

**МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ**

Д.Н. Яманов

**АНТЕННЫ, ЭЛЕКТРОДИНАМИКА
И РАСПРОСТРАНЕНИЕ
РАДИОВОЛН**

**ПОСОБИЕ
ПО ВЫПОЛНЕНИЮ ДОМАШНИХ ЗАДАНИЙ**

*для студентов II-III курсов
специальностей 25.05.03, 10.05.02
очной формы обучения*

Москва-2016

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ВОЗДУШНОГО ТРАНСПОРТА

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ**

**«МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ» (МГТУ ГА)**

**Кафедра технической эксплуатации радиоэлектронного оборудования
воздушного транспорта**

Д.Н. Яманов

АНТЕННЫ, ЭЛЕКТРОДИНАМИКА И РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН

ПОСОБИЕ

по выполнению домашних заданий

*для студентов II-III курсов
специальностей 25.05.03, 10.05.02
очной формы обучения*

Москва - 2016

ББК 537
Я 54

Рецензент д-р техн. наук, проф. А.И. Логвин

Яманов Д.Н.

Я 54 Антенны, электродинамика и распространение радиоволн: пособие по выполнению домашних заданий. – М.: МГТУ ГА, 2016. – 32 с.

Данное пособие издается в соответствии с рабочими программами учебных дисциплин «Электродинамика и распространение радиоволн» и «Антенны и распространение радиоволн» по Учебным планам для студентов II-III курсов специальностей 25.05.03, 10.05.02 очной формы обучения.

Рассмотрено и одобрено на заседаниях кафедры 13.01.2016 г. и методического совета 10.02.2016 г.

Подписано в печать 05.04.2016 г.

Печать офсетная
1,86 усл.печ.л.

Формат 60х84/16
Заказ № 61

1,57 уч.-изд. л.
Тираж 60 экз.

Московский государственный технический университет ГА
125993 Москва, Кронштадтский бульвар, д.20
Редакционно-издательские услуги ООО «Имидж-студия Арина»
127051 Москва, М. Сухаревская пл., д. 2/4 стр.1

ВВОДНЫЕ УКАЗАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ ДОМАШНИХ ЗАДАНИЙ

В домашние задания входят четыре задачи. Варианты заданий берутся из табл. 1 и 2. Задание выбирается в соответствии с двумя последними цифрами студенческого билета (ХУ).

В таблицах заданы для первой задачи: вид поляризации волны, значения угла падения θ , напряженности электрического поля E , частоты f , удельной объемной проводимости γ ; для второй задачи: форма сечения волновода и тип волны, напряженность поля E , длина линии l , полоса рабочих частот $\Delta f = f_{\text{мин}} - f_{\text{макс}}$; удельная объемная проводимость γ ; для третьей задачи: форма и тип резонатора, поле E , относительная диэлектрическая проницаемость $\varepsilon = \varepsilon_a / \varepsilon_0$ и размеры a , b , d у прямоугольного резонатора или R и d у цилиндрического резонатора; для четвертой задачи: канал радиосвязи ДКМВ (декаметровых волн), длина радиолинии D и ее географическое расположение, мощность передатчика $P_{\text{вых}}$, коэффициент усиления передающей антенны G_1 , время связи; канал радиосвязи МВ (метровых волн), мощность передатчика P_1 , частота f , высота подъема антенн абонентов h_1 и h_2 , индекс рефракции N_s , уровень внутренних шумов приемника $E_{\text{ш}}$.

Нужные данные для расчета находятся из табл.1 и 2 следующим образом: из табл. 1 находятся данные в соответствии с предпоследней цифрой студенческого билета (X); из табл. 2 находятся данные в соответствии с последней цифрой студенческого билета (У). Например, № 72 (X=7,У=2) должен использовать следующие данные для первой задачи: волна горизонтальной поляризации с углом падения $\theta=22^\circ$, с напряженностью электрического поля $E=7 \cdot 10^{-3}$ В/м, с частотой $f=70$ МГц, удельной объемной проводимостью $\gamma=8 \cdot 10^7$ 1/Ом·м; для второй задачи: волновод прямоугольный, с волной типа H_{10} , $E = 30$ В/м, с длиной $l = 1,1$ м, полосой рабочих частот $\Delta f = (3,8 \div 4)$ ГГц; удельной объемной проводимостью $\gamma = 8 \cdot 10^7$ 1/Ом·м; для третьей задачи: прямоугольный резонатор, тип колебаний E_{110} , $E = 80$ В/м, $\varepsilon=1,3$, размеры сторон $d = 10$ см, $b = 10$ см, $a = 15$ см; для четвертой задачи: канал ДКМВ, длина радиолинии $D = 100$ км, мощность передатчика $P_{\text{вых}} = 0,350$ кВт, географическое расположение 45° с.ш., время связи декабрь 16.00 и июнь 9.00; коэффициент усиления передающей антенны $G_1 = 4,0$.

Образец титульного листа приведен в Приложении 2.

Расчеты по каждому пункту следует начинать с названия искомой величины. Затем выписать формулу, по которой эта величина определяется, и сделать последовательную числовую подстановку всех величин, входящих в эту формулу, в системе единиц СИ (для заданий 1-3). После этого привести ответ с указанием размерности полученной величины.

Пособиями, кроме данного, при выполнении домашних заданий могут являться [1-7].

Таблица 1

Вариант ХУ		0У	1У	2У	3У	4У	5У	6У	7У	8У	9У
Задача №1	Е, В/м	10^{-4}	$2 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-4}$	10^{-3}	$6 \cdot 10^{-3}$	$7 \cdot 10^{-3}$	$8 \cdot 10^{-3}$	10^{-2}
	γ , л/О м·м	10^6	$2 \cdot 10^7$	$3 \cdot 10^7$	$4 \cdot 10^7$	$5 \cdot 10^7$	$6 \cdot 10^7$	$7 \cdot 10^7$	$8 \cdot 10^7$	$9 \cdot 10^7$	10^7
Задача №2	Δf , ГГц	15,15-19	11-12	9-10	8-9	7-8	4,5-5,2	4,7-5	3,8-4	3,1-3,5	2,5-3
	Е, В/м	85	20	40	30	65	50	45	30	20	10
	γ , л/О м·м	10^7	$2 \cdot 10^7$	$3 \cdot 10^7$	$4 \cdot 10^7$	$5 \cdot 10^7$	$6 \cdot 10^7$	$7 \cdot 10^7$	$8 \cdot 10^7$	$9 \cdot 10^7$	$1,5 \cdot 10^7$
Задача №3	Е, В/м	200	100	250	150	300	120	170	80	70	50
	R, см	28	26	24	22	20	18	15	12	10	8
	d, см	20	23	10	31	22	44	12	10	20	10
	b, см	10	12	13	5	4	6	8	10	12	15
	a, см	20	25	30	10	9	12	14	15	24	30
Задача №4 канал ДКМВ	D, км	100	200	300	100	200	300	400	100	200	300
	$P_{\text{вых.}}$, кВт	0,350	0,400	0,450	0,350	0,400	0,450	0,500	0,350	0,400	0,450
канал МВ	P_1 , Вт	200	300	400	200	300	400	200	300	400	200
	f , МГц	120	100	110	130	140	120	100	110	130	140

Таблица 2

Вариант XY		X0	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9
Задача №1	f , МГц	90	85	70	60	50	45	35	30	25	15
	θ° , градус	12	17	22	27	32	37	42	47	57	63
	Поляризация	Горизонтальная						Вертикальная			
Задача №2	Сечение	Прямоугольное						Круглое			
	Тип волны	H_{10}						H_{11}		E_{01}	
	l , м	0,8	1,0	1,1	1,2	1,3	2,0	2,4	2,3	3,0	3,5
Задача №3	Форма	Параллелепипед						Коаксиальный цилиндр		Цилиндр	
	Тип колебаний	H_{101}		E_{110}				$T(TEM)$ $p=1$		E_{010}	
	ε	1,2	1,3	1,3	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0	2,3
Задача №4 канал ДКМВ	Время связи (месяц, час суток)	декабрь 9.00 июнь 5.00	декабрь 12.00 июнь 7.00	декабрь 16.00 июнь 9.00	декабрь 9.00 июнь 15.00	декабрь 12.00 июнь 19.00	декабрь 9.00 июнь 12.00				
	Географическое расположение	35 ⁰ с.ш.	40 ⁰ с.ш.	45 ⁰ с.ш.	35 ⁰ с.ш.	45 ⁰ с.ш.	40 ⁰ с.ш.				
	G_1	4,3	3,3	4,0	4,3	4,0	3,3				
канал МВ	$h_1; h_2$							30;4	25;3	20;2	30;4
	N_s							350	330	370	350
	$E_{ш}$, дБ							-10	-15	-20	-15

ЗАДАЧА 1. ПЛОСКИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ВОЛНЫ

1.1. Задано

Плоская однородная волна частоты f МГц заданной поляризации с E В/м падает из воздуха с $\varepsilon_0 = 8,8 \cdot 10^{-12}$ Ф/м и $\mu_0 = 12,5 \cdot 10^{-7}$ Г/м на сверхпроводящую плоскость (рис.1).

1.2. Требуется определить:

1. Нормальные H_x (или E_x) и касательные H_z (или E_z) (рис.1) к границе компоненты полей падающей волны. В скобках поля для вертикальной поляризации. Учесть связь между E и H .

2. У падающей волны: коэффициент фазы, фазовую и групповую скорости и длину волны вдоль направления падения волны: β , v_ϕ , v_{gp} , λ и по направлению вдоль z : β_z , $v_{\phi z}$, v_{gpz} , λ_z (рис. 2).

3. Модуль усредненного по времени вектора Умова-Пойнтинга падающей волны.

4. Эффективную поверхностную плотность тока δ_s на сверхпроводящей плоскости.

