

## 1. Методические указания

Бурный рост электротехнического и радиотехнического оборудования в настоящее время вызывает резкий объем электромагнитных полей, которые являются помехами для других подобных устройств. Раздел электроники с названием электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств (ЭМС РЭС) имеет главную цель – обеспечить совместную и одновременную работу различного радиотехнического, электронного и электротехнического оборудования. Каждый специалист в области радиоэлектроники (1) должен знать принципы обеспечения ЭМС РЭС и использовать эти знания в практической работе. При рассмотрении ЭМС необходимо анализировать широкий спектр вопросов – от специфических особенностей радиотехнических систем до конструирования и технологии производства, причем с учетом технических, экономических, метрологических и организационных аспектов [1, 2, 4, 7, 9]. (2) Необходимо знать причины возникновения помех, свойства и характеристики различных элементов РЭС, влияющие на процессы создания помех и подверженности им, принципы и основные направления обеспечения ЭМС, организационные аспекты, стандарты и нормативные документы. Исходя из сказанного, в объем курса электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств (ЭМС РЭС) входят следующие разделы:

- Основные (базовые) принципы обеспечения электромагнитной совместимости.
- Учет требований электромагнитной совместимости в проектировании антенных устройств.
- Экранирование электромагнитных полей.
- Классификация сигналов и помех.
- Проблемы совместимости в передающих и приемных устройствах.

Основная форма изучения настоящего курса – самостоятельная работа над учебным материалом, представленным в темах данного пособия. В конце каждой темы приводятся вопросы для самопроверки. Для лучшего усвоения дисциплины «Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств» предусматривается:

- курс лекций в объеме 20(?) часов, в котором рассматриваются наиболее сложные для понимания темы программы (для иногородних студентов перед экзаменом предусмотрен установочный курс лекций в объеме 10(?) часов);
- выполнение двух (?) письменных контрольных работ;
- выполнение трех (?) лабораторных работ;
- объединенный зачет по письменным и лабораторным работам;
- экзамен по изучаемому курсу.

Экзаменационные билеты могут включать все перечисленные вопросы, изложенные в программе курса. К экзамену допускаются студенты, успешно выполнившие лабораторные и контрольные работы.

## 2. Учебно-методические материалы по дисциплине

### Основная литература

1. Виноградов Е. М., Винокуров В. И., Харченко И. П. Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств. Л.: Судостроение, 1986. 263 с.
2. Петровский В. И., Седельников Ю. Е. Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств. М.: радио и связь, 1986. 216 с.
3. Конструирование экранов и СВЧ устройств. Под ред. Чернушенко А. М. М.: Радио и связь, 1990. 351с.

4. Князев А. Д., Кечиев Л. Н., Петров Б. В. Конструирование радиоэлектронной и электронно-вычислительной аппаратуры с учетом электромагнитной совместимости. М.: Радио и связь, 1989. 223 с.
5. Ямпольский В. Г., Фролов О. П., Антенны и электромагнитная совместимость. М.: Радио и связь, 1983. 271 с.
6. Кравченко В. И., Болотов Е. А., Летунова Н. И. Радиоэлектронные средства и мощные электромагнитные помехи. М.: Радио и связь, 1987. 306 с.
7. Бадалов А. Д., Михайлов А. С. Нормы на параметры электромагнитной совместимости РЭС: Справочник. М.: Радио и связь, 1990. 187 с.
8. Проблемы антенной техники. Под ред. Бахраха Л. Д. М.: Радио и связь, 1989. 280 с.
9. Шевкопляс Б. В. Микропроцессорные структуры. Инженерные решения. Справочник. М.: Радио и связь, 1990. 367 с.
10. Благовещенский Д. В. Электромагнитная совместимость. СПб.: ГУАП, 1999. 82 с.

#### Дополнительная литература

11. Благовещенский Д. В. Радиосвязь и электромагнитные помехи. СПб.: ГУАП, 2002. 69 с.
12. Благовещенский Д. В. Распространение радиоволн. СПб.: ГУАП, 1995. 127 с.

