

Д.Р. Уайт

**Электромагнитная
совместимость
радиоэлектронных средств
непреднамеренные помехи**

Выпуск 2

**Москва
«Книга по Требованию»**

УДК 030
ББК 92
Д11

Д11 **Д.Р. Уайт**
Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств непреднамеренные помехи: Выпуск 2 / Д.Р. Уайт – М.: Книга по Требованию, 2013. – 270 с.

ISBN 978-5-458-35709-8

Глава 1. Прогнозирование и анализ внутрисистемных помех
Глава 2. Экранирование
Глава 3. Кабели и разъемы
Глава 4. Заземление и соединения блоков и устройств
Глава 5. Заземление сооружений и ослабление помех в них
Глава 6. Фильтры
Глава 7. Характеристики электрорадиоизделий как источников и рецепторов помех
Глава 8. Помехи в приборах и устройствах
Глава 9. Обеспечение ЭМС при проектировании РЭС

ISBN 978-5-458-35709-8

© Издание на русском языке, оформление
«YOYO Media», 2013

© Издание на русском языке, оцифровка,
«Книга по Требованию», 2013

Эта книга является репринтом оригинала, который мы создали специально для Вас, используя запатентованные технологии производства репринтных книг и печати по требованию.

Сначала мы отсканировали каждую страницу оригинала этой редкой книги на профессиональном оборудовании. Затем с помощью специально разработанных программ мы произвели очистку изображения от пятен, клякс, перегибов и попытались отбелить и выровнять каждую страницу книги. К сожалению, некоторые страницы нельзя вернуть в изначальное состояние, и если их было трудно читать в оригинале, то даже при цифровой реставрации их невозможно улучшить.

Разумеется, автоматизированная программная обработка репринтных книг – не самое лучшее решение для восстановления текста в его первоизданном виде, однако, наша цель – вернуть читателю точную копию книги, которой может быть несколько веков.

Поэтому мы предупреждаем о возможных погрешностях восстановленного репринтного издания. В издании могут отсутствовать одна или несколько страниц текста, могут встретиться невыводимые пятна и кляксы, надписи на полях или подчеркивания в тексте, нечитаемые фрагменты текста или загибы страниц. Покупать или не покупать подобные издания – решать Вам, мы же делаем все возможное, чтобы редкие и ценные книги, еще недавно утраченные и несправедливо забытые, вновь стали доступными для всех читателей.



Серия Книжный Ренессанс

www.samizday.ru/reprint

ПРЕДИСЛОВИЕ РЕДАКТОРА

В предисловии к первому выпуску данного справочно-методического пособия по ЭМС *) говорилось о важности своевременного обеспечения ЭМС РЭС, а также были изложены причины, побудившие ознакомить советского читателя с материалами по ЭМС, изданными в США в виде шеститомного справочника *A Handbook Series on Electromagnetic Interference and Compatibility*. В том же предисловии была дана общая характеристика справочника и упомянуты трудности, с которыми пришлось столкнуться при подготовке к опубликованию его на русском языке.

Настоящий второй выпуск пособия содержит обширный круг сведений, в большинстве своем нетрадиционных с точки зрения их освещения в систематизированной литературе по ЭМС и, очевидно, в основном заимствованных из различного рода фирменных материалов, отчетов и т. д., советскому читателю неизвестных. Многообразие материала может создать ощущение пестроты и некоторой фрагментарности, которую, к сожалению, не удалось полностью преодолеть при подготовке книги к советскому изданию.

Во второй выпуск включены материалы т. 3 оригинала; заключительная глава выпуска — обзор, составленный редактором по гл. 7, т. 1, содержит некоторые технические (в том числе более подробно изложенные в предшествующих главах) и организационные рекомендации по обеспечению ЭМС разрабатываемого радиоэлектронного средства.

Излагаемые здесь сведения должны заинтересовать радиоспециалистов — конструкторов, технологов, разработчиков РЭС и их элементов, проектировщиков зданий и различных сооружений. Этот выпуск будет полезен и

*) Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств и непреднамеренные помехи. Составитель Д. Р. Ж. Уайт. Вып. 1. Общие вопросы ЭМС. Межсистемные помехи. Сокращ. пер. с англ. Под ред. А. И. Сапгира. М., «Сов. радио», 1977.

специалистам, работающим в смежных областях (электротехнике, электронике, вычислительной технике), а также студентам учебных заведений радиотехнического профиля, высших и средних специальных.

