

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ИЗЛУЧЕНИЯ

ШКАЛА

ИЗМЕРЕНИЕ

РАСПРОСТРАНЕНИЕ

ТИПЫ И ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЗАЩИТЫ

Глава 1. Общая характеристика электромагнитных полей

В современных условиях научно-технического прогресса в результате развития различных видов энергетики и промышленности электромагнитные излучения занимают одно из ведущих мест по своей экологической и производственной значимости среди других факторов окружающей среды. В целом, общий электромагнитный фон состоит из источников излучения естественного происхождения:

электрические и магнитные поля Земли, атмосферы, радиоизлучения Солнца и галактик и излучения искусственного (антропогенного) происхождения:

телевизионные и радиостанции, линии электропередачи, электробытовая техника и другие.

Уровень естественного электромагнитного фона в некоторых случаях бывает **на несколько порядков ниже** уровней электромагнитных излучений, создаваемых антропогенными источниками. Электромагнитные излучения космического, околоземного и биосферного пространств играют

определенную роль в организации жизненных процессов на Земле, и в ряде случаев выявляется их биологическая значимость.

1.1. Электромагнитные излучения радиочастот и сверхвысоких частот

ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ПОЛЕ - это особая форма материи, посредством которой осуществляется взаимодействие между заряженными частицами. Представляет собой взаимосвязанные переменные электрическое поле и магнитное поле. Взаимная связь электрического E и магнитного H полей заключается в том, что всякое изменение одного из них приводит к появлению другого: переменное электрическое поле, порождаемое ускоренно движущимися зарядами (источником), возбуждает в смежных областях пространства переменное магнитное поле, которое, в свою очередь, возбуждает в прилегающих к нему областях пространства переменное электрическое поле, и т. д. Таким образом, электромагнитное поле распространяется от точки к точке пространства в виде электромагнитных волн, бегущих от источника. Благодаря конечности скорости распространения электромагнитное поле может существовать автономно от породившего его источника и не исчезает с устранением источника (например, радиоволны не исчезают с прекращением тока в излучившей их антенне).

Электромагнитное поле в вакууме описывается напряженностью электрического поля E и магнитной индукцией B . Электромагнитное поле в среде характеризуется дополнительно двумя вспомогательными величинами: напряженностью магнитного поля H и электрической индукцией D . Связь компонентов электромагнитного поля с зарядами и токами описывается уравнениями Максвелла.

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ВОЛНЫ представляют собой электромагнитные колебания, распространяющиеся в пространстве с конечной скоростью, зависящей от свойств среды (рис. 1).

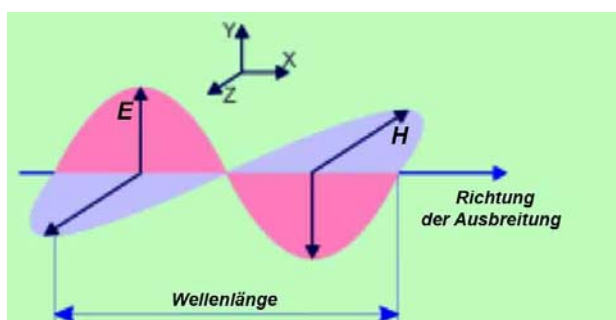


Рис. 1. Электромагнитные волны

Существование электромагнитных волн предсказано английским физиком М. Фарадеем в 1832 г. Другой английский ученый, Дж. Максвелл, в 1865 г. теоретически показал, что электромагнитные колебания не остаются локализованными в пространстве, а распространяются во все стороны от источника. Теория Максвелла позволила единым образом подойти к описанию радиоволн, оптического излучения, рентгеновского излучения, гамма-излучения. Оказалось, что все эти виды излучения – электромагнитные волны с различной длиной волны λ , т. е. родственны по своей природе. Каждое из них имеет своё определённое место в единой шкале электромагнитных волн (рис. 2).

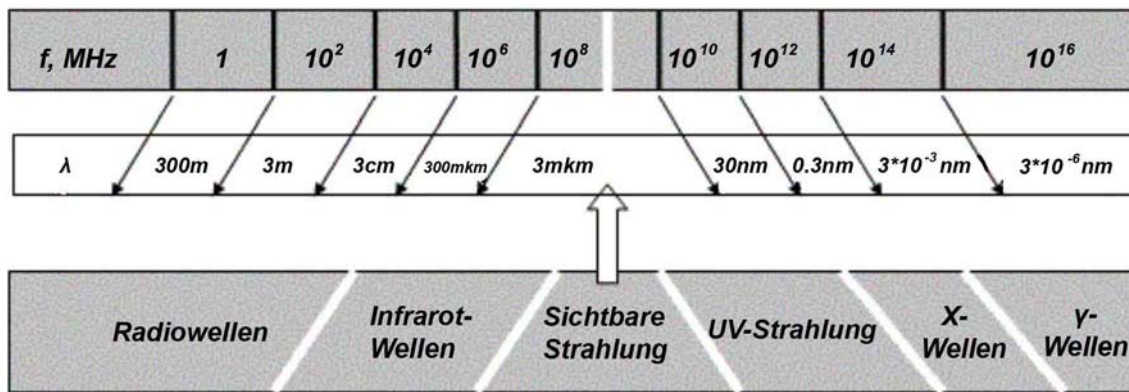


Рис. 2. Шкала электромагнитных волн

Распространяясь в средах, электромагнитные волны, как и всякие другие волны, могут испытывать преломление и отражение на границе раздела сред, дисперсию, поглощение, интерференцию; при распространении в неоднородных средах наблюдаются дифракция волн, рассеяние волн и другие явления.

Гармонические электромагнитные волны называются монохроматическими. Для монохроматической волны одной из главных характеристик является интенсивность. Интенсивность электромагнитной волны J представляет собой среднее значение величины плотности потока энергии переносимого волной:

$$J = \lim_{T \rightarrow \infty} \left(\frac{1}{T} \int_0^T |\vec{S}| dt \right) = \lim_{T \rightarrow \infty} \left(\frac{1}{T} \int_0^T \vec{E} \times \vec{H} dt \right)$$

где $\vec{S} = \vec{E} \times \vec{H}$ - вектор Пойнтинга.

Расчет интенсивности плоской, монохроматической волны с амплитудой электрического поля E_m в однородной среде с диэлектрической ϵ и магнитной μ проводимостью дает:

$$J = 0.5 n \epsilon E_m^2 / \xi_0 = 0.5 \xi_0 \mu H_m^2$$

где $n = \sqrt{\epsilon \mu}$ - коэффициент преломления среды;

$$\xi_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} - \mu_0 \epsilon_0 - \text{волновое сопротивление вакуума.}$$

Электромагнитные волны различных диапазонов длин волн характеризуются различными способами возбуждения и регистрации, по-разному взаимодействуют с веществом. Процессы излучения и поглощения электромагнитных волн, от самых длинных до ИК излучения, достаточно полно описываются соотношениями классической электродинамики.

В диапазонах более коротких длин волн, в особенности в диапазонах рентгеновских и γ -лучей, доминируют процессы, имеющие квантовую природу, и могут быть описаны только в рамках квантовой электродинамики на основе представления о дискретности этих процессов.

Электромагнитные волны широко используются в радиосвязи, радиолокации, телевидении, медицине, биологии, физике, астрономии и др. областях науки и техники.

Радиочастоты и сверхвысокие частоты являются составной частью спектра электромагнитных излучений в частотном диапазоне от единиц Гц до 300 ГГц. Основными параметрами ЭМИ являются длина волны (λ) и частота (f), которая связана с длиной волны обратной зависимостью (для условий распространения волны в воздухе):

$$f = c/\lambda$$

где c - скорость света.

Частоты колебаний ЭМИ измеряются в Герцах (Гц): 1 килгерц (кГц) = 10^3 Гц, 1 мегагерц (МГц) = 10^6 Гц, 1 гигагерц (ГГц) = 10^9 Гц. Классификация РЧ и СВЧ приведена в табл. 1.

На практике при оценке электромагнитной обстановки очень часто приходится учитывать отдельно или частоту колебаний, или длину волны.

ТАБЛИЦА 1

Электромагнитные излучения промышленной частоты

Частотный диапазон	Частота	Наименование частот		Длина волны	Наименование волн	
		Международное	Принятое в гигиенической практике		Международное	Принятое в гигиенической практике
--	> 3 Гц и менее	нет	ИЗЧ (инфразвуковая частота)	10 км и более	нет	нет
1	> 3-30 Гц	КНЧ (крайне низкая частота)	ЗЧ (звуковая частота)	< 10-10 ⁴ км	Декаметровые	нет
2	> 30-300 Гц	СНЧ (сверхнизкая частота)		< 10 ⁴ - 10 ³ км	Мегаметровые	нет
3	> 0,3-3 кГц	ИНЧ (инфранизкая частота)		< 10 ³ - 10 ² км	Гектометровые	нет
4	> 3-30 кГц	ОНЧ (очень низкая частота)		< 100-10 км	Мериметровые	нет
5	> 30-300 кГц	НЧ (низкая частота)	ВЧ (высокая частота)	< 10-1 км	Километровые	ДВ (длинные волны)
6	> 0,3-3 МГц	СЧ (средняя частота)		< 1-0,1 км	Гектометровые	СВ (средние волны)
7	> 3-30 МГц	ВЧ (высокая частота)		< 100-10 м	Декаметровые	КВ (короткие волны)
8	> 30-300 МГц	ОВЧ (очень высокая частота)	УВЧ (ультравысокая частота)	< 10-1 м	метровые	УКВ (ультракороткие волны)
9	> 0,3-3 ГГц	УВЧ (ультравысокая частота)	СВЧ (сверхвысокая частота)	< 1-0,1 м	Дециметровые	МКВ (микроволны)
10	> 3-30 ГГц	СВЧ (сверхвысокая частота)		10-1 см	Сантиметровые	
11	> 30-300 ГГц	КВЧ (крайне высокая частота)		< 10-1 мм	Миллиметровые	

Электросмоговые излучения не являются каким-то особенным лучевым фактором, а представляют лишь частный случай электромагнитных излучений сверхнизкочастотного диапазона (СНЧ) - 50/60 Гц.

1.2. Электрические поля

Электрическое поле представляет собой частную форму проявления электромагнитного поля. В своем проявлении это силовое поле, основным свойством которого является способность воздействовать на внесенный в него электрический заряд с силой, не зависящей от скорости заряда. Источниками электрического поля могут быть электрические заряды (движущиеся и неподвижные) и изменяющиеся во времени магнитные поля.

Основная количественная характеристика электрического поля – напряженность электрического поля E .

Электрическое поле в среде наряду с напряженностью характеризуется вектором электрической индукции D . В общем случае электрическое поле описывается уравнениями Максвелла.

1.3. Магнитные поля

Магнитное поле представляет собой частную форму электромагнитного поля. В своем проявлении это силовое поле, основным свойством которого является способность воздействовать на движущиеся электрические заряды (в т.ч. на проводники с током), а также на магнитные тела независимо от состояния их движения. Источниками магнитного поля могут быть движущиеся электрические заряды (проводники с током), намагниченные тела и изменяющиеся во времени электрические поля. Основная количественная характеристика магнитного поля – магнитная индукция B , которая определяет силу, действующую в данной точке поля в вакууме на движущийся электрический заряд и на тела, имеющие магнитный момент.

В материальных средах для магнитного поля вводится дополнительная характеристика – напряженность магнитного поля H , которая связана с магнитной индукцией соотношением:

$$H = B/\mu$$

где μ - магнитная проницаемость среды.

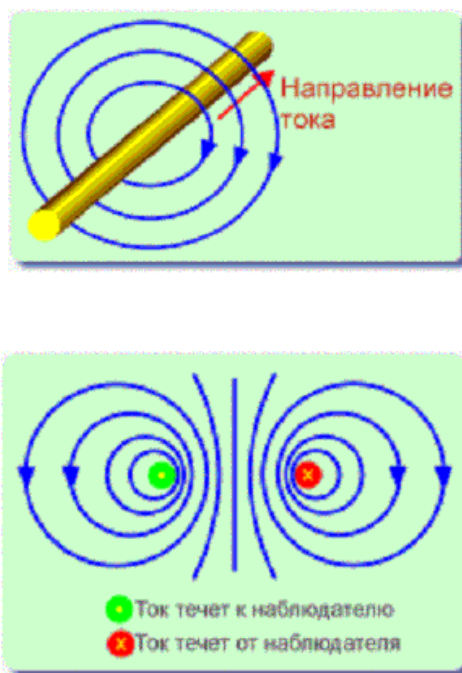


Рис. 3. Магнитное поле создается при движении электрических зарядов по проводнику

1.4. Источники электромагнитных излучений

1.4.1. Радиочастоты и сверхвысокие частоты

Источниками электромагнитных излучений радиочастот (ЭМИ РЧ) и сверхвысоких частот (СВЧ) являются технические средства и изделия, которые предназначены для применения в различных сферах человеческой деятельности. В основе этих изделий используются физические свойства ЭМ излучений: распространение в пространстве и отражение, нагрев материалов, взаимодействие с веществами и т. п., а также устройства, предназначенные не для излучения электромагнитной

энергии в пространство, а для выполнения какой-то иной задачи, но при работе которых протекает электрический ток, создающий паразитное электромагнитное излучение. Свойства ЭМИ РЧ и СВЧ распространяться в пространстве и отражаться от границы двух сред используются в связи (радио- и телестанции, ретрансляторы, радио- и сотовые телефоны), радиолокации (радиолокационные комплексы различного функционального назначения, навигационное оборудование). Способность ЭМИ РЧ и СВЧ нагревать различные материалы используется в различных технологиях по обработке материалов, полупроводников, сварки синтетических материалов, в приготовлении пищевых продуктов (микроволновые печи), в медицине (физиотерапевтическая аппаратура).

Микроволновая печь (или СВЧ-печь) в своей работе использует для разогрева пищи электромагнитное излучение, называемое также микроволновым излучением или СВЧ-излучением. Рабочая частота СВЧ-излучения микроволновых печей составляет 2,45 ГГц. Именно этого излучения и боятся многие люди. Однако современные микроволновые печи оборудованы достаточно совершенной защитой, которая не дает электромагнитному излучению вырываться за пределы рабочего объема. Вместе с тем, нельзя говорить, что излучение совершенно не проникает вне микроволновой печи. По разным причинам часть электромагнитного излучения проникает наружу, особенно интенсивно, как правило, в районе правого нижнего угла дверцы.

Непосредственными источниками электромагнитного излучения являются те части технических изделий, которые способны создавать в пространстве электромагнитные волны. В радиоаппаратуре это антенные системы, генераторные лампы, катодные выводы магнетронов, места неплотного сочленения фидерных трактов, разэкранированные места генераторных шкафов, экраны электронных визуальных средств отображения информации; на установках по термообработке материалов - рабочие индукторы и конденсаторы, согласующие трансформаторы, батареи конденсаторов, места разэкранирования фидерных линий.

Радары

Радиолокационные станции оснащены, как правило, антеннами зеркального типа и имеют узконаправленную диаграмму излучения в виде луча, направленного вдоль "оптической оси".

Радиолокационные системы работают на частотах от 500 МГц до 15 ГГц, однако отдельные системы могут работать на частотах до 100 ГГц. Создаваемый ими ЭМ-сигнал принципиально отличается от излучения других источников. Связано это с тем, что периодическое перемещение антенны в пространстве приводит к пространственной прерывистости облучения. Временная прерывистость облучения обусловлена цикличностью работы радиолокатора на излучение. Время наработки в различных режимах работы радиотехнических средств может исчисляться от нескольких часов до суток. У метеорологических радиолокаторов с временной прерывистостью 30 мин - излучение, 30 мин - пауза, суммарная наработка не превышает 12 ч, в то время как радиолокационные станции аэропортов в большинстве случаев работают круглосуточно. Ширина диаграммы направленности в горизонтальной плоскости обычно составляет несколько градусов, а длительность облучения за период обзора составляет десятки миллисекунд.

Радары метрологические могут создавать на удалении 1 км плотность потока энергии (ППЭ) ~ 100 Вт/м² (эта величина на 6 порядков превышает величину, которая считается безопасной, но с поправкой, что это очень кратковременное излучение) за каждый цикл облучения. Радиолокационные станции аэропортов создают ППЭ $\sim 0,5$ Вт/м² на расстоянии 60 м. Морское радиолокационное оборудование устанавливается на всех кораблях, обычно оно имеет мощность передатчика на порядок меньшую, чем у аэродромных радаров, поэтому в обычном режиме сканирования ППЭ, создаваемое на расстоянии нескольких метров, не превышает 10 Вт/м². Сравнение уровней создаваемых радаром излучений с другими источниками СВЧ-диапазона приведено на рис. 4.

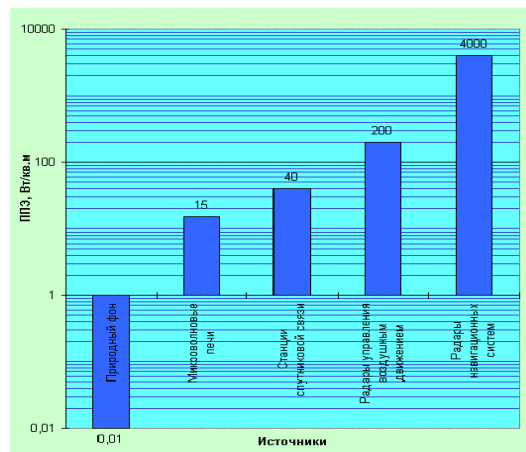


Рис. 4. Уровни ЭМИ-радаров в сравнении с другими источниками СВЧ-диапазона

Возрастание мощности радиолокаторов различного назначения и использование остронаправленных антенн кругового обзора приводит к значительному увеличению интенсивности ЭМИ СВЧ-диапазона и создает на местности зоны большой протяженности с высокой плотностью потока энергии. Наиболее неблагоприятные условия отмечаются в жилых районах городов, в черте которых размещаются аэропорты.

Системы спутниковой связи

Системы спутниковой связи состоят из приемопередающей станции на Земле и спутника, находящегося на орбите. Диаграмма направленности антенны станций спутниковой связи имеет ярко выраженный узконаправленный основной луч – главный лепесток. ППЭ в главном лепестке диаграммы направленности может достигать нескольких сотен Вт/м² вблизи антенны, создавая также значительные уровни излучения на большом удалении. Например, станция мощностью 225 кВт, работающая на частоте 2,38 ГГц, создает на расстоянии 100 км ППЭ равное 2,8 Вт/м². Однако рассеяние энергии от основного луча очень небольшое и происходит больше всего в районе размещения антенны.

Типичный расчетный график распределения ППЭ на высоте 2 м от поверхности земли в районе размещения антенны спутниковой связи приведен на рис. 5.

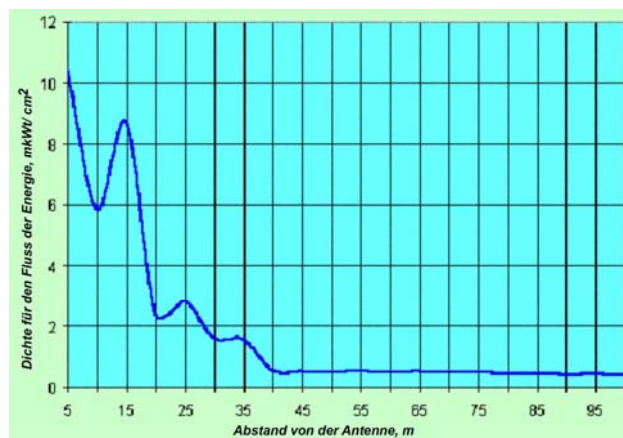


Рис. 5. График распределения плотности потока электромагнитного поля на высоте 2 м от поверхности земли в районе установки антенны спутниковой связи

Существуют два основных опасных случая облучения:

- непосредственно в районе размещения антенны;
- при приближении к оси главного луча на всем его протяжении.

Теле- и радиостанции

Передающие радиоцентры (ПРЦ) размещаются в специально отведенных для них зонах и могут занимать довольно большие территории (до 1000 га). По своей структуре они включают в себя одно

или несколько технических зданий, где находятся радиопередатчики, и антенные поля, на которых располагаются до нескольких десятков антенно-фидерных систем (АФС).

Зону возможного неблагоприятного действия ЭМИ, создаваемых ПРЦ, можно условно разделить на две части.

Первая часть зоны – это собственно территория ПРЦ, где размещены все службы, обеспечивающие работу радиопередатчиков и АФС. Это территория охраняется, и на нее допускаются только лица, профессионально связанные с обслуживанием передатчиков, коммутаторов и АФС.

Вторая часть зоны – это прилегающие к ПРЦ территории, доступ на которые не ограничен и где могут размещаться различные жилые постройки, в этом случае возникает угроза облучения населения, находящегося в этой части зоны.

На территориях размещения передающих радиоцентров, а нередко и за их пределами, наблюдаются высокие уровни ЭМИ низкой, средней и высокой частоты (ПРЦ НЧ, СЧ и ВЧ). Детальный анализ электромагнитной обстановки на территориях ПРЦ свидетельствует о ее крайней сложности, связанной с индивидуальным характером интенсивности и распределения ЭМИ для каждого радицентра. В связи с этим специальные исследования такого рода проводятся для каждого отдельного ПРЦ.

Широко распространенными источниками ЭМИ в населенных местах в настоящее время являются радиотехнические передающие центры (РТПЦ), излучающие в окружающую среду ультракороткие волны ОВЧ и УВЧ-диапазонов.

Сравнительный анализ санитарно-защитных зон (СЗЗ) и зон ограничения застройки в зоне действия таких объектов показал, что наибольшие уровни облучения людей и окружающей среды наблюдаются в районе размещения РТПЦ «старой постройки» с высотой антенной опоры не более 180 м.

Наибольший вклад в суммарную интенсивность воздействия вносят «уголковые» трех- и шестиэтажные антенны ОВЧ ЧМ-вещания.

Сотовая связь

Основными элементами системы сотовой связи являются базовые станции (БС), которые поддерживают радиосвязь с мобильными радиотелефонами (МРТ). Базовые станции БС и МРТ являются источниками электромагнитного излучения в УВЧ-диапазоне.

Некоторые технические характеристики действующих в настоящее время в мире стандартов системы сотовой радиосвязи приведены в табл. 2.

ТАБЛИЦА 2

Краткие технические характеристики стандартов системы сотовой радиосвязи

Наименование стандарта	Диапазон рабочих частот БС	Диапазон рабочих частот МРТ	Максимальная излучаемая мощность БС	Максимальная излучаемая мощность МРТ	Радиус "соты"
NMT-450 аналоговый	463 – 467,5 МГц	453 – 457,5 МГц	100 Вт	1,0 Вт	1,0 – 40 км
AMPS аналоговый	869 – 894 МГц	824 – 849 МГц	100 Вт	0,6 Вт	2,0 – 20 км
D-AMPS (IS-136) цифровой	869 – 894 МГц	824 – 849 МГц	50 Вт	0,2 Вт	0,5 – 20 км
CDMA цифровой	869 – 894 МГц	824 – 849 МГц	100 Вт	0,6 Вт	2,0 – 40 км
GSM-900 цифровой	925 – 965 МГц	890 – 915 МГц	40 Вт	0,25 Вт	0,5 – 35 км
GSM-1800 (DCS) цифровой	1805 – 1880 МГц	1710 – 1785 МГц	20 Вт	0,125 Вт	0,5 – 35 км

Базовые станции поддерживают связь с находящимися в их зоне действия мобильными радиотелефонами и работают в режиме приема и передачи сигнала. В зависимости от стандарта, БС излучают электромагнитную энергию в диапазоне частот от 463 до 1880 МГц.

Антенны БС устанавливаются на высоте 15–100 метров от поверхности земли на уже существующих постройках (общественных, служебных, производственных и жилых зданиях, дымовых трубах промышленных предприятий и т. д.) или на специально сооруженных мачтах.

Среди установленных в одном месте антенн БС имеются как передающие (или приемопередающие), так и приемные антенны, которые не являются источниками ЭМИ.

Передающие (приемопередающие) антенны БС могут быть двух типов:

- с круговой диаграммой направленности в горизонтальной плоскости (тип «Omni») – рис. 6;
- направленные (секторные) – рис. 7.

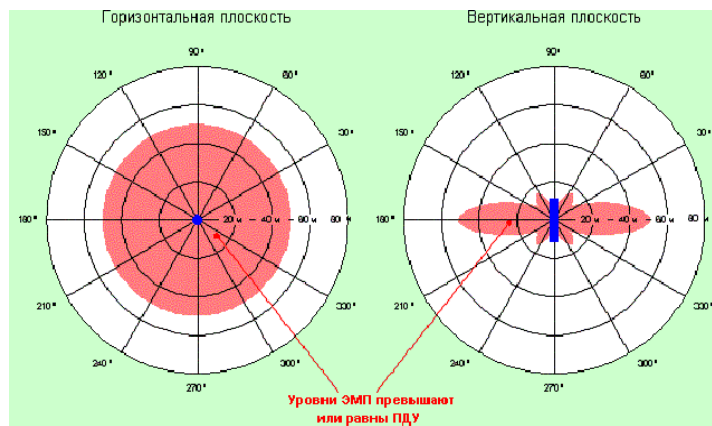


Рис. 6. Диаграмма направленности антенны типа «Omni»

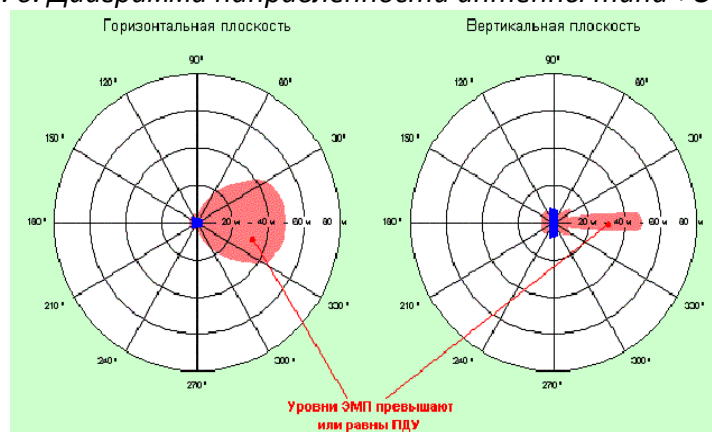


Рис. 7. Диаграмма направленности секторной антенны

Антенны БС размещаются на уже существующих постройках любого типа и на специально сооружаемых мачтах. Среди установленных в одном месте антенн БС имеются как передающие (или приемопередающие), так и приемные антенны, которые не являются источниками ЭМИ. Диаграмма направленности антенн в вертикальной плоскости построена таким образом, что основная энергия излучения (более 90 %) сосредоточена в довольно узком «луче» (рис. 8).

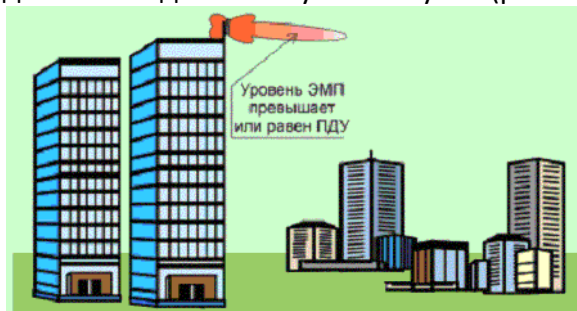


Рис. 8. Диаграмма направленности антенн

Он всегда направлен в сторону от сооружений, на которых находятся антенны БС, и выше прилегающих построек, что является необходимым условием для нормального функционирования системы сотовой связи.

Мобильный радиотелефон (МРТ) представляет собой малогабаритный приемопередатчик. В зависимости от стандарта телефона, передача ведется в диапазоне частот 453 – 1785 МГц. Мощность излучения МРТ является величиной переменной, в значительной степени зависящей от состояния канала связи «мобильный радиотелефон – базовая станция», т. е. чем выше уровень сигнала БС в месте приема, тем меньше мощность излучения МРТ. Максимальная мощность находится в границах 0,125–1 Вт, однако в реальной обстановке она обычно не превышает 0,05 – 0,2 Вт.

Персональный компьютер

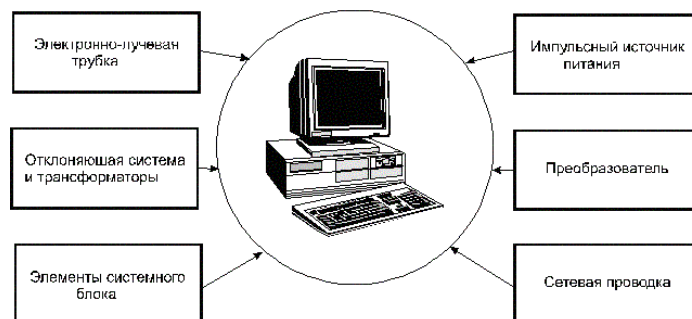


Рис. 9. Основные излучающие элементы ПК

Основными составляющими частями персонального компьютера (ПК) (рис. 9) являются:

- системный блок (процессор)
- разнообразные устройства ввода/вывода информации:
- клавиатура, дисковые накопители, принтер, сканер и т. п.

Каждый персональный компьютер включает средство визуального отображения информации, называемое по-разному – монитор, дисплей, главным компонентом которого часто является устройство на основе электронно-лучевой трубки. ПК часто оснащают сетевыми фильтрами (например, типа «Pilot»), источниками бесперебойного питания и другим вспомогательным электрооборудованием. Все эти элементы при работе ПК формируют сложную электромагнитную обстановку на рабочем месте пользователя (см. таблицу 3). Спектральная характеристика излучения ПК представлена на рис. 10.

ТАБЛИЦА 3

Частотные характеристики электромагнитного излучения ПК

Источник	Диапазон частот (первая гармоника)
Монитор сетевой трансформатор блока питания	50 Гц
статический преобразователь напряжения в импульсном блоке питания	20 - 100 кГц
блок кадровой развертки и синхронизации	48 - 160 Гц
блок строчной развертки и синхронизации	15 - 110 кГц
ускоряющее анодное напряжение монитора (только для мониторов с ЭЛТ)	0 Гц (электростатика)
Системный блок (процессор)	50 Гц - 1000 МГц
Устройства ввода/вывода информации	0 Гц, 50 Гц
Источники бесперебойного питания	50 Гц, 20 - 100 кГц

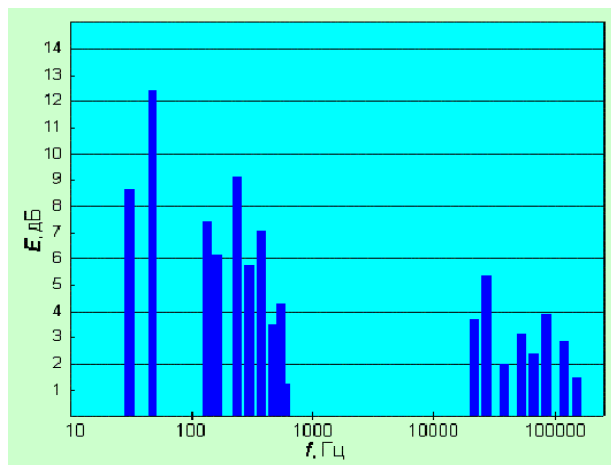


Рис. 10. Спектральная характеристика ПК

Кроме того, на рабочем месте пользователя источниками более мощными, чем компьютер, могут выступать объекты:

- ЛЭП
- трансформаторные подстанции
- распределительные щиты
- электропроводка
- бытовые и конторские электроприборы (у всех источников первая гармоника – 50 Гц)
- телевизоры (0–15,6 кГц)
- соседние ПК (0-1000 МГц) и т. д.

Общая картина поля на рабочем месте может быть очень сложной. (рис. 11).

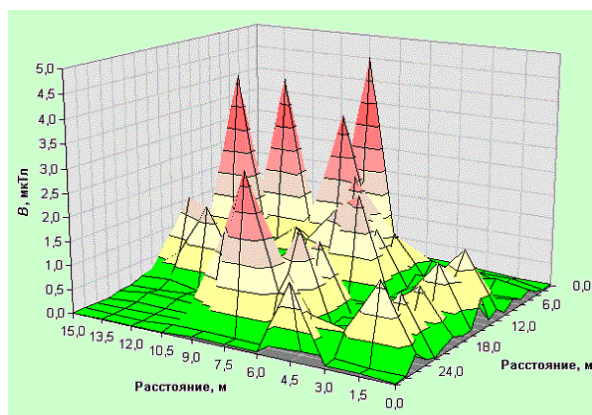


Рис. 11. Пример типичного распределения магнитного поля в диапазоне от 5 Гц до 2 кГц в помещении, оснащенном компьютерами

1.4.2. Электромагнитные излучения промышленной частоты

Основными источниками электромагнитных излучений промышленной частоты (50/60 Гц) являются элементы токопередающих систем различного напряжения (линии электропередачи, открытые распределительные устройства, их составные части), электроприборы и аппаратура промышленного и бытового назначения, потребляющая электроэнергию.

Бытовые приборы

Из бытовых приборов наиболее мощными следует признать СВЧ-печи, различного рода грили, холодильники с системой «без инея», кухонные вытяжки, электроплиты, телевизоры. Реально создаваемое ЭМИ в зависимости от конкретной модели и режима работы может сильно различаться

среди оборудования одного типа (рис. 12). Все нижеприведенные данные относятся к магнитному полю промышленной частоты 50 Гц. Согласно современным представлениям, оно может быть опасным для здоровья человека, если происходит продолжительное облучение (регулярно, не менее 8 часов в сутки, в течение нескольких лет) с уровнем выше 0,2 мкТл. Средние уровни магнитного поля промышленной частоты бытовых электроприборов на расстоянии 0,3 м показаны на рис. 15, а изменение уровня в зависимости от расстояния на рис.13.

