

РЕКОМЕНДАЦИЯ МСЭ-R BS.1698

Оценка полей от наземных радиовещательных передающих систем, работающих в любых полосах частот, для определения воздействия неионизирующего излучения

(Вопрос МСЭ-R 50/6)

(2005)

Сфера применения

Эта Рекомендация намерена обеспечить основы для извлечения и оценки значений электромагнитного излучения от радиовещательной станции, которое происходит на конкретных расстояниях от позиции передатчика. Используя такую информацию, ответственные организации могут затем разработать соответствующие стандарты, которые можно использовать для защиты людей от нежелательного воздействия вредного излучения. Фактические значения, подлежащие использованию в любом регулировании, естественно, будут зависеть от решений, достигнутых ответственными агентствами здравоохранения, национальными и всемирными.

Ассамблея радиосвязи МСЭ,

учитывая,

- a) что радиочастотная энергия может оказывать опасные воздействия на человеческое тело;
- b) что радиочастотная энергия может наводить вредные электрические потенциалы в проводящем материале;
- c) что радиочастотная энергия может иметь вредные воздействия на аппараты (такие, как аппараты радиосвязи, навигационные инструменты, электронные стимуляторы сердца, научное или медицинское оборудование и так далее);
- d) что радиочастотная энергия может приводить к непреднамеренному воспламенению огнеопасного или взрывоопасного материала;
- e) что определение опасных уровней излучения и электрических потенциалов, в понятиях спектрального содержания, интенсивности, совокупных воздействий и так далее, осуществляется компетентными полномочными органами;
- f) что определение областей, где радиочастотные поля и электрические потенциалы превышают безопасные уровни, осуществляется компетентными полномочными органами;
- g) что лица, не связанные с такими системами, могут непреднамеренно подвергаться такому излучению (включая путешественников по воздуху) или таким электрическим потенциалам;
- h) что лицам, эксплуатирующим и обслуживающим радиопередающие системы, может потребоваться работать в непосредственной близости к источнику таких радиочастотных воздействий,

рекомендует,

- 1 что следует использовать Приложение 1 к этой Рекомендации для оценки электромагнитных полей, порождаемых наземными радиовещательными передающими системами, которые работают в любой полосе частот, для определения воздействия неионизирующего излучения.

Приложение 1

Оценка полей от наземных радиовещательных передающих систем, работающих в любых полосах частот, для определения воздействия неионизирующего излучения

СОДЕРЖАНИЕ

		<i>Стр.</i>
1	Введение.....	3
2	Характеристики электромагнитных полей.....	4
2.1	Общие характеристики полей.....	4
2.1.1	Компоненты полей.....	4
2.1.2	Поле в дальней зоне.....	4
2.1.3	Поле в ближней зоне.....	7
2.1.4	Поляризация.....	7
2.1.5	Модуляция.....	7
2.1.6	Образцы помех.....	13
2.2	Уровни напряженности поля вблизи радиовещательных антенн.....	13
2.2.1	Полоса НЧ/СЧ (150-1 605 кГц).....	13
2.2.2	Полоса ВЧ (3-30 МГц).....	13
2.2.3	Полоса ОВЧ/УВЧ (30 МГц-3 ГГц).....	14
2.2.4	Полоса СВЧ (3-30 ГГц).....	14
2.3	Смешанное частотное поле.....	16
2.4	Электромагнитное поле внутри зданий.....	16
3	Вычисление.....	17
3.1	Процедуры.....	17
3.1.1	Закрытые решения.....	17
3.1.2	Численные методы.....	18
4	Измерения.....	20
4.1	Процедуры.....	20
4.1.1	Полосы НЧ/СЧ.....	20
4.1.2	Полосы ВЧ.....	21

Стр.

4.1.3	Полосы ОВЧ/УВЧ	21
4.1.4	Полосы СВЧ.....	21
4.2	Инструменты.....	21
4.2.1	Введение.....	21
4.2.2	Характеристики измерительных инструментов для электрического и магнитного полей	22
4.2.3	Типы и технические требования узкополосных инструментов	23
4.3	Сравнение между предсказаниями и измерениями	24
5	Предосторожности на передающих станциях и вблизи их	24
5.1	Предосторожности при контроле прямых воздействий на здоровье излучения РЧ	24
5.1.1	Меры предосторожности (профессиональных) сотрудников	25
5.1.2	Меры предосторожности в отношении общественности	26
5.2	Предосторожности при контроле косвенных опасностей излучений РЧ	26
	Дополнение 1 к Приложению 1 – Примеры вычисленных напряженностей полей вблизи радиовещательных антенн	27
	Дополнение 2 к Приложению 1 – Сравнение между предсказаниями и измерениями	41
	Дополнение 3 к Приложению 1 – Пределы и уровни	62
	Дополнение 4 к Приложению 1– Дополнительные методы оценивания	71
	Дополнение 5 к Приложению 1 – Электромедицинские устройства	75
	Дополнение 6 к Приложению 1 – Ссылки	76

1 Введение

За многие годы был рассмотрен предмет воздействий электромагнитного излучения, и были сделаны попытки, чтобы измерить конкретные пределы, которые могли бы использоваться для защиты людей от нежелательных воздействий. Исследования во многих странах различными организациями закончились различными административными регламентами. Заслуживающим внимания и понятным является то, что в результате всех усилий в этом отношении не возник единственный стандарт.

Эта Рекомендация намерена обеспечить основы для вывода и оценки значений электромагнитного излучения от радиовещательной станции, которое происходит на конкретных расстояниях от позиции передатчика. Используя такую информацию, ответственные организации могут затем

разработать соответствующие стандарты, которые можно использовать для защиты людей от нежелательного воздействия вредного излучения. Фактические значения, подлежащие использованию в любом регулировании, естественно, будут зависеть от решений, достигнутых ответственными агентствами здравоохранения, как национальными, так и всемирными.

Отмечается, что эта Рекомендация МСЭ-R и Рекомендации МСЭ-T охватывают подобный материал, но с упором на различные аспекты одинакового общего предмета. Например, Рекомендации МСЭ-T К.52 (Руководство по соответствию пределам для воздействия на человека электромагнитных полей) и К.61 (Руководство по измерению и численному предсказанию электромагнитных полей для соответствия с человеческими пределами для установок электросвязи) обеспечивают руководство по соответствию с пределами воздействий для систем электросвязи. Соответствующая ссылочная информация включена в Дополнение 6.

2 Характеристики электромагнитных полей

2.1 Общие характеристики полей

Эта секция дает обзор специальных характеристик электромагнитных полей, которые являются значимыми для этой Рекомендации, особенно, различие между полем в ближней зоне и полем в дальней зоне. Выведены простые уравнения для вычисления плотности мощности и напряженности поля в дальней зоне, и секция заканчивается определением терминов поляризации и образцов помех.

2.1.1 Компоненты полей

Электромагнитное поле, излучаемое из антенны, состоит из разных компонентов электрического и магнитного полей, которые ослабевают с расстоянием, r , от источника. Главными компонентами являются:

- поле в дальней зоне (поле Фраунгофера) (Fraunhofer), также называемое полем излучения, в котором величина полей убывает со скоростью $1/r$;
- излучающее поле в ближней зоне (поле Френеля) (Fresnel), также называемое индуктивным полем. Структура поля для индуктивного поля сильно зависит от формы, размера и типа антенны, хотя различные критерии были установлены и обычно используются для определения этого поведения;
- реактивное поле в ближней зоне (Рэля) (Rayleigh), также называемое квазистатическим полем, которое убывает со скоростью $1/r^3$.

Поскольку индуктивные и квазистатические компоненты быстро ослабевают с увеличивающимся расстоянием от источника излучения, они являются значимыми только вблизи передающей антенны – в так называемой *ближней зоне*.

Поле излучения, с другой стороны, является главным элементом в так называемой дальней зоне. Оно является полем излучения, которое эффективно переносит сигнал радио или телевидения от передатчика к удаленному приемнику.

2.1.2 Поле в дальней зоне

В дальней зоне электромагнитное поле по характеру является преимущественно плоской волной. Это означает, что электрические и магнитные поля находятся в фазе, и что их амплитуды имеют постоянное соотношение. Более того, электрические поля и магнитные поля расположены под прямыми углами друг к другу, располагаясь в плоскости, которая перпендикулярна направлению распространения.

Часто принимается, что условия поля в дальней зоне применяются к расстояниям более $2D^2/\lambda$, где D есть максимальный линейный размер антенны.

Однако необходимо проявлять осторожность при применении этого условия к антеннам радиовещания по следующим причинам:

- оно выведено из соображений, относящихся к плоским антеннам;
- предполагается, что D гораздо больше λ .

Там, где указанные условия не выполняются, для поля в дальней зоне следует использовать расстояние более 10λ .

2.1.2.1 Плотность мощности

Вектор плотности мощности электромагнитного поля, вектор S Пойнтинга (Poynting), дается векторным произведением электрического, E , и магнитного, H , компонентов полей:

$$S = E \times H \quad (1)$$

В поле дальней зоны, в идеальных условиях, где нет значительного влияния земной поверхности или препятствий, это выражение может быть упрощено, поскольку электрические и магнитные поля, а также направление распространения все взаимно ортогональны. Более того, отношение амплитуд напряженностей электрического, E , и магнитного, H , полей является константой, Z_0 , которая известна как характеристический импеданс свободного пространства¹, и составляет порядка 377Ω (или $120\pi \Omega$).

Таким образом, в поле дальней зоны плотность мощности, S , в области свободного распространения дается следующим не векторным уравнением:

$$S = E^2/Z_0 = H^2 Z_0 \quad (2)$$

Плотность мощности – на любом заданном расстоянии в любом направлении – в поле дальней зоны может быть вычислена, используя следующее уравнение:

$$S = P G_i / (4\pi r^2), \quad (3)$$

где:

- S : плотность мощности ($\text{Вт}/\text{м}^2$) в заданном направлении
- P : мощность (Вт), подаваемая к источнику излучения, в предположении системы без потерь
- G_i : коэффициент усиления источника излучения в значимом направлении, относительно изотропного излучателя
- r : расстояние (м) от источника излучения.

Произведение $P G_i$ в уравнении (3) известно как эквивалентная изотропно излучаемая мощность (э.и.м.), представляющая мощность, которую воображаемый изотропный излучатель должен был бы излучать, чтобы в приемной точке производить ту же самую напряженность поля.

Для плотностей мощности в других направлениях должна приниматься во внимание диаграмма направленности антенны.

Для использования уравнения (3) с конструкцией антенны, усиление которой G_a приводится относительно такой эталонной антенны изотропного усиления G_r , как полуволновой симметричный вибратор или короткий несимметричный вибратор, коэффициент усиления G_i должен быть заменен произведением $G_r \cdot G_a$, согласно уравнению (4). Значимый коэффициент G_r приводится в таблице 1.

$$S = P G_r G_a / (4\pi r^2) \quad (4)$$

¹ В общем случае, характеристический импеданс среды дается выражением $z = \sqrt{(\mu/\epsilon)}$, где μ есть магнитная проницаемость ($= 1,2566 \cdot 10^{-6}$ Гн/м в свободном пространстве), а ϵ есть диэлектрическая проницаемость ($= 8,85418 \cdot 10^{-12}$ Ф/м в свободном пространстве).

ТАБЛИЦА 1

Коэффициенты изотропного усиления для различных типов эталонных антенн

Тип эталонной антенны	Коэффициент изотропного усиления, G_r	Типовые приложения, где тип эталонной антенны является значимым
Изотропный излучатель	1,0	Радар, система спутниковой и наземной радиолинии
Полуволновой симметричный вибратор	1,64	Телевидение, радиовещание ОВЧ и иногда ВЧ
Короткий несимметричный вибратор	3,0	Радиовещание НЧ, СЧ и иногда ВЧ

Таким образом, усиление антенны G_d ($G_a = G_d$) выражается относительно усиления полуволнового симметричного вибратора:

$$S = 1,64 PG_d / (4\pi r^2), \quad (5)$$

где:

G_d : усиление антенны относительно полуволнового симметричного вибратора.

Подобным образом, когда усиление антенны $G_a = G_m$ выражается относительно усиления короткого несимметричного вибратора:

$$S = 3,0 PG_m / (4\pi r^2), \quad (6)$$

где:

G_m : усиление антенны относительно короткого несимметричного вибратора.

2.1.2.2 Напряженность поля

Уравнения (2)-(10) предполагают условия плоских волн (поле в дальней зоне) и неприменимы к вычислениям поля в ближней зоне.

Если уравнение (2) вставляется в уравнение (3) для исключения коэффициента S , а вводится коэффициент C , чтобы принимать во внимание характеристику направленности источника излучения, то тогда получается уравнение (7) для напряженности электрического поля (E) в поле дальней зоны источника излучения:

$$E = \sqrt{\frac{Z_0}{4\pi}} \frac{\sqrt{PG_i}}{r} \quad C = \frac{C}{r} \sqrt{30PG_i} \quad (7)$$

где:

E : напряженность электрического поля (В/м)

$Z_0 = 377 \Omega$, характеристический импеданс свободного пространства

P : мощность, подаваемая к источнику излучения (Вт), в предположении системы без потерь

C : коэффициент ($0 \leq C \leq 1$), учитывающий характеристику направленности источника излучения (в главном направлении излучения, $C = 1$).

Если усиление антенны выражается относительно полуволнового симметричного вибратора или короткого несимметричного вибратора, а не относительно изотропного излучателя, тогда коэффициенты G_d или G_m , соответственно, следует использовать вместо G_i , как показано в уравнениях (8) и (9).

$$E = \sqrt{\frac{Z_0}{4\pi}} \frac{\sqrt{1,64PG_d}}{r} \quad C = \frac{C}{r} \sqrt{49,2PG_d} \quad (8)$$

$$E = \sqrt{\frac{Z_0}{4\pi}} \frac{\sqrt{3PG_m}}{r} \quad C = \frac{C}{r} \sqrt{90PG_m} \quad (9)$$

Для вычисления напряженности магнитного поля в поле дальней зоны источника излучения используется уравнение (10):

$$H = E/Z_0, \quad (10)$$

где:

E : напряженность электрического поля (В/м)

H : напряженность магнитного поля (А/м)

$Z_0 = 377 \Omega (120\pi)$, характеристический импеданс свободного пространства.

2.1.3 Поле в ближней зоне

Структура поля в ближней зоне является более сложной, чем структура, описанная выше для поля в дальней зоне. В поле ближней зоны имеется произвольная фазовая и амплитудная взаимосвязь между векторами электрической и магнитной напряженностей полей, а напряженности полей значительным образом меняются от точки к точке. Следовательно, при определении природы поля ближней зоны должны вычисляться или измеряться как фаза, так и амплитуда, и электрического, и магнитного полей. На практике, однако, может оказаться, что достигнуть этого очень трудно.

2.1.3.1 Плотность мощности и напряженность поля

Нелегко определять вектор Пойнтинга в поле ближней зоны из-за произвольной взаимосвязи фазы и амплитуды, упомянутой выше. Амплитуды E и H , вместе с их фазовой взаимосвязью должны измеряться или вычисляться отдельно в каждой точке, что делает задачу особенно сложной и отнимающей много времени.

При использовании аналитических формул оценка напряженности поля в ближней зоне является выполнимой только для таких простых идеальных излучателей, как элементарный симметричный вибратор (диполь).

В случае более сложных антенных систем для оценки уровней напряженностей полей в ближней зоне должны использоваться другие математические методы. Эти другие методы позволяют иметь достаточно точные оценки напряженности поля, плотности мощности и других значимых характеристик поля, даже в сложной ближней зоне.

Измерение в поле ближней зоны является даже более трудным, поскольку не существует эталонного метода калибровки. Международная электротехническая комиссия в настоящее время работает над изданием стандарта по измерению для электромагнитных полей высокой частоты (от 9 кГц до 300 ГГц), особенно, в поле ближней зоны [1]. В дополнение, больше информации по этому аспекту дает документ EN 61566 (Измерения воздействия напряженности радиочастотного электромагнитного поля в диапазоне частот 1 кГц–1 ГГц – подраздел 6.1.4).

2.1.4 Поляризация

Поляризация определяется как направление вектора электрического поля, относящееся к направлению распространения фронта волны.

В радиовещании используются различные типы поляризации. Главными типами являются вертикальная поляризация и горизонтальная поляризация (по отношению к фронту волны, которая распространяется параллельно поверхности Земли), хотя используются также другие типы поляризации, как наклонная и эллиптическая.

2.1.5 Модуляция

Модуляция является самой особенной характеристикой излучения из радиовещательного передатчика. Поскольку определенные воздействия электромагнитного излучения чувствительны к типу используемой модуляции, отсюда следует, что при осуществлении оценок безопасности присутствие модуляции должно приниматься во внимание. Модуляция также должна приниматься во внимание при выполнении измерений или вычислений, чтобы определить, превышаются ли пределы или нет.

Модуляция часто приводит к сигналу, изменяющемуся как по амплитуде, так и по частоте. По этой причине в определении значений, подлежащих использованию в измерении и вычислении, обычно требуется усреднение по времени. Это требование также признается в значимых Стандартах.

2.1.5.1 Характеристики радиоизлучения

Регламент радиосвязи (РР) классифицирует излучения от радиопередатчиков согласно требуемой ширине полосы частот, а также основным и дополнительным характеристикам передачи. Полная классификация состоит из девяти знаков следующим образом:

- Знаки 1–4 описывают ширину полосы частот, используя три цифры и одну букву;
- Знаки 5–7 описывают основные характеристики, используя две буквы и одну цифру;
- Знаки 8–9 описывают любые дополнительные характеристики, используя две буквы.

К рассмотрению соображений по безопасности РЧ значимыми являются только три основные характеристики. Ими являются:

- тип модуляции главной несущей частоты Знак 5
- характер сигнала (сигналов), который модулирует (модулируют) главную несущую частоту Знак 6
- тип информации для передачи Знак 7

Таблица 2, которая основана на информации, приведенной в РР, перечисляет различные знаки, которые используются для классификации трех основных характеристик радиоизлучения. Для звукового и телевизионного радиовещания значимыми знаками являются следующие:

- Радио АМ (НЧ, СЧ и ВЧ с двумя боковыми полосами) А3Е
- Радио АМ (ВЧ с одной боковой полосой, сниженная/переменная несущая частота R3Е
- Радио АМ (ВЧ с одной боковой полосой, подавленная несущая частота) J3Е
- Телевизионные изображения С3F
- Звук телевидения F3Е или А3Е
- Радио ЧМ F3Е или F9Е
- Цифровое телевизионное радиовещание (ЦТР) G7F
- Цифровое звуковое радиовещание (ЦЗР) G7Е

ТАБЛИЦА 2

Знаки, используемые для определения класса излучения, на основе информации, приведенной в РР

Знак 5 Тип модуляции главной несущей частоты		Знак 6 Характер сигнала (сигналов), модулирующего главную несущую частоту		Знак 7 Тип информации для передачи	
N	Не модулированный	0	Нет модулирующего сигнала	N	Нет передаваемой информации
A	Амплитудная модуляция: две боковые полосы	1	Один канал, содержащий: квантованную или цифровую информацию, без использования модулированной поднесущей частоты	A	Телеграфия для слухового приема
H	Амплитудная модуляция: одна боковая полоса, полная несущая частота	2	Один канал, содержащий квантованную или цифровую информацию, с использованием модулированной поднесущей частоты	B	Телеграфия для слухового приема

ТАБЛИЦА 2

Знаки, используемые для определения класса излучения, на основе информации, приведенной в РР

Знак 5 Тип модуляции главной несущей частоты		Знак 6 Характер сигнала (сигналов), модулирующего главную несущую частоту		Знак 7 Тип информации для передачи	
R	Амплитудная модуляция: одна боковая полоса, сниженная или с переменным уровнем несущей частоты	3	Один канал, содержащий аналоговую информацию	C	Факсимиле
J	Амплитудная модуляция: одна боковая полоса, подавленная несущая частота	7	Два или более каналов, содержащих квантованную или цифровую информацию	D	Передача данных, телеметрия и телекоманды
B	Амплитудная модуляция: независимые боковые полосы	8	Два или более каналов, содержащих аналоговую информацию	E	Телефония, включая звуковое радиовещание
C	Амплитудная модуляция: частично подавленная боковая полоса	9	Два или более каналов, содержащих: смесь аналого-вых и цифровых каналов	F	Телевидение (видео)
F	Угловая модуляция: частота (т.е. ЧМ)	X	Случаи, не охваченные иначе	W	Сочетания случаев, указанных выше
G	Угловая модуляция: фаза			X	Случаи, не охваченные иначе
D	Смесь амплитудной и угловой модуляции (одновременно или последовательно)				
P	Последовательность импульсов: немодулированная				
K	Последовательность импульсов: модулированная по амплитуде				
L	Последовательность импульсов: модулированная по ширине/длительности				
M	Последовательность импульсов: модулированная в позиции/фазе				
Q	Последовательность импульсов: угловая модуляция несущей частоты во время периода импульса				
V	Последовательность импульсов: сочетание K, L, M и Q, или произведенное другими средствами				
W	Случаи, не охваченные выше: Несущая частота, модулированная двумя или более способами (амплитуда, угол, импульс)				
X	Случаи, не охваченные иначе				

ТАБЛИЦА 3а

Взаимосвязь между несущей, средней, пиковой и максимальной мгновенной мощностью, для различных классов излучения (данные наихудшего случая)

Класс излучения (основные характеристики) (1), (2)	Тип известной мощности								
	Мощность несущей, P_c			Средняя мощность, P_m			Пиковая мощность, P_p		
	Множитель для определения:			Множитель для определения:			Множитель для определения:		
	P_c	P_m	P_p	P_c	P_m	P_p	P_c	P_m	P_p
С*Г ⁽⁴⁾ Отрицательная модуляция Положительная модуляция	–	–	–	–	1	1,85	–	0,54	1
Г*... ⁽⁵⁾	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Н*А Н*В Н*Е	1	2	4	0,5	1	2	0,25	0,5	1
Ж*В ⁽³⁾ Ж*С ⁽³⁾ Ж*Е ⁽³⁾	–	–	–	0	1	1	0	1	1
К*А К*Е	1	1,5	4/d	0,67	1	2,67/d	0,25d	0,38d	1
Л*А Л*Е М*А Н*Е Р*Н	1	1	1/d	1	1	1/d	d	d	1
Р*В ⁽³⁾ Р*С ⁽³⁾ Р*Е ⁽³⁾	–	–	–	–	1	1	–	1	1
Г7Е	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Г7F	1	1	1	1	1	1	1	1	1

(1) См. таблицу 2 для дальнейшей информации по 3-символьному коду, который используется для описания трех основных характеристик типа передачи.

(2) Знак * указывает, что 2-я характеристика (т. е. характер модулирующего сигнала) не является значимой для рассмотрения опасностей.

(3) Предполагается, что несущая почти полностью подавлена и что, в случае модуляции тональной частотой, пиковая мощность передатчика может быть достигнута в режиме с одной боковой полосой (ОБП).

(4) Мощность несущей, P_c , ясно не определена.

(5) 3-я характеристика не является значимой для рассмотрения опасностей.

d = коэффициент заполнения импульса.

Эти коэффициенты даются для ЦЗР и ЦТР при измерении мощности всего канала (обычно 1,5 МГц для ЦЗР и 8 МГц для ЦТР).

ТАБЛИЦА 3b

Взаимосвязь между несущей, средней, пиковой и максимальной мгновенной мощностью для различных классов излучения (модуляция типового случая)

Класс излучения (основные характеристики)	Тип известной мощности								
	Мощность несущей, P_c			Средняя мощность, P_m			Пиковая мощность, P_p		
	Множитель для определения:			Множитель для определения:			Множитель для определения:		
	P_c	P_m	P_p	P_c	P_m	P_p	P_c	P_m	P_p
A*C (для $m = 70\%$) A*E (для $m = 70\%$)	1	1,25	2,89	0,80	1	2,32	0,35	0,43	1
C*F ⁽¹⁾									
Отрицательная модуляция	–	–	–	–	1	4,34	–	0,23	1
Положительная модуляция	–	–	–	–	1	2,7	–	0,37	1
F*...	1	1	1	1	1	1	1	1	1

⁽¹⁾ Мощность несущей, P_c , ясно не определена.

Таблицу 3b можно также использовать для преобразования значений напряженностей полей в другие системы обозначений; отметим, однако, что квадратный корень из коэффициентов преобразования, данный в таблице 3b, должен использоваться, когда имеют дело с напряженностями полей. Таким образом, в данном выше примере радио АМ, среднеквадратичную напряженность поля только несущей частоты следует умножить на $\sqrt{1,5}$ (или $\sqrt{1,25}$) для получения среднеквадратичной напряженности поля, которая включает в себя компоненты модуляции. Наоборот, производный уровень (включая компоненты модуляции) следует разделить на $\sqrt{1,5}$ (или $\sqrt{1,25}$), чтобы дать эквивалентный производный уровень только для несущей частоты.

Среднеквадратичное значение напряженности поля в дальней зоне можно вычислить из известной мощности, используя уравнение (7); соответствующий тип мощности для использования (т. е. P_m , или P_p) показан в таблице 4.

ТАБЛИЦА 4

Взаимосвязь между определенными обозначениями напряженностей полей и обозначениями мощностей

Вычислить	Использовать мощность, выраженную как
Действующее значение эквивалентной напряженности поля	Средняя мощность передатчика, P_m
Среднее значение эквивалентной напряженности поля, которая возникает во время периода пикового колебания РЧ	Пиковая мощность, P_p
Пиковое (максимальное) значение эквивалентной напряженности поля	Пиковая мощность, $P_p^{(1)}$

⁽¹⁾ Пиковая мощность эквивалентной напряженности поля определяется из пиковой мощности, P_p , используя коэффициент поправки "пиковое/среднеквадратичное". Этот коэффициент равен 2/1 для синусоидальной несущей частоты.

2.1.6 Образцы помех

И естественные и искусственные структуры могут повторно излучить электромагнитное поле (EMF). Повторно излучаемое поле векторным образом добавляется к прямому полю. Это может привести к образцам помех, которые состоят из ограниченных максимумов и минимумов напряженности поля. Образец помех является еще более сложным, если имеются многократные повторные излучения поля.

Образцы помех зависят от частоты источника излучения. Чем выше частота, тем меньше длина волны, и, следовательно, ближе, пространственно, максимумы и минимумы. На частотах телевидения УВЧ местные максимумы и минимумы могут быть отделены только десятками сантиметров.

В случае источников многократных излучений, например, если несколько каналов радио и телевидения излучаются из того же самого местоположения, возникают несколько накладывающихся образцов.

2.2 Уровни напряженностей полей вблизи радиовещательных антенн

В этой секции обсуждаются уровни напряженностей полей, которые находятся поблизости от типичных радиовещательных антенн НЧ/СЧ, ВЧ, ОВЧ и УВЧ.