Над переводом книги работали А. А. Локтев (гл. 9), А. С. Меерсон (§ 1.3, гл. 6—8), О. Г. Носов (§ 1.1, 1.2 гл. 2, 3) и Я. В. Рубинович (гл. 4, 5).

Большую помощь при подготовке издания оказала обстоятельная рецензия Ю. Д. Линденбратена. Ряд полезных замечаний и поправок внес М. Л. Волин, который просмотрел рукопись и составил к ней список литературы.

Глава 1

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ ВНУТРИСИСТЕМНЫХ ПОМЕХ

1.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Для определения внутрисистемных (ВЭМП) и межсистемных (МЭМП) электромагнитных помех обратимся к рис. 1.1. Помехи, излучаемые антеннами каждой из систем *A*, *B*, *C* и *X* и принимаемые антеннами остальных систем, относятся к межсистемным. Если источник (ИП) и рецептор (РП) помехи расположены в одном корпусе,

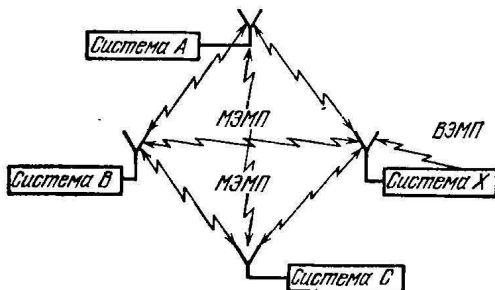


Рис. 1.1. Примеры МЭМП и ВЭМП.

принадлежат одному устройству, системе, то эти помехи называют внутрисистемными*) (система *X* на рис. 1.1). При этом помеха воспринимается не обязательно антенной.

Анализировать ВЭМП можно машинным и ручным методами. Моделирование на ЭВМ имеет большие возможности и избавляет человека от трудоемких расчетов. Однако большинство инженеров, занимающихся прогнозированием ВЭМП, как правило, считают вручную, так

*) Такое деление помех является весьма условным и зависит от смысла, который вкладывается в понятие «система». (Прим. ред.)

как обычно требуется приближенная оценка. В данной главе будут рассмотрены расчеты без ЭВМ, а также изложены идеи, лежащие в основе программ для машинного прогнозирования.

Подготовка к прогнозированию ВЭМП. Прежде чем прогнозировать ВЭМП, необходимо определить следующие исходные данные:

- 1) возможные комбинации ИП — РП,
- 2) полосы частот ИП и РП,
- 3) возможные пути распространения ВЭМП,
- 4) возможные методы защиты от ВЭМП.

Данные по первым двум пунктам должны быть известны до начала прогнозирования. Возможные методы защиты могут быть определены после предварительного прогнозирования. На практике эти данные формулируются уже на стадии предварительной разработки системы.

Определение комбинаций ИП — РП. На этом этапе необходимо выявить все возможные ИП в системе: передающие устройства, генераторы, источники питания,

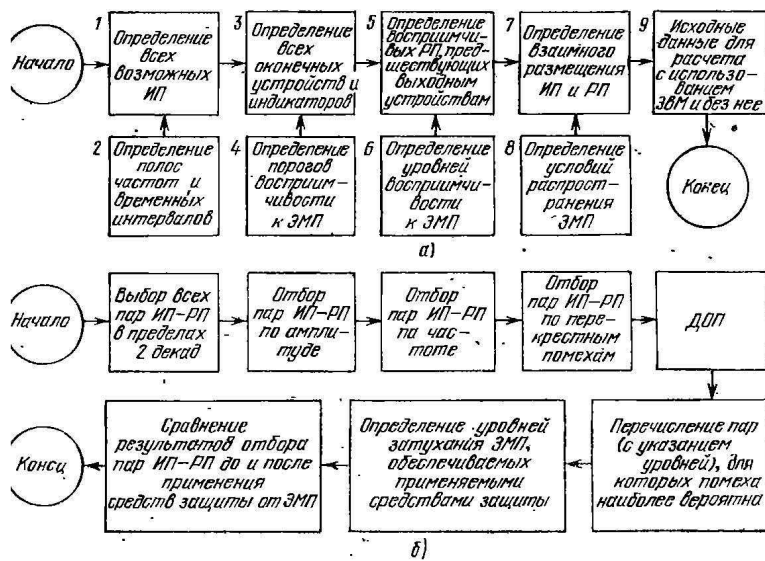


Рис. 1.2. Схема процесса прогнозирования ВЭМП:

а — подготовка к прогнозированию (сбор и обработка данных); б — цикл прогнозирования.

