

**ЭЛЕКТРОНИКА**

УДК 621.317.846

**ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ  
ПРИ ПРОВЕДЕНИИ АНТЕННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ**

Ю.Е. ГУРЛО, А.Я. БЕЛЬСКИЙ, А.В. ГУСИНСКИЙ, А.М. КОСТРИКИН

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
П. Бровки, 6, Минск, 220013, Беларусь**Поступила в редакцию 4 июля 2006*

Приведены меры по ослаблению мощности во время измерения плотности потока мощности при антенных измерениях, которые необходимо учитывать при оценке мощности опасного излучения. Представлена остронаправленная антенна с диэлектрической линзой в диапазоне 25,86–37,5 ГГц с узкой диаграммой направленности, которая позволяет значительно уменьшить плотность потока мощности боковых лепестков.

*Ключевые слова:* электромагнитная безопасность, плотности потока мощности, остронаправленная антенна с диэлектрической линзой.

**Введение**

При проведении антенных измерений большая часть энергии электромагнитного поля направлена вдоль основного лепестка диаграммы направленности, однако некоторая часть рассеивается в окружающем пространстве.

Электромагнитные поля (ЭМП) невидимы и действие их не обнаруживается органами чувств, что нередко порождает пренебрежительное отношение работающих к опасности электромагнитного облучения, недооценку его вредного воздействия на организм. Электромагнитное поле обладает определенной энергией и распространяется в виде электромагнитных волн.

Источниками СВЧ излучений являются генераторы качающейся частоты, гетеродины радиоприемных устройств, СВЧ-датчики различного назначения, устройства мобильной связи, РЛС и ряд других.

При проведении антенных измерений существует зона облучения, в окрестности которой необходимо знать уровень электромагнитного излучения с целью обеспечения безопасных условий работы.

**Теоретический анализ**

При воздействии ЭМП на организм человека на высоких частотах в диапазоне УВЧ и СВЧ с длиной волны сравнимы размеры тела и толщины слоев тканей. В тканях становятся существенными и даже преобладающими диэлектрические потери, заметными оказываются и различия в свойствах тканей — тело уже нельзя считать однородным. Кроме того, необходимо учитывать отражение энергии поля поверхностью тела. В таком случае поглощенная энергия вычисляется по формуле

$$P_{\text{пог}} = P_0(1-\rho)e^{-2k''r}, \quad (1)$$

где  $P_0 = I_0 S_{\text{эф}}$  — падающая на тело энергия;  $\rho$  — коэффициент отражения от границы воздух–кожа;  $S_{\text{эф}}$  — эффективная поверхность тела;  $k''$  — коэффициент затухания.

Эффективная поверхность тела человека является функцией частоты поля и может существенно отличаться от площади проекции тела человека на плоскость, нормальную падающей волне.

Вычисления по формуле (1) весьма затруднительны, так как: во-первых, поверхность тела человека не является плоской, а представляет собой сочетание различных криволинейных поверхностей, поэтому отражение от различных ее точек неодинаково; во-вторых, в многослойной структуре тела человека с различными толщинами слоев тканей в разных его местах происходят многократные отражения и преломления энергии прошедшей волны, она ослабляется и поглощается в них неодинаково, отсюда неодинаково воздействие на разные ткани.

В табл. 1 приведены расчетные данные о глубинах проникновения радиоволн в некоторые ткани живого организма.

