

ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ ЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ

Лектор – д. т. н., профессор кафедры радиотехнической
электроники ЛЭТИ *Андрей Дмитриевич Григорьев*

Санкт-Петербург
2016

Предмет изучения

Электромагнитная совместимость (ЭМС)
(*electromagnetic compatibility, EMC*)

радиоэлектронного средства (РЭС) – это его способность функционировать совместно и одновременно с другими техническими средствами в условиях возможного влияния непреднамеренных электромагнитных помех (НЭМП), не создавая при этом недопустимых помех другим средствам.

Качество функционирования и степень допустимых помех определяется международными и российскими стандартами.



Разделы ЭМС

- Источники помех.
 - Рецепторы помех.
 - Воздействие помех на рецепторы.
 - Способы уменьшения влияния помех на рецепторы.
 - Методы расчета параметров ЭМС.
 - Целостность мощности.
 - Целостность сигналов.
- 



Содержание программы

1. Основные определения ЭМС;
2. Международные и российские стандарты;
Уровни проблем ЭМС;
3. Электромагнитные помехи;
4. Основы теории экранирования;
5. Защитные покрытия.

Литература

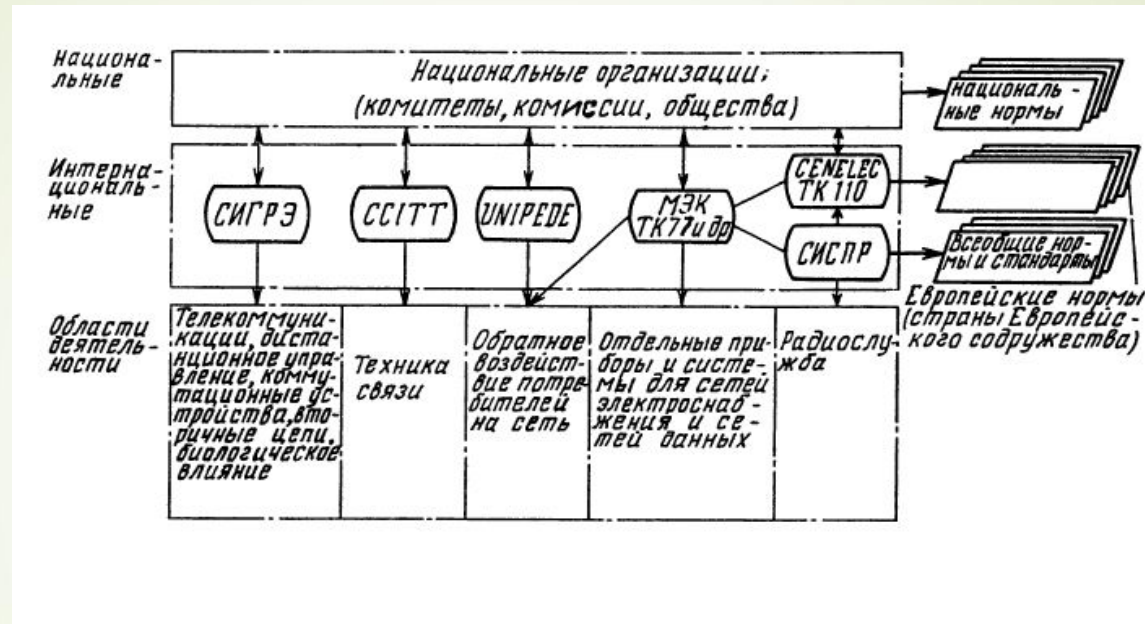
1. Григорьев А. Д. Электродинамика и микроволновая техника. Учеб. Для вузов. СПб.: Лань, 2007, 704 с.
2. Малков, Н.А. Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств. : учеб. пособие / Н.А. Малков, А.П. Пудовкин. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2007.
3. Князев, А.Д. Элементы теории и практики электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств. – М. : Радио и связь, 1984. – 336 с.
4. Уайт, Д. Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств и непреднамеренные помехи / Д. Уайт; пер. с англ. – М. : Советское радио, 1977. – Вып. 1.-3. www.biblem.narod.ru, 2007.
5. Михайлов, А.С. Справочник по расчету электромагнитных экранов / А.С. Михайлов. – М. : Энергоатом, 1988. – 244 с.
6. Уильямс Т. ЭМС для разработчиков продукции. М.: Технология, 2003.
7. САНПИН 2.2.4.1191–03 Электромагнитные поля в производственных условиях. Постановление о введении в действие санитарных правил и нормативов.
8. http://www.ru.sgs.com/ru/electromagnetic_compatibility_directive-hm?serviceld=56536&lobld=56539
9. Grigoryev A. D., Salimov R. V., Tikhonov R. I. Multiple-cell lumped element and port models for the vector finite element method. – Electromagnetics, V. 28, No 1, pp 18-26.



Литература (продолжение)

10. Хабибер Э. Электромагнитная совместимость. Основы ее обеспечения в технике /Пер. с немецкого. М.: Энергоатомиздат, 1995, 304 с.
11. <http://cae-expert.ru/product/ansys-hffs>
12. K. L. Kaiser. Electromagnetic Compatibility Handbook. CRC Press, 2004, p. 413.
<http://www.kattering.edu/~kkaiser/ech.html>
13. Григорьев А.Д. Методы вычислительной электродинамики. М.:Физматлит, 2012. 430 с.

Организации, занимающиеся нормированием ЭМС



СИГРЭ – Международная конференция по большим энергетическим системам.

ССИТТ – международная совещательная комиссия телеграфной и телефонной службы.

UNPEDE – международный союз по производству и распределению электроэнергии.

МЭК – международная электротехническая комиссия

СИСПР – специальный международный комитет по радиопомехам

Европейские Стандарты

- В Европе стандарты, связанные с электротехникой, разрабатываются, главным образом, **СЕНЕЛЕК (CENELEC)** и **ЕТСИ (ETSI)**.
- **СЕНЕЛЕК**– Европейский Комитет по стандартизации в области электротехники. Организация, состоящая из Национальных Электротехнических Комитетов государств-членов ЕС. Это самая значительная организация в ЕС в области стандартизации э/м полей.
- **ЕТСИ**– Европейский Институт по стандартизации в области телекоммуникаций (ETSI)
- **СЕНЕЛЕК** в основном разрабатывает стандарты на электротехнику и электронику - европейские стандарты (EN), в то время как ЕТСИ фокусирует свое внимание на радио и телекоммуникационных стандартах - европейские телекоммуникационные стандарты (ETS). Следует отметить, что все стандарты СЕНЕЛЕК были первоначально разработаны в МЭК (включая **СИСПР**).