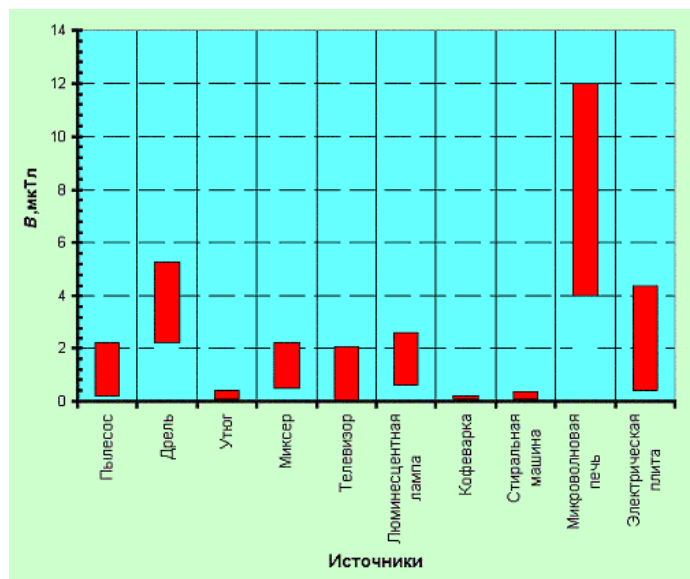


Рис. 12. Уровни излучений магнитного поля бытовых приборов на расстоянии 0,3 м

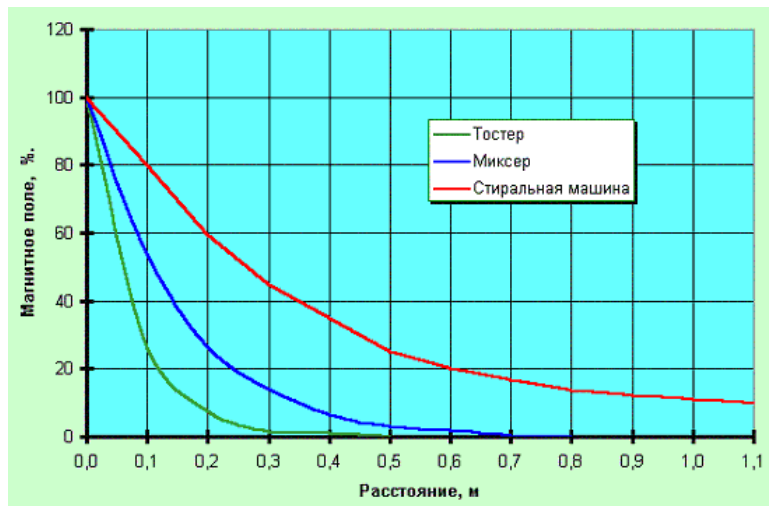


Рис. 13. Изменение уровня магнитного поля промышленной частоты бытовых электроприборов в зависимости от расстояния

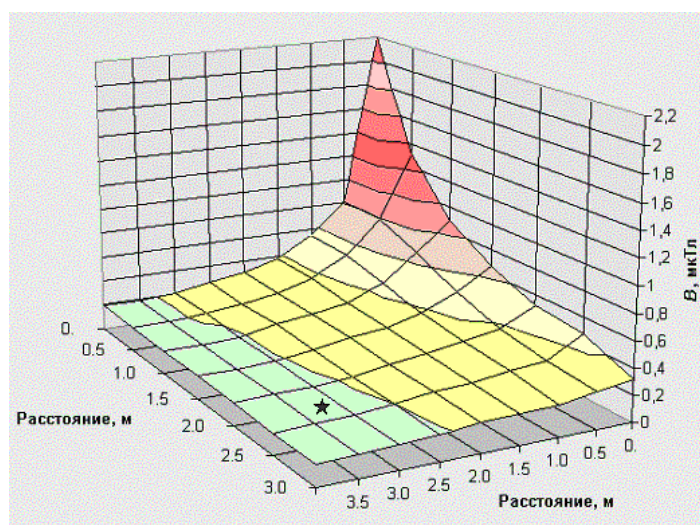
В табл. 4 представлены данные о расстоянии, на котором фиксируется магнитное поле промышленной частоты (50 Гц) величиной 0,2 мкТл при работе ряда бытовых приборов.

Распространение магнитного поля промышленной частоты от бытовых электрических приборов (выше уровня 0,2 мкТл)

Источник	Расстояние, на котором фиксируется величина больше 0,2 мкТл
Холодильник, оснащенный системой "No frost" во время работы компрессора	1,2 м от дверцы; 1,4 м от задней стенки
Холодильник обычный во время работы компрессора	0,1 м от электродвигателя компрессора
Утюг (режим нагрева)	0,25 м от ручки
Телевизор 14"	1,1 м от экрана; 1,2 м от боковой стенки
Электроотопитель	0,3 м
Торшер с двумя лампами по 75 Вт	0,03 м (от провода)
Электродуховка	0,4 м от передней стенки
Аэрогриль	1,4 м от боковой стенки

Электропроводка

Среди наиболее опасных источников, **излучающих в жилые квартиры, но находящихся вне их**, особое место занимают трансформаторные подстанции, домовые распределительные щиты электропитания, кабели электропитания. Наличие их можно в большинстве случаев определить визуально, однако безопасное расстояние можно определить только с помощью специальных приборов. Типичное безопасное расстояние – 1,5-5 метров. Пример распределения магнитного поля промышленной частоты в комнате, в которую излучает внешний источник, приведен на рис. 14.



*Рис. 14. Источник излучения - общий силовой кабель подъезда.
Зона для выбора спального места (безопасная зона) отмечена звездочкой*

Наибольшее влияние на электромагнитную обстановку жилых помещений в диапазоне промышленной частоты 50 Гц оказывает электротехническое оборудование здания, а именно кабельные линии, подводящие электричество ко всем квартирам и другим потребителям системы жизнеобеспечения здания, и распределительные щиты и трансформаторы. В помещениях, смежных с этими источниками, обычно повышен уровень магнитного поля промышленной частоты. Уровень электрического поля промышленной частоты при этом обычно невысокий и не превышает ПДУ для населения 500 В/м.

Примеры распределения магнитного поля промышленной частоты в помещениях приведены на рис. 15, 16. Звездочкой (★) показана зона с безопасным для здоровья уровнем магнитного поля.

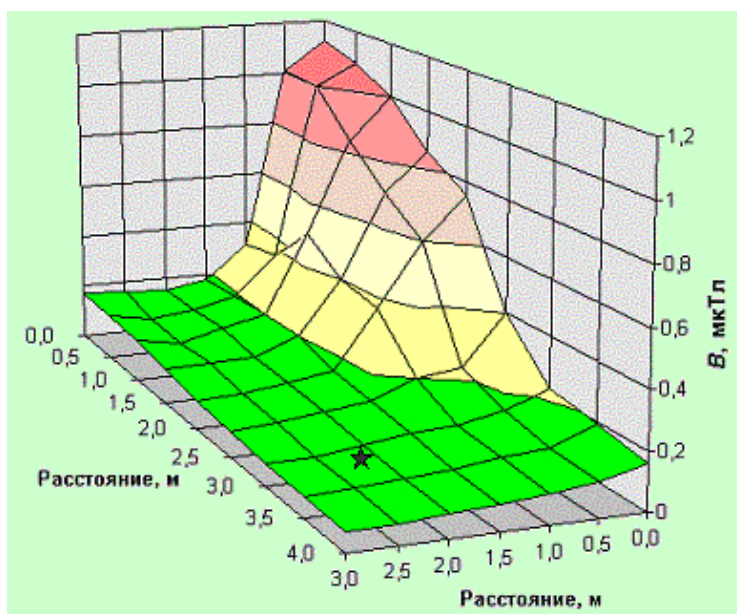


Рис. 15. Распределение магнитного поля промышленной частоты в жилом помещении. Источник поля - распределительный пункт электропитания, находящийся в смежном нежилом помещении

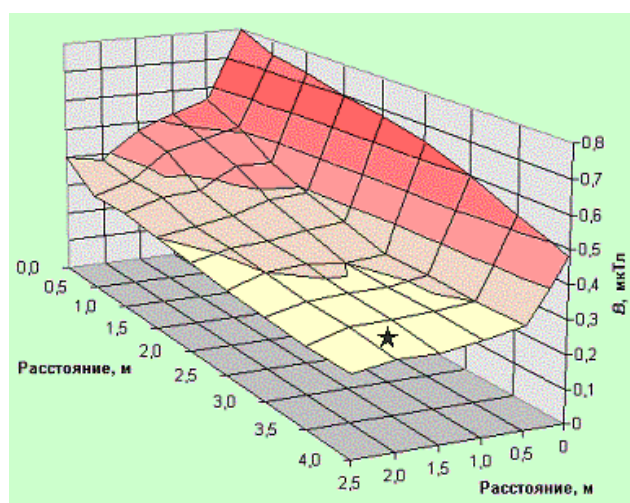


Рис. 16. Распределение магнитного поля промышленной частоты в жилом помещении. Источник поля - кабельная линия, проходящая в подъезде по внешней стене комнаты

Линии электропередачи

В зависимости от назначения и номинального напряжения линии электропередачи (ЛЭП) подразделяются на:

- сверхдальние (500 кВ и выше);
- магистральные (220-330 кВ);
- распределительные (30-150 кВ);
- подводящие (менее 20 кВ).

Провода работающей линии электропередачи создают в прилегающем пространстве электрическое и магнитное поля промышленной частоты. Расстояние, на которое распространяются эти поля от проводов линии, достигает десятков метров.

Дальность распространения электрического поля зависит от класса напряжения ЛЭП (цифра, обозначающая класс напряжения, стоит в названии ЛЭП – например, ЛЭП 220 кВ): чем выше напряжение – тем больше зона повышенного уровня электрического поля, при этом размеры зоны не изменяются в течение времени работы ЛЭП.

Дальность распространения магнитного поля зависит от величины протекающего тока или от нагрузки линии. Поскольку нагрузка ЛЭП может неоднократно изменяться как в течение суток, так и с изменением сезонов года, размеры зоны повышенного уровня магнитного поля также меняются.

Глава 2. Измерения бытовых и промышленных электромагнитных полей

2.1. Единицы измерения

ЭМИ РЧ и СВЧ характеризуются тремя основными параметрами: напряженностью электрического поля (E), напряженностью магнитного поля (H) и плотностью потока энергии ($ППЭ$). Оценка интенсивности РЧ и СВЧ различных диапазонов неодинакова. В диапазоне радиочастотного излучения менее 300 МГц (по рекомендации Международной организации IRPA / INIRC (Международный комитет по неионизирующим излучениям / Международная ассоциация по радиационной защите) - менее 10 МГц) интенсивность излучения выражается напряженностью электрической и магнитной составляющих и определяется соответственно в вольтах на метр (В/м) (или киловольтах на метр (кВ/м): $1 \text{ кВ/м} = 10^3 \text{ В/м}$) и амперах на метр (А/м). В диапазоне СВЧ, т.е. выше 300 МГц, интенсивность, или ППЭ, выражается в ваттах на метр квадратный (Вт/м^2 ; $1 \text{ Вт/м}^2 = 0,1 \text{ мВт/см}^2 = 100 \text{ мкВт/см}^2$).

Для характеристики **магнитных полей** вводится величина, называемая индукцией МП (B), равная силе, с которой МП действует на единичный элемент тока, расположенный перпендикулярно к вектору индукции. Единицей индукции МП является тесла (Тл). Для характеристики МП в вакууме вводится величина, называемая напряженностью МП (H), измеряемая в амперах на метр (А/м). Напряженность и индукция МП связаны соотношением:

$$B = \mu \mu_0 H,$$

где μ_0 - магнитная постоянная, равная 4×10^{-7} Гс/м; μ - относительная магнитная проницаемость веществ. $1 \text{ Тл} = 7,965 \text{ А/м}$; $1 \text{ А/м} = 1,256 \times 10^{-6} \text{ Тл}$. Внесистемная единица магнитной индукции - гаусс (Гс): $1 \text{ Гс} = 10^{-4} \text{ Тл}$; напряженность МП - эрстед (Э): $1 \text{ Э} = 79,58 \text{ А/м}$. В воздушной среде $1 \text{ Гс} = 1 \text{ Э}$.

Кроме того, применяется термин «гамма», обозначающий величину, которая равна 1 нТл.

Что касается сотовых телефонов, то сегодня уровень безопасности сотового телефона принято оценивать в **SAR (Specific Absorption Rates)** – по уровню излучения (эмиссии) излучаемой энергии в ваттах на кг мозгового вещества (Вт/кг). Чем значение SAR меньше, тем безопаснее устройство.

2.2. Аппаратура для измерений

2.2.1. Радиочастоты и сверхвысокие частоты

Далее следуют несколько приборов, которые отвечают требованиям к средствам инструментального контроля ЭМП-стандартов ЕЭС и Международного комитета по защите от неионизирующих излучений.

Эти приборы применялись при контроле активности действия изделий торговой марки Fostac ® компании **Fostac AG** (Schweiz)



Рис. 17. Анализатор поля EFA-3 (фирма "Wandel & Goltermann")

Назначение

Измерения магнитной и электрической составляющих низкочастотных электромагнитных полей, создаваемых различными источниками: линиями электропередач переменного тока, трансформаторными подстанциями, промышленными и бытовыми электроприборами, средствами визуального отображения информации (дисплеями компьютеров и телевизорами) и т. п.

Характеристики

Подключение к компьютеру через волоконно-энергетический интерфейс RS 232 для передачи результатов измерений. Автоматическое проведение измерений длительностью до 24 часов. Возможность автоматического проведения долговременных параллельных измерений электрического и магнитного полей благодаря функции автономной записи результатов, осуществляемой датчиком электрического поля. Хранение 4095 значений результатов измерений. Обработка полученных данных с помощью широкодоступных программ (например, Microsoft® Excel™). Развитые функции фильтрации сигнала - полосовые фильтры для всех промышленных частот и их гармоник, полосовой фильтр для частоты, выбранной пользователем. Встроенный частотомер. Меню пользователя. Возможность поставки программных средств расчета переменных электрического и магнитного полей с учетом множественных источников.

ТАБЛИЦА 5

<p>Диапазон частот : от 5 Гц до 30 кГц Предел измерений на частоте 50/60 Гц: со встроенным датчиком магнитного поля: от 50 нТл до 10 мТл или от 5 нТл до 10 мТл с полосовым фильтром; с дополнительным датчиком магнитного поля: от 10 нТл до 10 мТл или от 1 нТл до 10 мТл с полосовым фильтром; с внешним датчиком электрического поля: от 0,5 В/м до 100 кВ/м или от 0,1 В/м до 100 кВ/м с полосовым фильтром</p>	<p>Точность измерений от $\pm 3\%$... $\pm 8\%$) в зависимости от полосы частот и режима фильтрации Функции фильтрации : Широкополосные измерения с функцией частотомера: 5 Гц - 2 кГц/5 Гц - 30 кГц/30 Гц - 2 кГц/30 Гц - 30 кГц Полосовая фильтрация: 16,67 Гц/50 Гц/60 Гц/400 Гц/2-е и 3-и гармоники</p>
<p>Дисплей и сигнализация Обновление показателей.....3 сек. Время установки.....2 сек. Тип дисплея.....ЖК Визуальная сигнализация.....Красный светодиод Звуковая сигнализация.....Встроенный динамик Сигнализация.....По заданной величине Выбор пределов измерений.....Ручной или автоматический</p>	<p>Функции измерения Величины.....нТл, мкТл, мТл, мГс, Гс, В/м, кВ/м Измерение среднеквадратичное или пиковое Измерение частоты.....Частота максимального сигнала Калибровка.....По используемому датчику Самодиагностика Автоматическая при включении питания</p>
<p>Дополнительные фильтры Определяемые пользователем (от 15 Гц до 2 кГц)</p>	<p>Хранение данных Автоматические измерения по таймеру или ручное сохранение (4000 полных результатов)</p>
<p>Основные характеристики Источник питания по выбору Аккумулятор..... ..5xKR14(1.2 В) Батареи.....5xR14(1.5 В)</p>	<p>Условия эксплуатации: Температура окружающей среды.....0 +50 °С Относительная влажность воздуха.....5 - 95 %</p>

<p><i>Время непрерывной работы</i></p> <p>Аккумуляторы/батареи.....10ч/20ч</p> <p>Зарядка.....от источника LNT-1x</p>	
<p>Размеры</p> <p>Прибор.....110x200x60 мм</p> <p>Датчик Е-поля.....104x104x104 мм</p> <p>Масса</p> <p>Прибор.....1000 г</p> <p>Датчик Е- поля.....1000 г</p>	<p>Комплектность</p> <p>Измеритель EFA-3, внешний датчик Е-поля, сумка-чехол, оптоволоконный кабель, штатив, NiCd аккумуляторы, 2 зарядных устройства</p> <p>Дополнительно: прецизионный датчик Н-поля (A=100 см²), миниатюрный датчик Н-поля D=3 см с кабелем 1,2 м, кабель для датчика Н-поля, комплект связи с ПК (конвертер, кабель, дискета), другие принадлежности по заказу</p>



Рис. 18. Измерители электромагнитного излучения EMR-20, EMR-30 (фирма "Wandel & Goltermann")

Назначение

Изотропные (ненаправленные) измерения напряженности высокочастотных электрических полей, создаваемых различными источниками: радиовещательными и телевизионными передатчиками, медицинским оборудованием, радарными, передатчиками систем радио- и сотовой связи, микроволновыми печами и т. п., измерения в безэховых и ТЕМ-камерах.

Характеристики

- показания прибора в процентах от устанавливаемого граничного значения;
- непосредственное подключение к персональному компьютеру через волоконно-энергетический двунаправленный последовательный интерфейс V.24 (RS 232) для передачи результатов измерений, дистанционного управления и калибровки;
- хранение 1500 значений результатов измерений (только для EMR-30);
- обработка полученных данных с помощью широкодоступных программ (например, Microsoft® Excel™);

Комплектность

Дополнительно к основному прибору EMR-20 и EMR-30 также комплектуются кейсом для хранения и перевозки, комплектом для связи с ПК, настольным штативом и NiCd аккумуляторами (вместе с соответствующим зарядным устройством).

ТАБЛИЦА 6

Технические характеристики EMR-20, EMR-30

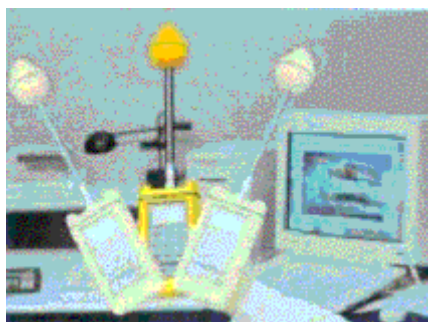
Технические характеристики EMR-20, EMR-30	
Диапазон частот	от 100 кГц до 3 ГГц
Диапазоны измеряемых величин	1,0 - 800 В/м, 0, 27 мкВт/см ² - 170 мВт/см ²
Приведенная погрешность измерений	± 1 дБ
Величины	В/м, А/м, мВт/см ² , Вт/м ² , % от заданной величины
Выводимые результаты	Текущее значение или максимальное значение с момента включения

Усреднение	Текущее значение или результат усреднения за 6 минут
Дисплей	ЖКИ многофункциональный
Самотестирование	При включении
Особенности EMR-30	
Хранение результатов	1500 значений
Часы реального времени	
Пространственное усреднение	По заданному интервалу времени или по точкам измерений
Основные характеристики	
Габаритные размеры (с датчиком)	96x64x465 мм
Масса (с элементами питания)	450 г
Источник питания	
Аккумуляторы	2xMignon (AA) 1,2 В
Батареи	2xMignon (AA) 1,5 В
Время непрерывной работы	
С аккумуляторами	8 ч.
С батареями	>15 ч
Условия эксплуатации	
Температура окружающей среды	от 0 до +50°C
Относительная влажность воздуха	от 25 до 75 %

На рисунках 19-24 представлены комплекты измерительной аппаратуры.



*Рис. 19. Комплект связи с ПК.
Позволяет обрабатывать полученные данные
с помощью широкодоступных программ (например, Microsoft® Excel™)*



*Рис. 20. Измеритель электромагнитного излучения EMR-30.
Позволяет проводить измерения с пространственным усреднением*

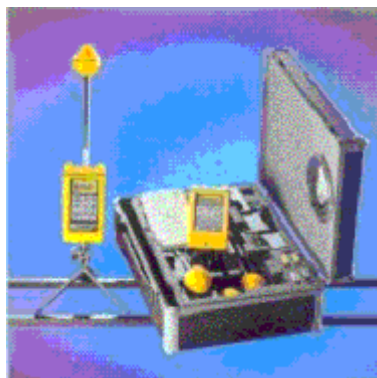


Рис. 21. Измерители электромагнитного излучения EMR-200, EMR-300 (фирма "Wandel & Goltermann"). Является улучшенными вариантами EMR-20, EMR-30. Назначение приборов и многие характеристики и возможности те же, но: диапазон частот другой - от 100 кГц до 60 ГГц, диапазоны измеряемых величин - 0,8 - 1000 В/м; 0,07 мкВт/см² - 260 мВт/см², 0,03 - 16 А/м.



Рис. 22. Датчики поля (входят в комплект EMR-200, EMR-300)

ТАБЛИЦА 7

Тип датчика поля	Диапазон частот, МГц	Пределы измерений		
		Напряженность электрического поля, В/м	Напряженность магнитного поля, А/м	Плотность потока энергии, мкВт/см ²
8	0,1-3000	1-800	-	0,27-170000
9	3-18000	1,2-1000	-	0,32-265000
10	27-1000	-	0,03-16 А/м	-
11	10-60000	1-800	-	0,27-170000
12	0,3-30	-	0,03-16 А/м	-
13	0,003-3	-	0,3-250 А/м	-

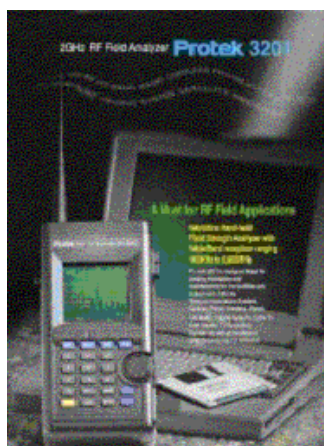


Рис. 23. Анализатор поля Protek 3201 (фирма "Wandel & Goltermann")

Назначение

Анализатор «Protek-3201» применяется при установке, наладке и текущем обслуживании оборудования систем сотовой, транкинговой и пейджинговой радиосвязи, кабельного и спутникового телевидения.

Комплектация

Стандартная широкополосная антенна, сумка-чехол, батареи типа АА (6 шт.), RS-232 кабель

Дополнительные

Переходник 70 - 50 Ом, F-BNC разъем, автомобильный адаптер, аттенюатор 20 дБ, 40 дБ, сетевой блок питания, мини-принтер RS-232, программное обеспечение для связи с ПК.

ТАБЛИЦА 8

Технические характеристики Protek 3201

Диапазон частот	100 кГц - 2060 МГц
Типы детектирования	N-FM, W-FM, AM, SSB
Шаг частоты	5 - 9995 кГц
Память каналов	10 банков x 160 каналов (1600 каналов)
Память данных	10 банков x 160 (1600)
Память установок пользователя	10 банков x 3 режима сканирования
Чувствительность	6 дБмкВ
Скорость сканирования	12,5 каналов/сек
Входное сопротивление	50 Ом
Максимальное входное напряжение	5 В
Диапазон измерений	N-FM: от -10дБмкВ до 40 дБмкВ W-FM/AM/SSB: от 0 дБмкВ до 50 дБмкВ
Разрешение	± 3 дБмкВ
Погрешность	± 0,5 дБмкВ
Частотомер	
Диапазон частот	9 - 2060 МГц
Разрешение	1 кГц
Чувствительность	9 - 2000 МГц: 150 мВ 20 - 1000 МГц: 100 мВ
Входное сопротивление	50 Ом
Максимальное входное напряжение	5 В
Память данных	10 каналов
Основные характеристики	
Динамик	Встроенный, внешний
Источник питания	6 батарей типа АА Сетевой блок питания Автомобильный адаптер 12В
Диапазон рабочих температур	от 0 до 40° С
Влажность воздуха	от 35 до 85%
Размеры (без антенны)	105x220x45 мм
Масса	700 г

Дополнительные широкополосные калиброванные антенны электрического и магнитного полей (в комплект к Protek 3201).

Диапазон частот 1 МГц - 1 ГГц.

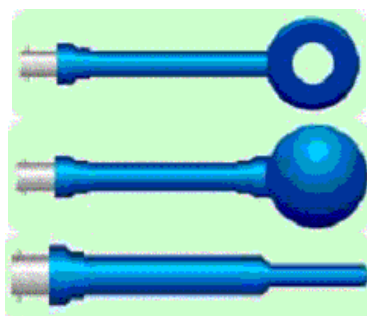


Рис. 24. 7405-902 Антенна для измерений магнитного поля (кольцо 3 см),
7405-904 Антенна для измерений электрического поля (шар 3,6 см)
7405-905 Антенна для измерений электрического поля (штырь 6 мм)

Дополнительные узкополосные калиброванные антенны	
Тип	Частота
ROD -30	30 МГц
ROD -160	160 МГц
ROD-300	300 МГц
ROD-800	800 МГц

Антенны, рассчитанные на другие частоты, поставляются по заказу.



Рис. 25. Тесламетр ETM -1 фирмы "Wandel & Goltermann"

Назначение

Прибор разработан для измерений уровней постоянного магнитного поля, источниками которого являются, например, медицинское оборудование, металлургические печи и транспорт на электрической тяге.

Характеристики

ETM-1 дополняет семейство анализаторов полей EFA-1 – EFA-3, обеспечивая измерения постоянных магнитных полей. Прибор имеет как автоматический, так и ручной выбор диапазона измерений. Результаты представляются на ЖК дисплее (3¹/₂ символа). Возможны измерения по одной или трем осям. Датчик соединяется с прибором экранированным кабелем длиной 1,5 м. Технические характеристики анализатора ETM-1 представлены в табл. 10.

В измерительной головке установлены три датчика, сигналы с которых обрабатываются в измерителе отдельно. Результатом является геометрическая сумма измеренных значений.

Для дистанционного управления ETM-1 используется интерфейс RS-232.

Комплектация

В комплект прибора входят измеритель, измерительная головка, экран измерительной головки, сумка-чехол, соединительный кабель RS-232, батарея и сетевой блок питания.

ТАБЛИЦА 10

Технические характеристики ETM-1

Характеристика направленности	Изотропная, трехкоординатная
Диапазон измерений	0,1 мТл - 1999 мТл
Тип датчиков	Датчик Холла
Диапазон частот	0 Гц
Точность измерений	± 2%
Основные характеристики	
Источник питания	Литиевая батарея 9 В или сетевой блок

	питания
Время непрерывной работы от батареи	15 ч
Размеры измерителя	160x80x30 мм
Размеры измерительной головки	12x12x100 мм
Вес	250 г
Диапазон рабочих температур	от 0 до +40° С



Рис. 26. Анализаторы поля **EFA-1** и **EFA-2**
(фирма "Wandel & Goltermann")

Назначение

Измерения магнитной составляющей низкочастотных электромагнитных полей, создаваемых различными источниками: линиями электропередач переменного тока, трансформаторными подстанциями, промышленными и бытовыми электроприборами, средствами визуального отображения информации (дисплеями компьютеров и телевизорами) и т. п.

Характеристики

EFA-1 и **EFA-2** компактны, имеют питание от малогабаритных батарей. Подключение к компьютеру через волоконно-энергетический интерфейс RS 232 для передачи результатов измерений. Автоматическое проведение измерений длительностью до 24 часов. Хранение 4095 значений результатов измерений (**EFA-2**). Обработка полученных данных с помощью широкодоступных программ (например, Microsoft® Excel™). Развитые функции фильтрации сигнала - полосовые фильтры для всех промышленных частот и их гармоник, полосовой фильтр для частоты, выбранной пользователем (**EFA-2**). Встроенный частотомер. Меню пользователя (**EFA-2**). Возможность поставки программных средств расчета переменного магнитного поля с учетом множественных источников.

Комплектность

Измеритель **EFA-1** или **EFA-2**, NiCd аккумуляторы, зарядное устройство.

Дополнительно : прецизионный датчик Н-поля ($A=100 \text{ см}^2$), миниатюрный датчик Н-поля $D=3 \text{ см}$ с кабелем 1,2 м, кабель для датчика Н-поля, сумка-чехол, комплект связи с ПК (конвертер, кабель, дискета), другие принадлежности по заказу.

ТАБЛИЦА 11

Технические характеристики **EFA-1** и **EFA-2**

<p>Диапазон частот : От 5 Гц до 30 кГц (3 дБ)</p> <p>Принцип измерения : Изотропное измерение действующих (среднеквадратических) или пиковых значений</p> <p>Измерения : Изотропные или однокоординатные</p> <p>Предел измерений на частоте 50/60 Гц</p>	<p>Точность измерений от 50 Гц до 400 Гц, широкополосный (5 Гц до 2 кГц) или выбираемый; $\pm 5\%$, $V > 500 \text{ нТл}$ (со встроенным датчиком магнитного поля); $\pm 3\%$, $\pm 1 \text{ нТл}$, $V > 40 \text{ нТл}$ (с дополнительным прецизионным датчиком магнитного поля); от 50 Гц до 5 кГц, широкополосный (5 Гц до 30 кГц) или выбираемый; $\pm 8\%$, $V > 500 \text{ нТл}$ (со встроенным датчиком</p>
--	---

<p>от 50 нТл до 10 мТл или от 5 нТл до 10 мТл с полосовым фильтром (со встроенным датчиком магнитного поля); от 10 нТл до 10 мТл или от 1 нТл до 10 мТл с полосовым фильтром (с дополнительным прецизионным датчиком магнитного поля) Точность значений на дисплее 0,1 %</p>	<p>магнитного поля); ± 3%, ± 1 нТл, В>40 нТл (с дополнительным прецизионным датчиком магнитного поля); 16,7 Гц, широкополосный (5 Гц до 2 кГц) или выбираемый; ± 6%, В>500 нТл (со встроенным датчиком магнитного поля); ± 5%, ± 1 нТл, В>40 нТл (с дополнительным прецизионным датчиком магнитного поля)</p>
<p>Функции фильтрации : Широкополосные измерения с функцией частотомера: 5 Гц - 2 кГц/5 Гц - 30 кГц/30 Гц - 2 кГц/30 Гц - 30 кГц; Полосовая фильтрация: 16,67 Гц/50 Гц/60 Гц/400 Гц/2-е и 3-и гармоники</p>	<p>Дисплей и сигнализация Обновление показателей.....3 сек. Время становки.....2 сек. Тип дисплея.....ЖК Визуальная сигнализация.....Красный светодиод Звуковая сигнализация.....Встроенный динамик Выбор пределов измерений.....Ручной или автоматический</p>
<p>Функции измерения Величины.....нТл, мкТл, мТл, мГс, Гс Измерение.....Среднеквадратичное или пиковое Индикация результатов..... Напряженность поля и компоненты поля Сигнализация.....по заданной величине Измерение частоты.....Частота максимального сигнала Калибровка.....по используемому датчику</p>	<p>Самодиагностика Автоматическая при включении питания Калибровка Автокалибровка Рекомендуемый интервал аттестации 24 мес. Интерфейсы Интерфейс для калибровки и передачи результатов измерения RS232 энергетический</p>

Приборы фирмы «Wandel & Goltermann» отвечают требованиям к средствам инструментального контроля ЭМИ-стандартов ЕЭС и Международного комитета по защите от неионизирующих излучений.



Рис. 27. **B&E metr** Измеритель напряженности электромагнитного поля **B&E metr** .
Компактный прибор для контроля параметров электромагнитного излучения

Назначение

Измеритель может применяться при проведении санитарно-гигиенического обследования помещений с электрооборудованием (персональные компьютеры, факсимильные аппараты, игровые автоматы и пр.). Типичные применения: общий анализ электромагнитного фона в помещении, поиск источников интенсивного электромагнитного излучения, аттестация рабочих мест и пр. в соответствии с требованиями гигиенических стандартов. Сертификация персональных компьютеров по международным стандартам MPR II и TCO 92/95 (при использовании антенны для сертификации ВДТ).

Применение

Аккредитованные испытательные лаборатории, производственные лаборатории в энергетике. Организации, осуществляющие аттестацию рабочих мест. Технические характеристики V&E metr представлены в таблице 12.

ТАБЛИЦА 12

Технические характеристики V&E metr

Характеристика	Значение
Диапазоны частот, кГц	0,005 - 400
Пределы измерения электрического поля, В/м В диапазоне частот 5 Гц - 2 кГц В диапазоне частот 2 кГц - 0,4 МГц	5 - 500 0,2 - 50
Пределы измерения магнитного поля, мкТл. В диапазоне частот 5 Гц - 2 кГц В диапазоне частот 2 кГц - 0,4 МГц	0,04 - 5 5000 - 500000
Неравномерность АЧХ в указанных диапазонах, дБ	3
Питание	Аккумуляторная батарея
Время непрерывной работы, ч.	15
Рабочий диапазон температур, °С	+15 ... +40
Габариты датчика измерителя, мм.	210x100x60
Масса прибора, кг	0,45

2.2.2. Электромагнитные излучения промышленной частоты

Уровень напряженности поля от ЛЭП есть функция номинального значения ее напряженности и конструктивно-строительных параметров (размер проводов, расстояние между ними, высота над поверхностью земли). В связи с этим уровни воздействия на людей, находящихся под ЛЭП, зависят от расстояния до токоведущих частей. Наибольшее значение регистрируется при нахождении непосредственно под проводами и по центру между опорами. С удалением в сторону от оси линии и ближе к опорам уровни напряженности поля быстро убывают до своих минимальных значений. Естественно предположить, что максимальные уровни напряженности поля, с которыми может встретиться человек, находятся в непосредственной близости к токоведущим проводам.

2.3. Методики измерений

2.3.1. Радиочастоты и сверхвысокочастотные излучения

Электрическое поле от антенны имеет три зоны: ближнюю - зона индукции или зона несформированной волны (имеется магнитная и электрическая составляющие); промежуточную, или интерференционную (происходит наложение магнитных и электрических полей), и дальнюю, или зону сформированной волны. Размеры этих зон зависят от типов антенн, длины волн излучения, а также площади раскрытия антенны. Их можно определять по формуле (табл. 13).

**Определение зон излучения от различных типов
направленных антенн**

Зоны излучения	Направленные антенны		Ненаправленные (изотропные) антенны
	Для параболических и круглых антенн	Для других типов антенн	
Ближняя ($R_{б.з.}$, м)	$R_{б.з.} = L^2/4\lambda$	$R_{б.з.} = L_2 L_1/4\lambda$	$R_{б.з.} = \lambda/2\pi$
Промежуточная ($R_{п.з.}$, м)	Размер зоны $R_{п.з.} = R_{д.з.} - R_{б.з.}$		$R_{п.з.} = \lambda/\pi$
Дальняя ($R_{д.з.}$, м)	$R_{д.з.} = L^2/\lambda$	$R_{д.з.} = L_1 L_2/\lambda$	$R_{д.з.} = 3\lambda/2\pi$

Обозначения: L - диаметр антенны, м; L_1 , L_2 - горизонтальный и вертикальный размеры раскрыва антенны, м; λ - длина волны излучения, м.