2.2.1 Полоса НЧ/СЧ (150–1605 кГц)

На НЧ и СЧ частоты находятся ниже резонансных частот всего тела. В случае прямых воздействий электромагнитного поля, предельные уровни (также определяемые как "производные") значений и для электрического, E , и для магнитного, H , полей являются относительно высокими. Однако во многих случаях, высокие значения присутствуют только очень близко к передающей антенне. Это особенно верно в более низком конце диапазона НЧ/СЧ, и для тех стандартов/руководящих принципов, которые определили более высокие производные уровни. В верхнем конце полосы, однако, значимые расстояния могут простираются до порядка нескольких сотен метров. Следует понимать, что это увеличение в расстоянии происходит, по крайней мере, частично, из-за снижения эталонных уровней в верхнем конце полосы СЧ. Доступа к мачте/башне во время передач нужно избегать из-за высоких напряженностей полей и риска поражения электрическим током.

2.2.2 Полоса ВЧ (3–30 МГц)

Измерения предлагают, чтобы в больших областях вокруг передающей станции ВЧ высокой мощности электромагнитное поле будет превышать производные уровни напряженностей электрических полей, особенно вблизи двухпроводных воздушных фидерных линий. На многих радиостанциях для уменьшения поля эти фидерные линии теперь упаковываются путем группобразования, но это не может быть сделано вокруг самих решеток передающих антенн. Таким образом, некоторые части земли, содержащие антенные решетки, должны стать "запретными областями", и должны быть запланированы графики технического обслуживания, чтобы избежать времени, когда антенная решетка осуществляет передачу. Это будет трудно выполнить на многих станциях ВЧ, где, по требованиям программирования, диаграммы направленности полей могут изменяться каждые 15 минут. Напряженность поля впереди решетки ВЧ имеет тенденцию увеличиваться с высотой над поверхностью земли. Частично это происходит из-за того, что главный луч имеет угол возвышения от 10° до 15° , но главным образом это следует из граничных условий на поверхности земли. Большинство радиовещательных антенн ВЧ являются горизонтально поляризованными, в этом случае напряженность электрического поля на земле была бы нулевой для бесконечно проводящей земли. Однако на практике, из-за конечной проводимости земли, есть небольшой горизонтальный компонент электрического поля.

Важно понять, что поле в ближней зоне антенной решетки ВЧ может расширяться на значительное расстояние. Это происходит не только из-за размера антенн, но также и потому что пересеченная местность может привести к очень большой действующей апертуре для решетки. Это приводит к измерениям напряженностей полей, падающим ниже производных уровней в местоположениях вблизи решетки, затем снова повышающимся с увеличением расстояния от антенн. Однако, как только входят в дальнюю зону, уровни напряженностей полей следуют нормальной диаграмме направленности, уменьшаясь с увеличением расстояния от антенной решетки.

2.2.3 Полоса ОВЧ/УВЧ (30 МГц–3 ГГц)

Обычно на позициях ОВЧ/УВЧ высокой мощности, антенны в общем случае располагаются на высоте около 100 м над поверхностью земли, смонтированные на мачтах или на свободно стоящих опорах. Поэтому на уровне земли напряженности полей являются сравнительно низкими, из-за расстояния от антенны, а также из-за узкой ширины луча, передаваемого в вертикальной плоскости.

2.2.4 Полоса СВЧ (3–30 ГГц)

Эта полоса частот используется для обширного количества таких служб электросвязи, как фиксированные и подвижные микроволновые линии типа "точка-точка" и "точка-многоточка", спутниковое радиовещание, гражданские и военные радары, наземные станции восходящих линий и так далее.

В следующих подсекциях имеют дело с системами, используемыми в радиовещании.

2.2.4.1 Определения областей полей

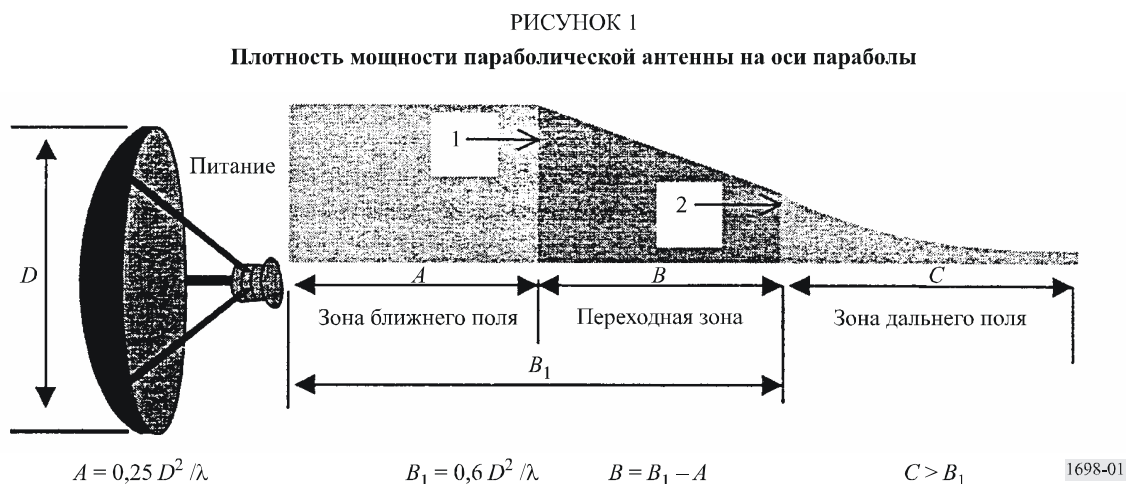
Для антенн с параболическим отражателем с диаметром $D \gg \lambda$ используются следующие определения:

Ближняя зона – В ближней зоне (или области Френеля) главного луча, плотность мощности может достигать максимума перед тем, как она начинает уменьшаться с расстоянием. Максимальное значение плотности мощности поля в ближней зоне на оси зависит только от мощности, подаваемой в антенну, диаметра, D , антенны и эффективности антенны.

Переходная область – Плотность мощности в переходной области уменьшается обратно пропорционально с увеличением расстояния от антенны.

Дальняя зона – Плотность мощности в дальней зоне (или области Фраунгофера) диаграммы направленности антенны уменьшается обратно пропорционально квадрату расстояния.

Различные зоны параболической антенны показаны на рисунке 1. Следующий подход действителен только вдоль главной оси антенны.



Излучение параболической антенны в зоне ближнего поля происходит вдоль полной длины зоны в форме цилиндра с диаметром, D . Максимум электромагнитного поля и его плотности мощности являются постоянными на всем протяжении зоны ближнего поля.

Это выражается уравнением:

$$S \text{ (W/m}^2\text{)} = \frac{16\eta P}{\pi D^2},$$

где:

- η : эффективность параболической антенны (используется 0,55)
- P : мощность передатчика (Вт)
- D : диаметр параболической антенны (м).

Следует отметить, что плотность, S , является максимальной на протяжении зоны ближнего поля.

Из точки 1 (начало переходной зоны) плотность S уменьшается линейно с расстоянием r к точке 2, где начинается зона дальнего поля.

В зоне дальнего поля, S уменьшается с квадратом расстояния согласно уравнению:

$$S \text{ (W/m}^2\text{)} = \frac{G P}{4\pi r^2},$$

где:

- G : усиление параболической антенны по отношению к изотропному источнику
- r : расстояние от параболической антенны (м).

Плотность S является максимальной на оси параболической антенны.

2.2.4.2 Фиксированные и подвижные наземные микроволновые линии

Типичная приемопередающая система состоит из передатчика и приемника, волновода и приемопередающей параболической антенны. Мощности передатчиков находятся внутри диапазона от 0,1 Вт до 15 Вт, а размеры параболы – внутри диапазона от 0,5 м до 4 м, при этом оба параметра зависят от используемой полосы частот.

Усиление используемой параболической антенны лежит внутри диапазона от 30 дБ до 50 дБ.

2.2.4.3 Спутниковые наземные станции

Идеальное местоположение для спутниковой наземной станции находится в низменности, на плоской земной поверхности и долинах, вдали от других объектов и промышленных зон. Практически, однако, такие станции часто располагаются в городских зонах, на крышах зданий и так далее.

В общем случае, угол возвышения главного луча находится между 5° и 50° ; радиус зеркала обычно составляет до 15 м, хотя есть несколько примеров более значительных зеркал.

В поле ближней зоны напряженность поля фиксированных и подвижных наземных линий связи может превышать эталонные уровни, особенно когда имеются более высокие мощности. Поэтому прямой доступ любых неуполномоченных людей следует предотвращать физически. Эталонные уровни могут также быть превышены в переходной зоне, в дополнение к полю в ближней зоне.

В частности, спутниковые наземные станции более высоких мощностей могут, в большой степени, производить поля, которые превышают рекомендованные уровни и в поле ближней зоны, и в переходной зоне. Так как эти области могут быть довольно расширенными, местоположение спутниковой наземной станции следует выбирать тщательно. Поскольку излучение испускается под некоторым углом возвышения, следует включать механизмы безопасности, чтобы механически предотвращать любое изменение угла возвышения в положение, которое позволило бы излучению быть направленным в пространство, где могут присутствовать какие-либо люди.

2.3 Смешанное частотное поле

Общепринято иметь более чем один передатчик (используя различные частоты передачи), при расположении на том же самом участке передатчика. В этом случае необходимо рассматривать суммарное (комбинированное) воздействие энергии радиочастоты (РЧ), которой подвергается человек. С другой стороны, воздействия часто являются зависимыми от частоты, и поэтому, после вычисления значимых параметров (S , E и H), следует принять во внимание комбинированное воздействие.

Для тепловых влияний, пределы воздействий даются в понятиях определенной (конкретной) степени поглощения (*specific absorption rate* - SAR) (см. Дополнение 4), что означает необходимость определения соответствующих плотностей мощностей. В случае позиции с многочастотным передатчиком рекомендуется, чтобы суммарная плотность мощности была суммой плотностей мощностей на каждой передающей частоте:

$$S_t = \sum_{i=1}^n S_i \quad (11)$$

где S_i есть плотность мощности на частоте f_i ($i = 1, 2, \dots, n$), с условием, что:

$$\sum_{i=1}^n \frac{S_i}{L_i} \leq 1 \quad (12)$$

где L_i эталонный уровень плотности мощности, на частоте f_i ($i = 1, 2, \dots, n$).

Это является основным принципом, но имеются некоторые различия в том, как принцип применяется (см. Дополнение 4).

2.4 Электромагнитное поле внутри зданий

Материалы здания и инфраструктура внутри здания имеют очень сильное влияние на поле, вызывая изменения результирующего поля, от точки к точке, даже в той же самой комнате. Пространственные изменения в электромагнитном поле вызываются многократными отражениями падающей волны, и поэтому поляризация результирующего поля может отличаться от поляризации падающей волны.

Металлические объекты и трубопроводы (линии и трубы) вызывают повторное излучение (действующее как вторичный источник), и изменяют интенсивность полей в их близости.

Все эти условия делают оценку воздействия трудной. При выполнении вычислений или измерений следует принимать во внимание довольно большое количество параметров.

Чтобы иметь приемлемую точность в вычислении воздействий, необходимо выбрать соответствующую модель для представления окружающей среды.

Точность измерения зависит от размера и типа обнаружения зонда, а также от местоположения человека, который осуществляет измерения относительно источника излучения и зонда.

До сих пор нет международных стандартов для методов вычисления и измерения.

Критической проблемой является не просто значение самих пределов воздействия, а метод, которым следует выполнять вычисления и измерения, и это является главной целью этой Рекомендации.

3 Вычисление

3.1 Процедуры

Методы аналитических и численных вычислений могут предсказать внешние или внутренние поля от электромагнитного излучателя. Вычисления полезны для оценки уровня напряженностей полей в ситуации определенного воздействия, чтобы установить, необходимы ли измерения, и какое оборудование следует использовать. Вычисления могут также быть дополнением к измерениям и использоваться для проверки того, что результаты измерений являются обоснованными.

В некоторых ситуациях, например для сложных условий воздействий поля в ближней зоне, когда дорогое измерительное оборудование SAR не является доступным, вычисления могут заменить измерения.

Точность и качество вычислений будут зависеть от используемых аналитических или численных методов и от точности описания электромагнитного источника (источников), а также от физических объектов между излучателем и точкой предсказания, которые могут затронуть поля. Для вычислений степени SAR на качество результата будет оказывать влияние также точность основной модели.

Чтобы иметь возможность выполнить вычисление, должны быть известны или оценены исходные параметры.

Примерами исходных параметров являются частота, средняя мощность, пиковая мощность, ширина импульса, длина импульса, скорость повторения импульсов, диаграмма направленности антенны, усиление и конфигурация.

3.1.1 Закрытые решения

В дальней зоне передающего источника, где электромагнитное поле по характеру является преимущественно плоской волной, для оценки напряженностей полей могут использоваться аналитические выражения. В главном направлении антенны для вычисления плотности может быть использовано уравнение свободного пространства Friis:

$$S = \frac{P G}{4\pi d^2},$$

где:

S : плотность мощности в (Вт/м²)

P : средняя выходная мощность (Вт)

G : усиление антенны для поля дальней зоны относительно изотропного излучателя

d : расстояние от излучателя (м).

Связь между плотностью мощности и напряженностями электрических и магнитных полей дается следующим уравнением:

$$S = \frac{E^2}{\eta} = H^2\eta,$$

где:

E : напряженность электрического поля (В/м) (среднеквадратичная)

H : напряженность магнитного поля (А/м) (среднеквадратичная)

η : внутренний импеданс свободного пространства, 377 Ω.

Отсюда, используя приведенные выше формулы, напряженности поля можно вычислить так:

$$E = \sqrt{\frac{P G \eta}{4\pi d^2}} = \frac{5,5\sqrt{P G}}{d}$$

$$H = \sqrt{\frac{P G}{4\pi d^2 \eta}} = \frac{\sqrt{P G}}{68,8d}$$

Эти отношения действительны только в дальней зоне излучающего источника, т. е. когда $d > 2D^2/\lambda$, где D есть наибольший размер излучающей структуры, а λ есть длина волны. Ослабление напряженности поля или повышение из-за отражения, материальной передачи и дифракции не принимаются во внимание. Использование вышеуказанных отношений в ближней зоне, или в других направлениях, отличающихся от главного направления, в общем случае будет давать слишком большие значения, пока не будет введен коэффициент поправки поля ближней зоны или коэффициент диаграммы направленности излучения.

3.1.2 Численные методы

Аналитические процедуры могут использоваться только для вычисления электромагнитных свойств для нескольких специальных случаев и конфигураций. Для решения общих проблем должны быть применены численные методы. Самые общие численные методы для вычисления электромагнитного поля от передающего источника или внутренних полей и для определенной степени поглощения в биологических телах перечисляются ниже. Какой из численных методов является наиболее подходящим для определенной проблемы, зависит от рассматриваемого частотного диапазона, геометрических структур, которые подлежат моделированию, и ситуации типового воздействия (поле ближней или дальней зон).

Некоторые обычные численные методы моделирования приводятся ниже:

- физическая оптика (PO);
- физическая теория дифракции (PTD);
- геометрическая оптика (GO);
- геометрическая теория дифракции (GTD);
- однородная теория дифракции (UTD);
- метод эквивалентных токов (МЕС);
- метод моментов (МОМ);
- многократный многополюсный метод (ММП);
- метод конечных разностей в области времени (FDTD);
- метод конечных элементов (FEM);
- метод импеданса.

Должна быть выполнена оценка для каждого приложения, чтобы установить, какой из вышеупомянутых методов является наиболее подходящим для решения заданной проблемы.

Каждая из этих процедур позволяет определять амплитуду и фазу следующих величин электромагнитного поля, в каждой точке в пространстве, где излучающие и рассеивающие элементы могут быть или идеальными проводниками, или диэлектрическими телами:

- напряженность электрического поля;
- напряженность магнитного поля;
- плотность мощности;
- ток;
- напряжение;
- импеданс.

Метод моментов (МОМ)

Метод моментов часто используется в разработке радиовещательных антенных систем (выходная мощность передатчика, усиление антенны и так далее) и в вычислении их результирующих электромагнитных полей. Он позволяет осуществлять вычисления как на передающем, так и на приемном концах, а также в полях ближней и дальней зон антенны.

Технические структуры, имеющие до трех измерений, могут быть промоделированы, принимая во внимание их материальные параметры (комплексная диэлектрическая проницаемость), а также параметры земли. Моделирование работает с проводниками, которые являются тонкими относительно длины волны и, в принципе, способно также представлять поверхности. Ограничение этого метода лежит в факте, что моделирование расширенных и сложных структур может стать для компьютера слишком затратным в использовании времени и памяти.

Метод моментов является методом, который был в значительной степени использован для решения электромагнитных проблем и осуществления вычислений степени SAR в блочных моделях биологических тел. В методе МОМ электрические поля внутри биологического тела рассчитываются посредством решения функции Грина (Green) в интегральных уравнениях Максвелла (Maxwell).

Быстрое преобразование Фурье/Метод сопряженных градиентов (БПФ/СГ)

Метод БПФ/СГ является дальнейшим развитием метода моментов. Итеративные алгоритмы, основанные на быстром преобразовании Фурье (БПФ) и градиентной процедуре, используются для решения линейных уравнений, полученных из метода моментов.

Метод конечных разностей в области времени (FDTD)

FDTD является численным методом для решения дифференциальных роторных уравнений Максвелла в области времени. Он может быть использован для вычисления внешнего и внутреннего распределения электромагнитного поля и степени SAR в биологических телах, для воздействий как поля ближней зоны, так и поля дальней зоны. В методе FDTD, становятся дискретными как время, так и пространство, а биологическое тело моделируется путем определения значений диэлектрической проницаемости и проводимости для пространственных ячеек, которые оно занимает. Требуемая память компьютера пропорциональна количеству пространственных ячеек. Метод FDTD считается наиболее обещающим методом вычисления степени SAR, но для точных вычислений требуются очень мощные компьютеры.

Многократный многополюсный метод (ММР)

Метод ММР основывается на аналитических решениях к уравнениям полей, которые обладают многополюсностью в одной точке в пространстве, и используется в сочетании с обобщенным многополюсным методом (GMP). Процедура ММР является особенно подходящей для ситуации так называемых тел “рассеивания с потерями”, которые находятся вблизи источников излучений, т. е. в пределах непосредственного поля ближней зоны.

Метод импеданса

Метод импеданса был успешно использован для решения дозиметрических проблем, где могли быть выполнены квазистатические приближения. Для вычислений степени SAR в человеческих телах этот метод оказался очень эффективным на частотах вплоть до 40 МГц. В методе импеданса биологическое тело моделируется с помощью трехмерной сети комплексных импедансов.

3.1.2.1 Вычисления напряженностей полей

Большинство методов, перечисленных выше, можно использовать для вычисления уровней напряженностей полей от электромагнитных излучателей. Точность результатов сильно зависит от того, насколько хорошо моделируется излучатель (например, антенна). Если объекты около излучателя, между излучателем и точкой предсказания, или близко к точке предсказания напряженности поля значительно влияют на уровни напряженностей полей, такие объекты также следует промоделировать.

3.1.2.2 Вычисления степени конкретного поглощения

Во многих ситуациях воздействий из-за трудности измерения усредненного по всему телу или местного пикового SAR, численные вычисления, или несколько численных методов, упомянутых выше, например, FDTD, MOM и MPM, могут использоваться для оценки степени конкретного поглощения в биологическом теле, которое подвергается электромагнитному излучению либо поля ближней зоны, либо поля дальней зоны.

Какой из этих методов является наиболее подходящим для конкретной проблемы, зависит, например, от частоты, условий воздействия, размера объекта, подвергающегося воздействию, требуемой точности и максимального допустимого времени вычисления. Каждый метод требует опыта в биофизике и численном анализе.

Для использования любой из этих моделей требуется трехмерная геометрическая числовая модель тела или части тела, которые подвергаются воздействию. Следует знать электрические свойства для различных частей тела на частоте воздействия. В зависимости от требуемой точности могут использоваться модели с различной сложностью. В некоторых ситуациях для моделирования тела подходящими являются простые формы, подобные сферам и цилиндрам. Диэлектрические свойства человеческих тканей даются в литературе. Используя изображения магнитного резонанса (MR) человеческого тела, можно разработать очень сложные и точные числовые модели тела. Модели MR с несколькими различными типами тканей и пространственной разрешающей способностью меньше, чем несколько миллиметров, были использованы для вычислений методом FDTD распределения SAR в людях, подвергшимся электромагнитным полям от переносных радиопередатчиков.

4 Измерения

4.1 Процедуры

Следует отметить, что методы измерения являются критическими, особенно для близких и низких частотных полей. Для более низких полос частот метод измерения является очень чувствительным и сложный аспект, поскольку расстояние испытательной точки (от источника излучения) обычно является намного меньше, чем длина волны. По этой причине частотный диапазон 10 кГц–30 ГГц разделен на четыре главные радиовещательные полосы: полосы НЧ/СЧ, ВЧ, ОВЧ/УВЧ и СВЧ.

4.1.1 Полосы НЧ/СЧ

Для проверки теоретических результатов должны быть выполнены измерения напряженности поля в ближней зоне, используя специальные инструменты (измерители напряженности поля) с тремя ортогонально размещенными короткими симметричными вибраторами (диполями). Рекомендуется не использовать какой-либо инструмент, требующий кабеля электропитания.

Для предотвращения мешающего влияния человека, который выполняет измерение, измерительный прибор должен быть присоединен к изолированному стержню. Расстояние между инструментом и оператором следует определять, принимая во внимание, есть ли какие-либо изменения в шкале инструмента, вызванные любым движением оператора. Такое расстояние зависит от частоты измеряемого сигнала.

При выполнении такого рода измерения необходимо принимать во внимание возможные влияния всех объектов, находящихся вблизи, и особенно тех, которые могут создавать явления повторного излучения.

Когда целью измерения является проверка результатов, полученных путем теоретических выкладок, испытательные точки следует выбирать вдоль направления излучения и на высоте между 1 и 2 м.

Более подробная информация дается в Рекомендации МСЭ-R BS.1386.

4.1.2 Полосы ВЧ

Подробная информация дается в Рекомендации МСЭ-R BS.705.

4.1.3 Полосы ОВЧ/УВЧ

Подробная информация дается в Рекомендации МСЭ-R BS.1195.

4.1.4 Полосы СВЧ

Принимая во внимание длину волны и расстояния от источников излучений, должен применяться стандартный метод измерения.

4.2 Инструменты

4.2.1 Введение

Измерение полей воздействия в частотном диапазоне 10 кГц–300 ГГц требует значительного усилия из-за изменчивости поля, подлежащего определению, в пространстве и во времени.

Необходимо использовать соответствующую измерительную аппаратуру и действенную измерительную установку. Важно знать характеристики измерительных инструментов, поскольку эти характеристики определяют соответствующий выбор инструмента. Такие зависимые от частоты характеристики, как взаимодействие кабелей, внеполосные некалиброванные характеристики и сформированная частотная характеристика, особенно важны для широкополосных инструментов. Другие свойства полей нуждаются в согласовании с характеристиками инструментов; например, реактивный или излучающий, поляризация и модуляция, или количество источников полей.

Воздействия на людей со стороны электромагнитных полей обычно измеряются в единицах плотности мощности, но другие такие меры, как наведенный ток в теле, могут быть более значимыми, и положения являются своего рода критическими аспектами для защиты или контроля, которые инженер обязан решать. Во многих случаях нет простой математической нормы между электрическим и магнитным полями, и поэтому, в этой ситуации, должно быть измерено каждое поле.

В этом случае используемыми измерительными инструментами являются:

- инструменты для измерения значения напряженностей полей E и H;
- инструменты для измерения тока.

4.2.1.1 Общие положения

Главными приборами этих инструментов являются:

- зонды;
- соединительные кабели, которые переносят сигнал от зонда к устройству чтения и вычисления;
- устройство чтения и вычисления.

4.2.1.2 Зонды

Большинство зондов являются изотропными или всенаправленными в трех измерениях, чтобы измерять энергию от всех направлений.

Зонды обязаны показывать следующие характеристики:

- реагировать на намеченные поля, E или H, без отклика на непреднамеренные поля;
- в общем случае, зонд является электрически малым и менее чем $\lambda/10$ для максимальной частоты эксплуатации; однако специальные оценивания показали, что некоторые зонды могут быть электрически большими;
- предсказуемо реагировать на такие изменения условий окружающей среды, как температура и влажность.

Очень важно, чтобы изотропные зонды, в течение измерения, помещались таким образом, чтобы соединение могло уменьшать возмущение поля в зонде соединительными кабелями. Это возмущение поля, как правило, является проблемой при измерении электрических полей средних волн или более низких частот.

4.2.1.3 Кабели

Кабели, используемые для подключения зонда, а также считывающего и вычисляющего инструмента, должны быть свободны от шума и предотвращать связь поля с измерительным блоком.

Очень важно отметить, что для кабелей имеется возможность действовать в качестве антенны и изменять поле в зонде, вызывая неправильное считывание. Иногда есть возможность решать эту проблему путем установки кабелей, во время измерений, перпендикулярно по отношению к электрическому полю.

4.2.2 Характеристики измерительных инструментов для электрического и магнитного полей

Обычно измерения воздействия электромагнитного поля выполняются в частотной области. Имеются две принципиальные группы инструментов.

4.2.2.1 Типы и технические требования широкополосных инструментов

С помощью широкополосных инструментов (см. рисунок 2) можно измерять суммарное поле в заданном частотном диапазоне (т. е. в ширине полосы частот), но нет возможности различать вклад источника отдельной частоты, когда одновременно излучают несколько источников.

РИСУНОК 2

Широкополосные инструменты



1698-02

Широкополосные инструменты выполняются с датчиками, которые могут быть неизотропными для измерения отдельного пространственного компонента поля, или могут быть изотропными для измерения всех трех компонентов поля одновременно. Эти инструменты могут измерять суммарный уровень мгновенного электрического или магнитного поля, или среднеквадратичное значение поля, или среднее значение плотности мощности за период времени, обычно 6 мин., в соответствии со стандартами воздействий.

Широкополосные инструменты могут быть подразделены на следующие классы, в зависимости от используемого детектора:

- диодный;
- болометрический;
- на основе термопары.

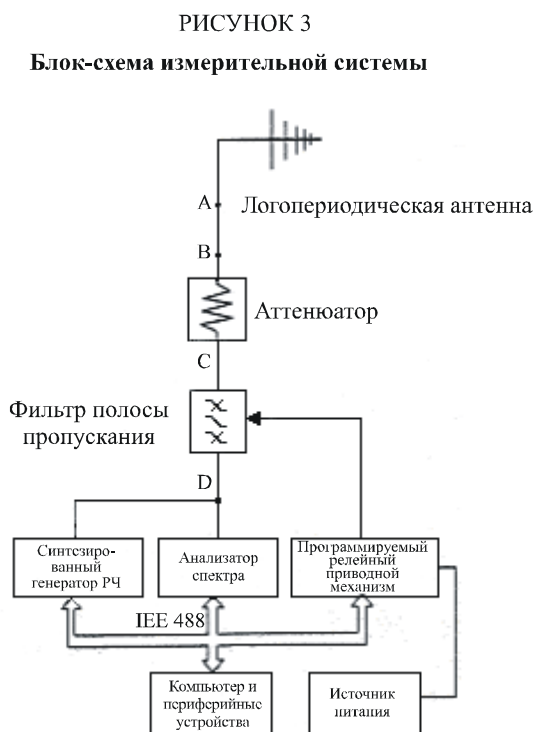
Эти инструменты могут быть использованы в обеих ситуациях, в поле ближней зоны и в поле дальней зоны.