#### Т е м а 1

##### Основные (базовые) принципы обеспечения электромагнитной совместимости.

Основополагающие принципы обеспечения электромагнитной совместимости. Понятие электромагнитной обстановки. Электромагнитная помеха, радиоканал, радиочастотный ресурс. Источники электромагнитных помех. Рецепторы электромагнитных помех. Воздействие помех на радиоэлектронные средства. Факторы, влияющие на электромагнитную совместимость радиоэлектронных средств. Пути решения проблемы электромагнитной совместимости [2, 6, 10 - 12].

#### Контрольные вопросы

1. В чем основная цель дисциплины электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств?
2. В каких областях науки и техники используются электромагнитные волны?
3. Каков характер роста числа радиоэлектронных средств?
4. Понятие электромагнитной обстановки.
5. Особенности электромагнитной обстановки на судах, самолетах, ИСЗ.
6. В чем состоит перегрузка радиоприемных устройств (РПУ)?
7. Электромагнитная помеха, радиоканал, радиочастотный ресурс – общие понятия.
8. Каков диапазон частот и волн, используемых на практике в различных радиосистемах?
9. Источники электромагнитных помех.
10. В чем различие естественных и искусственных электромагнитных помех?
11. В каких единицах измеряются уровни помех?
12. Что такое шумовая температура антенны?

13. Рецепторы электромагнитных помех.
14. Какие две группы рецепторов существуют?
15. Воздействие помех на радиоэлектронные средства.
16. Что такое восприимчивость рецептора?
17. Факторы, влияющие на электромагнитную совместимость радиоэлектронных средств.
18. В чем состоит воздействие непреднамеренных электромагнитных помех на рецептор?
19. Пути решения проблемы электромагнитной совместимости.
20. Каковы основные причины нарушения ЭМС?

## Т е м а 2

### Учет требований электромагнитной совместимости в проектировании антенных устройств

Антенны и требования к ним с точки зрения электромагнитной совместимости. Излучение антенн как фактор электромагнитной совместимости. Критерии помехозащищенности. Влияние помехозащищенности антенн на характеристики радиосистем. Антенны с высокой помехозащищенностью. Дальнее боковое излучение. Роль облучателей при оценке помехозащищенности антенн. Осесимметричные зеркальные антенны в задачах электромагнитной совместимости. Методы улучшения помехозащищенности антенн в заднем полупространстве. Вынесенные защитные экраны антенн [3, 5, 8, 10].

### Контрольные вопросы

1. Характеристики антенн с точки зрения электромагнитной совместимости.
2. Чем определяется помехозащищенность антенны?
3. Причины ухудшения направленных свойств антенны.
4. Излучение антенн как главная причина нарушений электромагнитной совместимости.
5. Способы оценки огибающей бокового излучения.
6. Каковы критерии помехозащищенности антенн по боковым излучениям?
7. Влияние помехозащищенности антенн на характеристики радиосистем.
8. Показать роль побочного излучения на примере радиорелейной линии связи.
9. Антенны с высокой помехозащищенностью.
10. Зачем используется метод затенения части раскрыва антенны?
11. Что дают дополнительные излучатели?
12. Дальнее боковое излучение.
13. В чем суть краевых эффектов?
14. Зачем уменьшают амплитуду возбуждения контура раскрыва?
15. Способы снижения уровня дальнего бокового излучения.
16. Роль облучателей при оценке помехозащищенности антенн.
17. Характеристики облучателей зеркальных антенн в виде рупоров.
18. Осесимметричные зеркальные антенны в задачах электромагнитной совместимости.
19. Методы улучшения помехозащищенности антенн в заданном полупространстве.
20. Описать конструкции антенн с пониженным уровнем теневого излучения.
21. Вынесенные защитные экраны антенн.
22. Изобразить основные типы этих экранов.

### Т е м а 3

#### Экранирование электромагнитных полей

Принципы экранирования электромагнитных полей. Характер электромагнитных полей как источников помех. Экранирование электромагнитного поля. Экранирование магнитного поля. Экранирование электрического поля. Однослойные экраны. Многослойные экраны. Перфорированные экраны [1, 3, 4, 10].

