

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Томский государственный университет
систем управления и радиоэлектроники

Комнатнов М.Е.

**ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ
ПРИЕМО-ПЕРЕДАЮЩИХ УСТРОЙСТВ**

Методические указания
по практическим, самостоятельным и лабораторным работам

Томск
2025

УДК 621.37

ББК 32.84

K63

Комнатнов Максим Евгеньевич

K63 Электромагнитная совместимость приемо-передающих устройств: методические указания по практическим, самостоятельным и лабораторным работам / сост. М.Е. Комнатнов. – Томск: Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2025 – 11 с.

Методические указания предназначены для выполнения практических, самостоятельных и лабораторных работ по дисциплине «Электромагнитная совместимость приемо-передающих устройств» при подготовке студентов технических направлений подготовки и специальностей. Также методические указания могут использоваться студентами других направлений и специальностей.

Одобрено на заседании каф. ТУ, протокол №3 от 13.02.2025

УДК 621.37
ББК 32.84

© Комнатнов М.Е., 2025

© Томск. гос. ун-т систем упр. и
радиоэлектроники, 2025

Оглавление

Введение.....	4
1 Программа дисциплины	5
1.1 Цели и задачи.....	5
1.2 Практические занятия.....	6
1.3 Лабораторные занятия	7
2 Методические указания по самостоятельной работе	9
3 Дополнительная литература.....	10
4 Перечень вопросов для зачета	11

Введение

Современные технические средства (ТС) очень сложны и могут содержать множество различных узлов, устройств и систем облегчающие жизнь человека. Как правило, для удаленного управления и передачи информации в ТС используются приемо-передающие устройства (ППУ), позволяющие, например, роботизированным системам, выполнить сложные работы в опасных или труднодоступных местах для человека, а также на больших глубинах в подводной акватории океана. В подобных условиях эксплуатации необходимо обеспечить не только проходимость, автономность движения и управления оборудованием робототехнического устройства, но и нормальную работу в заданной электромагнитной обстановке всех его радиотехнических блоков и узлов, отвечающих за прием и передачу сигналов управления и информации. При этом источников возбуждения электромагнитного излучения может быть множество от сильноточных ключей коммутации до различных преобразователей электроэнергии, а одна или несколько антенн для приема и передачи сигналов информации и управления могут находиться в непосредственной близости к ним и узлам ППУ. В результате роботизированная система может быть подвержена интенсивным внешним климатическим, а также искусственным и естественным электромагнитным воздействиям, что в отсутствие защиты может вызвать сбой, вывести критичный узел или систему из строя. Поэтому важно на этапе проектирования различных ППУ обеспечить их электромагнитную совместимость (ЭМС).

Дисциплина «Электромагнитная совместимость приемо-передающих устройств» охватывает широкий круг задач, связанный с терминологией, параметрами и характеристиками, а также методами обеспечения ЭМС ППУ, в т.ч. с оценкой качества функционирования ППУ при обеспечении ЭМС. Дисциплина также включает изучения научных основ в области исследования и проектирования ППУ направленных на развитие инженерной мысли, приобретения навыков оценки новизны и перспективности научно-технических разработок с учетом требований ЭМС.

1 Программа дисциплины

1.1 Цели и задачи

Целью дисциплины является освоение студентами теоретических и практических основ обеспечения электромагнитной совместимости (ЭМС) приемо-передающих устройств (ППУ).

Задачи дисциплины:

1. Знакомство студентов с терминологией ЭМС ППУ.
2. Изучение студентами параметров и характеристик ЭМС узлов ППУ.
3. Изучение студентами методов обеспечения ЭМС ППУ.
4. Формирование умений анализировать качество функционирования ППУ при обеспечении ЭМС.

Изучение дисциплины направлено на формирование у студентов:

- знания методов обеспечения ЭМС ППУ при передаче, обработке и приеме информации по каналу связи;
- умения исследовать методы обеспечения ЭМС ППУ при передаче, обработке и приеме информации по каналу связи;
- владения методами обеспечения ЭМС ППУ при передаче, обработке и приеме информации по каналу связи.