4.2.3 Типы и технические характеристики узкополосных инструментов

Узкополосные инструменты являются избирательными по частоте и могут измерять напряженность электромагнитного поля в диапазоне различных частот. Посредством неизотропного датчика или антенны есть возможность оценивать направление и поляризацию поля. Необходимо проявлять осторожность в установке, поскольку поля могут быстро изменять высокую частоту в пространстве относительно размера антенны, особенно в присутствии таких отражающих объектов, как стены, земля, металлические опоры и структуры. Важно заметить, что путем изменения точки измерения обнаруженная напряженность поля может быть полностью различной. На измерение могут также повлиять позиция антенны и соединяющие кабели.

Когда измерение электромагнитного поля на высокой частоте выполняется в области времени, необходимо использовать инструменты с соответствующей характеристикой анализа (для частоты и разрешающей способности ответа), чтобы получать хорошие результаты в спектральном анализе с помощью преобразования Фурье.

Рисунок 3 показывает блок-схему узкополосной измерительной системы.

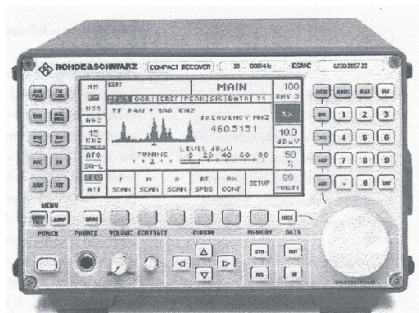


Система состоит из следующих основных компонентов:

- Калиброванная антенна, которая преобразует электрическое поле для дипольной антенны или магнитное поле для рамочной антенны в волну на линии передачи;
- Калиброванная соединительная линия передачи или коаксиальный кабель;
- Избирательный приемник, обычно в виде анализатора спектра (см. рисунок 4), который измеряет, используя цепь настройки, принятую напряженность сигнала как функцию частоты. Анализатор спектра дает значения напряжения или мощности в области частоты.

РИСУНОК 4

Избирательный приемник с анализатором спектра



1698-04

Во время этих измерений очень важно позаботиться, чтобы измерительные инструменты не нарушали измеряемое поле.

4.3 Сравнение между предсказаниями и измерениями

Сравнения между предсказаниями и измерениями показывают, что результаты измерений хорошо согласуются с результатами, полученными путем теоретических выкладок. Для более подробной информации, см. Дополнение 2.

5 Предосторожности на передающих станциях и вблизи их

Эта секция очерчивает предосторожности, которые следует предпринимать на радиовещательной передающей станции высокой мощности для контроля потенциальных рисков из-за излучения РЧ. Эти риски относятся к двум главным категориям; первая категория является прямым риском для здоровья из-за воздействия на человека высоких уровней излучения РЧ, включая удары, ожоги и возможную неправильную работу медицинских имплантантов. Вторая категория включает в себя косвенные риски, где излучение РЧ могло бы вызвать взрывы, пожары или мешать безопасной работе машин, подъемных кранов, транспортных средств и так далее.

5.1 Предосторожности при контроле прямых воздействий излучения РЧ на здоровье

В понятиях предосторожностей, которые могут быть разумно предприняты, рассматриваются две группы людей. Первая группа представляет служащих на передающих станциях или регулярных официальных посетителей этих станций. Хотя эта группа может быть в ситуациях более частого риска, степень, до которой могут быть применены меры контроля, является намного большей, чем степень для второй группы, представляющей членов общественности.

5.1.1 Меры предосторожности (профессиональных) служащих

5.1.1.1 Физические меры

Если это подходит, то следует обеспечить некоторую форму защитного барьера, чтобы ограничить доступ к любой области, где либо превышаются пределы воздействий, либо возможен контакт с незащищенными проводниками РЧ. Доступ к таким областям должен быть возможен только с использованием ключа или некоторой формы инструмента. Следует обеспечить механическую или электрическую блокировку для ограждений, где необходим доступ для технического обслуживания.

Другие такие физические меры, как световая предупредительная сигнализация или знаки, следует использовать в дополнение к защитным преградам, но не вместо них.

Риск удара или ожогов от напряжений РЧ, наведенных на таких проводящих объектах, как ограждение и поддерживающие структуры, следует свести к минимуму путем эффективного и должным образом обслуживаемого заземления РЧ или устройствами заземления. Особое внимание нужно уделить заземлению любых временных кабелей или проволочных канатов, таких, как стропы лебедок и так далее.

Там, где такими объектами необходимо управлять в поле РЧ, дополнительную защиту от ударов или ожогов следует обеспечивать ношением прочных перчаток, предназначенных для тяжелой работы, и через эффективную маркировку.

5.1.1.2 Эксплуатационные процедуры

Оценки рисков излучения РЧ обязаны быть выполнены с помощью соответственно обученного и опытного штата на сооружении, а также тогда, когда для передающей станции выполняются какие-либо существенные изменения. Начальная норма должна включать идентификацию следующих аспектов:

- областей, где люди могут подвергнуться "производным" или "исследуемым" уровням;
- различных групп людей, например, служащих, совладельцев антенных полигонов, общественности и так далее, которые могут подвергнуться воздействию;
- последствий таких состояний неисправностей, как утечка из фланцев РЧ, рассогласование антенны или эксплуатационные ошибки.

Начальная проверка уровней излучения РЧ может быть выполнена путем вычисления или математического моделирования, но в целях проверки следует также выполнять некоторые типовые измерения. В большинстве случаев, однако, измерения будут необходимы для более точного определения уровней излучения РЧ. Подлежащие измерению фактические величины (поле E, поле H, плотность мощности, наведенный ток) следует определять на основе конкретных обстоятельств. Они включают в себя частоты станции, область поля (поле ближней/дальней зон), которые измеряются, и предлагается ли проверять согласие с основными ограничениями (SAR) или только с "производными/исследованными" уровнями. Эти обстоятельства в значительной степени будут также определять, следует ли отдельно измерять три индивидуальных компонента поля, или следует использовать изотропный прибор. Обзоры излучения РЧ тогда следует выполнять штатом, обученным пользованию такими приборами, следуя предписанным процедурам измерений, и регистрируя результаты в точно определенном формате.

В пределах любой организации или компании ответственным за идентификацию и обеспечение подходящих инструментов следует сделать назначенного компетентного человека. Такие измерительные инструменты должны всегда использоваться в соответствии с инструкциями изготовителей и быть предметом регулярной функциональной эксплуатации (с источником проверки) и калибровки. Метки, показывающие даты истечения срока хранения, должны быть установлены на инструменты после таких испытаний или калибровки. Записи о калибровке следует сохранять, включая данные, были ли в каждом случае необходимы настройки и/или ремонт. Эту информацию следует затем использовать для определения интервала между калибровками.

Следует осуществлять процедуры работы, которые гарантируют, что пределы излучения РЧ не превышаются. Служащих следует обучить относительно соответствующих процедур безопасности РЧ. Где возможно, техническое обслуживание в зонах, подчиненных ограничениям доступа из-за высоких уровней излучения РЧ, следует запланировать вблизи намеченных перерывов передачи или изменений диаграмм направленности излучений. Однако всегда должен быть баланс между воздействием излучения РЧ и другим такими рисками, как работа на мачтах ночью, даже при прожекторном освещении. Там, где необходимо, передатчики следует переключать на уменьшенную мощность или выключать, чтобы позволить безопасный доступ для технического обслуживания или ремонтных работ.

Запрещенные области на передающих станциях должны быть ясно определены и отмечены, и следует реализовать системы "разрешения на производство работ". Следует привести в порядок соответствующие договоренности для любых антенных систем, сумматоров или зон, совместно используемых с другими организациями. Весь штат, который регулярно работает в зонах с высокими уровнями излучения РЧ, следует обеспечить некоторой формой индивидуальных средств оповещения или измерителями степени опасности РЧ.

Обязаны сохраняться отчеты о воздействии выше указанных уровней излучения РЧ. Компаниям или организациям, ответственным за работающие передающие станции, нужно наблюдать за здоровьем штата, регулярно работающим в областях с высокими уровнями излучения РЧ, и принимающим участие в эпидемиологических обследованиях, где уместно.

Подробности общих методов и процедур, касающихся безопасности излучения РЧ, следует включать в письменные инструкции по безопасности и выдавать всему соответствующему штату. Кроме того, следует выпускать местные инструкции для каждой передающей станции, чтобы гарантировать согласие с такими методами и процедурами.

Обучение мерам безопасности должно также включать характер и результаты излучения РЧ, медицинские аспекты и стандарты по безопасности.

5.1.2 Меры предосторожности в отношении общественности

5.1.2.1 Физические меры

К общественности применяются соображения, подобные тем, что подробно изложены в § 5.1.1.1 для служащих. Особенное внимание следует уделять зонам, где пределы излучения РЧ могли быть превышены из-за условий отказа. Следует обеспечивать защитные преграды в форме ограждения по периметру, соответственно заземленного там, где это необходимо. Вероятно, будут необходимы дополнительные знаки, предупреждающие об опасности.

5.1.2.2 Эксплуатационные процедуры

Оценки риска, выполненные согласно § 5.1.1.2, должны принимать во внимание возможность присутствия членом общественности, имеющих медицинские имплантаты. Процедуру для предоставления информации об опасности для здоровья для таких потенциальных посетителей следует принимать с соответствующими ограниченными процедурами доступа. Для регулярных посетителей антенных полигонов следует предоставлять основные инструкции по безопасности РЧ.

Обязана быть рассмотрена потребность выполнения исследований излучения РЧ вне границ антенных полигонов, в особенности там, где наведенные напряжения во внешних металлических структурах (подъемные краны, мосты, здания и так далее) могут вызывать незначительные ожоги или удар. В выполнении таких исследований следует принимать во внимание возможность напряженности поля, увеличивающейся с расстоянием, обычно из-за повышающегося ландшафта. Там, где необходимо, следует осуществлять процедуру для проверки приложений по планированию или других предложений для развития.

Пример, который иллюстрирует приведенный выше текст, дается в Дополнении 3 (рисунки 43 и 44).

5.2 Предосторожности при контроле косвенных опасностей излучений РЧ

Такие косвенные воздействия излучения РЧ, как опасности воспламенения огнеопасных веществ, могут происходить на уровнях, которые значительно ниже "производных/исследованных" уровней, особенно на частотах СЧ/ВЧ. Это происходит потому, что огнеопасные вещества могут храниться на антенном полигоне, имея такие проводящие структуры, как трубы, которые могли бы действовать как

довольно эффективные приемные антенны. Фактические риски, однако, являются редкими, но могут включать в себя промышленные перерабатывающие предприятия, установки для хранения топлива и бензозаправочные станции. Детальное оценивание, однако, является далеко непростым. Поэтому общая процедура, рекомендованная ниже, основана на постепенном устранении. Принятые подробные меры предосторожности будут, однако, вынуждены учитывать любые национальные эталоны или законодательство в заинтересованной стране.

Следует выполнить начальную оценку, основанную на практических оценках наихудших случаев, минимального разнесения, необходимого между конкретным типом передатчика и проводящей структурой, чтобы избежать такой опасности. Первым шагом в осуществлении этого должно быть определение минимальной напряженности поля, которая могла бы представлять опасность воспламенения для конкретных используемых частот передатчика. Это есть функция типа огнеопасного вещества и периметра любой петли, сформированной металлическими структурами, обычно трубами, и она может быть наиболее легко определена из таблиц или графиков. Затем следует определить уязвимую область от этой минимальной напряженности поля вычислением, математическим моделированием или из таблиц/графиков.

Если уязвимая область, как определено выше, содержит какие-либо такие места, на которых хранятся огнеопасные вещества, или если это планируется, то следует затем выполнить более детальную оценку. Это должно быть основано на фактических размерах любых металлических структур, категории газа огнеопасного хранимого вещества (веществ) и измеренной напряженности поля. Эту детальную оценку следует выполнять вычислением извлекаемой мощности из металлической структуры, чтобы определить, превышает ли это минимальную энергию воспламенения огнеопасного вещества. Если это имеет место, тогда следует измерить извлекаемую мощность и осуществить любые необходимые изменения в структуре и/или других защитных мерах.

В категории, подобной опасностям воспламенения, находится возможная детонация взрывчатых материалов. С этим будут сталкиваться очень редко, но детальное руководство доступно из национальных стандартов, например, типа BS 6657 в Соединенном Королевстве. Другие косвенные воздействия, которые следует учитывать, включают в себя помехи для систем безопасности транспортных средств, машин, подъемных кранов и так далее, которые близки к границам передающих станций или находятся внутри них. Устойчивость этих систем охватывается регламентами электромагнитной совместимости (ЭСМ) (см. Дополнение 3).

Где необходимо, должны быть применены предосторожности, подобные в принципе тем, что описаны в § 5.1.2.

Дополнение 1 к Приложению 1

Примеры вычисленных напряженностей полей вблизи радиовещательных антенн

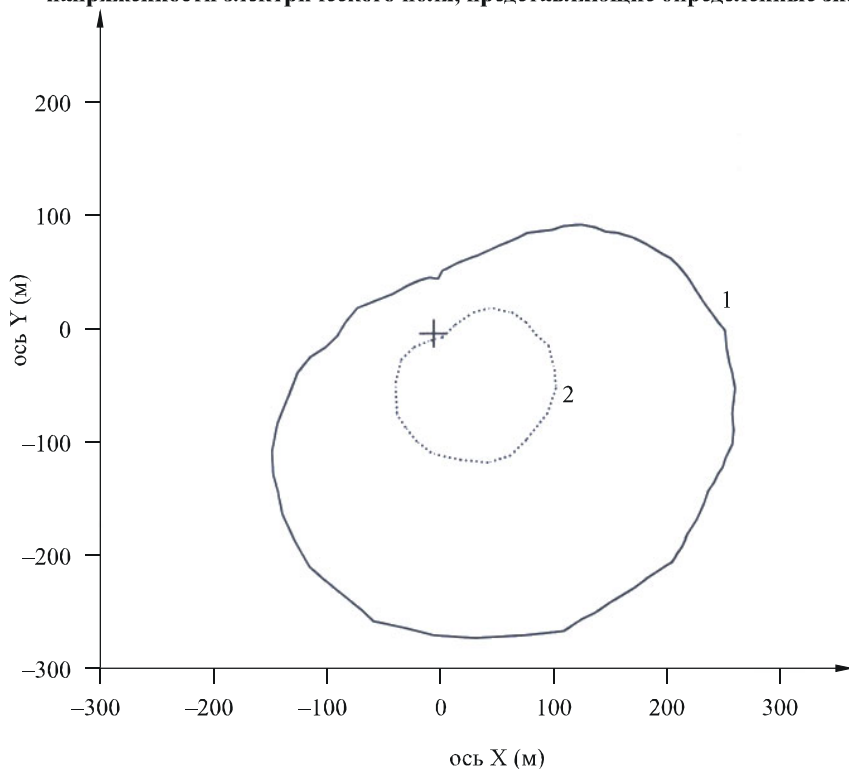
1 Пример А – Графики напряженностей электрического и магнитного полей

Согласно § 3 численные вычисления распределения напряженностей электрического и магнитного полей вблизи радиовещательных передающих антенн могут быть выполнены, чтобы определить, каковы напряженности поля в определенных точках или зонах. Это включает в себя, особенно, поле

ближней зоны, где структура поля в общем случае является очень усложненной. Вычисления могут быть также выполнены для проверки контуров полей (линий или поверхностей с постоянной напряженностью поля), где поддерживаются значимые предельные значения (уровни) ограничений электромагнитного поля. Этим способом возможно (например, в целях планирования) оценивать, какими могут быть расширенные значимые зоны, где могут быть или обязаны быть выполнены меры защиты.

В техническом документе Европейского радиовещательного союза (ЕСР) [2] приведено много результатов вычислений. В следующих рисунках некоторые результаты вычислений из этих примеров (радиовещательные передающие антенны СЧ и ВЧ) даются в виде графиков.

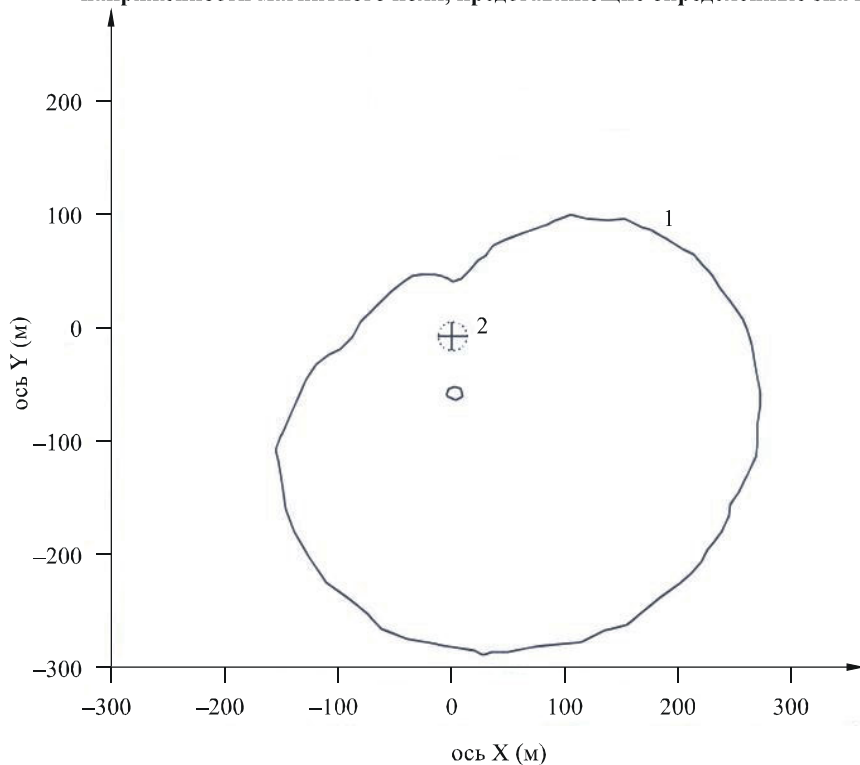
РИСУНОК 5
Несимметричный вибратор СЧ; контуры среднеквадратической напряженности электрического поля, представляющие определенные значения



1: ICNIRP (общая публикация) = 60 В/м
 2: 158 В/м
 E_{max} : 449,8 В/м
 Частота: 1422 кГц
 Мощность: 600 кВт
 Высота определения: 1,5 м над уровнем моря

РИСУНОК 6

Несимметричный вибратор СЧ; контуры среднеквадратической напряженности магнитного поля, представляющие определенные значения



1: ICNIRP (общая публикация) = 0,16 А/м

2: 1,3 А/м

H_{max} : 1,6 А/м

Частота: 1422 кГц

Мощность: 600 кВт

Высота определения: 1,5 м над уровнем моря

1698-06

РИСУНОК 7

Многовibratorная антенная решетка ВЧ; график опорного направления для среднеквадратичных значений напряженностей электрических полей частоте 6 МГц и мощности 500 кВт (1,5 м над уровнем земли)

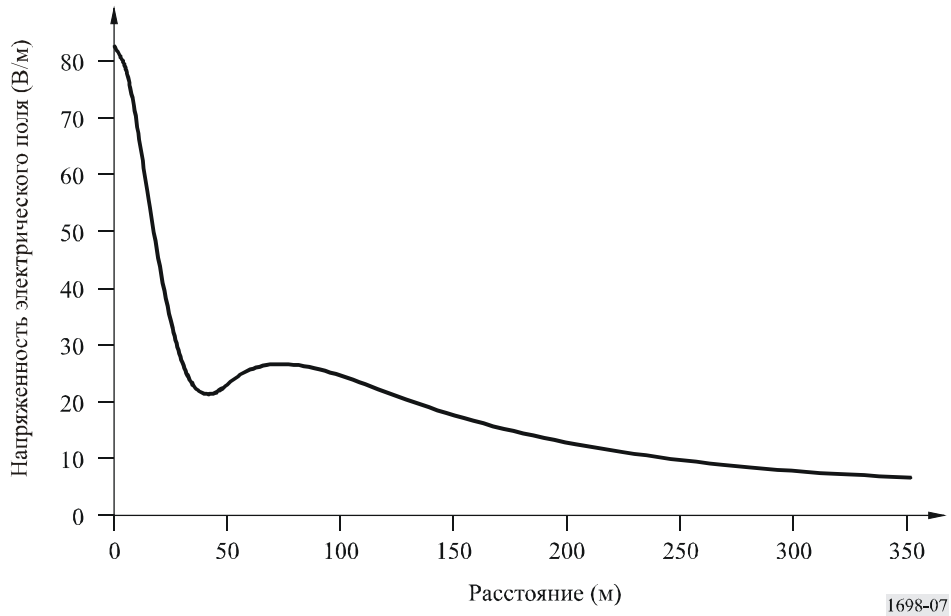
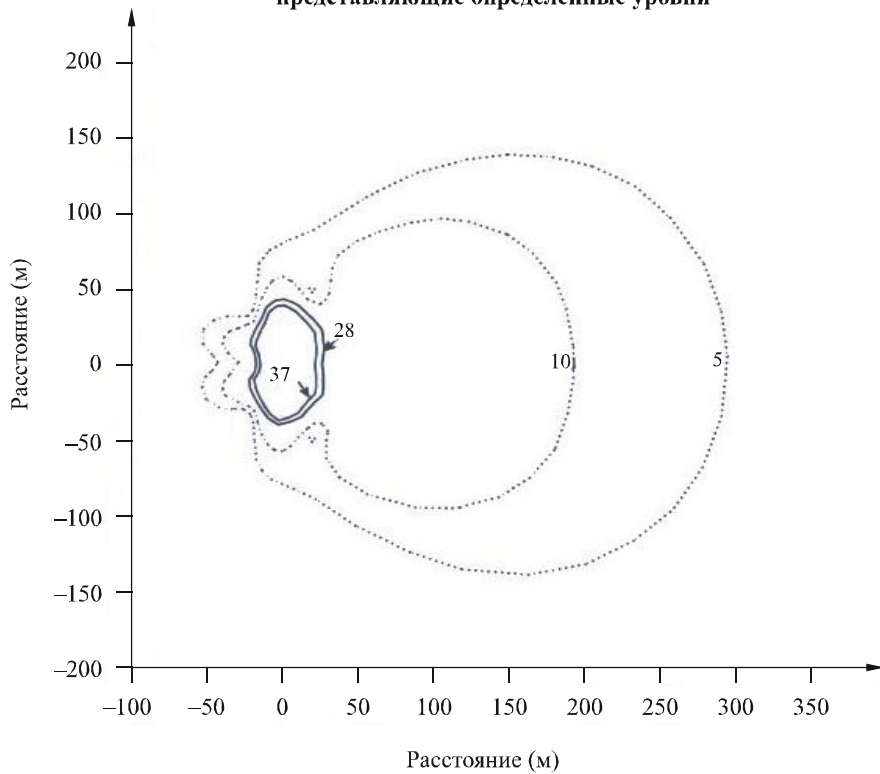


РИСУНОК 8

Многовibratorная антенная решетка ВЧ; контуры среднеквадратичных напряженностей электрических полей (В/м), представляющие определенные уровни

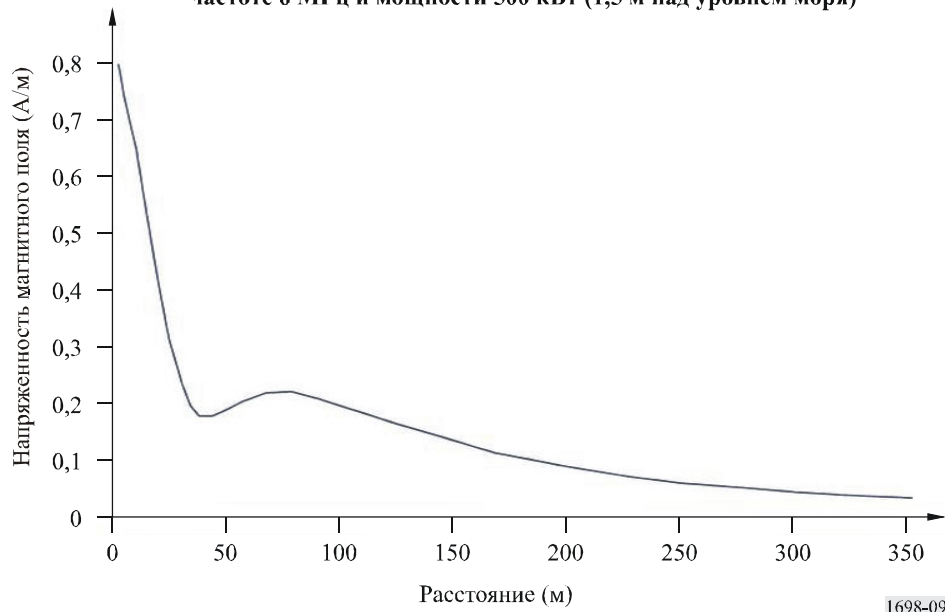


Мощность: 500 кВт
Частота: 6 МГц
Высота определения: 1,5 м над уровнем земли

1698-08

РИСУНОК 9

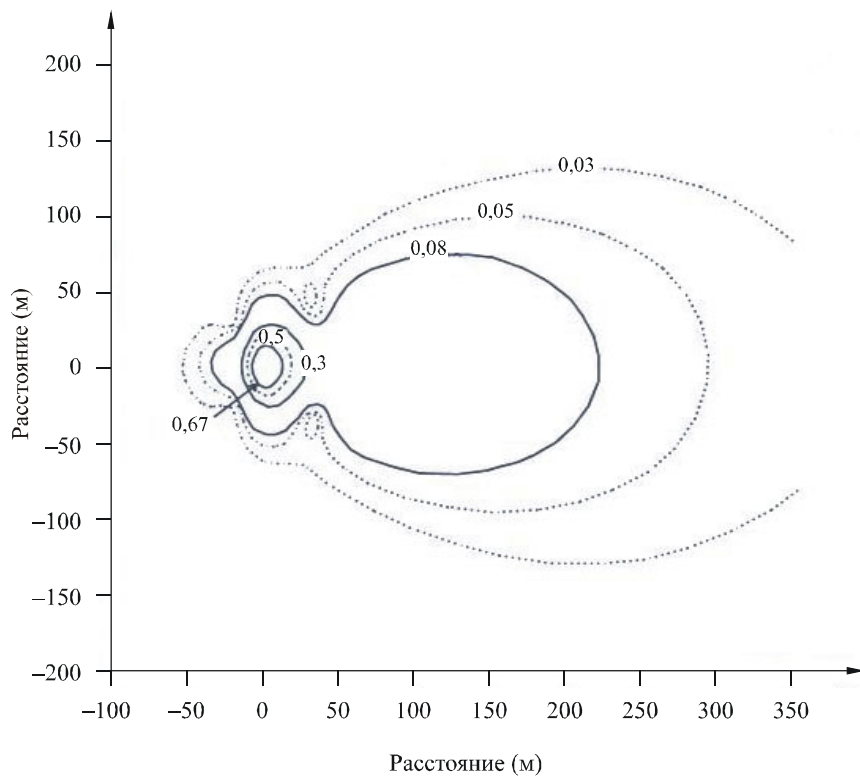
Многовibratorная антенная решетка ВЧ; график опорного направления для средневквдратичных значений напряженностей магнитных полей частоте 6 МГц и мощности 500 кВт (1,5 м над уровнем моря)



1698-09

РИСУНОК 10

Многовibratorная антенная решетка ВЧ; контуры средневквдратичных напряженностей магнитных полей (А/м), представляющих определенные уровни



Мощность: 500 кВт
Частота: 6 МГц
Высота определения: 1,5 м над уровнем моря

1698-10

2 Пример В – Определение напряженности магнитного поля в зоне ближнего поля антенн высокой мощности СЧ/НЧ

Этот пример имеет цель определить магнитную напряженность поля в зоне ближнего поля мачтовых антенн СЧ и НЧ (типа "несимметричных вибраторов"), решая интегральное уравнение Халлена (Hallen).