5. Удельное поверхностное сопротивление R_s отражающей поверхности при $\mu_0 = 12,5 \cdot 10^{-7}$ Г/м, γ 1/Ом·м и глубину проникновения Δ° .

6. Полное сопротивление проводника с размерами $l_y = 50$ см и $l_z = 30$ см.

7. Удельную p_t и полную мощность тепловых потерь P_t на отражающей поверхности с площадью $S = l_y \cdot l_z$.

8. Написать, при какой поляризации может иметь место явление полного преломления (т.е. отсутствует отраженная волна) и при каких условиях может наступить явление полного отражения (т.е. отсутствует преломленная волна) и определить угол Брюстера и критический угол падения, если $\varepsilon_1 = 2$, $\varepsilon_2 = 1$.

1.3. Методика решения задачи

1.3.1. При вертикальной поляризации (см. рис.1) нормальная к границе компонента поля $-E_x$, касательные компоненты поля $-E_z$ и $H_y = H_{nao}$.

Электрическое и магнитное поля плоской однородной волны связаны между собой через волновое сопротивление среды $\dot{\eta}$

$$\dot{\eta} = \frac{\dot{E}}{\dot{H}} = \sqrt{\frac{\mu_a}{\varepsilon_a}}, \text{ Ом},$$

где $\mu_a = \mu_0 \cdot \mu$ – абсолютная магнитная проницаемость среды;

$\mu_0 = 120 \pi / c$ – абсолютная магнитная проницаемость вакуума (магнитная постоянная);

c – скорость света в вакууме;

μ – относительная магнитная проницаемость среды;

$\varepsilon_a = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon$ – абсолютная диэлектрическая проницаемость среды;

$\varepsilon_0 = 1/(120\pi \cdot c)$ - абсолютная диэлектрическая проницаемость вакуума (электрическая постоянная);

ε – относительная диэлектрическая проницаемость среды.

Для воздуха или вакуума это сопротивление равно

$$\dot{\eta}_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} = 120\pi, \text{ Ом}$$

и называется волновым сопротивлением свободного пространства.

Действующие значения нормальной и касательной к границе раздела напряженности электрического поля падающей волны равны:

$$E_{x\text{ на } \partial} = E_{\text{на } \partial} \cdot \sin \theta; \quad E_{z\text{ на } \partial} = E_{\text{на } \partial} \cdot \cos \theta; \quad H_{y\text{ на } \partial} = \frac{E_{\text{на } \partial}}{\dot{\eta}}.$$

При горизонтальной поляризации векторы $\vec{E}$ и $\vec{H}$ на рис.1 следует поменять местами. Нормальной к границе компонентой поля будет H_x , касательными – H_z и $E_y = E_{\text{на } \partial}$:

$$H_{\text{на } \partial} = \frac{E_{\text{на } \partial}}{\dot{\eta}}; \quad H_{x\text{ на } \partial} = H_{\text{на } \partial} \cdot \sin \theta; \quad H_{z\text{ на } \partial} = H_{\text{на } \partial} \cdot \cos \theta.$$

1.3.2. Коэффициент фазы, фазовая и групповая скорости, длина волны связаны друг с другом следующим образом (рис. 2):

1) вдоль направления падения волны z_1 :

$$\beta = \omega \cdot \sqrt{\mu_a \cdot \varepsilon_a}; \quad v_\phi = \frac{\omega}{\beta} = v_0; \quad v_{gp} = \frac{1}{d\beta/d\omega} = v_0; \quad \lambda = \frac{2\pi}{\beta} = \frac{v_0}{f},$$

где $v_0 = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_a \cdot \mu_a}} = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon \cdot \mu}}$ - скорость света в данной среде;

ε и μ для воздуха равны 1;

2) по направлению вдоль оси z :

$$\beta_z = \beta \cdot \sin \theta; \quad v_{\phi z} = \frac{v_0}{\sin \theta}; \quad v_{gp z} = v_0 \cdot \sin \theta; \quad \lambda_z = \frac{\lambda}{\sin \theta} = \frac{v_{\phi z}}{f}.$$

1.3.3. Модули усредненного по времени вектора Умова – Пойнтинга падающей волны при горизонтальной поляризации и при вертикальной поляризации одинаковы и равны

$$\frac{\Delta}{P_{\text{на } \partial}} = |E_{\text{на } \partial} \cdot H_{\text{на } \partial}| = \frac{E_{\text{на } \partial}^2}{\dot{\eta}}.$$

1.3.4. Эффективная поверхностная плотность тока:

1) при горизонтальной поляризации

$$\delta_s = \delta_{sy} = H_t = 2H_{z\text{ на } \partial},$$

где H_t - касательная к границе раздела компонента поля;

2) при вертикальной поляризации

$$\delta_s = \delta_{sz} = H_t = 2H_{y\text{ на } \partial}.$$

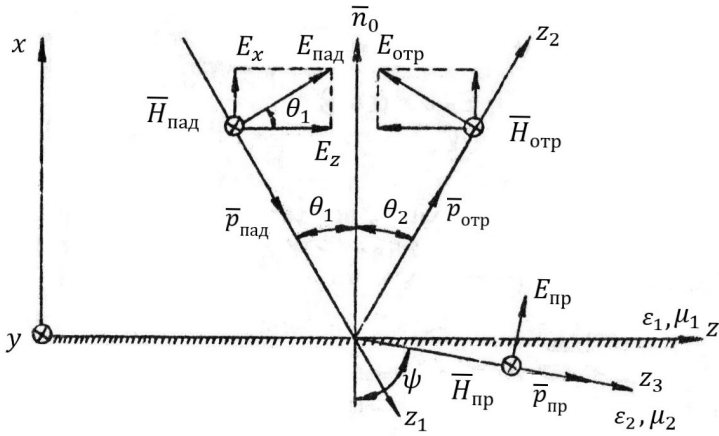


Рис.1. Отражение и преломление плоской однородной волны на плоской границе раздела двух сред при вертикальной поляризации

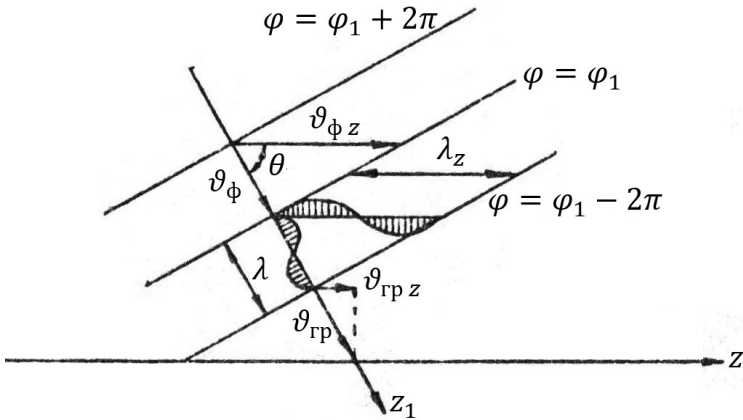


Рис.2. Фазовая, групповая скорости и длина волны

1.3.5. Удельное поверхностное сопротивление отражающей поверхности и глубина проникновения

$$R_s = \sqrt{\frac{\mu_a \cdot \omega}{2\gamma}}; \Delta^* = \sqrt{\frac{2}{\mu_a \cdot \omega \cdot \gamma}}.$$

1.3.6. Полное сопротивление проводника:

1) при горизонтальной поляризации

$$R = R_s \cdot \frac{l_y}{l_z};$$

2) при вертикальной поляризации

$$R = R_s \cdot \frac{l_z}{l_y}.$$

1.3.7. Удельная мощность тепловых потерь:

1) при горизонтальной поляризации

$$p_t = \delta_{sy}^2 \cdot R_s;$$

2) при вертикальной поляризации

$$p_t = \delta_{sz}^2 \cdot R_s.$$

Полная мощность тепловых потерь на отражающей поверхности с площадью $S = l_y \cdot l_z$

$$P_t = p_t \cdot S.$$

1.3.8. Угол Брюстера и критический угол падения:

$$\operatorname{tg} \theta_{Бр} = \sqrt{\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}}; \sin \theta_{кр} = \sqrt{\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}}.$$

ЗАДАЧА 2. ЛИНИИ ПЕРЕДАЧИ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО ДИАПАЗОНА

2.1. Задано

При расчетах необходимо пользоваться только системой единиц СИ.

В таблице вариантов заданий заданы: форма поперечного сечения волновода и тип волны в нем, максимальная амплитуда напряженности электрического поля, длина линии передачи l , полоса рабочих частот $f_{\min} - f_{\max}$. Волновод заполнен воздухом, удельная объемная проводимость стенок γ , пробивная напряженность $E_{проб} = 3$ кВ/мм, КБВ = 0,8. Для расчета допустимой длины линии – длительность импульса $\tau = 10^{-7}$ с, частота заполнения $f_{\max}$.

2.2. Требуется выполнить следующее:

1. Выбрать поперечные размеры прямоугольного волновода по заданным рабочим частотам и по минимальной частоте у круглого волновода. Стандарт на волноводы приведен в табл. 3.

2. Найти значения K_x , K_y , K_z (прямоугольный волновод) и $g_{ЕН}$, K_z (круглый волновод) – на $\lambda_{ср}$.

3. Используя найденные в п.2 значения K , записать выражения для полей заданного типа волны.

4. Найти поперечные размеры волновода при работе с высшими типами волн (при заданной рабочей волне H_{10} – найти размеры для волны H_{20} ; при работе с волной H_{11} в круглом волноводе найти диаметр под волну E_{01} , а при работе с высшей волной E_{01} , найти диаметр для волны H_{11}). Показать, в каком случае поперечные размеры получаются меньше – при работе с основной или с высшей волной.

5. Найти критическую частоту и критическую длину волны заданного типа.

6. Найти длину волны в волноводе, фазовую и групповую скорости на средней длине волны.