В зоне сформировавшейся волны между E и H существует связь:

$$E(V/m) = 120\pi \times H(A/m).$$

Величина ППЭ определяется из соотношения:

$$ППЭ (Вт/м^2) = E^2(V/m)/120\pi = H^2(A/m) \times 120\pi.$$

Эколого-гигиеническая оценка электромагнитной обстановки должна начинаться с учета радиоизлучающих источников и их основных технических характеристик:

количественный и качественный учет всех источников РЧ и СВЧ и их расположения,

места возможных утечек,

время работы излучателя или время нахождения человека вблизи работающего излучателя,

излучаемая мощность (импульсная или средняя),

коэффициент усиления антенны, площадь раскрыва антенны,

диаграмма излучения в горизонтальной и вертикальной плоскостях,

сектор обзора антенны и ее высота над поверхностью земли.

В контроль за эколого-гигиенической обстановкой РЧ и СВЧ входят расчетное и инструментальное определения уровней излучения.

Расчет уровней ЭМИ необходим для получения предварительных данных, дающих представление о степени соответствия уровня электромагнитного фона нормируемым величинам, в том числе и для более оперативного и целенаправленного инструментального анализа. Расчетный метод оценки применяется в основном для ЭМИ от антенн. Методика проведения расчета для различных зон излучения представлена в табл. 14.

ТАБЛИЦА 14

*Метод проведения расчета ППЭ СВЧ
от неподвижных направленных антенн*

Зоны излучения	По оси лепестка излучения	По краю лепестка излучения
Ближняя	$ППЭ = 3P_{ср} / A$	$ППЭ = P_{ср} / 3A$
Промежуточная	$ППЭ = (3P_{ср} / A) \times (R_{б.з.} / R)^2$	-
Дальняя	$ППЭ = P_{ср} \times G / 4\pi R^2$	$ППЭ = 0,5 P_{ср} \times G / 4\pi R^2$

Примечания: ППЭ - плотность потока энергии, Вт/м²;

$P_{ср.}$ - средняя мощность станции, Вт;

A - площадь раскрыва антенны, м²;

N - скважность, усл.ед. (из паспорта станции);

R - расстояние от антенны до определяемой точки, м;

G - коэффициент усиления антенны, усл.ед. (из паспорта станции).

В случае отсутствия $P_{ср.}$, G и N в паспорте станции они определяются по формулам:

$$P_{ср.} = P_{имп.} / N = (P_{имп.} \times t) / (t + \alpha)$$

$$N = T / t = (t + \alpha) / t,$$

где T - период повторения импульсов, с;

α - длительность паузы между импульсами, с;

t - длительность импульса, с;

$P_{имп.}$ - импульсная мощность станции, Вт;

$G = 4\pi \times 0.7 A / 12 = 8,8 \text{ ХА} / \lambda_2$, или

$G = \text{КНД} \times \text{КПД} = \text{КНД} \times P/P_0$,

где КНД - коэффициент направленного действия, усл. ед;

КПД - коэффициент полезного действия, усл. ед;

P - излучаемая мощность антенны, кВт;

P_0 - мощность, подводимая к антенне, кВт.

В ближней зоне излучения от направленных антенн могут создаваться максимальные интенсивности, превышающие усредненные значения. При этом максимальная интенсивность в ближней зоне находится на расстоянии

$$R = 0,2 L_2 / \lambda,$$

где L - диаметр антенны, м;

λ - длина волны излучения, м.

Эта интенсивность приблизительно в 40 раз больше интенсивности на границе ближней и дальней зон.

Удаление точки максимума ППЭ от антенн удобно представить в виде

$$R_{max} = 0,67 \times f \times L_2,$$

где f - частота излучения, ГГц;

R_{max} - удаление (расстояние) точки максимальной ППЭ от антенны, м;

L - диаметр антенны, м.

Значение уровня ППЭ вычисляют по формуле

$$\text{ППЭ} = 16 P_{cp.} / \pi L_2,$$

где ППЭ - плотность потока энергии, Вт/м²;

$P_{cp.}$ - средняя мощность источника, Вт;

L - диаметр антенны, м.

Для определения уровня напряженности ЭМИ по электрической составляющей до 300 МГц от ненаправленных антенн расчет производят по формуле

$$E = \frac{7,67 \cdot \sqrt{P_{cp.} \cdot G}}{R},$$

где E - напряженность ЭМИ по электрической составляющей, В/м;

$P_{cp.}$ - средняя мощность источника излучения, Вт;

G - коэффициент усиления антенны, отн. ед.;

R - расстояние от источника излучения до объекта облучения, м.

Измерение уровней ЭМИ проводится при максимальной излучающей мощности источников. В случае измерений при неполной излучаемой мощности делается перерасчет до уровня максимального значения. При нескольких режимах работы, различающихся по физическим характеристикам излучений, измерения проводятся в каждом отдельном случае. Измерения уровней в условиях производства допускается не проводить, если: радиоизлучающее средство не работает в режиме излучения ЭМИ в окружающую среду и максимальная мощность согласно паспортным данным не превышает:

5 Вт - в диапазоне частот от 30 кГц до 3 МГц;

2,0 Вт - в диапазоне частот свыше 3 МГц до 30 МГц;

0,2 Вт - в диапазоне частот свыше 30 МГц до 300 ГГц.

В бытовых условиях не подлежат контролю радиоизлучающие приборы, если их номинальная мощность не превышает:

1 Вт - в частотном диапазоне 30 кГц-3 МГц;

0,5 Вт - 3-30 МГц;

0,05 Вт - 30 МГц-300 ГГц.

В производственных условиях измерения уровней ЭМИ, соответствующих реальному нахождению на рабочих местах персонала, проводят на уровнях 0.5, 1.0 и 1.7 м от поверхности пола или земли с определением максимального значения уровня ЭМП для каждого рабочего места. В каждой точке желательно проводить не менее трех измерений с занесением в протокол наибольшего из зарегистрированных значений.

Во время проведения измерения персонал не должен находиться в зоне измерения. При невозможности выполнения данного требования в протоколе измерений делается специальная отметка. Лицо, проводящее измерения, не должно находиться между источником излучения и измерительной антенной.

Уровни ЭМИ от вращающихся и сканирующих антенн измеряются при остановленной антенне в направлении максимума излучения при всех рабочих значениях угла наклона. Для открытой местности с однородным рельефом результаты, полученные при одном направлении излучения, распространяются на весь сектор, охватываемый антенной при ее движении, в радиусе, на котором производились измерения. В случаях, характеризующихся неоднородным рельефом местности, наличием зданий и других сооружений, необходимо проводить измерения на каждом рабочем месте при направлении излучения в место измерения.

На открытой территории измерения проводят на высоте 2 м от поверхности земли, далее на высоте 3, 6, 9 м и т.д. в зависимости от этажности застройки.

Результаты измерений следует фиксировать в специальном журнале или оформлять в виде протокола.

В протокол, составляемый по результатам контроля уровней ЭМИ на рабочих местах, рекомендуется включать следующие сведения:

- дату и место обследования;
- характеристику радиоизлучающих установок: наименование, тип и порядковый номер по системе нумерации предприятия-изготовителя, год выпуска; мощность; частоту; режим генерации (непрерывный, импульсный); длительность работы в течение рабочего дня;
- описание применяемых средств защиты;
- места измерений (расстояние от источников ЭМИ, высота от поверхности пола или земли), при необходимости – эскиз точек измерений;
- данные измерений: полученные значения уровней ЭМИ;
- интенсивностно-временные характеристики воздействия ЭМИ на персонал;
- заключение (выводы) с оценкой соответствия уровней ЭМИ на рабочих местах персонала допустимым значениям;
- используемые измерительные приборы с указанием заводского номера и даты государственной проверки;
- рекомендации по защите персонала (в случае превышения ПДУ).

2.3.2. Электромагнитные излучения мониторов

Электромагнитные излучения, излучаемые видеотерминалом, имеют широкий диапазон частот. Согласно стандартам, электромагнитное излучение должно быть измерено в диапазоне частот от 5 Гц до 400 кГц.

Для выделения требуемых полос частот в измерительной установке предусмотрены фильтры верхних и нижних частот, имеющие магазины затуханий.

Переменные магнитные поля, излучаемые всеми сильноточными элементами видео дисплейного терминала (источником питания, отклоняющей системой, высоковольтными трансформаторами и т.д.), имеют преимущественно несинусоидальный характер и характеризуются большим числом гармоник. Поэтому прибор, измеряющий излучаемые магнитные поля, должен иметь широкий частотный спектр. Значения измеряемой плотности магнитного потока: в диапазоне частот 5 Гц ... 2 кГц (диапазон I) – от 200 до 5000 нТл; в диапазоне 2 ... 400 кГц (диапазон II) – от 10 до 1000 нТл.

Измеряемые уровни напряженности электрического поля: в диапазоне I – 10 ... 1000 В/м, в диапазоне II – 1 ... 100 В/м.

Уровень фона (магнитные поля, излучаемые сетевой проводкой и другими приборами) не должен превышать 40 нТл для диапазона I и 5н Тл для диапазона II.

Результаты тестирования в сильной степени зависят от типа используемых проводов электропитания и от того, каким образом эти провода размещаются. Поэтому чрезвычайно важным является понимание того, что полученные в результате тестирования данные могут быть «перенесены» на конкретно используемый в работе пользователем видео дисплейный терминал только в том случае, если его подключение выполняется аналогично тестируемому с использованием того же самого типа проводов электропитания и того же способа подключения. На рис. 28 показана схема расположения дисплеев при измерениях электромагнитных излучений.

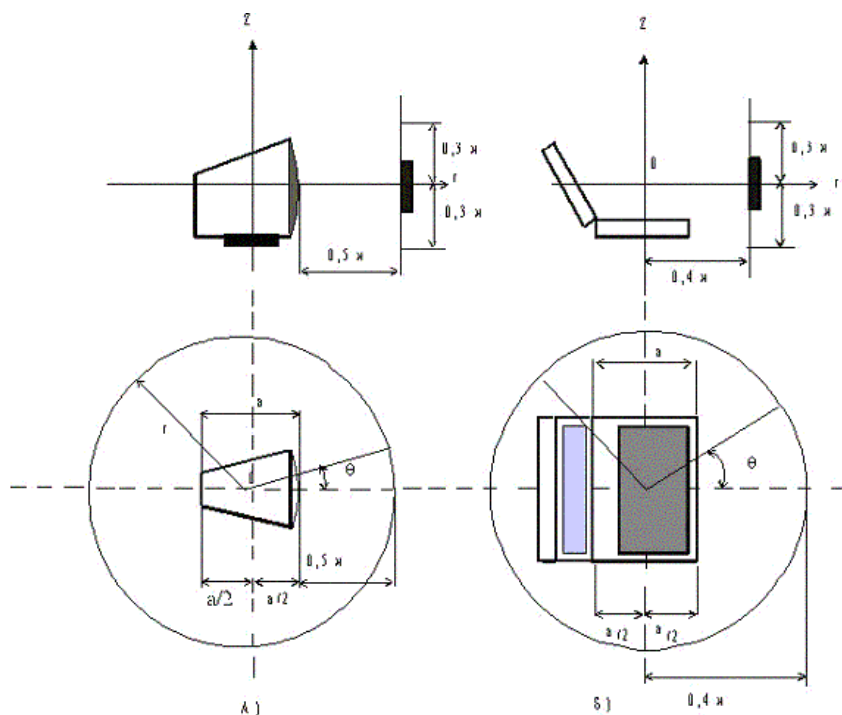


Рис. 28. Схема расположения дисплеев при измерениях электромагнитных излучений:
а - дисплей на ЭЛТ; б - портативная ПЭВМ

Для проведения испытаний и измерений в данной области необходимо специальное оборудование для измерения электрических и магнитных полей, а также экранированные и безэховые камеры. Кроме этого необходимо измерять визуальные характеристики дисплеев согласно требованиям новых стандартов. В качестве примера приводятся сведения о приборах Radians Innova AB (Швеция) для измерения параметров излучаемого электромагнитного излучения от персональных компьютеров, характеристики которых представлены в табл. 15.

ТАБЛИЦА 15

Диапазон частот

Характеристика	Модель прибора			
	ВММ-3	ВММ-4	ЕММ-4	
Диапазон частот	5...2000 Гц	2...400кГц	5...2000Гц	2...400кГц
Пределы измерений	200 нТл	200 нТл	2000 В/м	200 В/м
	2 мкТл, 20 мкТл, 200 мкТл, 2 мТл	2 мкТл		
Погрешность измерений	< 40 нТл	< 1,5 нТл	< 0,4 В/м	< 0,06 В/м

Глава 3. Медико-биологические аспекты воздействия электромагнитных излучений

3.1. Виды исследования биологического действия ЭМ излучений

Для определения предельно допустимых уровней общеприняты следующие основные виды исследований: исследования биологического действия ЭМИ в заданных условиях на животных, исследования на людях-добровольцах, эпидемиологические и клинико-физиологические исследования.

Исследования на животных производятся во всех случаях при разработке санитарных норм. У животного, облученного в заданных условиях, контролируются изменения, происходящие на уровне клетки, системы (кровеносной, нервной, эндокринной и т. д.) и организма в целом.

Исследования на добровольцах применяются на более поздних этапах разработки санитарных норм и в случаях отсутствия явной острой опасности для здоровья человека. В качестве примера приведу исследование на добровольцах биологического действия ЭМИ мобильного телефона. Эксперименты на добровольцах не могут дать полной картины биологического действия конкретного ЭМИ, поскольку фиксируют лишь текущие изменения контролируемых параметров, но не могут прогнозировать последствия этих изменений. Для решения этой проблемы служат два типа исследований.

Эпидемиологические исследования используются для изучения отдаленных последствий биологического действия ЭМИ, особенно малых уровней, стабильных и действующих в течение длительного времени. В качестве примера можно назвать широко проводимые в настоящее время исследования последствий биологического действия магнитных полей промышленной частоты.

Клинико-физиологические исследования, как правило, проводятся в виде наблюдений за изменением состояния здоровья людей, подвергающихся облучению в процессе своей профессиональной деятельности. Например, в результате проведенных в России еще в 60-е годы клинических исследований было установлено, что длительный контакт с ЭМИ в СВЧ-диапазоне может привести к развитию заболеваний, клиническую картину которых определяют, прежде всего, изменения функционального состояния нервной и сердечно-сосудистой систем. В результате было предложено ввести в перечень заболеваний новое понятие – «Радиоволновая болезнь».

В последние несколько лет особую роль в качестве источников ЭМИ, влияющих на человека, играют сотовая связь, ПЭВМ, спутниковая связь, ЭМИ ПЧ, радио- и телевизионное вещание. Исследования их биологического действия проводятся по каждому конкретному источнику ЭМИ с участием человека-пользователя. Оценивается поглощенная доза и ее распределение в структуре того или иного органа (в головном мозге, в сердце и т.д.). Используется комплекс клинико-физиологической аппаратуры с регистрацией непосредственных и отдаленных возможных проявлений воздействия ЭМИ (прежде всего, нервной системы), систематически тестируется психический статус пользователя. Начаты эпидемиологические исследования возможных отдаленных последствий при использовании конкретной аппаратуры.

3.2. Биофизика взаимодействия ЭМИ с биологическими объектами

Организм человека осуществляет свою деятельность путем ряда сложных процессов и механизмов и, в том числе, с использованием внутри- и внеклеточной электромагнитной информации и соответствующей биоэлектрической регуляции. Электромагнитная среда обитания фактически может быть рассмотрена как источник помех в отношении жизнедеятельности человека и биосистем. В этой связи возникает проблема биоэлектромагнитной совместимости как весьма сложной системы взаимодействия живой природы и технических средств, источников ЭМИ. В этой

ситуации живой организм вынужден постоянно искать защиту от быстро меняющейся обстановки, используя свои внутренние возможности.

При взаимодействии электромагнитных излучений с биологическими объектами лишь часть энергии поглощается. В этом случае используют следующий принцип: только та часть энергии излучения может вызвать изменения в веществе, которая поглощается этим веществом; отраженная или проходящая энергия не оказывает никакого действия (принцип Гроттгосуса).

Это взаимодействие носит биофизический характер, т.е. происходит процесс поглощения и непосредственного распределения поглощенной энергии на уровне биотканей целого организма. При этом тканевые системы называются биомикросистемами, а отдельные части тела (голова, туловище и т.д.) - биомакросистемами.

В отличие от ионизирующего излучения, которое непосредственно создает электрические заряды, электромагнитные излучения не обладают ионизирующей способностью и воздействуют только на уже имеющиеся свободные заряды или диполи. Диэлектрические свойства биотканей сильно зависят от их химического состава, частоты колебаний, происходящих внутри биологического объекта. Электромагнитные свойства определяют процессы прохождения энергии через слои вещества, отраженной на границах их раздела, и поглощения внутри тканей.

Диэлектрические и магнитные свойства биотканей

При взаимодействии электромагнитного излучения с биовеществом возникают два типа эффекта, определяющих диэлектрические свойства тканей. Колебания свободных зарядов (ионов) приводят к увеличению токов проводимости и потере энергии, связанной с электрическим сопротивлением среды. Вращение дипольных молекул с частотой приложения электромагнитного излучения влияет на токи смещения и диэлектрические потери, обусловленные вязкостью среды.

Диэлектрические свойства биотканей описываются диэлектрической проницаемостью и проводимостью. Магнитные свойства биотканей описываются магнитной проницаемостью. Хотя все биоткани являются слабыми диа- и парамагнетиками, близкими по свойствам к вакуумной среде, рассеяние магнитной энергии в биообъекте может быть значительным в зависимости от размеров и электрических свойств этих объектов.

Диэлектрические свойства биотканей существенно зависят от частоты электромагнитных колебаний. Эти зависимости показаны на графиках (рис. 29, 30).

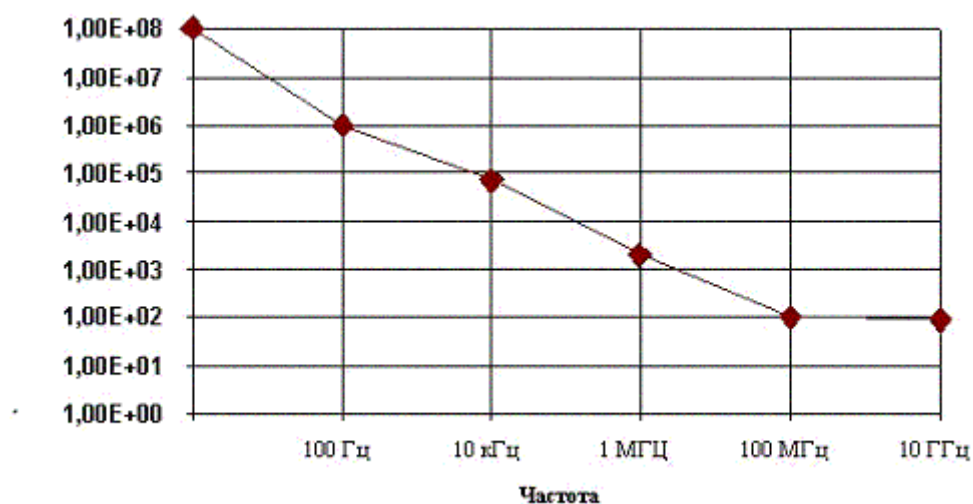


Рис. 29. Зависимость мнимой диэлектрической проницаемости биотканей с высоким содержанием воды от частоты электромагнитных колебаний

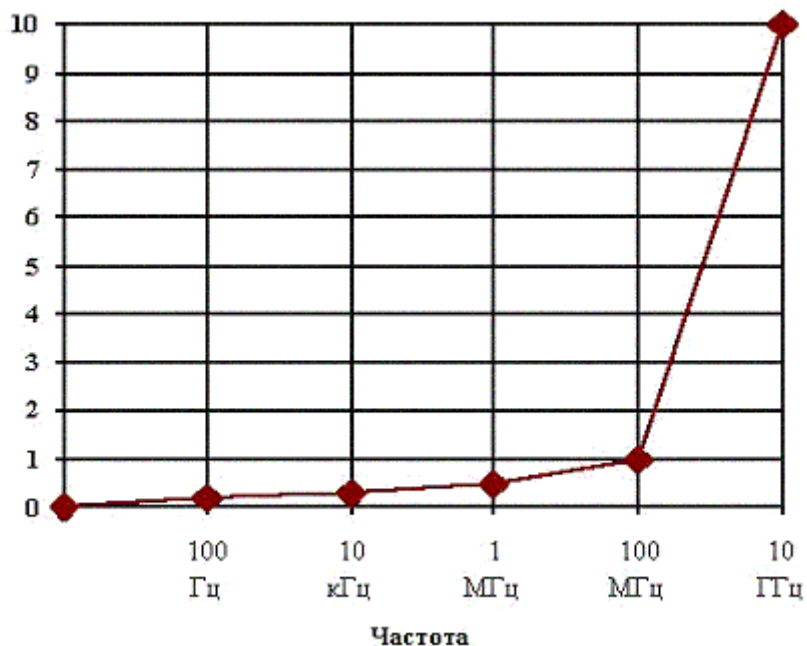


Рис. 30. Зависимость проводимости биотканей с высоким содержанием воды от частоты электромагнитных колебаний

При воздействии на биоткань электрических излучений она поляризуется, и ионные токи будут протекать только по межклеточной жидкости, т.к. мембраны клеток, являясь хорошими изоляторами, отделяют внутриклеточное содержание. Это справедливо для постоянного электрического поля.

При частоте, меньшей 10 кГц, период электромагнитных колебаний достаточно большой для того, чтобы клеточные мембраны успели перезарядиться за счет ионов вне и внутри клетки. Это объясняет наличие низкой удельной ионной проводимости даже для тканей с высоким содержанием воды. При этом полный заряд и диэлектрическая проницаемость ткани за период колебаний велики. Последующий рост удельной проводимости происходит вследствие уменьшения емкостного сопротивления мембран с увеличением частоты. Неполная перезарядка изолированных мембран вовлекает внутриклеточную жидкость в процесс образования ионных токов, проводимость ткани плавно увеличивается, а ее диэлектрическая проницаемость падает.

Лавинное вовлечение внутриклеточной среды в процесс образования ионных токов на частотах 10 кГц ...100 кГц вызывает резкое возрастание удельной проводимости. Кроме того, поляризация молекул тканей, в основном молекул воды, приводит к возникновению токов смещения, увеличивающих токи в тканях при тех же амплитудах напряженности электрического поля, т.е. уменьшает их удельное сопротивление.

При частотах 100 кГц ...10 МГц мембраны все меньше и меньше перезаряжаются, и емкостное сопротивление биоткани падает. Содержимое клеток все активнее включается в процесс образования ионных токов, т.е. проводимость ткани продолжает возрастать, а ее диэлектрическая проницаемость уменьшается. При этом значительно возрастают поляризация молекул и обусловленные ею токи смещения, что приводит к увеличению суммарных токов в биотканях.

При частотах больше 10 МГц емкостное сопротивление мембран клеток становится таким малым, что клетку считают короткозамкнутой. Поляризация молекул и токи смещения становятся доминирующими. Возбужденные молекулы приходят в колебательное движение, сталкиваются с псевдовозбужденными и передают им свою энергию, расходуемую на тепло и химические преобразования. Поэтому проводимость резко возрастает, а диэлектрическая проницаемость меняется незначительно.

3.3. Реакция организма человека на воздействие ЭМ излучений

Среди всего спектра наибольшей биологической значимостью и выраженностью симптоматики выделяются ЭМИ РЧ и СВЧ. В зависимости от интенсивности и продолжительности воздействия ЭМИ РЧ и СВЧ вызываемые изменения в организме подразделяют на изменения острого (термогенного) и хронического (атермального) воздействия. Острое воздействие обусловлено термическим воздействием ЭМИ, как правило, при нарушении техники безопасности. Термогенное воздействие обычно носит локальный характер, а возникающая симптоматика определяется топографией облучаемой области. При облучении пострадавшие ощущают тепло в месте воздействия, схожее с действием солнечных лучей. Иногда отмечают также общее недомогание, головную боль, головокружение, тошноту, рвоту, чувство страха, жажду, легкую слабость, боли в конечностях, повышенную потливость. У пострадавших наблюдаются повышение температуры тела, приступы тахикардии, нарушение сердечной деятельности, артериальная гипертензия. В ряде случаев в клинике острых воздействий могут преобладать диэнцефальные расстройства. Субъективная и объективная симптоматика у пострадавших через несколько дней исчезает, все клинические показатели приходят к доклиническому уровню, полностью восстанавливается работоспособность. Немногочисленные клинические наблюдения острого теплового действия ЭМИ на человека указывают на возможность локальных остаточных структурных изменений органов и тканей (ожогов, катаракты, атрофии семенников и т.д.).

3.3.1. Влияние излучений РЧ и СВЧ

Наиболее обширно в литературе представлены сведения, касающиеся клинко-эпидемиологического характера хронического влияния ЭМИ. Как правило, наблюдаемые изменения регистрировались при воздействии ЭМИ интенсивностью, подчас превышающей предельно допустимый уровень, но не приводящей к тепловым эффектам. По данным ряда отечественных авторов, у персонала, связанного с работой источников ЭМИ РЧ и СВЧ, выявляется разнообразная неврологическая симптоматика как субъективного, так и объективного характера (табл. 25). По зарубежным данным, при исследовании клинического статуса может отмечаться даже стимуляция неврологической симптоматики. Предъявляемые жалобы были хроническими и наблюдались еще до момента переоблучения. У таких пациентов может длительно сохраняться переоценка вреда, наносимого фактором. Для установления истинной картины в последнее время в практике клинко-эпидемиологического обследования начали широко применяться психологические методы. При использовании ряда психологических тестов у персонала, имеющего длительный контакт с ЭМИ, наблюдают достоверное усиление патологической компоненты тревожного поведения и депрессивного состояния при отсутствии каких-либо объективных симптомов. При анкетировании могут наблюдаться преобладание жалоб на снижение памяти, а также на ухудшение самочувствия, увеличение критической частоты слияния световых мельканий к концу рабочего дня. Наиболее характерными в динамике изменений реакции организма на хроническое воздействие ЭМИ являются: реакции центральной нервной и сердечно-сосудистой систем, а также системы крови. При этом выделяют три ведущих синдрома: астенический, астеновегетативный и гипоталамический. Астенический синдром наблюдают в начальных стадиях проявлений изменений, вызванных ЭМИ, два других - на умеренно выраженной и выраженной стадиях. Представленная симптоматика не всегда повторяется и не обязательно встречается у лиц, подвергавшихся облучению.

Некоторые авторы считают, что хронические воздействия ЭМИ РЧ и СВЧ при интенсивности менее 10 Вт/м^2 могут вызывать в системе крови различные неустойчивые изменения: лейкоцитоз, увеличение количества лимфоцитов. Иногда отмечают моноцитоз, патологическую зернистость нейтрофилов, ретикулоцитоз и тромбоцитопению. Однако большинство исследователей отмечают недостоверный характер этих изменений даже при кратковременном воздействии «до ощущения тепла» и неспецифичность проявлений, свойственных также многим неблагоприятным факторам труда.

Данные эпидемиологического изучения отдаленных последствий, предписываемых влиянию ЭМИ, в том числе возникновения специфических заболеваний крови, показывают, что нахождение стойких

изменений в крови в условиях воздействия реально существующих уровней ЭМИ у профессионалов и тем более у населения представляется весьма проблематичным.

Таким образом, представленные данные клинико-эпидемиологических исследований о влиянии ЭМИ РЧ и СВЧ на организм человека свидетельствуют, что выраженность наблюдаемых изменений зависит от интенсивности и времени воздействия. Общая картина изменений под влиянием различных уровней ЭМИ представлена в табл. 16.

ТАБЛИЦА 16

Возможные изменения в организме человека под влиянием ЭМИ различных интенсивностей

Интенсивность ЭМИ, мВт/см ²	Наблюдаемые изменения
600	Болевые ощущения в период облучения
200	Угнетение окислительно-восстановительных процессов в ткани
100	Повышенное артериальное давление с последующим его снижением; в случае воздействия - устойчивая гипотензия. Двухсторонняя катаракта
40	Ощущение тепла. Расширение сосудов. При облучении 0,5-1 ч повышение давления на 20-30 мм рт. ст.
20	Стимуляция окислительно-восстановительных процессов в ткани
10	Астенизация после 15 мин. облучения, изменение биоэлектрической активности головного мозга
8	Неопределенные сдвиги со стороны крови с общим временем облучения 150 ч, изменение свертываемости крови
6	Электрокардиографические изменения, изменения в рецепторном аппарате
4-5	Изменение артериального давления при многократных облучениях, непродолжительная лейкопения, эритропения
3-4	Ваготоническая реакция с симптомами брадикардии, замедление электропроводимости сердца
2-3	Выраженный характер снижения артериального давления, тенденция к учащению пульса, незначительные колебания объема сердца
1	Снижение артериального давления, тенденция к учащению пульса, незначительные колебания объема крови сердца. Снижение офтальмотонуса при ежедневном воздействии в течение 3,5 месяцев
0,4	Слуховой эффект при воздействии импульсных ЭМП
0,3	Некоторые изменения со стороны нервной системы при хроническом воздействии в течение 5-10 лет
0,1	Электрокардиографические изменения
до 0,05	Тенденция к понижению артериального давления при хроническом воздействии

3.3.2. Роль излучений КНЧ в ускорении роста раковых клеток

Авторы встретили несколько публикаций, указывающих на развитие у людей, много работающих с персональными компьютерами, патологических реакций, обусловленных, скорее всего, как считают ученые, воздействием электромагнитного излучения крайне низкой частоты.

К ним относятся электромагнитные излучения с частотами 30...300 Гц. КНЧ-поля не настолько энергетически сильны, чтобы изменить или разрушить связи в клетках на молекулярном уровне. Вместо этого КНЧ-поля, по-видимому, имитируют электрические изменения, которые обычно происходят в живой клетке организма.

Эта имитация обычных внутриклеточных процессов может лежать в основе потенциальной способности КНЧ-поля ускорять рост раковых опухолей. Некоторые ученые отметили, что участки мембраны, на которые воздействовало КНЧ-излучение, ведут себя как рецептор для химических веществ, ускоряющих рост раковых клеток.

Ученые считают, что КНЧ-поля также увеличивают химическую активность соединения, известного под названием ортинин декарбоксилаза, и этот эффект связывают с ускоренным развитием раковых клеток. Кроме того, КНЧ-поля разрушают функции соединения клеток - другой эффект, который также связывают с ростом раковых клеток.

Некоторые эксперименты обнаружили существование «оконных эффектов», т.е. некоторые биологические эффекты проявлялись только при определенной напряженности КНЧ-поля и не проявлялись при большей или меньшей напряженности. Кроме того, эти «оконные эффекты», по-видимому, зависели от наличия и ориентации статических полей, таких, как магнитное поле Земли.

Следует отметить, что, по-видимому, биологическое воздействие КНЧ-поля зависит от вида его волн. Ученые считают, что наименее активны синусоидальные волны, являющиеся характеристикой электричества, используемого в быту. Наиболее активными являются импульсные излучения, подобные тем, которые генерируются радаром, и поля с пилообразной характеристикой, которые генерируются схемами телевизоров и мониторов.

Вероятность возникновения рака у людей, живущих рядом с ЛЭП (ближе 400 м), возрастает на 29%. Ученые считают, что ЛЭП, ионизируя окружающий воздух, делает его опасным для здоровья: если вдыхать такой воздух, то заряженные частицы оседают в легких.

Пользователям компьютеров ученые советуют не работать в ночное и вечернее время, так как интенсивный свет действует на эпифиз, вследствие этого угнетается синтез мелатонина (гормона эпифиза), что может повлечь за собой заболевания. Свет угнетает синтез мелатонина, поэтому его концентрация максимальна ночью, а утром и днем – минимальная. Вследствие систематического искусственного освещения человека ночью у него может образоваться опухоль. Особенный вред избыточная освещенность приобретает тогда, когда на организм действуют какие-либо канцерогенные факторы, например химические или радиационные.

3.3.3. Катаракта, как результат воздействия излучений РЧ и СВЧ

Особое место при изучении влияния ЭМИ РЧ и СВЧ на организм человека занимает исследование катарактогенеза - помутнения хрусталика с потерей зрительной функции. Результаты клинических исследований катаракты, возникшей от излучений РЧ и СВЧ, представляют собой неясную картину.

Опубликованные в настоящее время сообщения очень часто не содержат должного критического анализа электромагнитной ситуации, не учитывают возрастных особенностей, дозиметрических и частотных характеристик ЭМИ. При изучении эпидемиологических данных о катарактогенезе необходима полная уверенность, что рассматриваемая категория лиц действительно подвергается профессиональному облучению. Ведь среди факторов риска, способствующих возникновению катаракты, по данным ВОЗ, электромагнитным излучениям РЧ и СВЧ отводят пятое место после диабета, ультрафиолетового облучения, метаболических нарушений и ионизирующей радиации. Начиная с 1952 г. в печати сообщалось о десятках случаев возникновения у людей электромагнитной катаракты. Из всех представленных в литературе случаев возникновения катаракты у людей, контактирующих с источниками ЭМИ, следует, что процесс катарактогенеза может развиваться на фоне довольно длительного (от 1 года до 6 лет) хронического облучения ЭМИ с тепловыми уровнями, иногда при случайных кратковременных попадании в поле интенсивностью, превышающей средние значения в 20-100 раз. Помимо катаракты, под воздействием электромагнитных излучений при частотах, близких к 35 ГГц, могут возникать кератиты, а также

повреждения стромы роговицы. При нетепловых интенсивностях в ряде случаев можно обнаружить нарушения функции зрения, связанные с различением цветов, сосудистые изменения дна глаза, а также ретинальные повреждения. Однако большинство специалистов, изучавших клинические проявления катаракты или другого поражения органа зрения у персонала, контактирующего с ЭМИ при интенсивностях ниже тепловых, дают отрицательный ответ (в перечне профессиональных заболеваний данная профессиональная патология отсутствует). Тем не менее, это не снимает вопроса о поражении глаз человека при более высоких уровнях воздействия, так как в эксперименте катаракту от воздействия ЭМИ можно отличить абсолютно достоверно.

3.3.4. Слуховые эффекты при воздействии излучений РЧ и СВЧ

Исследования, проведенные с участием людей, выявили слуховые эффекты, возникающие при воздействии импульсных ЭМИ. Так, при облучении головы прямоугольными импульсами с пиковой плотностью потока энергии около $30,0 \text{ Вт/м}^2$ и средней $1,0 - 4,0 \text{ Вт/м}^2$ у человека возникают слуховые ощущения. В зависимости от длительности и частоты следования импульсов ЭМИ они воспринимаются как щелчки, жужжание или чириканье. Гигиеническая значимость этого явления не совсем ясна. При определенных параметрах ЭМИ у человека могут, очевидно, возникать реакции, подобные тем, которые бывают при акустическом шуме.