Стандарты США разработаны ANSI (American National Standard Institute)

<http://www.standards.ru/amer/class/181110.aspx>

Код класса	Наименование класса	Количество стандартов
33.100.01	Электромагнитная совместимость в целом	94
33.100.10	Излучение	74
33.100.20	Защищенность	45
33.100.99	Электромагнитная совместимость, прочие аспекты	4

Перечень главных европейских стандартов (EN) по ЭМС:

- **EN 55022** Электромагнитная совместимость. Радиопомехи от оборудования информационных технологий. Нормы и методы измерений;
- **EN 55011** Оборудование промышленное, научно-исследовательское и медицинское. Характеристики радиочастотных помех. Предельные значения и методы измерения характеристик радиопомех;
- **EN 55015** Предельные значения и методы измерений характеристик радиопомех электроосветительного и аналогичного оборудования;
- **EN 55014-1** Электромагнитная совместимость. Требования к бытовым электроприборам, электроинструментам и аналогичной электроаппаратуре;
- **EN 55014-2** Электромагнитная совместимость. Требования к бытовым электроприборам, электроинструментам и аналогичной электроаппаратуре. Часть 2. Помехостойкость
- **EN 61326-1** Электрооборудование для измерения, управления и лабораторного использования. Требования к электромагнитной совместимости. Часть 1. Общие требования
- **EN 61000-6-1** Электромагнитная совместимость (ЭМС). Часть 6-1. Методы испытаний и измерений. Испытание на воздействие излучения, радиочастот и электромагнитных полей для жилых районов, районов с коммерческими предприятиями и районов с предприятиями легкой промышленности
- **EN 61000-6-2** Электромагнитная совместимость. Часть 6-2. Общие стандарты. Помехоустойчивость к промышленной окружающей среде;
- **EN 61000-6-3** Электромагнитная совместимость. Часть 6-3. Общие стандарты. Стандарт на излучение для жилых районов, районов с коммерческими предприятиями и районов с предприятиями легкой промышленности;
- **EN 61000-6-4** Электромагнитная совместимость. Часть 6-4. Общие стандарты. Стандарт на излучение к промышленной окружающей среде;
- **EN 61000-3-2** Электромагнитная совместимость. Часть 3-2. Пределы. Пределы для выбросов синусоидального тока [оборудование с входным током не более 16 А на фазу];
- **EN 61000-3-3** Электромагнитная совместимость. Часть 3-3. Пределы. Ограничение изменений напряжения, флуктуации и мерцания напряжения в распределительных сетях.

Российские регулирующие документы

1. Федеральный закон от 27 декабря 2002 г. № 184-ФЗ
О техническом регулировании
(с изменениями от 8 августа 2005 г., 1 мая, 1 декабря 2007г., 23 июля 2008 г., 18 июля, 23 ноября, 30 декабря 2009 г.)
Принят Государственной Думой 15 декабря 2002 года
Одобен Советом Федерации 18 декабря 2002 года –
требования к техническим регламентам.
2. ГОСТ Р 50397-2011 (МЭК 60050-161:1990). Совместимость
технических средств электромагнитная. Термины и
определения.
3. ГОСТ в области ЭМС, гармонизированные с международными
стандартами – более 50 ГОСТ.
4. ГОСТ в области ЭМС, не гармонизированные с
международными стандартами – более 30 ГОСТ.

Основные понятия и определения

Основным государственным стандартом в области терминологии электромагнитной совместимости технических средств является ГОСТ Р 50397-92, в котором содержится официальное определение терминов в области электромагнитной совместимости.

Электромагнитная обстановка (ЭМО) (*electromagnetic environment*) — совокупность реальных электромагнитных явлений, существующих в данном месте, в частотном и временном диапазонах.

Электромагнитная помеха (ЭМП) (*electromagnetic disturbance*) — электромагнитные явления, которые ухудшают или могут ухудшить качество функционирования ТС (электрической сети, приборов и устройств потребителей). Уровень ЭМП — значение величины помехи, измеренное в регламентированных условиях.

Влияние помехи (*electromagnetic interference* — *EMI*) — снижение показателей качества функционирования ТС при воздействии помехи.

Устойчивость к ЭМП, помехоустойчивость (*immunity*) — способность ТС сохранять заданное качество функционирования при воздействии помех.

Основные понятия и определения - 2

- ▣ **Радиочастотный ресурс (РЧР)** – совокупность возможных для использования электромагнитных полей, создаваемых с целью передачи и приема информации или энергии. РЧР был распределен международным соглашением ITU «Регламент радиосвязи» 1959 г. между 38 видами радиослужб в диапазоне частот от 10 кГц до 275 ГГц.

В дальнейшем этот документ неоднократно уточнялся.

В России действует «Регламент радиосвязи Российской Федерации МСЭ-Р», введенный в действие с 01.01.1999 г. решением ГКРЧ.

- ▣ **Радиоканал** – полоса частот как часть РЧР, используемая для функционирования радиосредства конкретного вида.
- ▣ **Рецептор** – любая система, изменяющая свои параметры под влиянием посторонних возмущений.

Основные понятия и

Уровень совместимости - установленное значение помехи, при которой с наибольшей вероятностью гарантируется нормальное взаимодействие всех элементов системы. Он служит, с одной стороны, в качестве основы при формулировке требований по помехоустойчивости и, с другой стороны - в качестве исходного пункта для установления допустимого уровня излучения помех вводимых в эксплуатацию устройств. Установление уровня совместимости осуществляется в соответствии с существующим или ожидаемым видом и значением помех и с возможным изменением электромагнитной обстановки объектом на стадии его проектирования с учетом технико-экономических аспектов.

Стойкость к повреждению - допустимое граничное воздействие на чувствительный элемент, превышение которого вызывает частичное или полное повреждение, а следовательно, и необратимое нарушение функционирования объекта. Восстановление функционирования требует, во всяком случае, применения технических средств, т.е. ремонта, замены элементов или группы элементов рассматриваемого устройства.