7. Найти максимально допустимую длину волновода, при которой не наблюдалось бы заметных искажений формы сигнала при работе короткими импульсами высокой частоты $f_{\text{макс}}$ и длительностью $\tau = 10^{-7}$ с.

8. Рассчитать предельную мощность в волноводе на средней частоте при выбранных его стандартных размерах. Найти пробивную мощность при $K_{CB} = 1,2$, максимально допустимую мощность и сравнить ее с рабочей мощностью.

9. Найти коэффициент затухания на средней частоте.

10. Найти отношение амплитуд поля (при $x = \text{const}$ и $y = \text{const}$) и мощностей на расстоянии l , м при рассчитанной величине коэффициента затухания.

11. Определить, на каком расстоянии амплитуды поля волн H_{20} в прямоугольном и H_{01} в круглом волноводах (исходя из задания), находящихся в закритическом режиме, уменьшаются не менее чем в сто раз, если частота равна средней частоте диапазона (надо предварительно найти $\lambda_{кр}$ волны H_{20} или H_{01}).

12. Найти КПД несогласованной с нагрузкой линии передачи при длине линии l и $K_{БВ} = 0,8$.

2.3. Методика выполнения задания

2.3.1. Предварительно найдем длины волн рабочего диапазона:

$$\lambda_{\text{мин}} = \frac{v_0}{f_{\text{макс}}}; \lambda_{\text{макс}} = \frac{v_0}{f_{\text{мин}}},$$

где $v_0 = \frac{1}{\sqrt{\mu_a \cdot \epsilon_a}} = c$ – так как волновод заполнен воздухом.

Условия для выбора размеров прямоугольного волновода для волны H_{10} :

$$0,9 \lambda_{\text{мин}} \geq a \geq 0,6 \lambda_{\text{макс}}; b \leq a / 2.$$

Условия для выбора диаметра круглого волновода с волной H_{11} :

$$0,77 \lambda_{\text{мин}} > D > 0,6 \lambda_{\text{макс}}, D = 2R.$$

Условия для выбора диаметра круглого волновода с волной E_{01} :

$$0,96 \lambda_{\text{мин}} > D > 0,76 \lambda_{\text{макс}}.$$

Удовлетворяющие этим условиям стандартные волноводы выбираются из табл.3.

Если в качестве рабочей волны задана не основная волна, а, например, волна E_{01} в круглом волноводе, то не всегда удается подобрать стандартный волновод, и тогда размеры следует оставлять те, которые получены из расчета.

2.3.2. Для прямоугольного волновода значения K_x и K_y равны:

$$K_x = \frac{m\pi}{a}; \quad K_y = \frac{n\pi}{b},$$

где m, n – индексы, которые ставятся около названия волны (H_{mn} и E_{mn} , где $m = 0, 1, 2, 3, \dots$; $n = 0, 1, 2, 3, \dots$).

Для круглого волновода значения g_E и g_H равны:

$$g_E = \frac{\beta_{mn}}{R}; \quad g_H = \frac{\mu_{mn}}{R},$$

где $m = 0, 1, 2, 3, \dots$; $n = 0, 1, 2, 3, \dots$;

β_{mn} – корни функции Бесселя 1-го рода;

μ_{mn} – корни производной функции Бесселя.

Приводятся таблицы некоторых корней функции Бесселя 1-го рода β_{mn} и корней производной функции Бесселя μ_{mn} (табл. 4 и 5).

Коэффициент фазы в волноводе

$$K_z = \sqrt{\omega_{cp}^2 \cdot \varepsilon_a \cdot \mu_a - K_{kp}^2},$$

где $K_{kp} = \sqrt{K_x^2 + K_y^2}$ – для прямоугольного волновода;

$\varepsilon_a = \varepsilon_0$ и $\mu_a = \mu_0$ – если диэлектриком служит воздух;

$K_{kp} = g_{E,H}$ – для круглого волновода.

2.3.3. Для прямоугольного волновода из решения уравнений Максвелла с выполнением граничных условий на идеально проводящих стенках получаются решения для комплексных амплитуд поля волн типа H_{mn} :

$$\begin{aligned} \dot{H}_z &= \dot{H}_{z_0} \cdot \cos(K_x \cdot x) \cdot \cos(K_y \cdot y) \cdot e^{-jK_z z}; \\ \dot{H}_x &= j \dot{H}_{z_0} \cdot \frac{K_x \cdot K_z}{K_{kp}^2} \cdot \sin(K_x \cdot x) \cdot \cos(K_y \cdot y) \cdot e^{-jK_z z}; \\ \dot{H}_y &= j \dot{H}_{z_0} \cdot \frac{K_y \cdot K_z}{K_{kp}^2} \cdot \cos(K_x \cdot x) \cdot \sin(K_y \cdot y) \cdot e^{-jK_z z}; \\ \dot{E}_x &= j \dot{H}_{z_0} \cdot \frac{\omega \cdot \mu_a \cdot K_y}{K_{kp}^2} \cdot \cos(K_x \cdot x) \cdot \sin(K_y \cdot y) \cdot e^{-jK_z z}; \\ \dot{E}_y &= -j \dot{H}_{z_0} \cdot \frac{\omega \cdot \mu_a \cdot K_x}{K_{kp}^2} \cdot \sin(K_x \cdot x) \cdot \cos(K_y \cdot y) \cdot e^{-jK_z z}, \end{aligned}$$

где $\dot{H}_{z_0} = H_{z_m} \cdot e^{j\varphi_0}$;

$$K_{kp} = \omega_{kp} \cdot \sqrt{\varepsilon_a \cdot \mu_a};$$

φ_0 – начальная фаза напряженности магнитного поля, рад;

H_{z_m} – действительная амплитуда напряженности продольного магнитного поля, А/м;

Таблица 3

Технические данные прямоугольных и круглых волноводов (стандарт, принятый Международной электротехнической комиссией (МЭК))

Прямоугольные волноводы					Круглые волноводы				
Обозначение типа волновода	Диапазон частот для ос- новного типа волны, ГГц		Внутренние размеры		Обозначение типа волно- вода	Диаметр, мм	Критические частоты(ГГц) для волн типа		
	от	до	ширина a, мм	высота b, мм			H ₁₁	E ₀₁	H ₂₁
R26	2,17	3,30	86,3	43,18	C25	83,62	2,1	2,74	3,49
R32	2,60	3,95	72,14	34,04	C30	71,42	2,46	3,21	4,08
R40	3,22	4,90	58,17	29,08	C35	61,04	2,88	3,76	4,77
R48	3,94	5,99	47,55	22,149	C40	51,99	3,38	4,41	5,61
R70	5,38	8,17	34,85	15,8	C48	44,45	3,95	5,16	6,56
R84	6,57	9,99	28,5	12,62	C65	32,54	5,4	7,05	8,96
R100	8,2	12,5	22,86	10,16	C76	27,78	6,32	8,26	10,5
R120	9,84	15,0	19,05	9,52	C89	23,825	7,37	9,63	12,2
R140	11,9	18,0	15,0	7,9	C104	20,244	8,68	11,3	14,4
R180	14,5	22,0	12,954	6,477	C165	12,7	13,8	18,1	22,9

Таблица 4

Корни β_{mn} функции Бесселя

$\begin{matrix} n \\ m \end{matrix}$	1	2	3
0	2,405	5,52	8,65
1	3,83	7,016	10,173
2	5,136	8,417	11,62

Таблица 5

Корни μ_{mn} производной функции Бесселя

$\begin{matrix} n \\ m \end{matrix}$	1	2	3
0	3,83	7,016	10,173
1	1,841	5,331	8,530
2	3,054	6,706	9,969

$\dot{E}_x, \dot{E}_y$ – комплексные амплитуды напряженности электрического поля, В/м.

В круглом волноводе с радиусом R поле волн типа E_{mn} :

$$\begin{aligned}\dot{E}_z &= \dot{E}_{z_0} \cdot J_m(g_E \cdot r) \cdot \cos(m\alpha) \cdot e^{-jK_z z}; \\ \dot{E}_r &= -j \cdot \frac{K_z}{g_E} \cdot \dot{E}_{z_0} \cdot J'_m(g_E \cdot r) \cdot \cos(m\alpha) \cdot e^{-jK_z z}; \\ \dot{E}_\alpha &= j \cdot \frac{m \cdot K_z}{g_E^2 \cdot r} \cdot \dot{E}_{z_0} \cdot J_m(g_E \cdot r) \cdot \sin(m\alpha) \cdot e^{-jK_z z}; \\ \dot{H}_r &= -j \cdot \frac{m \cdot \omega \cdot \varepsilon_a}{g_E^2 \cdot r} \cdot \dot{E}_{z_0} \cdot J_m(g_E \cdot r) \cdot \sin(m\alpha) \cdot e^{-jK_z z}; \\ \dot{H}_\alpha &= -j \cdot \frac{\omega \cdot \varepsilon_a}{g_E} \cdot \dot{E}_{z_0} \cdot J'_m(g_E \cdot r) \cdot \cos(m\alpha) \cdot e^{-jK_z z},\end{aligned}$$

и для волн типа H_{mn} :

$$\begin{aligned}\dot{H}_z &= \dot{H}_{z_0} \cdot J_m(g_H \cdot r) \cdot \cos(m\alpha) \cdot e^{-jK_z z}; \\ \dot{H}_r &= -j \cdot \frac{K_z}{g_H} \cdot \dot{H}_{z_0} \cdot J'_m(g_H \cdot r) \cdot \cos(m\alpha) \cdot e^{-jK_z z}; \\ \dot{H}_\alpha &= j \cdot \frac{m \cdot K_z}{r \cdot g_H^2} \cdot \dot{H}_{z_0} \cdot J_m(g_H \cdot r) \cdot \sin(m\alpha) \cdot e^{-jK_z z}; \\ \dot{E}_r &= \frac{m \cdot \omega \cdot \mu_a}{r \cdot g_H^2} \cdot \dot{H}_{z_0} \cdot J_m(g_H \cdot r) \cdot \sin(m\alpha) \cdot e^{-jK_z z}; \\ \dot{E}_\alpha &= j \cdot \frac{\omega \cdot \varepsilon_a}{g_H} \cdot \dot{H}_{z_0} \cdot J'_m(g_H \cdot r) \cdot \cos(m\alpha) \cdot e^{-jK_z z}.\end{aligned}$$

2.3.4. Критическая длина волны в прямоугольном волноводе

$$\lambda_{кр} = \frac{\nu_0}{f_{кр}} = \frac{1}{f_{кр} \cdot \sqrt{\varepsilon_a \cdot \mu_a}} = \frac{c}{f_{кр} \cdot \sqrt{\varepsilon \mu}} = \frac{2\pi}{K_{кр}} = \frac{2}{\sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2}},$$

где $K_{кр} = 2\pi f_{кр} \cdot \sqrt{\varepsilon_a \cdot \mu_a} = \omega_{кр} \cdot \sqrt{\varepsilon_a \cdot \mu_a}$; $\omega_{кр} = 2\pi \cdot f_{кр}$.