3.3.5. Экспериментальная оценка воздействия электромагнитных излучений промышленной частоты на организм человека

Бытовые приборы

Человеческий организм не может не реагировать на электромагнитные излучения. Однако для того чтобы эта реакция переросла в патологию и привела к заболеванию, необходимо совпадение ряда условий – в том числе достаточно высокий уровень излучения и продолжительность облучения. Поэтому при использовании бытовой техники с малыми уровнями излучения и/или кратковременным действием ЭМИ бытовой техники не оказывает влияния на здоровье основной части населения. Потенциальная опасность может грозить лишь людям с повышенной чувствительностью к ЭМИ и аллергикам.

Кроме того, согласно современным представлениям, магнитное поле промышленной частоты может быть опасным для здоровья человека, если происходит продолжительное облучение (регулярно, не менее 8 часов в сутки, в течение нескольких лет) с уровнем выше **0,2 мкТл**.

В настоящее время проводятся многочисленные исследования, направленные на изучение действия ЭМИ ПЧ на организм человека.

ЭП ПЧ в теле человека наводят электрические токи, в ЭП с $E = 6-8 \text{ кВ/м}$ наведенные токи составляют 90-120 мкА. Они стремятся пройти в землю, вследствие чего создается разность потенциалов между человеком и землей. Если человек изолирован от земли, то в месте контакта с заземлением он будет испытывать ощущение разряда электрического тока. В биологическом плане электрические токи становятся ощутимыми при прохождении их по телу, например от одной конечности до другой, при величине 500 мкА. При большем значении эти токи могут вызвать реакцию кратковременного электроудара, хотя вполне слабого и безвредного. Искровые разряды возникают при напряженности ЭП ПЧ свыше 3 кВ/м и напоминают удары статического электричества в сухую погоду.

Линии электропередачи

Наведенные токи от ЛЭП при прохождении на землю по силе воздействия меньше или эквивалентны в первом приближении наведенным токам, возникающим при пользовании бытовыми электроприборами.

Электрические и магнитные поля ПЧ сильно влияют на состояние всех биологических объектов, попадающих в зону их воздействия.

Например, в районе действия электрического поля ЛЭП у насекомых проявляются изменения в поведении: так, у пчел фиксируется повышенная агрессивность, беспокойство, снижение работоспособности и продуктивности, склонность к потере маток; у жуков, комаров, бабочек и других летающих насекомых наблюдается изменение поведенческих реакций, в том числе изменение направления движения в сторону с меньшим уровнем излучения.

У растений распространены аномалии развития - часто меняются формы и размеры цветков, листьев, стеблей, появляются лишние лепестки.

Здоровый человек страдает от относительно длительного пребывания в поле ЛЭП. Кратковременное облучение (минуты) способно привести к негативной реакции только у гиперчувствительных людей или у больных некоторыми видами аллергии. Работы английских ученых в начале 90-х годов показали, что у ряда аллергиков под действием поля ЛЭП развивается реакция по типу эпилептической.

При продолжительном пребывании (месяцы - годы) людей в электромагнитном поле ЛЭП могут развиваться заболевания преимущественно сердечно-сосудистой и нервной систем организма человека. В последние годы в числе отдаленных последствий часто называются онкологические заболевания.

3.4. Биологические эффекты, вызванные магнитными полями

Наведенные в тело человека электрические токи за счет МП ПЧ вызывают различные биологические эффекты: стимуляцию роста кости, регенерацию нервной ткани, изменения биохимических процессов в клетке [1].

По степени наибольшего риска возможны эффекты, зависящие от величины индуцированного тока, на которую влияют изменения тех или иных параметров МП ПЧ, что и представлено в табл. 17.

ТАБЛИЦА 17

Вероятностные биологические эффекты, вызываемые МП ПЧ в зависимости от величины плотности магнитного потока и соответствующих величин индуцированного тока

Величина воздействующей плотности магнитного потока, мТл	Величина индуцированной плотности тока, мА/м ²	Прогнозируемые эффекты
0,5 – 5	1 – 10	Минимальные биологические эффекты
5 – 50	10 – 100	Эффекты со стороны органов зрения и нервной системы
50 – 500	100 – 1000	Существует опасность для здоровья; стимуляция возбудимой ткани
>500	>1000	Острое нарушение состояния здоровья, экстрасистолия и фибрилляция желудочков сердца

Эти данные получены на людях для промышленной частоты при 4-х часовом воздействии. Наведенные токи более 100 мА/м² при напряженности МП свыше 50 мТл для ПЧ превышают пороги стимуляции и могут неблагоприятно влиять на состояние здоровья.

Одним из эффектов, достаточно хорошо изученным при действии МП, является магнитофосфен, который проявляется как мигающий свет в глазах. По данным различных авторов, величина МП,

например, для ПЧ, в этом случае составляет 10-20 мТл. В момент прекращения воздействия эти ощущения сразу пропадают. Принято считать, что они являются результатом непрямого воздействия на зрительный анализатор наведенных электрических токов.

МП изменяет полярность и снижает амплитуду вызванных зрительных потенциалов. После прекращения действия МП приблизительно через 40 мин значения возвращаются к исходным. Однако для изменения зрительно вызванных потенциалов напряженность поля приблизительно в 10 выше, чем для проявления магнитофосфена.

Каких-либо ощущений в момент воздействия постоянные МП у людей не вызывают. Иногда, правда, при воздействии постоянных МП до 2 Тл в течение нескольких минут может происходить изменение вкусовых ощущений.

Результаты эпидемиологических и клинико-физиологических наблюдений за подвергавшимися действию МП ПЧ в обобщенном виде представлены в табл. 18. Они получены на контингенте людей при действии МП ПЧ не только за счет ЛЭП, но и от других источников, генерирующих частоту 50/60 Гц: в этот контингент входили работники радиоэлектронной промышленности, сварщики, электромонтеры, линейные монтеры телефонной сети, т.е. те, чья работа связана с электричеством. Углубленный анализ этих данных не подтверждает безусловно функциональную связь между наблюдаемыми изменениями и профессиональным воздействием МП ПЧ. При высоком риске возникновения того или иного нарушения МП ПЧ не является главным этиологическим фактором (Магнитные поля, 1992), так как на персонал, как правило, действует комплекс факторов, способных вызвать различные эффекты. В связи с этим необходимы эпидемиологические исследования с учетом этиологической значимости того или иного фактора в возможной картине заболеваемости среди персонала, обслуживающего ЛЭП.

ТАБЛИЦА 18

Результаты эпидемиологических и клинико-физиологических исследований по влиянию МП ПЧ (50/60 Гц) на человека

Условия воздействия	Результаты	Источник данных
10-13 мкТл; острые воздействия	увеличение латентного периода сенсомоторной реакции	Медведев М.А. и др., 1976
40 мкТл; острые воздействия	восприятие поля отсутствовало	Creim J.A. et al., 1984
1,06 мТл при тотальном воздействии или 2,12 мТл при воздействии на область головы; повторные острые воздействия	восприятие поля отсутствовало	Tuker R.D., Schmitto O.H., 1978
0,3 мТл; воздействие в течение 3 ч	отсутствие гематологических изменений; время реакции человека не изменялось	Mantell B., 1975
5 мТл; воздействие в течение 3 ч	не отмечено изменений ЭКГ, ЭЭГ, уровня гормонов, формулы и химического состава крови	Sander R. et al., 1982
лица, по роду деятельности связанные с электричеством	повышенная частота развития лейкозов	Milham S.J. et al., 1982, 1985
то же	то же	Wright W. E. et al., 1982
то же	то же	McDowall M.E., 1983
то же	то же	Coleman M. et al., 1983
то же	отсутствие риска развития лейкоза	Vagero D., Olin R., 1983
то же	повышенная частота развития меланомы глаза	Swerdlow A. J., 1983
то же	повышенная частота развития лейкозов	Pearce N. E. Et al., 1985
то же	повышенная частота развития опухолей мозга	Lin R. S. et al., 1985
то же	отсутствие риска развития лейкоза, повышенная частота развития рака мочевых путей и злокачественной меланомы	Vagero D. et al., 1985
то же	отсутствие риска развития лейкоза	Calle E., Savitz O.A., 1985
то же	повышенная частота развития злокачественной меланомы	Olin R. e.a., 1985
лица, занятые в области	отсутствие риска развития лейкоза и	Tornquist S. et al., 1986

производства электроэнергии	злокачественных опухолей мозга	
дети, проживающие около высоковольтных линий электропередач	увеличение числа случаев лейкоза	Wertheimer E., Leeper E., 1979
то же	отсутствии увеличения числа лейкозов	Fulton J. P. et al., 1980
взрослые, проживающие около высоковольтных линий электропередач	увеличение заболеваемости раком	Wertheimer N., Leeper E., 1982
лица, проживающие около высоковольтных линий	отсутствии увеличения числа лейкозов	Coleman M. et al., 1985
Дети, проживающие около высоковольтных линий	отсутствии увеличения заболеваемости раком	Myers A. Et al., 1985
Лица, проживающие около высоковольтных линий	отсутствии увеличения заболеваемости раком	Rodvall Y. et al., 1985
Дети, проживающие около высоковольтных линий	отсутствии увеличения числа случаев лейкозов, увеличение числа опухолей нервной системы	Tomenius L., 1986
Лица, проживающие около высоковольтных линий	отсутствии увеличения заболеваемости раком	McDowall M.E., 1986

Считается, что реакция организма, обусловленная хроническим воздействием МП, определяется прежде всего функциональными изменениями со стороны нервной, сердечно-сосудистой, дыхательной систем и системы кровообращения. Общая клиническая картина действия МП может проявляться в виде вегетосенситивного полиневрита, астеновегетативного синдрома или их сочетания. Центральное место в обоих синдромах отводят функциональным сосудистым или сердечно-сосудистым изменениям.

Явлениям вегетосенситивного полиневрита свойственны вегетативные и трофические нарушения, как правило, в областях тела, находящихся под непосредственным воздействием МП, чаще всего в руках. Наиболее частой жалобой является ощущение зуда. Объективно отмечают изменения со стороны сосудистой и капиллярной сетей, окраски кожных покровов, могут появиться отечность и уплотнение кожи. На ладонной поверхности кистей кожа становится истонченной, в других случаях развивается гиперкератоз. Многие исследователи данный симптомокомплекс принимают за «специфичность» проявления действия МП, хотя по клинике развития эти проявления мало чем отличаются от кожных реакций невротического и псевдоневрологического характера. Субъективная и объективная симптоматика астеновегетативного синдрома, выявляемая у лиц, контактирующих с МП, представлена в табл. 18. Изменения, вызываемые МП в начальных стадиях, после амбулаторного лечения легко исчезают. Позднее, при более выраженных изменениях, рекомендуется временное ограничение контактов с МП до восстановления прежнего состояния здоровья.

В настоящее время многие специалисты считают предельно допустимой величину магнитной индукции равной 0,2 - 0,3 мкТл. При этом считается, что развитие заболеваний - прежде всего лейкемии - очень вероятно при продолжительном облучении человека полями более высоких уровней (несколько часов в день, особенно в ночные часы, в течение периода более года).

Магнитные поля на транспорте

По-видимому, магнитные поля в ультранизком диапазоне имеют существенное биологическое значение, потому что соответствуют основным физиологическим ритмам - сердечным, мозговым, частоте дыхания. Электротранспорт и различные индустриальные силовые установки - источники полей того же ультранизкого диапазона.

Эти излучения в десятки раз выше, чем те, что дают линии электропередачи, но до сих пор никто не изучал их влияния на человека.

Оказалось, что в городе уровень антропогенного электромагнитного «шума» в 10-100 раз выше, чем за городом. А внутри электропоездов он может быть выше естественного фона в тысячу и десять тысяч раз.

Были изучены данные о здоровье 230 работников Словацкой железной дороги. В итоге выяснилось, что машинисты и их помощники страдают гипертонией и ишемической болезнью сердца гораздо чаще, чем представители других, не менее «напряженных» профессий. Кроме того, машинисты электровозов, чье рабочее место находится рядом с двигателем, заболевают этой ишемической болезнью в два раза чаще своих коллег, работающих в электричках, где двигатели расположены иначе. Судя по всему, это связано с тем, что в кабине высокий уровень колебаний магнитных полей, а резкие всплески магнитной энергии могут играть роль пускового механизма в развитии сердечно-сосудистых патологий.

Не только машинисты, но и пассажиры постоянно подвергаются электромагнитным перегрузкам, наиболее они сильны в электропоездах и поездах метро.

3.5. Воздействие электромагнитных полей Земли на организм человека

3.5.1. Электромагнитная биосфера Земли

Электромагнитная биосфера нашей планеты определяется, в основном, электрическим и квазистатическими полями Земли, атмосферным электричеством (грозовыми разрядами, в частности, молниями), радиоизлучением Солнца и галактик, а в последнее время полем искусственных источников: полем «выделенных» излучателей (антенные поля и паразитные радиоизлучения аппаратуры) и общим «радиофоном» от многочисленных удаленных радиопередающих центров.

Электрическое поле Земли направлено нормально к земной поверхности (заряженной отрицательно относительно верхних слоев атмосферы). Напряженность электрического поля у поверхности земли $E_{зем} \approx 130$ В/м, убывая с высотой по экспоненциальному закону. Годовые изменения $E_{зем}$ сходны по характеру на всем земном шаре: максимум в январе-феврале (до 150...250 В/м) и минимум в июне - июле (100...120 В/м).

Напряженность магнитного поля Земли характеризуется двумя параметрами. Горизонтальная составляющая максимальна у экватора (20...30 А/м), убывая к полюсам (до единиц А/м). Вертикальная составляющая у полюсов составляет около 50...60 А/м, уменьшаясь у экватора до пренебрежимо малой величины. На земном шаре существуют отдельные области, где величина вертикальной составляющей намного выше («положительные аномалии») или ниже («отрицательные аномалии») среднего значения.

Частотный спектр атмосфериков простирается в диапазоне от сотен герц до десятков мегагерц. Максимум их интенсивности находится вблизи 10 кГц и убывает с частотой.

Спектр радиоизлучения Солнца и галактик занимает область приблизительно от 10 МГц до 10 ГГц. В «спокойном» состоянии интенсивность солнечного излучения находится в пределах от 10⁻¹⁰ до 10⁻⁸ Вт/м² МГц. Во время вспышек излучение усиливается в несколько десятков раз. Спектр и интенсивность радиоизлучения галактик близки к спектру и интенсивности спокойного Солнца.

Характерной формой взаимодействия электромагнитного поля с живым организмом является сочетание *нагрева тканей*, зависящего от поглощенной тканями (как полупроводящей средой) энергии, и *информационного акта*, определяющего нетепловое воздействие на организм. Вторая сторона воздействия - нетепловое, или так называемое специфическое действие радиоволн - определяется именно этим информационным аспектом воспринимаемых организмом электромагнитных излучений. Спектр и форма этого воздействия зависят от свойств источника и канала связи. Как показывают наблюдения, чувствительность организма в этом случае оказывается намного выше рассчитанной исходя из простейших соображений о тепловом действии полей ЭМИ. Кроме того, концентрация электромагнитной энергии в объемах тела, ограниченных радиоконтрастными средами, приводит к локальному нагреванию, «микронагревам». Поэтому деление двух сторон взаимодействия «поле - организм» на информационные и тепловые весьма условно.

3.5.2. Биофизика воздействия мощных ЭМ полей Земли на организм человека

Воздействие мощных электромагнитных полей на человека приводит к определенным сдвигам в нервно-психической и физиологической деятельности, однако, как предполагают, «многоступенчатая» система защиты организма от вредных сигналов, осуществляемая на всех уровнях — от молекулярных до системного, — в значительной степени снижает вредность действия «случайных» для организма потоков информации. Поэтому, если и наблюдается определенная реакция на эти поля, то очень часто при уровнях, значительно ниже тех, которые необходимы для возникновения энергетического воздействия. Например, при $E \approx 10^{-4}$ В/м наблюдается сосудистый условный рефлекс у человека; при $E \approx 3 \times 10^{-2}$ В / м — изменение слюноотделения у собаки; при (ППЭ) = 20 мкВт/см² — изменение энцефалограммы у кролика и даже при (ППЭ) = 0,3 мкВт /см² — изменение эпителиальных и промежуточных клеток животных (и это вместо предполагаемых на основе тепловой теории: 200 В/м, 10 мВт/см² для ВЧ и ЭМИ соответственно!). Для клетки чувствительность оценивается величиной энергии 10^{-19} Дж/клетку. Здесь можно говорить скорее о раздражающем, чем о поражающем эффекте, т. е. скорее о физиологическом в общем смысле, чем о патологическом аспекте воздействия электромагнитной энергии.

С усложнением биологического вещества неизменно усложняется процесс его взаимодействия с электромагнитным полем. Например, при объяснении чувствительности нервных клеток к ЭМП считаются вероятными следующие механизмы действия:

- особенно вероятно для ансамбля клеток и тем более для всего организма. детектирование ЭМП в мембране нервной клетки;
- влияние ЭМП на подвижность ионов, в частности на способность проникать через мембрану нервной клетки;
- изменение калийного градиента внутриклеточной среды;
- «упорядочивание» колебаний ионов под воздействием поля, приводящее к изменению характера и величины чувствительности рецепторов;
- влияние на собственные частоты предполагаемого электромагнитного обмена

С развитием и усложнением организма кроме простейших физико-химических механизмов все большее и большее влияние на организм в целом оказывают эффекты, которые принято связывать с так называемыми физиологическими и биофизическими механизмами действия, включающими как неразрывное целое информационный аспект полей ЭМИ. Эти и другие механизмы, еще более ясные, определяют вторичные эффекты воздействия поля, которые происходят, как правило, на дотепловых энергиях. Это — кумуляция, стимуляция, сенсбилизация, возникающие как следствие развитой способности сложных систем накапливать тепловое и информационное воздействие.

Кумуляция приводит к тому, что при воздействии прерывистого облучения суммарный эффект накапливается и зависит от величины эффекта с самого начала воздействия; при перерывах в воздействии увеличивается общее время облучения, необходимое для появления данного эффекта.

Сенсбилизация заключается в повышении чувствительности организма после слабого радиооблучения к последующим воздействиям (в опытах на ЭМИ — к значительно более мощным облучениям, вблизи летального порога).

Нервная система. При исследовании влияния ЭМИ на нервную систему особое внимание уделяется изучению центральной нервной системы, регулирующей активные и пассивные взаимосвязи организма с внешним миром, и вегетативной нервной системы, которая обеспечивает целостность и согласованность всех функций внутри самого организма.

Действие ЭМИ на поведение животных проявляется в изменении общей двигательной активности, в стремлении животных уйти из зоны воздействия, в ориентировочных реакциях на ЭМИ.

В ряде исследований, проведенных за последние годы, были обнаружены реакции головного мозга на действие ЭМИ, выражающиеся в структурных изменениях, а также в изменении биоэлектрической системы мозга.

Эндокринные железы. В тесном взаимодействии с вегетативной нервной системой гормоны эндокринных желез в своих взаимосвязях образуют функциональные системы, которые поддерживают на нормальном уровне углеводный, белковый, минеральный и водный обмены, как и весь обмен веществ в целом, а тем самым жизнь вообще.

Исследование функций желез внутренней секреции проводят, используя: 1) изучение сдвигов в картине крови — подсчет числа эритроцитов, лейкоцитов, тромбоцитов, эозинофилов, определение содержания гемоглобина, времени свертывания крови; 2) определение содержания аскорбиновой кислоты в надпочечниках, по которому можно судить об активности гипофиза; 3) прямое определение в крови и моче гормонов коры надпочечников. Последние методы позволяют прямо судить о состоянии гормонообразовательной функции гипофиза и надпочечников.

Кровь и лимфа . Кровь и связанная с ней лимфа, являясь внутренней средой организма, выполняют ряд исключительно важных физиологических функций. Несмотря на непрерывное поступление в кровь и выведение из нее различных веществ, химический состав крови в норме довольно постоянен. Все случайные колебания в составе крови в здоровом организме быстро выравниваются.

Как указывалось выше, при изучении действия ЭМИ в крови определяют число эритроцитов, лейкоцитов, тромбоцитов, эозинофилов, содержание гемоглобина и т. д. Определение содержания в крови ионов Na , K , Ca , Cl , общее содержание белка, сахара, холестерина позволяют судить о нарушениях минерального, белкового, углеводного и жирового обменов.

Белковый обмен . Одним из показателей белкового обмена является общее содержание белков в крови и соотношения отдельных белковых фракций. Уже в начальных стадиях развития различных профессиональных заболеваний, в том числе под действием ЭМИ, наблюдаются сдвиги как в содержании белков, так и в соотношении их фракций.

При влиянии ЭМИ возможно нарушение активности отдельных ферментных систем, участвующих в расщеплении углеводов. Методы определения этих нарушений не выходят за рамки стандартных.

При воздействии ЭМИ наблюдаются изменения в содержании хлоридов, натрия, калия, кальция, фосфатов. Натрий и калий определяются методом пламенной фотометрии, хлориды, фосфаты, кальций — титрометрическим методом. Очевидным является снижение витамина С, тиамин (витамин В1), которые определяются флуорометрически.

Некоторые данные о воздействии ЭМП на человека, расположенные на шкале интенсивностей, представлены в табл. 19.

ТАБЛИЦА 19

Некоторые данные о воздействии ЭМП на человека, расположенные по шкале интенсивностей

ППЭ, мВт/см ²	Изменения в организме
(5-8)10 ²	болевое ощущение при облучении
100	при включении — повышение кровяного давления с последующим резким спадом; при хроническом воздействии — стойкая гипотония. Стойкие морфологические изменения со стороны сердечно-сосудистой системы. Двухсторонняя катаракта
10	изменение условно-рефлекторной деятельности, морфологические изменения в коре головного мозга
2-3	выраженный характер снижения кровяного давления, учащение пульса, колебание объема крови сердца
0,5-1	снижение кровяного давления, тенденция к учащению пульса, незначительные колебания объема крови сердца. Понижение уровня кровяного давления; снижение офтальмотонуса. Деадаптация, расстройство механизмов управления иммунологической защиты

Заканчивая рассмотрение биологического действия МЭМП, попробуем кратко оценить те успехи, которые достигнуты наукой к настоящему времени. Прежде всего, получены неопровержимые данные о влиянии ЭМИ на организм человека и животных. Были получены экспериментальные данные по определению количественных характеристик этого влияния. Некоторые из них, наиболее характерные, приведены в таблице 19. Даже поверхностный анализ этих данных показывает, что исследователи предпочитают диапазон (ППЭ) = 5...10 мВт / см² и выше.

И это легко объяснить: ведь на интенсивностях ниже этих величин получаемый эффект очень мал, он теряется в естественных «шумах» организма, определяемых внутренними, происходящими в организме, и внешними по отношению к нему процессами.

Генетические последствия воздействия излучений ЭМИ изучены пока недостаточно. В одной из лабораторий США исследуется вопрос о корреляции между рождением монголоидных детей (болезнь Дауна) с облучением их отцов СВЧ энергией. Найдено, что большинство таких детей имеют отцов, облученных во время второй мировой войны радиополем локаторов.

Давайте разберемся, насколько справедливы и объективны данные о столь мощном действии электросмога. Ниже приведу данные об излучении, а вернее о величинах плотности потока (ПП) электромагнитного излучения различных источников (таблица 20). Плотность потока измеряется в единицах мощности (Вт, мВт, мкВт), приходящейся на единицу площади (m^2 , cm^2).

ТАБЛИЦА 20

Зависимость плотности потока электромагнитного излучения от параметров источника излучения

Источник	ПП, мкВт/см ²	Эффект	Мобильный телефон*	БС**	Превышение
Резонанс Шумана	0,0000001	Воздействие на мозг	25 км	900 км	-
Естественный электромагнитный фон	0,000001		2500 м	90 км	10 раз
Техногенно-измененный фон (среднее значение)	0,01	Изменение уровня мелатонина в мозгу человека, изменение электроэнцефалограммы, обратимые повреждения ДНК.	25 м	900 м	100000 раз
Нормируемое значение ПП от радиотелефонов.	2	Способен вызывать лейкоз у детей.	5 м	180 м	20000000 раз
Нормируемое значение ПП от базовых станций (БС) сотовой связи.	10	Необратимые повреждения ДНК	0.8 м	30 м	100000000 раз
Нормируемое значение ПП от сотовых телефонов.	100	В течение 2 минут изменяет проницаемость гемато-энцефалического барьера.	25 см	9 м	1000000000 раз
Термический эффект	10000	Неконтролируемая гибель клеток	0.25 см	9 см	100000000000 раз
* В графе указаны расстояния, на которых формируется указанное значение ПП от работающего сотового телефона. ** В графе указаны расстояния, на которых формируется указанное значение ПП от работающей базовой станции.					

За нулевую отметку взято значение ПП резонанса Шумана. Что это такое? Это сверхнизкочастотное электромагнитное воздействие, открытое немецким физиком Т.Шуманом, которое существовало всегда, при воздействии которого происходила эволюция всего живого на Земле и в условиях которого происходило развитие человечества. Откуда оно возникает? Источником сверхнизкого излучения является существование двух заряженных сфер гигантских размеров: токопроводящей земной поверхности вследствие постоянной грозовой деятельности (в одну секунду на Земле происходит в среднем около 100 гроз), а также ионосферы (слой атмосферы на высоте примерно 100 км от земной поверхности), которая заряжается "солнечным ветром". Между этими сферами находится атмосфера, которая является слабым проводником электрического тока. Подобное строение является фактором возникновения в промежуточном слое устойчивых сверхнизкочастотных колебаний, которые практически не затухают и имеют фиксированные частоты. Среди них выделяется частота около 8 Гц, которая полностью совпадает с частотой альфа-ритма мозга человека. Обратите внимание, такая же частота является обязательной во время разговора по мобильному телефону стандарта GSM. Вообще считается, что резонанс Шумана является связующей ниточкой нас с природой.

Еще в 50-ые годы 20 века было доказано, что интенсивность резонанса Шумана непосредственным образом влияет на высшую нервную деятельность человека, а также его интеллектуальные способности. При этом следует учитывать, что интенсивность волн Шумана крайне низка и составляет всего доли пикоВатт/см². Отсюда совершенно очевидно, что даже это крайне малое воздействие способно влиять на человека. Именно поэтому оно и было взято в качестве отправной точки.

А теперь сравните другие источники электромагнитного излучения и их интенсивности. Их воздействие превышает естественный уровень в миллионы и даже триллионы раз. Следовательно, мы живем в условиях чрезвычайно сильного электромагнитного шума, который бьет по нашему организму. И стоит ли после этого удивляться, что мы реагируем на это воздействием изменением своего здоровья и болезнями.

Что такое электрочувствительность?

Это новый термин, который недавно вошел в терминологию экологических медиков. Не каждый врач еще знаком с ним. Обозначает повышенную чувствительность к компонентам электромагнитного поля, т.е. электромагнитным полям различных частот, начиная со статического электричества и кончая СВЧ диапазоном. Согласно данным Всемирной организации здравоохранения имеется около 15% электрочувствительных индивидуумов:

http://www.who.int/pehemf/project/EMF_Project/en/index.html).

Каковы основные признаки электрочувствительности? Это, в основном, неопределенные жалобы, которые возникают у человека в результате пребывания его в помещениях (на работе, в домашней обстановке). К наиболее общим можно отнести:

Общие симптомы:

- Нарушение концентрации внимания
- Головные боли
- Слабость
- Потеря работоспособности
- Непреходящая усталость
- Приступы головокружения
- Плохой, поверхностный сон
- Потеря сил
- Снижение потенции
- Состояние внутреннего опустошения
- Нестабильность температуры тела
- Аллергические реакции

Симптомы со стороны нервной системы:

- Функциональные нарушения центральной и вегетативной нервной систем
- Изменения электроэнцефалограммы
- Неврастенические проявления
- Склонность к потению
- Легкое дрожание пальцев

Симптомы со стороны сердечно-сосудистой системы:

- Кардиоваскулярные нарушения
- Вегетонические нарушения сердечно-сосудистой системы
- Нестабильность пульса
- Нестабильность артериального давления.

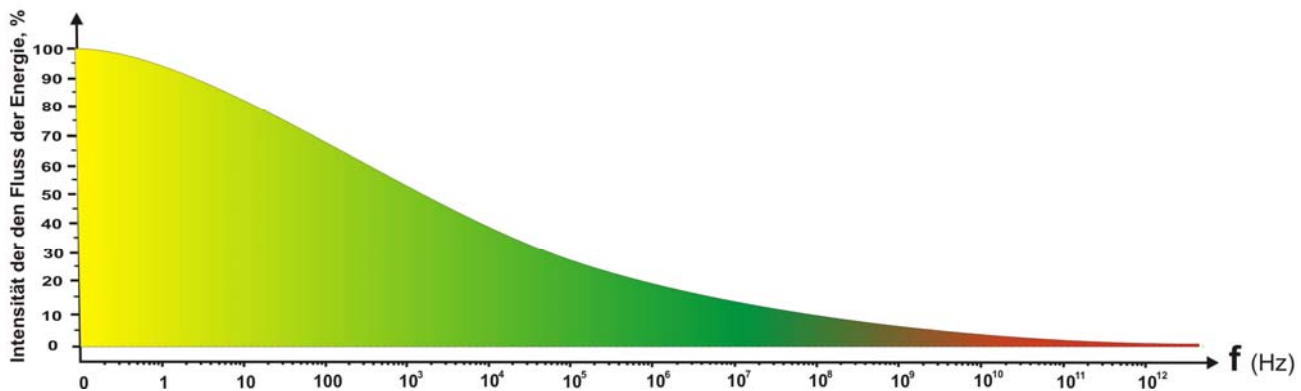
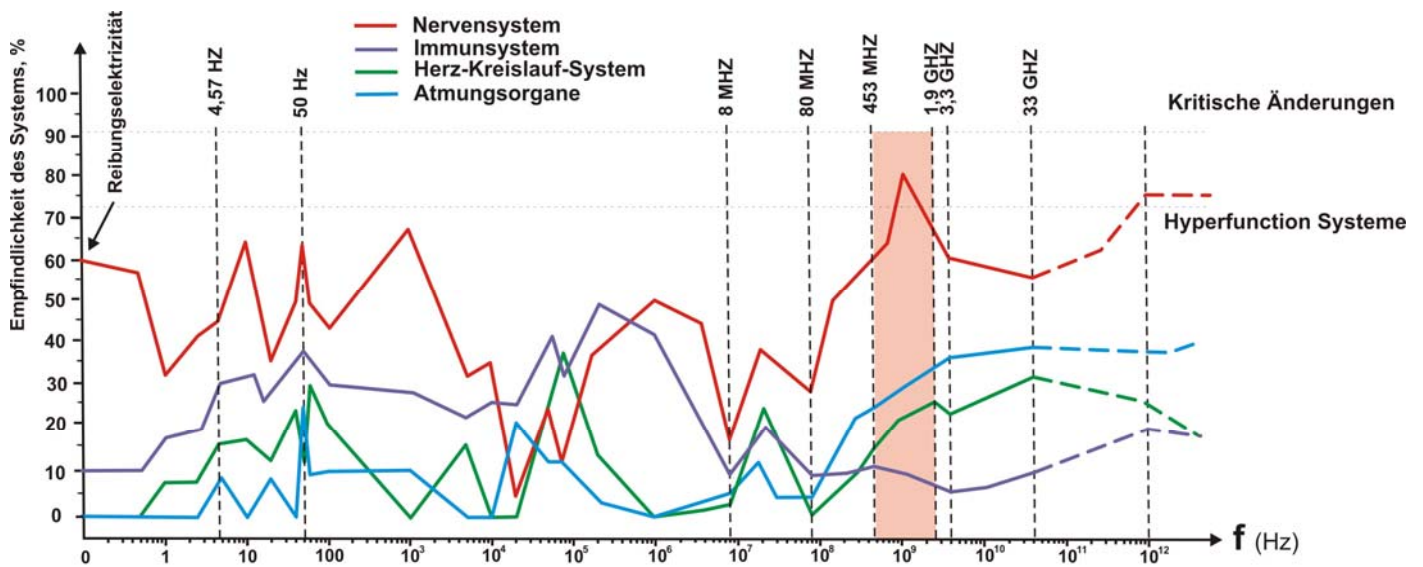


Рис. 31. Зависимость чувствительности различных систем человека от частоты и интенсивности внешнего электромагнитного излучения

Реакция со стороны различных систем организма на действие электросмога хорошо видна на рисунке 31. В нём представлены данные исследования на добровольцах, проведенные в Далласком центре экологической медицины (США), Онкологической клинике Св. Альджбеты (Братислава, Словакия), медицинских Университетах в Братиславе, Мартине, Кошице (Словакия), медицинского и технического университетов в Праге (Чехия), клиниках в Hannover и Regensburg (Германия). Хорошо видно, что выраженное совпадение чувствительности сердечно - сосудистой, дыхательной, нервной и иммунной систем происходит в областях частот средней резонансной частоты человеческого организма 4,57 Гц, промышленной частоты 50-60 Гц, 8, 80 МГц. Розовым цветом на графике выделена полоса частот, в которых работают мобильные телефоны.

Следовательно, организм реагирует на электросмог, к сожалению на тех частотах, с которыми наиболее часто сталкиваемся мы как дома, так и на работе. На нас эти частоты действует и ночью, когда организм расслаблен и отдыхает. Вот почему так важно знать распределение электросмога в области нашего спального места и почему так важно первым его сканировать.

Для большинства врачей люди, страдающие от электросмога не совсем желательные пациенты. Чаще всего им приписывают диагноз астено-вегетативный или астенический синдром.

Наиболее часто электрочувствительность встречается у жителей средней полосы, а также в северных странах. В странах средиземноморья такая патология не встречается или встречается крайне редко. Женщины менее чувствительны с электросмогу, чем мужчины. Наиболее выражен этот симптомокомплекс у "сов" и меньше у "жаворонков". Более чувствительны метеозависимые люди и индивидуумы, реагирующие на геомагнитные явления (магнитные бури). Имеют значение ранее перенесенные заболевания, никотиновая и алкогольная зависимости. Степень проявления электрочувствительности строго индивидуальна.

Основной причиной электрочувствительности считают пониженный порог реакции тканей и систем организма на воздействие электромагнитных полей различных частот.