Таблица 1. Глубина проникновения метровых, дециметровых и сантиметровых радиоволн в различные ткани до ослабления в  $e$  раз (в сантиметрах)

Наименование ткани	Длина волны, см							
	300	150	75	30	10	3	1,23	0,9
Кожа	3,765	2,78	2,18	1,638	0,646	0,189	0,0772	
Жир	20,45	12,53	8,52	6,42	2,45	1,1	0,342	
Мышцы	3,454	2,32	1,84	1,456		0,134		
Кровь	2,86	2,15	1,787	1,40	0,78	0,148	0,0598	0,0272
Хрусталик глаза	9,42	4,39	4,23	2,915	0,50	0,174	0,0706	0,0378
Стекловидное тело глаза	2,17	1,69	1,41	1,23	0,535	0,195	0,045	0,0315
Головной мозг	3,56	4,132	2,072	1,933	0,476	0,168	0,075	0,0378
Костный мозг	22,9	20,66	18,73	11,9	9,924	0,34	0,145	0,0730

Фактически поглощенная телом энергия поля может существенно отличаться от вычисленной по формуле (1) вследствие того, что подкожный жировой слой может играть роль четвертьволнового трансформатора, согласующего волновые сопротивления воздуха и мышечной ткани, граничащей с жировым слоем. При этом доля проходящей в тело энергии может значительно возрасти. Этот эффект зависит от толщины жирового слоя, толщины слоя кожи и частоты поля.

Тепловая энергия, возникающая в тканях тела человека, увеличивает общее тепловыделение тела. Если при этом механизм терморегуляции тела способен путем рассеяния избыточного тепла предупреждать перегревание тела, то его температура остается нормальной. В противном случае возможно повышение температуры тела. В то же время известно, что перегревание тела отрицательно отражается на организме человека, а повышение его температуры на 1°С и выше недопустимо. В табл. 2 указаны минимальные интенсивности излучений разных частот, вызывающие тепловой эффект.

Как видно из табл. 2, пороговые интенсивности излучения уменьшаются с повышением частоты, так как коэффициент поглощения электромагнитной энергии пропорционален частоте, а также удельной проводимости и диэлектрической проницаемости среды, которые у живых тканей в свою очередь являются функциями частоты.

Некоторые органы и ткани тела человека, обладающие слабо выраженным механизмом терморегуляции, более чувствительны к облучению, чем другие ткани и органы (мозг, глаза, почки и т.д.) и предельно допустимые уровни ЭПП для них составляют 5 мкВт/см<sup>2</sup> при постоянном облучении, которые обеспечиваются при малом удалении от излучателей, значительной мощности генератора или узкой направленности излучения.

Таблица 2. Пороговые интенсивности электромагнитных полей для тепловых эффектов в тканях живых организмов

Частота (длина волны)	Пороговая интенсивность
500 кГц	8000 В/м; 160 А/м (17 Вт/см <sup>2</sup> )
14,83 МГц	2500 В/м (1,7 Вт/см <sup>2</sup> )
69,7 МГц	200 В/м (11 мВт/см <sup>2</sup> )
300–3000 МГц (дециметровые волны)	40 мВт/см <sup>2</sup> (380 В/м)
3 ГГц (10-сантиметровые волны)	10 мВт/см <sup>2</sup> (190 В/м)
10 ГГц (3-сантиметровые волны)	5–10 Вт/см <sup>2</sup> (135–190 В/м)
30–300 ГГц (миллиметровые волны)	7 мВт/см <sup>2</sup> (170 В/м)

Однако исследования показали, что влияние электромагнитных полей высоких и особенно сверхвысоких частот на живой организм обнаруживается и при интенсивностях ниже тепловых порогов, т.е. имеет место нетепловое их воздействие. Это является результатом некоторых микропроцессов, протекающих под действием полей. Первый из них состоит в том, что суспензированные частицы тканей, например, эритроциты и лейкоциты крови выстраиваются в цепочки, вытянутые параллельно электрическим силовым линиям, вследствие чего структура и функции тканей изменяются. Второй процесс определяется как поляризация боковых цепей макромолекул тканей и ориентация их параллельно электрическим силовым линиям, что может приводить к разрыву внутри- и межмолекулярных связей, к коагуляции молекул и изменению их свойств. Третий процесс, обусловленный действием сил Лоренца, состоит в том, что положительные и отрицательные ионы в электролитах тканей перемещаются перпендикулярно электрическим силовым линиям, в результате этого нарушаются химический состав и электрическое равновесие тканей. Четвертый процесс — резонансное поглощение энергии поля. Отмечено, что нетепловое действие проявляется при весьма незначительных интенсивностях облучения и с возрастанием их не увеличивается.