Критические длины волн в круглом волноводе для волн типа E_{mn}

$$\lambda_{кр E} = \frac{2\pi}{g_E} = \frac{2\pi R}{\beta_{mn}}$$

и волн типа H_{mn}

$$\lambda_{кр H} = \frac{2\pi}{g_H} = \frac{2\pi R}{\mu_{mn}}.$$

Приведенные выше выражения для $\lambda_{кр}$ позволяют найти поперечные размеры прямоугольного волновода и диаметр ($D = 2R$) круглого волновода при работе с высшими типами волн.

2.3.5. В прямоугольном волноводе критические частоты волн типа H и E с одинаковыми сочетаниями индексов m и n одинаковы и равны

$$\omega_{кр mn} = \frac{\sqrt{\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2}}{\sqrt{\varepsilon_a \mu_a}} = v_0 \cdot \sqrt{\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2},$$

где $v_0 = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_a \cdot \mu_a}} = c$ – так как волновод заполнен воздухом.

В круглом волноводе критические частоты имеют разные значения у волн типа Н и Е даже с одинаковыми индексами.

Для волн типа E_{mn}

$$\omega_{кр E_{mn}} = \frac{g_E}{\sqrt{\varepsilon_a \cdot \mu_a}} = \frac{\beta_{mn}}{R \cdot \sqrt{\varepsilon_a \cdot \mu_a}}.$$

Для волн типа H_{mn}

$$\omega_{кр H_{mn}} = \frac{g_H}{\sqrt{\varepsilon_a \cdot \mu_a}} = \frac{\mu_{mn}}{R \cdot \sqrt{\varepsilon_a \cdot \mu_a}}.$$

2.3.6. Длина волны в волноводе, фазовая и групповая скорости вычисляются для прямоугольного и круглого волноводов по одинаковым формулам, но при соответствующих $\lambda_{кр}$:

$$\lambda_B = \frac{2\pi}{K_z} = \frac{2\pi}{\sqrt{K^2 - K_{кр}^2}} = \frac{2\pi}{K \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{K_{кр}}{K}\right)^2}} = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\varepsilon - \left(\frac{\lambda_0}{\lambda_{кр}}\right)^2}},$$

где $K = \sqrt{K_{кр}^2 + K_z^2} = \sqrt{g_{E,H}^2 + K_z^2} = \omega_0 \cdot \sqrt{\varepsilon_a \mu_a}$;

$\lambda_0 = \lambda_{кр}$ – в соответствии с заданием;

$\varepsilon = 1$ – в волноводе, заполненном воздухом;

$$v_\phi = \lambda_\phi f = \frac{v_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_0}{\lambda_{кр}}\right)^2}} = \frac{v_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{\omega_{кр}}{\omega_0}\right)^2}} = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon} \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_0}{\lambda_{кр}}\right)^2}} \cdot \frac{1}{\varepsilon};$$

$$v_{гp} = v_0 \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{\omega_{кр}}{\omega_0}\right)^2} = v_0 \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_0}{\lambda_{кр}}\right)^2},$$

где $\omega_0 = \omega_{кр}$.

2.3.7. Максимально допустимая длина волновода, при которой искажения еще невелики

$$L_{\max} \leq 1,5 \cdot 10^8 \cdot \frac{\left[1 - \left(\frac{f_{кр}}{f_{\max}}\right)^2\right]^{3/2}}{f_{\max} (\Delta f / f_{\max})^2 \cdot (f_{кр} / f_{\max})^2},$$

где $\Delta f = \frac{2}{\tau}$ – разность двух крайних частот спектра.

2.3.8. Предельная мощность в прямоугольном волноводе на средней частоте и волне типа H_{10} и H_{20}

$$P_{пред} = 6,63 \cdot 10^{-4} \cdot ab \cdot E_{проб}^2 \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_{ср}}{\lambda_{кр}} \right)^2}.$$

Предельная мощность в круглом волноводе:

1) с волной типа H_{11}

$$P_{пред} = 1,99 \cdot 10^{-3} \cdot R^2 \cdot E_{проб}^2 \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_{ср}}{\lambda_{кр}} \right)^2},$$

где $E_{проб}$ в В/м;

2) с волной E_{01}

$$P_{пред} = 1,125 \cdot 10^{-3} \cdot R^2 \cdot E_{проб}^2 \cdot \sqrt{\left(\frac{\lambda_{кр}}{\lambda_{ср}} \right)^2 - 1}.$$

Пробивная мощность $P_{проб} = P_{пред} / \text{КСВ}$,

где КСВ – коэффициент стоячей волны.

Максимально допустимая мощность

$$P_{доп} = \frac{P_{пред}}{3 \div 5}.$$

Рабочая мощность (мощность, проходящая по волноводу)

$$P_{раб} = \frac{P_{проб}}{E_{проб}^2} \cdot E_{раб\ m}^2,$$

где $E_{раб\ m}$ – амплитуда максимального значения электрического поля.

В задании именно это максимальное значение поля $E = E_{раб\ m}$ и задано.

Должно выполняться условие

$$P_{раб} \ll P_{доп}.$$

2.3.9. Коэффициент затухания волн типа H_{10} и H_{20} в прямоугольном волноводе при воздушном заполнении равен

$$\alpha = \frac{0,023 R_s \left[\left(\frac{1}{b} \right) + \left(\frac{2}{a} \right) \cdot \left(\frac{\lambda_{ср}}{\lambda_{кр}} \right)^2 \right]}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_{ср}}{\lambda_{кр}} \right)^2}}, \text{ дБ/м},$$

где R_s – удельное поверхностное сопротивление

$$R_s = \sqrt{\frac{\mu_a \cdot \omega_{ср}}{2\gamma}} = \frac{34,5}{\sqrt{\lambda_{ср} \gamma}},$$

где γ – удельная объемная проводимость стенок.

Коэффициенты затухания в круглом волноводе равны у волн H_{11}

$$\alpha = \frac{0,023 \cdot R_s \left[\left(\frac{\lambda_{cp}}{\lambda_{kp}} \right)^2 + 0,416 \right]}{R \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_{cp}}{\lambda_{kp}} \right)^2}}, \text{ дБ/м},$$

и у волн E_{01}

$$\alpha = \frac{0,023 \cdot R_s}{R \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_{cp}}{\lambda_{kp}} \right)^2}}, \text{ дБ/м},$$

где R – внутренний радиус волновода.

2.3.10. Отношение амплитуд поля и отношение мощностей можно найти из следующей формулы

$$\alpha = \frac{20}{l} \cdot \lg \frac{E_m(z)}{E_m(z+l)} = \frac{10}{l} \lg \frac{P(z)}{P(z+l)}, \text{ дБ/м}.$$

2.3.11. Расстояние Δz , на котором поле волны H_{20} (или H_{01}), находящейся в закритическом режиме, уменьшается в 100 раз на средней частоте диапазона, находится так:

$$\frac{E_m(z)}{E_m(z+l)} = 100 = e^{K'_z \Delta z}; \quad \ln 100 = 2,3 \lg 100 = K'_z \Delta z.$$

Критическая длина волны типа H_{20} при выбранных размерах прямоугольного волновода

$$\lambda_{kp} = \frac{2}{\sqrt{\left(\frac{m}{a} \right)^2 + \left(\frac{n}{b} \right)^2}} = a.$$

Критическая длина волны типа H_{01} в круглом волноводе

$$\lambda_{kpH} = \frac{2\pi}{g_H} = \frac{2\pi R}{\mu_{mn}} = \frac{2\pi R}{\mu_{01}}.$$

Коэффициент закритического затухания

$$K'_z = \sqrt{K_{kp}^2 - K^2} = K \sqrt{\left(\frac{\omega_{kp}}{\omega_{cp}} \right)^2 - 1} = 2\pi \sqrt{\varepsilon_a \mu_a} \cdot \sqrt{f_{kp}^2 - f_{cp}^2} = 2\pi \sqrt{\frac{\lambda_{cp}^2 - \varepsilon \lambda_{kp}^2}{\lambda_{cp} \lambda_{kp}}},$$

где $\varepsilon = 1$ - для воздуха.

Откуда расстояние, на котором поле уменьшится в 100 раз, равно

$$\Delta z = \frac{4,6}{K'_z}.$$

2.3.12. Коэффициент полезного действия несогласованной с нагрузкой линии передачи

$$\text{КПД} = \left(1 - \left| \Gamma \right|^2 \right) \cdot e^{-2\alpha l},$$

где $\left| \dot{\Gamma} \right|$ - модуль коэффициента отражения;

α - коэффициент затухания в Неп/м;

l - длина линии.

Модуль коэффициента отражения

$$\left| \dot{\Gamma} \right| = \frac{KCB - 1}{KCB + 1},$$

где $KCB = 1 / KBB$.