Знания, умения и навыки владения у студентов формируются при изучении разделов дисциплины, включающие:

1. Терминология при обеспечении ЭМС ППУ.
2. Параметры и характеристики электромагнитного излучения и восприимчивости ППУ.
3. Методы ослабления электромагнитных помех ППУ.
4. Оценка качества функционирования ППУ при обеспечении ЭМС.

Разделы, включают лекционные занятия:

1. Термины и определения ЭМС ППУ.
 - 1.1 Определения, параметры и характеристики ЭМС ППУ.
 - 1.2 Классификация электромагнитных помех ППУ.
2. Параметры и характеристики электромагнитного излучения и восприимчивости к воздействию электромагнитных помех ППУ.
 - 2.1 Антенно-фидерные устройства и СВЧ-тракты.
 - 2.2 Электромагнитное излучение радиопередающих устройств.
 - 2.3 Восприимчивость радиоприемных устройств к воздействию электромагнитных помех.
3. Методы ослабления электромагнитных помех ППУ.
 - 3.1 Схемотехнические методы. Электрические фильтры.
 - 3.2 Конструкторские методы. Экранирование.
4. Оценка качества функционирования ППУ при обеспечении ЭМС.
 - 4.1 Комплексная оценка электромагнитной эмиссии и восприимчивости к помехам ППУ.
 - 4.2 Комплексное ослабление кондуктивных и излучаемых помех ППУ, используя вычислительные средства для обеспечения ЭМС.

4.3 Методы испытаний ППУ на помехоэмиссию и восприимчивость к воздействию электромагнитных помех.

1.2 Практические занятия

Практические занятия посвящены решению задач в области ЭМС с ориентацией на ППУ. Для знакомства с тематическими направлениями предусмотрена демонстрация методов, средств измерений, специализированных устройств для испытания на ЭМС, а также ППУ в интегральном исполнении. Практические занятия включают следующие темы:

1. Анализ естественных и искусственных электромагнитных помех.

Изучение математических моделей различного вида естественных и искусственных электромагнитных помех, оказывающих влияние на прием и передачу полезного сигнала в зависимости от диапазона частот, а также источников и приемников электромагнитного излучения. Акцентируется внимание на индустриальных радиопомехах, а также воздействии электростатического разряда.

2. Анализ потерь в радиолинии и линиях передачи.

Приводится анализ потерь в свободном пространстве, а также в цепях согласования, антенно-фидерном устройстве и прочих узлах ППУ, включая СВЧ-устройства и антенны.

3. Оценка излучения элементов и узлов радиопередающего устройства.

Изучается электромагнитное излучение от активных компонентов ППУ возникающих вследствие нелинейных эффектов и комбинационных составляющих. Приводятся требования, уровни и методы измерения побочных колебаний выходных каскадов радиопередающих устройств и приборов СВЧ.

4. Оценка чувствительности входного тракта и восприимчивости узлов радиоприемного устройства к воздействию электромагнитной помехи.

Изучаются чувствительность и избирательность радиоприемного устройства, а также блокирование, интермодуляционные и перекрестные помех радиоприемного устройства.

5. Анализ и подходы к проектированию электрических фильтров для сигнальных и питающих цепей ППУ.

Изучаются подходы к проектированию электрических фильтров для сигнальных и питающих цепей ППУ, а также схемы измерения вносимого затухания отдельными компонентами, пассивными помехоподавляющими фильтрами и элементами СВЧ-тракта.

6. Оценка эффективности экранирования корпуса и подходы к их проектированию для узлов ППУ.

Изучаются аналитические модели для вычисления эффективности экранирования плоских и объемных электромагнитных экранов. Оценивается эффективность экранирования корпуса, и изучаются подходы к проектированию электромагнитных экранов для узлов ППУ. Обсуждаются аналитические модели для вычисления эффективности экранирования плоских и объемных электромагнитных экранов.

7. Анализ параметров ЭМС ППУ в соответствие с действующими стандартами.

Изучаются методы измерений и контроля параметров в соответствие с действующими стандартами в области ЭМС. Акцентируется внимание на требованиях по допустимому отклонению частоты радиопередающих устройств. Изучаются нормы и методы измерений индустриальных радиопомех от радиоприемников.