Электромагнитная энергия СВЧ диапазона обладает выраженным биологическим действием. При систематическом действии на организм человека уровней электромагнитной энергии (ЭМЭ), превышающих предельно допустимый уровень (ПДУ), вначале возникают компенсаторно-приспособительные реакции, являющиеся общими неспецифическими реакциями организма. Затем, при продолжении облучения, могут развиваться патологические изменения, носящие обратимый характер. И только в редких случаях, если облучение продолжалось в течение многих лет, возникают необратимые изменения со стороны нервной, сердечно-сосудистой и эндокринной систем [1].

Сверхвысококачественная энергия, падающая на поверхность тела человека, частично отражается, а поглощенная энергия проникает в поверхностные ткани до глубины 2–3 см. Степень отражения волн от поверхности тела человека зависит от толщины жирового слоя в облучаемом участке. Такие органы, как головной мозг и спинной, имеют незначительный жировой слой, а глаза — совсем его не имеют, следовательно, эти органы подвергаются в первую очередь наибольшему воздействию.

Длительное и систематическое воздействие СВЧ-энергии на работающих с интенсивностью, превышающей предельно допустимые величины, приводит к функциональным изменениям в организме. Эти изменения проявляются в нарушении функционального состояния нервной и сердечно-сосудистой системы: появляется головная боль, нарушается сон, повышается раздражительность, замедляется пульс, повышается кровяное давление и ряд других симптомов, при облучении глаз возможна катаракта (помутнение хрусталика глаза).

Функциональные нарушения в ранней стадии, вызванные биологическим действием электромагнитных полей, способны накапливаться в организме, но являются обратимыми, если исключить воздействие излучения или улучшить условия труда.

Таким образом, на основе результатов исследований воздействия электромагнитных полей радиочастот выявлена степень опасности полей различных диапазонов частот, установлена количественная связь этого взаимодействия с такими параметрами полей, как напряженность или плотность потока мощности, а также длительность облучения.

## Методика измерения плотности потока мощности (ППМ)

В соответствии с частотой измеряемого поля и предполагаемой максимальной плотностью потока мощности на месте измерения выбираются необходимая антенна, термисторная головка и аттенюаторы, из которых собирается высокочастотная головка. Она закрепляется в поворотном устройстве и вместе с ним монтируется на треноге.

Включается измерительная аппаратура. Для того чтобы выявить наиболее опасные значения плотности потока мощности [1] и согласно этому принимать меры защиты, измерения нужно производить при максимальной рабочей мощности излучения установки. В том же случае, когда включение установки на максимальную мощность может привести к переобучению людей, производящих измерения, эти измерения нужно производить при уменьшенной в необходимое число раз мощности с последующим умножением измеряемой ППМ на это число. Во всех случаях антенна измерителя мощности должна размещаться от передающей антенны на расстоянии  $r_{II}$ , определяется по формуле

$$r_{II} \geq 0,3\sqrt{PG_{II}}, \quad (2)$$

где  $P$  — средняя по времени мощность передатчика, Вт;  $G_{II}$  — коэффициент усиления передающей антенны в данном направлении (в относительных единицах).

На таком расстоянии от передающей антенны ППМ не превышает 100 мкВт/см<sup>2</sup> (предельно допустимая ППМ при работе с излучением до 2 ч за рабочий день).

Формула справедлива только при условии

$$r_{II} > D^2 / \lambda, \quad (3)$$

где  $D$  — максимальный размер раскрытия антенны.

С помощью поворотного устройства антенна прибора ориентируется на максимум излучения, о чем свидетельствует максимальное отклонение от начального положения стрелки нуль-индикатор. Если в пространстве, где ведется излучение, нельзя поместить треногу, высокочастотная головка используется без поворотного устройства и треноги, и ее ориентация производится от руки.