модуляторы, системы передачи цифровых сигналов информации и управления, коллекторные двигатели, реле, соленоиды, кремниевые управляемые вентили и т. д. (рис. 1.2, операция 1). Затем следует определить или оценить полосы частот и временные интервалы каждого ИП (операция 2). Временные характеристики позволяют учитывать возможные моменты возникновения внутрисистемных ЭМП.

Затем необходимо выявить все РП, в которых могут возникнуть сбои и отказы (операция 3). К ним относятся, например, оконечные исполнительные устройства, устройства воспроизведения информации, индикаторы. Это могут быть приборы в кабине самолета, механические устройства управления летательными аппаратами, электрические управляющие устройства аварийных систем. Результатом воздействия помех на систему управления может также явиться преждевременный износ подшипников или сокращение срока службы рулей управления самолета, аварийный сброс крыльевого топливного бака (при случайном срабатывании электрической системы сброса).

После этого следует или определить пороги срабатывания (операция 4), или оценить степень ухудшения работы при воздействии помехи.

Так как помехи обычно не воздействуют непосредственно на оконечные устройства, нужно знать наиболее чувствительные РП, с которых сигналы поступают на данные устройства. К таким РП, например, относятся антенна и входные цепи УВЧ и УПЧ в супергетеродинном приемнике, чувствительные усилители ЗУ в ЭВМ (операция 5). При этом также оценивают минимальные уровни помех, ухудшающие работу устройств (операция 6).

Полосы частот, о которых говорилось, можно оценить с помощью графиков зависимостей уровней излучаемых и воспринимаемых помех от частоты (рис. 1.3). Частотный диапазон основных ИП и РП лежит в пределах 300— 10^{10} Гц, что составляет 7,5 декад (порядка 24 октав). Некоторые ИП занимают значительный частотный диапазон, поскольку, по-видимому, либо перестраиваются по частоте, либо являются импульсными устройствами. Аналогично можно оценить и ширину полос частот РП. Некоторые ИП являются фиксированными по частоте (например, цепи питания переменного тока частотой

400 Гц), а некоторые РП занимают узкий диапазон частот (например, УПЧ).

Данные о полосах частот можно фиксировать также в виде таблицы, матрицы или наносить на перфокарты для последующих расчетов на ЭВМ.

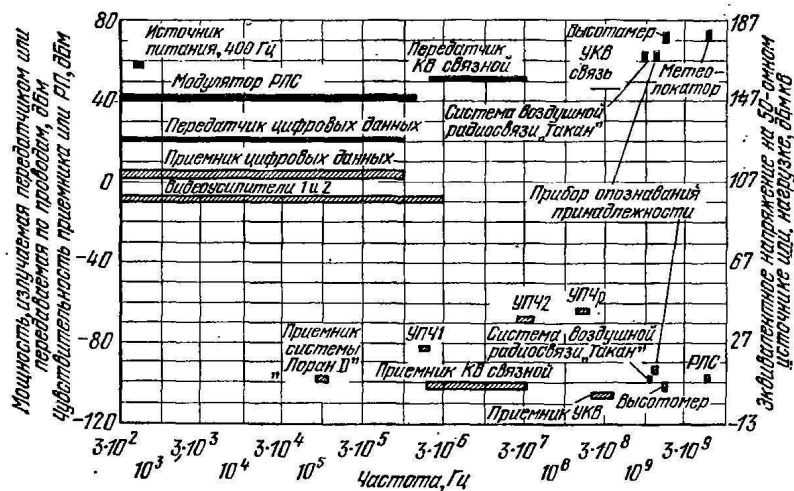


Рис. 1.3. Частотная карта источников (зачерненные отрезки) и рецепторов (заштрихованные отрезки) помех для типовой авиационной системы.

Анализируя рис. 1.3, можно сделать следующие выводы:

- все ИП имеют более высокие уровни мощности, чем уровни чувствительности всех РП (соблюдается не всегда);
- полосы частот некоторых ИП лежат в частотном диапазоне потенциальных РП или перекрывают его;
- полосы частот некоторых ИП не попадают в диапазон частот потенциальных РП, однако помехи могут создаваться по побочным каналам;
- различие уровней ИП и РП может быть относительно небольшим (например, 30 дБ между цифровым устройством передачи данных и видеоусилителем). При этом ВЭМП являются маловероятными. При большом различии уровней (например, 140 дБ между модулятором радиолокатора и приемником системы «Лоран D») вероятность возникновения ВЭМП существенно возрастает.