Коэффициент затухания

$$\alpha = \frac{\alpha, \partial B / м}{8,69} = \alpha, \frac{Hen}{м}.$$

При расчете КПД величина $e^{2\alpha l} = x$ вычисляется как обычно

$$\ln x = 2,3 \lg x = 2\alpha l; \quad \lg x = \frac{2\alpha l}{2,3}.$$

Далее, находим x .

Отсюда

$$КПД = \frac{1 - \left| \dot{\Gamma} \right|^2}{x}.$$

ЗАДАЧА 3. ОБЪЕМНЫЕ РЕЗОНАТОРЫ

3.1. Задано

При расчетах необходимо пользоваться только системой единиц СИ. Задана форма резонатора и тип колебания (H_{mnp} , E_{mnp} или T (ТЕМ) $_{p=1}$), его размеры a , b , d – в прямоугольном резонаторе, радиус R и длина d – в цилиндрическом резонаторе; меньший радиус $R_1 = 50$ мм и больший радиус $R_2 = R$, длина d – в коаксиальном резонаторе. Дана максимальная амплитуда напряженности электрического поля $E = E_{т макс}$, В/м, проводимость материала стенок равна $\gamma = 10^7$ 1/Ом·м, заполнение воздушное, $\mu_a = \mu_0 = 12,5 \cdot 10^{-7}$ Г/м, $\epsilon_a = \epsilon_0 = 8,8 \cdot 10^{-12}$ Ф/м.

3.2. Требуется выполнить следующее:

1. Нарисовать картину поля заданного типа колебания, используя рис.3.
2. Записать выражения для компонент поля соответствующего типа колебаний. В эти выражения надо подставить числовые значения K_x , K_y , K_z , которые заданы типом колебаний и размерами a , b , d , R .
3. Найти резонансную частоту $\omega_{рез}$ резонатора с заданным типом колебания.
4. Запасенную энергию электромагнитного поля W (считать, что заданное электрическое поле E равно соответственно $E_{zm макс}$, $E_{ym макс}$ или $E_{tm макс}$ – амплитуде поля в том месте, где поле максимально).

5. Глубину проникновения в материал стенок.

6. Добротность резонатора Q без учета потерь в диэлектрике.

7. Постоянную времени τ_0 . Определить, во сколько раз уменьшится

запасенная в резонаторе энергия при свободных колебаниях за время $t = 5$ с.

3.3. Методика выполнения задания

3.3.1. Картины полей различных типов колебаний в резонаторах различной формы приведены на рис.3.

3.3.2. Для прямоугольного резонатора составляющие поля для колебаний H_{mnp} :

$$\begin{aligned}\dot{H}_z &= \dot{H}_{z_0} \cos(K_x x) \cdot \cos(K_y y) \cdot \sin(K_z z); \\ \dot{H}_y &= j \dot{H}_{z_0} \frac{K_z \cdot K_x}{K_x^2 + K_y^2} \cdot \cos(K_x x) \cdot \sin(K_y y) \cdot \cos(K_z z); \\ \dot{H}_x &= j \dot{H}_{z_0} \frac{K_z \cdot K_x}{K_x^2 + K_y^2} \sin(K_x x) \cos(K_y y) \cos(K_z z); \\ \dot{E}_x &= \dot{H}_{z_0} \frac{\omega \mu_a K_y}{K_x^2 + K_y^2} \cos(K_x x) \sin(K_y y) \sin(K_z z); \\ \dot{E}_y &= -\dot{H}_{z_0} \frac{\omega \mu_a K_x}{K_x^2 + K_y^2} \sin(K_x x) \cos(K_y y) \sin(K_z z); \\ \dot{E}_z &= 0; \quad \dot{H}_{z_0} = H_{z_m} \cdot e^{j(\omega t + \varphi_0)},\end{aligned}$$

где $K_x = \frac{m\pi}{a}$; $K_y = \frac{n\pi}{b}$; $K_z = \frac{p\pi}{d}$.

Пример картины поля типа H_{mnp} , например, H_{101} , приведен на рис. 3,а.

Для прямоугольного резонатора составляющие поля для колебаний типа E_{mnp} :

$$\begin{aligned}\dot{E}_z &= \dot{E}_{z_0} \sin(K_x x) \cdot \sin(K_y y) \cdot \cos(K_z z); \\ \dot{H}_y &= -j \dot{E}_{z_0} \frac{\omega \varepsilon_a K_x}{K_x^2 + K_y^2} \cos(K_x x) \sin(K_y y) \cos(K_z z); \\ \dot{E}_x &= -\dot{E}_{z_0} \frac{K_z \cdot K_x}{K_x^2 + K_y^2} \cos(K_x x) \sin(K_y y) \sin(K_z z); \\ \dot{E}_y &= -\dot{E}_{z_0} \frac{K_z \cdot K_y}{K_x^2 + K_y^2} \sin(K_x x) \cos(K_y y) \sin(K_z z); \\ \dot{H}_z &= 0; \quad \dot{E}_{z_0} = E_{z_m} \cdot e^{j(\omega t + \varphi_0)}.\end{aligned}$$

Пример картины колебаний типа E_{mnp} , например, E_{110} , приведен на рис.3,б.

У цилиндрического резонатора составляющее поля колебаний типа E_{010} равны:

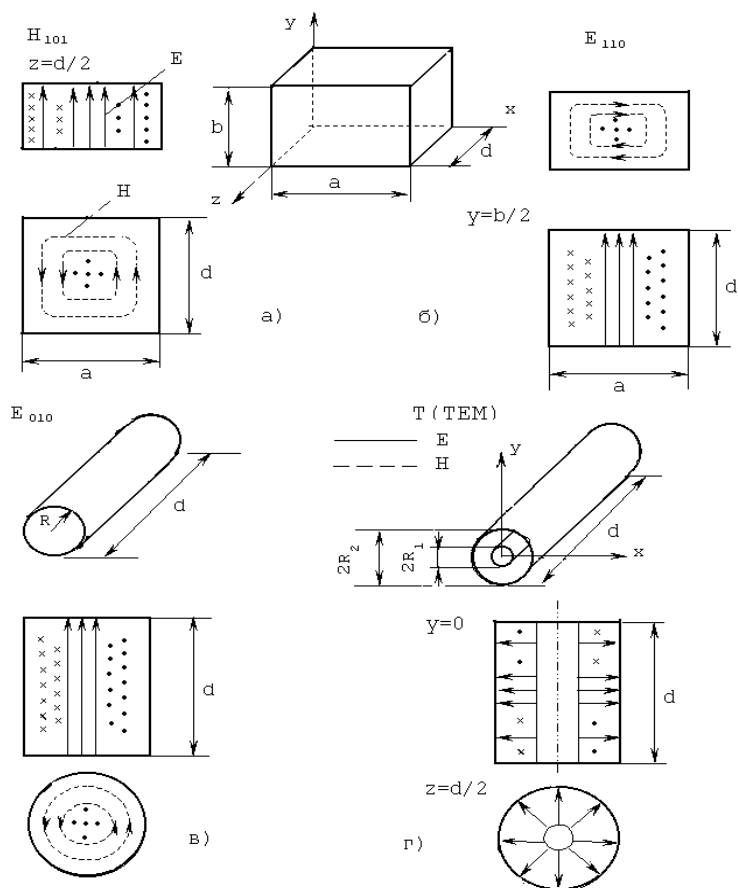


Рис.3. Полые металлические резонаторы:
 а) и б) – прямоугольный с колебаниями H_{101} и E_{110} ;
 в) – цилиндрический с колебанием E_{010} ;
 г) – коаксиальный Т (TEM) ($p=1$)

$$\dot{E}_z = \dot{E}_{z_0} J_0\left(\frac{\beta_{01}}{R} \cdot r\right); \quad \dot{H}_\alpha = -j \sqrt{\frac{\varepsilon_a}{\mu_a}} E_{z_0} J_1\left(\frac{\beta_{01}}{R} r\right),$$

где β_{01} - находится из табл.4;

$J_0(x)$ и $J_1(x)$ - функция Бесселя 1-го рода нулевого и первого порядка соответственно (находятся из Приложения 1).

Картина поля колебания E_{010} приведена на рис.3,в.

Для коаксиального резонатора с волной Т (ТЕМ), картина поля которой для $p=1$ приведена на рис.3,г :

$$\dot{E}_r = \dot{E}_{r_0} \frac{R_1}{r} \sin \frac{p\pi}{d} z; \quad \dot{H}_\alpha = j \dot{E}_{r_0} \frac{R_1}{r} \sqrt{\frac{\varepsilon_a}{\mu_a}} \cos \frac{p\pi}{d} z.$$

3.3.3. Резонансные частоты в прямоугольном резонаторе с колебаниями типа H_{mnp} и E_{mnp}

$$\omega_{\text{рез}E,H} = \frac{\sqrt{\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2 + \left(\frac{p\pi}{d}\right)^2}}{\sqrt{\varepsilon_a \mu_a}}.$$

Резонансные частоты цилиндрических круглых резонаторов с колебаниями типа E_{mn}

$$\omega_{\text{рез}E} = \frac{\sqrt{\left(\frac{\beta_{mn}}{R}\right)^2 + \left(\frac{p\pi}{d}\right)^2}}{\sqrt{\varepsilon_a \mu_a}},$$

где β_{mn} - корень функции Бесселя первого рода m – го порядка.

Резонансная частота коаксиального резонатора с колебанием типа Т (ТЕМ)

$$\omega_{\text{рез}} = \frac{p\pi c}{d\sqrt{\varepsilon}},$$

где $c = 3 \cdot 10^8$ м/с.