#### Контрольные вопросы

1. Для чего предназначено экранирование?
2. Что такое коэффициент экранирования?
3. Пояснить понятие эффективность экранирования (экранное затухание).
4. В чем физическая суть коэффициента реакции экрана?
5. Что нужно знать при проектировании экранов?
6. Основные требования к экранам.
7. В чем особенность электромагнитного поля в ближней зоне?
8. На какие основные типы делятся экраны в ближней и дальней зонах?
9. Какова особенность квазистатических магнитных и электрических полей?
10. Пояснить процесс экранирования электромагнитного поля дальней зоны.
11. Из каких элементов складывается общая эффективность экранирования?
12. В чем особенность экранирования в радиодиапазоне и на СВЧ?
13. При больших токах и малых напряжениях каков характер поля в ближней зоне?
14. Экранирование магнитного поля. Каковы требования к магнитостатическим экранам?
15. Когда используются немагнитные металлы для экранирования?
16. Как выбирается толщина экрана?
17. Из чего выполняются высокочастотные экраны?
18. При больших напряжениях и малых токах какое поле преобладает в ближней зоне?
19. Что прежде всего следует делать при экранировании электрического поля?
20. Экранирование электрического поля. Основные требования к экранам.
21. В чем отличие экранирования на низких и высоких частотах?
22. Однослойные экраны. Какие основные типы экранов существуют?
23. Как учитываются резонансные явления в экранах?
24. Где используется экран из ферромагнитного материала?
25. В чем конструктивные особенности экранов для ВЧ магнитных полей?
26. Каковы характеристики сетчатых экранов?
27. Многослойные экраны. Их конструктивные особенности.
28. От чего зависит эффективность экранирования многослойных экранов?
29. В чем особенности проектирования многослойных комбинированных экранов?
30. Перфорированные экраны. Требования к ним.
31. Что надо делать для уменьшения излучений из отверстий?
32. Понятие заградительного волновода.
33. Перечислите мероприятия для повышения эффективности перфорированных экранов.

## Т е м а 4

### Классификация сигналов и помех

Сигналы в условиях воздействия помех, оценка помеховой обстановки. Общие сведения о сигналах, их спектральное представление. Ширина спектра реальных сигналов. Помехи, помехоустойчивость. Индустриальные помехи, источники непрерывных индустриальных помех. Источники импульсных помех. Дополнительные источники индустриальных помех [6, 10, 11].

### Контрольные вопросы

1. Какие три главных элемента участвуют в передаче информации?
2. Что называется сообщением?
3. Что собой представляют посторонние электромагнитные процессы?
4. Что подразумевается под помехоустойчивостью?
5. Понятие сигнала связи, его характеристики.
6. Детерминированный сигнал полностью определен – что это значит?
7. Определение комплексной спектральной плотности или спектра сигнала.
8. Как найти ширину спектра сигнала?
9. Изобразите спектральную плотность прямоугольного импульса.
10. Какова роль отрицательных частот?
11. В чем требования получателя к ширине спектра телеграфного сигнала?
12. Какова полоса частот при передаче высококачественной музыки?
13. Импульсы какой длительности используются в радиолокации?
14. Спектр телевизионного сигнала.
15. Как отличаются помехи по своей форме?
16. Пояснить понятие «гладкая» помеха.
17. Из каких помех состоят аддитивные помехи?
18. Что такое белый шум?
19. Какие помехи считаются наиболее вредными?
20. В чем физическая суть замираний?
21. Быстрые и медленные замирания – пояснить разницу.
22. Интерференционные замирания.
23. Критерии помехоустойчивости.
24. Главные причины возникновения индустриальных помех.
25. Каковы источники непрерывных индустриальных помех?
26. Перечислить источники импульсных помех.
27. Особенности систем зажигания как источника помех.
28. Помехи от линий передач электроэнергии.
29. Помехи от электродвигателей.
30. Дуговые сварочные аппараты – источник помех.
31. Газоразрядные источники света.
32. Контактная сеть.
33. Источники электропитания, создающие помехи.
34. Явление электризации движущихся объектов.
35. Переменные механические нагрузки, помехи за счет пьезоэффекта.
36. Контактные помехи.