Гипотезой, объясняющей действие электросмога является явление торможения электрическим и/или магнитным полем любой частоты выработки гормона мелатонина шишковидной железой (эпифизом) в головном мозгу у человека. Мелатонин регулирует биологические ритмы, в том числе околосуточный ритм [1].

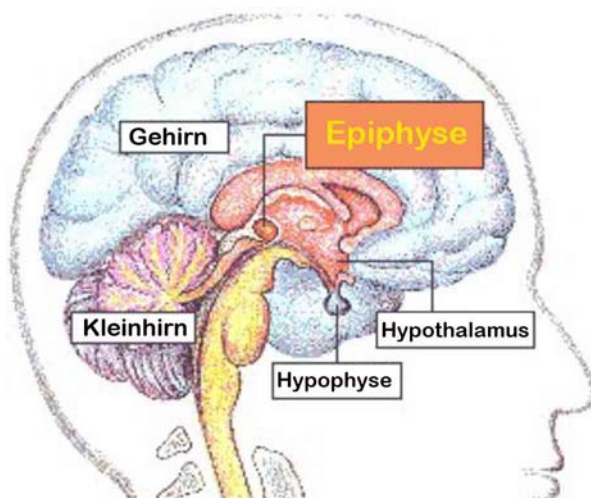


Рис. 32. Зоны максимальной чувствительности головного мозга человека к внешнему электромагнитному излучению

В результате такого ингибирования эндокринная система человека переходит в возбужденное состояние и нарушаются процессы возбуждения-торможения в коре мозга (Рис 32). Этим электрочувствительность напоминает другой известный симптомокомплекс - зимнюю или сезонную депрессию.

Согласно последним данным не только компоненты электросмога могут быть ответственны за перечисленную симптоматику. Свой вклад могут вносить стресс, шум, химические компоненты (формальдегид), металлические пломбы (амальгама). Все перечисленные факторы могут усиливать неблагоприятное воздействие электромагнитных полей.

3.6 Биофизика воздействия ЭМ полей сотовых телефонов на организм человека

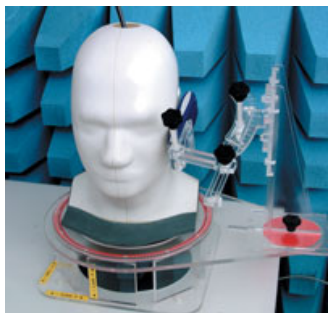
3.6.1 Измерение влияния ЭМ полей сотовых телефонов на организм человека

По международным требованиям излучающую мощность сотовых телефонов измеряют в единицах SAR. **SAR (Specific Adsorption Rate) - удельная поглощенная мощность**, выраженная на единицу массы тела или ткани. В единицах СИ SAR определяется в ваттах на 1 кг (Вт/кг). Не путайте этот показатель с номинальной мощностью сотового телефона, которая обычно указывается в инструкции. До недавнего времени верхней границей значения SAR в Европе считалась величина 2 Вт/кг. Общепринята следующая градация величин SAR для мобильных телефонов:

ТАБЛИЦА 21

Очень низкая облучающая способность	SAR < 0.2 Вт/кг
Низкая облучающая способность	SAR от 0.2 до 0.5 Вт/кг
Средняя облучающая способность	SAR от 0.5 до 1.0 Вт/кг
Высокая облучающая способность	SAR > 1.0 Вт/кг

Величину SAR измерить весьма сложно. Требуется специальное оборудование и фантомы, т.е. имитаторы тканей человеческого организма. Не существует в мире и единой методики измерения SAR. Поэтому данные этого показателя, измеряемые обычно в независимых центрах, могут различаться даже в несколько раз. Наиболее реальным является измерение плотности потока электромагнитного излучения (ПП) сотового телефона, расчет его излучающей способности, исходя из мощности аппарата. **Именно по этим показателям можно реально оценить безопасность вашего мобильного.**



Для определения SAR у производителей есть два способа. Оба основаны на использовании специальных манекенов. Согласно им, испытуемый телефон помещают в определенном положении около головы манекена (фантома), который слабо напоминает свойства человеческих тканей. Внутри фантома помещают датчики, которые измеряют небольшие повышения температуры, или измеряют значения плотности потока ЭМП. Естественно, датчики должны иметь предельно малые размеры и помещать их нужно в разные точки пространства. Телефон переводят на максимальный режим мощности и регистрируют с помощью компьютера

показания датчиков в "голове" фантома. Затем, используя инженерные расчеты, с помощью специальных программ рассчитывают трехмерное распределение электромагнитного поля и на основе этого высчитывают SAR.

Какое значение SAR является приемлемым? До 2001 года такой величиной было значение 2 Вт/кг. С 2001 года его уменьшили (из-за массы данных о негативных медицинских последствиях сотовой связи) до 0,8 Вт/кг.

Как видно, измерить SAR очень сложно. До сих пор нет единой методики. Голова манекена - не голова человека. В голову человека нельзя поместить датчики.

Более того, условия измерения лишь отдаленно напоминают реальные условия пользования телефоном. Следовательно, надо вести поиск других способов расчета SAR. Может быть более упрощенных и приближенных, но реально отражающих взаимодействие ЭМП с биологическими структурами.

С другой стороны, действительно ли ваш телефон обладает гарантированной фирмой значением SAR. Возьмем весьма распространенный случай. В программное обеспечение вашего мобильного вмешались. Например, при предпродажной прошивке, при замене программного обеспечения во время ремонта, при манипуляциях с инженерным меню и др. А ведь именно программа, "зашитая" в микросхемах и находящаяся во внутренностях вашего телефона, управляет его выходной мощностью. Например, вблизи базовой станции она уменьшает, а вдали - увеличивает мощность аппарата. После вышеупомянутых вмешательств уже никто, особенно производитель не сможет гарантировать излучающую способность мобильного. И тогда возле вашей головы окажется довольно мощная радиостанция.

3.6.2 Эффекты влияния ЭМ полей сотовых телефонов на организм человека

Так в чем же опасность для здоровья мобильных телефонов? В действии любого электромагнитного излучения принято выделять два эффекта: **термический** и **нетермический** (последний часто обозначают как **информационный**).

Термический эффект. Пояснять его суть не имеет особого смысла. Вы можете его наблюдать, если поместите курицу в микроволновую печь и через некоторое время получите готовое блюдо. Примерно такое же действие оказывает и излучение от сотового телефона. Это хорошо видно при компьютерной визуализации электромагнитного поля. Учтите еще и то, что антенна, основной излучатель телефона, находится в 3-5 сантиметрах от вашего головного мозга, на который электромагнитное поле и действует. Естественно температура отдельных участков мозга повышается. При длительном разговоре этот эффект можно ощущать по повышению температуры ушной раковины. Подсчитано, что при величине SAR 4 Вт/кг в течение 30 минут температура ткани у здорового взрослого индивидуума поднимается на 1 градус Цельсия. Это неблагоприятный эффект

для любых органов, которые будут отвечать нарушением своей функции. Кстати, все нормирование микроволнового излучения от сотовых телефонов базируется только на термическом эффекте. Другой орган, подверженный влиянию излучения от сотового телефона, хрусталик глаза. Из-за выполнения своих очень важных функций - поддержания прозрачности и аккомодации он плохо кровоснабжается и поэтому особенно подвержен действию электромагнитного излучения. А это влияет на остроту зрения.

Нетермический или информационный эффект. Изучен весьма слабо. Суть его заключается в следующем. Мобильные телефоны стандарта GSM осуществляют передачу информации импульсами, объединенных в блоки (см. рисунок 32).

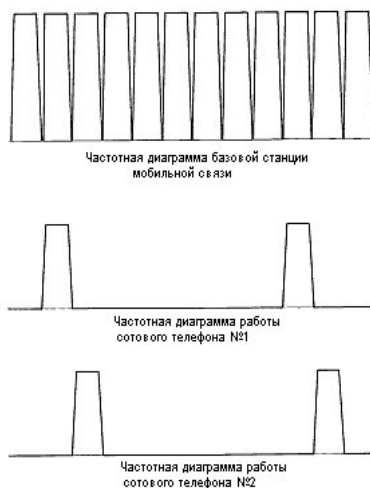


Рис. 33. Импульсные диаграммы работы мобильного телефона

Блок состоит из 8 импульсов. В распоряжении каждого пользователя имеется только один из восьми импульсов. Остальные семь принадлежат другим семи абонентам, которые в этот момент на данной частоте могут вести телефонные разговоры. Продолжительность одного GSM-блока составляет 4,616 миллисекунды (мс), следовательно, частота пульсации мобильного телефона составляет $1/4,616 \text{ мс} = 216,6 \text{ Гц}$ или округленно 217 Гц. Файл с записью такой частоты мобильного телефона Вы можете получить [здесь](#). С генерацией каждого восьмого импульса происходит и пропорциональное выделение энергии. Если номинальная мощность сотового аппарата, согласно инструкции равна 2 Вт, то мощность, выделяемая при каждом импульсе будет: $2 / 8 = 0,25 \text{ Вт}$. Это еще не все. Блоки упомянутых импульсов между мобильным телефоном и базовой станцией группируются в мультиблоки, состоящие из 26 повторений. Следовательно, второй частотой, которая испускается сотовым телефоном является частота: $217 / 26 = 8,35 \text{ Гц}$. Более того, некоторые виды мобильных аппаратов, работающие в энергосберегающем режиме (DTX), способны генерировать третью частоту - 2 Гц. Вот в этом наборе низкочастотного излучения и состоит еще одна опасность мобильной связи. Дело в том, что упомянутые частоты сотовых аппаратов совпадают с частотами собственной, естественной биоэлектрической активности головного мозга человека, которые регистрируются на электроэнцефалограмме (ЭЭГ). Так частота 217 Гц совпадает с так называемым гамма-ритмом мозга, 8,35 Гц - с альфа-ритмом, а 2 Гц - с дельта-ритмом. Следовательно, извне (из непосредственной близости) в головной мозг человека переносятся сигналы, который способен взаимодействовать с собственной биоэлектрической активностью головного мозга (например, путем резонанса) и тем самым, нарушать его функции. Такие изменения заметны на электроэнцефалограмме и не исчезают длительное время после окончания разговора. Очень важно отметить еще и то, что именно альфа-волны чрезвычайно индивидуальны, непосредственно связаны с умственной деятельностью человека и как считают, являются отражением сканирования внутренних образов сознания. Абстрактное мышление связано именно с альфа-ритмом мозга, во время сна преобладает дельта-ритм, а гамма-волны - с активной деятельностью человека. Реально ли негативное воздействие

пульсирующих источников энергии на организм человека? Медикам известен такой пример, когда воздействие на человека пульсирующим освещением с частотой 15 Гц, имеющего скрытую форму фоточувствительной эпилепсии приводило к возникновению припадка. Как Вам теперь понравится привычка некоторых располагать возле изголовья кровати сотовый телефон и использовать его в качестве будильника. Мобильный телефон ночью не "спит", а постоянно, даже в состоянии ожидания вызова работает в пульсирующем режиме.

О большей подверженности влиянию излучения у молодых людей говорит и исследование, проведенное среди 11.000 пользователей сотовой связи по заказу Norwegian Radiation Protection Board, Национальным Институтом "Рабочей жизни" (Швеция), а также SINTEF Unimed (Норвегия). Изучение показало, что люди, которые использовали телефон менее 2 минут в день, жаловались на дискомфорт и сторонние эффекты. Проблемы со здоровьем возрастают, если пользоваться телефоном дольше. Половина опрошенных абонентов сообщили, что при использовании сотовых телефонов испытывают неприятный разогрев в области головы, вокруг уха. Наибольшему риску подвергаются молодые люди. Те, кому еще нет 30, в 3-4 раза чаще подвержены сторонним эффектам. Особенно чувствительны к высокочастотному излучению мобильных телефонов дети.

Следует учитывать, что в условиях экранирования (автомобиль, железобетонные здания) плотность потока электромагнитного излучения, действующего на человека многократно усиливается.

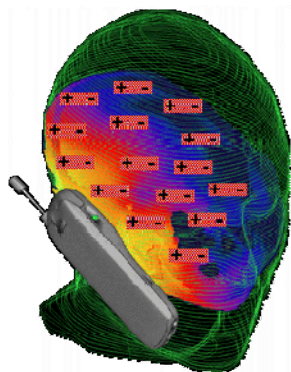
Основными симптомами неблагоприятного воздействия сотового телефона на состояние здоровья являются:

- *головные боли;*
- *нарушения памяти и концентрации внимания;*
- *непреходящая усталость;*
- *депрессивные заболевания;*
- *боль и резь в глазах, сухость их слизистой;*
- *прогрессивное ухудшение зрения;*
- *лабильность артериального давления и пульса (показано, что после разговора по мобильному телефону артериальное давление может повышаться на 5 до 10 мм.рт. столба).*

Тем не менее, наиболее опасными последствиями микроволнового излучения от сотовых телефонов являются опухоли мозга (обычно на стороне преимущественного расположения при разговоре). Риск нейроэпителиальных опухолей мозга повышается вдвое. У лиц, которые пользовались сотовыми телефонами более 6 лет частота развития другой опухоли - шванномы повышалась на 50%.

О потенциальной опасности сотовых телефонов говорит и постоянная тенденция к снижению предельного значения SAR. Как указывалось выше, до недавнего времени этот показатель не должен быть выше **2 Вт/кг**. Согласно исследованиям шведских специалистов, реализованным в стандарт **ТСО-01** значение SAR уменьшено до **0,8 Вт/кг**.

3.6.3. Расчеты SAR



SAR (Specific Absorption Rate) - это величина удельной поглощенной энергии электромагнитного поля (ЭМП) в тканях человека. Почему удельной? Потому, что ее расчет производят на определенную массу ткани, чаще всего на килограмм. Почему поглощенной энергии? Дело в том, что электромагнитная энергия, которая излучается, к примеру, сотовым телефоном, вызывает усиление колебательных, вращательных движений молекул, что выражается в увеличении температуры ткани (см. анимацию слева). Величина SAR имеет размерность Вт/кг. Думаю, что это понятно! Ватты - это та мощность ЭМП, которая поглотилась 1 кг ткани.

В инструкции к телефону приводятся конкретные значения SAR для данной разновидности аппарата. Так, к примеру, в инструкции к Motorola RAZR2 V8 написано: "Наибольшее значение SAR для данной модели телефона при испытании ее в действии в положении около уха составляет 0,2 Вт/кг".

Как получена эта величина и велико ли значение, равное 0,2 Вт/кг. Давайте разберемся в этом. На рисунке 34 показаны результаты сравнения двух мобильных телефонов: слева Motorola RAZR2 V8 и справа Nokia 8600 Luna. Зеленой линией показано нормированное значение SAR (0,8 Вт/кг). Красная линия показывает распределение SAR в сером, фиолетовая - белом веществе мозга. Хотя плотность потока обоих телефонов не превышает гигиенических нормативов, значение SAR в мозгу от Motorola RAZR2 V8 превышает установленную норму. Напротив, Nokia 8600 Luna характеризуется довольно низкими значениями SAR для всех органов.

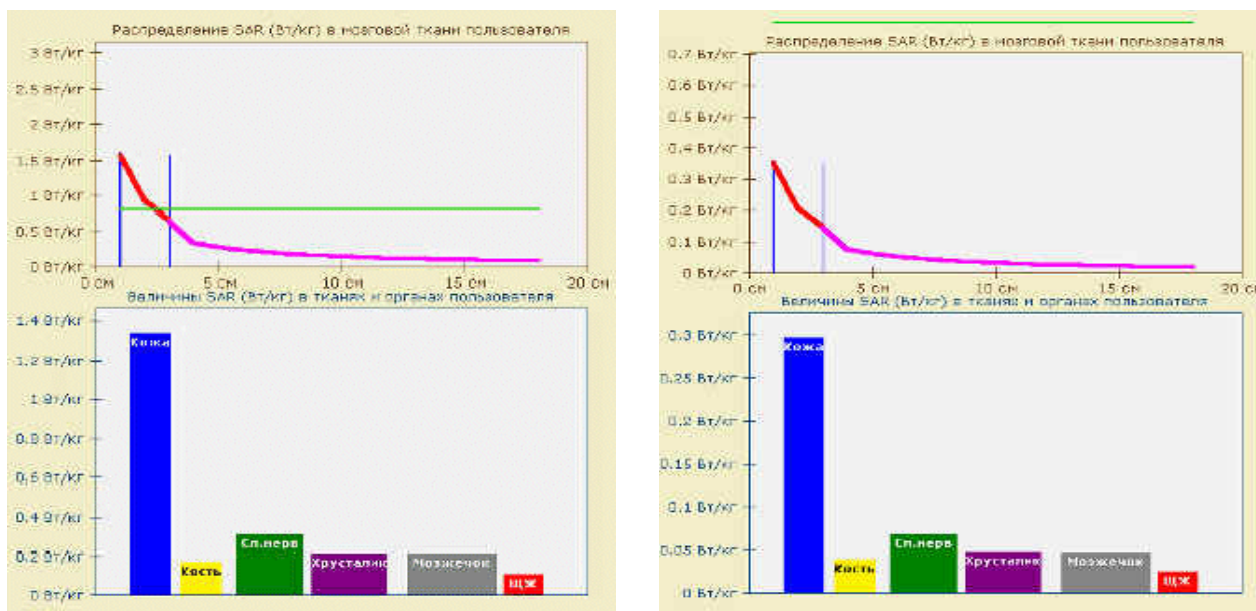


Рис. 34. Диаграммы влияния излучения мобильного телефона на отдельные системы и органы человека

В настоящее время единственным критерием, который предложен в гигиенической практике Европы и позволяет установить безопасность сотового телефона, является измерение плотности потока (ПП) ЭМП. Однако, наш опыт показывает, что не совсем верно. Даже при одинаковых значениях ПП телефоны могут формировать различный SAR. Это обусловлено различными причинами. Например, их конструктивными особенностями. Так, мобильники без наружной антенны обладают несколько большей направленностью. Это, кстати, обнаруживается по пропаданию связи в местах с низким уровнем сигнала. Такие телефоны, даже при одинаковой ПП будут формировать в тканях человека большие значения SAR.

Сотовый телефон является малогабаритным приемопередатчиком. В зависимости от стандарта телефона, передача ведется в диапазоне частот 453 – 1800 МГц. Мощность излучения является величиной переменной, в значительной степени зависящей от состояния канала связи "мобильный радиотелефон – базовая станция", т. е. чем выше уровень сигнала базовой станции в месте приема, тем меньше мощность излучения сотового телефона. Максимальная мощность находится в границах 0,125–1 Вт. Наибольшей выходной мощностью характеризуются телефоны стандарта NMT-450 (номинальная мощность около 1 Вт), меньшей - GSM-900 (0,25 Вт) и самой меньшей стандарта GSM-1800 (0,125Вт). Ниже приведены данные по некоторым наиболее распространенным типам аппаратов мобильной связи.

ТАБЛИЦА 22

Модель	SAR (Вт/кг)
Ericsson LX-588	1,51
Nokia 3110	1,24

Nokia 6210	1,19
Siemens C-35	1,19
Nokia 3210	1,14
Motorola Timeport P7389	1,05
Motorola Timeport 9250 GSM 1900	1,00
Motorola Timeport I7089	1,00
Nokia 6110	0,91
Motorola d160	0,88
Nokia 8110i	0,87
Ericsson GA-768 GSM	0,81
Nokia 8210	0,73
Nokia 6150	0,72
Nokia 8890	0,69
Sony CMDX-1000	0,53
Ericsson GH628	0,41
Nokia 8810	0,35
Nokia 8850	0,26
Motorola 130 Startac	0,22
Motorola StarTac70	0,22
Motorola v3688	0,10

Согласно существующим в Европе временным допустимым уровням электромагнитных излучений плотность потока (ПП) на пользователей мобильных телефонов не должна превышать **100 мкВт/см²**. Необходимо отметить, что в природных условиях значение плотности потока высокочастотного излучения исчезающе мало и составляет лишь 10^{-15} мкВт/см².

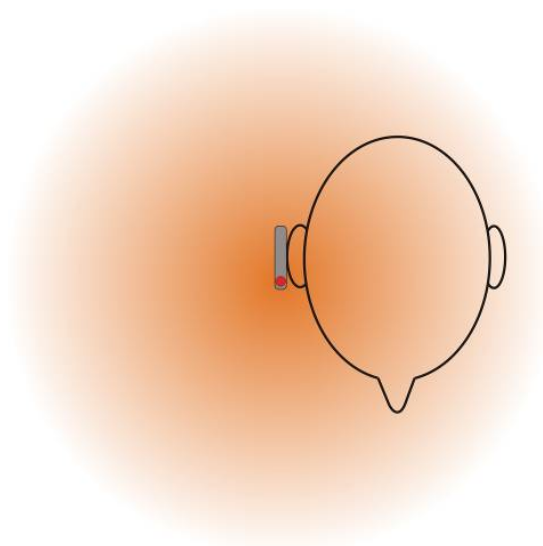


Рис. 35. Диаграмма направленности излучения мобильного телефона без защитных устройств

3.6.4. Защита от ЭМ излучений мобильного телефона

Каким же образом защититься от вредного влияния излучений мобильного телефона?

Выход был найден. Однако, не государственными органами стран - членов ВОЗ, которые не пошли далее разработки соответствующих рекомендаций, а в результате многолетнего труда ученых-энтузиастов ряда передовых стран, которым на основе различных нетрадиционных методов и подходов к проблеме, удалось создать эффективные устройства защиты (УЗ) человека от вредных техногенных ЭМП. Это позволило наладить во многих странах выпуск целой гаммы таких устройств.

По принципу действия, все выпускаемые устройства можно условно подразделить на два основных класса: **класс ГАРМОНИЗАТОРОВ** и **класс НЕЙТРАЛИЗАТОРОВ**.

Устройства первого класса представляют собой генераторы электромагнитных полей (ЭМП), характер и интенсивность излучения которых, соответствуют естественному электромагнитному фону, который, как правило, подавлен в районах с высоким уровнем техногенных полей.

Определенное пространство вокруг работающего генератора характеризуется наличием восстановленного естественного электромагнитного фона, что создает благоприятную экологическую обстановку для организма человека, находящегося в зоне действия генератора и **гармонизирует** работу всех систем его организма, поддерживая в нем энергетическое равновесие.

Эти приборы выполнены в виде мобильных или стационарных устройств, приспособленных для ношения в чехле, или устанавливаемых в помещениях, соответственно (приборы **Fostac Maximus®**, **фирмы FOSTAC Technologies AG, Швейцария**).

Существуют и другие технологии создания гармонизаторов, также генерирующих частоты естественного спектра, однако без применения источников питания.

Эти гармонизаторы выпускаются в виде кулонов, нагрудных значков, самоклеющихся аппликаторов и предназначены, как для размещения на поверхности электронных приборов, включая мобильники, так и для ношения пользователями на одежде и на теле. Очень кратко, принцип действия таких устройств заключается в том, что некоторые вещества, находясь на стадии структурных переходов, например, в процессе кристаллизации, обладают свойством, при определенных условиях, запоминать воздействующие на них физические и информационные поля.

На базе таких кристаллических веществ, ученым удалось создать миниатюрные гармонизаторы в виде брелков, значков и кулонов. Максимально эффективными в этой группе устройств являются продукты, разработанные и выпускающиеся фирмой **FOSTAC AG, Швейцария**

Однако доминирующее положение на рынке УЗ занимают устройства второго класса, нейтрализующие вредное воздействие техногенных ЭМП на организм человека.

Такие УЗ являющиеся «пассивными» генераторами (не имеющими источников электропитания). Они названы «генераторами формового поля», или «формовыми» генераторами, т.к. в основе их действия лежит так называемый «эффект формы», известный человечеству с давних времен.

Кратко, суть его состоит в том, что все материальные тела живой и неживой природы обладают свойством излучения фоновых энергоинформационных полей очень малой интенсивности.

Большинство нейтрализаторов выполнено в виде пластиковой подложки, на которую методом высоких технологий послойно наносятся специально рассчитанные геометрические фигуры из благородных и редкоземельных металлов. Такой "слоеный пирог" не только обеспечивает эффективную защиту от влияния вредных полей, но и одновременно стимулирует всю биоэнергетику организма. По форме такие защитные устройства бывают плоскими, как в виде небольших карт, значков и кулонов, так и в виде самоклеющихся дисков и наклеек различного размера. В зависимости от конструктивного исполнения, УЗ размещаются либо на одежде или теле пользователя (карты, значки, кулоны), либо наклеиваются на мобильник (диски, наклейки) таким образом, чтобы при разговоре УЗ имело непосредственный контакт с рукой пользователя.

Существуют нейтрализаторы и других конструкций.

Так, разработанное учеными фирмы **Fostac AG (Швейцария)** устройство для защиты от вредных ЭМИ мобильных телефонов, выполнено в виде сетки из углепластикового материала микроскопического плетения. Это, позволяет сформировать т.н. «дифракционную петлю» для излучения мобильного телефона, защищающую слуховой проход уха и головной мозг человека от проникновения вредных электромагнитных излучений.

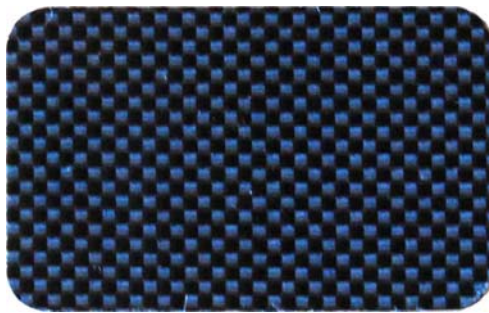


Рис. 36. Устройство Chip Fostac[®] фирмы Fostac AG, Швейцария

Принцип построения и работы этих устройств подробно описан в следующей главе.

Следует особо отметить то обстоятельство, что, одним из важнейших результатов последних исследований явился вывод о том, что надежным индикатором взаимодействия формовых полей со средой является сам биологический объект, т.е. человеческий организм.

В этом плане установлено, что доступными методами определения степени влияния на человека техногенных электромагнитных полей и, одновременно, эффективности защитных свойств УЗ, являются новые аппараты и методы медицинской диагностики, такие как «Complex medical expert», производства фирмы CME Swiss AG, Швейцария. Конечно, с помощью классических лабораторных методов и уникальной измерительной аппаратуры, возможно выполнить такие исследования даже на более высоком уровне, но они являются довольно длительными и дорогостоящими, что ограничивает их применение только специализированными научно – исследовательскими институтами, при проведении тех или иных исследовательских работ.

Эти методы позволили четко определять степень влияния вредных полей на функциональное состояние органов и систем человека, без применения УЗ, и с ними.

С этой целью измеряют определенные прямые или косвенные параметры, характеризующие функциональное состояние основных систем организма, либо интегральные (обобщенные) показатели, характеризующие общее его состояние.

Выше (см. раздел 3.5.2 и Рис. 31, 35), мы уже показали распределение влияния электромагнитного излучения широкого диапазона на человеческий организм в целом и диаграмму распределения влияния электромагнитного излучения мобильного телефона на мозг человека.

В результате проведенных работ в Далласком центре экологической медицины (США), Онкологической клинике Св. Альджбеты (Братислава, Словакия), медицинских Университетах и в медицинских клиниках в Братиславе, Мартине, Кошице (Словакия), медицинского и технического университетов в Праге (Чехия), клиниках в Hannover и Regensburg (Германия), было исследовано не только влияние ЭМ полей на человеческий организм, но и проведены исследования степени защиты с применением продуктов фирмы Fostac AG (Швейцария).

Контроль степени защиты от влияния мобильных телефонов проводился с применением углепластикового устройства Chip Fostac[®]. Исследования проводились как для одиночного устройства Chip Fostac[®], так и с использованием двух устройств одновременно, повернутых относительно центральной оси на 90⁰ (Рис. 37).

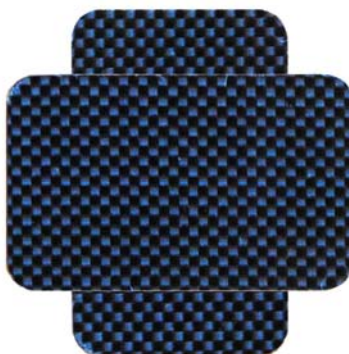


Рис. 36. Двойное устройство Chip Fostac[®] фирмы Fostac AG, Швейцария

Подобное применение этих устройств обусловлено их принципом работы (см Главу 4). На плоскости устройства, обращенной к защищаемому объекту, получается поляризованное электромагнитное поле. Для снижения активности электромагнитного излучения, применялся принцип «минимизации» при суммировании двух однонаправленных, взаимно перпендикулярных по плоскости поляризации, предварительно поляризованных излучений. Результирующие диаграммы распределения и направленности ЭМИ мобильного телефона с применением двойного Chip Fostac[®] показаны на Рис 38.

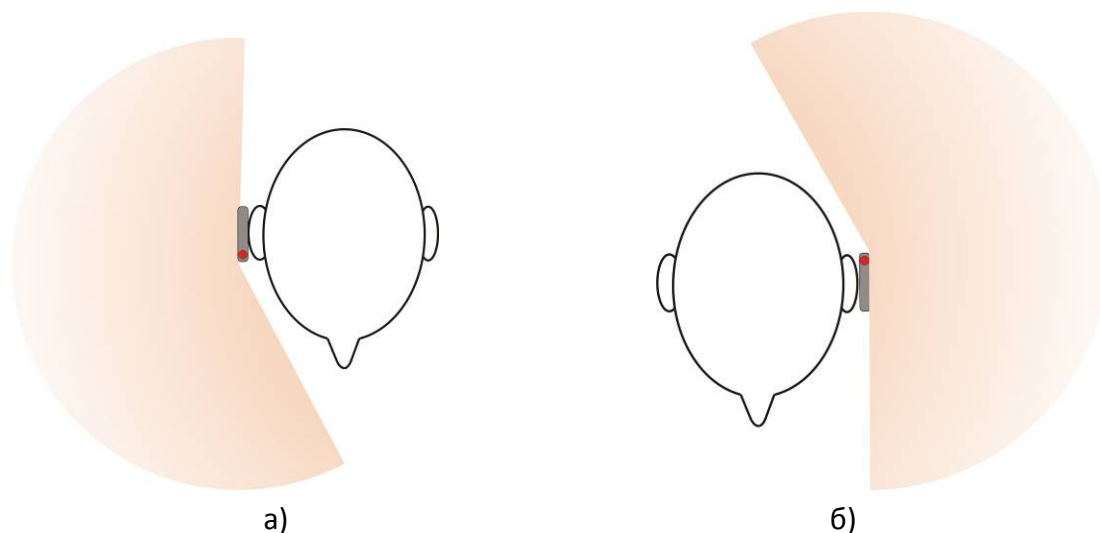


Рис. 38. Диаграммы направленности излучения мобильного телефона с Chip Fostac[®] для правого (а) и левого (б) уха пользователя

Результаты исследований обобщены в графиках, показанных на Рис 39.

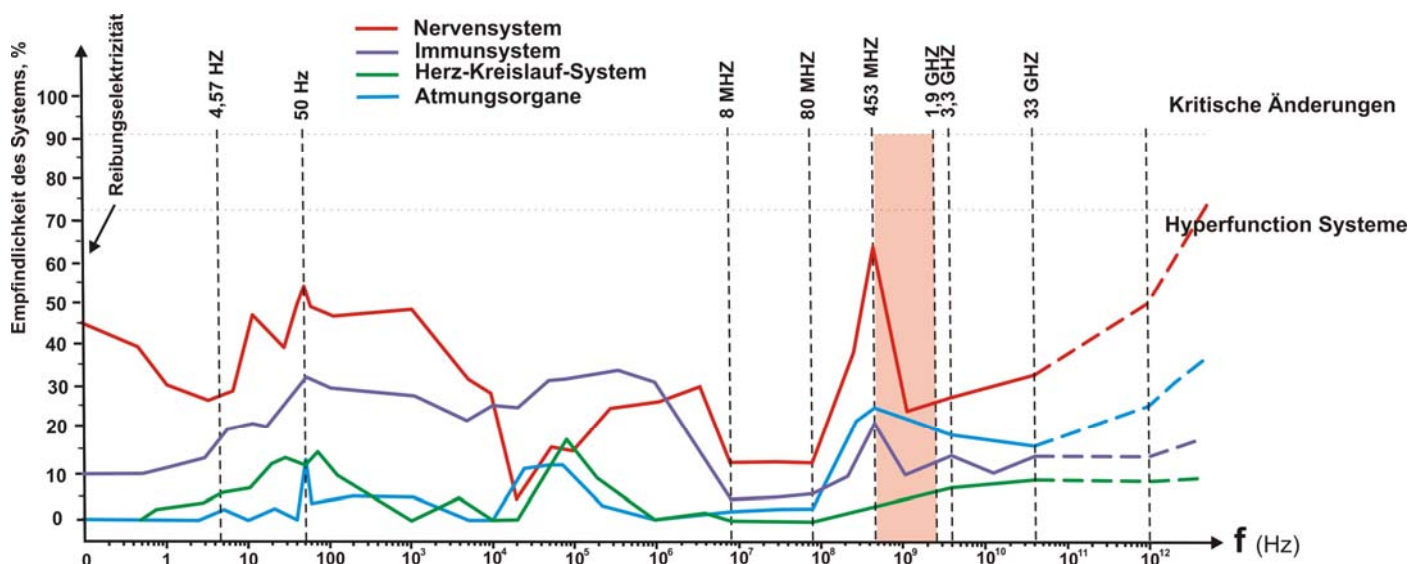


Рис. 39. Зависимость чувствительности различных систем человека от частоты и интенсивности внешнего электромагнитного излучения с применением защитного устройства Chip Fostac[®]

При сравнении графиков влияния электромагнитного поля на организм человека без применения защиты типа Chip Fostac[®] (Рис. 31) и с применением защитных устройств (Рис. 39) мы видим кардинальное изменение чувствительности органов на это влияние при применении защиты. Это

изменение чувствительности относится не только к диапазону частот работы мобильных телефонов, но и к полному спектру электромагнитных волн. При приближении по шкале ЭМ излучений к диапазону работы мобильных телефонов в обоих случаях мы можем видеть увеличение чувствительности человека. Но в отличие от случая исследований без защиты, при применении защитных устройств чувствительность повысилась на меньший уровень, не достигая (для нервной системы) уровня гиперфункции. Таким образом, при применении защитных устройств типа Chip Fostac® мы можем исключить такие реакции организма, как:

- головные боли;
- нарушения памяти и концентрации внимания;
- непреходящая усталость;
- депрессивные заболевания;
- боль и резь в глазах, сухость их слизистой;
- прогрессивное ухудшение зрения

Эти исключения возможны из-за кардинального снижения влияния электромагнитных волн на нервную систему.