8. Учет параметров и характеристик ЭМС при проектировании ППУ.

Изучается комплексная оценка параметров и характеристик ЭМС на различных этапах проектирования ППУ.

1.3 Лабораторные занятия

Лабораторные занятия проводятся в лаборатории оснащенной специализированными устройствами и измерительными приборами применяемые при измерениях и испытаниях на ЭМС. При выполнении измерений и обработке результатов используется персональный компьютер с базовым и специализированным программным обеспечением (ПО). Специализированное ПО «EMtest» предназначено для автоматизированных измерений испытаний параметров и характеристик ЭМС различных технических средств. Лабораторные занятия включают следующие темы:

1. Моделирование электромагнитных помех в СВЧ-тракте.

Задаются параметры электромагнитной помехи и полезного сигнала. Оцениваются во временной и частотной областях, изменения формы и амплитуды полезного сигнала при изменении формы, амплитуды помехи, а также используя вносимое затухание различных электрических фильтров.

2. Моделирование воздействия электромагнитных помех на ППУ.

Изучаются методы и средства моделирования, используемые при проектировании ППУ с учетом требований ЭМС. Оцениваются с использованием вычислительного эксперимента уровни кондуктивной и излучаемой электромагнитной эмиссии и восприимчивости к воздействию электромагнитной помехи ППУ.

3. Оценка электромагнитного излучения интегральной схемы ППУ в ТЕМ-камере.

Исследуется метод измерения электромагнитной эмиссии от ППУ находящейся на измерительной плате в апертуре ТЕМ-камеры. При исследовании используется установка, состоящая из спектрального анализатора, ТЕМ-камеры, согласованной нагрузки и измерительной печатной платы с расположенной на ней ППУ. Измеряется спектральным анализатором на входе ТЕМ-камеры с платой ППУ напряжение, при разных режимах его работы. Напряжение, в дальнейшем пересчитывается в уровень электромагнитной эмиссии и сравнивается с требуемым уровнем.

4. Оценка восприимчивости интегральной схемы ППУ в ТЕМ-камере.

Исследуется метод измерения восприимчивости к воздействию электромагнитной помехи на ППУ находящейся на измерительной плате в

апертуре TEM-камеры. При исследовании используется установка, состоящая из спектрального анализатора, осциллографа, генератора сигналов, усилителя мощности, направленного ответвителя, TEM-камеры, согласованной нагрузки и измерительной печатной платы, с расположенной на ней ППУ. Измеряются осциллографом и спектральным анализатором амплитуды помех, наводимых от TEM-камеры на ППУ, при разных режимах его работы. Оценивается уровень устойчивости ППУ и сравнивается с требуемым уровнем воздействия, устанавливается степень восприимчивости ППУ к воздействию электромагнитной помехи.

5. Исследование ППУ с учетом требований ЭМС.

Используются разные виды электромагнитных экранов и фильтров при оценке электромагнитной эмиссии и восприимчивости к воздействию электромагнитной помехи на ППУ.

2 Методические указания по самостоятельной работе

Самостоятельная работа студента включает работу с учебными материалами, выполнение контрольных мероприятий, предусмотренных учебным планом. В процессе изучения дисциплины для лучшего освоения материала необходимо регулярно обращаться к рекомендуемой литературе и источникам, указанным в учебных материалах; пользоваться через кабинет студента на сайте Университета образовательными ресурсами электронно-библиотечной системы, а также общедоступными интернет-порталами, содержащими научно-популярные и специализированные материалы, посвященные различным аспектам проектирования ППУ с учетом требований ЭМС.

Цели самостоятельной работы:

1. Углубление знаний в области ЭМС для проектирования ППУ.
2. Формирование критического мышления и способности к самостоятельному поиску информации.
3. Подготовка к практическим занятиям, лабораторным работам и аттестации.

Виды самостоятельной работы студентов:

1. Проработка лекционного материала – это важный этап в обучении, помогающий усвоить и закрепить знания. Рекомендации по работе с лекциями:
предварительное ознакомление с темой лекции, составление вопросов по теме, что поможет сосредоточиться на важных моментах;
в течение 24 часов после лекции пересмотрите свои записи и дополните их, чтобы закрепить материал, систематизируйте информацию, выделив ключевые моменты и акцентируя на них внимание.