Зашкаливание нуль-индикатор при грубом разбалансе свидетельствует о недопустимой перегрузке термистора. В этом случае дезориентацией приемной антенны или уменьшением мощности излучения снижается уровень измеряемой мощности, либо выключается излучающая аппаратура, отключается или закрывается заглушкой приемная антенна. Затем при выключенной излучающей аппаратуре принимаются меры по ослаблению мощности, поступающей на термистор, путем включения в фидерную линию аттенюаторов или замены антенны прибора антенной с меньшей действующей площадью. После этого вновь производится настройка на максимум излучения.

Если передающая антенна в процессе работы может излучать в различных направлениях, то измерения производятся при ее положении, создающем максимум потока мощности в месте измерения.

Плотность потока мощности определяется по формуле

$$I = \frac{(P_1 + P_2)n}{\eta S_d}, \quad (4)$$

где  $I$  — искомая плотность потока мощности, мкВт/см<sup>2</sup>;  $P_1$  и  $P_2$  — мощности, определенные при измерениях в  $E$  и  $H$  плоскости соответственно, мкВт;  $S_d$  — действующая площадь антенны прибора, см<sup>2</sup>;  $\eta$  — к.п.д. термисторной головки прибора;  $n$  — число, показывающее, во сколько раз мощность установки стала меньше ее максимальной рабочей мощности после соответствующего его уменьшения или применения аттенюатора.

Если в помещении работают несколько установок, создающих потоки излучения разных длин волн, то измерения производятся на каждой длине волны и общая интенсивность излучения определяется как арифметическая сумма.

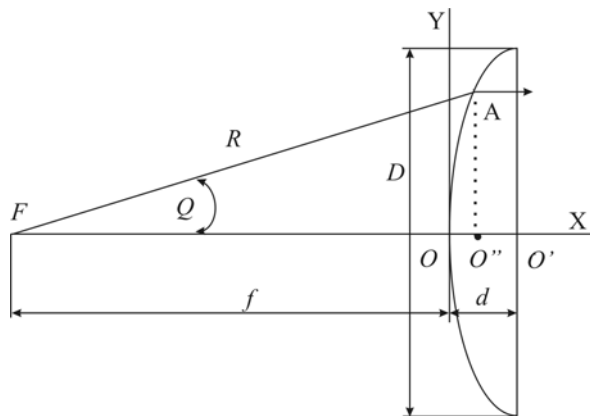


Рис. 1. Схематическое изображение рупорной антенны с диэлектрической линзой

При измерении ППМ с помощью термисторной головки можно зарегистрировать достаточно высокий его уровень, близкий либо ненамного ниже предельного.

Для регистрации очень низких уровней ППМ необходимо использовать более высокочувствительные приборы: либо измерительный приемник или высокочувствительный анализатор спектра. Методика выполнения антенных измерений мощности излучения промышленных радиопомех с использованием анализатора спектра разработана в испытательной лаборатории аппаратуры и устройств СВЧ БГУИР, ее основные положения приведены в работе [4].

На электромагнитную безопасность влияют также и параметры антенны. В этой же лаборатории была разработана и испытана остронаправленная антенна с диэлектрической линзой в диапазоне 25,86–37,5 ГГц (рис. 1), параметры которой приведены ниже.

Максимальная толщина линзы определяется из выражения:

$$d = \sqrt{\frac{f^2}{(n+1)^2} + \frac{D^2}{4(n^2-1)}} - \frac{f}{n+1}, \quad (5)$$

где  $f$  — фокусное расстояние;  $D$  — диаметр линзы;  $n$  — относительный коэффициент преломления.

Длина конического рупора  $R$  должна удовлетворять условию:

$$R \geq D_p^2 / 2,4 \lambda - 0,15 \lambda, \quad (6)$$

где  $\lambda$  — длина волны источника колебаний.