## Т е м а 5

### Проблемы совместимости в передающих и приемных устройствах

Различные виды излучений передатчика. Влияние помех на работу радиоприемников. Специфика помех - блокирование, перекрестные искажения и интермодуляция [1, 2, 10].

#### Контрольные вопросы

1. Охарактеризуйте две группы источников непреднамеренных помех.
2. Передатчики как источники электромагнитных помех.
3. Оборудование промышленных и подвижных объектов - источники токов и ЭДС.
4. Что называется необходимой полосой радиочастот сообщения ?
5. Основные излучения и нежелательные – дать определения.
6. В чем суть побочных и внеполосных излучений?
7. Роль радиоизлучения на гармонике.
8. Побочное радиоизлучение на субгармониках.
9. Пояснить суть паразитного радиоизлучения.
10. Комбинационное радиоизлучение как вид побочного.
11. Интермодуляционное радиоизлучение, его суть.
12. Четыре причины нежелательного внеполосного радиоизлучения.
13. Понятие полосы частот на уровне X, дБ.
14. Что такое контрольная полоса частот?
15. Что представляет собой шумовое излучение передающего устройства?
16. Источники шумовых излучений передатчика.
17. Понятие восприимчивости к полю для радиоприемников.
18. Параметры восприимчивости приемника.
19. Восприимчивость приемника по основному и побочным каналам приема.
20. Что называется избирательностью?
21. Какие виды избирательности существуют?
22. Что называют основным каналом приема?
23. В чем суть побочного канала?
24. Понятие зеркального канала.
25. От чего зависит избирательность основного и побочного каналов?
26. Что такое чувствительность приемника?
27. Перечислите три вида чувствительности.
28. Чем определяется коэффициент шума приемника?
29. В каких единицах измеряется восприимчивость побочных каналов?
30. В чем суть эффекта блокирования полезного сигнала?
31. Что называется полосой блокировки?
32. В чем природа перекрестных искажений?
33. Чем определяется коэффициент перекрестных искажений в приемнике?
34. Пояснить суть явления интермодуляции.
35. Где возникают интермодуляционные помехи?
36. Что собой представляет коэффициент интермодуляции?
37. Каким типам приемников присущи перекрестные искажения, блокирование и интермодуляция?

### Методические указания к выполнению контрольных заданий

По курсу предусмотрено выполнение контрольных заданий, которые состоят из трех задач. Все задачи в контрольных заданиях имеют десять вариантов. Студент должен взять вариант задания в соответствии с последней цифрой шифра. Без выполнения контрольных заданий студент к сдаче экзамена не допускается. Контрольные задания должны быть оформлены в соответствии с общими требованиями:

1. На обложке контрольного задания следует указать - фамилию, имя и отчество; шифр студенческого билета; номер контрольного задания и наименование дисциплины; адрес места жительства.
2. При выполнении каждой задачи необходимо записать общие условия – указать параметры из таблиц в соответствии с шифром.
3. Все буквенные обозначения следует пояснить.
4. Расчеты должны сопровождаться рисунками, когда необходимо.
5. Все формулы, рисунки и таблицы должны иметь сквозную нумерацию.
6. В конце работы должен быть приведен список литературы.

#### Задача № 1

Построить огибающую в переднем полупространстве (относительно изотропного излучателя) для апертурной антенны с круглым раскрывом как оценку влияния направленных свойств антенн на электромагнитную совместимость. Гарантированная огибающая бокового излучения для указанной антенны определяется формулой:

$$F(\Theta) = 52 - 10 \lg(d/\lambda) - 25 \lg \Theta, \text{ дБ},$$

где  $d$  – диаметр антенны,  $\Theta$  – угол в градусах.