В полосах частот ниже 10 МГц физические отношения в электромагнитном поле являются намного более сложными. В отличие от микроволновых частот, где электромагнитное поле имеет характеристики поля в зоне дальнего поля даже на очень коротких расстояниях от источника излучения, и где понятие плотности излучаемой мощности (напряженность вектора Пойнтинга) является очень полезным, в полосе частот СЧ/НЧ поле вблизи антенны является очень сложным. Фактически, в зоне ближнего поля простая взаимосвязь между электрическими и магнитными полями больше не существуют: эти два поля не находятся в фазе и их отношение не равно 377Ω . Такой факт дополнительно усложняет взаимосвязи в электромагнитном поле ниже 10 МГц.

Ясно, что измеренные напряженности поля будут зависеть от типа передающей антенны, мощности передатчика и расстояния от передающей антенны. Например, в случае мощного передатчика, Е-компонент, напряженности полей на типичном антенном полигоне НЧ/СЧ могут находиться в диапазоне от нескольких В/м до более чем 250 В/м. Очень близко к передающим антеннам напряженность поля может быть порядка 1000 В/м.

3 Пример С – Ближнее электромагнитное поле передающих многовибраторных антенн ВЧ

3.1 Введение

Этот пример имеет дело со значительно более сложными антенными структурами, называемыми многовибраторными (синфазными) антеннами. Эти антенны очень важны для передачи с большой мощностью на коротких волнах (ВЧ). Они, фактически, являются антенными решетками из горизонтальных симметричных вибраторов, размещенных в вертикальной плоскости.

В радиовещании ВЧ явно декларируется общая тенденция к увеличению мощности и усиления передающих антенн. Мощность передатчика 500 кВт и усиление антенны (в направлении максимального излучения) более 20 дБ (относительно полуволнового симметричного вибратора) стали почти стандартными в больших передающих центрах для глобального покрытия. Передатчик мощностью 500 кВт с усилением антенны порядка 20 дБ производит действующую излучаемую мощность (э.и.м.) порядка 50 мегаватт.

В § 3.2 кратко описана численная методика, которая использовалась для вычисления электрических и магнитных полей в ближней зоне для антенн высокой мощности. Наконец, в § 3.3, даются результаты для полей вблизи многовибраторных (синфазных) антенн ВЧ.

3.2 Численный анализ структур из проводов

Вычисления полей в ближней зоне многовибраторных (синфазных) антенн были выполнены с использованием программы AWAS (*Analysis of Wire Antennas and Scatterers – Анализ антенн из проводов и рассеивателей*), которая является одной из нескольких программ, разработанных в Школе электротехники, Университет Белграда, для анализа антенн из проводов и рассеивателей. Кратко, программа основана на формулировке так называемого уравнения с двумя потенциалами для распределения тока вдоль проводов. Это уравнение решается с использованием метода МОМ с полиномиальным приближением для тока.

Рассматривается произвольная структура, расположенная в вакууме, и собранная из идеально проводящих сегментов прямых проводов. Согласно граничным условиям, на поверхностях проводов, тангенциальный компонент суммарного электрического поля должен быть равен нулю, т.е:

$$(\mathbf{E} + \mathbf{E}_i)_{\tan} = 0, \quad (13)$$

где:

\mathbf{E} : электрическое поле, произведенное токами и зарядами структуры провода

\mathbf{E}_i : приложенное электрическое поле, которое моделирует возбуждение к системе.

Приложенное поле может быть, например, электрическим полем случая плоской волны на структуре (при анализе рассеивателей или приемных антенн), или полем, расположенным в малой области в терминалах антенн, которое моделирует генератор, возбуждающий антенну (при анализе передающих антенн).

Электрическое поле, произведенное токами и зарядами проводов, может быть выражено в понятиях магнитного векторного потенциала, \mathbf{A} , и электрического скалярного потенциала, V , как:

$$\mathbf{E} = -j\omega \mathbf{A} - \text{grad}V, \quad (14)$$

где:

ω : угловая частота ($\omega = 2\pi f$).

Эти два потенциала, в свою очередь, могут быть выражены в понятиях плотностей поверхностных токов (\mathbf{J}_s) и зарядов (ρ_s), которые связаны уравнением непрерывности. Далее поверхностные токи и заряды аппроксимируются с помощью линейных токов и зарядов (аппроксимация тонких проводов), а структура провода разделяется на N сегментов (каждый из них имеющий местную ось, s_m). Наконец, уравнение с двумя потенциалами (также называемое векторно-скалярно-потенциальным уравнением) для распределения тока получается в форме:

$$\sum_{m=1}^N \int_0^{h_m} \left[\mathbf{u}_p \cdot \mathbf{u}_m I_m(s_m) g(r_a) + \frac{1}{k^2} \frac{dI_m(s_m)}{ds_m} \text{grad} g(r_a) \right] ds_m = \frac{\mathbf{u}_p \cdot \mathbf{E}_i}{j\omega\mu_0} \quad (15)$$

где:

I_m : напряженность тока вдоль сегмента провода

$k = \omega\sqrt{\epsilon_0\mu_0}$: коэффициент фазы свободного пространства

$g(r_a) = \frac{1}{4\pi} \frac{\exp(-jk r_a)}{r_a}$: соответствующая функция Грина

r_a : приближенное среднее расстояние между точкой на поверхности элемента провода ds_m и точкой поля.

Уравнение (15) является интегрально-дифференциальным уравнением для распределения тока, и оно может быть решено только численным методом. Для этой цели следуют общим руководящим принципам МОМ и аппроксимируют неизвестную функцию $I_m(s_m)$ с помощью ряда известных функций (основных функций), с неизвестными весовыми коэффициентами. В качестве основных функций выбираются простые степенные функции, которые составляют полиномиальное приближение распределения тока, т. е.:

$$I_m(s_m) = \sum_{i=0}^{n_m} I_{mi} \left(\frac{s_m}{h_m} \right)^i \quad (16)$$

где:

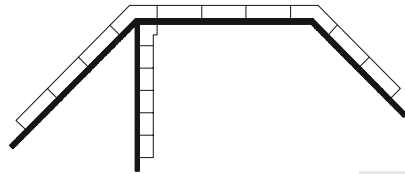
h_m : длина сегмента

I_{mi} : взвешивающие коэффициенты.

Уравнение (15) во всех точках вдоль сегмента провода не может быть удовлетворено в точности, а только приблизительно. Согласно методу МОМ выбирается набор взвешивающих функций, и

оцениваются скалярные произведения уравнения (15) и этих функций. Взвешивающие функции выбираются как импульсы. Каждый импульс является единичной константой, определенной на коротком подсегменте, и равен нулю во всем остальном промежутке. Типовое распределение импульсов показано на рисунке 11.

РИСУНОК 11
Типовое распределение взвешивающих функций импульсов, используемое в программе AWAS



1698-11

Для импульса, определенного на подсегменте (s_{p1}, s_{p2}) вдоль оси сегмента провода p , оценка скалярного произведения приводит к уравнению (17):

$$\sum_{m=1}^N \sum_{i=0}^{n_m} I_{mi} \left\{ \int_{s_{p1}}^{s_{p2}} \int_0^{h_m} \mathbf{u}_p \cdot \mathbf{u}_m \left(\frac{s_m}{h_m} \right)^i g(r_a) ds_m ds_p + \frac{1}{k^2} \frac{i}{h_m} \int_0^{h_m} \left(\frac{s_m}{h_m} \right)^{i-1} [g(r_a)_{s_{p2}} - g(r_a)_{s_{p1}}] ds_m \right\} + \sum_{i=0}^{n_p} I_{pi} \int_{s_{p1}}^{s_{p2}} \frac{Z'(s_p)}{j \omega \mu_0} \left(\frac{s_p}{h_p} \right)^i ds_p = \int_{s_{p1}}^{s_{p2}} \frac{\mathbf{u}_p \cdot \mathbf{E}_i}{j \omega \mu_0} ds_p \quad (17)$$

В этом уравнении, \mathbf{u}_p есть единичный вектор сегмента провода p , а Z' является импедансом на единицу длины возможной нагрузки импеданса, распределенной вдоль сегмента. При оценке для всех импульсов, уравнения формы (17) составляют систему линейных уравнений в I_{mi} , которая может быть решена численным методом.

Как только коэффициенты I_{mi} становятся известными, может быть оценено приблизительное распределение тока вдоль сегментов проводов. Эта часть Рекомендации имеет дело, прежде всего, с электрическими и магнитными полями в ближней зоне. Электрическое поле может быть оценено в понятиях двух потенциалов, подобным способом, как при получении уравнения с двумя потенциалами, т. е.:

$$\mathbf{E} = -j \omega \mu_0 \sum_{m=1}^N \sum_{i=0}^{n_m} I_{mi} \int_0^{h_m} \left[\mathbf{u}_m \left(\frac{s_m}{h_m} \right)^i g(r_a) + \frac{1}{k^2} \frac{i}{h_m} \left(\frac{s_m}{h_m} \right)^{i-1} \text{grad } g(r_a) \right] ds_m \quad (18)$$

Магнитное поле может быть выражено в понятиях магнитного векторного потенциала следующим образом:

$$\mathbf{H} = \frac{1}{\mu_0} \text{rot } \mathbf{A} \quad (19)$$

Когда этот потенциал выражается в понятиях токов проводников, окончательно получают:

$$\mathbf{H} = - \sum_{m=1}^N \sum_{i=0}^{n_m} I_{mi} \int_0^{h_m} \left(\frac{s_m}{h_m} \right)^i \mathbf{u}_m \times \text{grad } g(r_a) ds_m \quad (20)$$

3.3 Электрические и магнитные поля в ближней зоне многовibratorных (синфазных) антенн

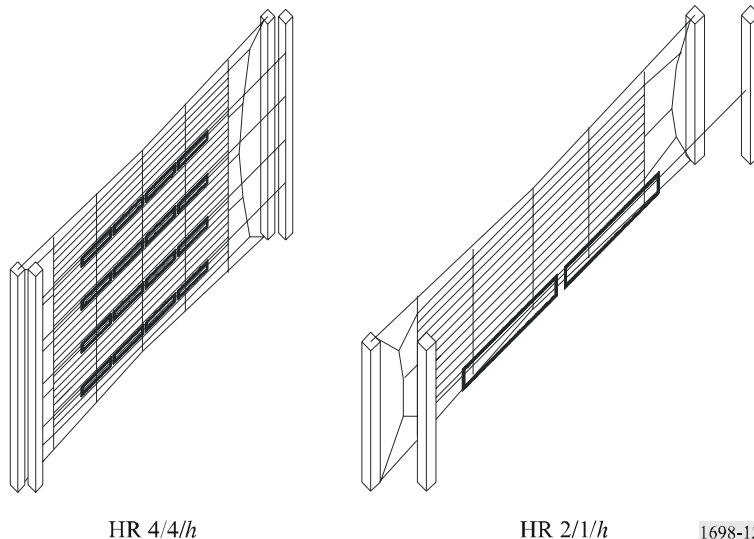
Имеется разнообразие таких передающих антенн большой мощности, используемых в диапазоне ВЧ (короткие волны), как горизонтальные симметричные вибраторы (обычно формирующие направляющую решетку), ромбические антенны и вертикальные несимметричные вибраторы. Целью исследования являются решетки горизонтальных симметричных вибраторов, размещенных в вертикальной плоскости, известные как многовibratorные (синфазные) антенны; этот вид решеток запланирован для использования в новом коротковолновом передающем центре "Радио Югославия", расположенном в г. Стублине (Stubline) около Белграда. Симметричные вибраторы (диполи) в многовibratorной решетке обычно являются полуволновыми симметричными вибраторами, либо простыми, либо свернутыми, которые питаются токами приблизительно равных амплитуд (но иногда отличающимися по фазам), чтобы произвести желательную диаграмму направленности излучения. Решетка обычно имеет пассивный отражатель, который в большинстве практических случаев состоит из сетки проводников (аперидический отражатель), но также может быть решеткой настроенных симметричных вибраторов. Многовibratorные решетки помечены как $H (R) (S) m/n/h$, где H обозначает решетку горизонтальных симметричных вибраторов, размещенных в вертикальной плоскости; R обозначает отражатель (если он присутствует); S обозначает сдвиг фазы (если присутствует) между токами, питающими смежные соосные симметричные вибраторы, чтобы сдвигать азимут главного луча; m обозначает количество соосных симметричных вибраторов в каждом ряду; n обозначает количество параллельных симметричных вибраторов, расположенных вертикально (обычно на расстоянии половины длины волны), т.е. количество рядов (отсеков); и h обозначает высоту самого нижнего ряда над поверхностью земли (в длинах волны).

Многовibratorные антенные решетки имеют превосходные свойства, включая высокое усиление (больше, чем 20 дБ), т.е. диаграмму направленности высокой эффективности, и возможности управления высокой мощностью (до 500 кВт). Следовательно, они играют очень важную роль в больших передающих центрах ВЧ. Центральной проблемой в этой Рекомендации является разработка точной и эффективной методики для оценки этих полей.

Антенное поле антенны нового центра ВЧ "Радио Югославия" имеет общее количество 15 горизонтально поляризованных антенн. Две из них являются квадрантными антеннами, со всенаправленной характеристикой, а тринадцать антенн являются многовibratorными (синфазными) антеннами из симметричных вибраторов (рисунок 12). Семь многовibratorных антенн содержат 16 свернутых симметричных вибраторов каждая, размещенных в четырех отсеках из четырех элементов ($HRS 4/4/h$), в то время как шесть многовibratorных антенных решеток содержат два свернутых симметричных вибратора каждая, размещенных в одном отсеке ($HR 2/1/h$). Все решетки имеют аперидический отражатель, выполненный из тонких горизонтальных проводов. Центр имеет два передатчика. Мощность каждого передатчика равна 500 кВт (немодулированная несущая частота), и есть возможность одновременно передавать две программы к различным пунктам назначения. Передатчики подключены к соответствующим антеннам через поле переключения антенн, которое расположено в комнате рядом с залом передатчика. Размещение антенного поля, со зданием и передатчиками показано на рисунке 13. Рисунок 14 показывает подробности одной антенны (В12).

РИСУНОК 12

Типовые многовibratorные антенны центра ВЧ "Радио Югославия"



HR 4/4/h

HR 2/1/h

1698-12

РИСУНОК 13

Планировка антенного поля центра ВЧ "Радио Югославия"

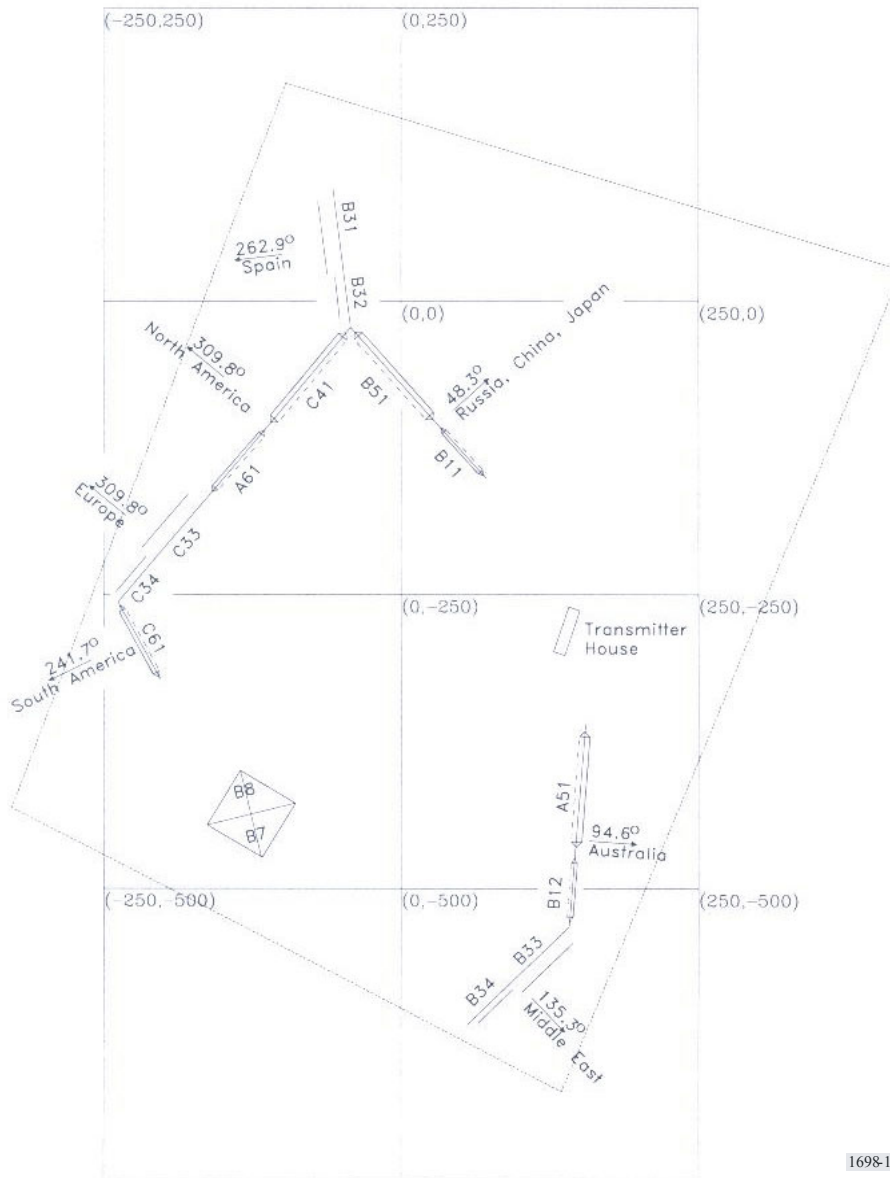
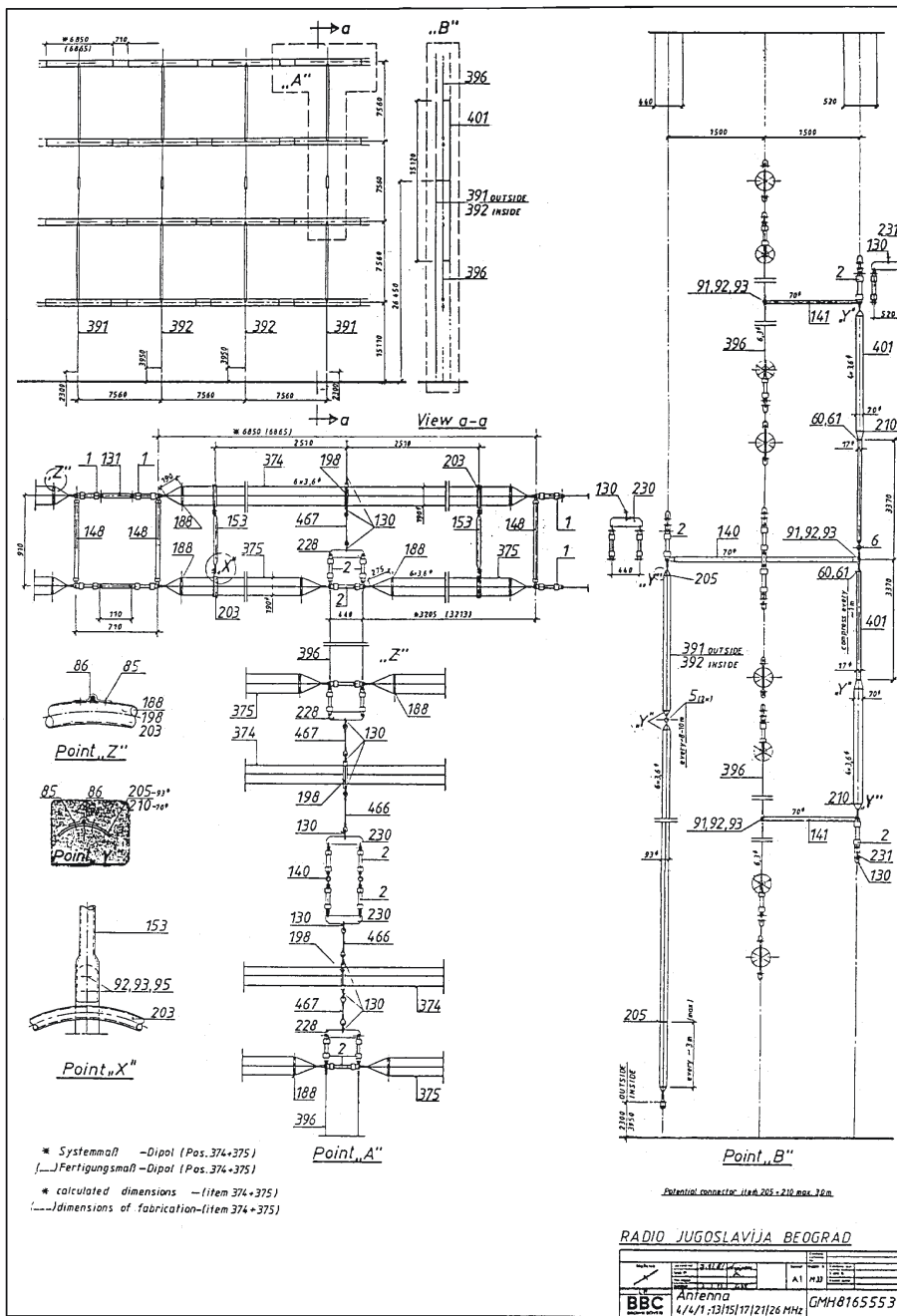


РИСУНОК 14

Подробный чертеж многовibratorной антенны В12 с симметричными вибраторами (HRS 4/4/1) центра ВЧ "Радио Югославия"



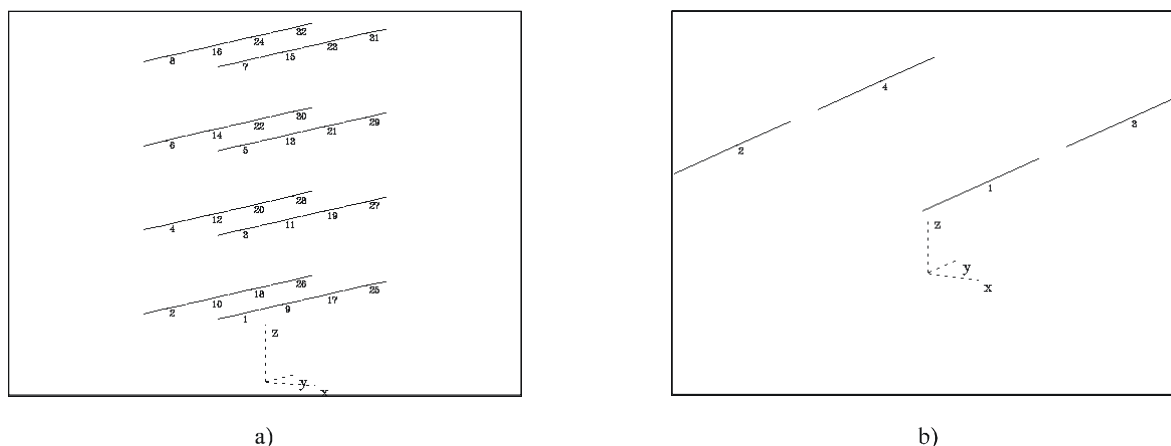
1698-14

В литературе, имеется немного статей, имеющих дело с вычислением электрических и магнитных полей многовibratorных (синфазных) антенн ВЧ, но все из них основаны на синусоидальной аппроксимации распределения тока вдоль симметричных вибраторов, и при условии, что токи, питающие симметричные вибраторы, имеют одинаковые амплитуды. Цель состоит в том, чтобы обеспечить более строгий анализ, используя более точное приближение для распределения тока, и принимая во внимание связь между элементами решетки, т.е. питаемая элементы напряжениями равной амплитуды.

Было экспериментально показано (и подтверждено теоретически используя синусоидальную аппроксимацию для тока распределения), что аппроксимация реальной почвы с помощью идеально проводящей плоскости приводит к точным результатам. Это упрощение является важным, так как оно позволяет непосредственно использовать программу AWAS, без каких-либо модификаций, поскольку она может обрабатывать антенны только выше идеальной земли. Существующий анализ был также ускорен путем взятия простых симметричных вибраторов вместо свернутых симметричных вибраторов. Это приближение было установлено для получения точных результатов. Длина простого симметричного вибратора в разработке частоты была взята несколько короче, чем половина длины волны, основываясь на данных, взятых из размеров фактического полотна антенны. Расстояние между точками питания смежных антенн всегда равно половине длины волны, как горизонтально, так и вертикально. Расстояние между симметричными вибраторами и отражателем составляло в точности четверть длины волны. Отражатель был промоделирован путем введения отрицательных отображений (в вертикальной плоскости) первоначальных симметричных вибраторов. Расстояние между первоначальными симметричными вибраторами и их соответствующими отображениями тем самым составляло половину длины волны. Рисунок 15 показывает модели AWAS типичных многовибраторных антенн центра ВЧ "Радио Югославия".

РИСУНОК 15

Модель AWAS для случая а) антенны HRS 4/4/h и случая б) антенны HR 2/1/h



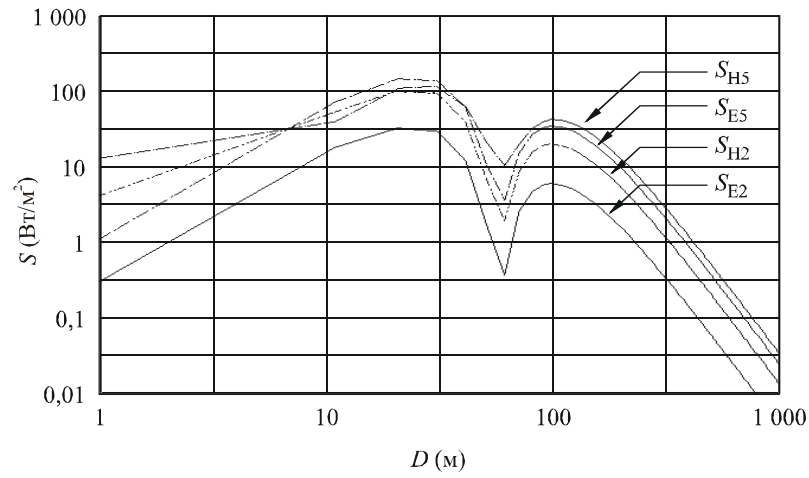
1698-15

Электрические и магнитные поля в ближней зоне были оценены в направлении максимума диаграммы направленности излучения (поскольку поле в направлении побочных лепестков оказалось существенно более слабым). Поля были оценены при возвышениях $z = 2$ м, для оценки опасностей излучений для штата центра, который мог передвигаться по открытому полю центра, и $z = 5$ м для общего населения, принимая во внимание возможное проживание в двухэтажных зданиях.