Основные понятия и определения-4

Помехоустойчивость - свойство чувствительного элемента нормально работать при воздействии помехи. Количественно помехоустойчивость рассматриваемого объекта задается в виде допустимого воздействия в форме амплитуды импульса напряжения, напряженности поля, граничной энергии, стандартизированного испытательного воздействия и т.д. Если при воздействии, превышающем предел помехоустойчивости, не происходит разрушения объекта, то наблюдается обратимое нарушение функционирования. После исчезновения помехи или после повторного включения рассматриваемое устройство может работать нормально, ему не требуется ремонт или замена деталей или группы элементов. Критерии нормального функционирования, лежащие в основе объективного определения помехоустойчивости, зависят от назначения объекта, и поэтому они всегда специфичны для разных объектов.

Пороговое значение опасной помехи - определенный интервал значений помехи, вызывающий нарушение функционирования чувствительного элемента.

Нарушение функционирования - кратковременное или длительное недопустимое отклонение функций системы от нормальных.

Уровни ЭМС

- Межсистемный – обеспечение ЭМС между отдельными автономными системами (службами).

Пример: РРЛ и сотовая связь.

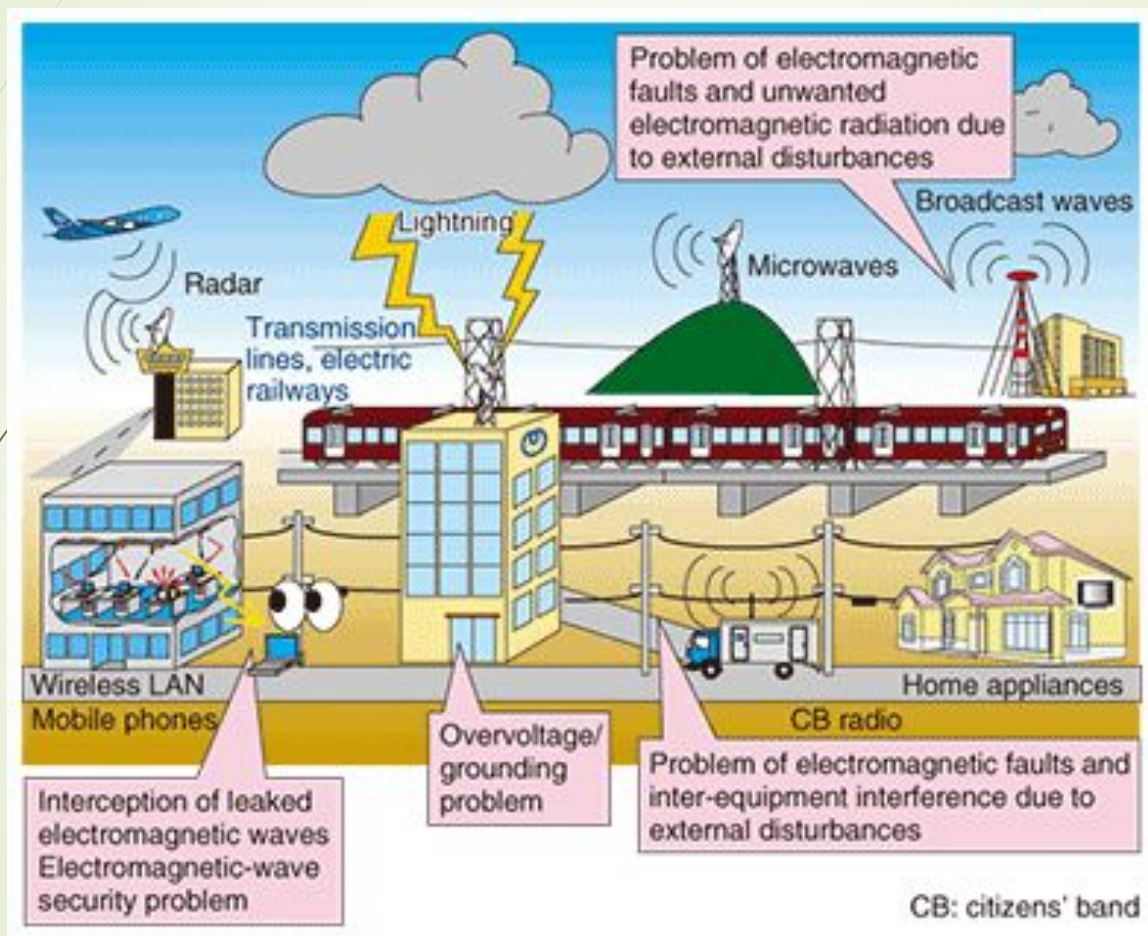
- Внутрисистемный – обеспечение ЭМС внутри сложного радиоэлектронного комплекса.