3.3.4. Запасенная электромагнитная энергия:

1) в прямоугольном резонаторе с типом колебания H_{101}

$$W_{H_{101}} = \frac{\varepsilon_a}{4} E_{y_{\text{т.макс}}}^2 \frac{abd}{4};$$

2) в прямоугольном резонаторе с типом колебания E_{110}

$$W_{E_{110}} = \frac{\varepsilon_a}{4} E_{z_{\text{т.макс}}}^2 \frac{abd}{4};$$

3) в цилиндрическом резонаторе с колебанием типа E_{010}

$$W_{E_{010}} = \frac{\varepsilon_a}{4} E_{z_{\text{т.макс}}}^2 2\pi d \frac{R^2}{2} J_1^2(\beta_{01}),$$

где $J_1(x)$ - находится из табл.П.1 Приложения 1;

4) в коаксиальном резонаторе с колебанием типа Т (ТЕМ) при $p=1$

$$W_T = \frac{\varepsilon_a}{4} E_{r_{\text{max}}}^2 R_1^2 2\pi \frac{d}{2} \ln \frac{R_2}{R_1}.$$

3.3.5. Глубина проникновения в материал стенок

$$\Delta^o = \sqrt{\frac{2}{\omega_{\text{рез}} \mu_a \gamma}}.$$

3.3.6. Добротность при различных типах колебаний:

1) в прямоугольном резонаторе с колебаниями H_{101} и H_{110}

$$Q_{H101} = \frac{adb(a^2 + d^2)}{ad(a^2 + d^2) + 2b(a^3 + d^3)} \cdot \frac{1}{\Delta^o},$$

$$Q_{E110} = \frac{abd(a^2 + b^2)}{ab(a^2 + b^2) + 2d(a^3 + b^3)} \cdot \frac{1}{\Delta^o};$$

2) в цилиндрическом резонаторе с колебанием E_{010}

$$Q_{E010} = \frac{d \cdot R}{d + R} \cdot \frac{1}{\Delta^o};$$

3) в коаксиальном резонаторе с колебанием Т (ТЕМ) при $p=1$

$$Q_T = \frac{2d \cdot \ln(R_2 / R_1)}{4 \ln(R_2 / R_1) + d(1/R_1 + 1/R_2)} \cdot \frac{1}{\Delta^o}$$

3.3.7. Энергия при свободных колебаниях тратится на потери и постепенно уменьшается по закону

$$W = W_0 e^{-\frac{\omega_0 t}{Q}} = W_0 e^{-\frac{2t}{\tau_0}}, \quad \tau_0 = \frac{2Q}{\omega_0},$$

где W_0 – начальный запас энергии в резонаторе при $t = 0$;

τ_0 – постоянная времени;

ω_0 – собственная частота резонатора.

Собственная частота ω_0 и резонансная частота $\omega_{\text{рез}}$ связаны друг с другом через добротность Q так, что

$$\omega_0 = \omega_{\text{рез}} \sqrt{1 + \frac{1}{4Q^2}}.$$

Как видно, при больших добротностях $Q \geq 10$ в инженерных расчетах этой разницей в величинах резонансной и собственной частоты можно пренебречь и считать $\omega_0 = \omega_{\text{рез}}$.

За время t энергия поля при свободных колебаниях уменьшается $W_0 / W = e^{2t/\tau_0}$.

ЗАДАЧА 4. КАНАЛЫ РАДИОСВЯЗИ

4.1. Задано

4.1.1. Для канала декаметровых волн (ДКМВ):

– длина радиолнии D и ее географическое расположение;

- мощность передатчика $P_{\text{вых}}$;
- коэффициент усиления передающей антенны G_1 ;
- вид излучения;
- длина волны;
- время действия канала связи;
- требуемое качество связи (разборчивость речи, надежность).

4.1.2. Для канала метровых волн (МВ):

- мощность передатчика P_1 ;
- высоты подъема антенн абонентов h_1, h_2 ;
- коэффициенты усиления передающей и приемной антенн G_1, G_2 ;
- коэффициенты передачи антенных фидеров передатчика и приемника

η_1, η_2 ;

- частота f ;
- индекс рефракции N_s ;
- уровень внутренних шумов приемника $E_{\text{ш}}$;
- надежность связи p_i ;
- дальность связи $D=D_{\Gamma}$.

4.2. Требуется определить

4.2.1. Для канала ДКМВ определить надежность канала связи.

4.2.2. Для канала МВ определить достоверность связи при заданных надежности связи, дальности и профиле трассы. Построить зависимость напряженности поля сигнала от расстояния $E_c = f(r)$.

4.3. Методика выполнения задания

4.3.1. Канал ДКМВ

Приведем методику расчета надежности ДКМВ канала связи и проиллюстрируем ее конкретным примером.

Для расчета примем:

- длина радиолинии $D = 100$ км;
- географическое расположение радиолинии $35^\circ \dots 45^\circ$ с.ш.;
- передатчик с мощностью выхода в телефонном режиме $P_{\text{вых}} = 0,350$ кВт;
- передающая антенна с коэффициентом усиления $G_1 = 4,3$;
- время действия радиоканала – светлое время суток;
- фразовая разборчивость $J_d = 97\%$;
- надежность связи $p_i \geq 95\%$.

Методика расчета включает следующие пункты.

1. Рабочую частоту (длину волны) определяют с помощью ежемесячных прогнозов максимально применимых частот (МПЧ). При этом исходят из: выделенного для связи участка ДКМВ диапазона (2...24 МГц), обеспечения требуемого качества связи с помощью одной рабочей волны в течение времени действия канала (светлое время суток, зима-лето), оптимальных значений $f_p = (0,7 \dots 0,8) f_{\text{МПЧ}}$. Прогнозы МПЧ на июнь и декабрь (для наиболее трудных периодов распространения) приведены на рис.4 и 5. Основываясь на

перечисленных выше требованиях прогнозов (см. рис. 4 и 5) и учитывая, что дальность связи D менее 400 км, примем $f_p = 3,5$ МГц ($\lambda_p = 86$ м).

Для данной f_p отражающим слоем в светлое время суток будет ионизированный слой E (трассы, меньше 2000 км используют этот слой, число отражений от ионосферы при этом $n=1$) с высотой $h_d = 110$ км.

2. Геоцентрический угол, при $n = 1$ и D , выраженной в км,

$$\theta^0 = \frac{D}{222,4}.$$

Для $D = 100$ км $\theta^0 = 100/222,4 \approx 0,450^\circ$.

3. Угол падения

$$\varphi_0 = \arctg \frac{a \sin \theta}{h_d + a(1 - \cos \theta)},$$

где a – радиус Земли ($a = 6370$ км).

Для $h_d = 110$ км

$$\varphi_0 = \arctg \frac{6370 \sin 0,45^\circ}{110 + 6370(1 - \cos 0,45^\circ)} \approx 24^\circ.$$

4. По известным φ_0 и λ_p значение коэффициента поглощения Γ_0 определяют по графикам зависимостей $\Gamma_E' = \psi(\lambda_p)$ приведенным на рис. 6. Эти зависимости построены для некоторого значения $f_{kp0} = 4$ МГц. Находим, что $\Gamma_0 = \Gamma_E' = 3,8$.

5. По ионосферным картам области E (см. рис. 7,8) определяем значение f_{kp} для требуемого месяца года, времени суток и широты. Для этого на карте нужного месяца (например, декабря, см. рис. 7) находим точку пересечения перпендикуляра к оси абсцисс (времени), соответствующей требуемому времени суток (например, 9.00), и перпендикуляра к оси ординат (широт) в точке, соответствующей заданной широте (35° с.ш. в нашем случае). Найдя точку пересечения (точка А, см. рис. 7), определяем, на какой изоплете (так называют линии одинаковых значений критических частот) она находится. В нашем примере точка А соответствует изоплете с $f_{kp} = 2,4$ МГц (цифры в скобках). Аналогично находятся значения f_{kp} для других месяцев, времени суток, географических широт.

6. Вычисляем действительное значение коэффициента поглощения

$$\Gamma = \Gamma_0 \left(\frac{f_{kp}}{f_{kp0}} \right)^2 = 3,8 \left(\frac{2,4}{4,0} \right)^2 = 1,37.$$

7. Напряженность электрического поля без учета потерь в ионосфере E_0 в мВ/м находится по формуле

$$E_0 = \frac{173 \sqrt{P_u}}{r_0} \cdot \frac{1 + |K_0|}{2} |K_0|^{n-1},$$

где r_0 – расстояние между точками передачи и приема, взятое как дальность по лучу, км;

$|K_0|$ – модуль коэффициента отражения радиоволн от поверхности Земли;

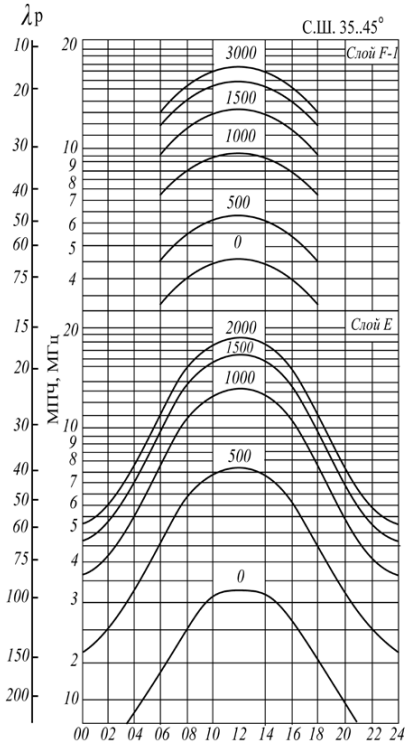


Рис. 4. Прогноз МПЧ на декабрь

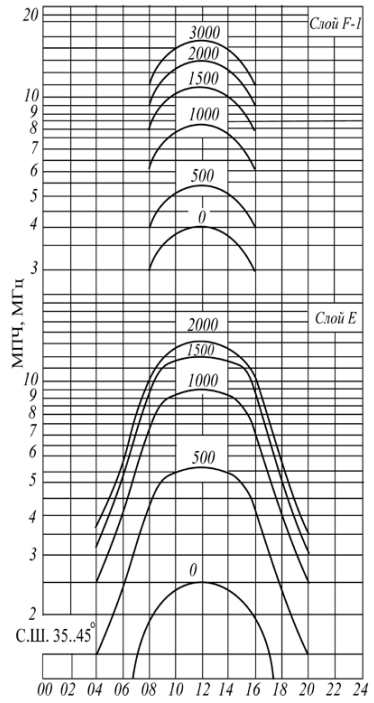
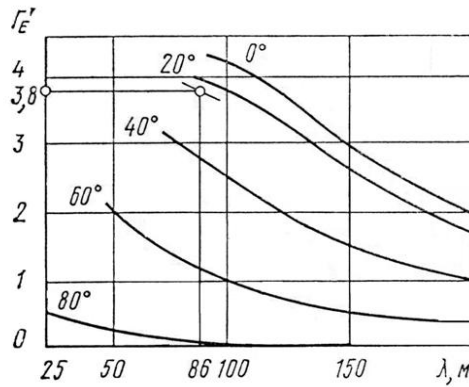