В системе, отображенной на рис. 1.3 (все пары не показаны), существуют 136 пар ИП—РП, однако число наиболее вероятных пар невелико. Метод уменьшения числа пар ИП—РП будет рассмотрен далее.

Определение полос частот. В действительности причиной многих ВЭМП является воздействие излучений ИП вне рабочей полосы частот, которые попадают в рабочую полосу частот РП, или наличие у РП побочных каналов, воспринимающих помеху, создаваемую ИП в его рабочей полосе.

При прогнозировании ВЭМП следует использовать заранее известные данные или определить их с помощью измерений. Если такие данные отсутствуют, то можно воспользоваться математическими моделями, разработанными для ИП и РП, близких к рассматриваемым. Иногда можно предсказать побочные полосы частот. Однако, если разность основных частот ИП и РП превышает одну декаду (ошибки в определении уровней могут составлять 30—50 дБ), это не гарантирует достоверность прогноза, поскольку возможно возникновение паразитных резонансов и гармоник высших порядков.

Определение возможных путей распространения ВЭМП. Связи между ИП и РП могут оказаться весьма сложными и многочисленными.

Основываясь на примере возможных путей распространения ВЭМП, обусловленных излучением (ПИ) и проводимостью (ПП) (рис. 1.4), классифицируем их. Пути ПИ: антенна—антенна, антенна—блок, антенна—провод, блок—антенна, блок—провод, провод—антенна, провод—блок, провод—провод, блок—блок. Пути ПП: провод—провод, сопротивление общего заземления, внутреннее сопротивление общего источника.

Методы защиты от ВЭМП. Защиту от ВЭМП можно предусматривать на стадиях проектирования, монтажа и эксплуатации оборудования и систем. Следует рассматривать все возможные методы защиты, даже если некоторые из них не будут использованы при решении данной проблемы. Необходимо учитывать ширину луча, усиление, диаграмму направленности и поляризацию антенны, сопротивление связи, уровень утечки из-за неполного экранирования блока, заземление экрана блока, эффективность экранирования блока, заземление экранирующей оплетки кабеля, экран кабеля, сопротивление нагрузки схемы, сопротивление источника сигнала, экрани-

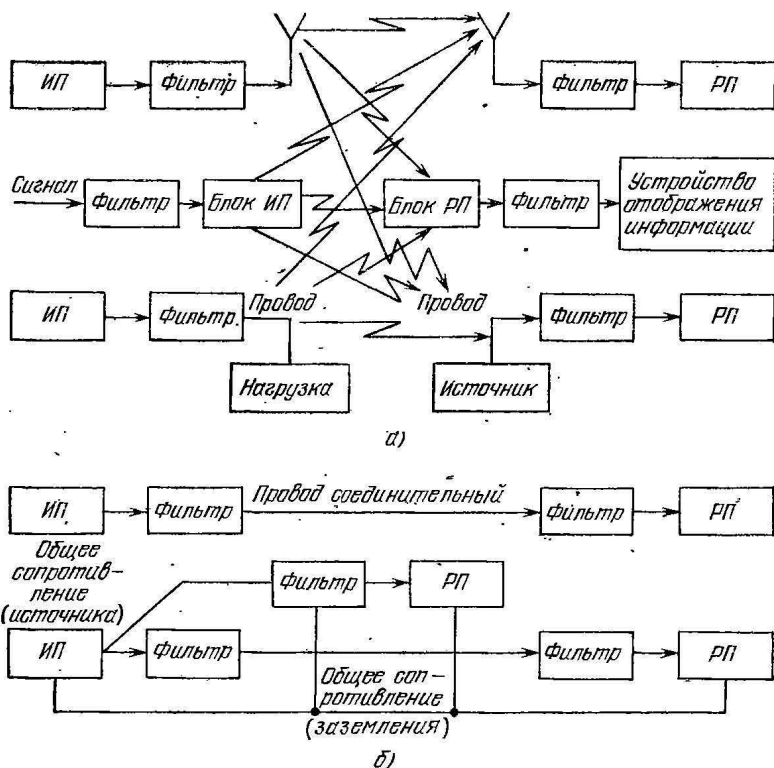


Рис. 1.4. Основные пути распространения ЭМП:
 а — между антеннами, блоками и проводами (ПИ); б — за счет проводимости (ПП).