Пример: Генератор тактовой частоты и приемник

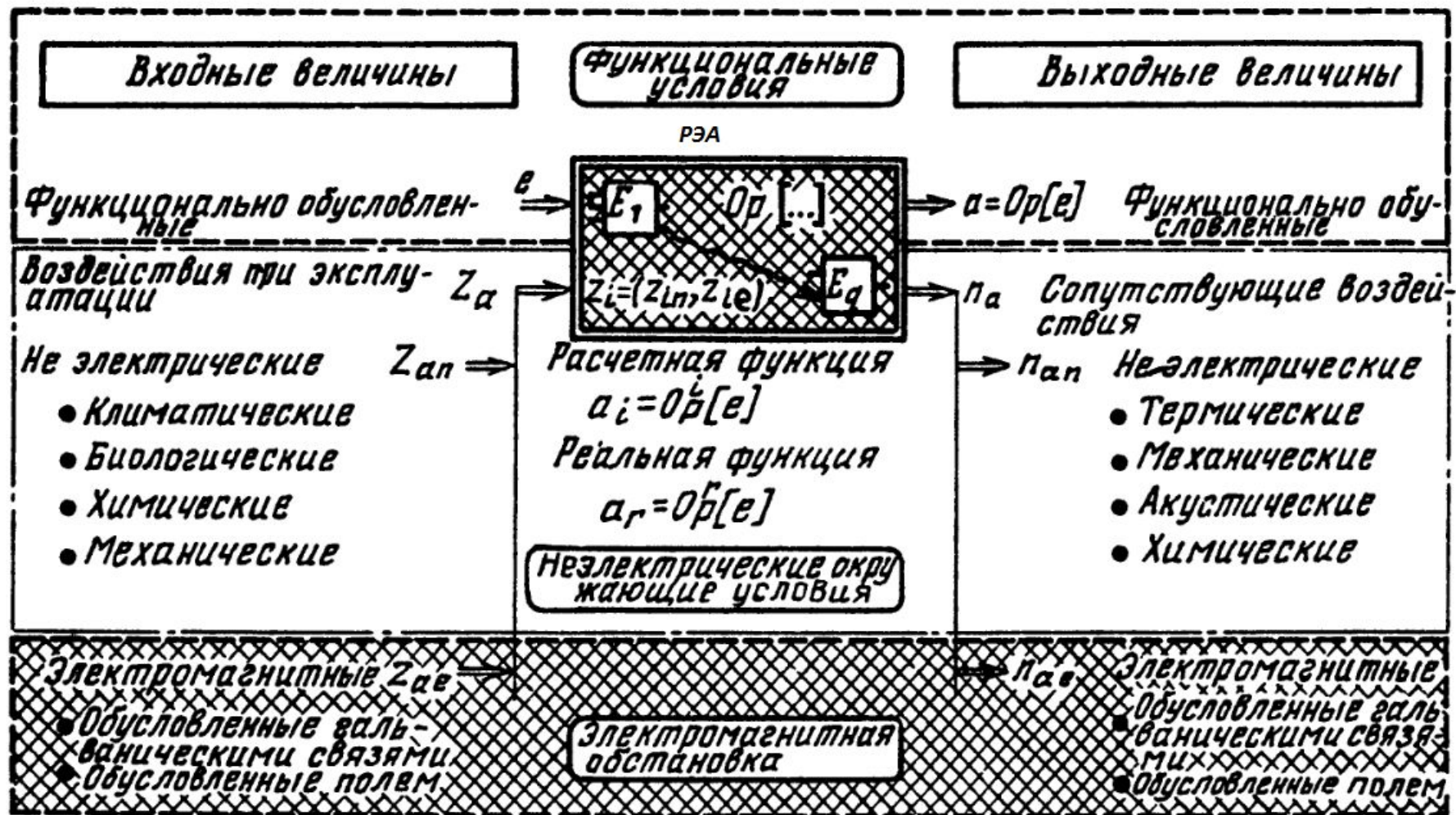
- Внутриаппаратурный – обеспечение ЭМС внутри отдельного устройства между его узлами и компонентами.

Пример: Передатчик и приемник ППМ.

Межсистемный уровень



Взаимодействие внешней среды и РЭА



Параметры ЭМС

$$S_e = (S_{e1}, S_{e2}, \dots, S_{en});$$

$$S_f = (S_{f1}, S_{f2}, \dots, S_{fm});$$

$$E = (E_1, E_2, \dots, E_k).$$

S_{ei} – устойчивость РЭА по отношению к внутренним помехам.

S_{fi} – устойчивость РЭА по отношению к внешним помехам.

E_i – электромагнитное воздействие данной РЭА на другие объекты.

Тема 2. Электромагнитные помехи

Классы непреднамеренных электромагнитных помех (НЭМП)

- Станционные
 - Излучаемые: Основное, неосновное, внеполосное излучение, гармоники, субгармоники, комбинационное, интермодуляционное, шумовое.
- Индустриальные
 - Излучаемые: электромагнитная, электрическая, магнитная индукция;
 - Кондуктивные: провал напряжения, перенапряжение, коммутационная, индуцированная.
- Естественные.
 - Излучаемые: атмосферная, космическая, электростатическая, мощный электромагнитный импульс.
- Контактные
 - Излучаемые: от одиночного облучателя, интермодуляционная.

Классификация видов НЭМП

- По частоте: высокочастотная, низкочастотная.
- По длительности: непрерывная, длительная, кратковременная.
- По периодичности: редкоимпульсная, регулярная, нерегулярная, коммутационная.
- По типу спектра: импульсная, шумовая, модулированная, импульсно-шумовая.
- По ширине спектра: узкополосная, широкополосная.
- По месту происхождения: межсистемная, внутрисистемная, внутриаппаратурная.
- По полярности: симметричная, несимметричная.

Классификация НЭМП

Класс	Подкласс	Вид (для всех классов и подклассов)
Станционные	Излучаемые	По частоте и спектру
Индустриальные	Излучаемые, Кондуктивные	По времени
Естественные	Излучаемые	По отношению помехи к рецептору
Контактные	Излучаемые	По отношению рецептора к помехе

Электромагнитное поле излучения

□ Зоны излучения:

□ Ближняя (индукционная),

$$R_n \leq \lambda / (2\pi), \mathbf{E}(r), \mathbf{H}(r) \propto r^{-3}.$$

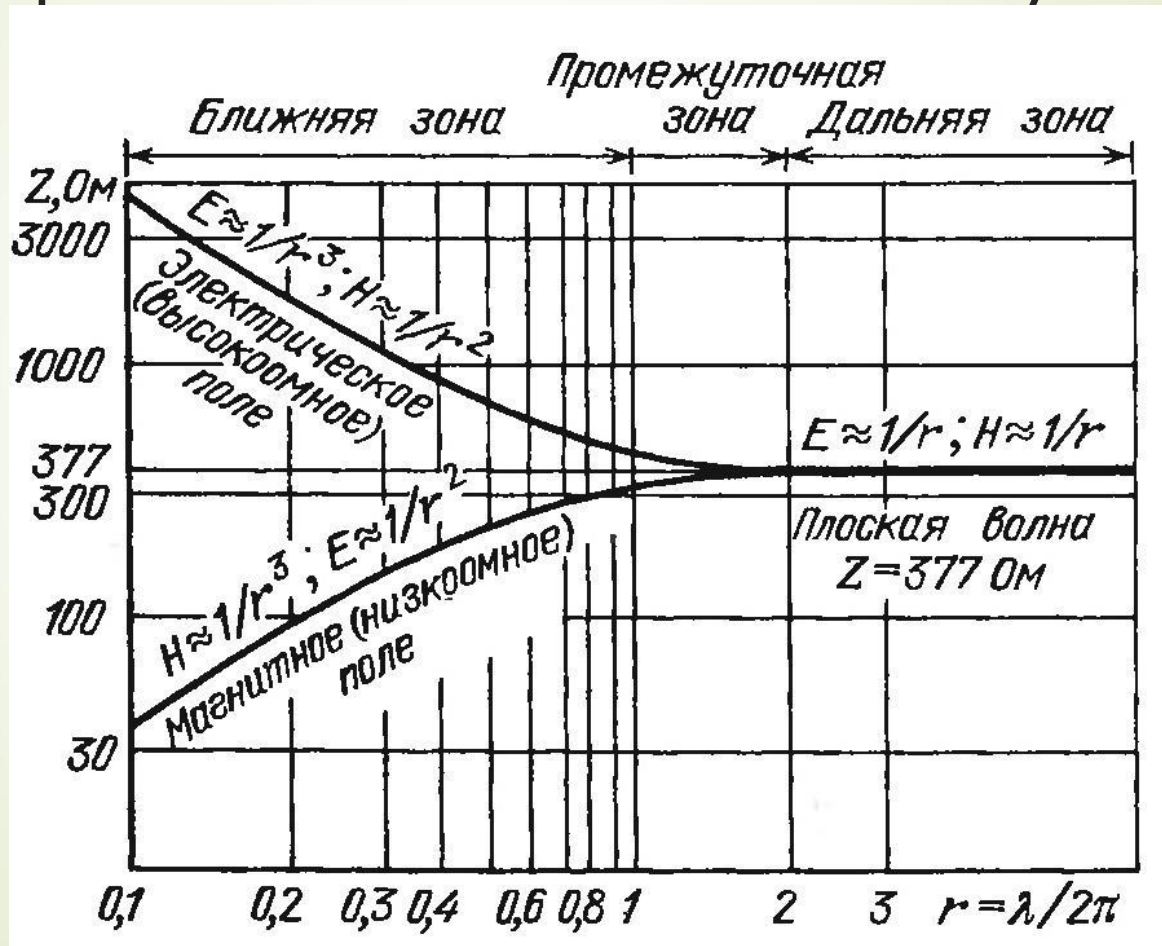
□ Промежуточная (Френеля)

$$R_n < R_i < R_r$$

□ Дальняя (излучения)

$$R_r \geq D^2 / \lambda, \mathbf{E}, \mathbf{H} \propto r^{-1}.$$

Характеристическое сопротивление поля излучения



Регистрация ЭМП

□ Единицы измерения ЭМП

□ Напряженность электрического поля

□ В/м, мкВ/м, дБмкВ/м.

$$E \text{ (дБмкВ/м)} = 20 \lg E \text{ (мкВ/м)} .$$

□ Плотность мощности

□ Вт/м², мВт/см², дБм/см².

$$P \text{ (дБм/см}^2\text{)} = 10 \lg P \text{ (мВт/см}^2\text{)} .$$

□ Перевод единиц для плоской волны:

$$P = \text{Re}(\mathbf{E} \times \mathbf{H}) = |\mathbf{E}|^2 / Z_0 .$$

$$P[\text{дБм/см}^2] = -90 + E[\text{дБмкВ/см}] - 10 \lg(Z_0) \approx -116 + E[\text{дБмкВ/см}]$$

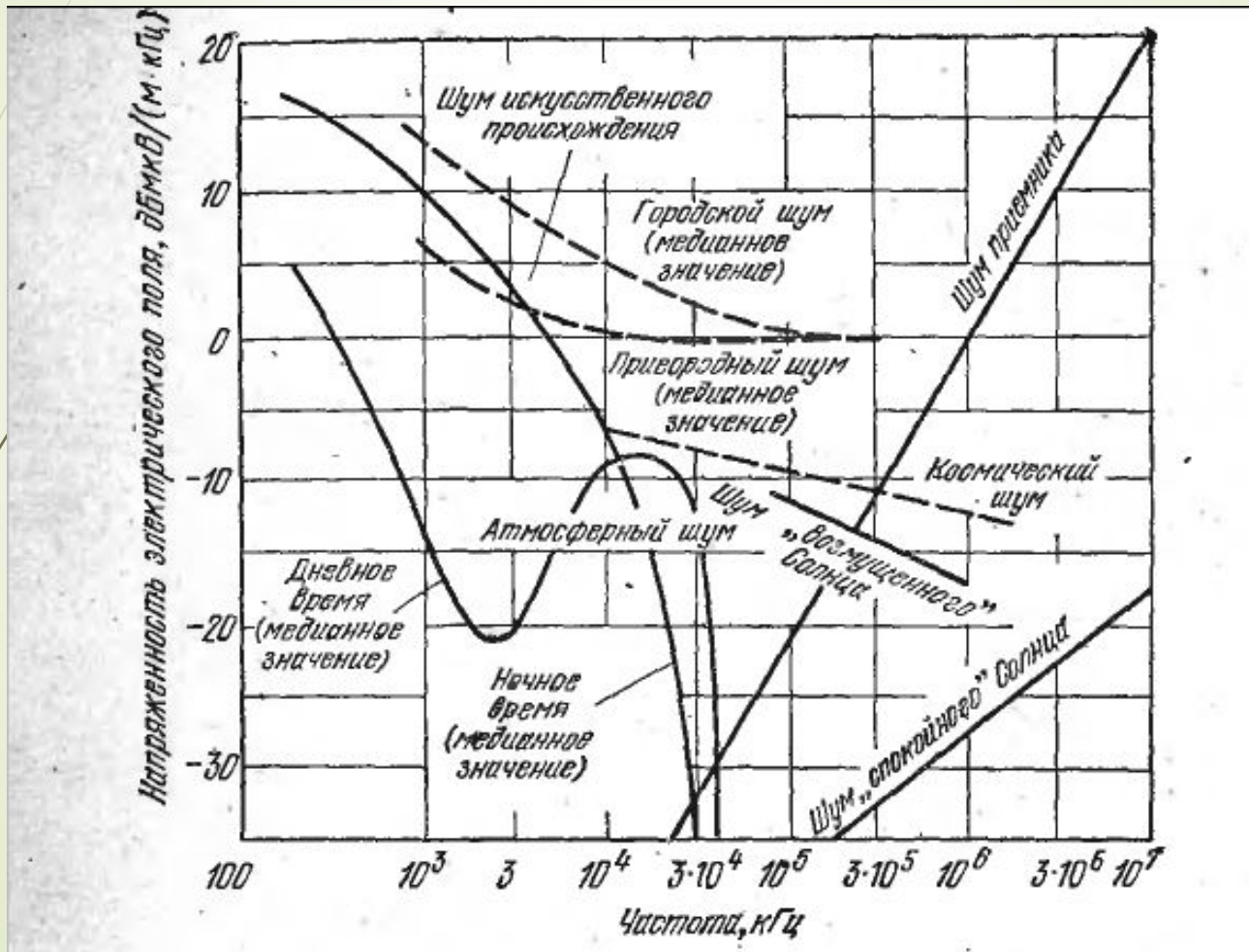
□ Спектральная плотность мощности

p [дБм/(см²·кГц)].