Рис. 5. Прогноз МПЧ на июнь

Рис. 6. Зависимости коэффициента поглощения от длины рабочей волны при $f_{кр0} = 4$ МГц

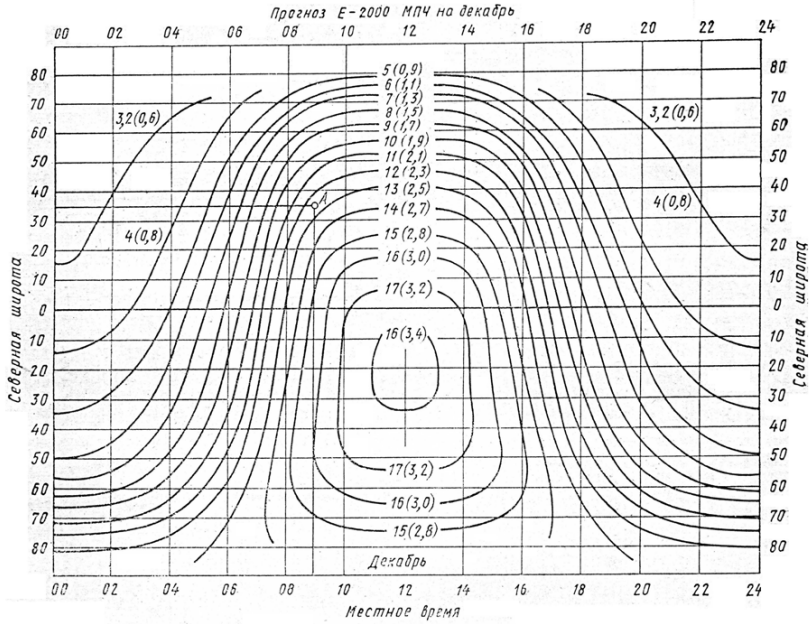


Рис 7. Ионосферная карта для области E на декабрь

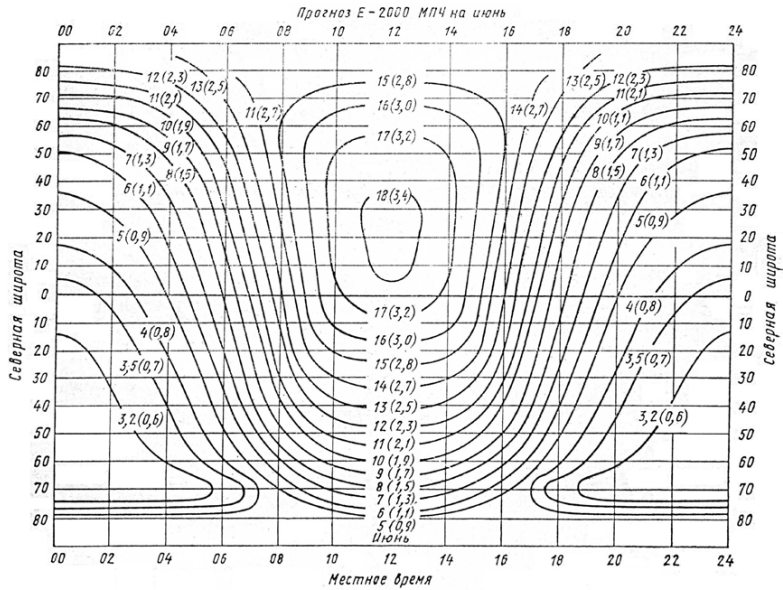


Рис 8. Ионосферная карта для области E на июнь

n – число отражений (скачков) от ионосферы;

P_u – полезная излучаемая мощность, кВт;

Величина $P_u = \frac{P_{\text{подв}} G_1}{4}$,

где $P_{\text{подв}}$ – мощность, подводимая к передающей антенне;

G_1 – коэффициент усиления антенны.

Множитель $\frac{1+|K_0|}{2}$ учитывает влияние волны, отраженной от Земли в месте расположения приемной антенны, а множитель $|K_0|^{n-1}$ – потери при отражении от земли при многоскачковом распространении. Рекомендуемое для расчетов значение $|K_0| = 0,8$.

Поэтому с учетом рекомендуемого значения $|K_0| = 0,8$ и числа скачков $n = 1$ формула для E_0 примет вид

$$E_0 = \frac{173 \sqrt{P_{\text{подв}} G_1}}{2r_0} \cdot 0,9.$$

Воспользовавшись теоремой Пифагора, находим дальность связи r_0 по лучу

$$r_0 \approx 2 \cdot \sqrt{h_d^2 + \frac{D}{4}}.$$

Для $D = 100$ км, получаем $r_0 \approx 241,6$ км.

Значение $P_{\text{подв}}$ определяется произведением $P_{\text{вых}}$ и коэффициента η полезного действия фидерного тракта, который лежит в пределах $\eta = 0,6 \dots 0,9$. Примем $\eta = 0,6$.

Подставляя значения r_0 , η , $P_{\text{вых}}$ и G_1 в формулу для E_0 , получаем

$$E_0 = \frac{173 \sqrt{P_{\text{вых}} \eta G_1}}{2r_0} \cdot 0,9 = \frac{173 \sqrt{0,35 \cdot 0,6 \cdot 4,3}}{2 \cdot 241,6} \cdot 0,9 = 0,308 \frac{\text{мВ}}{\text{м}}.$$

8. Находим медианное значение напряженности поля в точке приема

$$E_M = E_0 E^{-\Gamma} = 0,308 e^{-1,37} \approx 77 \frac{\text{мкВ}}{\text{м}}$$

или в дБ по отношению к $1 \frac{\text{мкВ}}{\text{м}}$,

$$E_M = 37,7 \text{ дБ}.$$

9. Зная медианное значение поля в точке приема E_M и уровень помех в точке приема E_{Π} , находят наблюдаемое отношение сигнал/помеха H на входе приемника в дБ

$$H = E_M - E_{\Pi}.$$

Величину E_{Π} при точных расчетах определяют экспериментально. При ориентировочных оценках можно воспользоваться графиками зависимостей $E_{\Pi} = \Psi(f_p)$, приведенными, например, в [6,7]. В рассматриваемом нами случае прием осуществляется в дневное время вдали от промышленных помех и

согласно [6,7] значения E_{II} находятся в пределах $-40 \dots -60$ дБ. Для дальнейших расчетов принимаем $E_{II} = -40$ дБ (по отношению к 1 мкВ/м). Отсюда

$$N = 37,7 - (-40) = 77,7 \text{ дБ.}$$

10. По графикам зависимости $J = \Psi(H_3)$ находим, что требуемое защитное отношение H_3 , обеспечивающее $J_d = 97\%$, составляет 50 дБ (кривая 1 на рис. 9).

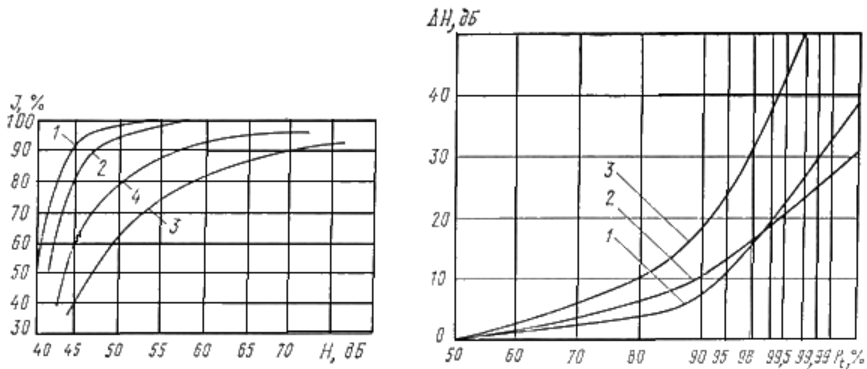


Рис. 9. Зависимости разборчивости речи от необходимого отношения сигнал/помеха на входе приемника: 1, 2 - передача осмысленных фраз с и без компрессора; 3, 4 - передача несвязного текста с и без компрессора

Рис. 10. Графики для определения надежности:

- 1- быстрые релейские замирания;
- 2- медленные замирания;
- 3- суммарный график

11. Определяем

$$\Delta H = N - H_3 = 77,7 - 50 = 27,7 \text{ дБ}$$

и из графиков рис. 10 $\Delta H = \Psi(p_t)$ находим надежность связи $p_t = 97\%$, что лучше заданной.

4.3.2. Канал МВ

Приведем методику расчета достоверности связи и проиллюстрируем ее конкретным примером.