Данное выражение справедливо при  $\Theta_1 \leq \Theta \leq \Theta_2$ , где  $\Theta_1 = 100 \lambda/d$ , а  $\Theta_2$  определяется из таблицы 1. При  $\Theta > \Theta_2$  величина  $F(\Theta) = 0$  дБ.

Таблица 1

Номер по порядку	$d$ , см	$\lambda$ , см	$\Theta_2$ , град
1	100	5	37
2	120	4	32
3	80	2	28
4	150	3	25
5	120	2	23
6	140	2	22
7	80	1	21
8	90	3	32
9	60	3	37
10	100	4	34

## Задача №2

Определить толщину  $d$  прямоугольного и цилиндрического однослойных экранов так, чтобы экран при заданных частоте и размере экрана обеспечивал необходимую эффективность экранирования. Здесь под размером экрана подразумевается величина  $D$  - расстояние между короткими вертикальными стенками прямоугольного экрана (его широкая стенка) или диаметр цилиндра. Прямоугольный экран имеет форму параллелепипеда и одной широкой стенкой лежит на металлической подложке, узкие стенки его перпендикулярны подложке. Цилиндр стоит вертикально на подложке.

При определении  $d$  расчет необходимо начать с определения величины  $\delta_c$  – глубины проникновения поля в данный металл (медь с  $\mu_a = 1,55$  и  $\sigma = 5,7 \cdot 10^7$  См/м)

$$\delta_c = (\pi \cdot f \cdot \mu_a \cdot \sigma)^{-1/2},$$

где значения частоты  $f$  выбираются из таблицы.

Далее производится расчет толщины экрана  $d$  по формуле

$$d = \delta_c \cdot [A_0 - \ln(D/(2 \cdot 2^{1/2} \cdot \mu_a \cdot m \cdot \delta_c))] \quad \text{для } d > \delta_c,$$

где  $m = 1$  для прямоугольных экранов и  $m = 2$  для цилиндрических экранов; значения эффективности экранирования  $A_0$  и величины  $D$  выбираются из таблицы 2.

Таблица 2

Номер по порядку	$f$ , ГГц	$A_0$ , дБ	$D$ , см
1	10	50	4
2	8	60	3
3	12	40	5
4	9	30	3
5	11	50	6
6	14	40	4
7	7	70	5
8	13	30	3
9	8	40	6
10	10	50	4



### Задача №3

Сравнить расчетные значения эффективности экранирования  $A_0$  двух экранов: прямоугольного, выполненного из ферромагнитного материала с  $\mu = 800$ , и цилиндрического, выполненного из меди.

Первый используется для экранирования низкочастотных магнитных полей и представляет собой параллелепипед с толстыми стенками (магнитопровод) и пустым объемом внутри (экранируемая область). Поперечное сечение магнитопровода обозначено  $S_1$ , а поперечное сечение экранируемой области -  $S_2$ . Обычно  $S_2 \gg S_1$ .

Второй, цилиндрический экран, используется для экранирования высокочастотных магнитных полей и представляет собой полый цилиндр с внутренним радиусом  $R$  и толщиной стенки образующей цилиндра  $d$ . Для меди  $\mu_a = 1,55$  и  $\sigma = 5,7 \cdot 10^7$  См/м.

Расчет  $A_0$  производить по следующим формулам:

$$A_0 = 20 \lg (1 + \mu \cdot S_1 / S_2) \quad \text{для прямоугольного экрана;}$$

$$A_0 = 10 \lg [1 + ((\omega \cdot \mu_a \cdot \sigma \cdot R \cdot d) / 2)^2] \quad \text{для цилиндрического экрана,}$$

где значения соответствующих параметров приводятся в таблице 3.

Таблица 3

Номер по порядку	$S_1 / S_2$	$f$ , ГГц	$R$ , см	$d$ , мм
1	0,08	4	2,5	0,1
2	0,10	6	3	0,15
3	0,07	5	2	0,2
4	0,09	7	3,5	0,25
5	0,085	3	4	0,3
6	0,075	8	4,5	0,2
7	0,095	2	3	0,1
8	0,105	9	4	0,15
9	0,06	1	2,5	0,25
10	0,065	10	2	0,3