рис. 3

На основании рекомендации СЕРТ Т/Р 25-08 [5] автором аппроксимированы ДНА, наиболее часто используемых в диапазонах ОВЧ и УВЧ, результаты представлены в таблице 1.

№	Тип антенны	Аппроксимация ДНА кривыми [31]	
		Горизонтальная плоскость	Вертикальная плоскость
1	Четвертьволновый вертикальный вибратор	КА	DE
2	Полуволновый горизонтальный диполь	DE	КА
3	Вертикальная рамка	DE	DE
4	Длинный провод $l \gg \lambda$	СС	СС
5	Коллинеарная решетка	КА	СА
6	Синфазная решетка	СА	СА
7	<b>Антенна бегущей волны</b>	ЕА	ЕА
8	Щелевая антенна	ЕА	ЕА
9	Волновой канал	ЕА	ЕА
10	Синфазная решетка с рефлектором	ЕА	ЕА
11	Ромбическая антенна	ЕА	ЕА
12	Рупорная антенна	ЕА	ЕА
13	Спиральная антенна всенаправленного излучения	ЕА	ЕА
14	Спиральная антенна осевого излучения	ЕА	ЕА
15	Логопериодическая антенна	ЕА	ЕА

В задачах прогнозирования уровней помех и оценки ЭМС необходимо учитывать изменение ширины главного лепестка ДНА в горизонтальной и вертикальной плоскостях для сигналов, поступающих в антенну на частотах, отличных от основной. Для ориентировочных и оперативных расчетов можно воспользоваться данными табл. 2 [3]. Для проверки данных, приведенных в табл. 2, проведено моделирование изменения ширины ДНА на нерабочих частотах для симметричного вибратора и четырехэлементной антенной решетки. Анализ полученных ДНА показывает, что данные, приведенные в табл. 2, справедливы для частот, соответствующих 10 гармонике и 10 субгармонике. При расчетах ДНА на частотах гармоник 2...9 приведенные характеристики несправедливы. Однако такое упрощение приводит только к ужесточению норм ЭМС, что приемлемо при большом объеме вычислений, которые планируется проводить. При исследовании нелинейных эффектов, а также при вычислении уровня помехи при небольших расстройках (2 субгармоника – 2 гармоника), следует ширину ДНА брать ту же, что и на основной частоте.

Таблица 2

Усиление на рабочей частоте	$\Theta$ (горизонтальной)	$\varphi$ (вертикальной)
$G > 25$ дБ	$4\Theta$	$4\varphi$
$10 < G \leq 25$ дБ	$10\Theta$	$10\varphi$
$G \leq 10$ дБ	$360^\circ$	$180^\circ$

Поправка  $K_{пл}$ , учитывающая несовпадение поляризации антенн источника и рецептора помех, приведена в табл. 3 [3].

Таблица 3

Поляризация приемной антенны		Поляризация передающей антенны					
		горизонтальная		вертикальная		круговая	
		$G < 10$ дБ	$G > 10$ дБ	$G < 10$ дБ	$G > 10$ дБ	левая	правая
Горизонтальная	$G < 10$ дБ	0	0	-16	-16	-3	-3
	$G > 10$ дБ	0	0	-20	-20	-3	-3
Вертикальная	$G < 10$ дБ	-16	-16	0	0	-3	-3
	$G > 10$ дБ	-16	-20	0	0	-3	-3
Круговая	левая	-3	-3	-3	-3	0	-16
	правая	-3	-3	-3	-3	-16	0