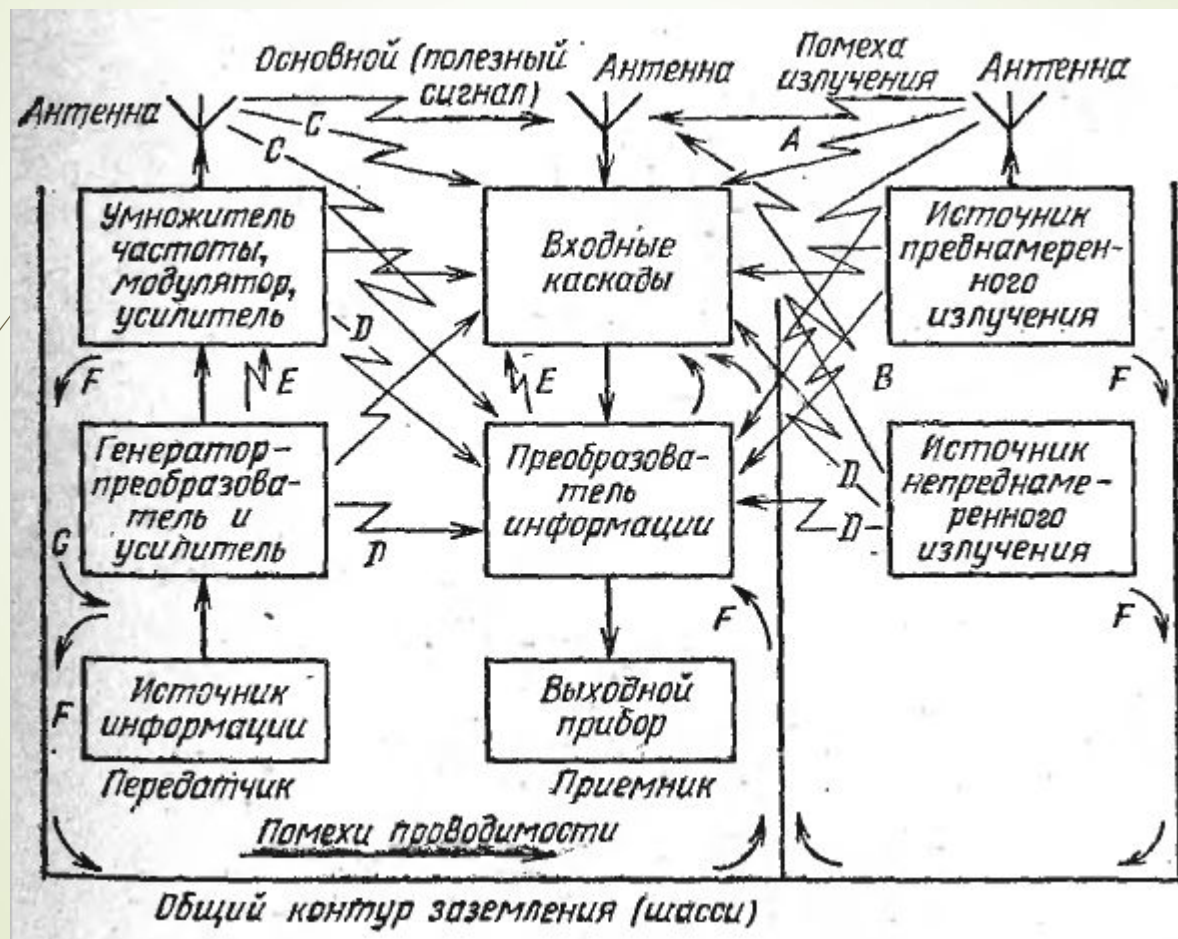
Таблица перевода

<i>E</i>			<i>P</i>			
В/м	мкВ/см	дБмкВ/см	Вт/м ²	дБВт/м ²	мВт/см ²	дБм /см ²
10 000	10 ⁸	160	2.65 · 10 ³	54	26500	44
1000	10 ⁷	140	2650	34	265	24
100	10 ⁶	120	26.5	14	2.65	4
10	10 ⁵	100	0.265	-6	0.027	-16
1	10 ⁴	80	2.65 · 10 ⁻³	-26	2.7 · 10 ⁻⁴	-36
0.1	1000	60	2.65 · 10 ⁻⁵	-46	2.7 · 10 ⁻⁶	-56
0.01	100	40	2.65 · 10 ⁻⁷	-66	2.7 · 10 ⁻⁸	-76
1 · 10 ⁻³	10	20	2.65 · 10 ⁻⁹	-86	2.7 · 10 ⁻¹⁰	-96
1 · 10 ⁻⁴	1	0	2.65 · 10 ⁻¹¹	-106	2.7 · 10 ⁻¹²	-116
1 · 10 ⁻⁵	0.1	-20	2.65 · 10 ⁻¹²	-126	2.7 · 10 ⁻¹⁴	-136
1 · 10 ⁻⁷	0.01	-40	2.65 · 10 ⁻¹⁴	-146	2.7 · 10 ⁻¹⁶	-156