рование отсеков, величину утечки через проводники, полосу частот ИП, гармоники ИП, паразитные излучения ИП, потери передачи фильтра, потери в свободном пространстве, использование экранирующих прокладок, сопротивление заземления, экранирование групп кабелей, время нарастания и спада, длительность и частоту следования импульсов, избирательность, побочные каналы приема и восприимчивость рецептора, емкостную связь между проводниками и кабелями, экранирование проводов и кабелей, ориентацию проводов.

1.2. МЕТОДЫ ОТБОРА ПАР ИСТОЧНИК ПОМЕХИ — РЕЦЕНТОР ПОМЕХИ

Перед окончательным этапом прогнозирования ВЭМП отбирают несколько наиболее вероятных пар ИП — РП, а затем только для них прогнозируют наличие ВЭМП. Такой метод наиболее удобен.

Процесс отбора заключается в следующем:

— составляется матрица всех комбинаций ИП — РП, причем в матрицу заносятся данные об уровнях помех и чувствительности рецепторов независимо от их диапазона частот;

— отбираются пары по амплитуде (отбор является неточным, так как при этом не учитываются частоты);

— отбираются пары по частоте, при этом учитываются уровни помех в основной и побочной полосах частот;

— отбираются пары с учетом их пространственного расположения и потерь распространения.

Рассмотрим процесс отбора, используя исходные данные из диаграммы рис. 1.3.

Составление матрицы (табл. 1.1) включает запись:

— всех возможных ИП в первую строку матрицы;

— всех возможных РП в левый столбец матрицы;

— различий уровней без учета полос частот в столбцы матрицы.

В матрицу не заносятся данные о передатчиках и приемниках, предназначенных для совместной работы.

Отбор по амплитуде (табл. 1.2). Для каждой из пар ИП — РП возможны следующие ситуации:

1. Помеха в основной полосе частот ИП и РП (случай ОО) (рис. 1.5, а). Диапазон частот излучения ИП полностью перекрывает диапазон РП. (При этом для РП полосу рабочих частот необходимо увеличить с каждого края на 20%. Для полосовых усилителей полосы частот увеличиваются на одну октаву.) Если перекрытие существует, то в верхнюю левую часть соответствующего квадрата табл. 1.2 записывают поправку 0 дБ, в нижнюю часть того же квадрата записывают данные из табл. 1.1.

2.3. Основное излучение ИП попадает в побочный канал приема РП (случай ОП) и побочное излучение ИП — в основной канал РП (случай ПО) (рис. 1.5, б). При этом необходимо определить, существует ли для каждой пары табл. 1.1 перекрытие по частоте в пределах

Таблица 1.1

РП	Разница в мощности ИП и чувствительности РП, дБм						метеоло- катор	высота- мер	приборы опозна- вания	система «Такан»	модуля- тор РЛС
	источник питания, 400 Гц	передатчики		УКВ	высо- томер	метеоло- катор					
		цифровых данных	КВ								
Приемник цифровых данных	65	—	45	40	65	65	65	55	55	35	
Видеоусилитель 1	80	30	60	55	80	80	80	70	70	50	
Видеоусилитель 2	80	30	60	55	80	80	80	70	70	50	
ЭВМ*)	65	15	45	40	65	65	65	55	55	35	
УПЧ1	155	105	135	130	145	155	155	145	145	125	
УПЧ2	140	90	120	115	130	140	140	130	130	110	
УПЧр	135	85	115	110	125	135	135	125	125	105	
Система «Лоран D»	170	120	150	145	160	170	170	160	160	140	
Приемник КВ	170	120	150	145	165	175	175	165	165	145	
Приемник УКВ	175	125	155	150	165	175	175	165	165	145	
Система «Такан»	170	120	150	145	165	170	170	160	160	140	
Прибор опознавания	165	115	145	140	155	165	165	145	145	135	
Высотомер	170	120	150	145	160	170	170	160	160	140	
Приемник РЛС	170	120	150	145	160	170	170	160	160	140	
Электроослабляющее устройство 1*)	80	30	60	55	70	80	80	70	70	50	
Электроослабляющее устройство Q*)	80	30	60	55	70	80	80	70	70	50	

Число комбинаций ИП—РП 136

*) На рис. 1.3 не показаны. По отечественной классификации диапазоны КВ, УКВ обозначаются ВЧ, ОВЧ.
(Прим. ред.)