Кроме того, снижение общего уровня влияния электромагнитных излучений на организм человека позволяет повысить иммунный статус организма, снизить патогенную нагрузку на эндокринную и сердечнососудистую системы, повысить статус половой системы и, соответственно, скорректировать гормональный баланс в организме человека. Эти выводы сделаны на основании медицинских исследований, проведенных в Онкологической клинике Св. Альджбеты (Братислава, Словакия), медицинских Университетах в Братиславе, Мартине (Словакия), медицинского университета в Праге (Чехия) с применением аппаратуры «Complex medical expert», производства фирмы CME Swiss AG, Швейцария.

На основании статистического анализа изменения чувствительности человеческого организма на применение защитных устройств типа Chip Fostac® можно сказать, что средневзвешенный расчетный коэффициент снижения чувствительности организма на воздействие электромагнитных волн (а соответственно – коэффициент «улучшения» общего состояния здоровья человека, применяющего Chip Fostac®) составляет не менее **32%** от первичного состояния (без применения защитных средств). Средневзвешенный коэффициент снижения чувствительности организма на воздействие электромагнитных волн можно рассчитать с применением распределения Фурье для среднеквадратичных отклонений абсолютных значений характеристик чувствительности органов и систем человека на эти ЭМ воздействия:

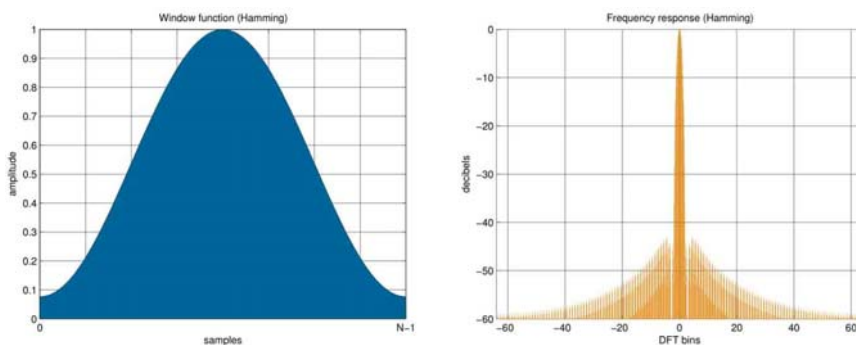
$$f(x) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \left(a_n \cos \frac{n\pi x}{L} + b_n \sin \frac{n\pi x}{L} \right)$$

или

$$\hat{f}(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} f(x) e^{-ix\omega} dx.$$

где a_0 – начальный уровень чувствительности системы органов, а последующие коэффициенты представляют собой среднеквадратичные отклонения чувствительности в различных негармонических диапазонах частот.

Эти коэффициенты можно представить в виде функций Хемминга:



Глава 4. Теория, принципы построения и работы

устройств типа Chip Fostac®

Работа устройств типа Chip Fostac® основана на волновых свойствах электромагнитных излучений. При расчетах взаимодействия электромагнитных излучений со специальным материалом, из которого изготовлен Chip Fostac®, использовались явления интерференции и дифракции. При прохождении ЭМИ через первый слой материала и отражении внутри Chip Fostac®, электромагнитное поле поляризуется. При прохождении через следующие слои материала электромагнитное поле изменяется в соответствии с законами интерференции и дифракции. При выходе материал устройства Chip Fostac® представляет собой дифракционную решетку.

4.1. Теоретические основы интерференции, дифракции и поляризации электромагнитного поля

При распространении электромагнитных волн возможны явления дифракции, интерференции, поляризации и отражения.

Дифракция (огибание волнами препятствий) имеет место тогда, когда длина волны сравнима (или больше) с размерами находящегося на пути препятствия. Если препятствие по сравнению с длиной акустической волны велико, то явления дифракции нет.

В устройствах Chip Fostac® толщина нитей, образующих материал Chip Fostac® намного меньше основного спектра частот, которые модифицирует это устройство. Поэтому для описания работы Chip Fostac® применимы законы дифракции, интерференции, поляризации и отражения.

При одновременном движении в ткани нескольких электромагнитных волн в определённой точке среды может происходить суперпозиция этих волн. Такое наложение волн друг на друга носит общее название интерференции.

Если в процессе прохождения через объект электромагнитные волны пересекаются, то в определённой точке среды наблюдается усиление или ослабление колебаний. Результат интерференции будет зависеть от пространственного соотношения фаз электромагнитных колебаний в данной точке среды. Если электромагнитные волны достигают определённого участка среды в одинаковых фазах (синфазно), то смещения частиц имеют одинаковые знаки и интерференция в таких условиях способствует увеличению амплитуды электромагнитных колебаний. Если же электромагнитные волны приходят к конкретному участку в противофазе, то смещение частиц будет сопровождаться разными знаками, что приводит к уменьшению амплитуды электромагнитных колебаний.

Интерференция играет важную роль при оценке явлений, возникающих в тканях вокруг источника электромагнитных волн. Особенно большое значение имеет интерференция при распространении электромагнитных волн в противоположных направлениях после отражения их от препятствия.

4.1.1. Взаимодействие электромагнитных волн с веществом

1 Согласно классической электронной теории вещество можно рассматривать как систему заряженных частиц. В случае высокочастотных волн, вынужденные колебания могут совершать только электроны. Более массивные заряженные частицы (ядра атомов, ионы) совершают вынужденные колебания под действием низкочастотных волн (инфракрасное излучение).

2 В изотропной среде сила, действующая на заряд q со стороны электромагнитного поля волны, равна

$$F = qE + q [v1/V [nE]] ,$$

где v_1 - скорость заряда q ; V - фазовая скорость волны, n – единичный вектор, проведенный в направлении распространения волны. Так как $v_1 \leq V$, то второе слагаемое, представляет собой силу Лоренца. Оно мало по сравнению с первым, и им можно пренебречь.

Наиболее сильное воздействие на электроны оказывают световые волны, частоты которых близки к частотам колебаний электронов в атомах или молекулах.

3 В процессе вынужденных колебаний заряженных частиц в молекулах вещества периодически изменяются (с частотой ν падающего света) дипольные электрические моменты молекул. При этом молекулы излучают вторичные электромагнитные волны той же частоты ν .

4 В однородной и изотропной среде имеет место интерференция первичной и вторичных волн.

В случае падения электромагнитной волны на границу раздела двух различных однородных и изотропных сред в результате интерференции первичной и вторичных волн образуются отраженная волна, распространяющаяся в той же среде, откуда пришла первичная волна, и преломленная волна, распространяющаяся во второй среде.

5 Электрические и магнитные свойства вещества, определяющие его поведение под действием световой волны, характеризуются относительной диэлектрической проницаемостью ϵ , удельной проводимостью γ и относительной магнитной проницаемостью μ . Для всех веществ в области радио частот электромагнитных волн можно считать, что $\mu = 1$, а фазовая скорость этих волн

$$V = c / \sqrt{\epsilon}$$

При падении электромагнитной волны (ЭВ) на плоскую границу раздела двух диэлектриков с разными значениями относительной диэлектрической проницаемости ϵ волна частично отражается и частично преломляется.

Отношение скорости света в вакууме к фазовой скорости v света в среде:

$$n = c / V = \sqrt{\epsilon \mu} \approx \sqrt{\epsilon}$$

называется абсолютным показателем преломления этой среды. Для любой среды, кроме вакуума, величина n зависит от частоты излучения и состояния среды (ее температуры, плотности и т.д.). Для разреженных сред (например, газов при нормальных условиях) $n \approx 1$. В анизотропных средах абсолютный показатель преломления зависит также от направления распространения ЭВ и характера ее поляризации для характеристики поглощающих сред вводится комплексный показатель преломления.

Относительным показателем преломления n_{21} второй среды относительно первой называется отношение фазовых скоростей распространения ЭВ V_1 и V_2 соответственно в первой и второй средах:

$$n_{21} = V_1 / V_2 = n_2 / n_1$$

где n_1 и n_2 – абсолютные показатели преломления первой и второй сред. Если $n_{21} > 1$, то вторая среда называется энергетически более плотной, чем первая среда.

Нижеприводимые формулы справедливы только для монохроматических волн, длины λ которых на много раз больше межмолекулярных расстояний в среде.

4.1.2. Отражение и преломление электромагнитных волн диэлектриками

При падении электромагнитной волны на идеально плоскую границу раздела двух диэлектриков, размеры которой значительно превышают длину волны, угол между направлением распространения отраженной волны и нормалью к границе раздела i_1 (угол отражения) равен по абсолютной величине соответствующему углу для падающей волны i (закон отражения). Такое отражение называется зеркальным. Угол между направлением распространения преломленной волны и нормалью к границе раздела (угол преломления r) связан с углом падения i законом Снеллиуса (законом преломления):

$$\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{n_2}{n_1} = n_{21}$$

n_{21} – это относительный показатель преломления среды, в которой распространяется преломленная электромагнитная волна, относительно среды, в которой распространяется падающая ЭВ.

Если ЭВ из энергетически более плотной среды 1 падает на границу раздела с энергетически менее плотной средой 2 ($n_{21} < 1$), то при углах падения $i \geq i_{\text{пр}}$, где $\sin i_{\text{пр}} = n_{21}$, преломленная волна отсутствует и ЭВ полностью отражается от энергетически менее плотной среды. Это явление называется полным внутренним отражением. Угол $i_{\text{пр}}$ называется предельным (критическим углом полного внутреннего отражения).

Величина R , равная отношению интенсивностей отраженной и падающей волн, называется коэффициентом отражения. Величина T , равная отношению интенсивностей преломленной и падающей волн, называется коэффициентом пропускания. Для отражения и преломления ЭВ на границе раздела двух прозрачных сред (не поглощающих ЭВ)

$$R + T = 1.$$

В случае полного внутреннего отражения $R=1$ и $T=0$.

при падении под углом i_1 на плоскую границу раздела двух сред плоской неполяризованной электромагнитной волны коэффициент отражения:

$$R = \frac{1}{2} \left[\frac{\sin^2(i-r)}{\sin^2(i+r)} + \frac{\text{tg}^2(i-r)}{\text{tg}^2(i+r)} \right],$$

где r – угол преломления. В случае $i = r = 0$ (нормальное падение ЭВ)

$$R = \left(\frac{n_{21} - 1}{n_{21} + 1} \right)^2,$$

где n_{21} – относительный показатель преломления.

Диффузным (рассеянным) отражением ЭВ называется отражение ЭВ во всевозможных направлениях. Оно наблюдается, например, при отражении ЭВ от мономерной поверхности раздела двух сред.

4.1.3. Принцип Гюйгенса - Френеля

Дифракцией ЭВ называют совокупность явлений, которые наблюдаются при ее распространении в среде с резко выраженными неоднородностями (например, при прохождении через отверстия в электронепрозрачных экранах, вблизи границ подобных тел и т.д.) В более узком смысле под дифракцией понимают явление огибания электромагнитными волнами малых препятствий, т.е. отклонения от законов геометрического распространения ЭВ и следовательно проникновение этих волн в область геометрической тени.

Дифракцию ЭВ Френель объяснил как результат интерференции вторичных волн согласно принципу Гюйгенса-Френеля. [Гюйгенса-Френеля принцип – это приближенный метод решения задач о распространении волн, особенно световых]. Согласно принципу Гюйгенса-Френеля, каждый элемент поверхности, которой достигла в данный момент волна, является центром элементарных волн, огибание которых будет волновой поверхностью в следующий момент времени. Рис.40 а. Положение фронта распространяющейся волны может быть в любой момент времени представлено огибающей всех вторичных (элементарных) волн, рис.40 б. Источниками вторичных волн являются точки, до которых дошел фронт первичной волны в предшествующий момент времени. При этом предполагается, что вторичные волны излучаются только «вперед», т.е. в направлениях, составляющих острые углы с направлением внешней нормали к фронту первичной волны. Принцип Гюйгенса позволяет объяснить законы отражения и преломления света, однако он недостаточен для объяснения дифракционной картины распространения ЭВ.

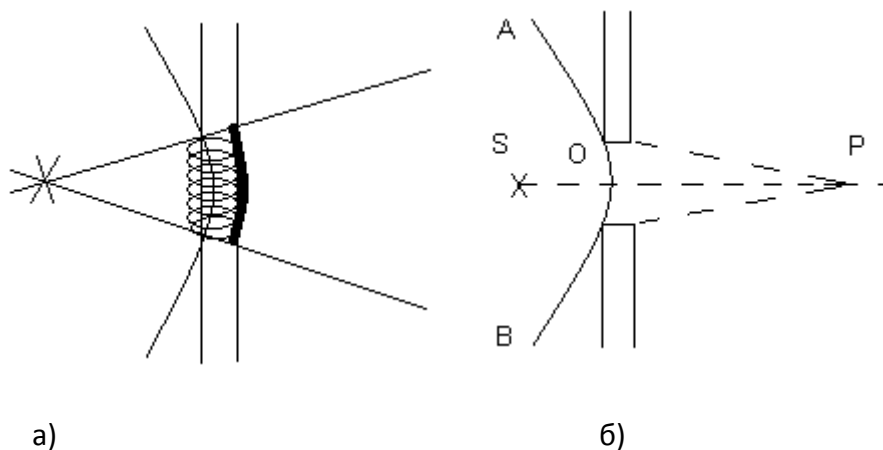


Рис.40

Обратные элементарным волны во внимание не принимаются.

Френель в 1815 году дополнил принцип Гюйгенса (1678): ввел представление когерентности элементарных волн и интерференции волн.

Когерентность(находящийся в связи) – согласованное протекание во времени и пространстве нескольких колебательных волновых процессов, проявляющихся при их сложении (Рис 41).

Когерентные колебания – разность фаз постоянная или закономерно изменяется во времени и при сложении определяет результирующую амплитуду.

Гармонические колебания.

$$P(t) = A \cos(\omega t + \varphi)$$

A – амплитуда
 ω – частота
 φ – фаза
 } константы

Сложение двух гармонических колебаний

$$Ap = \sqrt{A_1^2 + A_2^2 + 2 A_1 A_2 \cos(\varphi_1 - \varphi_2)}$$

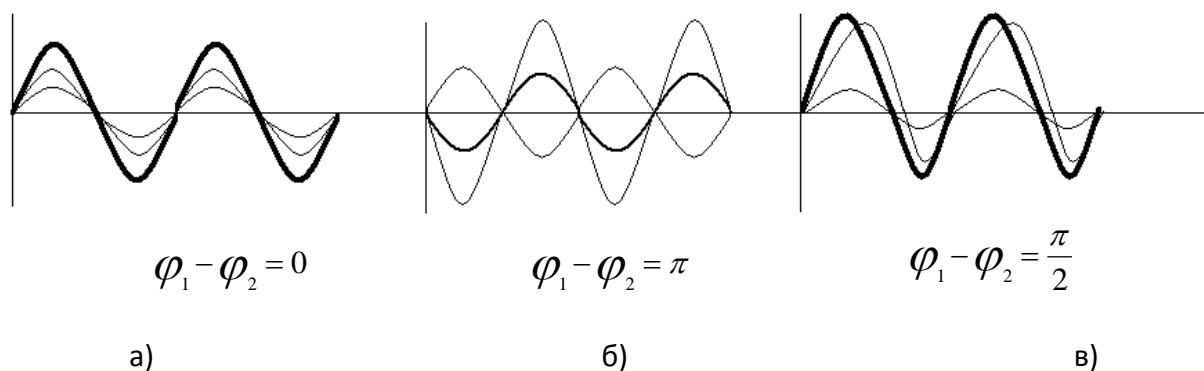


Рис.41

При большом отрезке времени τ случайное изменение фазы может превысить π – колебание стало неконкретным. Это оценивают функцией корреляции $R(t)$. В этом случае

$$Ap = \sqrt{A_1^2 + A_2^2 + 2 A_1 A_2 R(t) \cos(\omega t)}$$

ω - средняя частота колебания.

$R(t) = 1$ при $t=0$ и $R(t)=0$ при $t=\infty$

$R(t) = 0,5$, t в этом случае называют временем когерентности или продолжительностью гармонического цуга.

В реальных волновых процессах амплитуда и фаза колебаний изменяются не только вдоль направления распространения волн, но и в плоскости перпендикулярной этому направлению.

Когерентность исчезнет, если в точках отстоящих на l от начальной разность фаз достигнет π .

Для характеристики волны в плоскости перпендикулярной направлению ее распространения применяют термин площадь когерентности и пространственная когерентность. В этом случае вводит функцию корреляции $R(l)$.

Нагретое тело излучает совокупность сферических волн, по мере удаления от источника волна приближается к плоской и размер когерентности $1,22 \lambda r/\rho$.

r – расстояние до источника

ρ – размер источника.

Для солнечного света размер когерентности 30 мкм. С уменьшением углового размера источника размер когерентности растёт. r/ρ – угол когерентности.

4.1.4. Графическое сложение амплитуд вторичных волн

Амплитуду волны в точке наблюдения можно рассчитывать на основе графического метода векторных диаграмм сложения одинаково направленных когерентных колебаний, возбуждаемых в этой точке всеми элементарными источниками вторичных волн. В пределах каждой зоны Френеля угол α между внешней нормалью к фронту и направлением в точку наблюдения, а также расстояние r доточки наблюдения изменяются крайне незначительно. Поэтому векторная диаграмма соответствующая одно зоне, имеет вид, близкий к полуокружности. Результирующая амплитуда вторичных волн от всех элементарных участков зоны равна диаметру этой полуокружности.

Результирующая амплитуда A_i вторичных волн от i -й зоны прямо пропорциональна площади этой зоны. Для равновеликих по площади зон (рис. 42) амплитуда A_i уменьшается по мере увеличения номера i зоны благодаря возрастанию угла α и расстояния r : $A_1 > A_2 > A_3 > \dots$. В этом случае векторная диаграмма для системы зон имеет вид медленно скручивающейся спирали (рис. 43).

Для расчета дифракции света на прямолинейном крае плоского экрана или на прямолинейной щели метод зон Френеля неудобен, так как эти зоны оказываются частично закрытыми экраном. В этих случаях фронт падающей плоской волны разбивается на бесконечно узкие полоски, параллельные прямолинейному краю экрана или щели. Расчет дифракции можно произвести графически с помощью спирали Корню (рис. 5), уравнение которой в параметрической форме имеет вид:

$$u = \int_0^v \cos \frac{\pi \xi^2}{2} d\xi \quad \text{и} \quad \omega = \int_0^v \sin \frac{\pi \xi^2}{2} d\xi, \quad \text{где параметр} \quad v = \sqrt{\frac{2}{\lambda L}} (x - x_0)$$

Здесь λ - длина волны, L - расстояние от плоскости экрана до точки T (предполагается, что волна падает на экран нормально к его плоскости), x_0 – координата точки наблюдения T , x - текущая координата точек фронта волны, а ось Ox проведена в плоскости экрана перпендикулярно к его краю.

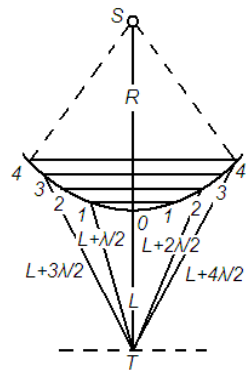


Рис.42

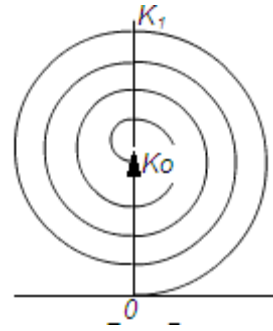


Рис.43

Спираль Корню состоит из двух ветвей, симметричных относительно начала координат ($v=0$) и при $v \rightarrow \pm\infty$ асимптотически навивающихся соответственно на полюс $F+(0,5;0,5)$ и полюс $F-(-0,5;-0,5)$ (Рис 44).

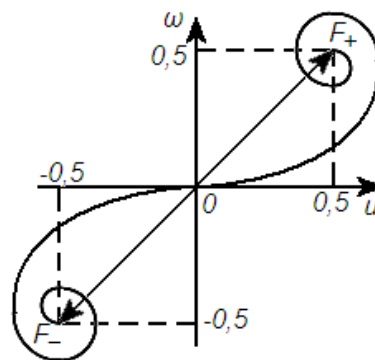


Рис.44

4.1.5. Дифракция Френеля.

Дифракция сферической электромагнитной волны на неоднородной среде (отверстие в экране), размер которого b сравним с диаметром первой зоны Френеля $\sqrt{Z\lambda} : b \approx \sqrt{Z\lambda}$ (дифракция в сходящихся лучах, z – расстояние точки наблюдения от экрана).

В ряде дифракционных задач, обладающих осевой симметрией, расчет интерференции вторичных волн может быть сильно упрощен с помощью наглядного геометрического метода разбиения фронта волны на кольцевые участки, называемые зонами Френеля. Разбиение на зоны производится так, чтобы разность хода от сходственных границ (внутренних или внешних) каждой пары соседних зон до рассматриваемой точки T равнялась $\lambda/2$. Вторичные волны от сходственных точек двух соседних зон приходят в точку T в противоположных фазах и взаимно ослабляют друг друга при наложении.

На рис. 42 показано построение зон Френеля в случае сферической волны, возбуждаемой источником S . Участок 101 волновой поверхности называется первой (центральной) зоной Френеля, кольцевой участок 21- второй зоной и т.д. Так как R и $L \gg \lambda$, то при не слишком большом i площади первых i зон Френеля одинаковы (i - № зоны Френеля):

$$\sigma_1 = \sigma_2 = \dots = \sigma_i = \frac{\pi R L \lambda}{R + L}$$

В случае плоского волнового фронта

$$\sigma_1 = \dots = \sigma_i = \pi L \lambda$$

4.1.6. Дифракция Фраунгофера.

Дифракция практически плоской электромагнитной волны на неоднородной среде (отверстие в экране), размер которого b много меньше диаметра первой зоны Френеля $\sqrt{2Z\lambda} : b \ll \sqrt{2Z\lambda}$ (дифракция в параллельных лучах). Особенности дифракции Фраунгофера на различных объектах показаны на рисунках 45; 46; 47.

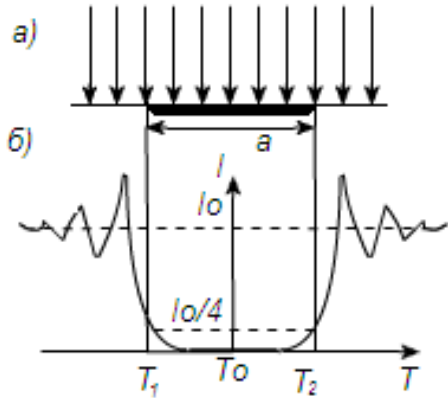


Рис.45. Распределение интенсивности при дифракции Фраунгофера на длинном прямоугольном экране

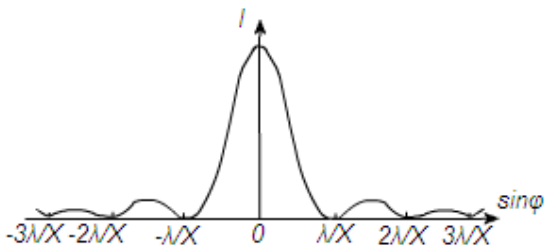


Рис.46. Распределение интенсивности при дифракции Фраунгофера на узкой длинной щели

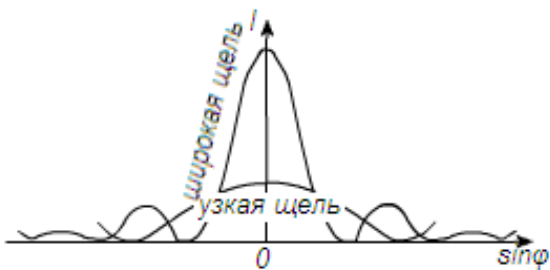


Рис.47. Распределение интенсивности при дифракции Фраунгофера на узкой длинной и широкой щелях

4.1.7. Частота и поляризация – основные характеристики электромагнитных волн в долазерной оптике

В связи с изначальным допущением, что условия распространения электромагнитных волн в среде материала устройств типа Chip Fostac[®] соответствуют условиям возникновения волновых явлений, в дальнейшем поведение электромагнитных волн в среде материала устройства типа Chip Fostac[®] рассматриваем по аналогии с распространением световых волн.

Световая волна, являющаяся волной электромагнитной, характеризуется частотой, амплитудой и поляризацией. Гармоническая (или монохроматическая) волна, распространяющаяся вдоль оси Oz , описывается выражением:

$$E(t, z) = eA \cos(\omega t - kz).$$

Здесь

E – электрический вектор волны; e – единичный вектор, характеризующий направление поляризации (ориентацию электрического вектора);

A – амплитуда (в v/cm), ω – частота (в $гц$);

$$k = \frac{\omega}{c} n - \text{волновое число; } c - \text{скорость света в вакууме } (c = 3 * 10^{10} \text{ см/сек})$$

n – показатель преломления среды, в которой распространяется ЭВ.

S амплитудой A связан поток мощности или интенсивность волны

$$I = cnA^2 / 8\pi \quad (в \text{ вт} / \text{см}^2);$$

полная мощность

$$P = I\pi a^2 \quad (в \text{ вт});$$

a – радиус пучка.

В «долазерную» эпоху физики, изучавшие поглощение света веществом, отражение света от границы раздела разных сред, рассеяние света и такое прочее, знали, что главными факторами, определяющими характер этих процессов, являются частота и поляризация световой волны. Какова прозрачность данной среды, не является в достаточной мере корректным, пока не уточнено, о какой области оптического спектра идет речь: о видимом, ультрафиолетовом или инфракрасном излучении. Более того, сложный характер спектра поглощения среды требует указать точное значение частоты. Изучение зависимости поглощения света от частоты ν (или длины волны $\lambda = 2\pi / k = c / \nu n$) лежит в основе оптической абсорбционной спектроскопии — области, ставшей самостоятельной наукой и имеющей огромное число приложений. Шкала частот, или длин волн, до недавнего времени являлась основной шкалой, с помощью которой классифицировали эффекты взаимодействия света с веществом; в основе такой классификации лежит неявное предположение о том, что в процессе взаимодействия света со средой частота света существенно не изменяется.

Вопрос о величине коэффициента отражения света на границе двух сред также не является корректным, если не указано направление поляризации падающей волны. Например, при угле падения, равном углу Брюстера, свет, поляризованный в плоскости падения, вообще не отражается, несмотря на скачок показателя преломления.

4.1.8 Роль интенсивности света

В подавляющем числе энергетических эффектов, исследованных до создания лазеров, амплитуда световой волны A все же не влияла на характер явления. В большинстве случаев количественные, а тем более качественные результаты экспериментов, которые проводятся с нелазерными

источниками света, не зависят от интенсивности света. Такие энергетические характеристики среды, как показатель преломления, коэффициент поглощения, коэффициент рассеяния, фигурировали в физических справочниках без указания на то, при каких интенсивностях света они были измерены. Опыт показывает, что в той области интенсивностей, которой располагала долазерная оптика, зависимость указанных величин от интенсивности никак не проявляется.

Разумеется, для экспериментатора, выполнявшего тот или иной опыт, интенсивность источника света всегда была важна; она определяла, в частности, требования к чувствительности используемой им приемной аппаратуры. Т. О., в долазерной экспериментальной оптике интенсивность излучения характеризует уровень экспериментальной техники и почти не имеет отношения к физике изучаемых явлений. Возникает естественный вопрос: является ли сказанное следствием общего физического закона типа: «все энергетические явления не зависят от интенсивности излучения», либо дело в ограниченности экспериментального материала, собранного долазерной оптикой. Многочисленные исследования по физической оптике, выполненные с мощными лазерами, показали, что если уж формулировать некий общий закон, касающийся зависимости энергетических явлений от интенсивности света, то эта формулировка должна быть диаметрально противоположной.

Опыты со световыми пучками, мощность которых достигает 10^8-10^{10} *вт/см²*, показали, что существует весьма сильная количественная и, что особенно важно, качественная зависимость характера энергетических эффектов от интенсивности излучения. При этом следует подчеркнуть, что речь идет не о малых поправках, регистрируемых лишь в тонком физическом эксперименте; имеются в виду весьма «грубые» явления, радикально меняющие поведение световых пучков.

4.7 Взаимодействие сильного светового поля со средой

4.2.1 Линейный атомный осциллятор

Взаимодействие света со средой. Причины, по которым в линейной оптике характер явления не зависит от интенсивности излучения, можно выявить, обратившись к ее теоретическим основам. Известно, что эффекты взаимодействия света с веществом можно трактовать как на классическом, так и на квантовом языке. Квантовый язык необходим при анализе поглощения и излучения света атомными системами. При изучении же распространения света в среде в области прозрачности, то есть вдали от полос резонансного поглощения среды, вполне удовлетворительно классическое описание, которым мы и воспользуемся ниже.

Энергетические свойства среды в линейной оптике описываются такими не зависящими от интенсивности волны характеристиками, как коэффициент преломления:

$$n = c/v \quad (1)$$

(v — фазовая скорость света в среде) и коэффициент поглощения δ . По мере распространения в среде вдоль оси oz световая волна затухает по закону:

$$I = I_0 e^{-\delta z} \quad (2)$$

Взаимодействие света со средой состоит из последовательных элементарных взаимодействий с ее атомами или молекулами. В электрическом поле волны E атомы или молекулы среды поляризируются: отрицательно заряженные электроны под действием поля смещаются относительно положительно заряженных ядер, появляется электрический дипольный момент, причем смещение определяется величиной и знаком напряженности поля. Знак и величина напряженности светового поля изменяются с частотой ω , в связи с этим изменяется и положение электрона. Колеблющийся же электрон сам является источником поля; он переизлучает действующее на него световое поле.

Дипольный момент, приобретённый отдельным атомом под действием световой волны:

$$P = \alpha E \quad (3)$$

Величина α называется линейной атомной восприимчивостью, а дипольный момент, приобретённый 1 *см³* среды P , называется поляризацией среды:

$$P = N\alpha E = \chi E, \quad (4)$$

где N – число атомов в 1 см^3 , а χ – макроскопическая линейная восприимчивость. Диэлектрическая проницаемость среды ε и показатель преломления n в силу (3) и (4) имеют вид:

$$\varepsilon = 1 + 4\pi\chi, \quad (5)$$

$$n = \sqrt{\varepsilon} = \sqrt{1 + 4\pi\chi} \quad (6)$$

Смещение атомного электрона под действием электрического поля световой волны описывается уравнением:

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = eE + F - R \frac{dx}{dt} \quad (7)$$

Здесь m – масса электрона, e – его заряд, R – параметр, характеризующий затухание электронных колебаний, eE – сила действующая на электрон со стороны поля, F – сила, действующая на электрон со стороны атомного ядра (возвращающая сила ядра):

$$F = -kx \quad (8)$$

Уравнение гармонического осциллятора:

$$\frac{d^2 x}{dt^2} = \frac{e}{m} E - \omega_0^2 x - \delta \frac{dx}{dt} \quad (9)$$

где $\delta = \frac{R}{m}$, а $\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$ – собственная частота атомного осциллятора.

Решение имеет вид:

$$x(t) = \frac{eA}{m} \cdot \frac{\cos(\omega t - kz + \varphi)}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + \delta^2 \omega^2}}, \quad (10)$$

$$\varphi = \text{arctg} \frac{\delta \omega}{(\omega^2 - \omega_0^2)}.$$

Формулы (9), (10) описывают простейшие закономерности дисперсии света: показатель преломления n растёт (а фазовая скорость U уменьшается) по мере приближения частоты световой волны ω к собственной частоте атомного осциллятора ω_0 или, другими словами, к полосе поглощения среды.

4.2.2 Нелинейный атомный осциллятор. Нелинейные восприимчивости

Движение электрона в поле ядра — это движение в потенциальной яме, имеющей конечную глубину (рис. 48,а). Наглядным, хотя и грубым, аналогом движения электрона в поле ядра и соответствующей потенциальной яме может служить движение тяжелого шарика внутри сосуда, форма которого имеет форму потенциальной ямы. Если на атом воздействуют сильное световое поле $E \approx 10^9 \text{ в/см}$, то форма потенциальной ямы может искажаться.

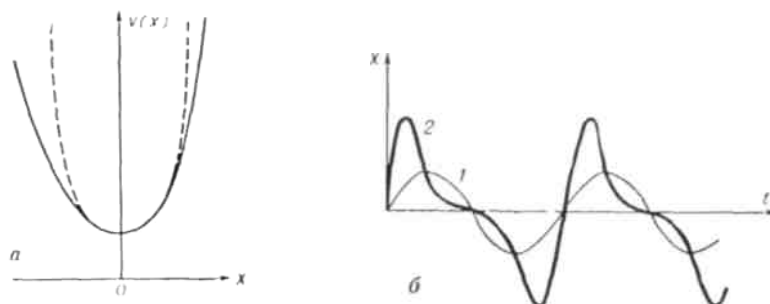


Рис. 48, а — потенциальная яма, в которой совершает колебание энергетический электрон.

При малых смещениях dx потенциальная яма симметрична относительно $x = 0$ (пунктир), и сила, действующая на электрон со стороны ядра, пропорциональна смещению dx . При больших смещениях яма может оказаться несимметричной (сплошная линия), б — отклик оптического электрона, колеблющегося и потенциальной яме, на гармоническое световое поле. В слабых полях форма отклика повторяет внешнее воздействие (1), в сильных полях форма отклика искажается (2).

При этом сила F нелинейно зависит от смещения x , то есть:

$$F = kx + \beta x^2. \quad (11)$$

В соответствии с (11) уравнение (9) становится нелинейным, а осциллятор — ангармоническим:

$$\frac{d^2x}{dt^2} = \frac{e}{m} E - (\omega_0^2 x - \gamma x^2) - \delta \frac{dx}{dt} \quad (12)$$

Отклик такого осциллятора на гармоническом поле не повторяет форму внешнего воздействия (рис. 1, б). При ещё больших световых полях в выражении для F появляются члены $\approx x^4$ и более высоких степеней. Происходит дальнейшее искажение отклика электрона и смещение положения равновесия.