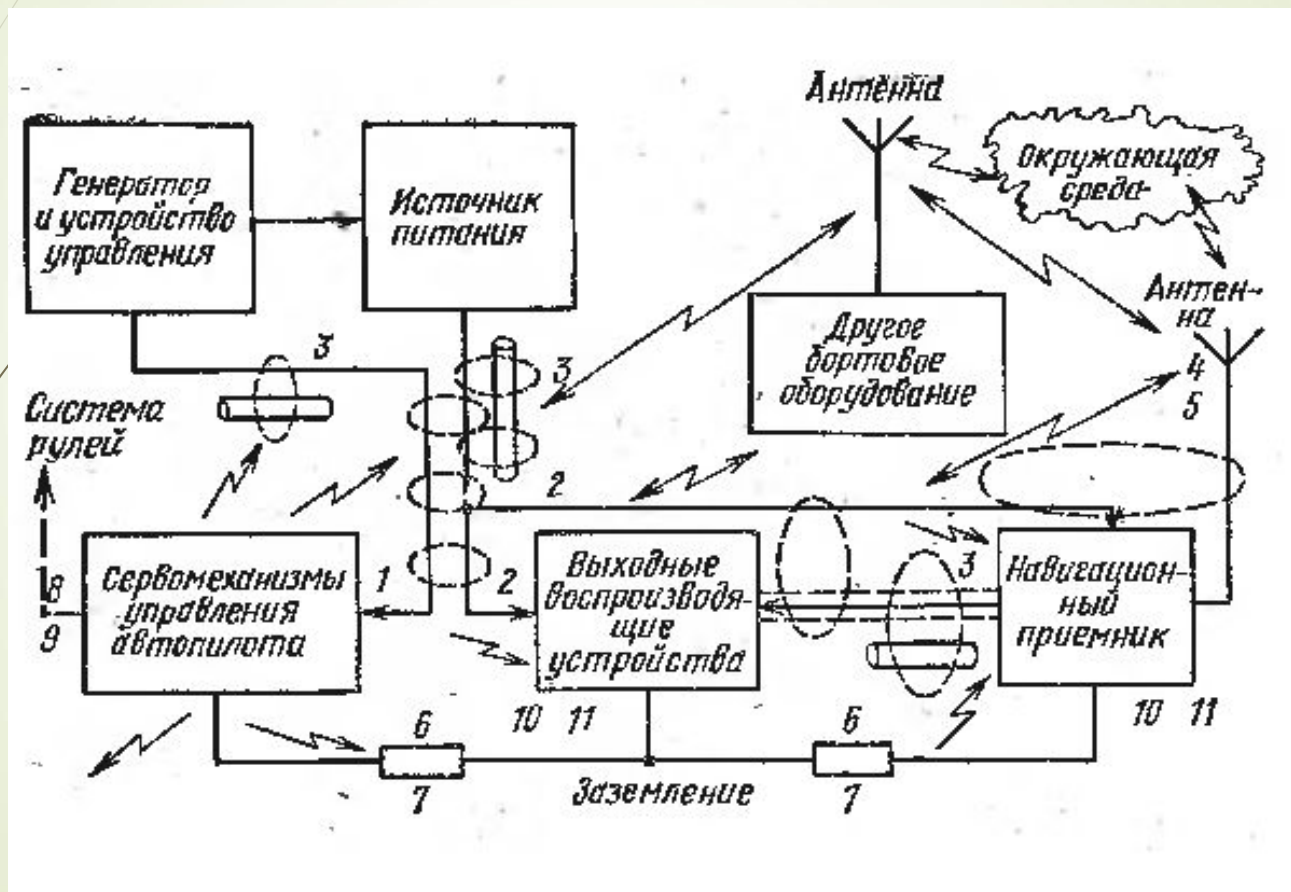
Некоторые источники электромагнитного шума



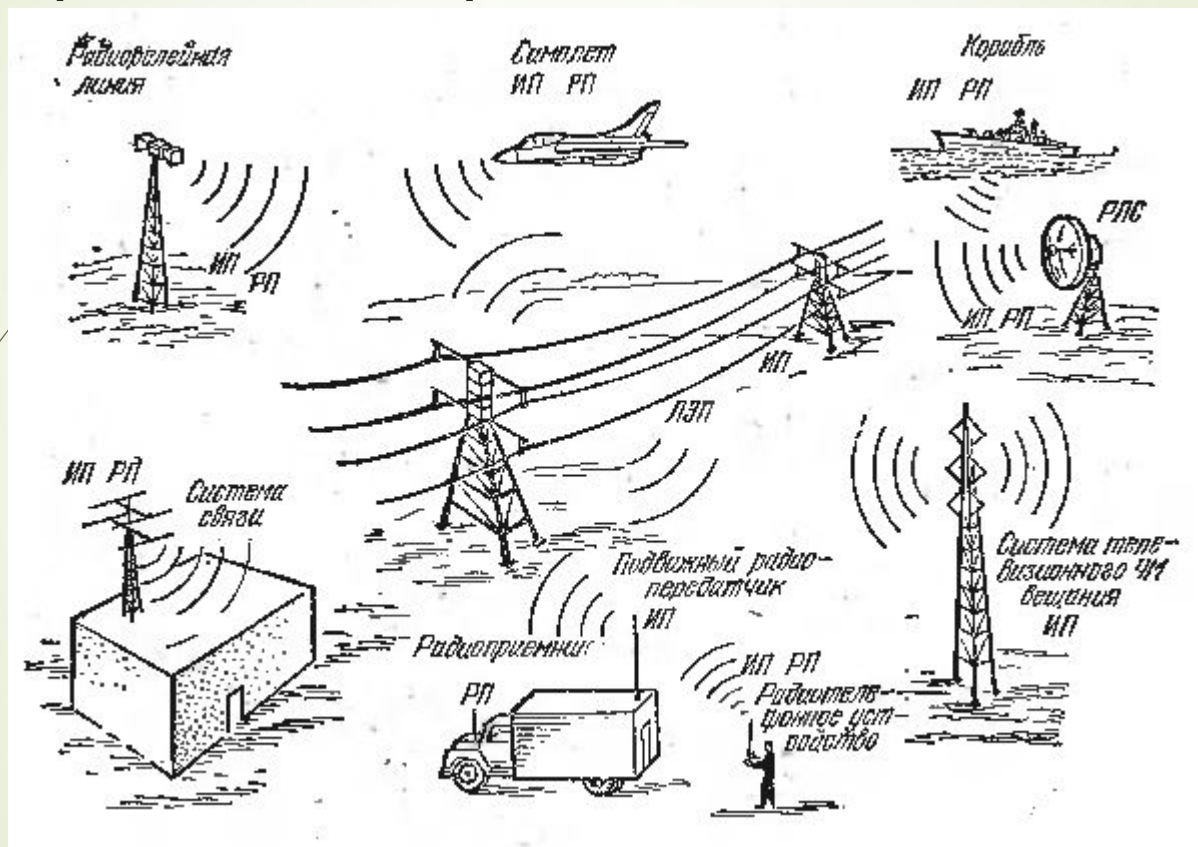
Некоторые пути внутри- и межсистемных ЭМП