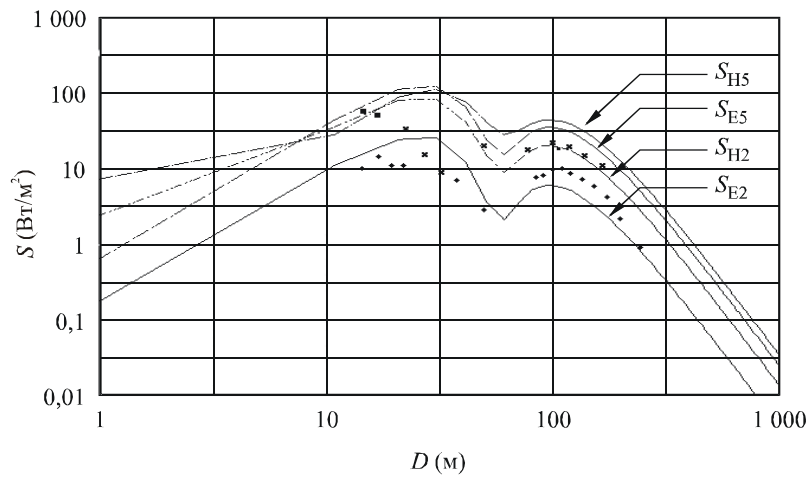
Результаты анализа сначала были сравнены с результатами для антенн HRS 4/4/1. Рабочая частота антенны – 15,245 МГц, а подаваемая мощность – 500 кВт. Рисунок 16а) показывает результаты для "эквивалентного" вектора Пойнтинга, оцененного с помощью AWAS, когда предполагалось, что симметричные вибраторы питаются идентичными токами. Рисунок 16б) показывает одинаковые результаты, но при использовании симметричных вибраторов, питаемых одинаковыми напряжениями, наряду с измеренными данными в $z = 2$ м. Соглашение между теоретическими и экспериментальными данными является хорошим. Очевидно, что питание антенны с равными напряжениями приводит к лучшему предсказанию фактического поля, в особенности, около провала на расстоянии в 70 м от антенны.

РИСУНОК 16

"Эквивалентный" вектор Пойнтинга антенны HRS 4/4/1, оцениваемый с помощью программы AWAS, когда симметричные вибраторы питаются с помощью а) идентичных токов и б) идентичных напряжений вместе с экспериментальными данными (точки)



а)



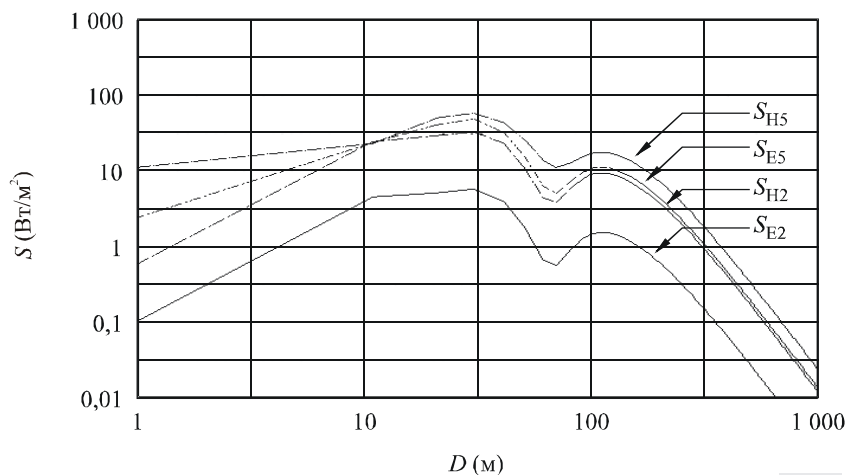
б)

1698-16

Доверяя численной методике, использованной для вычисления полей в ближней зоне, были оценены поля всех многовibratorных антенн нового центра "Радио Югославия". Два показательных примера показаны на рисунках 17 и 18.

РИСУНОК 17

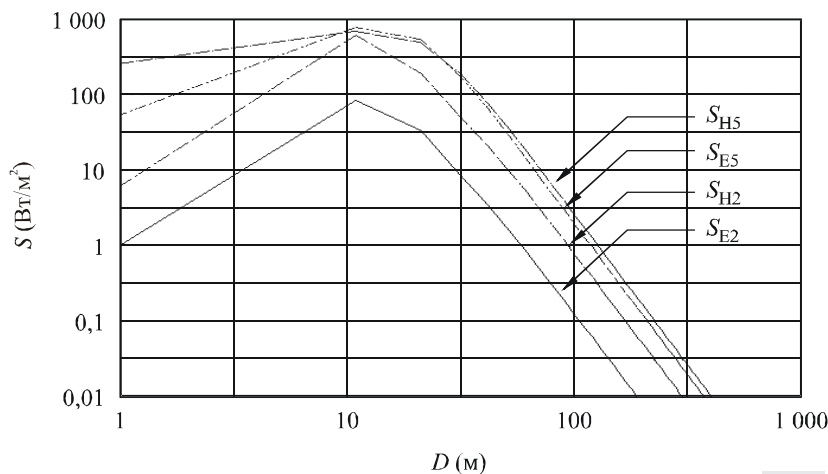
"Эквивалентный" вектор Пойнтинга антенны A51 (HRS 4/4/0,5), работающей на частоте 9,63701 МГц. Безопасное расстояние от антенны для личного состава центра равно 50 м, а для населения 300 м



1698-17

РИСУНОК 18

"Эквивалентный" вектор Пойнтинга антенны C34 (HR 2/1/0,5), работающей на частоте 10,67996 МГц. Безопасное расстояние от антенны для личного состава центра равно 70 м, а для населения 130 м



1698-18

4 Выводы

Электрическое и магнитное поля в ближней зоне вблизи передающей многовibratorной антенны ВЧ с большой мощностью были исследованы теоретически, используя программу AWAS. Теория была применена конкретно к антеннам нового центра "Радио Югославия". Были определены безопасные зоны для людей вблизи этих антенн. Представлены результаты для полей в ближней зоне многовibratorных (синфазных) антенн, впервые применив строгую теорию, и оказалось, что они находятся в хорошем согласии с экспериментальными данными, опубликованными в другом месте.

Дополнение 2 к Приложению 1

Сравнение между предсказаниями и измерениями

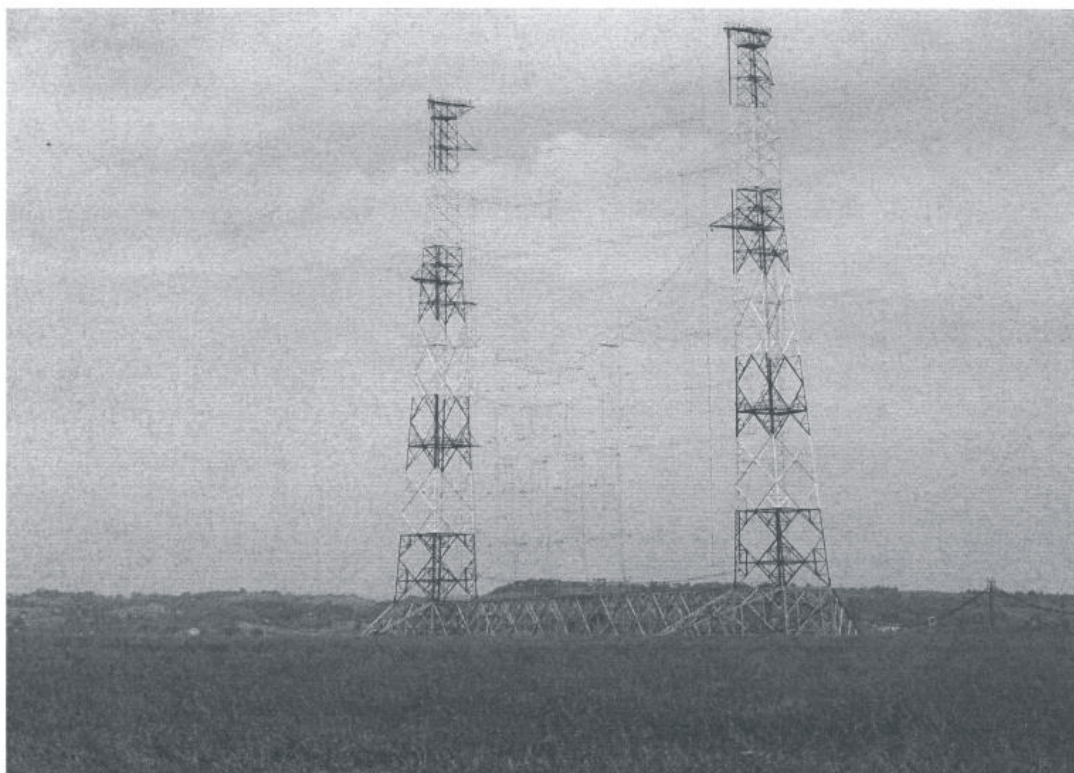
1 Предисловие

Моделирование и измерения были отдельно выполнены различным персоналом без взаимного обмена информацией, чтобы избежать обоюдных влияний в работе и в результатах.

Антенная система была промоделирована только частично, поскольку она является особенно сложной (см. § 1.1 для модели антенны).

Измерения и предсказания были выполнены на антенной системе, представленной на рисунках 19 и 20, которая способна работать в полосе коротких волн; сравнения были сделаны на частотах 13 МГц и 18 МГц.

РИСУНОК 19
Антенная система



1.1 Модель, используемая для антенной системы

Антенная система, показанная на рисунке 19, выполнена из горизонтально поляризованной решетки из 16 свернутых симметричных вибраторов, расположенных впереди отражателя, который реализован с помощью сети проводников. Симметричные вибраторы питаются с помощью бифилярных линий, формирующих сложную согласующую сеть импедансов; все бифилярные линии согласующей сети импеданса, представленные на рисунке 20, главным образом являются расположенными вертикально (ортогонально по отношению к симметричным вибраторам); некоторые горизонтальные линии являются сравнительно короткими и ортогонально расположенными, как по отношению к симметричным вибраторам, так и фидерам, вдоль направления распространения. В основании антенны размещены другие бифилярные линии, используемые для расщепления мощности РЧ среди четырех "стоек" четырех симметричных вибраторов.

РИСУНОК 20

Согласующая и питающая сеть



1698-20

Чтобы упростить модель и избежать ненужных подробностей, а тем самым и последующего более продолжительного времени вычисления, полная система была промоделирована как простая решетка из 16 симметричных вибраторов, как на рисунке 21; каждый вибратор питался своим собственным генератором напряжения, безошибочно сфазированным со всеми другими генераторами, без потребности моделировать согласующую/питающую сеть. Кроме того, каждый свернутый симметричный вибратор, физически реализованный парой параллельных проводов, свернутых на краях, был промоделирован как свернутый симметричный вибратор из отдельного провода, соответствующего поперечного сечения, чтобы получить одинаковое значение импеданса.

Наконец, каждый симметричный вибратор был представлен 24 сегментами, каждый длиной не более $\lambda/20$, как показано на рисунке 22.

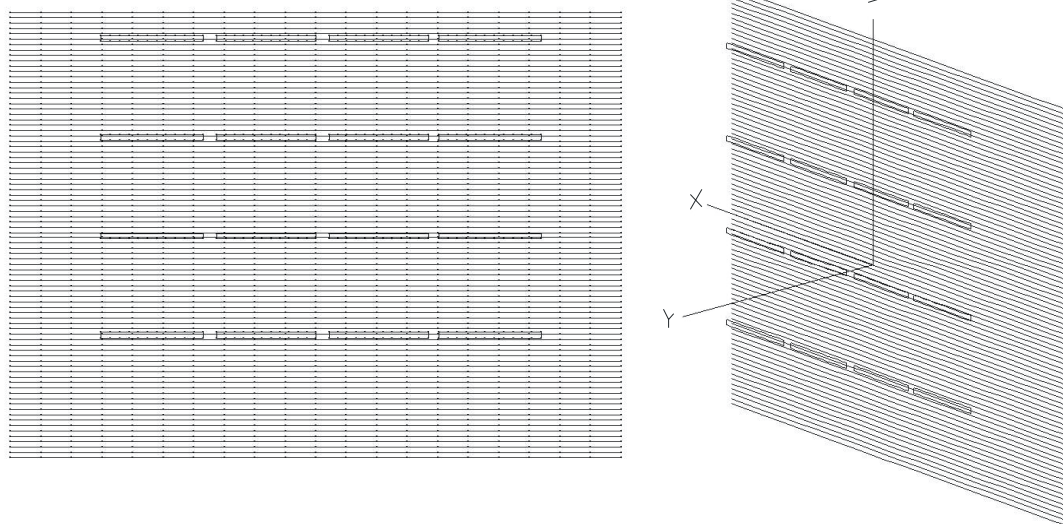
1.2 Преимущества и ограничения осуществленной модели антенной системы

Наиболее важным преимуществом является исключительная простота осуществленной модели в сравнении со сложностью реальной антенной системы. С помощью этого метода имеется возможность получать сравнительно короткое время вычисления (около десяти минут на компьютере Pentium 4 с частотой 2 ГГц).

Другим преимуществом является возможность легкой настройки модели, если необходимо, чтобы лучше представить реальную систему. Фактически, в общем случае результат первого сравнения между моделированием и измерениями представляет хорошую обратную связь для выполнения некоторых настроек на первой модели. Самым важным ограничением в простой принятой модели является невозможность правильно принять во внимание вклад сложной согласующей/питающей сети в компоненты x , y , z полей. Фактически некоторое количество мощности излучается бифилярными согласующими линиями, которые работают в режиме стоячей волны. По этой причине в результате предсказания вертикальный компонент поля E не появляется (компонент z), так же как горизонтальный компонент в направлении распространения (компонент y), за исключением некоторых случаев, где значения являются весьма низкими; подобное поведение является видимым для компонента x поля H . Это возникает из-за того, что предсказание было сделано без учета вертикальных излучателей и излучателей в направлении распространения. В результатах измерения, наоборот, и вертикальный (z) и горизонтальный (y) компоненты поля E присутствуют, так же как и горизонтальный (x) компонент поля H , вызывая некоторые проблемы в прямом сравнении. Самое приемлемое решение состоит в том, чтобы рассматривать эти два компонента как порожденные величиной мощности, которая не достигает решеток симметричных вибраторов; их вклад в измеренное поле следует учитывать внутри горизонтального компонента (x) в результате моделирования. Иными словами, горизонтальный вклад (x), являющийся результатом моделирования, должен сравниваться с общим результатом измерений, полученным как квадратный корень из суммы квадратов вкладов, измеренных на осях x , y , z .

РИСУНОК 21

Модель решетки из симметричных вибраторов и ее ориентация в трехосной системе X, Y, Z . Каждый симметричный вибратор питается своим собственным генератором, который находится в фазе с другими генераторами. Вклады $E_x, E_y, E_z, H_x, H_y, H_z$ полей E и H в точке оценивания имеют ту же самую ориентацию осей X, Y, Z



1698-21

РИСУНОК 22

Модель отдельного симметричного вибратора. Симметричный вибратор моделируется с помощью 24 сегментов, каждый из которых короче, чем $\lambda/20$. Возбуждение прилагается в центре верхнего или нижнего плеча, в средней точке центрального сегмента



1698-22

2 Сравнение между предсказанием и измерениями

2.1 13 МГц

2.1.1 Предсказания

2.1.1.1 Замечания относительно модели

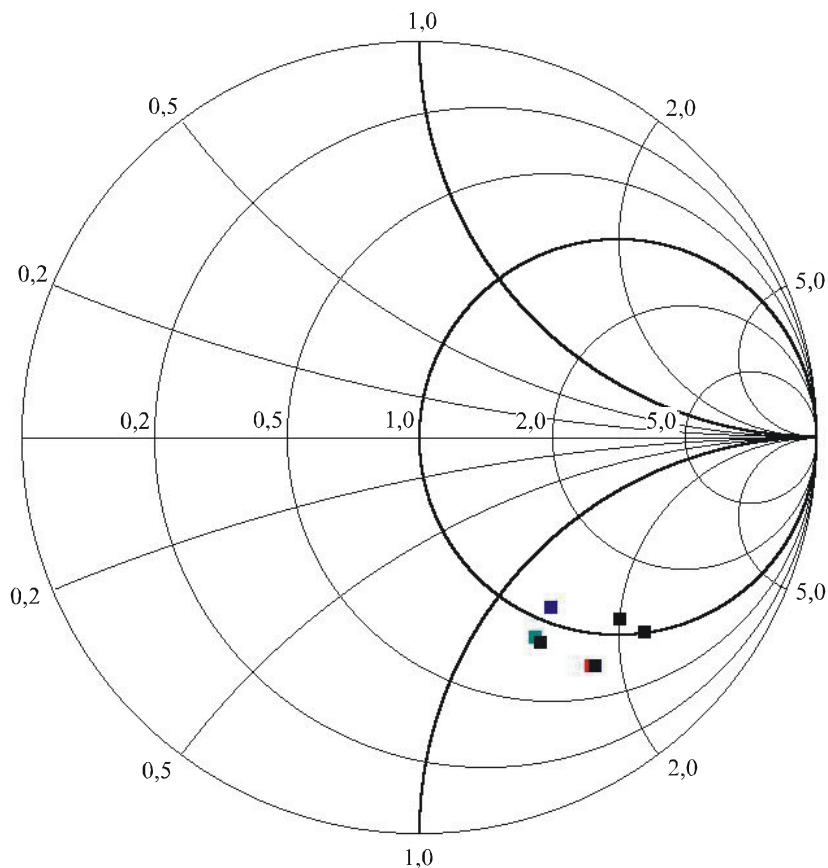
Чтобы предварительно описанной модели наилучшим образом соответствовать реальной антенной системе, необходимо знать правильную величину мощности на входе каждого симметричного вибратора, принимая во внимание потери в линии передачи.

Чтобы применять соответствующее значение напряжения в каждом симметричном вибраторе, при моделировании был вычислен входной импеданс каждого симметричного вибратора. Значения даны на рисунке 23.

РИСУНОК 23

Входной импеданс симметричных вибраторов, полученный путем моделирования, нормированный относительно 600 Ω . Отметим малую – но существующую – дисперсию значений сопротивлений около 600 Ω

13 МГц, импедансы симметричных вибраторов (приведенные к 600 Ω)



1698-23

Затем для каждого симметричного вибратора было принято общее значение сопротивления, равное 600Ω , будучи средним значением, полученным из моделирования. Отметим, что это решение может быть причиной неточности в результатах предсказаний.

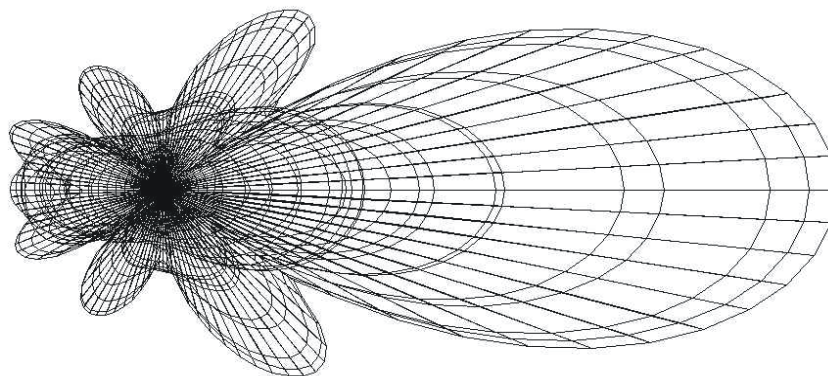
Чтобы компенсировать несоответствие главным образом из-за реактивного компонента и последующего отражения мощности по направлению к передатчику, было учтено соответствующее увеличение мощности. Следовательно, в каждом симметричном вибраторе было применено соответствующее напряжение.

2.1.1.2 Оценки полей в дальней зоне

Чтобы лучше всего сравнивать поведение модели с реальными антеннами, приведенными на рисунках 19 и 20, были вычислены диаграммы излучений. Результаты показаны на рисунке 24 (горизонтальная плоскость), рисунке 25 (вертикальная плоскость) и рисунке 26 (фронтальный вид).

РИСУНОК 24

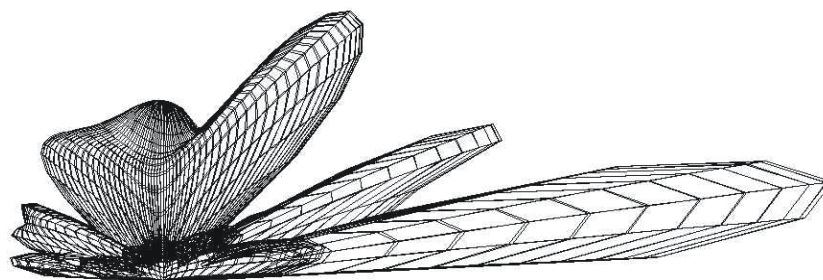
Диаграмма излучения в горизонтальной плоскости



1698-24

РИСУНОК 25

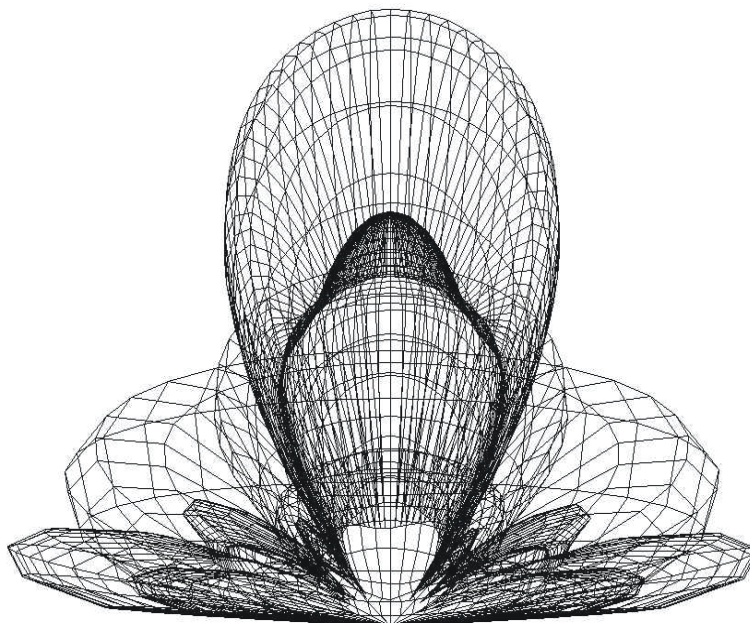
Диаграмма излучения в вертикальной плоскости



1698-25

РИСУНОК 26

Диаграмма излучения, фронтальный вид



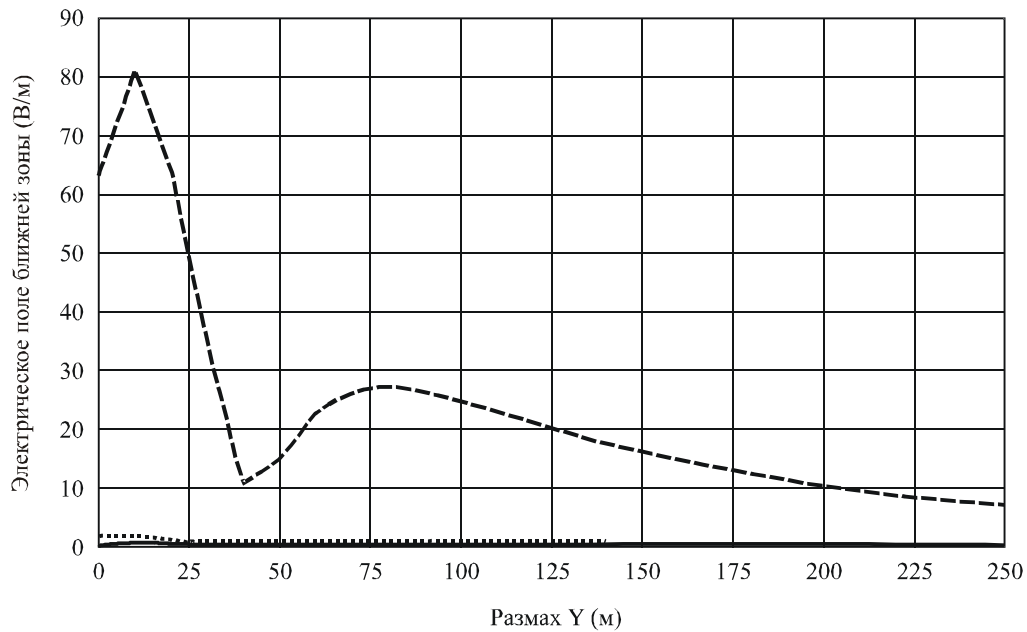
1698-26

2.1.1.3 Результаты предсказания напряженности поля в ближней зоне

Предсказание было выполнено путем вычисления компонент x , y , z полей E и H в направлении максимального усиления антенны (ось Y) в 2 м над местностью (ось $Z = 2$). Вычисленные значения представлены на рисунке 27 (поле E) и на рисунке 28 (поле H). Сильное влияние местности, как в оценках, так и в измерениях, может ввести дополнительное различие между двумя результатами. Чтобы показать сильное влияние местности, были также рассчитаны значения полей E и H , изменяя высоту точки оценивания над местностью (ось Z) от 0 до 9 м на фиксированном расстоянии 60 м. ($Y = 60$). Поведение иллюстрируется на рисунке 29 (поле E) и на рисунке 30 (поле H).

РИСУНОК 27

Вычисленная напряженность поля E в ближней зоне



13 МГц, электрическое поле ближней зоны в зависимости от расстояния.

Мощность передатчика: 225 кВт в антенном соединителе.