Для конического рупора максимальный КНД:

$$D_0 = 5,1 (D_p / \lambda)^2, \quad (7)$$

где  $D_p$  — диаметр раскрытия рупора.

Максимальный угол раскрытия  $Q_0$  (рис. 1) определяется условием:

$$\operatorname{tg}(\theta_0 / 2) = 2(n-1)d / D. \quad (8)$$

Радиус-вектор, описывающий профиль:

$$R(\theta) = f + d - d(\theta). \quad (9)$$

Минимальное расстояние от фокуса до центра линзы:

$$f = \frac{D^2}{8d(n-1)} - \frac{d(n+1)}{2}. \quad (10)$$

По приведенным выражениям рассчитан профиль рупорной антенны с диэлектрической линзой.

### Экспериментальная часть

Испытания антенны в  $E$  и  $H$  плоскостях на частотах 25, 30 и 37 ГГц показали, что антенна имеет более узкую диаграмму направленности, чем другие антенны этого же

диапазона. Такая диаграмма уменьшает зону опасного излучения. На рис. 2 и 3 представлены диаграммы направленности в *E*- и *H*-плоскостях.

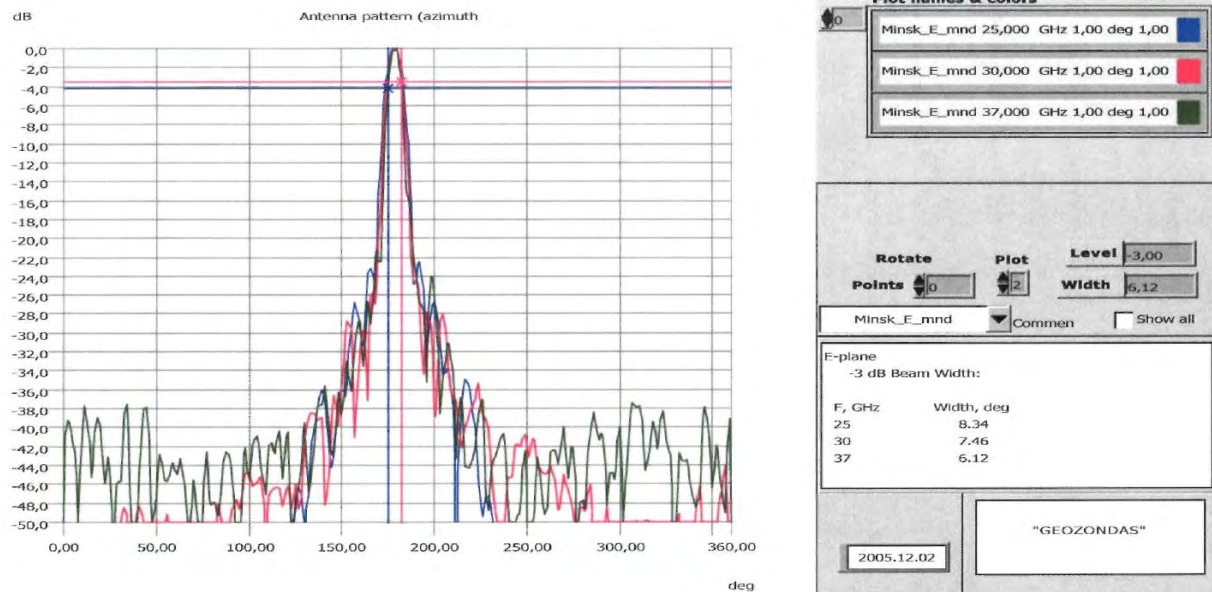


Рис. 2. Диаграмма направленности антенны в *E*-плоскости

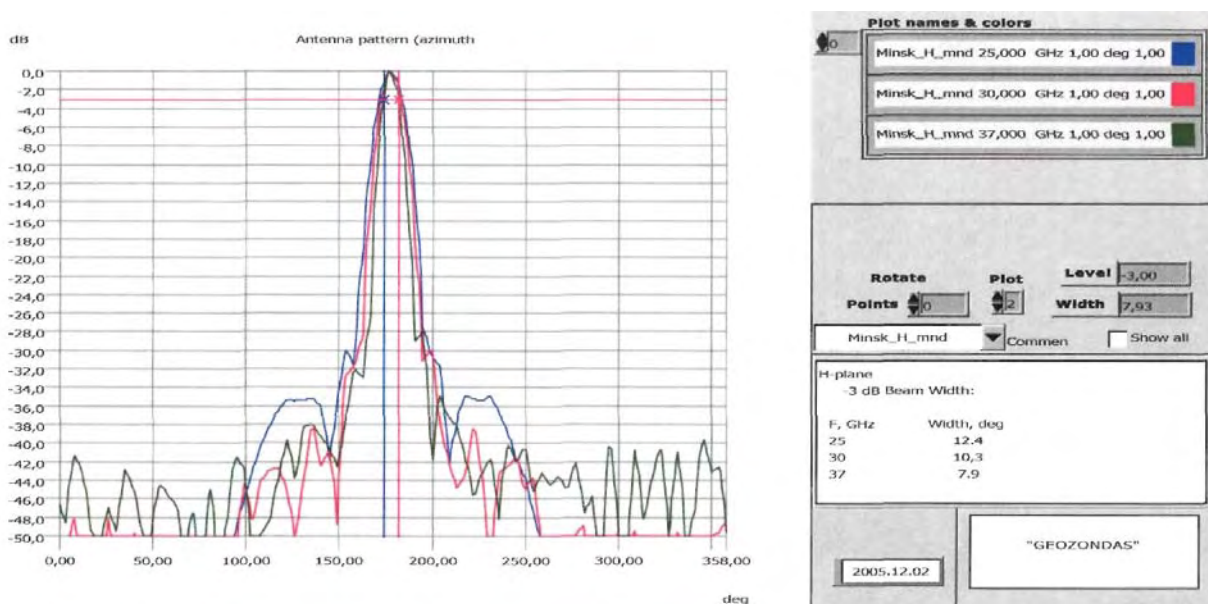


Рис. 3. Диаграмма направленности антенны в *H*-плоскости

### Заключение

1. В статье приведены меры по ослаблению мощности во время измерения плотности потока мощности при антенных измерениях, которые необходимо учитывать при оценке мощности опасного излучения.