Некоторые источники и рецепторы ВЭМП



Некоторые источники и рецепторы МЭМП



Методы снижения МЭМП



Экспертиза РЭС

Обязательной сертификации в РФ подлежат:

1. Средства связи, выполняющие функции систем коммутации (телефонные станции)
2. Оборудование абонентского доступа (учрежденные АТС)
3. Средства связи, выполняющие функции систем управления и мониторинга (АСУ, системы учета).
4. Радиоэлектронные средства связи (радио, ТВ, спутниковые системы связи).
5. Оборудование средств связи (программное обеспечение).

Экспертизу РЭС на соответствие требованиям стандартов ЭМС проводит ГСПИ РТВ (государственный специализированный проектный институт радио и телевидения) по заявкам.

Тема 3. Виды тестирования

<http://www.emci.ru/testig.html>

Помехоэмиссия

№ п.п	Виды испытаний на ЭМС	Стандарты, на соответствие которым проводятся испытания
1	Индустриальные радиопомехи	ГОСТ Р 51318.14.1-99 (СИСПР 14-1-93) ГОСТ Р 51318.14.1-2006 (СИПР 14-1:2005) ГОСТ Р 51318.15-99 (СИСПР 15-96) ГОСТ Р 51318.11-99 (СИСПР 11-97) ГОСТ Р 51318.22-99 (СИСПР 22-97) ГОСТ 22505-97
2	Гармонические составляющие тока, потребляемого техническими средствами из сети электропитания	ГОСТ Р 51317.3.2-99 (МЭК 61000-3-2-95) ГОСТ Р 51317.3.2-2006 (МЭК 61000-3-2:2005)
3	Колебания напряжения и фликер, вызываемые техническими средствами в сети электропитания	ГОСТ Р 51317.3.3-99 (МЭК 61000-3-3-94) МЭК 61000-3-3:2000

Продолжение

Помехоустойчивость

№ п/п	Виды испытаний	Стандарты, на соответствие которым проводятся испытания
1	Индустриальные радиопомехи	ГОСТ Р 51318.14.1-99 (СИСПр 14-1-93) ГОСТ Р 51318.14.1-2006 (СИПр 14-1:2005) ГОСТ Р 51318.15-99 (СИСПр 15-96) ГОСТ Р 51318.11-99 (СИСПр 11-97) ГОСТ Р 51318.22-99 (СИСПр 22-97) ГОСТ 22505-97
2	Устойчивость к радиочастотному электромагнитному полю	ГОСТ Р 51317.4.3-99 (МЭК 61000-4-3-95) ГОСТ Р 51317.4.3-2006 (МЭК 61000-4-3:2006)
3	Устойчивость к наносекундным импульсным помехам	ГОСТ Р 51317.4.4-99 (МЭК 61000-4-4-95) ГОСТ Р 51516-99 (МЭК 60255-22-4-92) ГОСТ Р 51317.4.4-2007 (МЭК 61000-4-4:2004)
4	Устойчивость к микросекундным импульсным помехам большой энергии	ГОСТ Р 51317.4.5-99 (МЭК 61000-4-5-95)
5	Устойчивость к кондуктивным помехам, наведенным радиочастотными электромагнитными полями	ГОСТ Р 51317.4.6-99 (МЭК 61000-4-6-96)

Продолжение

Помехоустойчивость

№ п/п	Виды испытаний на ЭМС	Стандарты, на соответствие которым проводятся испытания
6	Устойчивость к магнитному полю промышленной частоты	ГОСТ Р 50648-94 (МЭК 1000-4-8-93)
7	Устойчивость к импульсному магнитному полю	ГОСТ Р 50649-94 (МЭК 1000-4-9-93)
8	Устойчивость к затухающему колебательному магнитному полю	ГОСТ Р 50652-94 (МЭК 61000-4-10-93)
9	Устойчивость к динамическим изменениям напряжения электропитания	ГОСТ Р 51317.4.11-99 (МЭК 61000-4-11-94), ГОСТ Р 51317.4.11-2007 (МЭК 61000-4-11:2004)
10	Устойчивость к затухающим колебательным помехам	ГОСТ Р 51317.4.12-99 (МЭК 61000-4-12-97); МЭК 61000-4-18
11	Устойчивость к искажениям синусоидальности напряжения электропитания, включая передачу сигналов по электрическим сетям	ГОСТ Р 51317.4.13-2006 (МЭК 61000-4-13:2002)
12	Устойчивость к колебаниям напряжения электропитания	ГОСТ Р 51317.4.14-99 (МЭК 61000-4-14-99)
13	Устойчивость к кондуктивным помехам в полосе частот от 0 до 150 кГц.	ГОСТ Р 51317.4.16-2000 (МЭК 61000-4-98)

Окончание

Помехоустойчивость

№ п/п	Виды испытаний на ЭМС	Стандарты, на соответствие которым проводятся испытания
14	Устойчивость к пульсациям напряжения электропитания постоянного тока	ГОСТ Р 51317.4.17-2000 (МЭК 61000-4-17-99)
15	Устойчивость к изменениям частоты в системах энергоснабжения	ГОСТ Р 51317.4.28-99 (МЭК 61000-4-28-99)
16	Устойчивость к провалам, коротким прерываниям и изменениям напряжения, воздействующим на входной порт электропитания постоянного тока	МЭК 61000-4-29:2000
17	Устойчивость к токам кратковременных синусоидальных помех частотой 50 Гц в цепях защитного и сигнального заземления	ГОСТ Р 50746-2000 п. 4.2.1.13
18	Устойчивость к токам микросекундных импульсных помех в цепях защитного и сигнального заземления	ГОСТ Р 50746-2000 п. 4.2.1.14



Конструкторско-технологические методы повышения уровня ЭМС

- 1. Экранирование.**
- 2. Фильтрация.**
- 3. Заземление.**