Примем для расчета такие исходные данные:

- мощность передатчика $P_1 = 200$ Вт;
- высоты подъема антенн абонентов $h_1 = 30$ м, $h_2 = 4$ м;
- коэффициенты усиления передающей и приемной антенн $G_1 = 0$ дБ, $G_2 = 3$ дБ;

дБ;

- коэффициенты передачи антенных фидеров передатчика и приемника $\eta_1 = 2$ дБ, $\eta_2 = 1$ дБ;
- частота $f = 120$ МГц;
- индекс рефракции $N_s = 350$;
- уровень внутренних шумов приемника $E_{ш} = -10$ дБ;
- надежность связи $p_t = 95\%$;
- дальность связи $D = D_r$.

Необходимо определить достоверность связи J на дальности D_r .

Методика расчета включает следующие пункты.

1. Дальность радиогоризонта равна

$$D_r = 4,12(\sqrt{h_1 + h_2}) = 4,12 \cdot (\sqrt{30} + \sqrt{4}) = 30,8 \text{ км.}$$

2. Учитываются три вида напряженности поля: поле свободного пространства $E_{св}$, поле в области дифракции E_d и ослабление ΔL поля тропосферного рассеяния $E_{тр}$ по сравнению с $E_{св}$. Основные расчетные соотношения и иллюстрирующие их графики даны для следующих условий: эффективная мощность излучения полуволнового диполя без потерь – $P_1 = 1$ кВт, модуль коэффициента отражения – единица, поверхность Земли – гладкая, сферическая, закон распределения замираний – Накагами-Райса, атмосфера – стандартная, относительный нулевой уровень напряженности поля – 1 мкВ/м, надежность связи $p_t = 95\%$.

Для перечисленных условий

$$E_{св} = 106,6 - 20 \lg D_r = 106,6 - 20 \lg 30,8 \approx 77 \text{ дБ,}$$

где $E_{св}$ – напряженность поля в дБ по отношению к 1 мкВ/м;

D_r – расстояние между антеннами абонентов, км.

3. Находим поправку ΔP по заданной мощности $P_1 = 200$ Вт

$$\Delta P = 10 \lg \frac{P_1}{P_1} = 10 \lg \frac{1000}{200} \approx 7 \text{ дБ.}$$

4. Напряженность поля в точке приема

$$E_c = E_{св} - \Delta P = 77 - 7 = 70 \text{ дБ.}$$

5. Вносим поправки на G_1 , G_2 , η_1 , η_2 и определяем E_c на входе приемника

$$E_{с.вх.} = E_c + G_1' + G_2 + \eta_1 + \eta_2 = 70 + 0 + 3 - 2 - 1 = 70 \text{ дБ.}$$

6. Находим отношение сигнал/шум на входе приемника

$$H = E_{с.вх.} - E_{ш} = 70 - (-10) = 80 \text{ дБ.}$$

7. По графикам (кривая 1) на рис.9 устанавливаем, что $J \approx 100\%$.

8. Строим зависимость напряженности поля E_c от расстояния r .

На расстояниях в пределах радиогоризонта (от точки 1, см. рис.11) E_c определяется равенством $E_{св} = 106,6 - 20 \lg D$ (см. п. 2). Сразу за радиогоризонтом от точки 1 до точки 4 поле определяется дифракционными потерями, градиент

которых составляет 0,81 дБ/км. После точки 4 проявляется действие тропосферного рассеяния, и линия потерь имеет крутизну наклона, как следует из уравнения

$$\Delta L = E_{cv} - E_{mp} = 20,4 \cdot 10 \lg f - \frac{N_s - 310}{5} + 10\theta,$$

равную 0,1 дБ/км.

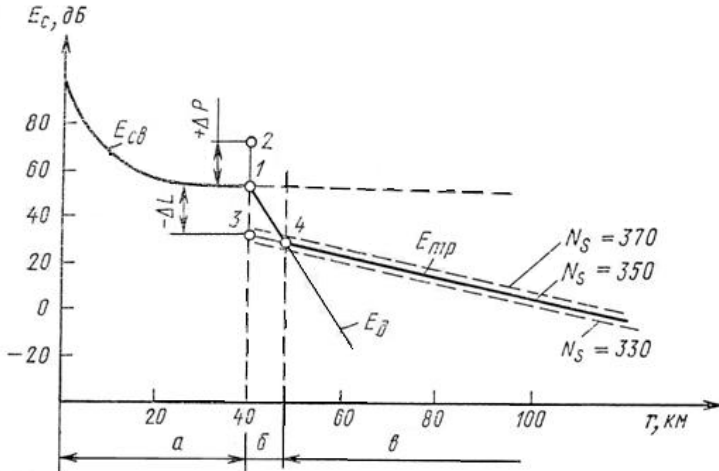


Рис. 11. Зависимость напряженности МВ поля сигнала от расстояния:

a – область E_{cv} ; $б$ – область E_d ; $в$ – область $\Delta L_{тр}$

Последнее уравнение определяет превышение поля свободного пространства над полем тропосферного рассеяния (в дБ), в него входят: f – частота в МГц; N_s – индекс рефракции; θ – угол тропосферного рассеяния.

Величина

$$\theta = \frac{171D_3}{4a},$$

где a – радиус Земли ($a = 6370$ км);

D_3 – эквивалентное расстояние.

Смысл D_3 ясен из рис.12.

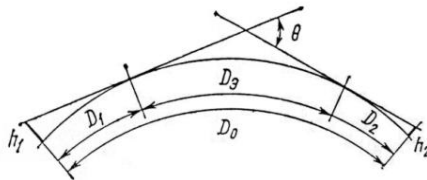


Рис. 12. К определению эквивалентного расстояния

$$D_3 = D - D_r = D - 4,12(\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}).$$

Начальная точка (точка 3) определяется уравнением для ΔL при $D_3 = 0$ и зависит от f и N_s . Например, если $f=120$ МГц, а $N_s=350$, то $\Delta L = +33$ дБ. На той же частоте для $N_s = 370$ значение $\Delta L = 29$ дБ, для $N_s = 390$ - $\Delta L = 25$ дБ и т.д. по ± 2 дБ на каждые ± 10 единиц N_s (пунктирные линии, см. рис. 11). Если мощность, излучаемая передающей антенной, не равна 1 кВт, то ее значение пересчитывается в дБ по отношению к 1 кВт и точка 1 на рис.11 смещается (в точку 2) на полученное число дБ вверх (вниз), если мощность больше (меньше) 1 кВт (см. п.3 и п.4).

ЛИТЕРАТУРА

1. Григорьев А.Д. Электродинамика и техника СВЧ.-М.: Высшая школа, 1990.-335с.
2. Яманов Д.Н. Электродинамика и распространение радиоволн: Часть 1. Основы электродинамики: Тексты лекций. -М.: МГТУ ГА, 2009.-76с.
3. Яманов Д.Н. Электродинамика и распространение радиоволн. Часть 2. Основы электродинамики: Тексты лекций. -М.: МГТУ ГА, 2011.-77с.
4. Фальковский О.И. Техническая электродинамика.-М.: Связь, 1978.-432с.
5. Баскаков С.И. Электродинамика и распространение радиоволн.-М.: Высшая школа, 1992.-416 с.
6. Калинин А.И., Черенкова Е.Л. Распространение радиоволн и работа радиолиний. –М.: Связь, 1971. -336 с.
7. Яманов Д.Н., Основы электродинамики и распространение радиоволн. Часть 3. Распространение радиоволн: Тексты лекций. –М.: МГТУ ГА, 2006. -88 с.

СОДЕРЖАНИЕ

Вводные указания к выполнению домашних заданий	3
Задача 1. Плоские электромагнитные волны	6
Задача 2. Линии передачи высокочастотного диапазона.....	9
Задача 3. Объемные резонаторы	17
Задача 4. Каналы радиосвязи	21
Литература	30
Приложения	31

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение 1

Значение функции Бесселя 1-го рода нулевого порядка $J_0(x)$ и первого порядка $J_1(x)$ для аргументов от $x = 1,6$ до $x = 4,05$

Таблица П.1

x	$J_0(x)$	$J_1(x) = -J'_0(x)$	x	$J_0(x)$	$J_1(x) = -J'_0(x)$
1,60	0,455	0,570	2,85	-0,205	0,393
1,65	0,427	0,574	2,90	-0,224	0,375
1,70	0,398	0,578	2,95	-0,242	0,357
1,75	0,369	0,580	3,00	-0,260	0,339
1,80	0,340	0,581	3,05	-0,276	0,320
1,85	0,311	0,582	3,10	-0,292	0,301
1,90	0,282	0,581	3,15	-0,306	0,281
1,95	0,253	0,579	3,20	-0,320	0,261
2,00	0,224	0,577	3,25	-0,333	0,241
2,05	0,195	0,573	3,30	-0,344	0,221
2,10	0,166	0,568	3,35	-0,355	0,200
2,15	0,138	0,563	3,40	-0,364	0,179
2,20	0,110	0,556	3,45	-0,373	0,158
2,25	0,083	0,548	3,50	-0,380	0,137
2,30	0,055	0,540	3,55	-0,386	0,116
2,35	0,029	0,530	3,60	-0,392	0,095
2,40	0,002	0,520	3,65	-0,396	0,074
2,45	-0,023	0,509	3,70	-0,399	0,054
2,50	-0,048	0,497	3,75	-0,401	0,033
2,55	-0,073	0,483	3,80	-0,403	0,013
2,60	-0,097	0,471	3,85	-0,403	-0,007
2,65	-0,120	0,457	3,90	-0,402	-0,027
2,70	-0,142	0,442	3,95	-0,401	-0,047
2,75	-0,164	0,426	4,00	-0,397	-0,066
2,80	-0, 5	0,410	4,05	-0,393	-0,085

**МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ**

Кафедра ТЭ РЭО ВТ

ДОМАШНЕЕ ЗАДАНИЕ № __

по дисциплине
**ЭЛЕКТРОДИНАМИКА И РРВ
(АНТЕННЫ И РРВ)**

Выполнил: студент _ курса
факультета _____
группы _____
Иванов И.И.
шифр _____

Москва – 20__