2. Подготовка к практическим занятиям и лабораторным работам. При подготовке к практическим занятиям и лабораторным работам необходимо повторить пройденный материал, выполнить задание, выданное преподавателем, используя материалы лекций и учебно-методического пособия, ознакомиться с темой следующего занятия.

3. Самостоятельное изучение дополнительной литературы.

При самостоятельном изучении литературы следуйте рекомендациям:

- чтение или просмотр материала осуществляйте со скоростью, достаточной для индивидуального понимания и освоения материала, выделяя основные идеи; на основании изученного составить тезисы. Освоив материал, попытайтесь соотнести теорию с примерами из практики;
- если в тексте встречаются незнакомые или малознакомые термины, следует выяснить их значение для понимания дальнейшего материала;
- осмысливайте прочитанное и изученное, отвечайте на предложенные вопросы.

При необходимости студенты могут задать интересующие вопросы преподавателю во время консультаций, с использованием средств телекоммуникаций.

3 Дополнительная литература

1. Основы электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств: Учебное пособие [Электронный ресурс] / Т.Р. Газизов. – Томск: ТУСУР, 2022. – 138 с. – Режим доступа: <https://edu.tusur.ru/publications/10461> (дата обращения: 05.02.2025).
2. Радиоприемные устройства: Учебник [Электронный ресурс] / В.П. Пушкарёв. – Томск: ТУСУР, 2019. – 226 с. – Режим доступа: <https://edu.tusur.ru/publications/9325> (дата обращения: 05.02.2025).
3. Заболоцкий, А. М. Электромагнитная совместимость: преднамеренные силовые электромагнитные воздействия: Учебное пособие [Электронный ресурс] / А.М. Заболоцкий, Т.Р. Газизов, С.П. Куксенко. – Томск: ТУСУР, 2018. – 114 с. – Режим доступа: <https://edu.tusur.ru/publications/8163> (дата обращения: 05.02.2025).
4. Табаков Д.П. Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств (ЭМС РЭС): учебно-методическое пособие / Д.П. Табаков, Ю.В. Соколова. – Самара: ПГУТИ, 2020. – 46 с. [Электронный ресурс]: Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/255605> (дата обращения: 05.02.2025).
6. Мелихов С.В. Оценка чувствительности радиоприёмных устройств: учебное пособие / С.В. Мелихов. – Москва: ТУСУР, 2018. – 99 с. [Электронный ресурс]: Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/313559> (дата обращения: 05.02.2025).

4 Перечень вопросов для зачета

1. Классифицируйте пути возникновения, определите виды и источники формирования электромагнитных помех;
2. Изобразите основные формы и опишите параметры электромагнитных помех временной и частотной областях;
3. Перечислите не менее 10 основных понятий, используемых при обеспечении ЭМС ППУ;
4. Перечислите методы измерения излучаемых электромагнитных помех радиопередающего устройства;
5. Перечислите методы измерения восприимчивости к воздействию излучаемой электромагнитной помехи радиоприемного устройства;
6. Раскройте основные характеристики источников электромагнитных помех в радиодиапазоне;
7. Опишите возможные виды электромагнитных помех, создаваемых интегральными схемами ППУ;
8. Опишите методы анализа электромагнитных помех, излучаемых мощными выходными каскадами радиопередающих устройств.
9. Перечислите методы измерения излучаемых электромагнитных помех интегральных схем ППУ;
10. Перечислите методы и основные принципы измерения побочных колебаний выходных каскадов СВЧ устройств;
11. Перечислите известные методы для аналитического вычисления эффективности электромагнитного экранирования корпусом;
12. Изобразите не менее 3 схем измерения вносимого затухания помехоподавляющим фильтром;
13. Какие модели используются при оценке устойчивости интегральных схем к воздействию электростатических разрядов;
14. Обеспечение электромагнитной совместимости в проводных системах связи;
15. Опишите электромагнитную связь между источником и рецептором электромагнитного излучения;
16. Перечислите существующие нормы и стандарты ЭМС для ППУ.