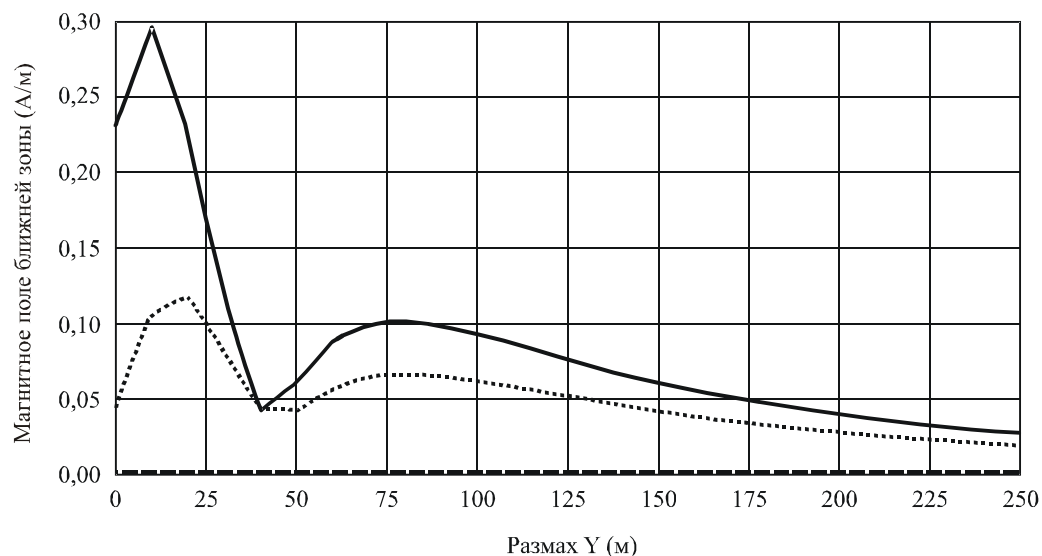
Высота: 2 м над местностью

- Электрическое поле ближней зоны (X), размах Y, константы: X = 0, Z = 2; CORT13
- Электрическое поле ближней зоны (Y), размах Y, константы: X = 0, Z = 2; CORT13
- Электрическое поле ближней зоны (Z), размах Y, константы: X = 0, Z = 2; CORT13

1698-27

Наиболее важным вкладом является компонент x. Горизонтальная ось представляет собой расстояние от антенны в метрах (размах Y). Z зафиксировано на величине 2 м (высота над местностью). Напряженность компонент поля E представляется в В/м на вертикальной оси.

РИСУНОК 28
Вычисленная напряженность поля Н в ближней зоне



13 МГц, магнитное поле ближней зоны в зависимости от расстояния.

Мощность передатчика: 225 кВт в антенном соединителе.

Высота: 2 м над местностью

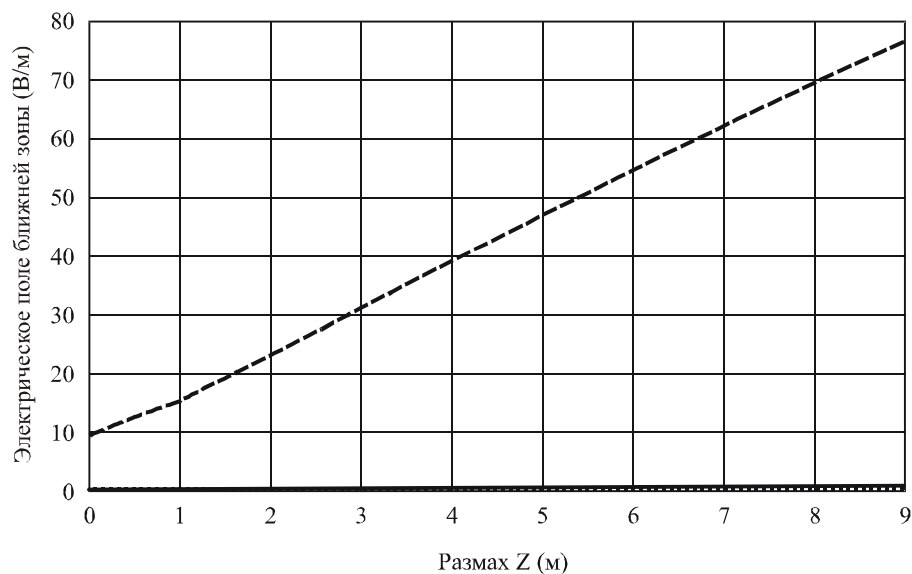
- Магнитное поле ближней зоны, mag (X), размах Y, константы: X = 0, Z = 2; CORT13
- Магнитное поле ближней зоны, mag (Y), размах Y, константы: X = 0, Z = 2; CORT13
- Магнитное поле ближней зоны, mag (Z), размах Y, константы: X = 0, Z = 2; CORT13

1698-28

Главным вкладом является компонент y . Компонент z будет ниже, тогда как компонент x равен 0. Горизонтальная ось представляет собой расстояние от антенны в метрах (размах Y). Z зафиксировано на величине 2 м (высота над местностью). Напряженность компонентов поля Н представляется в А/м на вертикальной оси.

РИСУНОК 29

Вычисленная напряженность поля E на расстоянии 60 м от антенны ($Y = 60$ м)
на различных высотах между 0 и 9 м (размах Z)



13 МГц, электрическое поле ближней зоны в зависимости от высоты @ 60 м от антенны.

Мощность передатчика: 225 кВт в антенном соединителе.

Высота: 2 м над местностью

----- Электрическое поле ближней зоны, $\text{mag}(X)$, размах Z , константы: $X = 0, Y = 60$; CORT13

————— Электрическое поле ближней зоны, $\text{mag}(Y)$, размах Z , константы: $X = 0, Y = 60$; CORT13

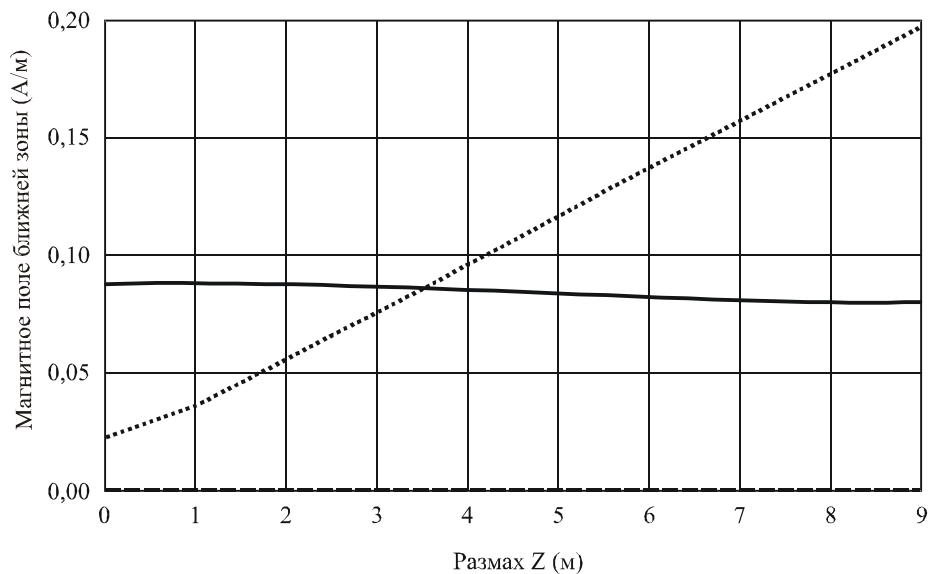
..... Электрическое поле ближней зоны, $\text{mag}(Z)$, размах Z , константы: $X = 0, Y = 60$; CORT13

1698-29

Сильная взаимосвязь между значениями E и высотой (присутствует только компонент x поля E) является очевидной.

РИСУНОК 30

Вычисленная напряженность поля H на расстоянии 60 м от антенны ($Y = 60$ м)
на различных высотах между 0 и 9 м (размах Z)



13 МГц, магнитное поле ближней зоны в зависимости от высоты @ 60 м от антенны.

Мощность передатчика: 225 кВт в антенном соединителе.

Высота: 2 м над местностью

- Магнитное поле ближней зоны, $\text{mag}(X)$, размах Z , константы: $X = 0, Y = 60$; CORT13
- Магнитное поле ближней зоны, $\text{mag}(Y)$, размах Z , константы: $X = 0, Y = 60$; CORT13
- Магнитное поле ближней зоны, $\text{mag}(Z)$, размах Z , константы: $X = 0, Y = 60$; CORT13

1698-30

Сильная взаимосвязь между значениями H и высотой (присутствуют оба компонента z и y поля H , значение компонента y является почти постоянным) также является очевидной.

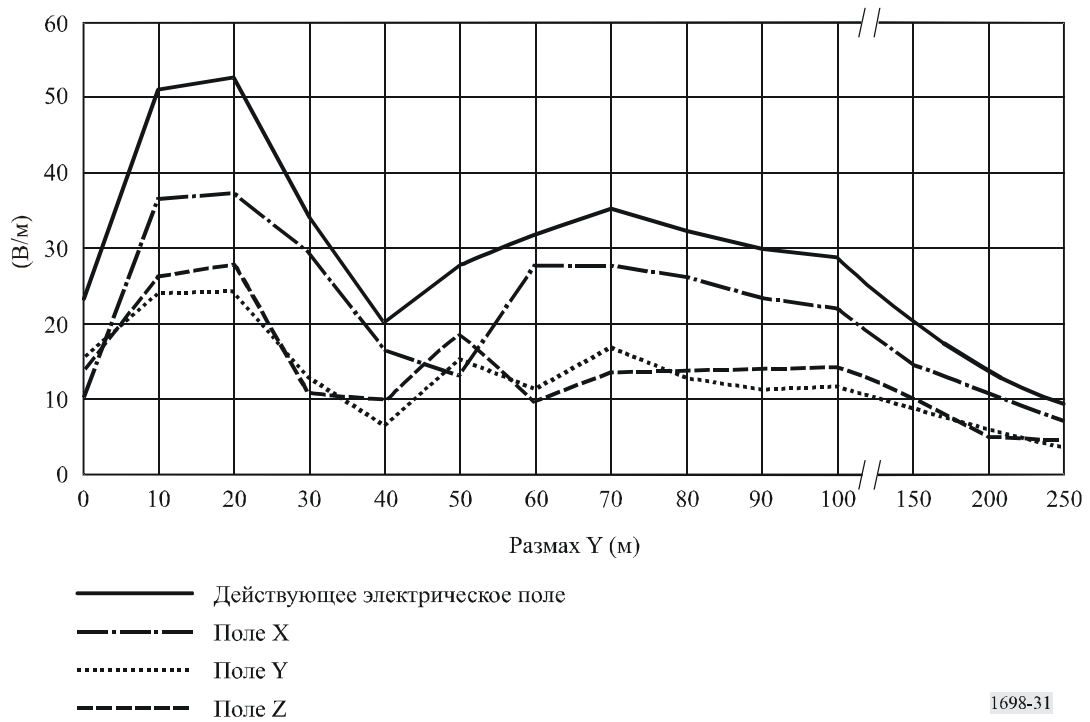
2.1.2 Измерения

Измерения были выполнены путем использования широкополосного измерителя напряженности поля, установленного на диэлектрической тележке, передвигаемой оператором, который размещался далеко от антенного полигона. Этими средствами избегали каких-либо возмущений полем E/H .

2.1.2.1 Результаты измерений

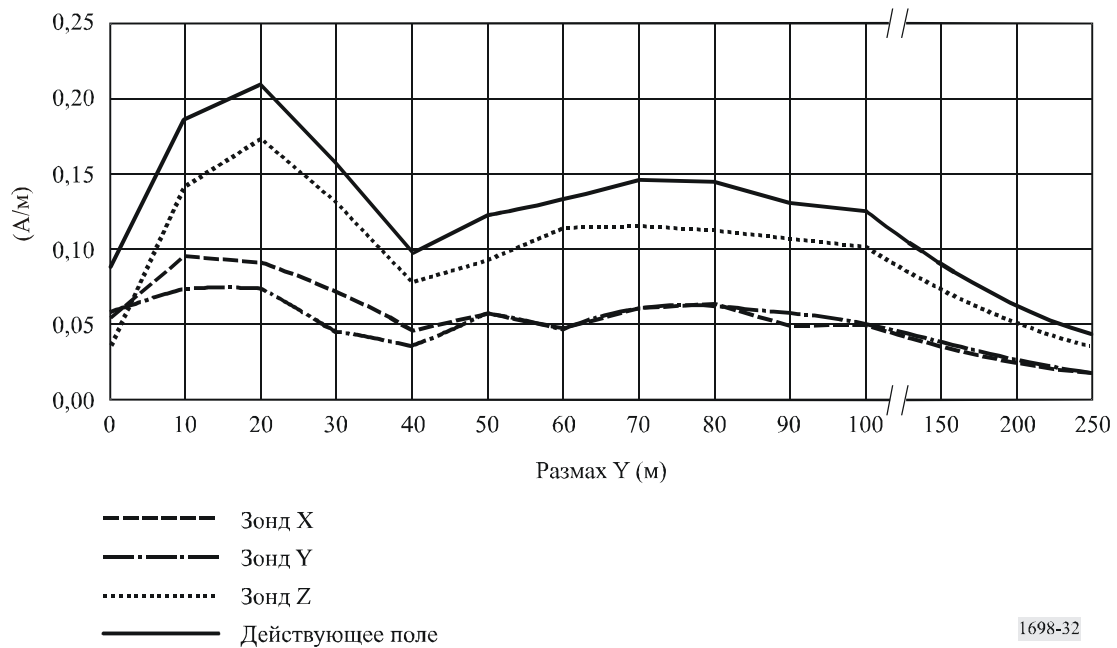
Измеренные значения представлены на рисунке 31 (поле E) и рисунке 32 (поле H). Рисунок 31 и рисунок 32 прямо сопоставимы с рисунком 27 и рисунком 28, соответственно.

РИСУНОК 31
Измеренное поле E



Горизонтальная ось представляет собой расстояние от антенны в метрах (размах Y). Компоненты напряженности поля E представляются в В/м на вертикальной оси. Присутствуют все три компонента x, y, z поля E, а верхняя линия представляет общее значение.

РИСУНОК 32
Измеренное поле H



Горизонтальная ось представляет собой расстояние от антенны в метрах (размах Y). Компоненты напряженности поля H представляются в A/m на вертикальной оси. Присутствуют все три компонента x, y, z поля H , а верхняя линия представляет общее значение.

2.2 18 МГц

2.2.1 Предсказания

2.2.1.1 Замечания относительно модели

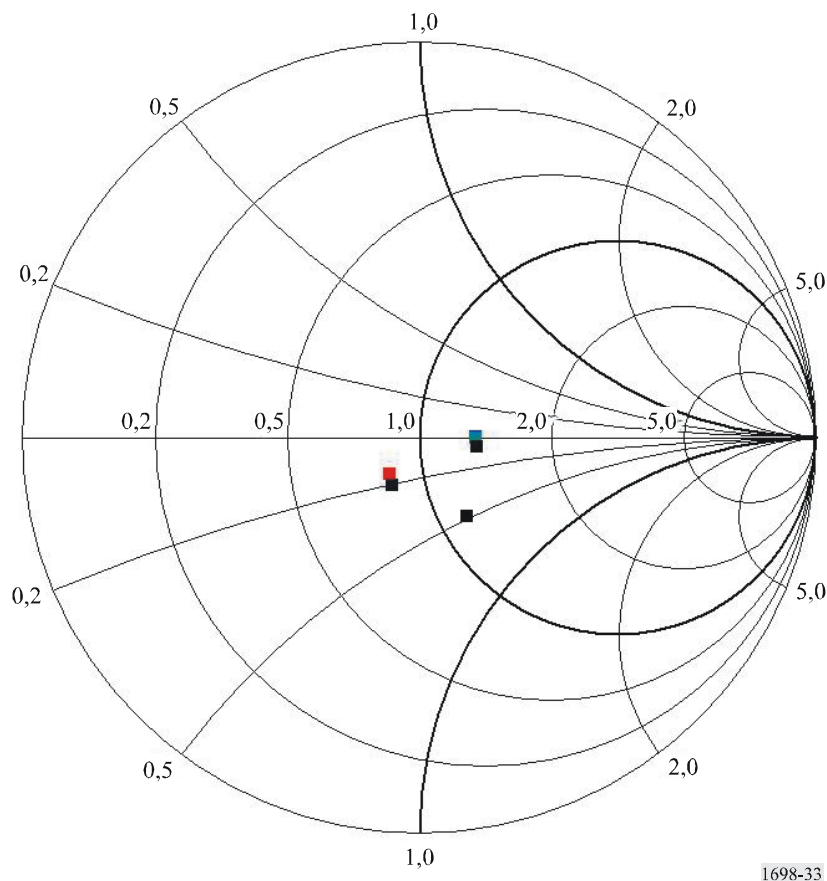
Чтобы предварительно описанной модели наилучшим образом соответствовать реальной антенной системе, необходимо знать правильную величину мощности на входе каждого симметричного вибратора, принимая во внимание потери в линии передачи и потери из-за рассогласования.

Чтобы применять соответствующее значение напряжения, при моделировании был вычислен входной импеданс каждого симметричного вибратора. Значения даны на рисунке 33.

РИСУНОК 33

Входной импеданс симметричных вибраторов, нормированный относительно 180Ω

18 МГц, импеданс симметричных вибраторов (нормированный относительно 180Ω)



1698-33

Затем для каждого симметричного вибратора было принято общее значение сопротивления, равное 180Ω , будучи средним значением, полученным из моделирования. Отметим, что это решение может быть причиной неточности в результатах предсказаний.

Из-за низких реактивных компонентов комплексного входного импеданса никакие подстройки для мощности передатчика не являются необходимыми для компенсации потерь мощности из-за рассогласования и последующего отражения между передатчиком и антенной.

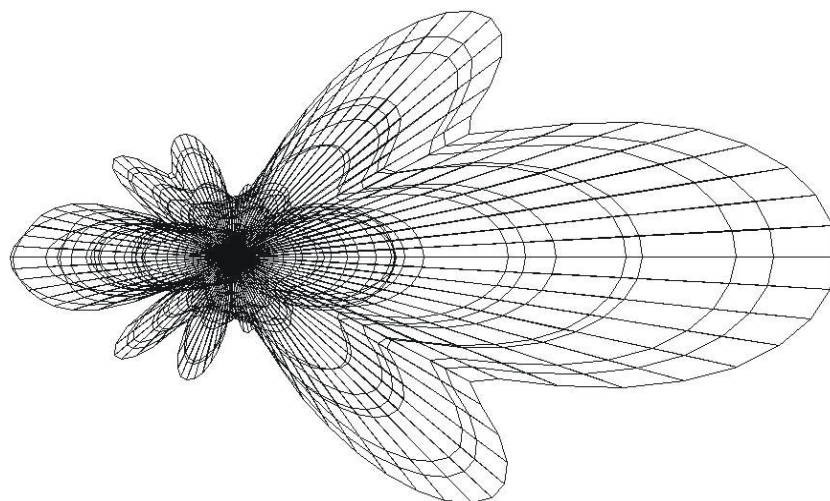
Отметим, малую – но существующую – дисперсию значений сопротивлений около 180Ω и существенное отсутствие реактивных компонентов.

2.2.1.2 Оценки полей в дальней зоне

Чтобы лучше всего сравнивать поведение модели с реальными антеннами, приведенными на рисунках 19 и 20, были вычислены диаграммы излучений. Результаты показаны на рисунке 34 (горизонтальная плоскость), рисунке 35 (вертикальная плоскость) и рисунке 36 (фронтальный вид).

РИСУНОК 34

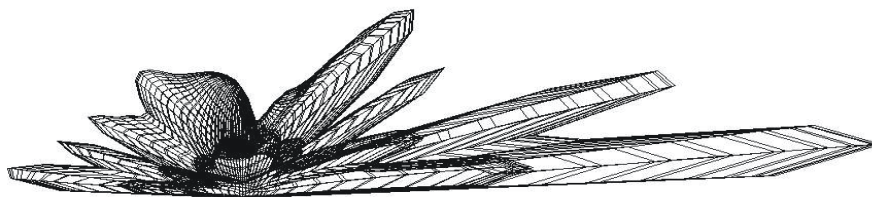
Диаграмма излучения в горизонтальной плоскости



1698-34

РИСУНОК 35

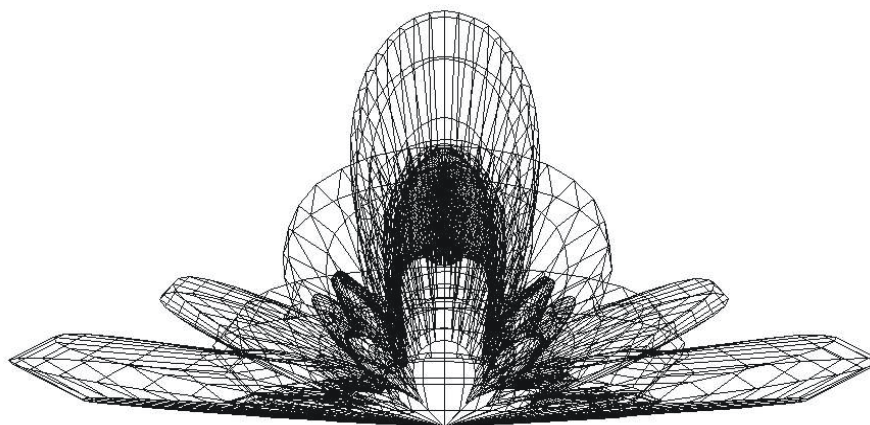
Диаграмма излучения в вертикальной плоскости



Rap 2037-35

РИСУНОК 36

Диаграмма излучения, фронтальный вид



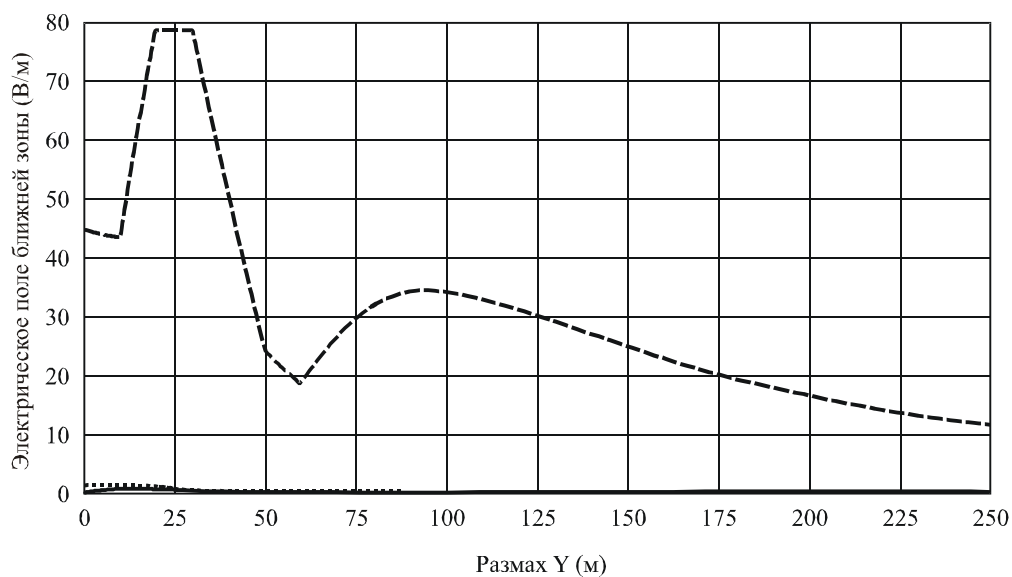
1698-36

2.2.1.3 Результаты предсказания напряженности поля в ближней зоне

Предсказание было выполнено путем вычисления компонент x , y , z полей E и H в направлении максимального усиления антенны (ось Y) на высоте 2 м над местностью (ось $Z = 2$). Вычисленные значения представлены на рисунке 37 (поле E) и на рисунке 38 (поле H). Сильное влияние местности, как в оценках, так и в измерениях, может ввести дополнительное различие между двумя результатами. Чтобы показать сильное влияние местности, были также рассчитаны значения полей E и H , изменяя высоту точки оценивания над местностью (ось Z) от 0 до 9 м на установленном расстоянии 60 м. ($Y = 60$). Поведение иллюстрируется на рисунке 39 (поле E) и на рисунке 40 (поле H).

РИСУНОК 37

Вычисленная напряженность поля E в ближней зоне



18 МГц, электрическое поле ближней зоны в зависимости от расстояния.

Мощность передатчика: 200 кВт в антенном соединителе.

Высота: 2 м над местностью

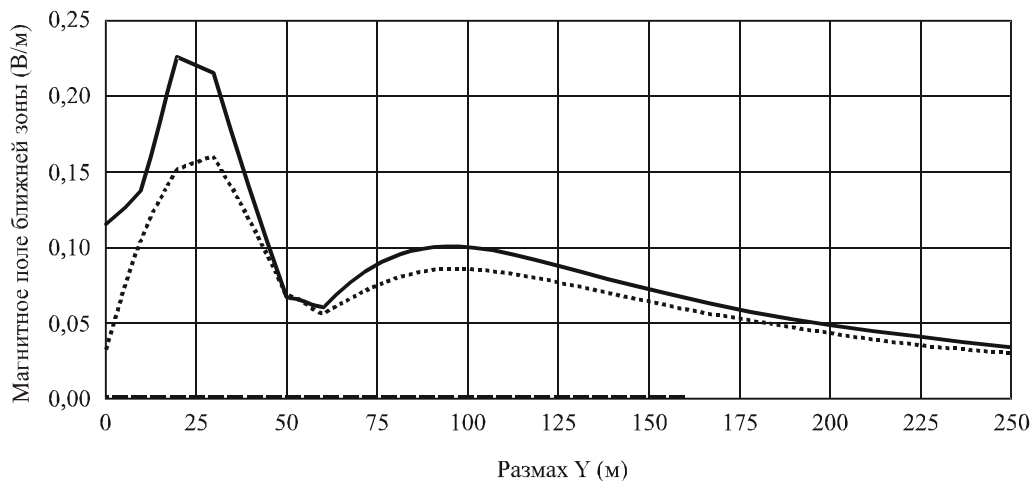
- Электрическое поле ближней зоны, tag (X), размах Y, константы: X = 0, Z = 2; CORT18
- Электрическое поле ближней зоны, tag (Y), размах Y, константы: X = 0, Z = 2; CORT18
- Электрическое поле ближней зоны, tag (Z), размах Y, константы: X = 0, Z = 2; CORT18

1698-37

Наиболее важным вкладом является компонент x . Горизонтальная ось представляет собой расстояние от антенны в метрах (размах Y). Z зафиксировано на величине 2 м (высота над местностью). Напряженность компонент поля E представляется в В/м на вертикальной оси.

РИСУНОК 38

Вычисленная напряженность поля Н в ближней зоне



18 МГц, магнитное поле ближней зоны в зависимости от расстояния.

Мощность передатчика: 200 кВт в антенном соединителе.