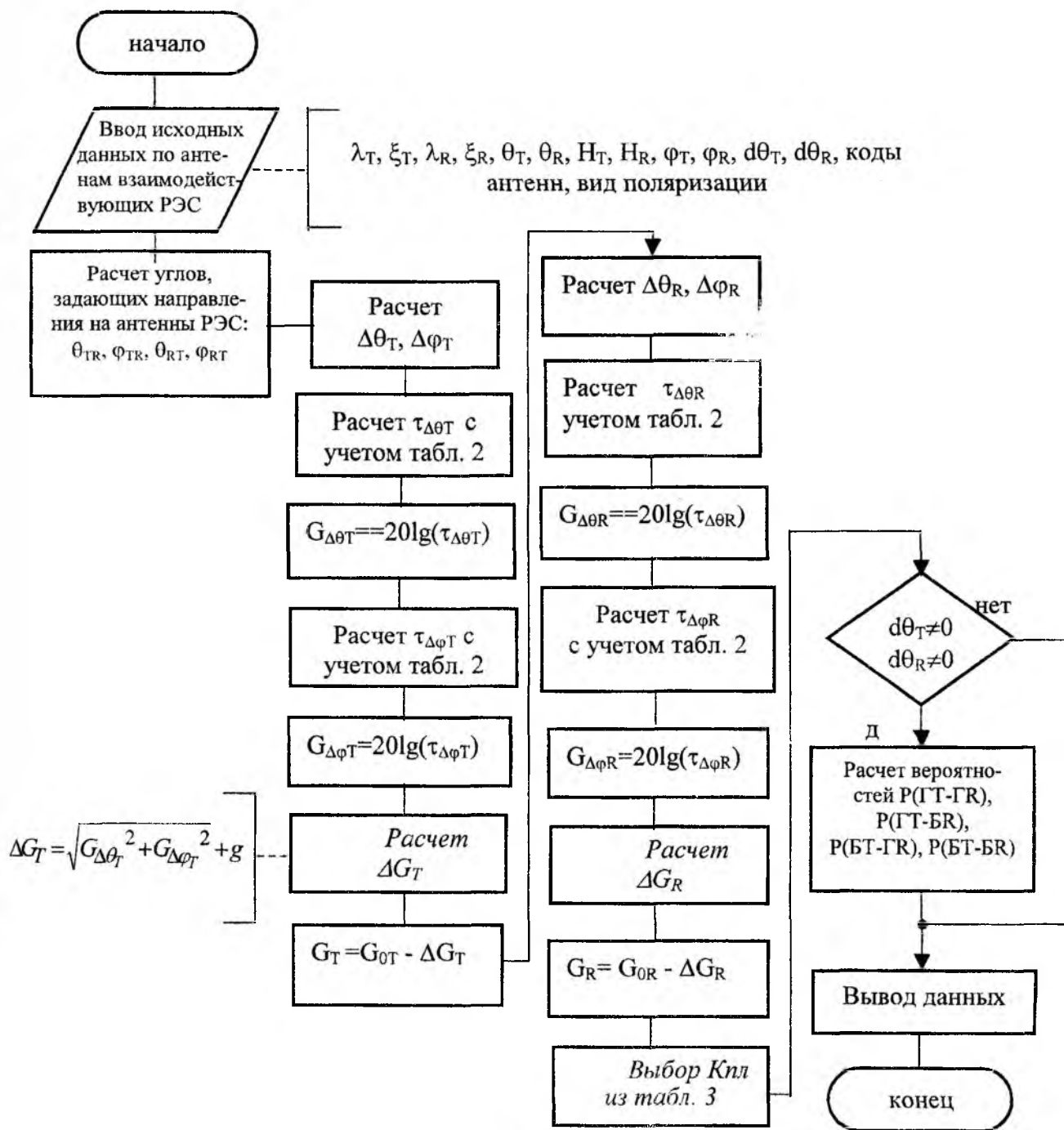


Рис. 4

Если одна или обе антенны являются сканирующими, необходимо рассчитать вероятность возникновения различных ситуаций взаимодействия их ДНА. Вероятности возникновения различных ситуаций взаимодействия их диаграмм направленности можно вычислить по таким формулам [3]:

$$\begin{aligned}
 p(ГТ - ГР) &= \alpha_T \alpha_R / (d\theta_T + \alpha_T)(d\theta_R + \alpha_R), \\
 p(ГТ - БР) &= \alpha_T d\theta_R / (d\theta_T + \alpha_T)(d\theta_R + \alpha_R), \\
 p(БТ - ГР) &= d\theta_T \alpha_R / (d\theta_T + \alpha_T)(d\theta_R + \alpha_R), \\
 p(БТ - БР) &= d\theta_R d\theta_T / (d\theta_T + \alpha_T)(d\theta_R + \alpha_R),
 \end{aligned}
 \tag{6}$$