Это приводит к нелинейной зависимости между поляризацией среды P и E . При $(E/E_a) < 1$ P можно представить в виде разложения в ряд по параметру: E/E_a

$$P = \chi^{(1)} E + \chi^{(2)} E^2 + \chi^{(3)} E^3 + \dots \quad (13)$$

Коэффициенты $\chi^{(1)}$, $\chi^{(2)}$ и так далее называются нелинейными восприимчивостями (по порядку величины $\chi^{(1)} \approx 1/E_a$; $\chi^{(2)} \approx 1/E_a^2$). Уравнение (13) является основой нелинейной оптики. Если на поверхность среды падает монохроматическая световая волна $E = A \cos(\omega t - kx)$, где A — амплитуда, ω — частота, k — волновое число, x — координата точки вдоль направления распространения волны, t — время, то, согласно (13), поляризация среды наряду с линейным членом $P^l = \chi^{(1)} A \cos(\omega t - kx)$ содержит ещё и нелинейный член 2-го порядка:

$$P^{nl} = \chi^{(2)} E^2 = \frac{\chi^{(2)} A^2}{2} + \frac{\chi^{(2)} A^2}{2} \cos 2(\omega t - kx). \quad (14)$$

Последнее слагаемое в (14) описывает поляризацию, изменяющуюся с частотой 2ω , т.е. генерацию 2-й гармоники. Генерация 3-й гармоники, а также зависимость показателя преломления n от интенсивности описывается членом $\chi^{(3)} E^3$ в (13) и так далее.

4.2.3. Причины нелинейных энергетических эффектов

Нелинейный отклик атомного или молекулярного осциллятора на сильное световое поле — наиболее универсальная причина нелинейных энергетических эффектов. Существуют и другие причины: например, изменение показателя преломления n может быть вызвано нагревом среды лазерным излучением. Изменение температуры $\Delta T = \alpha E^2$ (α — коэффициент поглощения света)

приводит к изменению n от n_0 до $n = n_0 + \frac{\partial n}{\partial T} \Delta T$. Во многих случаях существенным оказывается

также эффект электрострикции (сжатие среды в световом поле E). В сильном световом поле E лазера электрострикционное давление, пропорционально E^2 , изменяет плотность среды, что может привести к генерации звуковой волны. С тепловыми эффектами связана самодефокусировка света.

Нелинейные восприимчивости $\chi^{(2)}$, $\chi^{(3)}$, $\chi^{(4)}$ и так далее — новые параметры вещества. Изучение их дисперсии (зависимости от ω) — предмет нелинейной спектроскопии. Для атомов методами квантовой механики удаётся рассчитать нелинейные восприимчивости любого порядка. Их дисперсия имеет очень сложный вид, так как резонансы возникают не только при совпадении частот

действующих полей с собственными частотами атома, но и при совпадении с ними тех или иных комбинаций этих частот. В не слишком сильных лазерных полях совпадение результатов теории и эксперимента оказывается хорошим.

Была развита феноменологическая теория, позволившая получить количественные результаты, во многих случаях хорошо согласующиеся с экспериментом, и дать рецепты поиска новых нелинейно-энергетических материалов. В то время как значения $\chi^{(2)}$ для подавляющего большинства энергетических материалов отличаются между собой не более чем на один порядок, значения $\chi^{(3)}$ отличаются на три порядка. Это свидетельствует об особой физической информативности нелинейных свойств вещества.

4.7 Энергетические переходы

4.3.1 Фотоны друг с другом непосредственно не взаимодействуют

В физике используется (и подтверждается) представление о «непосредственном взаимодействии», приводящем к рассеянию частиц друг на друге, к поглощению одних частиц другими, взаимным превращениям частиц и, в частности, к их распадам. Фотоны не рассеиваются друг на друге, не поглощаются друг другом, не распадаются. Между ними не действуют ни электромагнитные силы, ни какие-либо другие. Итак, фотоны непосредственно друг с другом не взаимодействуют! Поэтому всякий раз, когда наблюдается превращение одних фотонов в другие, следует говорить о взаимодействии через некоего «посредника».

Роль «посредника» играет вещество, а точнее, его частица, и прежде всего электрон. Будем в дальнейшем рассматривать этот «посредник» как некий микрообъект, который характеризуется определенной системой энергетических уровней.

Непосредственное взаимодействие имеет место между фотоном и микрообъектами. Оно проявляется в том, что микрообъект может поглощать фотоны или испускать их (или же одновременно и поглощать, и испускать). При этом микрообъект совершает квантовые переходы между определенными энергетическими уровнями. Поскольку непосредственными участниками этих переходов являются фотоны, то такие переходы называют энергетическими.

Таким образом, все процессы «преобразования» одних фотонов в другие (все процессы преобразования света в свет) сводится к определенным энергетическим переходам микрообъектов. Именно по этой причине следует более подробно обсудить энергетические переходы

4.3.2 Однофотонные и многофотонные переходы

Энергетические переходы разделяются на *однофотонные* и *многофотонные*. В однофотонном переходе участвует, т. е. испускается либо поглощается один фотон. В многофотонном переходе участвуют одновременно несколько фотонов — два или более. В зависимости от количества участвующих в переходе фотонов различают многофотонные переходы разной кратности: двухфотонные (кратность равна 2), трехфотонные (кратность равна 3) и т. д. Предположим, что в общем случае рассматривается многофотонный переход кратности N . Это означает, что в нем участвуют N фотонов. При этом может оказаться, что m фотонов испускаются, а $N - m$ фотонов поглощаются. Варьируя число m от нуля до N можно, очевидно, перебрать все типы многофотонных переходов кратности N .

Подчеркнем, что многофотонный переход принципиально нельзя разбивать на какие-либо временные этапы; его следует рассматривать как единый, неделимый во времени процесс.

Возьмем для примера двухфотонный переход, в котором поглощаются два фотона. Здесь нельзя полагать, будто сначала поглощается один фотон, а потом другой фотон. Существенно, что оба фотона поглощаются одновременно. Если бы можно было полагать, что сначала поглощается один фотон, а потом другой, то в этом случае мы имели бы дело уже не с двухфотонным переходом, а с двумя однофотонными переходами.

Таким образом, двухфотонный (как и всякий многофотонный) переход качественно отличается от совокупности (последовательности) однофотонных переходов.

4.3.3. Виртуальный уровень.

На рисунке 1а изображены два однофотонных перехода: сначала поглощается один фотон с энергией $h\nu$ и микробиъект переходит с уровня 1 на уровень 2, затем поглощается другой фотон и микробиъект переходит с уровня 2 на уровень 3. А как изобразить двухфотонный переход, в котором поглощаются два фотона с энергиями $h\nu$? Такой переход принято изображать так, как показано на рисунке 1б, на котором пунктиром показан так называемый виртуальный уровень.

Что такое «виртуальный уровень»? Объясняя это понятие, напомним, что двухфотонный переход нельзя разбить во времени на два этапа.

Отсюда следует, что принципиально нельзя обнаружить микробиъект на виртуальном уровне (в противном случае можно было бы говорить о двух этапах — до обнаружения и после обнаружения микробиъекта). Именно этим и отличается виртуальный уровень от обычного энергетического уровня.

Можно ли заключить отсюда, что виртуальный уровень оказывается «несуществующим», «нереальным»? Ведь на любом реально существующем энергетическом уровне микробиъект может быть в принципе обнаружен!

Мы не станем обсуждать здесь степень реальности (или нереальности) виртуальных уровней. Для нас главное состоит в том, что реально существуют как однофотонные, так и многофотонные переходы. И если для представления однофотонных переходов достаточно системы обычных (реальных) энергетических уровней, то для представления многофотонных переходов такой системы уровней уже недостаточно приходится обращаться к специфическому понятию — понятию виртуальных уровней. Приведенный на рисунке 1 пример достаточно ясно, показывает специфику это понятия.

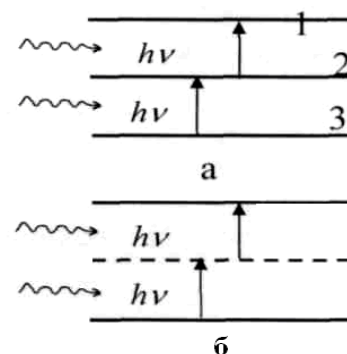


Рис 1

4.3.4. Каким образом микробиъект играет роль «посредника» в процессах преобразования «света» в «свет»?

Рассмотрим различные процессы «превращения» одних фотонов в другие фотоны. Начнем с процесса, представленного на рисунке 2. Микробиъект поглощает фотон с энергией $h\nu_1$ и переходит с уровня 1 на уровень 3. Затем он испускает фотон энергией $h\nu_2$ и переходит с уровня 3 на уровень 2. Таким образом, исходный (первичный) фотон с энергией $h\nu_1$ «превращается» в конечный (вторичный) фотон с энергией $h\nu_2$. Роль «посредника» в этом «превращении» играет микробиъект. Впрочем, здесь микробиъект оказался не просто «посредником» — ведь его состояние тоже изменилось: он перешел в итоге с уровня 1 на уровень 2. Более выпукло роль микробиъекта как «посредника» между фотонами (именно «посредника» и не более) проявляется в процессе, представленном на рисунке 3а. Микробиъект поглощает фотон с энергией $h\nu$ и переходит с уровня 1 на уровень 2. Затем он испускает фотон с такой же энергией и возвращается на уровень 1. Итак, состояние микробиъекта в конечном счете не меняется; в то же время первичный фотон «превращается» во вторичный. Этот последний имеет такую же энергию, но, разумеется, может отличаться как направлением импульса, так и поляризацией.

Далее обратимся к процессу, показанному на рисунке 3б (пунктиром изображен виртуальный уровень). В отличие от двух предыдущих процессов мы имеем здесь не два однофотонных перехода, а один двухфотонный переход. Если в процессе, показанном на рисунке 3а, микробиъект в

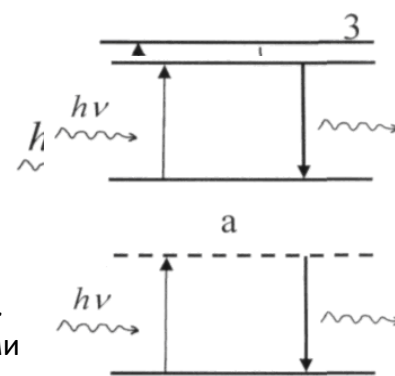


Рис 3

принципе можно обнаружить на уровне 2 (в промежутке между поглощением первичного и испусканием вторичного фотона), то теперь ситуация совершенно иная: принципиально нельзя обнаружить микробиъект на виртуальном уровне; не существует никакого «промежутка» времени между поглощением первичного и испусканием вторичного фотона. Более того, нельзя даже утверждать, что сначала поглощается первичный фотон, а затем испускается вторичный. Процесс поглощения и испускания является в данном случае единым, неделимым во времени процессом; при этом в принципе невозможно обнаружить какого-либо, даже временного изменения состояния микробиъекта.

Таким образом, в рассмотренном двухфотонном процессе микробиъект выступает как весьма своеобразный, можно сказать, весьма «тактичный» посредник, остающийся «в тени».

4.3.5. Процесс, описывающий генерацию второй гармоники.

Многофотонные процессы, в которых начальное и конечное состояния микробиъекта одинаковы, представляют для нелинейной оптики особый интерес. Выше мы рассмотрели двухфотонный процесс. Далее рассмотрим два *трехфотонных* процесса.

Первый из них представлен на рисунке 4 (пунктиры изображают виртуальные уровни). Микробиъект участвует в трехфотонном переходе: происходит поглощение двух фотонов с энергиями $h\nu$ и испускание одного фотона с энергией $2h\nu$; состояние микробиъекта не меняется. Поскольку в подобных процессах микробиъект как «посредник» «остается в тени», можно рассматривать как бы непосредственное «превращение» двух фотонов в один (два фотона, сталкиваясь друг с другом, превращаются в новый фотон). При этом выполняются законы сохранения энергии и импульса для фотонов:

$$h\nu + h\nu = 2h\nu \quad (3.1)$$

$$\vec{p}_1 + \vec{p}_2 = \vec{p} \quad (3.1')$$

(здесь \vec{p}_1 и \vec{p}_2 — импульсы поглощенных фотонов, а \vec{p} — импульс испущенного фотона).

Рассмотренный процесс называют в нелинейной оптике *генерацией второй гармоники*. Он описывает «превращение» света с частотой ν в свет с частотой 2ν . Более подробно явление генерации второй гармоники будет рассмотрено ниже.

На рисунке 5 представлен трехфотонный процесс при котором поглощается один фотон с энергией $h\nu$ и испускаются два фотона — с энергиями $h\nu_1$ и $h\nu_2$; состояние микробиъекта не меняется.

Этот процесс можно рассматривать в известном смысле как «распад» одного (первичного) фотона на два новых (вторичных) фотона. При этом для фотонов, участвующих в процессе, выполняются законы сохранения энергии и импульса:

$$h\nu = h\nu_1 + h\nu_2 \quad (3.2)$$

$$\vec{p} = \vec{p}_1 + \vec{p}_2 \quad (3.2')$$

Рассмотренный процесс называют *параметрической генерацией света*. Он описывает «превращение» световой волны с частотой ν в две новые световые волны — с частотами ν_1 и ν_2 . В принципе любую из этих частот (например частоту ν_1) можно, по желанию, плавно варьировать в пределах от нуля до ν .

Может возникнуть сомнение, действительно ли процессы, изображенные на рисунках 4 и 5, требуют участия микробиъекта в качестве «посредника».

Не взаимодействуют ли в этих процессах фотоны друг с другом непосредственно, без какого-либо «посредника»?

В самом деле, почему бы не считать, что в некоторых процессах фотоны способны взаимодействовать друг с другом непосредственно? (Ведь взаимодействуют же многие другие частицы!) В таком случае

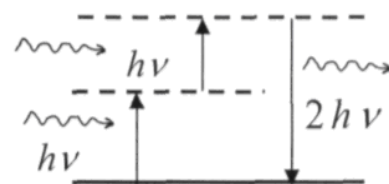


Рис 4

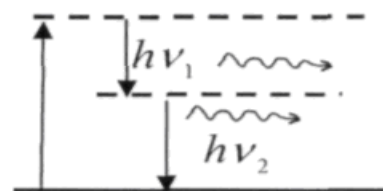


Рис 5

можно было бы обойтись без понятия виртуальных уровней. Так, в примере, изображенном на рисунке 5, можно было бы считать, что фотон с энергией $h\nu$ сам по себе (без участия микрообъекта) распадается на фотоны с энергиями $h\nu_1$ и $h\nu_2$, а микрообъект попросту остается на некотором энергетическом уровне, не совершая никаких виртуальных переходов.

Однако с подобными соображениями нельзя согласиться. Как показывает опыт, процессы, изображенные на рисунках 4 и 5 (как и другие процессы), в отсутствие вещества не происходят! Как бы ни оставался микрообъект «в тени», его участие, его «посредничество» оказывается всегда решающим, поскольку оно определяет саму возможность того или иного многофотонного процесса.

4.4. Преобразование одной световой волны в другую световую волну

4.4.1. Некогерентные и когерентные процессы преобразования света в свет

В предыдущем вопросе на примере (элементарных актов взаимодействия фотонов с микрообъектом) были рассмотрены различные процессы преобразования света в свет. В одних процессах переходы с поглощением первичных фотонов и переходы с испусканием вторичных фотонов четко разграничены во времени: они сопровождаются изменениями в состоянии микрообъекта (даже если начальное и конечное состояния микрообъекта оказываются одинаковыми). В других процессах переходы с поглощением первичных фотонов и переходы с испусканием вторичных фотонов не разграничиваются во времени и никаких изменений в состоянии микрообъекта обнаружить невозможно; в этих процессах выполняются законы сохранения энергии и импульса для фотонов, как если бы фотоны непосредственно взаимодействовали друг с другом.

Процессы первого типа принято называть *некогерентными* процессами преобразования света в свет, а процессы второго типа — *когерентными* процессами. Остановимся подробнее на специфике тех и других процессов.

Некогерентные процессы. В некогерентных процессах первичная световая волна (волна накачки), поглощаясь веществом, приводит к определенным изменениям заселенности уровней частиц вещества. Затем новые квантовые переходы в веществе приводят к высвечиванию вторичной световой волны. Очевидно, что при этом не может быть и речи о каком-либо взаимодействии волны накачки и вторичной световой волны. Ведь сначала волна накачки переводит вещество в возбужденное состояние, а затем уже (спустя какое-то время!) вещество, возвращаясь в исходное состояние, излучает вторичную световую волну.

Примером некогерентного процесса преобразования света в свет может служить процесс генерации лазерного излучения, происходящий при условии оптической накачки. Излучение от лампы-вспышки является волной накачки, а генерируемое в активной среде лазера когерентное излучение — вторичной световой волной. Другим примером может служить широко используемое в лампах дневного света явление фотолюминесценции.

Когерентные процессы. В отличие от некогерентных процессов в когерентных процессах нельзя разделить во времени акты взаимодействия с веществом волны накачки и вторичной волны — оба эти акта должны рассматриваться как единый процесс (напомню, что именно в этом и состоит специфика переходов, идущих через виртуальные уровни). Указанная специфика когерентных процессов проявляется в двух отношениях. Во-первых, невозможно обнаружить каких-либо изменений в состоянии вещества, взаимодействующего со световыми волнами. Во-вторых, можно в известном смысле говорить о непосредственном взаимодействии волны накачки и вторичной волны. Разумеется, взаимодействие волн осуществляется через «посредство» вещества и определяется его параметрами. Однако «участие» вещества, хотя и принципиально необходимо, имеет виртуальный характер, что позволяет говорить о как бы непосредственном взаимодействии световых волн.

Взаимодействие волн требует согласования волны накачки и вторичной волны по частоте, направлению распространения и поляризации. Для этого каждая из взаимодействующих волн, очевидно, должна характеризоваться определенной частотой, определенным направлением распространения и определенной поляризацией. Следовательно, в когерентных процессах должны

участвовать световые волны с высокой степенью когерентности. Можно сказать, что все когерентные процессы — это процессы преобразования когерентного света в когерентный свет.

Важность когерентности света в когерентных процессах может быть понята также на основе фотонных представлений. Поскольку для протекания когерентного процесса необходимо выполнение законов сохранения энергии и импульса для фотонов, то, следовательно, и первичные, и вторичные фотоны должны находиться в определенных состояниях — состояниях с определенной энергией и определенным импульсом. Ясно, что, чем больше фотонов находится в требуемых состояниях и чем меньше разброс фотонов по всевозможным иным состояниям, тем эффективнее будет протекать рассматриваемый когерентный процесс. Уменьшение же разброса фотонов по состояниям как раз и означает повышение степени когерентности излучения

Требование согласования параметров волны накачки и вторичной волны выступает в виде так называемого условия *волнового синхронизма*. На «фотонном языке» это условие выражает закон сохранения импульса для фотонов, участвующих в данном процессе. Условие волнового синхронизма играет важную роль в когерентных процессах — оно является необходимым условием эффективной передачи световой энергии от волны накачки ко вторичной волне.

4.4.2. Условие волнового синхронизма на примере генерации второй гармоники.

Рассматривая генерацию второй оптической гармоники, будем полагать, что направления волны накачки и вторичной волны совпадают и что, следовательно, все фотонные импульсы направлены в одну и ту же сторону. В этом случае векторное равенство можно заменить скалярным:

$$2 p_1 = p, \quad (4.1)$$

где p_1 и p — импульсы соответственно первичного и вторичного фотонов.

В случае среды в соотношении для импульса фотона надо ввести показатель преломления среды (зависящий от частоты):

$$p = \frac{h\nu}{c} n(\nu) \quad (4.2)$$

Используя (4.2), а также (3.1), перепишем (4.1) в следующем виде:

$$2 \frac{h\nu}{c} n(\nu) = \frac{h2\nu}{c} n(2\nu)$$

или после сокращения одинаковых множителей:

$$n(\nu) = n(2\nu) \quad (4.3)$$

Это и есть условие волнового синхронизма для процесса генерации второй гармоники. Согласно условию (2.3) для эффективной передачи световой энергии от волны накачки во вторичную волну (иначе говоря, во вторую гармонику) необходимо равенство показателей преломления для рассматриваемых световых волн.

В общем случае равенство (2.3), разумеется, не выполняется (из-за явления дисперсии света). Поэтому возникает важный в практическом отношении вопрос: каким образом можно обеспечить выполнение условия (2.3)? Удовлетворительный ответ на этот вопрос был найден не сразу. Ответ этот оказался весьма интересным — он основывался на использовании зависимости показателя преломления света от направления в кристалле.

Возьмем одноосный кристалл. На рисунке 6 представлены индикатрисы отрицательного одноосного кристалла, причем изображенные сплошными линиям соответствуют частоте ν , изображенные пунктиром частоте 2ν . В точках А и А1 происходит пересечение индикатрисы обыкновенной волны с частотой ν и индикатрисы необыкновенной волны с частотой 2ν .

Это означает, что если выбрать, например, направление АА (оно составляет некоторый угол α с направлением главной оси кристалла), то для световых волн, распространяющихся в данном направлении, будет выполняться условие:

$$n_o(\nu) = n_e(2\nu) \quad (4.4)$$

Это есть условие синхронизма для процесса генерации второй гармоники, в котором волна накачки является обыкновенной волной, а вторая гармоники — необыкновенной волной. Направление AA называют *направлением синхронизма* для рассматриваемого процесса.

Итак, что же надо сделать, чтобы осуществить процесс генерации второй оптической гармоники?

Для этого надо прежде всего взять одноосный кристалл с достаточно высоким значением нелинейной восприимчивости

χ_1 . (Это может быть, например, отрицательный одноосный кристалл дигидрофосфата калия KH_2PO_4 .) Кристалл должен быть вырезан в виде, например, прямоугольного параллелепипеда, ось которого совпадает с направлением синхронизма для данной частоты ν волны накачки. Для получения волны накачки надо использовать лазер. При этом необходимо, чтобы волна накачки была плоскополяризованной и чтобы ее плоскость поляризации была перпендикулярна к плоскости главного сечения нелинейного кристалла (плоскости, проходящей через главную ось кристалла и ось параллелепипеда). Такая поляризация волны накачки необходима для того, чтобы эта волна сыграла роль обыкновенной волны (плоскость поляризации обыкновенной волны как раз перпендикулярна к плоскости главного сечения).

Если эти условия будут выполнены, то при распространении в нелинейном кристалле волны накачки с частотой возникает дополнительная световая волна — вторая оптическая гармоника. Направление распространения этой волны будет совпадать с направлением волны накачки (впрочем, возможно также и обратное направление), частота будет вдвое больше, а плоскость поляризации будет совпадать с плоскостью главного сечения, что характерно для необыкновенной волны. При использовании нелинейных кристаллов длиной в несколько сантиметров удается перевести во вторую гармонику более 10% световой энергии волны накачки.



Рис 6

(4.4)

4.4.3. Классическое объяснение явления генерации второй гармоники.

До сих пор мы рассматривали генерацию второй оптической гармоники, опираясь на фотонные представления, т. е. имея в виду трехфотонный процесс, изображенный на рисунке 4. Однако нетрудно дать этому явлению также и чисто классическое объяснение.

Пусть на квадратично-нелинейную среду падает когерентная волна накачки с частотой ν :

$$E = E_0 \cos(2\pi\nu t) \quad (4.5)$$

Если бы среда была линейной, то её поляризация изменялась бы во времени точно так же, как волна накачки, т. е. с частотой ν .

$$P(t) = \chi_0 E_0 \cos(2\pi\nu t) \quad (4.6)$$

Но в нелинейной среде поляризация содержит, в частности, вторую гармонику — слагаемое — $\frac{1}{2} \chi_1 E_0^2 \cos(4\pi\nu t)$. Изменение поляризации с частотой 2ν может приводить, естественно, к

переизлучению света на частоте 2ν , т. е. к появлению вторичной световой волны с частотой 2ν .

Волна поляризации (в частности, вторая гармоника поляризации) распространяется в среде со скоростью волны накачки, т. е. со скоростью $c/n(\nu)$. Чтобы передача энергии от волны поляризации к переизлученной световой волне происходила эффективно, необходимо, чтобы скорости обеих волн совпадали. Так как скорость световой волны с частотой 2ν равна $c/n(2\nu)$, то для переизлучения света на частоте 2ν должно выполняться условие:

$$n(\nu) = n(2\nu) \quad (4.7)$$

которое, как уже известно, является условием волнового синхронизма.

Таково классическое объяснение нелинейно-оптического явления генерации второй гармоники. Заметим, что при таком объяснении роль среды как «посредника» во взаимодействии первичной и вторичной световых волн выступает весьма наглядно, так как «передача взаимодействия» идёт по «цепочке»: волна накачки — волна поляризации — вторичная световая волна.

Нетрудно представить себе процесс генерации третьей оптической гармоники. На «фотонном языке» это есть определенный четырехфотонный процесс — уничтожаются три фотона энергиями $h\nu$ и рождается один фотон с энергией $3h\nu$. На языке классических волновых представлений это есть результат переизлучения света, непосредственно вытекающий из факта существования третьей гармоники нелинейной поляризации среды.

Возможны также процессы генерации энергетических гармоник более высоких порядков — четвертой гармоники, пятой и т. Д.

Нелинейная поляризация среды позволяет осуществлять смешение частот. Пусть поляризация нелинейной среды описывается выражением:

$$P = \chi_0 E + \chi_1 E^2 \quad (4.8)$$

Предположим, что на среду падают две когерентные световые волны с разными частотами: $E_1 \cos(2\pi\nu_1 t)$ и $E_2 \cos(2\pi\nu_2 t)$. Если сумму этих волн

$$E = E_1 \cos(2\pi\nu_1 t) + E_2 \cos(2\pi\nu_2 t) \quad (4.9)$$

подставить в (4.8), то в выражении, которое получится для поляризации среды, будет присутствовать, в частности, слагаемое

$$P_{1,2} = 2\chi_1 E_1 E_2 \cos(2\pi\nu_1 t) \cos(2\pi\nu_2 t) \quad (4.10)$$

Воспользовавшись соотношением:

$$2 \cos(\alpha) \cos(\beta) = \cos(\alpha + \beta) + \cos(\alpha - \beta),$$

преобразуем (4.8) к следующему виду:

$$P_{1,2} = \chi_1 E_1 E_2 \cos[2\pi(\nu_1 + \nu_2)t] + \chi_1 E_1 E_2 \cos[2\pi(\nu_1 - \nu_2)t] \quad (4.11)$$

Таким образом мы видим возможность переизлучения света на частотах $(\nu_1 + \nu_2)$ и $(\nu_1 - \nu_2)$. Таким образом, нелинейная поляризация среды позволяет осуществлять сложение и вычитание частот световых волн. В рассматриваемом здесь случае взаимодействие волн с частотами ν_1 и ν_2 может приводить, как мы видим, к появлению вторичных световых волн на частотах $(\nu_1 + \nu_2)$ и $(\nu_1 - \nu_2)$.

Выражение (4.8) является наиболее простым выражением для поляризации нелинейной среды — нелинейная поляризация описывается членом, квадратичным по напряженности. В более общем случае в выражении для поляризации могут присутствовать также и члены с E^3 , E^4 и т. Д. Учет таких членов приводит к тому, что при подстановке (4.9) в выражение для поляризации появляются слагаемые с частотами: $\nu_{nm} = n\nu_1 + m\nu_2$ где n и m — целые числа. Это означает, что, кроме сложения и вычитания, возможны и другие варианты смешения частот.

4.5 Поляризационные «отклики» среды (материала)

Итак, причиной любого нелинейного явления служит, в конечном счете, какое-то изменение среды, наблюдаемое при прохождении через среду достаточно мощного оптического излучения. Это изменение свойств среды следует рассматривать как определенный отклик среды на световую волну.

Природа «отклика» может быть разной. Обычно различают два типа «откликов»: поляризационный «отклик» и «отклик заселенности уровней».

Поляризационный «отклик» связан с появлением нелинейной поляризации среды под воздействием исходной световой волны. При этом внутри среды происходят процессы переориентации электрических дипольных моментов, возникают также наведенные дипольные

моменты. «Инерциальность» поляризационного отклика характеризуется малым промежутком времени – до 10^{-13} с.

«Отклик заселенности уровней» имеет совсем иную природу. Он связан с изменением заселенностей энергетических уровней частиц среды, происходящим под воздействием световой волны, распространяющейся в среде. «Инерционность» отклика характеризуется временем, превышающим 10^{-8} с.

4.6 Теоретические основы функционирования дифракционных решеток

В настоящей главе дифракционная решетка изучается как многолучевой спектральный прибор, обладающий высоким разрешением. Простейшей решеткой является амплитудная дифракционная решетка, состоящая из периодической последовательности щелей, разделенных непрозрачными промежутками (до нескольких сотен тысяч). В решетке осуществляется многолучевая интерференция когерентных пучков света, исходящих от различных щелей (рис. 3.1).

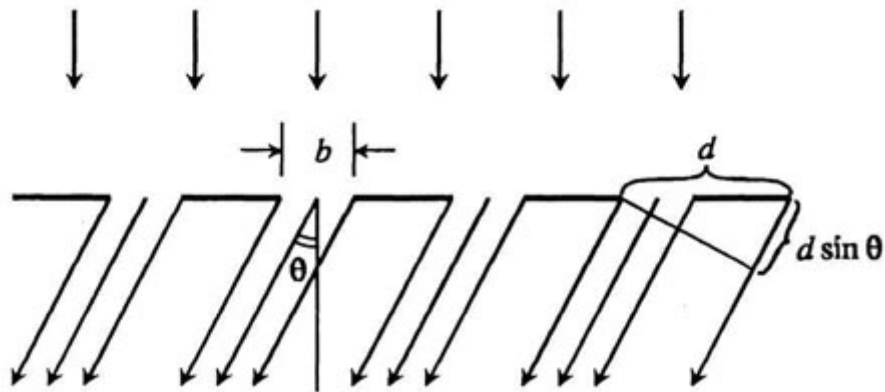


Рисунок 54
Дифракционная решетка.

Решетка освещается параллельным пучком света и наблюдается фраунгоферова дифракционная картина. Наблюдение проводится либо на достаточно удаленном экране, либо в фокальной плоскости линзы, поставленной на пути света за решеткой. Расчет дифракционной картины при дифракции света на амплитудной решетке, выполненный на основе принципа Гюйгенса–Френеля, приводит к следующему выражению для распределения интенсивности $I(\theta)$.

$$I(\theta) = I_1(\theta) \left[\frac{\sin \frac{N\delta}{2}}{\sin \frac{\delta}{2}} \right]^2, \tag{3.1}$$

где $I_1(\theta)$ – распределение интенсивности при дифракции света на одиночной щели

$$I_1(\theta) = I_0 \left[\frac{\sin \frac{kb \sin \theta}{2}}{\frac{kb \sin \theta}{2}} \right]^2. \tag{3.2}$$

В выражениях (3.1) и (3.2) δ – фазовый сдвиг между колебаниями от соседних щелей решетки, равный $k d \sin \theta$, где d – период решетки; через b обозначена ширина щелей, через N – полное число периодов решетки (число щелей). Общий вид распределения (3.1) показан на рис. 3.2

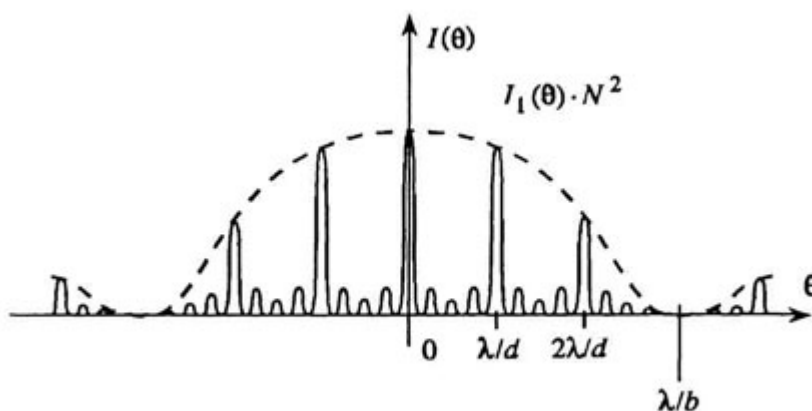


Рисунок 55

Распределение интенсивности при дифракции света на амплитудной решетке.

Наиболее интересным в картине дифракции света на решетке является наличие узких интенсивных главных максимумов. Их положение определяется условием:

$$d \sin \theta = m \lambda \quad (3.3)$$

Целое число m называют порядком дифракционного максимума (или порядком спектра). Формула (3.3) имеет простой физический смысл. В точке наблюдения, соответствующей условию (3.3), колебания от всех щелей решетки складываются синфазно. На векторной диаграмме эта ситуация изображается цепочкой коллинеарных векторов, каждый из которых представляет вклад в результирующее колебание от отдельной щели решетки (рис. 3.3а). Амплитуда суммарного колебания равна $N A_1$, где A_1 – амплитуда колебания в точке наблюдения от отдельной щели решетки.

$$I = N^2 I_1(\theta)$$

Таким образом, в главном максимуме интенсивность суммарного колебания $I = N^2 I_1(\theta)$. Рассмотрим теперь точку наблюдения, для которой векторная диаграмма имеет вид рис. 3.3б. Амплитуда суммарного колебания в этой точке равна нулю. Разность фаз между первым и N -ым векторами изменилась на 2π , а, следовательно, между соседними векторами – на $2\pi / N$. Соответствующая разность хода изменилась на λ / N .

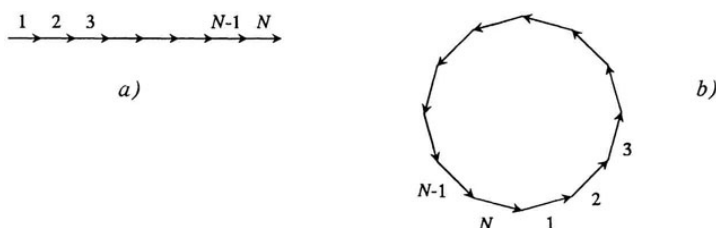


Рисунок 56

Векторная диаграмма колебаний в главном максимуме (а) и в соседнем минимуме (б).

Эта точка наблюдения соответствует ближайшему (по отношению к главному максимуму) нулю функции $I(\theta)$.

Полагая дифракционные углы достаточно малыми, найдем для угловой полуширины главного максимума:

$$\Delta\theta \approx \frac{\lambda}{Nd} = \frac{\lambda}{D} \quad (3.4)$$

Формула (3.4) находится в согласии с общими закономерностями фраунгоферовой дифракции. Как видно из (3.4), угловая полуширина главного максимума определяется длиной волны λ и общим размером решетки $D = Nd$.

4.6.1. Спектральный метод

При рассмотрении интерференции неидеально монохроматических волн весьма эффективным оказывается **спектральный метод**.

Мы можем рассматривать реальный процесс вида (1.8) как совокупность большого числа монохроматических компонент (теорема Фурье), имеющих разные частоты. Пусть свет от источника, используемого в интерференционном эксперименте, разлагается с помощью какого-либо спектрального прибора (призма, дифракционная решетка) на множество монохроматических пучков.