Высота: 2 м над местностью

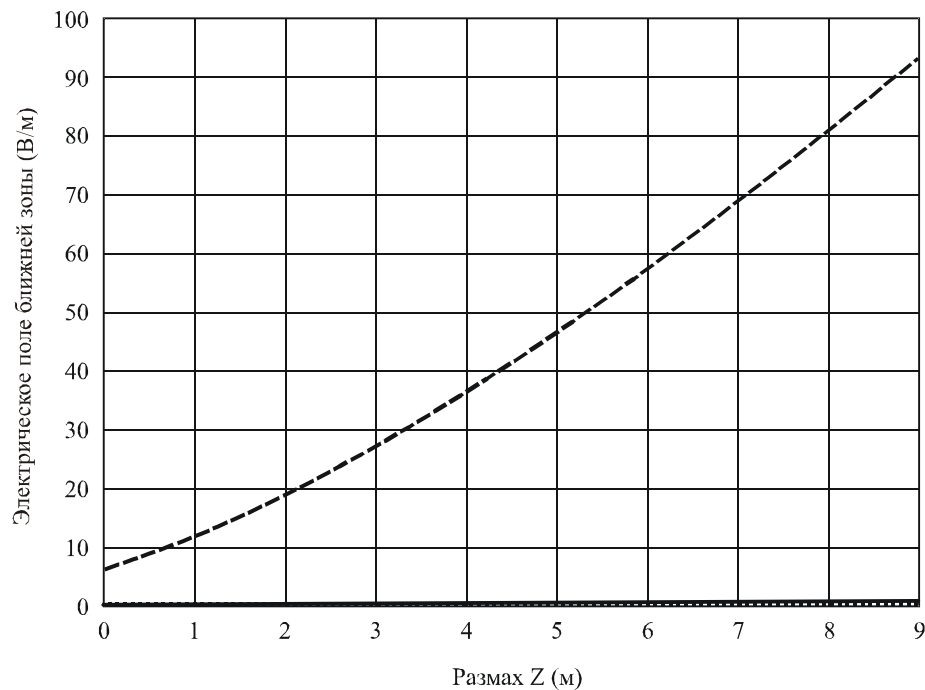
- Магнитное поле ближней зоны, $\text{mag}(X)$, размах Y, константы: $X = 0, Z = 2$; CORT18
- Магнитное поле ближней зоны, $\text{mag}(Y)$, размах Y, константы: $X = 0, Z = 2$; CORT18
- Магнитное поле ближней зоны, $\text{mag}(Z)$, размах Y, константы: $X = 0, Z = 2$; CORT18

1698-38

Главным вкладом является компонент y . Компонент z будет ниже, тогда как компонент x равен 0. Горизонтальная ось представляет собой расстояние в метрах от антенны (размах Y). Z зафиксировано на величине 2 м (высота над местностью). Напряженность компонентов поля Н представляется в А/м на вертикальной оси.

РИСУНОК 39

Вычисленная напряженность поля E на расстоянии 60 м от антенны ($Y = 60$)
на различных высотах между 0 и 9 м (размах Z)



18 МГц, электрическое поле ближней зоны в зависимости от высоты @ 60 м от антенны.
Мощность передатчика: 200 кВт в антенном соединителе.

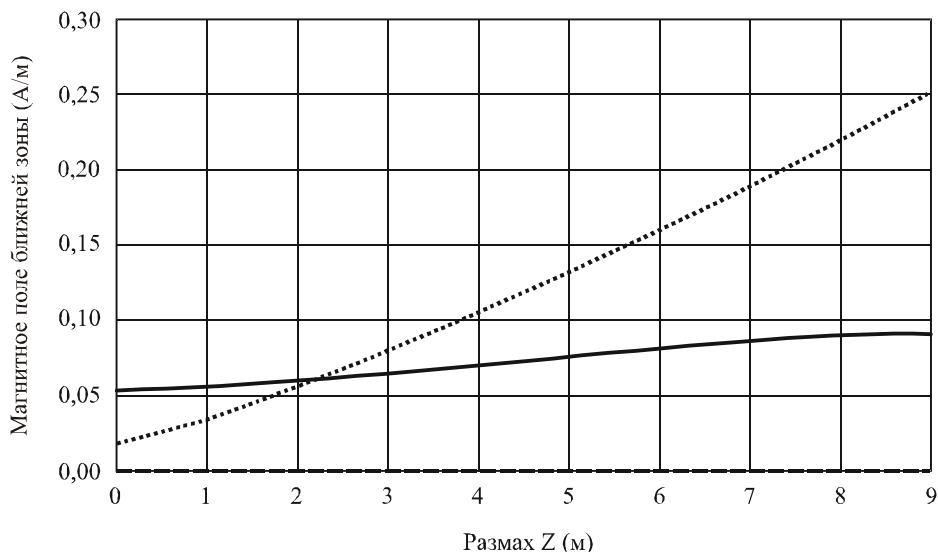
- Электрическое поле ближней зоны, mag (X), размах Z, константы: X = 0, Y = 60; CORT18
- Электрическое поле ближней зоны, mag (Y), размах Z, константы: X = 0, Y = 60; CORT18
- Электрическое поле ближней зоны, mag (Z), размах Z, константы: X = 0, Y = 60; CORT18

1698-39

Сильная взаимосвязь между значениями E и высотой (присутствует только компонент x поля E) является очевидной.

РИСУНОК 40

Вычисленная напряженность поля H в ближней зоне на расстоянии 60 м от антенны ($Y = 60$) на различных высотах между 0 и 9 м (размах Z)



18 МГц, магнитное поле ближней зоны в зависимости от высоты @ 60 м от антенны.
Мощность передатчика: 200 кВт в антенном соединителе.

- Магнитное поле ближней зоны, $\text{mag}(X)$, размах Z , константы: $X = 0, Y = 60$; CORT18
- Магнитное поле ближней зоны, $\text{mag}(Y)$, размах Z , константы: $X = 0, Y = 60$; CORT18
- Магнитное поле ближней зоны, $\text{mag}(Z)$, размах Z , константы: $X = 0, Y = 60$; CORT18

1698-40

Сильная взаимосвязь между значениями H и высотой (присутствуют оба компонента z и y поля H , значение компонента y является почти постоянным) является очевидной.

2.2.2 Измерения

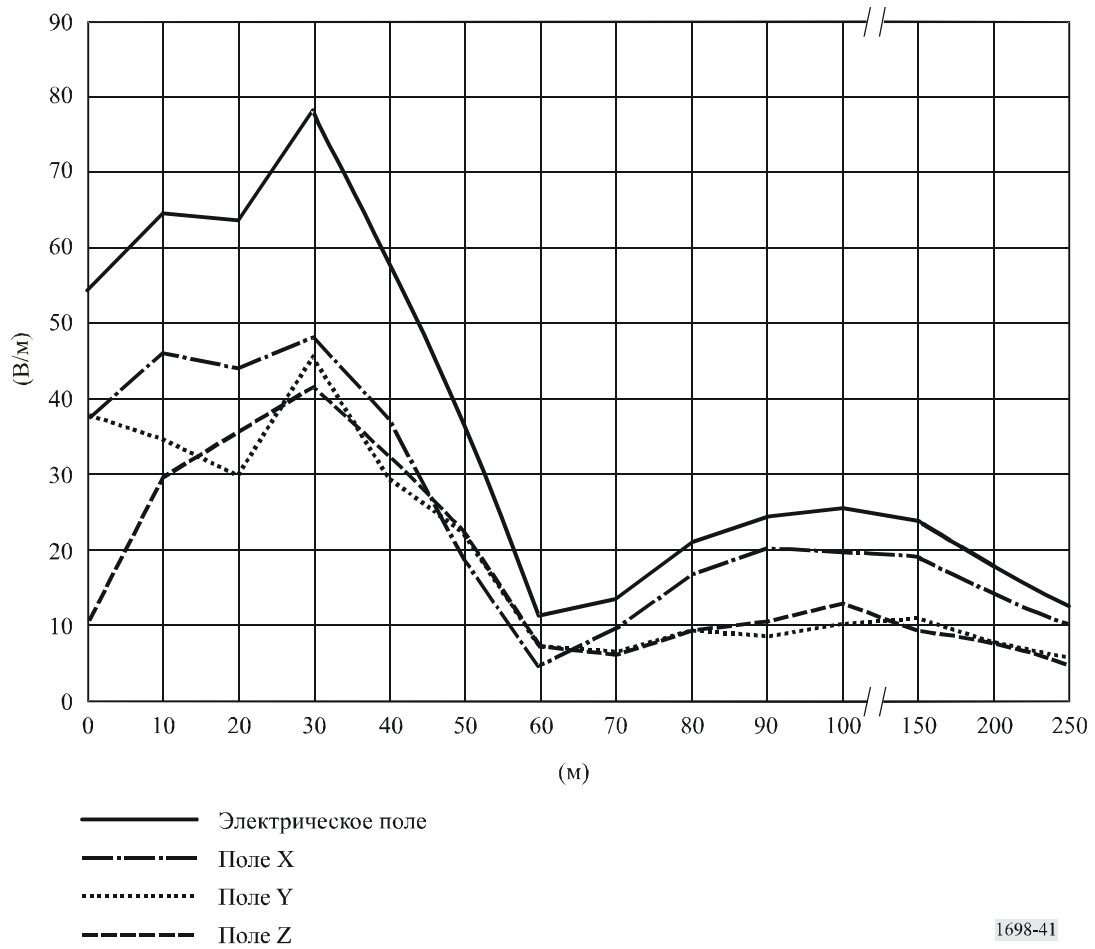
Измерения были выполнены путем использования широкополосного измерителя напряженности поля, установленного на диэлектрической тележке, передвигаемой оператором, который размещался далеко от антенного полигона. Этими средствами избегали каких-либо возмущений полей E/H .

2.2.2.1 Результаты измерений

Измеренные значения представлены на рисунке 41 (поле E) и на рисунке 42 (поле H). Рисунки 41 и 42 являются прямо сопоставимыми с рисунками 37 и 38, соответственно.

РИСУНОК 41

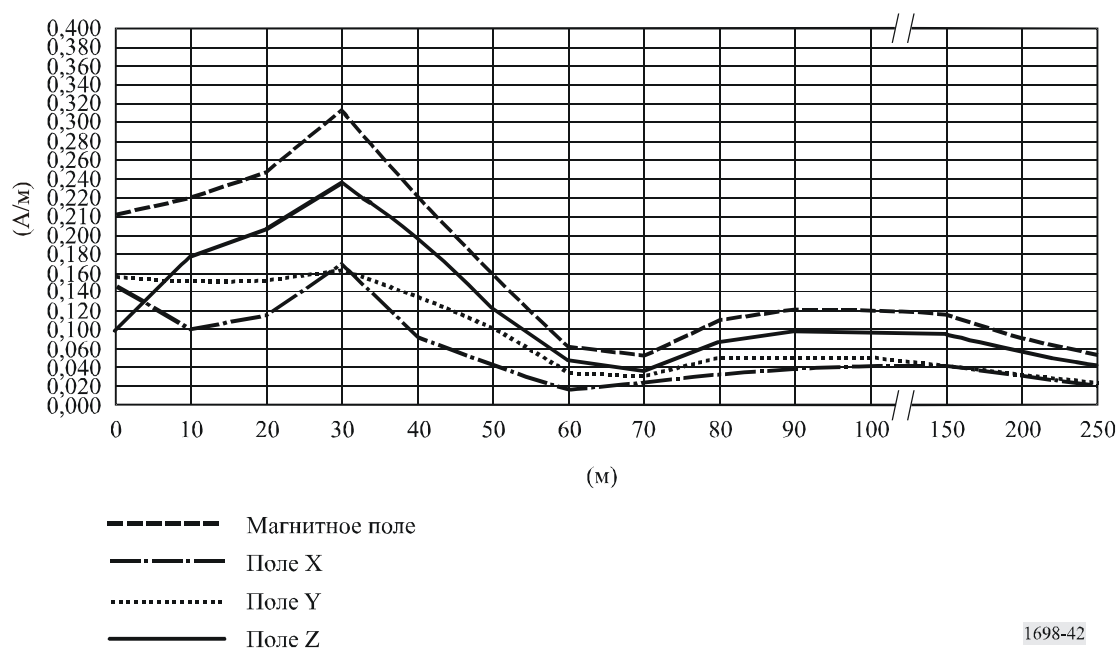
Измеренная напряженность поля E в ближней зоне



Горизонтальная ось представляет собой расстояние от антенны в метрах (размах Y). Напряженность компонентов поля E представляется в В/м на вертикальной оси. Присутствуют все три компонента x, y, z поля E, а верхняя линия представляет общее значение.

РИСУНОК 42

Измеренная напряженность поля Н в ближней зоне



1698-42

Горизонтальная ось есть расстояние от антенны в метрах (размах Y). Напряженность компонентов поля Н представляется в А/м на вертикальной оси. Присутствуют все три компонента x, y, z поля Н, а верхняя линия представляет общее значение

2.3 Сравнение между измерениями и предсказаниями напряженности поля в ближней зоне

2.3.1 13 МГц

На расстоянии менее 40 м предсказание дало значения, как полей E, так и полей Н, выше, чем измеренные значения; максимальные значения E и Н были найдены на расстоянии 10-20 м от антенной системы, как в результатах моделирования, так и в измерениях.

Как в предсказанных, так и в измеренных значениях, есть очевидный "минимум" на расстоянии 40 м от антенны, глубже в предсказании, чем в измерении.

Второй "максимум" достигает своего пика, в обоих случаях, на расстоянии 75 м от антенны; в этом случае значения, полученные от моделирования, ниже, чем измеренные значения.

На более длинных расстояниях, 250 м от антенны, все поля приближаются к подобным значениям между предсказанием и измерением.

2.3.2 18 МГц

На расстоянии менее 40 м предсказание дало значения как поля E, так и поля Н, выше, чем измеренные значения; максимальные значения E и Н были найдены на расстоянии 10-20 м от антенной системы, как в результатах моделирования, так и в измерениях.

Второй "максимум" достигает своего пика на расстоянии 100 м, как в предсказании, так и в измерении, для полей E и Н, с более низким значением для измеренного поля E. На расстоянии более 60 м от антенны поле Н допускает одинаковое значение и для предсказания, и для измерения.

3 Выводы

Сравнение между измеренными и предсказанными значениями полей E и H , как на частоте 13 МГц, так и на частоте 18 МГц, дает интересные результаты.

В общем случае, значения не находятся в полном взаимном соглашении, как, казалось бы, надо ожидать; однако среди них нет никаких существенных различий по сравнению с неопределенностью инструментария, с неопределенностью в плоскости поверхности Земли вблизи антенны (которые не приняты во внимание при моделировании, даже тогда, когда ясно, что напряженность поля имеет сильную зависимость от высоты точки измерения) и наложенной простотой модели. Различия будут больше вблизи антенны (т. е. первый максимум приблизительно на расстоянии около 10 м), до 50%, и будут уменьшаться с увеличивающимся расстоянием; при 250 м различия являются весьма малыми.

Причины этих различий должны находиться в трудностях в измерениях в поле ближней зоны, в неопределенности, свойственной оснащению аппаратурой, в простоте модели, в присутствии некоторых объектов вблизи антенны (металлические структуры, эти две сетки, поддерживающие симметричные вибраторы, и согласующая сеть, а также небольшой дом), которые не были приняты во внимание в модели, а также согласующая сеть и ее излучение. Наконец, местность была промоделирована с ее типовыми электрическими значениями.

Чтобы наилучшим образом подходить к деятельности по предсказанию поля E и H с использованием модели, рекомендуется следующее:

Модель антенны: должны быть тщательно исследованы физические размеры излучающих и пассивных элементов, а также комплексный входной импеданс системы. Для упрощения сложной системы, т. е. решетки излучателей, может быть удобно заменить согласующую и питающую сеть равным количеством генераторов напряжения, приложенных на входе каждого излучателя. Если согласующую сеть не рассматривают, то нужно компенсировать:

- Зависящее от обстоятельств несоответствие между генераторами и излучателями путем введения искусственных согласующих элементов или простых сетей, или подстройкой мощности, назначенной передатчику. Окончательный результат почти нечувствителен к присутствию малых несоответствий, которые не требуют моделирования.

Подразделение сегмента: достаточно представить ниточную антенную систему с сегментами не более $\lambda/20$.

Модель местности: необходимо дать точные значения диэлектрической постоянной и проводимости, особенно в случае горизонтально поляризованного поля E .

Мощность передатчика: важно принять во внимание потери в линиях передачи, в согласующей сети, на сопротивлении стыков, при несоответствиях загрузке. В некоторых случаях является своевременным искусственно откорректировать точное значение мощности, чтобы принять во внимание различные причины потерь, не усложняя модель антенной системы.

Высота точек измерений по отношению к земле: во многих случаях этот параметр очень важен, если областью применения является сравнение между измерениями и предсказаниями. Фактически, в значении полей может быть отмечено сильное влияние высоты, и, если местность моделируется как плоскость, можно столкнуться с большими ошибками, по сравнению с измерением. Во всех этих случаях, в которых излучатели находятся вблизи местности, а местность совсем не является плоскостью, результаты предсказания должны быть взяты с осторожностью.

Выбор кода: моделирование, основанное на методе МОМ, кажется, будет полезным и удобным в случаях ниточных (филярных) антенн, физические и электрические характеристики которых являются хорошо известными. Возможно и совсем легко упростить модель согласно минимальному количеству правил, без потери точности результатов.

Дополнение 3 к Приложению 1

Пределы и уровни

1 Регулирующие и консультативные органы по аспектам здоровья

Аспекты здоровья электромагнитных полей касаются многих международных и национальных органов. Список, который не является исчерпывающим, дается для информации в конце этого Дополнения.

2 Сравнение основных пределов и производных уровней из широко используемых регламентов

Современные стандартные руководящие принципы разнятся в определении групп людей, потенциально рискующих подвергнуться облучению (например, общественность, профессионально незащищенные от воздействий работники, возраст) и/или в месте интересующих размещений (например, общественные места, дома, огороженные корпуса и ограниченные здания).

Различия также появляются в рассматриваемом органе.

В этом Дополнении сравниваются:

- Стандарт IEEE для безопасных уровней относительно воздействия на человека радиочастотных электромагнитных полей, в диапазоне от 3 кГц до 300 ГГц [3].
- Руководящие принципы ICNIRP для ограничения воздействия электрических, магнитных и электромагнитных полей, изменяющихся во времени (вплоть до 300 ГГц) [4].
- Заявление совета NRPB по ограничениям воздействия на человека статических и изменяющихся во времени электромагнитных полей и излучения [5].

Таблица 5 дает приблизительное сравнение между группами и позициями, выбранными в стандартах.

ТАБЛИЦА 5

	IEEE/ANSI	ICNIRP	NRPB
Группы	Нет	Общественность Профессионально облучаемые люди	Взрослые и дети Взрослые
Размещения	Контролируемые (Осведомленность облучаемых людей) Неконтролируемые (Нет осведомленности)	Нет	Нет

2.1 Сравнение основных биологических пределов

Стандарты и руководящие принципы дают "основные пределы" для тока контакта, плотности тока и степени SAR, и о них сообщается в таблице 6, вместе с измерительными условиями.

Общий руководящий принцип для сравниваемых стандартов заключается в том, что все они не позволяют степени SAR по всему телу превышать значение 4 Вт/кг.

При использовании коэффициента безопасности 10, основной предел SAR (усредненная степень SAR по всему телу) уменьшается до 0,4 Вт/кг. Основной предел NRPB в 0,4 Вт/кг предложен как максимальный уровень, разрешенный для увеличения внутренней температуры в 1 К.

Следует отметить, что основной предел всего тела для SAR усредняется за время 6 минут. Имеются также пределы, применимые к определенной части тела, упоминаемые как "местные SAR", поскольку воздействия резонансов могут дать повышение для местных "наиболее чувствительных участков"; эти пределы выше, чем усредненная степень SAR целого тела.

2.2 Сравнение производных уровней пределов для E, H и пределов плотностей потоков мощности на различных частотах

Прямое измерение плотности тока и степени конкретного поглощения является очень трудным и невозможным практически. Поэтому производные уровни даются в дополнение к основным пределам, в стандартах и рекомендациях, рассматриваемых здесь.

С другой стороны измерение величин электромагнитного поля, E и H имеет более практическую годность.

Степень SAR зависит от частоты, в то время как основные пределы, как в таблице 6, предполагаются постоянными. Посредством значимых данных предел SAR может быть преобразован в параметры E, H и S, соответствующие свободному полю.

ТАБЛИЦА 6

Сравнение основных биологических ограничений (пределов SAR) и эталонных уровней (параметры тока)

Параметр	IEEE/ANSI		ICNIRP		NRPB
	Контролируемый	Неконтролируемый	Профессиональный	Население	
Наводимое среднеквадратичное значение или ток контакта (мА)	1 000 <i>f</i> (13a)	450 <i>f</i> (13a)	100 (2)	45 (2)	
	100 (1), (13b)	45 (1), (13b)	40 (3)	20 (3)	
Средняя квадратичная плотность тока (А/м ²)	350 <i>f</i> 1	15,7 <i>f</i> 1	10 <i>f</i> 1	2 <i>f</i> 1	10 <i>f</i>
Зона усреднения (см ²)	1	1	(4)	(4)	
Время усреднения	(4)	(4)			
Средняя по всему телу SAR (Вт/кг)	0,4 (5a)	0,08 (5b)	0,4 (5a)	0,08 (5a)	0,4 (5c)
Местная SAR (Вт/кг)	8 (13c)	1,6 (13c)	10 (13d)	2 (13d)	10
Масса усреднения (кг)	0,001 (6)	0,001 (6)	0,001 (5a), (7)	0,001 (5a), (7)	0,01 и 0,1 (5a), (10)

ТАБЛИЦА 6

Сравнение основных биологических ограничений (пределов SAR) и эталонных уровней (параметры тока)

Параметр	IEEE/ANSI		ICNIRP		NRPB
	Контролируемый	Неконтролируемый	Профессиональный	Население	
Местная SAR ⁽⁷⁾ (Вт/кг)	20 (13c)	4 (13c)	20 (13d)	4 (13d)	20
Масса усреднения (кг)	0,010 ⁽⁸⁾	0,010 ⁽⁸⁾	0,01 ^{(5a), (9)}	0,01 ^{(5a), (9)}	0,1 ^{(5a), (9)}
Плотность мощности (Вт/м ²)			50 $68/f^{1,05}$ (12), (13)	10 $68/f^{1,05}$ (12), (13)	100 $68/f^{1,05}$ (12)
Время усреднения (мин)					

f : частота в МГц (пока не установлено иначе).

- (1) Ток через каждую ступню. f : частота (МГц).
- (2) Ток, наводимый в любой конечности (10–110 МГц).
- (3) Ток контакта из проводящих объектов (100 кГц–110 МГц).
- (4) Плотность тока через любой 1 см² площади ткани.
- (5) а) Пределы SAR относятся к времени усреднения 6 мин.
б) Пределы SAR относятся к времени усреднения, как дано в таблице 7.
в) Пределы SAR относятся к времени усреднения 15 мин.
- (6) Локализованная SAR, за исключением рук, запястий, ступней и лодыжек (100 кГц–6 ГГц).
- (7) Локализованная SAR для головы и туловища (100 кГц–10 ГГц).
- (8) Локализованная SAR для рук, запястий и лодыжек (100 кГц–6 ГГц).
- (9) Локализованная SAR для конечностей (100 кГц–10 ГГц).
- (10) Локализованная SAR для головы, шеи, туловища и утробного плода (10 МГц–10 ГГц).
- (11) 10 г для головы и утробного плода; 100 г для шеи и туловища.
- (12) Для частот между 10 и 300 ГГц. f : частота (Гц).
- (13) Усреднено по любым 20 см² облучаемой площади:
 - а) 3 кГц < f < 100 кГц
 - б) 100 кГц < f < 100 МГц
 - в) 100 кГц < f < 6 ГГц
 - г) 100 кГц < f < 10 ГГц.

Таблицы 7, 8 и 9 показывают максимальные уровни соответственно E, H и плотности мощности в различных полосах в частотном диапазоне 1 кГц–300 ГГц. Пределы вычислены согласно консервативному предположению об оптимуме электромагнитной связи между электромагнитным полем и телом.

ТАБЛИЦА 7

Сравнение производных уровней; поле E (среднеквадратичные значения В/м)*

Частотный диапазон	IEEE/ANSI		ICNIRP		NRPB							
	Контролируемый	Неконтролируемый	Профессиональный	Население	Только взрослые	Взрослые и дети						
0,6–3 кГц					1 000							
3–30 кГц	614		610 ⁽¹⁾	87								
30–38 кГц												
38–65 кГц												
65–100 кГц												
100–410 кГц												
410–600 кГц												
600–610 кГц												
610–680 кГц												
680–920 кГц												
0,92–1 МГц							614		610/ <i>f</i>	87/ <i>f</i> ^{0,5}	600/ <i>f</i>	
1–1,34 МГц												
1,34–3 МГц	614	823,8/ <i>f</i>	610/ <i>f</i>	87/ <i>f</i> ^{0,5}	600/ <i>f</i>							
3–10 МГц	1 842/ <i>f</i>						60	600/ <i>f</i>				
10–12 МГц												
12–30 МГц												
30–60 МГц	61,4		61	28			<i>f</i> ⁽²⁾	50 ⁽²⁾				
60–100 МГц												
100–137 МГц												
137–200 МГц												
200–300 МГц												
300–400 МГц											3 <i>f</i> ^{0,5}	1,375 <i>f</i> ^{0,5}
400–800 МГц												
0,8–1,1 ГГц												
1,1–1,55 ГГц												
1,55–2 ГГц			137	61	194 ⁽²⁾							
2–3 ГГц												
3–15 ГГц												
15–300 ГГц												

f: частота (МГц, пока не установлено иначе).

* Значения следует усреднить по промежутку 6 мин., кроме случая, показанного ниже:

а) $f^2/0,3$

б) 30 мин.

⁽¹⁾ Это значение находится в диапазоне от 0,82 кГц до 1 МГц.

⁽²⁾ Плоская волна, эквивалентная значению поля E.

ТАБЛИЦА 8

Сравнение производных уровней; поле Н (среднеквадратичные значения А/м)^{(1), (2)}

Частотный диапазон	IEEE/ANSI		ICNIRP		NRPB					
	Контролируемый	Неконтролируемый	Профессиональный	Население	Только взрослые	Взрослые и дети				
1–3 кГц					64					
3–30 кГц	163									
30–38 кГц										
38–65 кГц										
65–100 кГц			5 ⁽³⁾							
100–140 кГц	16,3/f		1,6/f	0,73/f	18/f ²					
140–150 кГц										
150–535 кГц										
535–610 кГц										
610–680 кГц										
0,68–1 МГц			16,3/f	158,3/f ^{1,668} (1a)	0,16	0,073	0,16 ⁽²⁾	0,13		
1–1,34 МГц							f/377 ⁽²⁾			
1,34–3 МГц										
3–10 МГц										
10–12 МГц			0,163		0,008f ^{0,5}	0,0037f ^{0,5}	0,36 ⁽²⁾			
12–30 МГц	0,0729 (1b)								0,66 × 10 ⁻³ f	
30–60 МГц										
60–100 МГц							0,33 × 10 ⁻³ f			
100–137 МГц	0,33 × 10 ⁻³ f ⁽²⁾									
137–200 МГц									0,52	
200–300 МГц							0,36			
300–400 МГц	0,36									
400–800 МГц									0,16	
0,8–1,1 ГГц							0,16			
1,1–1,55 ГГц	0,16									
1,55–2 ГГц			0,16							
2–3 ГГц					0,16					
3–15 ГГц	0,16									
15–300 ГГц			0,16							

f : частота (МГц, пока не установлено иначе).

(1) Значения следует усреднить по промежутку 6 мин., кроме случая, показанного ниже:

- а) $0,0636 f^{1,337}$ мин.
 б) 30 мин.

(2) Плоская волна, эквивалентная значению поля Н, основанная на значениях плотности мощности, приведенных для взрослых. ПРИМЕЧАНИЕ. – Эти значения не даются точно тем же самым образом, каким определены значения поля Е и плотности мощности.