где  $p(\bullet)$  - вероятность события ( $\bullet$ ):  $ГТ - ГР$  - излучение по главному лепестку ДНА передатчика воспринимается главным лепестком ДНА приемника;  $ГТ - БР$  - излучение по главному лепестку ДНА

передатчика проникает через область боковых лепестков ДНА приемника;  $BT - GR$  – боковое излучение антенны передатчика воздействует по главному лепестку ДНА приемника;  $BT - BR$  – боковое излучение антенны передатчика проникает через область боковых лепестков приемника;  $d\theta_T, d\varphi_T$  – секторы обзора антенны передатчика в горизонтальной и вертикальной плоскости соответственно;  $d\theta_R, d\varphi_R$  – то же для антенны приемника.

Для антенн, осуществляющих круговой обзор, значение суммы углов  $d\theta + \alpha = 360^0$ . Вероятности, вычисленные по (6), определяют долю импульсов со стороны мешающей сканирующей антенны радиолокационной станции (РЛС), приходящихся на каждую зону взаимодействия за один оборот антенны. За один оборот антенны каждая из РЛС излучает  $M=F \cdot T$  импульсов, где  $F$  – частота следования импульсов,  $T$  – период вращения антенны. Тогда число импульсов, приходящееся на зону взаимодействия антенн, составляет  $Q = p \cdot M$ . В этом случае уровень помех за период обзора помехи РЛС определяется выражением, дБ [3]

$$N = Q(P_n - P_{\text{мин.имп}})10^{-4},$$

где  $P_{\text{мин.имп}}$  – минимальная мощность одиночного обнаруживаемого импульса. Обычно она на 10...15 дБ выше чувствительности приемника [3].

При этом существует 5 условий индикации помехи [3]:  $0 \leq N \leq 3,7$  – нет помехи;  $3,8 \leq N \leq 9,4$  – небольшая помеха;  $9,5 \leq N \leq 14,7$  – граничная (значительная) помеха;  $14,8 \leq N \leq 25,2$  – сильная помеха;  $N \geq 25,3$  – чрезвычайно сильная помеха.

Алгоритм расчета коэффициентов усиления антенн взаимодействующих РЭС приведен на рис. 4. Приведенная методика и алгоритм расчета коэффициентов усиления антенн взаимодействующих РЭС позволяют:

-при решении практических задач расчета ЭМС рассчитать коэффициенты усиления антенн передатчика и приемника помехи с учетом их взаимной ориентации, поляризации и частотных характеристик;

-вычислить вероятность взаимодействия РЭС по различным лепесткам ДНА для РЛС.

**Список литературы** 1. Ямпольский В.Г., Фролов О.П. Антенны и ЭМС. М.: Радио и связь, 1983. 272 с. 2. Справочник по антенной технике: В 5т. / Л.Д. Бахрах, Л.С. Бенинсон, Е.Г. Зелкин и др. Под ред. Я.Н. Фельда, Е.Г. Зелкина. М.: ИПРЖ, 1997. Т.1. 256 с. 3. Виноградов Е.М., Винокуров В.И., Харченко И.П. Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств. Л.: Судостроение, 1986. 264 с. 4. ERC Report 68. Monte-Carlo radic simulation methodology. 1999. 5. Recommendation T/R 25-08. Planning criteria and coordination of frequencies in the land mobile service in the range 29,7-960 MHz (Lecce 1989, revised in Vienna 1999).

Харьковский национальный университет радиоэлектроники  
 Научный центр управления, связи и РЭБ  
 Киевский высший институт управления и связи

Поступила в редколлегию 02.10.2001