2. Разработана и представлена остронаправленная антенна с диэлектрической линзой в диапазоне 25,86–37,5 ГГц с узкой диаграммой направленности, которая позволяет значительно уменьшить плотность потока мощности боковых лепестков.

# ECOLOGICAL SAFETY AT CARRYING OUT ANTENNA MEASUREMENTS

Y.E. HURLO, A.Y. BELSKY, A.V. GUSINSKIY, A.M. KOSTRIKIN

## Abstract

The measures are presented on a power attenuation during measurement of power flux density at the antenna measurements which are necessary for considering at an estimation of a radiated power. The beam(ca) antenna is presented with the dielectric lens over the range 25,86–37,5 GHz with a narrow directional diagram which allows to reduce power flux density side lobe considerably.

## Литература

1. Пресман А.С. Электромагнитные поля и живая природа. М, 1968.
2. Олешкевич Л.А., Бондаренко Л.М., Соколов С.М. и др. Электромагнитные поля радиоволн: Учеб.-метод. разработка для студентов. Минск, 1993.
3. Мелехов М.Е., Иващенко П.А. Проверка средств измерений напряженности электромагнитного поля: Учеб. пособие. М., 1986.
4. Гурло Ю.Е., Дзисяк А.Б., Бельский А.Я., и др. // 14-я Междунар. Крымская конф. "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии" (КрыМиКо'2004). Материалы конф. (Севастополь, 13–17 сент. 2004 г.). Севастополь, 2004. С. 645–646.