(3) Это значение действительно в диапазоне от 0,8 кГц до 150 кГц.

ТАБЛИЦА 9

Сравнение производных уровней; плотность мощности (Вт/м²)⁽³⁾

Частотный диапазон	IEEE/ANSI ⁽¹⁾				ICNIRP		NRPB	
	Контролируемый		Неконтролируемый		Профессиональный	Население	Только взрослые	Взрослые и дети
	Поле Е	Поле Н	Поле Е	Поле Н				
<100 Гц								
0,1–1 кГц								
1–3 кГц								
3–30 кГц								
30–100 кГц	1 000	10×10^6	1 000	10×10^6				
100–410 кГц								
0,41–1 МГц	1 000	$10^5/f^2$	1 000	$10^5/f^2$				
1–1,34 МГц								
1,34–3 МГц	1 000	$10^5/f^2$	$1 800/f^2$ (2), (3a)	$10^5/f^2$ (2)				
3–10 МГц								
10–12 МГц	$9 000/f^2$	$10^5/f^2$	$1 800/f^2$ (2), (3b)	$10^5/f^2$ (2)	10	2	10	6,6
12–30 МГц								
30–60 МГц			2 (2), (3b)	$(9,4 \times 10^6)/f$ 8,336			$2,7 \times 10^{-3} f^2$	
60–100 МГц	10	$10^5/f^2$		(2), (3c)				
100–137 МГц								
137–200 МГц	10		2 (3b)					
200–300 МГц								$0,165 \times 10^{-3} f^2$
300–400 МГц							50	
400–800 МГц								26
0,8–1,1 ГГц			$f/150$		$f/40$	$f/200$		$41 \times 10^{-6} f^2$
1,1–1,55 ГГц	$f/30$		(3b)					$41 \times 10^{-6} f^2$
1,55–2 ГГц								100
2–3 ГГц								
3–15 ГГц	100		$f/150$ (3d)		50	10		
15–300 ГГц	$100^{(3e)}$							

f : частота (МГц, пока не установлено иначе).

- (1) Ниже 100 МГц, эквивалентные значения плоской волны даются для полей Е и Н.
- (2) Как дается некоторыми коммерчески доступными измерителями.
- (3) Значения следует усреднить по промежутку 6 мин., кроме случая, показанного ниже:
- $f^2/0,3$ мин.
 - 30 мин.
 - $0,0336 f^{1,337}$ мин.
 - $90 000/f$ мин.
 - $616 000/f^{1,2}$ мин.

3 Значения напряженностей полей, подлежащих определению

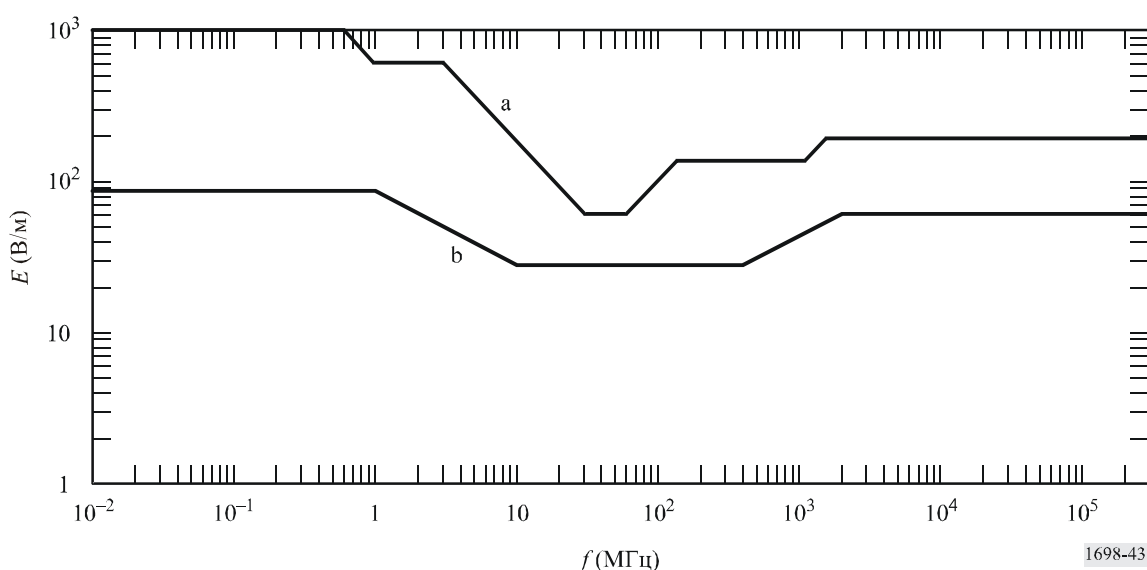
С использованием данных, приведенных в этом Дополнении, для § 2.2 диапазон напряженностей электрического и магнитного полей показаны соответственно на рисунках 43 и 44.

Эти кривые/графики не следует использовать в качестве основы для регуляторных требований администраций. Они представляют собой сложное представление пределов, изображенных в настоящее время и предназначенных для развития с течением времени. В качестве таковых, они просто иллюстрируют методологию, которая могла быть применена в рамках администрации для развития полезных стандартов.

Кроме того, необходимо признать, что результаты независимых исследований предмета не являются полностью совместимыми, и в результате, истолкование итогов полномочными органами, приводило в прошлом и будет приводить в будущем, к отличающимся требованиям в различных странах.

РИСУНОК 43

Диапазон напряженностей электрических полей, производных от таблиц, которые даны в Дополнении 3

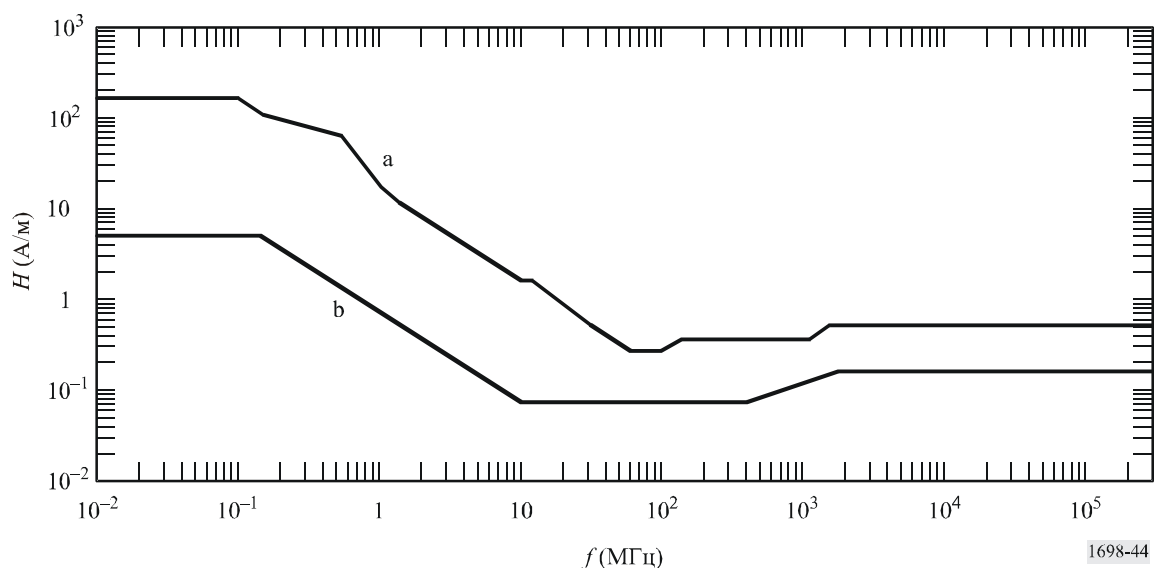


Кривые "a" и "b" представляют соответственно верхние и нижние границы некоторых известных существующих рекомендаций для уровней воздействий РЧ (представленных в этом Дополнении в качестве примера). Все кривые от полномочных органов, создающих такие рекомендации, лежат между этими границами, и любая кривая между кривыми "a" и "b" должна позволять соответствующие службы радиовещания.

Различия между предложенными максимальными уровнями на одинаковой частоте (рисунки 43 и 44) зависят от других условий, рассматриваемых различными источниками, которые предлагают пределы.

РИСУНОК 44

Диапазон напряженностей магнитных полей, производных от таблиц, которые даны в этом Дополнении



4 Численные методы и вычисление величин электромагнитных полей

В немногих относительно простых случаях проблемы электромагнитного излучения и рассеяния могут быть решены, используя аналитические процедуры в закрытой форме. Однако решение общих проблем, со случайными конфигурациями, требует применения численных методов вычисления, выполняемых на мощных компьютерах.

Численные методы, зависящие от рассматриваемого частотного диапазона и размера геометрических используемых структур, являются доступными для вычисления величин электромагнитных полей.

Среди этих различных методов было решено использовать метод MOM, применяемый в разработке радиовещательных антенных систем и в вычислении их результирующих электромагнитных полей.

Метод MOM интенсивно используется для вычисления распределения SAR в так называемой "блочной модели".

Напряженности электрических полей внутри тела рассчитываются из решения интегрального уравнения электрического поля, используя уравнения Максвелла.

Используемое программное обеспечение представляет собой: NEC – WIN Professional V 1.1 (1997) от фирмы Nittany Scientific, inc. – <http://www.nittany-scientific.com/>.

5 Перечень некоторых национальных регламентов

5.1 Администрации

5.1.1 Австралия

Австралийское агентство защиты от излучения и по ядерной безопасности (ARPANSA), Стандарт по защите от излучения RPS-3, Стандарт по защите от излучения – Уровни максимального воздействия для радиочастотных полей – от 3 кГц до 300 ГГц.

5.1.2 Бразилия

Резолюция № 303/202 – Regulamento sobre Limitacao da Exposicao a Campos Elétricos, Magnéticos e Eléctromagnéticos na Faixa de Radiofrequencias entre 9 kHz e 300 GHz.
www.anatel.gov.br/bibliotheca/Templates/Resolucoes/resolucoes.asp.

5.1.3 Франция

Декрет № 2002-775 от 03.05.2002, относящийся к предельным значениям воздействия на общественность электромагнитных полей, излучаемых оборудованием, которое используется в сетях электросвязи или радиоэлектронными установками.

5.1.4 Германия

Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit. www.bmwi.de.

5.1.5 Италия

DPCM 8 июля 2003 г. www.parlamento.it/parlam/leggi/elemen.htm.

5.1.6 Новая Зеландия

5.1.7 Соединенные Штаты Америки

<http://www.fcc.gov/oet/rfsafety/>.

5.1.8 Государство Ватикан

Delibera del 16/12/1992 No: 225620.

5.1.9 Япония

Закон о радио (Закон № 131, 2 мая, 1950 г.), Статья 30.

Регламенты для осуществления Закона о радио (Правила регуляторной комиссии в области радио № 14, 30 ноября, 1950 г.), Статья 21–3 и Приложение, таблица 2-3-2.

Web-сайт: <http://www.tele.soumu.go.jp/e/ele/index.htm> (на английском языке)

<http://www.tele.soumu.go.jp/j/ele/index.htm> (на японском языке)

(Статьи Закона и Регламентов имеются только на японском языке. Некоторые отчеты для министерства имеются на английском языке.)

- 6 **Перечень некоторых регуляторных и консультативных органов**
- 6.1 **Комитет по электронным компонентам, Comité des composants électroniques, CENELEC [6]**
- 6.2 **Немецкая комиссия по электрическим и электронным информационным технологиям, DKE**
- 6.3 **Европейский Союз, ЕС – Рекомендация Совета Европейского союза, L 199, 12 июля 1999 г.**
- 6.4 **Институт инженеров по электротехнике и электронике/Американский национальный институт стандартизации (IEEE/ANSI)**
- 6.5 **Международная комиссия по неионизирующему излучению (ICNIRP)**
- 6.6 **Международная электротехническая комиссия (МЭК)**
- 6.7 **Всемирная организация здравоохранения (ВОЗ)**
- 6.8 **Национальный совет по радиологической защите (NRPB)**
- 6.9 **Европейский институт стандартизации по электросвязи (ETSI)**

Дополнение 4 к Приложению 1

Дополнительные методы оценивания

1 Дозиметрия

Применение дозиметрических понятий дает возможность устанавливать связь между внешними (т. е. вне тела) напряженностями полей и внутренними величинами напряженности электрического поля, наводимой плотностью тока и степенью поглощения энергии в тканях. Развитие экспериментальной и численной дозиметрии было дополняющим. Оба подхода требуют приближений к моделированию облучения человека; однако развитие тканевых эквивалентных материалов и минимально мешающих зондов в экспериментальной области и использование анатомически реалистических моделей для вычислительных целей улучшило понимание взаимодействия полей РЧ с телом.

Принимая во внимание, что плотность тока является величиной, наиболее ясно относящейся к биологическим воздействиям на низких частотах, именно степень SAR становится более существенной величиной, поскольку частоты увеличиваются в направлении длин волн, сопоставимых с размерами человеческого тела.

В большинстве ситуаций воздействий SAR может быть выведена только из измеренных напряженностей полей в окружающей среде, используя дозиметрические модели. На частотах ниже 100 МГц, чтобы измерить наведенный ток, были использованы бесконтактные методы, а в расширенных однородных полях напряженности внешних электрических полей относились к

наведенному току как функция частоты. В области резонанса тела воздействия практического значения возникают в реактивном поле ближней зоны, где связь набегающего поля с телом трудно установить вследствие неоднородности поля и изменяющегося выравнивания между полем и телом. Кроме того, ограниченные увеличения в плотности тока и SAR могут возникать в частях тела как следствие ограниченного геометрического поперечного сечения более проводящих тканей.

Дозиметрические величины могут быть рассчитаны с использованием подходящих численных методов и расчетных моделей человеческого тела. С другой стороны, такие величины могут быть измерены, используя подходящие физические модели (фантомы).

2 Измерение степени SAR

Степень SAR (Вт/кг) является основной предельной величиной большинства регламентов и стандартов по регулированию воздействия ПЧ. SAR является мерой степени электромагнитной энергии, рассеиваемой в расчете на единицу массы ткани.

Степень SAR может быть определена как значение, нормированное по массе всего тела (иногда упоминается как "SAR, усредненная по целому телу"), или как локализованное значение в пределах малого объема ткани (локализованная SAR).

Степень SAR может быть установлена из внутренних величин тремя способами, как указано следующим уравнением:

$$\text{SAR} = \frac{\sigma E^2}{\rho} = C_i \frac{dT}{dT} = \frac{J^2}{\sigma \rho},$$

где:

- E : значение напряженности внутреннего электрического поля в ткани тела (В/м^{-1})
- σ : проводимость ткани тела (С/м^{-1})
- ρ : плотность ткани тела (кг/м^{-3})
- C_i : теплоемкость ткани тела ($\text{Дж/кг}^{-1} \text{ } ^\circ\text{С}^{-1}$)
- dT/dt : производная по времени температуры в ткани тела ($^\circ\text{С/с}^{-1}$)
- J : значение плотности наводимого тока в ткани тела (А/м^2).

Местная SAR в увеличивающейся массе (dm) определяется как производная по времени увеличивающейся поглощаемой энергией (dW), деленной на массу:

$$\text{SAR} = d/dt \quad dW/dm$$

Это значение величины важно с двух точек зрения; приводя к неоднородному распределению поглощения энергии, когда подвергаются действию однородной плоской волны, и к локализованному поглощению энергии, являющемуся результатом неоднородных полей в тесной близости к источнику воздействия.

Регламенты или стандарты по воздействиям содержат производные пределы электрического и магнитного полей. Основная дозиметрическая концепция убеждает, что согласие с (внешними) производными уровнями будет гарантировать согласие с основными пределами SAR. Однако измерения внешней или внутренней SAR могут также использоваться для указания согласия. Для условий воздействия ближнего поля на частичное тело внешние электромагнитные поля могут быть трудными для измерения или они могут превысить производные пределы, хотя местная SAR находится ниже основных пределов. В этих случаях в моделях тела должны быть проведены измерения внутренних SAR. Самые важные методы для измерения SAR будут описаны ниже.

2.1 Измерение электрического поля

Степень SAR также пропорциональна возведенной в квадрат среднеквадратической напряженности электрического поля E (В/м) внутри незащищенной ткани:

$$\text{SAR} = \sigma E^2 / \rho,$$

где:

σ (S/м): проводимость

ρ (кг/м³): плотность массы материала ткани в рассматриваемой позиции.

Используя зонд изотропного электрического поля, можно определять местную SAR внутри модели облученного тела. Перемещая зонд и повторяя измерения электрического поля в целом теле или в части тела, можно определять распределение SAR и значения усредненного SAR целого или частичного тела. Отдельное измерение электрического поля занимает только несколько секунд, что означает, что трехмерные распределения SAR могут быть определены с высокой пространственной разрешающей способностью и с приемлемым временем измерения (обычно менее часа).

2.2 Измерение температуры

Степень SAR пропорциональна начальной скорости увеличения температуры dT/dt (C/s) в ткани незащищенного объекта:

$$\text{SAR} = c \Delta T / \Delta t,$$

где c есть конкретная теплоемкость материала ткани (J/kgC). Используя определенные температурные зонды, можно определить местную SAR внутри модели облученного тела. Используются один или более зондов для определения повышения температуры ΔT в течение короткого времени воздействия ΔT (обычно меньше 30 секунд, чтобы предотвратить перемещение теплоты). Начальная скорость температурного повышения аппроксимируется с помощью $\Delta T / \Delta t$, а местное значение SAR рассчитывается для каждой позиции измерения. Повторяя температурные измерения в целом теле или в части тела, можно получить распределение SAR и значения усредненной SAR по целому или частичному телу.

Измерения трехмерных распределений SAR являются очень трудоёмкими из-за большого количества точек измерения. Для получения приемлемого времени измерения количество точек должно быть ограничено. Это означает, что очень трудно измерить очень неоднородные распределения SAR точным образом. Точность температурных измерений может быть также затронута тепловой проводимостью и конвекцией в ходе измерений или между измерениями.

2.3 Калориметрическое измерение

Усредненную SAR целого тела можно определить, используя калориметрические методы. В нормальном калориметрическом измерении, полноразмерная или масштабируемая модель тела в тепловом равновесии облучается в течение периода времени. Затем используется калориметр, чтобы измерять поток теплоты от тела, пока модель снова не вернется в тепловое равновесие. Полученная суммарная поглощенная энергия затем делится на время воздействия и массу модели тела, которая дает степень SAR целого тела. Калориметрический двойной метод использует два калориметра и две идентичных модели тела. Одна из моделей облучается, а другая модель используется как тепловой эквивалент. Это означает, что измерение может быть выполнено при менее хорошо контролируемых тепловых условиях, чем нормальное калориметрическое измерение.

Калориметрические измерения дают довольно точные определения SAR целого тела, но не дают никакой информации о внутреннем распределении SAR. Для получения точных результатов требуется достаточное количество осаждения энергии. Суммарное время измерения, которое определяется временем для достижения теплового равновесия после воздействия, может быть до нескольких часов. Степень SAR частичного тела можно измерить, используя фантомы частичного тела и малые калориметры.

3 Измерение тока тела

Измерительные приборы для тока тела могут быть выполнены в двух категориях:

- измерительные приборы для тока от тела к земле;
- измерительные приборы для тока контакта.

3.1 Токи, наводимые в теле

Внутренние токи тела, которые наводятся в людях, происходят от воздействия полей РЧ на часть или целое тело в отсутствие контакта с другими объектами, кроме земли.

Два основных метода, используемых для измерения токов тела, включают в себя трансформаторы тока типа клещей (соленоидальные) для измерения тока, текущего в конечностях, и системы из параллельных пластин, которые разрешают измерение токов, текущих к земле через ступню.

Были разработаны инструменты на основе трансформаторов тока типа клещей, которые можно носить.

Блок измерителя устанавливается или непосредственно на трансформаторе, или связывается через волоконно-оптическую линию, чтобы обеспечить отображение тока, текущего в конечности, вокруг которой закреплен трансформатор тока. Считывание тока в этих модулях может быть достигнуто использованием или узкополосных методов, например, анализаторов спектра, или перестраиваемых приемников (которые предлагают преимущество, будучи способными определять частотное распределение наводимого тока в окружающих средах с множеством источников), или широкополосных методов с использованием диодного детектирования или теплового преобразования.

Были разработаны инструменты для обеспечения индикации точных среднеквадратичных значений в присутствии множества частот и/или форм сигналов с амплитудной модуляцией.

Верхняя частотная характеристика трансформаторов тока обычно ограничивается приблизительно частотой 100 МГц, однако были использованы трансформаторы с воздушными сердечниками (в противоположность трансформаторам с ферритовыми сердечниками), чтобы расширить верхнюю частотную характеристику этих инструментов. В то время как трансформаторы с воздушными сердечниками легче и поэтому полезны для более длительных измерений, они значительно менее чувствительные, чем устройства с ферритовыми сердечниками.

Альтернативой устройствам типа клещей является система из параллельных пластин. В этом приборе ток тела течет через ступню к проводящей пластине головы, через некоторую форму датчика тока, установленного между пластинами, и таким образом – к земле. Ток, текущий между верхними и нижними пластинами, может быть определен путем измерения падения напряжения РЧ на резисторе низкого импеданса. В качестве альтернативы может быть использован трансформатор тока РЧ с малой апертурой или вакуумная термопара, чтобы измерять ток, текущий через проводник между этими двумя пластинами.

Имеются инструменты с плоскими частотными характеристиками между 3 кГц и 100 МГц.

Имеются несколько проблем, которые следует учесть при выборе прибора для измерения наведенного тока.

Во-первых, включенные измерители являются предметом влияния наведенных токов смещения электрического поля от полей, заканчивающихся на верхней пластине. Исследования показали, что очевидные ошибки, возникающие в отсутствие человека, являются несущественными для эксплуатации измерителей, когда человек присутствует.

Во-вторых, сумма обоих токов лодыжек, измеренных измерителями типа клещей, имеет тенденцию быть немного больше, чем соответствующее значение, указанное измерителями пластинчатого типа. Величина этого эффекта, который является функцией частоты РЧ и геометрии измерителя, вряд ли будет существенной. Тем не менее, более точным методом оценивания токов конечностей является трансформатор тока. Точный метод измерения может зависеть от требований руководящих принципов защиты, относительно которых сделаны оценки соответствия.

В-третьих, необходимо учитывать способность измерять наведенные токи в конечностях в таких практических условиях заземления, какие можно найти на практике. В частности, отличающаяся степень электрического контакта между землей и нижней пластиной системы из параллельных пластин и фактической земной поверхностью может оказывать влияние на видимый ток, текущий к земле.

Измерения могут быть выполнены с использованием антенн, разработанных в качестве эквивалента человека. Это дает возможность использования стандартизированного подхода и разрешает выполнять измерения токов без потребности в людях, подвергающихся потенциально опасным токам и полям.

3.2 Измерение тока контакта

Устройство измерения тока должно быть вставлено между рукой человека и проводящим объектом. Измерительная техника может состоять из металлического зонда (определенная контактная область), который нужно держать рукой на одном конце зонда, в то время как другой конец касается проводящего объекта. Датчик тока типа клещей (трансформатор тока) можно использовать для измерения тока контакта, который течет в руку в контакте с проводящим объектом.

Альтернативными методами являются:

- измерение разности потенциалов (падения напряжения) на неиндуктивном резисторе (диапазон резистора 5–10 Ω), подключенном последовательно между объектом и металлическим зондом, удерживаемым в руке;
- миллиамперметр на основе термопары, непосредственно помещенный последовательно.

Соединительные проводники и измеритель тока должны быть установлены таким образом, чтобы помехи и ошибки из-за наводки были сведены к минимуму.

В случае, где ожидаются чрезмерно высокие токи, эквивалентный импеданс тела может моделироваться с помощью электрической сети резисторов и конденсаторов.

3.3 Измерение напряжения прикосновения

Напряжение прикосновения (напряжение холостого хода) измеряется подходящим вольтметром или осциллографом для рассматриваемого частотного диапазона. Устройства измерения подключаются между проводящим объектом, который заряжен напряжением, наведенным полем, и эталонным потенциалом (землей). Входной импеданс вольтметра обязан быть не менее 10 к Ω .

Дополнение 5 к Приложению 1

Электромедицинские приборы

1 Электромедицинские приборы

Электромагнитная совместимость (ЭСМ) является общей заботой для электронного оборудования и особенно электронных медицинских устройств. Если электромедицинские устройства используются в присутствии сильных электромагнитных полей, они могут работать неправильно. Риск такой неправильной работы увеличивается, если напряженность поля является достаточно большой. Риск неправильной работы зависит от нескольких таких переменных, как уровень напряженности поля (которая является зависимой от расстояния между излучающей антенной и устройством), мощность передатчика, частота волн, тип модуляции излучаемого сигнала, воздействие кабельной связи, а также от собственной защищенности РЧ электронных устройств.

Помехи РЧ для электромедицинских устройств можно обычно снизить или устранить подходящим экранированием РЧ или электронной фильтрацией. Подходящими являются прикладные методы, полученные из тех, методов, что обычно используются для ЭСМ. К медицинским устройствам, имплантированным или нет, и к медицинскому комплекту инструментов могут применяться специальные пределы, которые могут быть значительно ниже, чем общие пределы для населения.

1.1 Имплантированные и переносные устройства

Электромагнитное поле может вызывать помехи РЧ для действующих имплантированных или переносных медицинских устройств.

К этому классу принадлежат инсулиновые насосы и электронные стимуляторы сердца, и в будущем количество этих устройств может быть увеличено. Диапазон и количество различных новых устройств также, кажется, увеличивается, например переносные мониторы, протезные средства для зрения и движения. Вообще говоря, электронные стимуляторы сердца и другие медицинские устройства могли бы страдать от помех излучаемого электромагнитного поля. Однако в случае электромедицинских имплантированных устройств проблемы помех РЧ еще не были полностью решены из-за недостатка полного понимания проблемы изготовителями и поставщиками.

Дополнение 6 к Приложению 1

Ссылки

- [1] IEC [6 October 2000] IEC Committee Draft (CD) 85/214/CD: Measurement and evaluation of high frequency (9 kHz to 300 GHz) electromagnetic fields with regard to human exposure.
 - [2] EBU [November 2001] BPN 023: Radio frequency radiation: Exposure limits and their implication for broadcasters. European Broadcasting Union.
 - [3] ANSI/IEEE [1992] Standard for safety levels with respect to human exposure to radiofrequency electromagnetic fields, 3 kHz to 300 GHz. IEEE Std C95.1/D1.4.
 - [4] ICNIRP [April 1998] Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic and electromagnetic fields (up to 300 GHz). *Health Physics*, Vol. 74, 4, p. 494-522.
 - [5] NRPB [1993] Board Statement on restrictions on human exposure to state and time varying electromagnetic fields and radiation. Doc. NRPB, Vol. 4, 5.
 - [6] CENELEC [21 November 2003] Draft prEN 50413: Basic Standard on measurement and calculation procedures for human exposure to electric, magnetic and electromagnetic fields (0 Hz-300 GHz).
 - [7] IEEE. IEEE Std C95.3: IEEE recommended practice for measurements and computations of radio frequency electromagnetic fields with respect to human exposure to such fields, 100 kHz-300 GHz.
-