Поскольку исходный процесс не является периодическим, в результате мы получим «сплошной» спектр, то есть набор монохроматических компонент, частоты которых непрерывно заполняют некоторый спектральный диапазон. Интенсивность света в некотором (достаточно малом) частотном

интервале $d\omega$ может быть записана в виде $J(\omega)d\omega$, где $J(\omega)$ – так называемая спектральная интенсивность. Сумма интенсивностей всех монохроматических пучков равна, очевидно, интенсивности света, излучаемого источником:

$$I = \int_0^{\infty} J(\omega) d\omega.$$

Смысл этого соотношения состоит в том, что оно устанавливает закон аддитивного сложения интенсивностей спектральных компонент, из которого следует, что спектральные компоненты различных частот некогерентны между собой. Мы можем рассчитать теперь интерференционную картину, которая получится при использовании данного источника. Распределение интенсивности, возникающее в любой интерференционной схеме, есть результат наложения большого числа независимых интерференционных картин, полученных в монохроматическом свете (для каждой из спектральных компонент).

Рассмотрим монохроматическую компоненту частоты ω и интенсивности $J(\omega)d\omega$. Из теории интерференции монохроматических волн (формула (1.5)) вытекает соотношение (мы предполагаем здесь и далее, что интерферирующие пучки имеют одинаковые интенсивности)

$$dI = 2J(\omega)d\omega \left[1 + \cos \frac{\omega}{c} \Delta \right]. \quad (1.14)$$

Δ
 где Δ – разность хода, характеризующая положение точки наблюдения. После интегрирования по всему спектру получим

$$dI = 2 \int_0^{\infty} J(\omega) \left[1 + \cos \frac{\omega}{c} \Delta \right] d\omega. \quad (1.15)$$

Это соотношение является универсальным. Оно описывает распределение интенсивности $I(\Delta)$ в интерференционной картине при использовании некогерентного источника света.

4.6.2. Источник с «прямоугольным» спектром

Рассмотрим в качестве примера источник с «прямоугольным» спектральным распределением (рис. 1.6).

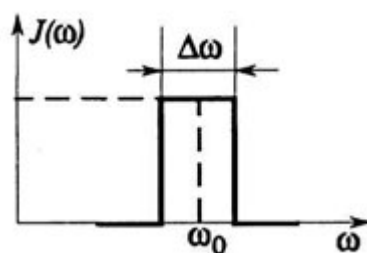


Рисунок 57
 «Прямоугольное» спектральное распределение.

Используя (1.15), найдем

$$I = 2 \int_0^{\infty} J(\omega) \left[1 + \cos \frac{\omega}{c} \Delta \right] d\omega = 2I_0 \left[1 + \left[\frac{\sin \frac{\Delta\omega}{2c} \Delta}{\frac{\Delta\omega}{2c} \Delta} \right] \cos \frac{\omega_0}{c} \Delta \right]. \quad (1.16)$$

$\Delta\omega \ll \omega_0$

Функция $I(\Delta)$ изображена на рис. 1.7. В случае $\Delta\omega \ll \omega_0$ множитель в квадратных скобках в (1.16) изменяется существенно медленнее, чем $\cos \frac{\omega_0}{c} \Delta$.

Этот медленно меняющийся множитель определяет огибающую $I(\Delta)$, изображенную на рис. 1.7 пунктиром. При больших значениях Δ интерференционные полосы исчезают. Мы говорили ранее, что это происходит вследствие потери когерентности из-за большой разности хода.

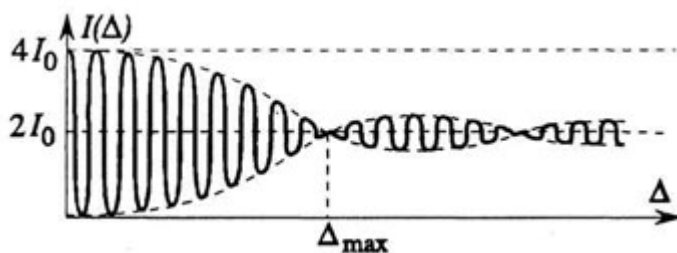


Рисунок 58
 Интерференция волн с «прямоугольным» спектром.

Теперь, с точки зрения спектрального метода, мы должны будем объяснить это явление как результат наложения большого числа интерференционных картин вида (1.14), полученных в монохроматическом свете. Существенную роль играет то обстоятельство, что интерференционные картины, образованные различными спектральными компонентами, имеют различный пространственный масштаб (ширину полос).

Видность интерференционной картины, описываемой соотношением (1.16), зависит от разности хода Δ

$$V(\Delta) = \frac{\sin \frac{\Delta \omega}{2c} \Delta}{\frac{\Delta \omega}{2c} \Delta} \quad (1.17)$$

Эта зависимость изображена на рис. 1.8.

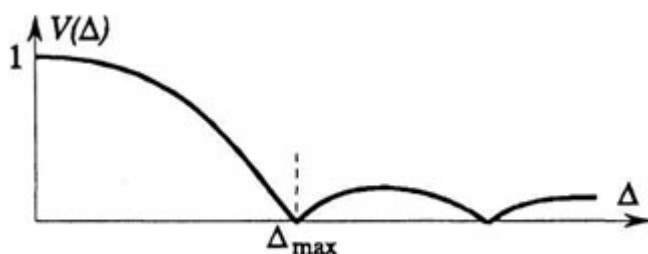


Рисунок 59
Видность интерференционной картины для источника с «прямоугольным» спектром.

Если оценивать Δ_{max} по первому нулю функции $V(\Delta)$, то нетрудно убедиться в справедливости (1.12) и (1.13).

Необходимо сделать одно существенное замечание. Задание спектрального распределения в виде функции частоты $J(\omega)$ соответствует идее Фурье-преобразования, и поэтому в теории предпочтительно в качестве переменной использовать частоту ω . Разумеется, можно было бы в рассмотренном выше примере задать «прямоугольное» распределение по длинам волн $J(\lambda)$. В этом случае точный вид функции $V(\Delta)$ несколько отличался бы от (1.17). Однако все качественные выводы (1.12) и (1.13) остаются справедливыми.

4.6.3. Источник с двумя близкими спектральными линиями.

Рис. 1.9 иллюстрирует изменение контраста наблюдаемых полос при наложении интерференционных картин для двух монохроматических компонент (λ_1 и λ_2) равной интенсивности.

В этом случае результирующая картина периодически (по Δ) размывается и восстанавливается – наблюдается характерная картина **биений**. Такие картины получаются на опыте, если источник света

имеет близкие спектральные линии (например, желтый дублет Na: $\lambda_1 = 589.0$ нм и $\lambda_2 = 589.6$ нм). Легко показать, что размывания наступают при условии

$$\Delta_m = \left(m - \frac{1}{2}\right) \frac{\lambda_0^2}{\Delta\lambda}, \quad (m = 1, 2, \dots), \quad (1.18)$$

где λ_0 – среднее значение длины волны двух спектральных компонент.

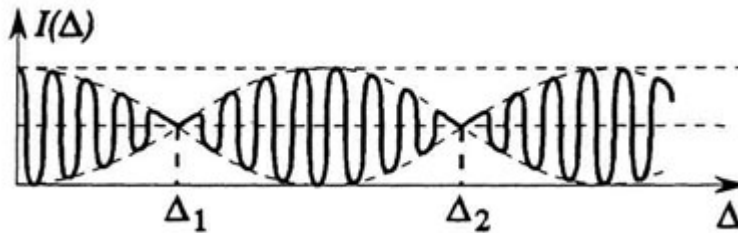


Рисунок 60
Наложение двух интерференционных картин с различными пространственными периодами.

4.7 Принцип построения устройства Chip Fostac®

Устройства типа Chip Fostac® состоят из набора нитей из углепластика имеющих специальное переплетение.

Это переплетение соответствует условиям возникновения эффектов интерференции, поляризации и дифракции электромагнитных волн при прохождении через материал устройства Chip Fostac®. Для простоты изложения принимаем, что ЭМ излучение имеет вид прямоугольной волны. Таким образом, учитывая вышеизложенные теоретические обоснования (главы 4.1 – 4.6), получаем следующую картину модификации ЭМ волн в материале Chip Fostac®.

При прохождении стохастических ЭМ волн через первый слой материала возникают явления поляризации этих волн в плоскости пересечения переплетений (см. Рис. 61).

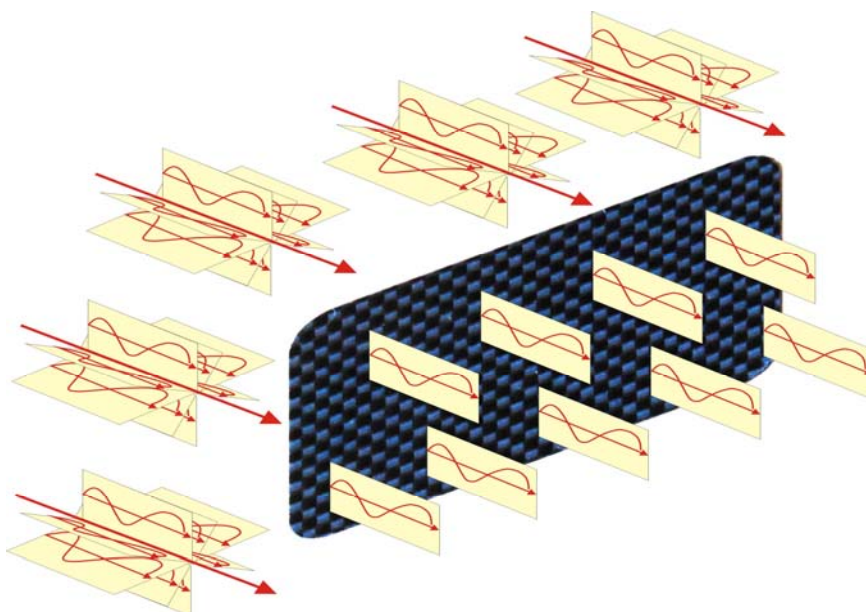


Рис. 61 Поляризация электромагнитных волн при прохождении

через первый слой материала Chip Fostac®

При прохождении электромагнитных волн через второй и последующие слои материала Chip Fostac® происходит явление интерференции с преломлением и отражением модифицированных ЭМ волн в каждом последующем слое, в соответствии с 4.6.2 (см. Рис 62)

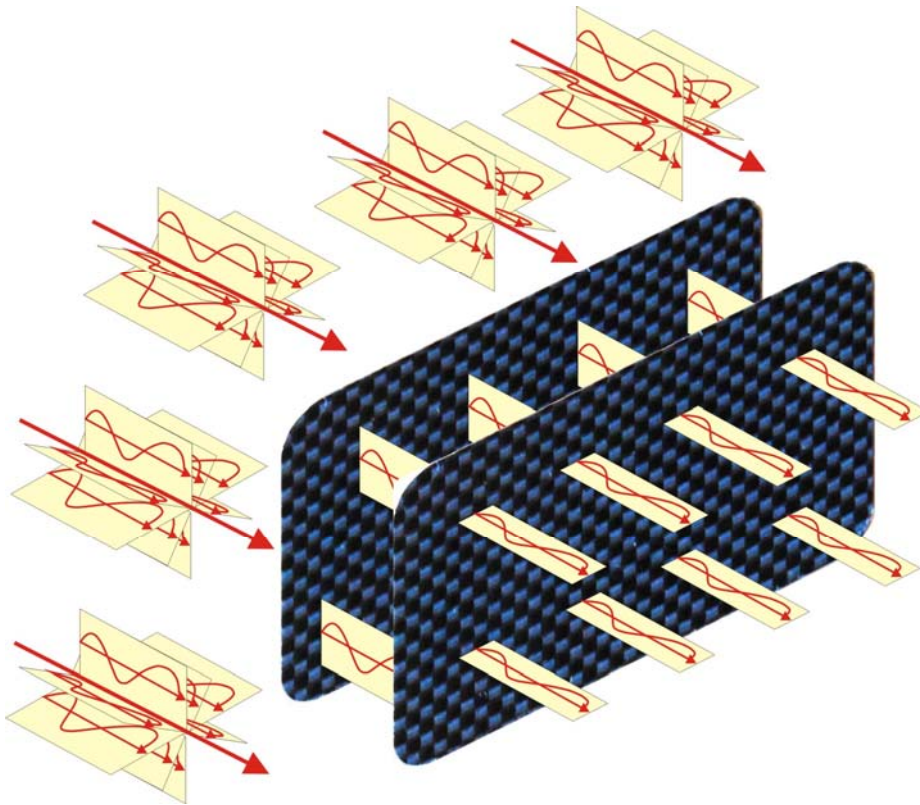


Рис. 62 Интерференция электромагнитных волн при прохождении через второй и последующие слои материала Chip Fostac®

В соответствии с формулами 1.16 и 1.17 пункта 4.6.2 средневзвешенное расчетное затухание электромагнитного поля на выходе из материала одного устройства типа Chip Fostac® получаем около **60,5%**.

Полная расчетная амплитудно-частотная характеристика затухания электромагнитных волн в материале одного устройства типа Chip Fostac® представлена на Рис.63.

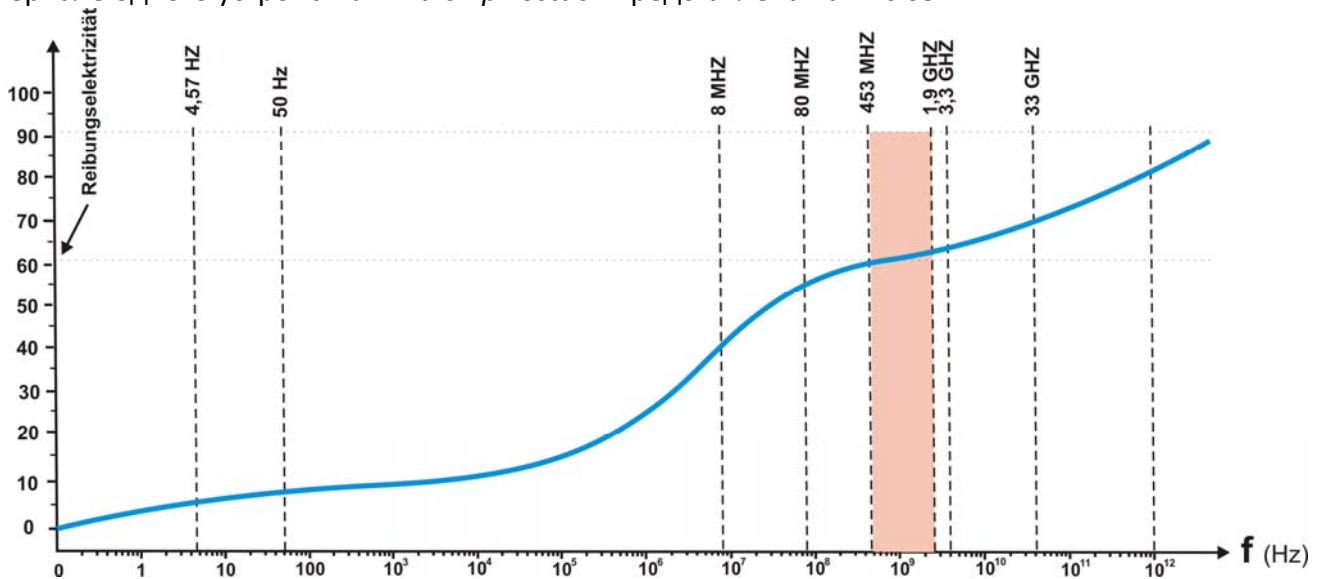


Рис. 63 Расчетная амплитудно-частотная характеристика затухания ЭМ волн в одном устройстве Chip Fostac®

При прохождении электромагнитных волн через второе устройство Chip Fostac® происходит суммирование явлений интерференции с преломлением и отражением модифицированных ЭМ волн в каждом последующем слое, в соответствии с пунктом 4.6. Кроме того, в последнем слое второго устройства Chip Fostac® происходит модификация ЭМ волн по типу дифракционной решетки. Основным условием максимальной компенсации электромагнитных волн во втором устройстве является поворот этого устройства на 90° относительно поперечной оси первого устройства. Это необходимо для выполнения условия суммарного гашения поляризованных ЭМ волн в первом и втором слоях материала устройства типа Chip Fostac®. Этот эффект обусловлен тем, что происходит последовательная модификация электромагнитных волн в предыдущих слоях материала устройства Chip Fostac® в соответствии с вышеизложенными процессами (см. Рис 64).

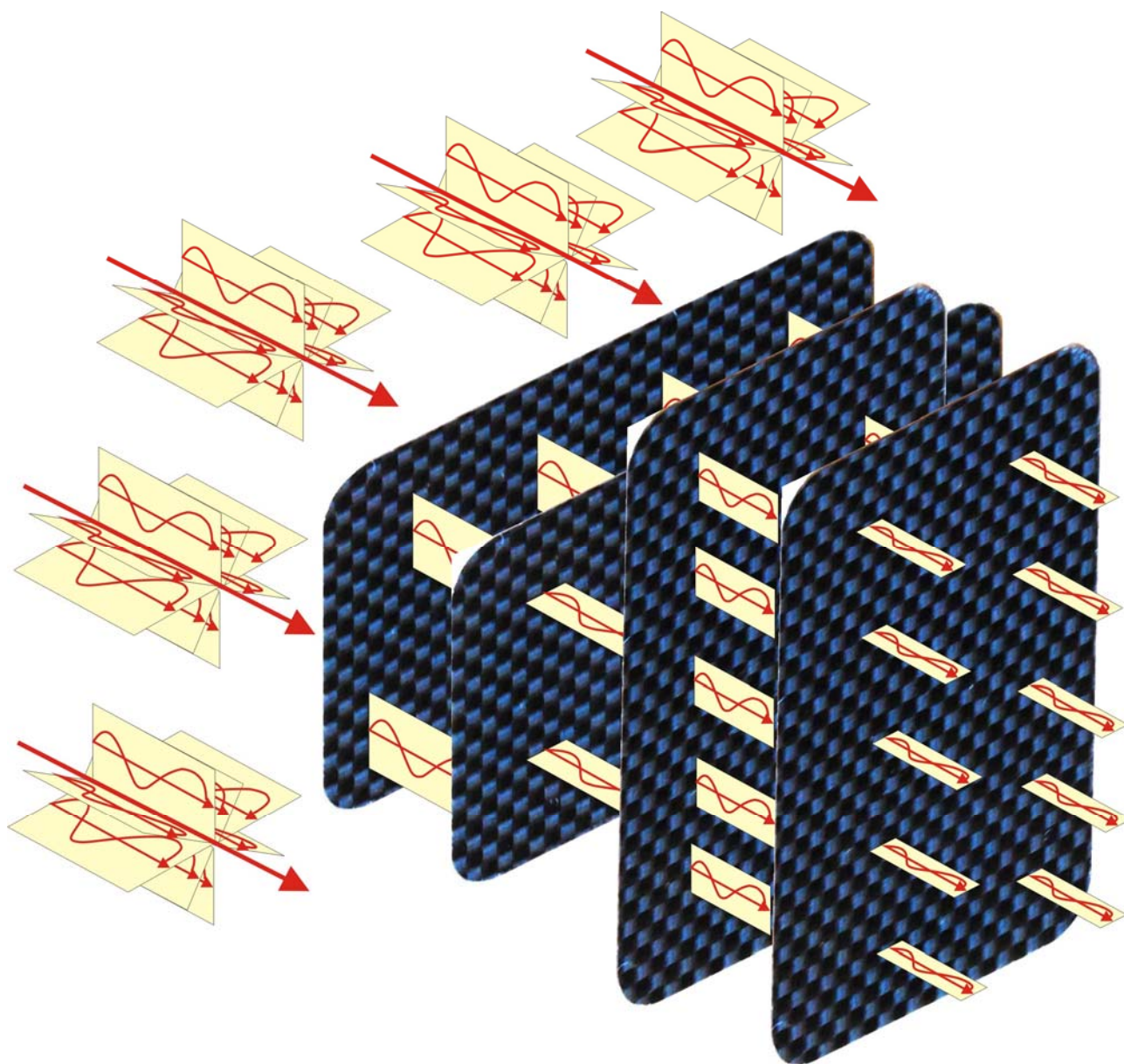


Рис. 42 Поляризация и интерференция электромагнитных волн при прохождении через второй Chip Fostac®

В результате получаем полное средневзвешенное расчетное затухание электромагнитного поля на выходе из материала двух устройств типа Chip Fostac® **97,1025 %** (см. Рис 65).

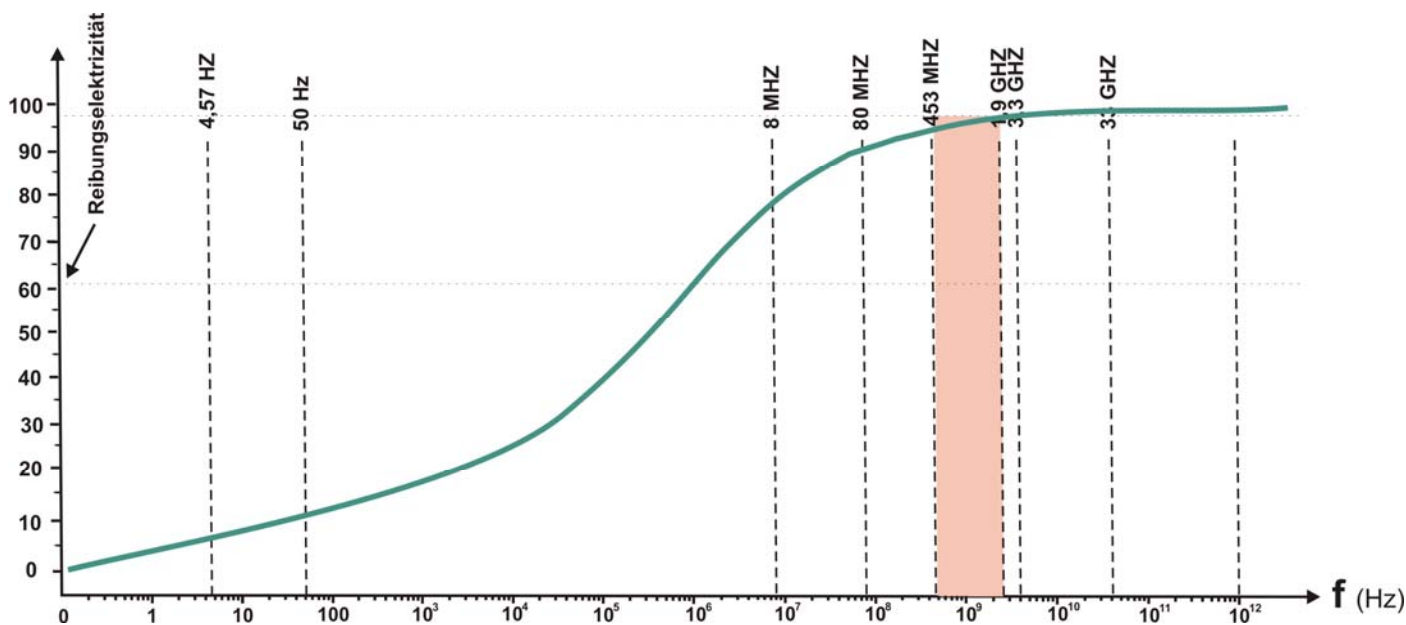


Рис. 65 Суммарная расчетная амплитудно-частотная характеристика затухания ЭМ волн в двух устройствах Chip Fostac®

В результате проведения измерений затухания потока электромагнитного поля, с помощью измерительных приборов (с. Главу 2) были получены следующие результаты, которые представлены на Рис.66 и 67.

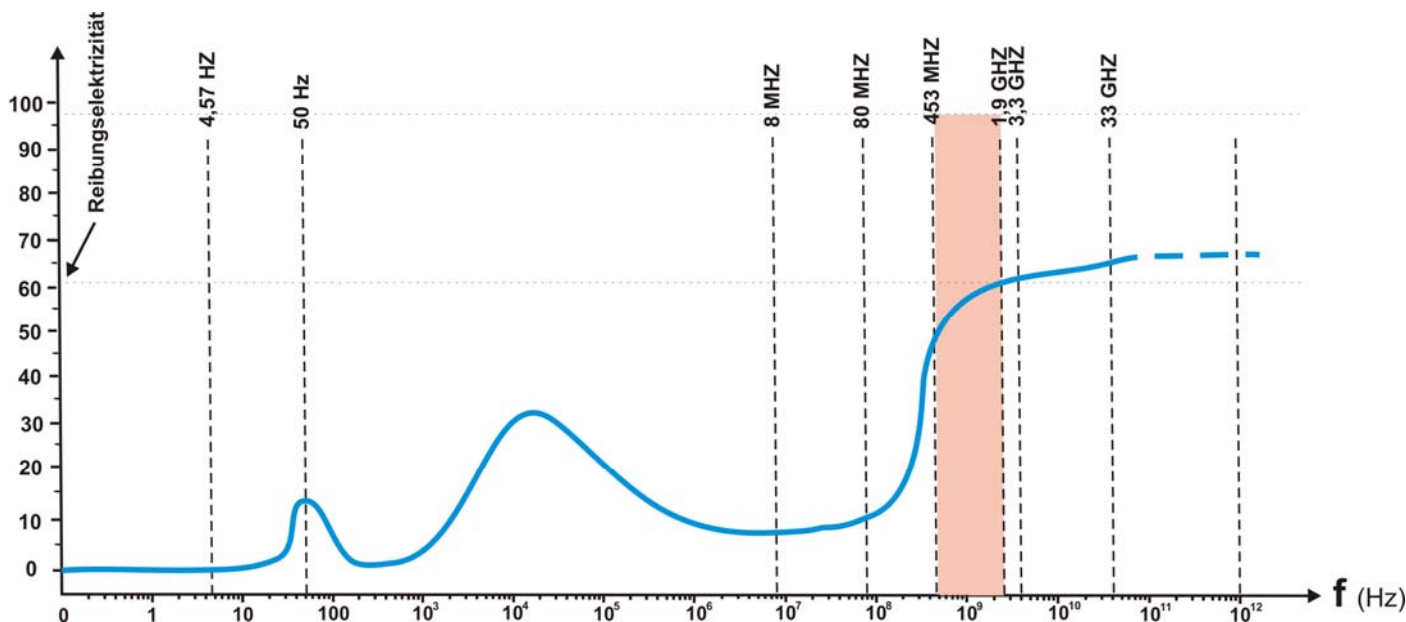


Рис. 66 Измеренная амплитудно-частотная характеристика затухания ЭМ волн в одном устройстве Chip Fostac®

Обработка результатов измерений для **одного устройства** Chip Fostac® показала снижение потока ЭМ поля в диапазоне частот работы мобильных телефонов на **51.2%** по сравнению с измерениями, проводимыми без защитных устройств. Средневзвешенный показатель уменьшения потока составляет **32,4%**.

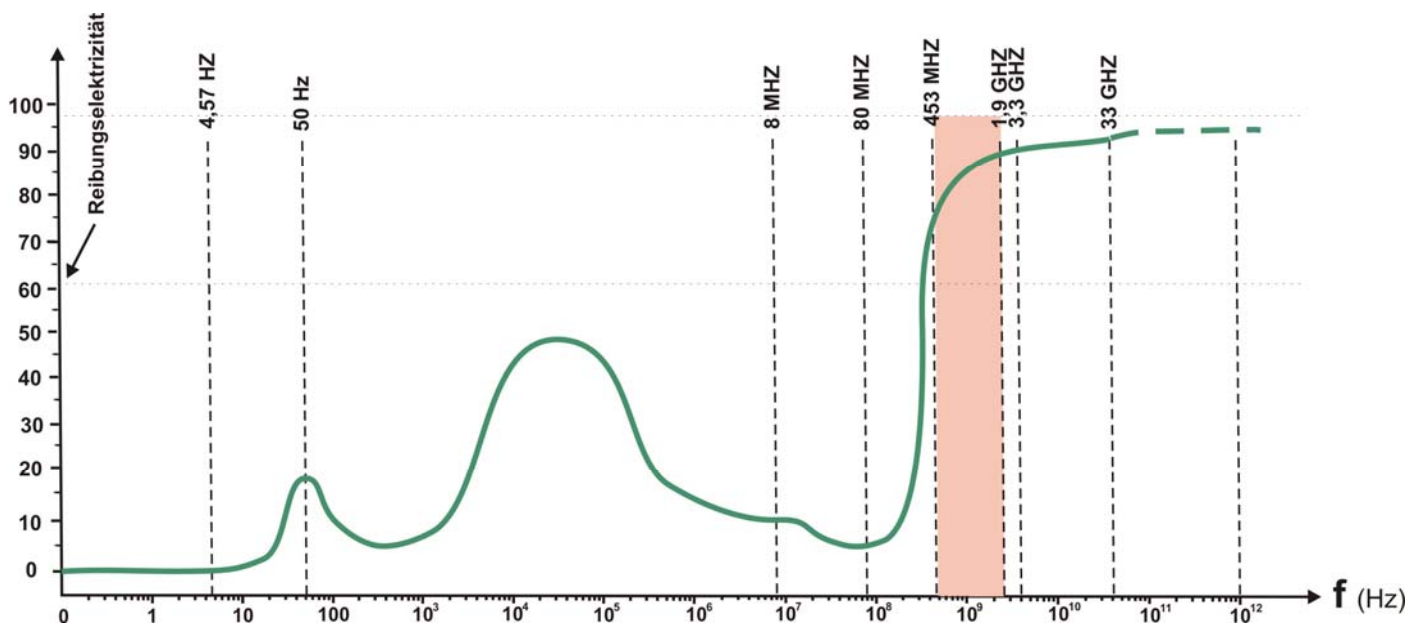


Рис. 67 Суммарная измеренная амплитудно-частотная характеристика затухания ЭМ волн в двух устройствах Chip Fostac®

Обработка результатов измерений для **двух устройств** Chip Fostac® показала снижение потока ЭМ поля в диапазоне частот работы мобильных телефонов на **81.5%** по сравнению с измерениями, проводимыми без защитных устройств. Средневзвешенный показатель уменьшения потока вредного электромагнитного излучения составляет **52,8%**.

Выводы

По результатам выполненных измерений была проведена статистическая обработка полученных данных в соответствии со следующей методикой расчетов.

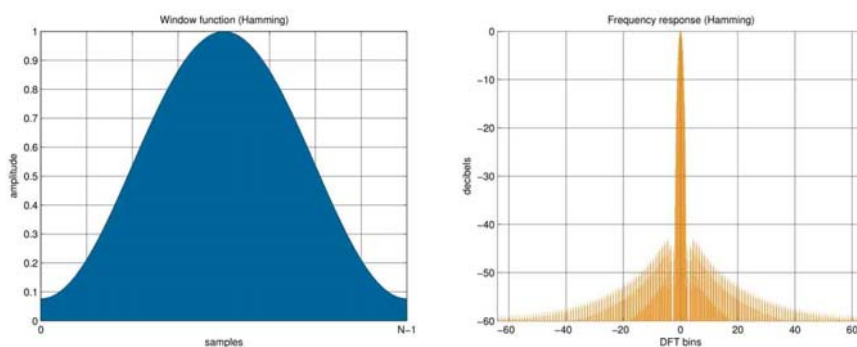
Средневзвешенные коэффициенты эффективности применения защитных устройств от электромагнитных излучений типа Chip Fostac[®] рассчитываются с применением распределения Фурье для среднеквадратичных отклонений абсолютных динамических значений амплитудно-частотных характеристик этих устройств.

$$f(x) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \left(a_n \cos \frac{n\pi x}{L} + b_n \sin \frac{n\pi x}{L} \right)$$

Где:

- a_0 – начальный уровень эффективности защитных устройств,
- последующие коэффициенты ($a_n, b_n \dots m_n$) представляют собой среднеквадратичные отклонения эффективности в последовательных негармонических диапазонах частот, выбранных по методу случайных вариаций.

Эти коэффициенты можно представить в виде функций Хемминга:



Все расчеты выполнялись в относительных единицах изменения плотности потока электромагнитного поля с применением защитных устройств, по отношению к результатам, полученным при измерениях, проведенных без применения защитных устройств.

$$\Delta \text{ППЭ} = \frac{[\text{ППЭ}_{\text{с Chip Fostac}}]}{[\text{ППЭ}_{\text{без Chip Fostac}}]} = K_n \{f(s)\}$$

где s – среднеквадратичное отклонения амплитудно-частотной характеристики устройства Chip Fostac[®].

Расчеты проводились без учета динамики изменения распространения электромагнитных волн в воздухе и тканях организма человека (без учета диэлектрической и магнитной проводимостей тканей головного мозга человека), принимая допущение, что среднеквадратичные отклонения абсолютных значений амплитудно-частотных характеристик защитных устройств, являются величиной постоянной:

$$K_n \{f(s)\} = \text{const}$$

Пики эффективности устройств типа Chip Fostac[®] приходятся на частоты, приведенные в Таблице 23.

ТАБЛИЦА 23

Пиковые значения эффективности применения устройств типа Chip Fostac[®]

Частота электромагнитного излучения, Hz		Эффективность с применением одного Chip Fostac [®] , %	Эффективность с применением двух Chip Fostac [®] , %
50		13,5	18,7
31 200	31,2 kHz	33,6	48,2
10 400 000	10,4 MHz	7,6	11,2
67 200 000	67,2 MHz	9,2	4,1
453 000 000	453 MHz	48,3	74,2
1 900 000 000	1,90 GHz	61,7	90,1
31 700 000 000	31,7 GHz	64,2	92,7

Для одного устройства Chip Fostac[®] снижение потока ЭМ поля в диапазоне частот работы мобильных телефонов составляет **51.2%** по сравнению с измерениями, проводимыми без защитных устройств. Средневзвешенный показатель уменьшения потока ЭМ поля во всем диапазоне электромагнитных излучений составляет **32,4%**.

Для двух сопряженных устройств Chip Fostac[®] снижение потока ЭМ поля в диапазоне частот работы мобильных телефонов составляет **81.5%** по сравнению с измерениями, проводимыми без защитных устройств. Средневзвешенный показатель уменьшения потока ЭМ поля во всем диапазоне электромагнитных излучений составляет **52,8%**.

*Проведенная статистическая обработка данных измерений позволяет утверждать, что применение защитных устройств типа **Chip Fostac[®]** позволяет эффективно снизить влияние электромагнитных полей в диапазоне частот работы мобильных телефонов всех стандартов связи (стандартов NMT-450i, GSM-800, GSM-900, GSM-1800, GSM-1900, CDMA-2000, 3G - 2200 МГц), и существенно уменьшить вредное влияние электромагнитных полей во всем диапазоне частот.*